



ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών  
«Ολοκληρωμένη Ανάπτυξη και Διαχείριση του Αγροτικού Χώρου»

**Μια βιο-οικονομική προσέγγιση στην κατασκευή  
υποδειγμάτων προγραμματισμού  
δραστηριοτήτων των γεωργικών  
εκμεταλλεύσεων:**

Εφαρμογή ανάλυσης πολιτικής στον τομέα των  
αροτραίων καλλιεργειών

**Διδακτορική Διατριβή**

Αθανάσιος Πετσάκος

**Επιβλέπων Καθηγητής: Στυλιανός Ροζάκης**

Αθήνα 2012



**ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ**

**Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών  
«Ολοκληρωμένη Ανάπτυξη και Διαχείριση του Αγροτικού Χώρου»**

## **ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

**Αθανάσιος Πετσάκος**

**« Μία βιο-οικονομική προσέγγιση στην κατασκευή  
υποδειγμάτων προγραμματισμού δραστηριοτήτων των  
γεωργικών εκμεταλλεύσεων. Εφαρμογή ανάλυσης πολιτικής  
στον τομέα των αροτραίων καλλιεργειών »**

**Επιβλέπων Καθηγητής  
Στυλιανός Ροζάκης**

**Αθήνα, 2012**



## ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Αθανάσιος Πετσάκος

« Μία βιο-οικονομική προσέγγιση στην κατασκευή υποδειγμάτων προγραμματισμού δραστηριοτήτων των γεωργικών εκμεταλλεύσεων. Εφαρμογή ανάλυσης πολιτικής στον τομέα των αροτραίων καλλιεργειών »

### **Τριμελής συμβουλευτική επιτροπή**

Στυλιανός Ροζάκης

Κωνσταντίνος Τσιμπούκας

Νικόλαος Δαναλάτος

### **Εξεταστική επιτροπή**

Νικόλαος Δέρκας

Αθανάσιος Καμπάς

Βασίλειος Μάνος

Αναστάσιος Ξεπαπαδέας



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι ιδιαιτερότητες του γεωργικού τομέα και η πολυπλοκότητα των σχέσεων μεταξύ των οικονομικών, βιο-φυσικών και περιβαλλοντικών συνιστωσών της γεωργικής δραστηριότητας, έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη μιας κατηγορίας οικονομικών υποδειγμάτων που ονομάζονται *βιο-οικονομικά*. Στόχος της παρούσας διατριβής είναι η παρουσίαση μιας ολοκληρωμένης προσέγγισης βιο-οικονομικής ανάλυσης σε επίπεδο εκμετάλλευσης για αναλύσεις πολιτικής στο γεωργικό τομέα. Η προτεινόμενη προσέγγιση στηρίζεται στη χρήση ενός υποδείγματος Θετικού Μαθηματικού Προγραμματισμού (ΘΜΠ), σε συνδυασμό με συναρτήσεις απόδοσης-νερού που προκύπτουν από τα αποτελέσματα ενός *ad hoc* βιο-φυσικού υποδείγματος για διαφορετικές εδαφοκλιματικές συνθήκες και ποσότητες νερού άρδευσης. Ειδικότερα, παρουσιάζεται μια νέα μορφή ΘΜΠ που στηρίζεται στη θεωρία της προσδοκώμενης χρησιμότητας και συνεπώς λαμβάνεται ρητά υπόψη ο οικονομικός κίνδυνος που αντιμετωπίζει ο παραγωγός εξαιτίας των διακυμάνσεων των αποδόσεων και των τιμών των προϊόντων. Η προτεινόμενη βιο-οικονομική μέθοδος εφαρμόστηκε στην περιοχή της Καρδίτσας σε δείγμα καπνοπαραγωγικών εκμεταλλεύσεων, προκειμένου, αφενός να διαπιστωθεί η αξιοπιστία και η προβλεπτική ικανότητα του υποδείγματος και αφετέρου να αναλυθεί ο βαθμός της συνέργειας/συμπληρωματικότητας, ή αντίθεσης μεταξύ των συνεχών μεταρρυθμίσεων της Κοινής Αγροτικής Πολιτικής (ΚΑΠ) και της Οδηγίας Πλαίσιο για το Νερό (ΟΠΝ) σε σχέση με την εξοικονόμηση νερού άρδευσης σε διάφορα πιθανά σενάρια τιμολόγησης νερού. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης δείχνουν πως η ΚΑΠ πιθανώς να αποτελέσει τροχοπέδη στους στόχους της ΟΠΝ για ορθολογικότερη διαχείριση των υδάτων, αν η τιμή του νερού άρδευσης περιοριστεί σε επίπεδα μικρότερα των 0.04€/m<sup>3</sup>. Επίσης, οι συνδεδεμένες ενισχύσεις του βαμβακιού προκαλούν σημαντική στρέβλωση του «σήματος των τιμών» που λαμβάνουν οι παραγωγοί, με αποτέλεσμα να ευνοείται η εξάπλωση της καλλιέργειας εις βάρος των υπολοίπων αρδευομένων καλλιεργειών. Τέλος, η περιφερειοποίηση δεν οδηγεί σε εξοικονόμηση νερού άρδευσης, ενώ εμφανίζει μειωμένη οικονομική αποδοτικότητα λόγω της απώλειας ενός σταθερού και βέβαιου εισοδήματος, γεγονός που πιθανώς να οδηγήσει τους παραγωγούς σε καλλιεργητικές επιλογές που μειώνουν την έκθεση τους στον οικονομικό κίνδυνο.

**Επιστημονική περιοχή:** Γεωργική οικονομική

**Λέξεις κλειδιά:** Βιο-οικονομικό υπόδειγμα, συναρτήσεις απόδοσης-νερού, Θετικός Μαθηματικός Προγραμματισμός, οικονομικός κίνδυνος.





**TITLE:** A bio-economic approach to building farm activity programming models: An application of policy analysis in the sector of arable crops

## **ABSTRACT**

The specificities of the agricultural sector and the relational complexity between economic, bio-physical and environmental factors that define agricultural production have lead to the development of a type of economic models, called *bio-economic* models. The goal of this dissertation is to present an integrated framework of bio-economic analysis at the farm level which can be used for the assessment of different policy options in the agricultural sector. The methodology developed in this dissertation is based on the coupling of a Positive Mathematical Programming (PMP) model with empirical yield-water response functions which are estimated from an *ad hoc* bio-physical model that runs for different soil and climatic conditions and irrigation water availability. More specifically, an alternative specification of PMP models is presented so that the risk which farmers face, because of the variability of crop yields and prices, is explicitly considered. The proposed bio-economic approach is implemented in a case study based on a sample of ex-tobacco producing farms from the region of Karditsa, in order to test the validity and analytical capacity of the model, as well as to examine the degree of synergy or contradiction between the Water Framework Directive (WFD) and the latest reforms of the Common Agricultural Policy (CAP), with respect to water saving under different water pricing scenarios. Results indicate that the CAP may contradict the goals of the WFD concerning sustainable water use when water prices are below 0.04€/m<sup>3</sup>. Furthermore, coupled payments for cotton produce a distorted price signal that favors the expansion of the land allocated to the crop. Finally, flatter (lower) decoupled payments have no significant effect on water saving, yet they result in lower economic efficiency because the reduction of the non stochastic part of farmer's income will eventually lead them to production choices that reduce downside risk.

**Discipline:** Agricultural Economics

**Keywords:** Bio-economic model, water-yield response function, Positive Mathematical Programming, economic risk.



## Ευχαριστίες

Οφείλω να εκφράσω τις πιο θερμές μου ευχαριστίες σε όσους συνέβαλαν με κάθε τρόπο στην ολοκλήρωση και συγγραφή της διδακτορικής μου διατριβής. Καταρχήν στο Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών που με τη χρηματική του στήριξη βοήθησε στην περάτωση της διατριβής.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα τρία μέλη της συμβουλευτικής επιτροπής, συγκεκριμένα τον εισηγητή μου, κύριο Στέλιο Ροζάκη, για την ανάθεση της μελέτης και την επιστημονική καθοδήγηση, τον κύριο Νίκο Δαναλάτο για την καθοδήγηση του σε όλα τα γεωπονικά αντικείμενα της διατριβής, και τέλος τον κύριο Κώστα Τσιμπούκα για τις συμβουλές και τις επισημάνσεις του σε θέματα που αφορούν στην εμπειρική εφαρμογή που παρουσιάζεται στη διατριβή.

Θα ήθελα ακόμα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον κύριο Pierre-Alain Jayet από το ερευνητικό κέντρο του INRA στο Grignon της Γαλλίας για την εμπιστοσύνη του και την ευκαιρία που μου προσέφερε να εργαστώ σε ένα βιο-οικονομικό ερευνητικό αντικείμενο, εμπειρία η οποία αποτέλεσε την πηγή πολλών ιδεών που αναπτύσσονται στην παρούσα διατριβή.

Οφείλω επίσης να ευχαριστήσω τους κυρίους Θανάση Καμπά και Νίκο Δέρκα που με τις υποδείξεις και τις διορθώσεις τους συνέβαλλαν στη διαμόρφωση του τελικού κειμένου.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τη μητέρα μου και την αδελφή μου για την ατελείωτη υπομονή τους και την υποστήριξη τους κατά τη συγγραφή της διατριβής.



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>1</b>
<b>1 ΒΙΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΥΠΟΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΕΩΝ.....</b>	<b>9</b>
1.1 Εισαγωγή .....	9
1.2 Ο μαθηματικός προγραμματισμός σε βιο-οικονομικά υποδείγματα.....	12
1.3 Γραμμικός προγραμματισμός.....	14
1.4 Προεκτάσεις του γραμμικού προγραμματισμού.....	16
1.4.1 Πολλαπλά κριτήρια .....	16
1.4.2 Οικονομικός κίνδυνος.....	17
1.4.3 Λοιπές μη γραμμικές εξειδικεύσεις.....	20
1.4.4 Δυναμικά υποδείγματα προγραμματισμού .....	21
1.5 Βιο-φυσικά υποδείγματα καλλιέργειών .....	22
1.5.1 Γενικά χαρακτηριστικά βιο-φυσικών υποδειγμάτων .....	22
1.5.2 Μηχανές αύξησης.....	25
1.6 Σύνδεση οικονομικών και βιο-φυσικών υποδειγμάτων και παραδείγματα βιο-οικονομικών αναλύσεων.....	28
<b>2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ ΒΙΟ-ΦΥΣΙΚΟΥ ΥΠΟΔΕΙΓΜΑΤΟΣ .....</b>	<b>35</b>
2.1 Εισαγωγή .....	35
2.2 Δυναμική εξατμισοδιαπνοή και εξατμισοδιαπνοή αναφοράς.....	36
2.3 Υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς.....	42
2.3.1 Ροές ενέργειας.....	42
2.3.2 Οι υδρατμοί της ατμόσφαιρας.....	45
2.3.3 Υπολογισμός της <i>ETo</i> με ελλιπή κλιματικά δεδομένα .....	47
2.4 Εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας.....	48
2.5 Υπολογισμός του μονού φυτικού συντελεστή κατά στάδιο ανάπτυξης.....	50
2.5.1 Γενικά.....	50
2.5.2 Φυτικός συντελεστής αρχικού σταδίου .....	52
2.5.3 Φυτικοί συντελεστές υπολοίπων σταδίων .....	55
2.6 Πραγματική εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας .....	56
2.7 Υπολογισμός της τελικής απόδοσης της καλλιέργειας .....	61
2.7.1 Εμπειρικές συναρτήσεις απόδοσης.....	61
2.7.2 Εναλλακτική τετραγωνική συνάρτηση .....	64
2.7.3 Η μέγιστη απόδοση της καλλιέργειας .....	65
<b>3 ΡΥΘΜΙΣΗ ΥΠΟΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ ....</b>	<b>71</b>
3.1 Εισαγωγή .....	71

3.2	Ανάλυση της μεθόδου ΘΜΠ .....	73
3.3	Τρόποι εκτίμησης της μη γραμμικής αντικειμενικής συνάρτησης.....	78
3.3.1	Διαγώνιος πίνακας Q .....	78
3.3.2	Πλήρως ορισμένος πίνακας Q .....	80
3.4	Κριτική της μεθόδου ΘΜΠ.....	84
3.5	Οικονομικά υποδείγματα αβεβαιότητας και κινδύνου .....	90
3.5.1	Εισαγωγή.....	90
3.5.2	Η υπόθεση της προσδοκώμενης χρησιμότητας .....	91
3.5.3	Το κριτήριο E-V στην ανάλυση του οικονομικού κινδύνου .....	97
3.5.4	Συμβατότητα E-V και E-U.....	101
3.6	Ρύθμιση υποδειγμάτων προγραμματισμού και οικονομικός κίνδυνος.....	108
3.7	Ενσωμάτωση του οικονομικού κινδύνου σε υποδείγματα ΘΜΠ .....	110
3.7.1	Εισαγωγή.....	110
3.7.2	Προβλήματα ρύθμισης υποδειγμάτων οικονομικού κινδύνου.....	113
3.7.3	Η ρύθμιση ενός υποδείγματος οικονομικού κινδύνου .....	114
3.8	Επέκταση του ΘΜΠ σε μη παρατηρούμενες δραστηριότητες .....	121
<b>4</b>	<b>ΕΞΕΙΔΙΚΕΥΣΗ ΤΟΥ ΒΙΟ-ΦΥΣΙΚΟΥ ΥΠΟΔΕΙΓΜΑΤΟΣ .....</b>	<b>123</b>
4.1	Εισαγωγή .....	123
4.2	Βλαστικές περίοδοι.....	124
4.3	Εδαφοκλιματικά δεδομένα.....	127
4.4	Το μέγιστο βάθος του ριζοστρώματος.....	130
4.5	Υπολογισμός των φυτικών συντελεστών.....	136
4.6	Η μέγιστη απόδοση των καλλιεργειών .....	137
4.7	Η προσομοίωση της ανάπτυξης των καλλιεργειών.....	138
4.7.1	Προγραμματισμός αρδεύσεων .....	138
4.7.2	Η άσκηση προσομοίωσης.....	140
4.8	Εκτίμηση συναρτήσεων απόδοσης.....	142
4.8.1	Γενικά.....	142
4.8.2	Αποτελέσματα.....	146
<b>5</b>	<b>ΕΞΕΙΔΙΚΕΥΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΟΥ ΒΙΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟΥ ΥΠΟΔΕΙΓΜΑΤΟΣ .....</b>	<b>149</b>
5.1	Εισαγωγή .....	149
5.2	Τεχνικοοικονομικά δεδομένα εκμεταλλεύσεων .....	152
5.3	Κατασκευή του βιο-οικονομικού υποδείγματος .....	154
5.3.1	Εισαγωγή.....	154
5.3.2	Αντικειμενική συνάρτηση.....	155

5.4	Οι περιορισμοί του υποδείγματος .....	162
5.4.1	Τεχνικοί περιορισμοί .....	162
5.4.2	Αγρονομικοί περιορισμοί.....	166
5.4.3	Θεσμικοί περιορισμοί και περιορισμοί αγοράς .....	167
5.5	Η ρύθμιση του υποδείγματος.....	169
5.6	Ενσωμάτωση των συναρτήσεων απόδοσης.....	174
5.6.1	Μετασχηματισμοί αντικειμενικής συνάρτησης και περιορισμών.....	174
5.6.2	Έλεγχος αξιοπιστίας.....	176
5.7	Σενάρια πολιτικής και τιμολόγησης νερού.....	177
5.8	Αποτελέσματα .....	180
5.8.1	Αρδευόμενες εκτάσεις.....	180
5.8.2	Αποδόσεις αρδευομένων καλλιεργειών .....	184
5.8.3	Συνολική ζήτηση νερού .....	186
5.8.4	Ακαθάριστο κέρδος εκμεταλλεύσεων και αποδοτικότητα εξοικονόμησης νερού άρδευσης .....	188
5.9	Συμπεράσματα.....	191
<b>6</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ.....</b>	<b>193</b>
	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>199</b>
	Ξένη .....	199
	Ελληνική.....	213
	<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α΄: ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ.....</b>	<b>215</b>
	Βαμβάκι .....	215
	Αραβόσιτος .....	216
	Καπνός .....	217
	Σιτάρι.....	218
	Μηδική (συνολικά 5 κοπές) .....	219
	Μηδική (1 <sup>η</sup> κοπή).....	220
	Μηδική (2 <sup>η</sup> κοπή).....	221
	Μηδική (3 <sup>η</sup> κοπή).....	222
	Μηδική (4 <sup>η</sup> κοπή).....	223
	Μηδική (5 <sup>η</sup> κοπή).....	224
	<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β΄: ΣΥΜΒΟΛΑ ΚΑΙ ΜΟΝΑΔΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 2.....</b>	<b>225</b>





# Εισαγωγή

---

Τα τελευταία χρόνια, και ιδιαίτερα μετά την ενδιάμεση αναθεώρηση του 2003, παρατηρείται μια μετατόπιση του επίκεντρου του ενδιαφέροντος της Κοινής Αγροτικής Πολιτικής (ΚΑΠ) της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ), από τη στήριξη των αγορών των γεωργικών προϊόντων στη προώθηση του πολυλειτουργικού χαρακτήρα της γεωργίας, ο οποίος συνίσταται στην ταυτόχρονη επίτευξη πολλαπλών στόχων (οικονομικών, περιβαλλοντικών και κοινωνικών) στα πλαίσια της βιώσιμης ανάπτυξης του αγροτικού χώρου. Αυτή η ολοκληρωμένη προσέγγιση εκφράζεται από την πολιτική της αγροτικής ανάπτυξης της ΕΕ που καθιστά την ΚΑΠ άρρηκτα συνδεδεμένη με τους υπόλοιπους τομείς της οικονομικής δραστηριότητας και με το περιβάλλον, το οποίο αποτελεί την πηγή των σημαντικότερων εισροών για την παραγωγική διαδικασία στη γεωργία (νερό, έδαφος).

Παρά την έμφαση σε μέτρα που προωθούν την αγροτική ανάπτυξη μέσω δραστηριοτήτων συμπληρωματικών προς τη γεωργία (π.χ. αγροτουρισμός), η τελευταία παραμένει η κυρίαρχη δραστηριότητα στον αγροτικό χώρο. Η γεωργική δραστηριότητα αποτελεί έναν ιδιαίτερο τομέα της οικονομίας, αφού η σχέση μεταξύ της έντασης χρήσης των παραγωγικών συντελεστών και της τελικής παραγόμενης ποσότητας δεν είναι σταθερή και προκαθορισμένη, αλλά εξαρτάται από διάφορους εξωγενείς παράγοντες που συνήθως είναι αδύνατο να προβλεφθούν με ακρίβεια ή/και να ελεγχθούν με επιτυχία (Hardaker *et al.*, 2004). Για παράδειγμα, ασθένειες και εχθροί της καλλιέργειας μπορούν να οδηγήσουν σε πλήρη καταστροφή της παραγωγής, ενώ οι εδαφοκλιματικές συνθήκες που επικρατούν κατά τη βλαστική περίοδο επηρεάζουν τόσο την απόδοση της καλλιέργειας όσο και τη χρήση φυσικών συντελεστών, η προέλευση και διαθεσιμότητα των οποίων βασίζεται στα φυσικά και βιολογικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα σε κάθε οικοσύστημα (π.χ. κύκλος του νερού και του αζώτου).

Επιπλέον, η γεωργική δραστηριότητα συνοδεύεται συνήθως από αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όπως είναι η εξάντληση των υπογείων υδροφόρων οριζόντων εξαιτίας της υπεράντλησης σε μεγάλα βάθη, η μείωση της βιοποικιλότητας λόγω των εντατικών συστημάτων μονοκαλλιέργειας και η υποβάθμιση της γονιμότητας των εδαφών και της ποιότητας των υδάτων από την αλόγιστη χρήση λιπασμάτων και προϊόντων φυτοπροστασίας, η οποία ταυτόχρονα υπονομεύει και την ασφάλεια των τροφίμων (Δαμιανός κ.α., 2006). Το συνεχώς αυξανόμενο ενδιαφέρον που παρουσιάζεται για ζητήματα περιβάλλοντος αποτελεί πλέον τη σημαντικότερη αφορμή για παρεμβάσεις στο υφιστάμενο πλαίσιο πολιτικής, οι οποίες θα επηρεάσουν σημαντικά τη διάρθρωση της παραγωγής και το γεωργικό εισόδημα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η

οδηγία πλαίσιο για το νερό (2000/60/EC) η οποία επιδιώκει την ανάκτηση του πλήρους κόστους χρήσης του νερού άρδευσης, αποσκοπώντας στη βελτίωση της ποιότητας των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων. Ένα από τα μέτρα πολιτικής που προτείνονται για το σκοπό αυτό είναι η τιμολόγηση του νερού, που όταν εφαρμοστεί αναμένεται να μεταβάλλει σημαντικά την ένταση χρήσης του πόρου και να έχει επιπτώσεις στη διάρθρωση των καλλιεργειών στις περιοχές εφαρμογής (Kampas *et al.*, 2010). Ανάλογες επιπτώσεις αναμένεται να έχουν και άλλα οικονομικά μέτρα περιβαλλοντικής πολιτικής, όπως για παράδειγμα εκείνα που προτείνονται για τη μείωση της νιτροϋπανσης σε άλλες περιοχές της Ευρώπης, όπως φόροι αζώτου στη λεκάνη του Σηκουάνα στη Γαλλία (Jayet & Petsakos, 2010) ή/και στρεμματικοί φόροι σε καλλιέργειες στην Ελβετία (Goetz *et al.*, 2006).

Οι παραπάνω ιδιαιτερότητες του γεωργικού τομέα και η πολυπλοκότητα των σχέσεων μεταξύ των οικονομικών, βιο-φυσικών και περιβαλλοντικών συνιστωσών της γεωργικής δραστηριότητας, έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη μιας κατηγορίας οικονομικών υποδειγμάτων που ονομάζονται *βιο-οικονομικά*. Η δομή των βιο-οικονομικών υποδειγμάτων περιλαμβάνει τόσο διατυπώσεις στηριζόμενες στην οικονομική θεωρία, όσο και σχέσεις που περιγράφουν τις βιο-φυσικές διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα κατά την ανάπτυξη των φυτών και επηρεάζουν τη γεωργική παραγωγή και το μέγεθος των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η ποσοτική έκφραση των φυσικών και βιολογικών διαδικασιών από τις οποίες εξαρτάται η απόδοση των καλλιεργειών, σε συνδυασμό με τη γνώση των εναλλακτικών παραγωγικών επιλογών και των αντίστοιχων τεχνολογιών που έχει στη διάθεση του ένας γεωργός, επιτρέπει την ενσωμάτωση στοιχείων της γεωπονικής και της οικονομικής επιστήμης σε ένα ολοκληρωμένο μεθοδολογικό πλαίσιο για τη διαμόρφωση αιμοφορικών επιλογών στη χρήση της γης και των φυσικών πόρων (Ruben *et al.*, 1998). Έτσι, το βασικό πλεονέκτημα ενός βιο-οικονομικού υποδείγματος σε σχέση με ένα καθαρά οικονομικό είναι η ταυτόχρονη εκτίμηση της ευημερίας και της αιμοφορίας που επιτυγχάνονται με συγκεκριμένα μέτρα πολιτικής (Kruseman & Bade, 1998).

Βιο-οικονομικά υποδείγματα έχουν χρησιμοποιηθεί ευρύτατα στη διεθνή βιβλιογραφία προκειμένου να μελετηθούν θέματα πολιτικής και καλλιεργητικών πρακτικών που σχετίζονται με τη σωστή διαχείριση των υδάτινων πόρων, τη γονιμότητα του εδάφους και τη ρύπανση γεωργικής προέλευσης (Janssen & Van Ittersum, 2007). Στην Ελλάδα, η χρήση βιο-οικονομικών υποδειγμάτων δεν είναι τόσο διαδεδομένη όσο στο εξωτερικό και οι εργασίες που έχουν δημοσιευτεί, από όσο είναι σε θέση να γνωρίζει ο γράφων, εστιάζουν σε επιμέρους ζητήματα, όπως η τιμολόγηση του νερού άρδευσης (π.χ. Kampas *et al.*, 2010; Manos *et al.*, 2006) και η εύρεση των καταλληλότερων αμειψισπορών για την αντικατάσταση της μονοκαλλιέργειας βαμβακιού για διαφορετικά καλλι-

εργητικά συστήματα (Rozakis *et al.*, 2001). Ένας από τους λόγους στους οποίους πιθανώς να οφείλεται η έλλειψη βιο-οικονομικών αναλύσεων στην Ελλάδα είναι οι απαιτήσεις σε αγρονομικά δεδομένα που συνήθως καλύπτονται από εξειδικευμένα βιο-φυσικά υποδείγματα προσομοίωσης της ανάπτυξης των καλλιεργειών. Πλην ορισμένων εξαιρέσεων (π.χ. Danalatos, 1993), παρόμοια υποδείγματα δεν έχουν αναπτυχθεί στη χώρα, γεγονός που αποτελεί τροχοπέδη στην ολοκληρωμένη μελέτη των γεωργικών συστημάτων.

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή παρουσιάζεται μια ολοκληρωμένη προσέγγιση βιο-οικονομικής ανάλυσης σε επίπεδο γεωργικής εκμετάλλευσης που έχει ως στόχο τη διαμόρφωση ενός ενιαίου πλαισίου για αναλύσεις πολιτικής στο γεωργικό τομέα. Η προτεινόμενη προσέγγιση συνδυάζει την οικονομική θεωρία με βασικές αρχές της γεωπονικής επιστήμης, προκειμένου να καταστεί ρεαλιστικότερη η σχέση μεταξύ των αποφάσεων των παραγωγών και ενός σημαντικού μέρους των τεχνικών και εδαφοκλιματικών παραμέτρων και περιορισμών. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται σύγχρονες μέθοδοι μαθηματικού προγραμματισμού (ΜΠ) για την προτυποποίηση της οικονομικής συμπεριφοράς των παραγωγών, σε συνδυασμό με ένα *ad hoc* βιο-φυσικό υπόδειγμα για τη διερεύνηση της σχέσης μεταξύ νερού άρδευσης, κλιματικών συνθηκών και τελικών αποδόσεων των καλλιεργειών.

Βασικό στοιχείο της προτεινόμενης προσέγγισης είναι η υιοθέτηση των αρχών του Θετικού Μαθηματικού Προγραμματισμού (ΘΜΠ) για τη «ρύθμιση» (calibration) του υποδείγματος. Ειδικότερα, παρουσιάζεται μια νέα εκδοχή ΘΜΠ που στηρίζεται στη θεωρία της προσδοκώμενης χρησιμότητας (expected utility), με την οποία επιτυγχάνεται η ακριβής ρύθμιση του υποδείγματος, λαμβάνοντας υπόψη με σαφή τρόπο τον οικονομικό κίνδυνο που αντιμετωπίζει ο παραγωγός εξαιτίας των διακυμάνσεων των αποδόσεων και των τιμών των προϊόντων. Το βασικότερο σημείο διαφοροποίησης από τα κλασικά υποδείγματα κινδύνου που συναντώνται στη βιβλιογραφία είναι πως δεν υιοθετείται η υπόθεση περί σταθερής συμπεριφοράς των παραγωγών έναντι του κινδύνου, αλλά αντίθετα θεωρείται πως η συμπεριφορά αυτή εξαρτάται από το τελικό επίπεδο του πλούτου (εισοδήματος) των παραγωγών.

Με τη σειρά του, η κατασκευή του βιο-φυσικού υποδείγματος βασίζεται στη μεθοδολογία που παρουσιάζεται από τους Allen *et al.* (1998) για την εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής των καλλιεργειών και η οποία έχει εφαρμοστεί με επιτυχία σε διαφορετικές τοποθεσίες σε όλη τη γη. Το βιο-φυσικό υπόδειγμα που εξειδικεύτηκε για τις ανάγκες της παρούσας διατριβής δεν μπορεί φυσικά να συγκριθεί με τα πολύπλοκα, αλλά συνήθως δύσχρηστα και ταυτόχρονα ιδιαίτερα απαιτητικά σε δεδομένα, βιο-φυσικά υποδείγματα που συναντώνται στη γεωπονική βιβλιογραφία. Τα τελευταία λαμβάνουν

υπόψη πολλαπλές εισροές (νερό και διάφορα είδη λιπασμάτων) και είναι αποτέλεσμα ερευνητικών προσπαθειών ομάδων επιστημόνων και γεωργικών πειραμάτων πολλών ετών σε μεγάλα πανεπιστήμια και ερευνητικά κέντρα του εξωτερικού.

Δυο είναι οι λόγοι που οδήγησαν στην κατασκευή του απλοποιημένου βιο-φυσικού υποδείγματος. Ο πρώτος προκύπτει από την πολυπλοκότητα των υπαρχόντων βιο-φυσικών υποδειγμάτων που καθιστά απαγορευτική τη χρήση τους από άτομα χωρίς εξειδικευμένες γνώσεις σχετικά με τον τρόπο ποσοτικής αναπαράστασης των βιο-φυσικών φαινομένων, με αποτέλεσμα ανάλογα υποδείγματα να χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά στα πλαίσια διεπιστημονικών ερευνητικών ομάδων. Επίσης, τα υποδείγματα αυτά χρησιμοποιούν μεγάλο αριθμό παραμέτρων που αφορούν στις εδαφοκλιματικές συνθήκες μιας συγκεκριμένης περιοχής και η κύρια στόχευση τους είναι η υποβοήθηση της έρευνας σχετικά με διάφορα βιο-φυσικά φαινόμενα ή διεργασίες των καλλιεργειών (π.χ. φωτοσύνθεση). Για το λόγο αυτό, εκτός ελαχίστων εξαιρέσεων (Galko & Jayet, 2011; Louhichi *et al.*, 2010), η χρήση των υποδειγμάτων αυτών σε αναλύσεις πολιτικής σε περιφερειακό και εθνικό επίπεδο είναι περιορισμένη και οι εφαρμογές τους αφορούν σε καθαρά τοπικό επίπεδο ή/και σε μικρό αριθμό καλλιεργειών (π.χ. Helfand & House, 1995; Johnson *et al.*, 1991; Larson *et al.*, 1996).

Τα παραπάνω καθιστούν απαραίτητη την ανάπτυξη μιας εφαρμογής (δηλαδή ενός *ad hoc* βιο-φυσικού υποδείγματος) προκειμένου να «τροφοδοτηθούν» οικονομικά υποδείγματα που χρησιμοποιούνται σε αναλύσεις αγροτικής πολιτικής. Για το λόγο αυτό, σε αντίθεση με τα τυπικά βιο-φυσικά υποδείγματα που χρησιμοποιούνται για ερευνητικούς σκοπούς ή για τη λήψη αποφάσεων διαχείρισης μιας καλλιέργειας σε επίπεδο αγρού, η εφαρμογή που αναπτύσσεται θα πρέπει (α) να έχει ένα γενικό (generic) χαρακτήρα ώστε να είναι δυνατή η χρήση της για την προσομοίωση μεγάλου αριθμού καλλιεργειών, (β) να έχει μικρές απαιτήσεις σε εδαφοκλιματικά δεδομένα και (γ) να στηρίζεται σε όσο το δυνατόν απλές αρχές της γεωπονικής επιστήμης ώστε να μην αποτελεί «μαύρο κουτί».

Τα παραπάνω οδηγούν στο δεύτερο λόγο για τον οποίο επιδιώχθηκε η κατασκευή του υποδείγματος. Αυτός δεν είναι άλλος από το να καταδειχτεί πως ένα τέτοιο εγχείρημα βρίσκεται σαφώς εντός των δυνατοτήτων ενός γεωργοοικονομολόγου, αφού η προτεινόμενη μέθοδος στηρίζεται σε βασικές αρχές φυσιολογίας, εδαφολογίας και μετεωρολογίας. Πρόκειται δηλαδή για γνώσεις που (οφείλουν να) κατέχουν όλοι οι απόφοιτοι οποιουδήποτε πανεπιστημίου όπου διδάσκεται η γεωπονική επιστήμη, επομένως και του τμήματος Αγροτικής Οικονομίας και Ανάπτυξης του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών. Εξάλλου, η προτεινόμενη μέθοδος αποτελεί στην πραγματικότητα έναν οδηγό πρακτικής εφαρμογής της διαδικασίας υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής των

καλλιεργειών και απευθύνεται σε όλους τους ενδιαφερόμενους, φοιτητές ή ερευνητές διαφόρων ειδικοτήτων (Allen *et al.*, 1998).

Η σύζευξη του υποδείγματος ΘΜΠ με το βιο-φυσικό υπόδειγμα πραγματοποιείται μέσω της εκτίμησης εμπειρικών (συνεχών) συναρτήσεων απόδοσης-νερού που προκύπτουν από τα αποτελέσματα του τελευταίου για διαφορετικές εδαφοκλιματικές συνθήκες και ποσότητα νερού άρδευσης. Οι συναρτήσεις απόδοσης ενσωματώνονται στη συνέχεια στην αντικειμενική συνάρτηση του υποδείγματος ΘΜΠ, το οποίο συνεπώς λαμβάνει υπόψη τρεις διαφορετικές διαστάσεις της διαδικασίας λήψης αποφάσεων στο γεωργικό τομέα. Συγκεκριμένα, το υπόδειγμα προσομοιώνει τη βέλτιστη επιλογή τόσο σε εντατικό επίπεδο (δηλαδή τη χρήση του συντελεστή παραγωγής «νερό άρδευσης»), όσο και σε εκτατικό επίπεδο (εκτάσεις καλλιεργειών), στηριζόμενο στις σχετική κερδοφορία των εναλλακτικών δραστηριοτήτων αλλά και των τεχνικοοικονομικών περιορισμών κάθε εκμετάλλευσης. Ταυτόχρονα, προτυποποιείται η αντίδραση των παραγωγών έναντι του οικονομικού κινδύνου με τρόπο συνεπή προς την οικονομική θεωρία, ξεφεύγοντας έτσι από τα τυπικά πλαίσια μεγιστοποίησης του κέρδους που χρησιμοποιείται συνήθως στη βιβλιογραφία.

Ο συνυπολογισμός των τριών αυτών διαστάσεων επιτρέπει την ανάδειξη της ετερογένειας που χαρακτηρίζει τη γεωργική παραγωγή και η οποία δεν είναι δυνατό να ενσωματωθεί σε κλασικά υποδείγματα ΜΠ που χρησιμοποιούνται για αναλύσεις πολιτικής σε περιφερειακό ή/και εθνικό επίπεδο. Η ετερογένεια αυτή σχετίζεται με το μεγάλο αριθμό των εκμεταλλεύσεων σε μια δεδομένη γεωγραφική περιοχή, κάθε μια από τις οποίες διευθύνεται από παραγωγούς (οικονομικές μονάδες) με διαφορετικές προσδοκίες αποδόσεων, χαρακτηρίζονται από διαφορετικό και τρόπο αντίδρασης έναντι του οικονομικού κινδύνου, ενώ αντιμετωπίζουν διαφορετικές εδαφικές και μικροκλιματικές συνθήκες.

Η προτεινόμενη βιο-οικονομική μέθοδος εφαρμόστηκε στην περιοχή της Καρδίτσας σε δείγμα 70 πρώην καπνοπαραγωγικών εκμεταλλεύσεων και υπό διάφορα σενάρια πολιτικής, προκειμένου να διαπιστωθεί η αξιοπιστία και η προβλεπτική ικανότητα του υποδείγματος και των επιμέρους τμημάτων του, δηλαδή του ΘΜΠ και των συναρτήσεων απόδοσης. Η επιλογή του συγκεκριμένου δείγματος βασίστηκε κυρίως στη διαθεσιμότητα τεχνικοοικονομικών στοιχείων, καθώς οι εκμεταλλεύσεις αυτές αποτέλεσαν αντικείμενο μελέτης περίπτωσης στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος PILOTEC<sup>1</sup>, στο οποίο συμμετείχε ο γράφων κατά την περίοδο 2007-2009. Το παράδειγμα εφαρμογής αφορά στη μελέτη των επιπτώσεων μιας πιθανής τιμολόγησης του νερού άρδευσης

---

<sup>1</sup> «Δημιουργία Καινοτόμων Εμπειριών Αποδεικτικού Χαρακτήρα για την Τεκμηρίωση της Δυνατότητας των Καπνοπαραγωγών να στραφούν προς την καλλιέργεια Ενεργειακών Φυτών, Μέτρο 10, Καν. (ΕΚ) 2182/02». Για περισσότερες πληροφορίες: <http://aoatools.aua.gr/pilotec/>.

υπό τέσσερα σενάρια αγροτικής πολιτικής, τα οποία αναφέρονται στην ΚΑΠ από το 2005 (προ της ενδιάμεσης αναθεώρησης) έως και τη μορφή που αναμένεται να λάβει μετά το 2013 οπότε και θα εφαρμοστεί το μέτρο της περιφερειοποίησης της ενιαίας ενίσχυσης.

Η διατριβή διαρθρώνεται στα εξής κεφάλαια:

1. Στο κεφάλαιο 1 δίνονται δυο ορισμοί βιο-οικονομικών υποδειγμάτων, ένας γενικός και ένας αυστηρότερος, προκειμένου να καταδειχτεί η ποικιλία των διατυπώσεων που χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση της οικονομικής συμπεριφοράς του γεωργού ή της εκμετάλλευσης. Στις ενότητες 1.2 έως 1.4 αναλύονται οι διάφορες μέθοδοι ΜΠ που συναντώνται στη βιβλιογραφία και έχουν αποτελέσει τη βάση βιο-οικονομικών υποδειγμάτων. Τα κύρια χαρακτηριστικά και η δομή ενός βιο-φυσικού υποδείγματος παρουσιάζονται στην ενότητα 1.5, όπου συζητούνται οι διάφοροι τρόποι με τους οποίους προσομοιώνεται η ανάπτυξη των φυτών και η αύξηση της φυτικής βιομάζας. Τέλος, στην ενότητα 1.6 περιγράφονται οι μέθοδοι με τους οποίους επιτυγχάνεται η σύζευξη ενός υποδείγματος ΜΠ και ενός βιο-φυσικού υποδείγματος, στα πλαίσια μιας ολοκληρωμένης βιο-οικονομικής ανάλυσης.
2. Στο κεφάλαιο 2 αναλύεται λεπτομερώς η διαδικασία κατασκευής ενός βιο-φυσικού υποδείγματος, η οποία βασίζεται στη μεθοδολογία του FAO (Food and Agriculture Organization – Οργανισμός Τροφίμων και Γεωργίας) σχετικά με τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής μιας καλλιέργειας. Ειδικότερα, δίνονται οι ορισμοί της εξάτμισης, της διαπνοής και της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς και πραγματοποιείται η βιβλιογραφική ανασκόπηση της εξέλιξης στην εκτίμηση της τελευταίας, η οποία αποτελεί βασικό συστατικό όλων των βιο-φυσικών υποδειγμάτων που έχουν αναπτυχθεί έως σήμερα (ενότητες 2.1-2.3). Στη συνέχεια (ενότητες 2.4-2.5), παρουσιάζονται οι διαδικασίες υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας με τη μέθοδο του μονού φυτικού συντελεστή, ενώ στην ενότητα 2.6 υπολογίζεται η προσαρμοσμένη εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας σε περιπτώσεις υδατικής καταπόνησης (έλλειψης νερού). Στην ενότητα 2.7.1 παρουσιάζονται οι κυριότερες εμπειρικές συναρτήσεις που συναντώνται στη βιβλιογραφία και συνδέουν τη σχετική τελική απόδοση της καλλιέργειας με τη σχετική εξατμισοδιαπνοή της, ενώ προτείνεται και μια εναλλακτική διατύπωση, η οποία είναι περισσότερο αντιπροσωπευτική για την περίπτωση του βαμβακιού που καλλιεργείται στην Ελλάδα (ενότητα 2.7.2). Τέλος, στην ενότητα 2.7.3 περιγράφονται δυο μέθοδοι (προτεινόμενοι από τον FAO) για τον υπολογισμό της μέγιστης απόδοσης των καλλιεργειών, ανάλογα με τις επικρατούσες κλιματικές συνθήκες.

3. Στο κεφάλαιο 3 αναλύεται η μέθοδος του ΘΜΠ και παρουσιάζονται τα στάδια της διαδικασίας εφαρμογής του αλγορίθμου του (ενότητες 3.1-3.3), ενώ συζητούνται τα πλεονεκτήματα και τα προβλήματα που προκύπτουν από την εφαρμογή της μεθόδου (ενότητα 3.4). Ακολουθεί μια κριτική παρουσίαση της θεωρίας προσδοκώμενης χρησιμότητας και η σύνδεση της με υποδείγματα ΜΠ για την προτυποποίηση του οικονομικού κινδύνου, ενώ ταυτόχρονα συζητούνται οι ισχυρές υποθέσεις στις οποίες στηρίζονται τα υποδείγματα αυτά (ενότητα 3.5). Στη συνέχεια πραγματοποιείται μια σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση της χρήσης του οικονομικού κινδύνου στα πλαίσια ρύθμισης υποδειγμάτων ΜΠ, όπου εντοπίζονται τα προβλήματα των χρησιμοποιούμενων μεθόδων που έχουν εμφανιστεί μέχρι σήμερα στη σχετική βιβλιογραφία (ενότητα 3.6). Η ενότητα 3.7 αφιερώνεται στην αναλυτική παρουσίαση ενός καινοτόμου τρόπου σύζευξης του οικονομικού κινδύνου και της μεθόδου ΘΜΠ, η οποία αμβλύνει τους περιορισμούς που προκύπτουν από τις ισχυρές υποθέσεις στις οποίες στηρίζονται τα συνήθη υποδείγματα οικονομικού κινδύνου. Ταυτόχρονα προτείνονται τρόποι αντιμετώπισης σημαντικών προβλημάτων των κλασικών υποδειγμάτων ΘΜΠ, όπως είναι η αδυναμία χειρισμού μη παρατηρούμενων δραστηριοτήτων και η σημαντική μεροληψία που υπεισέρχεται κατά τη χρήση της μεθόδου.
4. Στο κεφάλαιο 4 αναλύεται η χρήση του βιο-φυσικού υποδείγματος και η διαδικασία εκτίμησης των συναρτήσεων απόδοσης για τις κυριότερες αροτραίες καλλιέργειες της περιοχής μελέτης (βαμβάκι, αραβόσιτος, σιτάρι, καπνός και μηδική). Συγκεκριμένα, εξειδικεύονται όλοι οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται στο υπόδειγμα, όπως είναι η διάρκεια των βλαστικών περιόδων των καλλιεργειών και οι τιμές των απαιτούμενων εδαφοκλιματικών παραμέτρων (ενότητες 4.1-4.3). Η ενότητα 4.4 αφιερώνεται στη συζήτηση για την εκτίμηση του μέγιστου βάθους του ριζοστρώματος που αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες στη διαμόρφωση των τελικών αποδόσεων των καλλιεργειών. Στην ενότητα 4.5 υπολογίζονται οι φυτικοί συντελεστές και στη συνέχεια εκτιμώνται οι μέγιστες δυνατές αποδόσεις κάθε καλλιέργειας για τις δεδομένες κλιματικές συνθήκες της περιοχής μελέτης (ενότητα 4.6). Ακολουθεί η *ad hoc* προσομοίωση της ανάπτυξης των καλλιεργειών, η οποία βασίζεται στην παραμετρική επίλυση του υποδείγματος για διαφορετικές ποσότητες νερού άρδευσης και εδαφοκλιματικών συνθηκών (ενότητα 4.7). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή ενός νέφους παρατηρήσεων στο χώρο [απόδοση-νερό], μέσω του οποίου εκτιμώνται συνεχείς συναρτήσεις απόδοσης για τις εξεταζόμενες αροτραίες καλλιέργειες (ενότητα 4.8).
5. Στο πέμπτο κεφάλαιο πραγματοποιείται η εμπειρική εφαρμογή του τελικού βιο-οικονομικού υποδείγματος, η οποία εξετάζει τις επιπτώσεις της (προβλεπόμενης)

τιμολόγησης νερού άρδευσης στις παραγωγικές αποφάσεις και στη συνολική ζήτηση νερού ενός δείγματος εκμεταλλεύσεων, υπό τέσσερα διαφορετικά σενάρια πολιτικής. Έτσι, στην ενότητα 5.2 παρουσιάζεται το δείγμα των εκμεταλλεύσεων που χρησιμοποιείται στην εμπειρική εφαρμογή και ακολουθεί η αναλυτική περιγραφή της αντικειμενικής συνάρτησης και των μεταβλητών του υποδείγματος (ενότητα 5.3). Οι περιορισμοί του υποδείγματος για τα διάφορα σενάρια πολιτικής εξειδικεύονται στην ενότητα 5.4 και στη συνέχεια (ενότητα 5.5) ρυθμίζεται το υπόδειγμα με την εναλλακτική μέθοδο ΘΜΠ που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 3. Όπως συζητείται και στο κείμενο, η ρύθμιση προηγείται της εισαγωγής των συναρτήσεων απόδοσης στην αντικειμενική συνάρτηση. Αυτή πραγματοποιείται στη συνέχεια (ενότητα 5.6) και αναλύονται οι μετασχηματισμοί που επέρχονται στην αντικειμενική συνάρτηση και σε ορισμένους από τους περιορισμούς του υποδείγματος. Στην ενότητα 5.7 εξειδικεύονται τα σενάρια πολιτικής και στην ενότητα 5.8 παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της τιμολόγησης του νερού για καθένα από τα σενάρια αυτά.

6. Η διατριβή κλείνει με το κεφάλαιο 6, όπου πραγματοποιείται μια σύνοψη της προτεινόμενης μεθοδολογίας και συζητούνται τα πλεονεκτήματα της και τα θεωρητικά και πρακτικά προβλήματα που παρουσιάστηκαν κατά την εμπειρική εφαρμογή της. Τέλος αναγνωρίζονται τα σημεία εκείνα που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ερευνητικό ενδιαφέρον και δύνανται να αποτελέσουν αντικείμενο μελλοντικών ερευνητικών εργασιών.



# 1 Βιο-οικονομικά υποδείγματα εκμεταλλεύσεων

---

## 1.1 Εισαγωγή

Τα οικονομικά υποδείγματα αποτελούν τα εργαλεία ποσοτικής ανάλυσης της οικονομικής επιστήμης και χρησιμοποιούνται για τη μελέτη της συμπεριφοράς ατόμων και επιχειρήσεων απέναντι σε μεταβολές στο οικονομικό περιβάλλον. Με τον τρόπο αυτό μπορούν να διερευνηθούν τα κίνητρα που οδηγούν στην επιλογή μιας τεχνολογίας ή μιας δραστηριότητας και να εκτιμηθούν οι επιπτώσεις των διαφόρων μέτρων οικονομικής πολιτικής στη κοινωνική ευημερία, την κερδοφορία επιχειρήσεων και την ανταγωνιστικότητα των διάφορων τομέων της οικονομίας. Τα υποδείγματα συνιστούν μια απλοποιημένη αναπαράσταση του οικονομικού συστήματος και επιτρέπουν την καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας του αλλά και των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των συστατικών του στοιχείων. Συνεπώς μπορούν να προσφέρουν μια χρήσιμη εικόνα του αντικείμενου μελέτης, δίνοντας τη δυνατότητα στον αναλυτή να συνδέσει την οικονομική θεωρία με πραγματικά δεδομένα και να προβεί σε διατύπωση και έλεγχο υποθέσεων μέσα σε ένα πειραματικό περιβάλλον πλήρως ελεγχόμενο από τον ίδιο. Η απλοποίηση του οικονομικού συστήματος απαιτεί ένα συγκεκριμένο σύνολο υποθέσεων και παραδοχών που καθορίζουν την καταλληλότητα ενός υποδείγματος και την αξιοπιστία των ερευνητικών συμπερασμάτων. Χαρακτηριστικές υποθέσεις, προερχόμενες από τη νεοκλασική σχολή οικονομικής σκέψης, είναι η σαφώς ορισμένη διαδικασία της παραγωγής, που συνεπάγεται άριστη γνώση της συναρτησιακής σχέσης μεταξύ συντελεστών παραγωγής και τελικού προϊόντος, και η ορθολογική συμπεριφορά του ατόμου ή της επιχείρησης, δηλαδή η βελτιστοποίηση ενός οικονομικού μεγέθους (π.χ. εισόδημα ή κέρδος) με βάση δεδομένους περιορισμούς.

Τα *βιο-οικονομικά υποδείγματα* αποτελούν μια προέκταση των κλασικών οικονομικών υποδειγμάτων και λαμβάνουν υπόψη τις ιδιαιτερότητες του γεωργικού τομέα, η κυριότερη από τις οποίες είναι η εξάρτηση της παραγωγής από τις εκάστοτε εδαφοκλιματικές συνθήκες. Η ιδιαιτερότητα αυτή έρχεται σε αντίθεση με την υπόθεση περί άριστης γνώσης της παραγωγικής διαδικασίας, γεγονός που καθιστά αναγκαία την ενσωμάτωση αγρονομικών πληροφοριών σε οικονομικά υποδείγματα, προκειμένου να προσομοιωθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια το εξεταζόμενο οικονομικό σύστημα. Έτσι, σύμφωνα με τους Barbier και Bergeron (1999), βιο-οικονομικά ονομάζονται τα υποδείγματα που βασίζονται στον μαθηματικό προγραμματισμό (ΜΠ) και συνδυάζουν διατυπώσεις της οικονομικής συμπεριφοράς των παραγωγών, με βιο-φυσικά υποδείγματα που περιγρά-

φουν αναλυτικά τη χρήση των φυσικών συντελεστών παραγωγής και την παραγωγική διαδικασία στη γεωργία.

Ο ΜΠ, το πρώτο από τα δυο συστατικά μέρη ενός βιο-οικονομικού υποδείγματος, σύμφωνα με τον ορισμό των Barbier και Bergeron, είναι ένα βασικό εργαλείο της επιχειρησιακής έρευνας και μαζί με την οικονομετρία αποτελούν τις κυριότερες μεθόδους ποσοτικής ανάλυσης στην οικονομική επιστήμη. Υποδείγματα ΜΠ χρησιμοποιούνται ευρέως στο γεωργικό τομέα για την εύρεση του άριστου σχεδίου παραγωγής σε επίπεδο εκμετάλλευσης (Hazell & Norton, 1986), ή για την εκτίμηση των επιπτώσεων σε περιφερειακό και εθνικό επίπεδο από τις αλλαγές στο πλαίσιο της εφαρμοζόμενης αγροτικής πολιτικής (Arfini, 2001). Σε ένα υπόδειγμα ΜΠ περιγράφονται αναλυτικά οι σχέσεις μεταξύ των παραγόμενων προϊόντων και των συντελεστών παραγωγής (π.χ. έδαφος, νερό, εργασία, κεφάλαιο κλπ.), μέσα από ένα σύνολο περιορισμών που αντανακλούν την περιορισμένη διαθεσιμότητα των τελευταίων. Οι σχέσεις αυτές αντιπροσωπεύουν την υφιστάμενη τεχνολογία παραγωγής και βασίζονται σε επιστημονικές αρχές και γνώσεις με αποτέλεσμα να επιτυγχάνουν την ποσοτικοποίηση της παραγωγικής διαδικασίας, επιτρέποντας έτσι την εκτίμηση της προσφοράς του γεωργικού τομέα και του βέλτιστου τρόπου χρήσης των συντελεστών παραγωγής.

Η χρήση υποδειγμάτων ΜΠ στηρίζεται στην νεοκλασική υπόθεση περί ορθολογικής συμπεριφοράς της οικονομικής μονάδας, δηλαδή στην επιδίωξη βελτιστοποίησης ενός ή περισσοτέρων κριτηρίων χρησιμότητας, όπως είναι το ακαθάριστο κέρδος (μεγιστοποίηση) ή ο οικονομικός κίνδυνος (ελαχιστοποίηση). Η παραπάνω υπόθεση φανερώνει τον «δεοντολογικό» ή «κανονιστικό» (normative) χαρακτήρα του ΜΠ, ο οποίος αφορά στην εύρεση της άριστης λύσης ενός προβλήματος υπό περιορισμούς. Στο σημείο αυτό εντοπίζεται η διαφορά του ΜΠ από τις οικονομετρικές μεθόδους, καθώς οι τελευταίες δεν αναζητούν μια άριστη λύση αλλά επικεντρώνονται στον προσδιορισμό της σχέσης μεταξύ των διαφόρων μεταβλητών που επηρεάζουν ένα φαινόμενο, βασιζόμενες στη μελέτη χρονολογικών σειρών (time series), διαστρωματικών δεδομένων (cross sectional data) ή και των δύο (δεδομένα panel – panel data), χρησιμοποιώντας στατιστικές μεθόδους για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Ως «βιο-φυσικά» ορίζονται τα υποδείγματα τα οποία προσομοιώνουν τις φυσικές και βιολογικές διαδικασίες που καθορίζουν την ανάπτυξη των καλλιεργειών, προσφέροντας έτσι τη δυνατότητα ποσοτικοποίησης της σχέσης μεταξύ της τελικής απόδοσης και της χρήσης διαφορετικών καλλιεργητικών πρακτικών και ποσοτήτων εισροών (Bouman *et al.*, 1996). Πρόκειται δηλαδή για εξειδικευμένα υποδείγματα προσομοίωσης καλλιεργειών (crop simulation models) που αντιπροσωπεύουν την πρακτική εφαρμογή της συσσωρευμένης επιστημονικής γνώσης στα πεδία της γεωπονίας, της μετεωρολο-

γίας, της εδαφολογίας και της φυσιολογίας φυτών. Έτσι, ενώ τα οικονομικά υποδείγματα περιγράφουν τους τεχνικοοικονομικούς και κοινωνικούς λόγους που εξηγούν μια συγκεκριμένη οικονομική συμπεριφορά (π.χ. υψηλό κέρδος, χαμηλό κόστος, αξιοποίηση υπάρχοντος εξοπλισμού κτλ.), τα βιο-φυσικά προσομοιώνουν το βιολογικό κύκλο των καλλιεργειών, καθορίζοντας τις απαιτούμενες ποσότητες εισροών υπό διαφορετικές αγρονομικές συνθήκες και επίπεδα παραγωγής.

Αν και ο συνδυασμός ΜΠ και βιο-φυσικών υποδειγμάτων είναι ιδιαίτερα διαδεδομένος, στη βιβλιογραφία συναντά κανείς και ανάλογες οικονομετρικές εφαρμογές που ενσωματώνουν αγρονομικά δεδομένα, χωρίς μάλιστα αυτά να προέρχονται από εξειδικευμένα βιο-φυσικά υποδείγματα. Για παράδειγμα, οι Kaufmann και Snell (1997) εκτίμησαν ένα βιο-φυσικό υπόδειγμα απόδοσης αραβοσίτου στο οποίο, εκτός από κλιματικά δεδομένα, χρησιμοποιήθηκαν ως ανεξάρτητες μεταβλητές οι τιμές των εισροών και του τελικού προϊόντος, καθώς και βοηθητικές μεταβλητές (proxy variables) που αντιπροσώπευαν την τεχνολογία παραγωγής. Οι Antle και Capalbo (2001) παρουσίασαν μια πιο ολοκληρωμένη μεθοδολογία που στηρίζεται στην ταυτόχρονη εκτίμηση λογαριθμικά γραμμικών (log-linear) συναρτήσεων παραγωγής και ζήτησης παραγωγικών συντελεστών για κάθε εδαφική μονάδα (αγρό) του δείγματος τους, σε συνδυασμό με ένα υπόδειγμα προσομοίωσης (simulation model). Το τελευταίο ενσωματώνει συνεχείς και διακριτές επιλογές σε επίπεδο αγρού (αμειψισπορές) και «παράγει» δεδομένα για αποδόσεις καλλιεργειών και τιμές προϊόντων και εισροών, με βάση τις εμπειρικές κατανομές τους, τόσο χρονικά όσο και χωρικά (για τις αποδόσεις – ανάλογα με τις εδαφοκλιματικές παραμέτρους που χαρακτηρίζουν κάθε εδαφική μονάδα).

Οι παραπάνω εφαρμογές φανερώνουν πως ο ορισμός των Barbier και Bergeron (1999) είναι αρκετά αυστηρός και περιοριστικός, αφού δεν λαμβάνει υπόψη την ποικιλομορφία των μεθόδων κατασκευής ενός βιο-οικονομικού υποδείγματος. Ένας γενικότερος ορισμός δόθηκε αργότερα από τους Janssen και van Ittersum (2007: 623), στα πλαίσια μιας εκτενούς βιβλιογραφικής ανασκόπησης του αντικειμένου: *«Βιο-οικονομικά είναι τα υποδείγματα εκείνα που συνδυάζουν διατυπώσεις της συμπεριφοράς των παραγωγών σχετικά με τη διαχείριση των φυσικών πόρων, με διατυπώσεις που περιγράφουν τις παρούσες και τις εναλλακτικές δυνατότητες παραγωγής και οι οποίες προσφέρουν μια ποσοτική σχέση μεταξύ αναγκαίων εισροών, τελικής παραγωγής και συνδεδεμένων εξωτερικοτήτων»*. Η ανάλυση του προηγούμενου ορισμού φανερώνει πως «βιο-οικονομικό» μπορεί να ονομαστεί οποιοδήποτε οικονομικό υπόδειγμα που ενσωματώνει αγρονομικές πληροφορίες και γνώσεις προκειμένου να αναπαρασταθεί ποσοτικά και με ρεαλιστικό τρόπο η διαδικασία της γεωργικής παραγωγής και τα πιθανά συνεπαγόμενα περιβαλλοντικά προβλήματα.

Οι Janssen και van Ittersum προτείνουν επίσης την κατηγοριοποίηση των βιο-οικονομικών υποδειγμάτων σε «μηχανιστικά» και «εμπειρικά», ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής τους και τη λειτουργία τους. Έτσι, «μηχανιστικά» ονομάζονται εκείνα που χρησιμοποιούν συνήθως τεχνικές ΜΠ και επιτρέπουν την ανάλυση επιπτώσεων πολιτικής και την πραγματοποίηση προβλέψεων, βασιζόμενα στην υπάρχουσα θεωρία και γνώση. Αντίθετα, τα «εμπειρικά» υποδείγματα στηρίζονται στην εξαγωγή συμπερασμάτων χρησιμοποιώντας στατιστικές μεθόδους για τη μελέτη χρονολογικών σειρών που αφορούν στη σχέση μεταξύ διαφόρων μεταβλητών, όπως οι τιμές παραγωγού, οι κλιματικές συνθήκες και οι παραγόμενες ποσότητες γεωργικών προϊόντων. Ωστόσο, η συγκεκριμένη εργασία φανερώνει προτίμηση για τον ΜΠ στη κατασκευή βιο-οικονομικών υποδειγμάτων, αφού οι Janssen και Van Ittersum επικεντρώνονται σε «μηχανιστικά» υποδείγματα, εντοπίζοντας 48 δημοσιεύσεις και 42 διαφορετικές εξειδικεύσεις. Με αυτή τη λογική, η παρούσα διατριβή επικεντρώνεται αποκλειστικά σε βιο-οικονομικά υποδείγματα που βασίζονται σε μεθόδους ΜΠ και χρησιμοποιούν αγρονομικά δεδομένα προερχόμενα από βιο-φυσικά υποδείγματα. Για το λόγο αυτό, στη συνέχεια του κεφαλαίου αναλύονται τόσο οι διάφορες μέθοδοι ΜΠ όσο και τα βασικά χαρακτηριστικά βιο-φυσικών υποδειγμάτων που συναντώνται στη βιβλιογραφία.

## **1.2 Ο μαθηματικός προγραμματισμός σε βιο-οικονομικά υποδείγματα**

Σε σχέση με τις οικονομετρικές μεθόδους, που επίσης χρησιμοποιούνται για οικονομικές αναλύσεις στο γεωργικό τομέα (π.χ. Guyomard *et al.*, 1996; Sckokai & Moro, 2009), ο ΜΠ παρουσιάζει κάποια χαρακτηριστικά που τον καθιστούν καταλληλότερο στο να αποτελέσει την οικονομική και μαθηματική βάση ενός βιο-οικονομικού υποδείγματος. Συγκεκριμένα, περιγράφει με ακρίβεια τη συμμετοχή των συντελεστών στη παραγωγική διαδικασία, λαμβάνει υπόψη πιθανές αλλαγές στο τεχνικοοικονομικό πλαίσιο της ανάλυσης, όπως είναι για παράδειγμα η επιλογή εναλλακτικών μεθόδων παραγωγής, απαιτεί λιγότερα δεδομένα, ενώ σημαντική κρίνεται και η ικανότητα υπολογισμού των σκιωδών (δυσικών) τιμών για καθένα από τους υφιστάμενους περιορισμούς (Lehtonen, 2001). Οι τιμές αυτές αντιπροσωπεύουν το κόστος ευκαιρίας των διαθέσιμων σταθερών συντελεστών παραγωγής και χρησιμοποιούνται συχνά για την εκτίμηση της αξίας τους όταν αυτό δεν προκύπτει εύκολα από δεδομένα της αγοράς. Συνηθέστερο παράδειγμα είναι ο περιορισμός της συνολικής διαθέσιμης έκτασης της εκμετάλλευσης (πιθανώς ο ευρύτερα χρησιμοποιούμενος περιορισμός σε υποδείγματα ΜΠ), η δυσική τιμή του οποίου χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του ενοικίου της γης. Το σημαντικότερο ωστόσο πλεονέκτημα της χρήσης μεθόδων ΜΠ στην κατασκευή βιο-οικονομικών υποδειγμάτων είναι η δυνατότητα εξειδίκευσης σε επίπεδο αγρού ή γεωργικής επιχείρησης (εκμετάλλευσης). Αυτό επιτρέπει την ενσωμάτωση αγρονομικών πληροφοριών και πε-

ριορισμών στους οποίους αντανακλάται η ετερογένεια των εδαφών και των εκμεταλλεύσεων αναφορικά με τις ακολουθούμενες καλλιεργητικές τεχνικές και τη διαθεσιμότητα των συντελεστών παραγωγής.

Να σημειωθεί πως αν και η δυνατότητα κατασκευής υποδειγμάτων εκμεταλλεύσεων ΜΠ είναι επιθυμητή, η γενίκευση των αποτελεσμάτων σε τοπικό – περιφερειακό επίπεδο δεν είναι μια τετριμμένη υπόθεση. Η πιο συνηθισμένη μέθοδος που χρησιμοποιείται για το σκοπό αυτό είναι η «αντιπροσωπευτική εκμετάλλευση» (Sharples, 1969), η οποία στηρίζεται στην κατασκευή ενός μοναδικού υποδείγματος για μια ομάδα εκμεταλλεύσεων με ομοιογενή τεχνολογικά χαρακτηριστικά και αναλογικότητα διαθέσιμων συντελεστών παραγωγής (Day, 1963). Το υπόδειγμα αυτό μπορεί είτε να αφορά σε μια πραγματική εκμετάλλευση, αντιπροσωπευτική της ομάδας, είτε να πρόκειται για ένα «αθροιστικό» υπόδειγμα ΜΠ για μια περιοχή, η οποία θεωρείται ομογενής ως προς τα παραγωγικά χαρακτηριστικά της (π.χ. αποδόσεις). Και στις δυο περιπτώσεις είναι αναγκαία η εφαρμογή στατιστικών μεθόδων πολυκριτήριας ανάλυσης, όπως η παραγοντική ανάλυση (factor analysis) και η ανάλυση σε συστάδες (cluster analysis), για τον καθορισμό ομοιογενών ομάδων εκμεταλλεύσεων ή γεωργικών περιοχών. Οι δυο προσεγγίσεις είναι ισοδύναμες αν η «αντιπροσωπευτική» εκμετάλλευση θεωρηθεί ως «μέση» εκμετάλλευση για την ίδια περιοχή, δηλαδή οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για την εξειδίκευση του υποδείγματος αφορούν στους αριθμητικούς μέσους των εκμεταλλεύσεων στην περιοχή (Hazell & Norton, 1986). Η μέθοδος της αντιπροσωπευτικής εκμετάλλευσης έχει χρησιμοποιηθεί ευρύτατα σε οικονομικές αναλύσεις στο γεωργικό τομέα, όπως για παράδειγμα στην αναγνώριση των πολλαπλών στόχων των κτηνοτρόφων στην Ιρλανδία (Wallace & Moss, 2002), στη διερεύνηση της συμπεριφοράς των βαμβακοπαραγωγών της Θεσσαλίας απέναντι στον κίνδυνο (Petsakos *et al.*, 2009) και στην εκτίμηση των επιπτώσεων των μεταρρυθμίσεων της ΚΑΠ στην Ιταλία (Arfini *et al.*, 2001).

Ένα μειονέκτημα των υποδειγμάτων ΜΠ είναι η περιορισμένη περιγραφική ικανότητα του σε αντίθεση με τις οικονομετρικές μεθόδους (Buysse *et al.*, 2007). Το μειονέκτημα αυτό οφείλεται στο γεγονός πως τα υποδείγματα ΜΠ απαιτούν ελάχιστα δεδομένα για την κατασκευή τους (συνήθως για ένα έτος), ενώ η εξειδίκευση της αντικειμενικής συνάρτησης και των τεθέντων περιορισμών εξαρτάται από την αντίληψη του αναλυτή για το εξεταζόμενο οικονομικό σύστημα. Συνεπώς ένα υπόδειγμα ΜΠ δεν προκύπτει στατιστικά από τα δεδομένα/παρατηρήσεις που έχει στη διάθεση του ο αναλυτής, με αποτέλεσμα, συχνά, να μην είναι εφικτή η αναπαραγωγή της παρατηρούμενης κατάστασης του συστήματος. Για το λόγο αυτό, η παρουσίαση των αποτελεσμάτων από υποδείγματα ΜΠ προτείνεται να συνοδεύεται από μια ανάλυση ευαισθησίας για τη μελέτη της σταθερότητας (robustness) της τελικής λύσης σε αλλαγές των παραμέτρων (Pannell,

1997; Rehman & Romero, 1993). Η ανάλυση ευαισθησίας αφορά στην ανάλυση του αποτελέσματος που επιφέρουν στην άριστη λύση οι μεταβολές σε τιμές διαφόρων παραμέτρων του υποδείγματος. Επειδή το συγκεκριμένο πρόβλημα σχετίζεται με τον έλεγχο αξιοπιστίας ενός υποδείγματος ΜΠ που κρίνει την καταλληλότητα του ως εργαλείο ανάλυσης επιπτώσεων πολιτικής, τα τελευταία χρόνια η έρευνα προτείνει μεθόδους που αναπαράγουν προσεγγιστικά ή με ακρίβεια την παρατηρούμενη κατάσταση. Τα υποδείγματα αυτά παρουσιάζονται αναλυτικά στο κεφάλαιο 3.

### 1.3 Γραμμικός προγραμματισμός

Η απλούστερη και ευρύτερα χρησιμοποιούμενη μορφή υποδειγμάτων ΜΠ είναι τα γραμμικά, στα οποία η αντικειμενική συνάρτηση αποτελεί γραμμικό συνδυασμό άγνωστων πραγματικών μεταβλητών που ονομάζονται «μεταβλητές απόφασης». Το πεδίο τιμών των τελευταίων οριοθετείται έμμεσα από γραμμικούς περιορισμούς, που είναι συναρτήσεις των μεταβλητών αυτών (ανισοεξισώσεις). Ο γραμμικός προγραμματισμός (ΓΠ) είναι συνεπής με τη βασική αρχή της μικροοικονομικής θεωρίας που είναι είτε η μεγιστοποίηση του κέρδους των παραγωγών είτε η ελαχιστοποίηση του κόστους, υπό περιορισμούς, οι οποίοι αντιπροσωπεύουν μια τεχνολογία Leontief και αντανakλούν τη περιορισμένη διαθεσιμότητα των σταθερών συντελεστών παραγωγής. Τα δυο προβλήματα είναι ισοδύναμα και συνδέονται με τη θεωρία της δυκότητας του ΓΠ. Το πρωταρχικό (primary) πρόβλημα μεγιστοποίησης για βραχυπρόθεσμο διάστημα μπορεί να γραφεί διανυσματικά ως:

*Μεγιστοποίηση:*  $Z = (\mathbf{r} - \mathbf{c})^T \mathbf{x}$  υπό περιορισμούς  $\mathbf{Ax} \leq \mathbf{b}$   $[\boldsymbol{\theta}]$  και  $\mathbf{x} \geq 0$ .

Όπου  $Z$  το ακαθάριστο κέρδος της εκμετάλλευσης,  $\mathbf{x}$  το διάνυσμα ( $I \times 1$ ) του επιπέδου παραγωγής κάθε δραστηριότητας (π.χ. έκταση καλλιεργειών),  $\mathbf{r}$  και  $\mathbf{c}$  τα διανύσματα ( $I \times 1$ ) της ακαθάριστης προσόδου και του μεταβλητού κόστους κάθε δραστηριότητας αντίστοιχα,  $\mathbf{A}$  ο πίνακας ( $M \times I$ ) των τεχνολογικών συντελεστών,  $\mathbf{b}$  το διάνυσμα ( $M \times 1$ ) της παρατηρούμενης (διαθέσιμης) ποσότητας των σταθερών συντελεστών παραγωγής και  $\boldsymbol{\theta}$  το διάνυσμα ( $M \times 1$ ) των σκιωδών (ή δυικών) τους τιμών. Κάθε  $\theta_m$  ( $m \in M$ ) στοιχείο του διανύσματος  $\boldsymbol{\theta}$  δείχνει την ποσότητα κατά την οποία θα αυξανόταν η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης αν ήταν διαθέσιμη μια επιπλέον μονάδα του  $m$ -οστού συντελεστή. Ταυτόχρονα, εκφράζει το οριακό κόστος ή το κόστος ευκαιρίας από τη χρησιμοποίηση μιας επιπλέον μονάδας του συντελεστή παραγωγής, δηλαδή τη μέγιστη τιμή στην οποία θα ήταν διατεθειμένος ο παραγωγός να αγοράσει την επιπλέον αυτή μονάδα. Στην παραπάνω διατύπωση, το διάνυσμα  $\mathbf{x}$  αποτελεί τη μεταβλητή απόφασης, ενώ όλα τα υπόλοιπα διανύσματα αποτελούν παραμέτρους, των οποίων οι τιμές είναι γνωστές και προκαθορισμένες. Επιπλέον, το διάνυσμα  $\mathbf{r} - \mathbf{c}$  εκφράζει το

ακαθάριστο κέρδος των δραστηριοτήτων και ονομάζεται «οικονομικός συντελεστής» της μεταβλητής απόφασης.

Το δυικό (dual) πρόβλημα κατασκευάζεται με τη βοήθεια των σκιωδών (ή δυικών) τιμών των περιορισμών του πρωταρχικού προβλήματος και μπορεί να γραφεί διανυσματικά ως ακολούθως:

*Ελαχιστοποίηση:*  $C = \theta^T \mathbf{b}$  υπό περιορισμούς  $\mathbf{A}^T \theta \geq \mathbf{r} - \mathbf{c}$  [ $\mathbf{x}$ ] και  $\theta \geq 0$ .

Όπου  $C$  το συνολικό κόστος των σταθερών συντελεστών της εκμετάλλευσης. Η συμμετρία των δυο προβλημάτων είναι εμφανής (Paris, 1991), καθώς οι μεταβλητές απόφασης του πρωταρχικού προβλήματος λογίζονται ως σκιώδεις τιμές στο δυικό πρόβλημα και αντίστροφα. Αντίστοιχη συμμετρία παρατηρείται μεταξύ των οικονομικών συντελεστών του ενός προβλήματος και των σταθερών όρων των περιορισμών στο άλλο. Επιπλέον, ο πίνακας τεχνολογικών συντελεστών στο δυικό πρόβλημα είναι ανεστραμμένος, ενώ αντιστρέφεται και η φορά των ανισοεξισώσεων των περιορισμών.

Τα υποδείγματα ΓΠ βασίζονται σε κάποιες υποθέσεις που σχετίζονται με τον τρόπο εξειδίκευσης τους και τα χαρακτηριστικά των χρησιμοποιούμενων παραμέτρων και μεταβλητών (McCarl & Spreen, 2004):

1. *Γραμμικότητα:* Απαιτείται η ύπαρξη σταθερά αναλογικής σχέσης μεταξύ κάθε μεταβλητής απόφασης και της τελικής τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης. Η αναλογική σχέση ισχύει και μεταξύ της τελικής τιμής της μεταβλητής απόφασης και των χρησιμοποιούμενων συντελεστών παραγωγής. Αυτό σημαίνει πως δεν λαμβάνονται υπόψη τυχόν οικονομίες κλίμακας που μπορεί να προκύψουν από τη διεύρυνση κάποιου κλάδου παραγωγής.
2. *Διαιρετότητα:* Οι μεταβλητές απόφασης και οι χρησιμοποιούμενοι συντελεστές παραγωγής είναι απεριόριστα διαιρετοί και μπορούν να εκφραστούν όχι μόνο σε ακέραιες αλλά και σε κλασματικές μονάδες.
3. *Προσθετικότητα:* Η συμβολή κάθε μεταβλητής απόφασης στην αντικειμενική συνάρτηση είναι προσθετική, δηλαδή, η αντικειμενική συνάρτηση ισούται με το άθροισμα των γινομένων των μεταβλητών απόφασης επί τους αντίστοιχους οικονομικούς συντελεστές τους. Αναλόγως, η συνολική απαιτούμενη ποσότητα κάθε παραγωγικού συντελεστή ισούται με το άθροισμα των απαιτήσεων των επιμέρους μεταβλητών απόφασης.

4. *Βεβαιότητα*: Οι τιμές των παραμέτρων του προβλήματος είναι σταθερές και εξωγενείς, δηλαδή γνωστές εκ των προτέρων, ανεξάρτητα από την τελική τιμή της μεταβλητής απόφασης.

## 1.4 Προεκτάσεις του γραμμικού προγραμματισμού

### 1.4.1 Πολλαπλά κριτήρια

Ο ΓΠ εξελίχθηκε αρχικά σαν μεθοδολογία βελτιστοποίησης μιας μόνο γραμμικής συνάρτησης αγνώστων μεταβλητών, δηλαδή ενός μοναδικού κριτηρίου απόφασης (μονοκριτήριο προγραμματισμός). Πολλοί ερευνητές ωστόσο αμφισβητούν την ορθότητα της μονοκριτηρίας υπόθεσης ως αντιπροσωπευτικής του τρόπου λήψης αποφάσεων, αφού τόσο η επιλογή δραστηριοτήτων σε επίπεδο εκμετάλλευσης όσο και η εφαρμογή ενός μίγματος πολιτικής σε περιφερειακό ή ανώτερο επίπεδο αποτελεί συνήθως συμβιβασμό μεταξύ διαφορετικών στόχων, πολλοί από τους οποίους είναι συχνά αντικρουόμενοι (Wallace & Moss, 2002; Sumpsi *et al.*, 1996). Για παράδειγμα, ο στόχος ενός αγροτικού νοικοκυριού, εκτός από τη μεγιστοποίηση του ακαθάριστου κέρδους, μπορεί να αφορά στην ελαχιστοποίηση του οικονομικού κινδύνου και τη μείωση της μισθωτής εργασίας. Παρομοίως, πολιτικές για την ανάπτυξη του αγροτικού χώρου πρέπει να αποσκοπούν στη στήριξη του γεωργικού εισοδήματος, στην προστασία του περιβάλλοντος και ταυτόχρονα στην προώθηση εναλλακτικών (της γεωργίας) μορφών απασχόλησης για τους κατοίκους της υπαίθρου. Οι παραπάνω λόγοι οδήγησαν στην ανάπτυξη μεθόδων προγραμματισμού που επιτρέπουν την εύρεση της άριστης λύσης σε ένα πολυκριτήριο πρόβλημα. Στο σημείο αυτό είναι αναγκαία η διάκριση μεταξύ των εννοιών «κριτηρίου» και «στόχου». Έτσι, το κριτήριο αποτελεί το αντικείμενο βελτιστοποίησης της αντικειμενικής συνάρτησης (π.χ. ακαθάριστο κέρδος), ενώ στόχος αναφέρεται σε μια επιθυμητή τιμή του κριτηρίου (Romero & Rehman, 2003).

Η παλαιότερη και ευρύτερα χρησιμοποιούμενη μέθοδος πολυκριτηρίου προγραμματισμού είναι ο «προγραμματισμός στόχων» (goal programming) που συνίσταται στην έκφραση των πολλαπλών στόχων ως το δεξί μέρος σε περιορισμούς εξισώσεων, στους οποίους προστίθενται δυο επιπλέον μεταβλητές που αντιπροσωπεύουν τη θετική και την αρνητική απόκλιση της τελικής τιμής κάθε περιορισμού από το ζητούμενο στόχο. Η αντικειμενική συνάρτηση αφορά στην επιλογή των κατάλληλων τιμών κάθε μεταβλητής απόφασης προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι αποκλίσεις αυτές (π.χ. Weersink *et al.*, 2004; Dorward, 1999).

Μια διαφορετική μέθοδος πολυκριτηρίου προγραμματισμού αποτελεί ο «προγραμματισμός πολλαπλών στόχων» (multi-objective programming – MOP), ο οποίος επιχειρεί την εύρεση μιας άριστης τιμής ταυτόχρονα σε περισσότερες από μια αντικειμενικές συ-



ναρτήσεις. Λόγω της φύσης του προβλήματος, ο σκοπός του αναλυτή δεν είναι η εύρεση μια μοναδικής άριστης λύσης αλλά ενός συνόλου εφικτών και κατά Pareto αποτελεσματικών λύσεων, χωρίς ωστόσο να προσδιορίζεται ποια είναι η άριστη (Rehman & Romero, 1993). Το σύνολο των εφικτών λύσεων μπορεί να παραχθεί από ένα υπόδειγμα παραμετρικής βελτιστοποίησης κάθε στόχου ξεχωριστά, κρατώντας τους υπολοίπους ως περιορισμούς με διαφορετικό σταθερό μέρος σε κάθε επίλυση («μέθοδος περιορισμών» – constraint method). Εναλλακτικά, οι διαφορετικοί στόχοι μπορούν να εισαχθούν στην αντικειμενική συνάρτηση μαζί με ένα συντελεστή «στάθμισης» που αντιπροσωπεύει την προτεραιότητα υλοποίησης τους, ενώ το σύνολο των εφικτών λύσεων παράγεται από την παραμετρική επίλυση του προβλήματος με συνεχείς αλλαγές των τιμών στάθμισης κάθε στόχου («μέθοδος των βαρών» – weighting method).

Όπως γίνεται αντιληπτό, η γνώση της στάθμισης που ο παραγωγός αντιστοιχεί σε κάθε στόχο επιτρέπει την απευθείας επίλυση ενός προβλήματος MOP, χωρίς αρχικά την παραγωγή του εφικτού συνόλου λύσεων. Στην περίπτωση αυτή, η αντικειμενική συνάρτηση αντιστοιχεί σε μια συνάρτηση «χρησιμότητας πολλαπλών ιδιοτήτων» (multi-attribute utility – MAU) που αποτελεί το σταθμισμένο άθροισμα των διαφορετικών στόχων. Κάτι τέτοιο όμως παρουσιάζει σημαντικές δυσκολίες καθώς απαιτεί τη διενέργεια επιτόπιων ερευνών (συνεντεύξεων) προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με τις προτεραιότητες των στόχων των παραγωγών και των νοικοκυριών τους.

Οι Sumpsi *et al.* (1996) αντιμετώπισαν τη δυσκολία αυτή χρησιμοποιώντας ένα υπόδειγμα προγραμματισμού στόχων για την εύρεση των βαρών εκείνων που επιτρέπουν την αναπαραγωγή (συνήθως προσεγγιστικά) της παρατηρούμενης συμπεριφοράς του παραγωγού. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία, με διάφορες παραλλαγές (π.χ. Amador *et al.*, 1998), έχει χρησιμοποιηθεί ευρύτατα σε βιο-οικονομικές αναλύσεις, όπως στη διερεύνηση των επιπτώσεων της τιμολόγησης του νερού άρδευσης στην Ιταλία (Bartolini *et al.*, 2007), στην ανάλυση του τρόπου χρήσης εισροών στην Ισπανία (Gómez-Limón *et al.*, 2004) και στην οικονομική αξιολόγηση αμειψισπορών στη Θεσσαλία (Rozakis *et al.*, 2001).

#### **1.4.2 Οικονομικός κίνδυνος**

Όπως προαναφέρθηκε, μια από τις υποθέσεις στις οποίες στηρίζονται τα υποδείγματα ΓΠ είναι η βεβαιότητα για τις τιμές των παραμέτρων του προβλήματος. Στα πλαίσια ενός υποδείγματος προγραμματισμού δραστηριοτήτων σε επίπεδο εκμετάλλευσης, αυτό μεταφράζεται σε άριστη γνώση των τιμών των προϊόντων, των αποδόσεων των καλλιεργειών και της διαθεσιμότητας των συντελεστών παραγωγής. Προφανώς πρόκειται για μια πολύ ισχυρή υπόθεση που δεν μπορεί να θεωρηθεί ρεαλιστική, καθώς στην πράξη οι τιμές των παραμέτρων αυτών παρουσιάζουν ετήσιες διακυμάνσεις εξαι-

τίας της αβεβαιότητας που αποτελεί ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της γεωργικής παραγωγής. Η ανάλυση του οικονομικού κινδύνου που διατρέχουν οι παραγωγοί ως συνέπεια της παραπάνω αβεβαιότητας πραγματοποιείται με ειδικά υποδείγματα προγραμματισμού που περιγράφονται στη συνέχεια.

Να σημειωθεί πως αν και στη βιβλιογραφία δεν υπάρχει ομοφωνία ως προς τη διαφορά μεταξύ των όρων «κίνδυνος» και «αβεβαιότητα», για τις ανάγκες της παρούσας διατριβής υιοθετείται η διάκριση που προτείνουν οι Robison και Barry (1987), ορίζοντας την «αβεβαιότητα» ως ελλιπή γνώση της πιθανότητας πραγματοποίησης ενός τυχαίου γεγονότος και «κίνδυνο» το αντίστοιχο οικονομικό αποτέλεσμα που επηρεάζει την ευημερία ενός ατόμου. Με βάση τον προηγούμενο ορισμό μπορεί να γίνει διάκριση σε δυο μορφές κινδύνου, τον «ενσωματωμένο κίνδυνο» (embedded risk) και τον «μη ενσωματωμένο κίνδυνο» (non-embedded risk) (Dorward, 1999).

Οι περιπτώσεις «ενσωματωμένου κινδύνου» αφορούν σε αβεβαιότητα που οδηγεί σε καταστάσεις οικονομικού κινδύνου, οι οποίες όμως είναι δυνατό να ελεγχτούν και να αντιμετωπιστούν από τον παραγωγό καθώς αποκτά νέες πληροφορίες για το μέγεθος της αβεβαιότητας. Για παράδειγμα, αν η τιμή μιας εισροής (π.χ. λίπασμα) μειωθεί κατά τη διάρκεια της περιόδου, ο παραγωγός μπορεί να επιλέξει την αγορά μεγαλύτερης ποσότητας από εκείνη που είχε αρχικά προβλεφθεί. Επίσης, αν το ύψος της βροχής είναι μικρότερο από το αναμενόμενο, ο παραγωγός μπορεί να αυξήσει τη συχνότητα των αρδεύσεων. Η προσομοίωση ανάλογων καταστάσεων πραγματοποιείται συνήθως με υποδείγματα που στηρίζονται στη μέθοδο του «διακριτού στοχαστικού προγραμματισμού» (discrete stochastic programming), ο οποίος αναπτύχθηκε αρχικά από τον Cocks (1968) και καθιερώθηκε αργότερα σε υποδείγματα προγραμματισμού εκμεταλλεύσεων από τον Rae (1971a; 1971b). Η μέθοδος μπορεί να θεωρηθεί ως η αλγεβρική αναπαράσταση ενός δένδρου αποφάσεων (Hardaker *et al.*, 2004) και βασίζεται στο διαχωρισμό της παραγωγικής διαδικασίας σε αριθμό σταδίων, κάθε ένα από τα οποία αντιστοιχεί σε ενδεχόμενα (καταστάσεις φύσης – states of nature) με συγκεκριμένη πιθανότητα εμφάνισης. Έτσι ο παραγωγός είναι αντιμέτωπος με μια διαδοχική σειρά αποφάσεων που αφορούν στην ποσότητα των εισροών και τον χρόνο εφαρμογής των καλλιεργητικών επεμβάσεων, το οικονομικό αποτέλεσμα των οποίων εξαρτάται από την επιλογή που έγινε σε προηγούμενο στάδιο.

Ως «μη ενσωματωμένος κίνδυνος» ονομάζεται η κατάσταση αβεβαιότητας με πιθανές οικονομικές συνέπειες που δεν μπορούν να ελεγχθούν πλήρως από τον παραγωγό. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν η διακύμανση των τιμών των αγροτικών προϊόντων και οι επικρατούσες κλιματικές συνθήκες που επηρεάζουν το δυναμικό παραγωγής μιας καλλιέργειας και κατά συνέπεια την τελική της απόδοση (Doorenbos &

Kassam, 1979). Για την εύρεση του άριστου σχεδίου παραγωγής υπό συνθήκες «μη ενσωματωμένου κινδύνου», χρησιμοποιείται συνήθως το υπόδειγμα βελτιστοποίησης της συνάρτησης προσδοκώμενης χρησιμότητας (expected utility) που παρουσιάστηκε από τον Freund (1956) και έχει τη μορφή:

$$E[U] = \bar{\mathbf{g}}^T \mathbf{x} - \frac{\varphi}{2} \sigma^2 \quad (1.1)$$

όπου  $E[U]$  η προσδοκώμενη χρησιμότητα,  $\bar{\mathbf{g}}$  το διάνυσμα ( $I \times 1$ ) προσδοκώμενου ακαθάριστου κέρδους ανά μονάδα κάθε δραστηριότητας, το οποίο θεωρείται πως ακολουθεί κανονική κατανομή,  $\mathbf{x}$  το διάνυσμα ( $I \times 1$ ) του επιπέδου παραγωγής κάθε δραστηριότητας,  $\varphi$  ένας συντελεστής που εκφράζει το βαθμό αποστροφής στον κίνδυνο και  $\sigma^2$  η διακύμανση του συνολικού ακαθάριστου κέρδους της εκμετάλλευσης που ορίζεται ως  $\sigma^2 = \mathbf{x}^T \mathbf{V} \mathbf{x}$ , όπου  $\mathbf{V}$  ο πίνακας διακύμανσης-συνδιακύμανσης των ακαθάριστων κερδών των επιμέρους δραστηριοτήτων (καλλιεργειών). Οικονομικά υποδείγματα για την ανάλυση του «μη ενσωματωμένου κινδύνου» που αντιμετωπίζουν οι παραγωγοί παρουσιάζονται λεπτομερώς στο κεφάλαιο 3.

Από τους παραπάνω ορισμούς για τις δυο μορφές οικονομικού κινδύνου, είναι φανερό πως η αντιμετώπιση του «μη ενσωματωμένου κινδύνου» αφορά σε στρατηγικές αποφάσεις που λαμβάνονται στην αρχή κάθε περιόδου και σχετίζεται με τη διακύμανση του γεωργικού εισοδήματος (Janssen & Van Ittersum, 2007). Η μείωση της διακύμανσης είναι εφικτή με τη διαφοροποίηση της παραγωγής και την επιλογή δραστηριοτήτων που παρουσιάζουν μικρή διακύμανση σε ακαθάριστο κέρδος. Αυτό σημαίνει πως ο «μη ενσωματωμένος κίνδυνος» επηρεάζει τη διάρθρωση της γεωργικής παραγωγής και κατά συνέπεια πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την ανάλυση των επιπτώσεων μέτρων αγροτικής πολιτικής. Αντίθετα, ο «ενσωματωμένος κίνδυνος» αφορά σε καταστάσεις εντός της καλλιεργητικής περιόδου που μπορούν να αντιμετωπιστούν από τον παραγωγό, εφόσον έχει πρόσβαση σε αγορές παραγωγικών συντελεστών (Dorward & Parton, 1997). Για το λόγο αυτό ο «ενσωματωμένος κίνδυνος» φαίνεται να έχει μικρό ενδιαφέρον σε βιο-οικονομικές αναλύσεις καθώς η πρόσβαση σε αγορές παραγωγικών συντελεστών μπορεί να εξασφαλίσει ένα υψηλό επίπεδο παραγωγής, περιορίζοντας τις αρνητικές συνέπειες όποιων δυσμενών καταστάσεων παρουσιαστούν κατά τη διάρκεια μια περιόδου. Επιπλέον, τα υποδείγματα διακριτού στοχαστικού προγραμματισμού είναι ιδιαίτερα απαιτητικά σε δεδομένα αφού απαιτείται η άριστη γνώση κάθε σταδίου της παραγωγικής διαδικασίας, η δε πολυπλοκότητα τους αυξάνεται με την αύξηση του αριθμού των σταδίων, χωρίς ωστόσο αυτό να προσθέτει στην αναλυτική αξία του υποδείγματος όταν αυτό χρησιμοποιείται σε αναλύσεις πολιτικής (Janssen & Van Ittersum, 2007). Αυτό αντίθετα σημαίνει πως υποδείγματα ενσωματωμένου κινδύνου παρουσιάζονται ως ιδανικά εργαλεία διαχείρισης εκμεταλλεύσεων, καθώς επιτρέπουν τη λεπτο-

μερή περιγραφή της παραγωγικής διαδικασίας και την επιλογή των κατάλληλων ενεργειών σε κάθε στάδιο.

Οι Pannell *et al.* (2000) υποστηρίζουν ότι η ανάλυση του «ενσωματωμένου κινδύνου» μπορεί να είναι εξίσου σημαντική με εκείνη του «μη ενσωματωμένου κινδύνου» γιατί ένας παραγωγός ενδιαφέρεται τόσο για την αποδοτικότητα των καλλιεργητικών παρεμβάσεων του, όσο και για την ορθότητα των ετήσιων επιλογών του στη μείωση της διακύμανσης του εισοδήματός του (επιλογή δραστηριοτήτων). Οι ίδιοι ερευνητές καταλήγουν πως η ενσωμάτωση του ενός ή και των δυο μορφών κινδύνου σε ένα υπόδειγμα εξαρτάται από τους σκοπούς της ανάλυσης και το επιθυμητό επίπεδο πολυπλοκότητας.

### **1.4.3 Λοιπές μη γραμμικές εξειδικεύσεις**

Υποδείγματα ΜΠ που χρησιμοποιούν μη γραμμικές αντικειμενικές συναρτήσεις, όπως η (1.1), ξεφεύγουν από τις κλασικές γραμμικές εξειδικεύσεις και μεθόδους επίλυσης και ονομάζονται υποδείγματα μη γραμμικού προγραμματισμού (ΜΓΠ), ενώ βασίζονται σε ειδικούς αλγόριθμους για την εύρεση μιας άριστης λύσης (Rardin, 2000). Εκτός από τον οικονομικό κίνδυνο, η μη γραμμικότητα στην αντικειμενική συνάρτηση μπορεί επίσης να αφορά στην επιμέρους συνάρτηση κόστους (π.χ. Petsakos & Rozakis, 2009) ή στη συνάρτηση παραγωγής, λαμβάνοντας διάφορες αλγεβρικές μορφές, όπως η τετραγωνική (Howitt, 1995b) και εκείνη σταθερής ελαστικότητας υποκατάστασης (constant elasticity of substitution – CES) (Howitt, 1995a). Άλλες εξειδικεύσεις ΜΓΠ αφορούν σε υποδείγματα που χρησιμοποιούν ενδογενείς παραμέτρους, δηλαδή παραμέτρους που λογίζονται ως μεταβλητές και η τιμή τους εξαρτάται από τις τελικές τιμές των υπολοίπων μεταβλητών απόφασης. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν τα υποδείγματα προσφοράς με ενδογενείς τιμές παραγόμενων προϊόντων, συνήθως εκείνων των οποίων η τιμή προσδιορίζεται σε τοπικό επίπεδο με βάση τους νόμους προσφοράς και ζήτησης, όπως είναι τα κτηνοτροφικά φυτά (Rozakis *et al.*, 2008). Τα υποδείγματα αυτά αντικαθιστούν την παράμετρο «τιμή» με μια αντίστροφη συνάρτηση ζήτησης και συνεπώς πρόκειται για υποδείγματα μερικής ισορροπίας, αφού η τελική τιμή του κάθε προϊόντος καθορίζεται από το σημείο ισορροπίας μεταξύ της προσφερόμενης και της ζητούμενης ποσότητας. Αυτό με τη σειρά του σημαίνει πως η αντικειμενική συνάρτηση δεν αναπαριστά πλέον το ακαθάριστο κέρδος των παραγωγών, αλλά αποτελεί ένα μέτρο του κοινωνικού πλεονάσματος που επιτυγχάνεται από την ισορροπία στην αγορά των προϊόντων με ενδογενή τιμή πώλησης (McCarl & Spreen, 1980).

Βιο-οικονομικά υποδείγματα με μη γραμμικές αντικειμενικές συναρτήσεις – κυρίως συναρτήσεις παραγωγής ή απόδοσης – είναι ιδιαίτερα συνηθισμένα στη βιβλιογραφία, καθώς η αντίδραση των καλλιεργειών στις βασικότερες εισροές (μεταβολές της απόδο-

σης σε μεταβολές των ποσοτήτων νερού και αζώτου) θεωρείται από πολλούς ερευνητές πως είναι μη γραμμική. Για παράδειγμα, τετραγωνικές συναρτήσεις απόδοσης ως προς το νερό έχουν προταθεί από τους Tsur και Dinar (1997), εκθετικές συναρτήσεις ως προς το άζωτο από τους Godard *et al.* (2008), ενώ ο Paris (1992) προτείνει τη συνάρτηση Von Liebig στην περίπτωση περισσοτέρων της μιας εισροής. Η χρήση μη γραμμικών συναρτήσεων απόδοσης σε υποδείγματα ΜΠ αποτελεί μια από τις κυριότερες μεθόδους σύζευξης βιο-φυσικών και οικονομικών υποδειγμάτων και αναλύεται στην ενότητα 1.6, όπου επίσης γίνεται η διάκριση μεταξύ των συναρτήσεων παραγωγής και απόδοσης.

#### **1.4.4 Δυναμικά υποδείγματα προγραμματισμού**

Όλες οι εξειδικεύσεις υποδειγμάτων ΜΠ που αναλύθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους αφορούν σε στατικά υποδείγματα, δηλαδή αναφέρονται σε μια συγκεκριμένη περίοδο αναφοράς (ή έτος βάσης) – συνήθως εκείνη από την οποία προέρχονται τα δεδομένα για την κατασκευή του υποδείγματος – και συνεπώς δεν λαμβάνουν υπόψη τον παράγοντα «χρόνο». Αντίθετα, τα «δυναμικά» υποδείγματα περιλαμβάνουν μεταβλητές ή παραμέτρους που είναι συναρτήσεις του χρόνου, με αποτέλεσμα να λαμβάνουν διαφορετικές τιμές σε κάθε περίοδο. Η χρονική διαφοροποίηση στις τιμές των μεταβλητών και των παραμέτρων μπορεί να αφορά μεταξύ άλλων σε χρηματικές ροές, σε αμειψισπορές με καθορισμένη σειρά καλλιέργειών, στην εξάντληση ενός μη ανανεώσιμου φυσικού πόρου ή σε αρνητικές εξωτερικές οικονομίες (negative externalities) που εμφανίζονται με χρονική υστέρηση σε σχέση με τη δραστηριότητα που τις προκάλεσε (McCarl & Spreen, 2004).

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η πραγματοποίηση επενδύσεων, δηλαδή η αύξηση του μονίμου και ημιμονίμου κεφαλαίου μιας εκμετάλλευσης που πλέον απαιτεί τον υπολογισμό των συνολικών δαπανών και τη δέσμευση του παραγωγού καθ' όλη τη διάρκεια ζωής της επένδυσης. Τυπική επένδυση στα πλαίσια βιο-οικονομικών υποδειγμάτων είναι η αλλαγή του συστήματος άρδευσης (π.χ. από καταιονισμό σε στάγδην), για την οποία, πέρα από το κόστος εγκατάστασης και το ετήσιο κόστος χρήσης, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η απόσβεση της επένδυσης. Να σημειωθεί πως αν και η χρήση δυναμικών υποδειγμάτων ενδείκνυται για τη προσομοίωση επενδυτικών αποφάσεων, αυτό είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί και σε στατικό πλαίσιο με το συνυπολογισμό ενός ισοδύναμου προκαταβλητέου ετήσιου συνολικού κόστους που αφαιρείται από τον οικονομικό συντελεστή κάθε μεταβλητής απόφασης (Kampas *et al.*, 2010).

Οι αμειψισπορές αποτελούν άλλο ένα παράδειγμα απόφασης με επιπτώσεις στις επιλογές των επόμενων περιόδων, αφού ο παραγωγός δεσμεύεται σε ένα προκαθορισμένο σχέδιο καλλιεργητικών αλληλουχιών. Σε ένα πιο αυστηρά μαθηματικό πλαίσιο, ωστόσο,

το σχέδιο των αμειψισπορών μπορεί να είναι μεταβλητό και να επιλέγεται σε κάθε περίοδο χρησιμοποιώντας στοχαστικές μεθόδους μέσα από ένα πεπερασμένο σύνολο συνδυασμών καλλιεργειών (Castellazzi *et al.*, 2008). Αμειψισπορές μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε στατικά υποδείγματα, είτε με τη μορφή περιορισμών (Hazell & Norton, 1986), είτε με τη μορφή μεταβλητών απόφασης των οποίων ο οικονομικός συντελεστής (ακαθάριστο κέρδος) καθορίζεται κατά την αρχική περίοδο με βάση τις εκτιμήσεις ή/και τις προσδοκίες του παραγωγού για τις τιμές και τις αποδόσεις των καλλιεργειών της αμειψισποράς (Rozakis *et al.*, 2001).

Οι Janssen και Van Ittersum (2007)<sup>2</sup> διακρίνουν τρεις κατηγορίες δυναμικών βιοοικονομικών υποδειγμάτων, ανάλογα με τον τρόπο που λαμβάνεται υπόψη ο παράγοντας «χρόνος». Η πιο απλή μορφή είναι τα «διαχρονικά υποδείγματα» (inter-temporal models), στα οποία επιδιώκεται η βελτιστοποίηση μιας αντικειμενικής συνάρτησης για το σύνολο των περιόδων της ανάλυσης (π.χ. Pandey & Hardaker, 1995). Αντίθετα, τα «περιοδικά επαναλαμβανόμενα υποδείγματα» (recursive models) στοχεύουν στη βελτιστοποίηση αριθμού αντικειμενικών συναρτήσεων, κάθε μια από τις οποίες αντιπροσωπεύει μια διαφορετική περίοδο, με την άριστη λύση να εξαρτάται κάθε φορά από την αντίστοιχη της προηγούμενης περιόδου (π.χ. Wallace & Moss, 2002). Στα «δυναμικά περιοδικά επαναλαμβανόμενα υποδείγματα» (dynamic recursive models), τα οποία αποτελούν ένα συνδυασμό των δυο προηγούμενων, επιδιώκεται η βελτιστοποίηση μιας μοναδικής αντικειμενικής συνάρτησης, λαμβάνοντας όμως υπόψη τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ διαδοχικών περιόδων (π.χ. Barbier & Bergeron, 1999).

## 1.5 Βιο-φυσικά υποδείγματα καλλιεργειών

### 1.5.1 Γενικά χαρακτηριστικά βιο-φυσικών υποδειγμάτων

Όπως προαναφέρθηκε, τα αγρονομικά δεδομένα που χρησιμοποιούνται σε βιοοικονομικά υποδείγματα προέρχονται συνήθως από εξειδικευμένα βιο-φυσικά υποδείγματα προσομοίωσης της ανάπτυξης των καλλιεργειών, τα οποία συνδέουν την τελική απόδοση με τα εδαφοκλιματικά χαρακτηριστικά του αγρού και την ένταση χρήσης των παραγωγικών συντελεστών (νερό και θρεπτικά στοιχεία). Τα υποδείγματα αυτά είναι δυναμικά, καθώς λαμβάνουν υπόψη τον παράγοντα «χρόνος», με αποτέλεσμα να προσομοιώνουν την πορεία της ανάπτυξης του φυτού σε κάθε στιγμή της βλαστικής περιόδου. Αυτό σημαίνει πως η μαθηματική αναπαράσταση των διαφόρων βιο-φυσικών δια-

---

<sup>2</sup> Στο άρθρο τους, οι Janssen και van Ittersum (2007) διακρίνουν μια τέταρτη κατηγορία δυναμικών υποδειγμάτων που ονομάζουν «στοχαστικό προγραμματισμό» (stochastic programming). Πρόκειται για υποδείγματα που βασίζονται στον «διακριτό στοχαστικό προγραμματισμό» του Cocks (1968), τα οποία όμως δεν προσομοιώνουν τη διαχρονική επιλογή σε βάθος πολλών περιόδων, αλλά στοχεύουν στην επίλυση διαδοχικών προβλημάτων απόφασης με αβέβαια αποτελέσματα εντός της ίδιας περιόδου και συνεπώς δεν μπορούν να συγκριθούν με τις υπόλοιπες τρεις κατηγορίες δυναμικών υποδειγμάτων.

δικασιών στο σύστημα φυτό-έδαφος βασίζεται σε συστήματα είτε διαφορικών εξισώσεων είτε εξισώσεων διαφορών. Στην πρώτη περίπτωση ο χρόνος λογίζεται ως συνεχής μεταβλητή, ενώ στη δεύτερη ως ακέραιη μονάδα. Για παράδειγμα, ο ρυθμός αύξησης της φυτικής βιομάζας,  $dw/dt$  ( $g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ ), στα αρχικά στάδια της βλαστικής περιόδου εκφράζεται συχνά με τη διαφορική εξίσωση  $dw/dt = r_m \times w$ , όπου  $t$  ο χρόνος σε ημέρες ( $d$ ),  $r_m$  ο σχετικός ρυθμός αύξησης ( $g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ ) και  $w$  η φυτική βιομάζα σε δεδομένη χρονική στιγμή ( $g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ ) (Goodriaan & Van Laar, 1994). Αντίθετα, η ημερήσια μεταβολή της εδαφικής υγρασίας στο ριζόστρωμα υπολογίζεται σε διακριτό χρόνο και μπορεί να εκφραστεί στην πιο απλή μορφή της με το ακόλουθο σύστημα εξισώσεων διαφορών:

$$\Delta Dr_d = ETc_d - IR_d - P_d$$

όπου  $\Delta Dr_d$  η μεταβολή της υγρασίας την ημέρα  $d$ ,  $ETc_d$  είναι η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας,  $IR_d$  η ποσότητα του νερού άρδευσης, και  $P_d$  το ύψος της βροχόπτωσης, όλα μετρούμενα σε mm.

Ο δυναμικός χαρακτήρας των βιο-φυσικών υποδειγμάτων καθιστά σαφές πως πρόκειται για πολύπλοκες μαθηματικές κατασκευές που απαιτούν τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή και γνώσεις προγραμματισμού. Επίσης, η χρησιμοποίηση ημερήσιων (ή και μικρότερων χρονικά) βημάτων για την προσομοίωση των βιο-φυσικών διαδικασιών φανερώνει έμμεσα και το πλήθος των αναγκαίων κλιματικών, εδαφικών και γενετικών δεδομένων για την εξειδίκευση ενός υποδείγματος. Έτσι, ως ελάχιστα κλιματικά δεδομένα θεωρούνται οι ημερήσιες τιμές μέσης, μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας, ενώ συχνά απαιτούνται δεδομένα και για την ατμοσφαιρική υγρασία και την ταχύτητα του αέρα. Τα απαραίτητα δεδομένα για το έδαφος στο οποίο αναπτύσσεται το φυτό αφορούν συνήθως στην περιεκτικότητα οργανικής ουσίας, στη μηχανική σύσταση των στρωμάτων του ριζοστρώματος και στα διάφορα επίπεδα εδαφικής υγρασίας που είναι κρίσιμα για τον προγραμματισμό των αρδεύσεων (σημείο κορεσμού, υδατοϊκανότητα και σημείο μόνιμης μάρανσης). Τα γενετικά δεδομένα αναφέρονται σε φαινολογικές και φυσιολογικές πληροφορίες σχετικά με την ανάπτυξη των φυτών, όπως το μέγιστο ύψος τους, ο τρόπος ανάπτυξης και το μήκος του ριζικού συστήματος, η φωτοσυνθετική οδός που ακολουθούν (C-3 και C-4 για γεωργικές καλλιέργειες) και η διάρκεια κάθε σταδίου της βλαστικής περιόδου (σε ημέρες ή βαθμοημέρες).

Κάθε βιο-φυσικό υπόδειγμα προσομοιώνει με περισσότερο ή λιγότερο αναλυτικό τρόπο σημαντικές βιολογικές και χημικές διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα στο σύστημα έδαφος-φυτό, όπως η φαινολογική ανάπτυξη, η ανάπτυξη της φυλλοστοιβάδας και του ριζικού συστήματος, ο σχηματισμός των φυτικών οργάνων, η φωτοσύνθεση και η αφομοίωση του διοξειδίου του άνθρακα και τέλος τα ισοζύγια νερού αζώτου και άνθρακα.

Οι διαδικασίες αυτές αποτελούν ανεξάρτητα, αλλά αλληλοσυνδεόμενα κομμάτια του υπερκείμενου βιο-φυσικού υποδείγματος και η αναλυτικότητα τους εξαρτάται από τους αντικειμενικούς σκοπούς τους υποδείγματος (Jame & Cutforth, 1996).

Οι Van Ittersum *et al.* (2003) διακρίνουν τρεις σκοπούς για τους οποίους επιδιώκεται η κατασκευή ενός βιο-φυσικού υποδείγματος. Ο πρώτος είναι η καλύτερη κατανόηση ενός φαινομένου ή μιας βιολογικής λειτουργίας του φυτού (π.χ. φωτοσύνθεση ή υδατική καταπόνηση). Στην περίπτωση αυτή, η προσομοίωση απαιτείται να είναι ιδιαίτερα ακριβής, προκειμένου να ελεγχθούν ερευνητικές υποθέσεις σχετικά με την επίδραση διαφόρων παραγόντων στο υπό διερεύνηση αντικείμενο. Υποδείγματα που ως στόχο είχαν τον εμπλουτισμό της επιστημονικής γνώσης σχετικά με τις βιολογικές λειτουργίες και τον τρόπο ανάπτυξης των φυτών αποτέλεσαν ιστορικά την πρώτη μορφή βιο-φυσικών υποδειγμάτων. Κομβικό σημείο αποτέλεσε η ποσοτικοποίηση της φωτοσυνθετικής ικανότητας των φύλλων από τον De Wit (1965), εξέλιξη η οποία έδωσε το έναυσμα για την ανάπτυξη των πρώτων δυναμικών βιο-φυσικών υποδειγμάτων στο πανεπιστήμιο Wageningen κατά τα τέλη της δεκαετίας του '60 και τη δεκαετία του '70, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για καθαρά ερευνητικούς σκοπούς. Τυπικά παραδείγματα αυτών των πρώτων προσπαθειών αποτελούν τα BACROS (Basic CROp growth Simulator), το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη της διαπνοής και της αύξησης διαφόρων καλλιεργειών υπό ιδανικές αγρονομικές συνθήκες, και το PHOTON (PHOTOSynthesis and transpiratioN) που χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη της φωτοσύνθεσης, της αναπνοής και της διαπνοής (Bouman *et al.*, 1996).

Στα παραπάνω υποδείγματα, τα οποία ονομάζονται «μηχανιστικά», η προσομοίωση των βιο-φυσικών διαδικασιών βασίζεται στην υπάρχουσα επιστημονική γνώση και εκφράζει τη σχέση αιτίου-αποτελέσματος μεταξύ των εμπλεκόμενων μεταβλητών (Teh, 2006). Επιπλέον χαρακτηριστικό τους είναι η ιεραρχική δομή, αφού τα αποτελέσματα σε υψηλότερο ιεραρχικό επίπεδο αποτελούν σύνθεση των διαδικασιών σε χαμηλότερο επίπεδο. Αποτέλεσμα είναι ο μεγάλος αριθμός απαιτούμενων παραμέτρων και η χρήση χρονικών διαστημάτων μικρότερων της ημέρας για την αναλυτική προσομοίωση κάθε ερευνώμενης βιο-φυσικής διαδικασίας. Για παράδειγμα, η ημερήσια συσσώρευση υδατανθράκων μπορεί να οριστεί ως το σύνολο της φωτοσυνθετικής ικανότητας κάθε φύλλου σε διάφορα ύψη της φυλλοστοιβάδας και ώρες της ημέρας και υπολογίζεται με μεθόδους ολοκληρωτικού λογισμού (De Wit, 1965).

Ο δεύτερος γενικός σκοπός κατασκευής ενός βιο-φυσικού υποδείγματος σύμφωνα με τους Van Ittersum *et al.* (2003) είναι η υποβοήθηση στη διαδικασία λήψης επιχειρησιακών αποφάσεων στο γεωργικό τομέα και συγκεκριμένα στη χρήση της γης, αφού τα βιο-φυσικά υποδείγματα μπορούν να προβλέψουν με σχετική ακρίβεια την πιθανή



απόδοση καλλιεργειών και την ένταση της χρήσης των παραγωγικών συντελεστών. Στην περίπτωση αυτή τα υποδείγματα ονομάζονται «εμπειρικά» γιατί οι βιο-φυσικές διαδικασίες εκφράζονται ως εμπειρικές σχέσεις που προκύπτουν στατιστικά από παρατηρήσεις ή από αποτελέσματα μηχανιστικών υποδειγμάτων, χωρίς όμως να είναι φανερή σχέση αιτίου-αποτελέσματος που τις διέπει (Teh, 2006). Χαρακτηρίζονται επίσης ως «μαύρα κουτιά» (black boxes) γιατί οι παράμετροι που προσδιορίζουν μια εμπειρική σχέση – και συνεπώς καθορίζουν την αξία του υποδείγματος – είναι πέρα από τον έλεγχο του χρήστη (Sinclair & Seligman, 2000). Να σημειωθεί ωστόσο πως η σαφής διάκριση μεταξύ μηχανιστικών και εμπειρικών υποδειγμάτων δεν είναι δυνατή, καθώς όλα τα υποδείγματα ενσωματώνουν εμπειρικές σχέσεις σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό για να περιγράψουν βιο-φυσικές διαδικασίες, ιδιαίτερα στα κατώτερα ιεραρχικά επίπεδα (Jame & Cutforth, 1996).

Χαρακτηριστικό των εμπειρικών βιο-φυσικών υποδειγμάτων είναι η δυνατότητα γενίκευσης τους, δηλαδή η προσαρμογή των υποκείμενων σχέσεων που περιγράφουν τις διάφορες βιολογικές διαδικασίες, επιλέγοντας κάθε φορά κατάλληλες τιμές για τις χρησιμοποιούμενες παραμέτρους, προκειμένου να είναι δυνατή η προσομοίωση μεγάλου αριθμού καλλιεργειών. Ο λόγος για τον οποίο επιδιώκεται αυτή η απλοποίηση είναι η ενθάρρυνση της χρήσης των υποδειγμάτων και από άτομα (ή οργανισμούς) που δεν σχετίζονται με την γεωπονική επιστήμη αλλά προέρχονται από άλλα αντικείμενα, όπως η οικονομία και οι περιβαλλοντικές επιστήμες (Steduto *et al.*, 2008). Για τον ίδιο λόγο, τα υποδείγματα αυτά είναι λιγότερο απαιτητικά σε δεδομένα σε σχέση με τα αντίστοιχα μηχανιστικά, αφού περιορίζονται συχνά σε ημερήσια ή μηνιαία εδαφοκλιματικά στοιχεία και προσφέρουν την επιλογή προκατασκευασμένων προτύπων καλλιεργειών ή φυτειών.

Τέλος, βιο-φυσικά υποδείγματα μπορούν να κατασκευαστούν και για διδακτικούς σκοπούς. Όπως και εκείνα που αποσκοπούν στην υποβοήθηση λήψης επιχειρησιακών αποφάσεων, έτσι και τα βιο-φυσικά υποδείγματα που χρησιμοποιούνται στην εκπαίδευση οφείλουν να είναι ιδιαίτερα απλά προκειμένου να διευκολύνουν την κατανόηση της επίδρασης των διαφόρων βιολογικών και κλιματικών παραγόντων στην ανάπτυξη των φυτών (Van Dam *et al.*, 1997).

### **1.5.2 Μηχανές αύξησης**

Θεμελιώδες κομμάτι κάθε βιο-φυσικού υποδείγματος αποτελεί η «μηχανή αύξησης» (growth engine), δηλαδή το εξειδικευμένο κομμάτι του υποδείγματος από το οποίο εξαρτάται ο τρόπος προσομοίωσης εκείνων των βιολογικών διαδικασιών που καθορίζουν τον ρυθμό αύξησης της κάθε καλλιέργειας. Ο Steduto (2006) διακρίνει τρεις μεγάλες κατηγορίες υποδειγμάτων ανάλογα με το μηχανισμό αύξησης που ενσωματώνουν:

(α) η τελική βιομάζα καθορίζεται από την ημερήσια συσσώρευση υδατανθράκων, ως αποτέλεσμα της φωτοσυνθετικής διαδικασίας των φύλλων και της αφομοίωσης του διοξειδίου του άνθρακα (carbon-driven growth engines), (β) η τελική βιομάζα υπολογίζεται ως συνάρτηση της συνολικής προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (solar-driven growth engines) και (γ) η τελική βιομάζα υπολογίζεται ως συνάρτηση της συνολικής διαπνοής του φυτού (water-driven growth engines).

Από τις τρεις αυτές κατηγορίες μηχανών αύξησης, εκείνη που βασίζεται στη συσσώρευση υδατανθράκων είναι η πολυπλοκότερη αλλά ταυτόχρονα και η πιο αναλυτική, αφού ακολουθεί μια αυστηρή ιεραρχική δομή. Ειδικότερα, η ημερήσια συσσώρευση υδατανθράκων, παραγώγων της φωτοσύνθεσης, μπορεί να υπολογιστεί από το ρυθμό αφομοίωσης σε κάθε τμήμα της φυλλοστοιβάδας (De Wit, 1965), ενώ η ποσοτική έκφραση, με τη χρήση κατάλληλων συντελεστών για την αναπνοή αύξησης και την αναπνοή διατήρησης που λαμβάνει χώρα στα διάφορα φυτικά όργανα (φύλλα, ρίζα, βλαστός, όργανα καρποφορίας), επιτρέπει τον υπολογισμό της ημερήσιας συνολικής αύξησης της φυτικής βιομάζας (Goodriaan & Van Laar, 1994). Το μειονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι, φυσικά, η πολυπλοκότητα της και η αβεβαιότητα σχετικά με την πραγματική τιμή των πολυάριθμων παραμέτρων που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό τόσο της φωτοσύνθεσης όσο και της αναπνοής. Μηχανή αύξησης βασιζόμενη στη συσσώρευση υδατανθράκων χρησιμοποιούν τα βιο-φυσικά υποδείγματα που αναπτύχθηκαν τις τελευταίες δεκαετίες στο πανεπιστήμιο Wageningen της Ολλανδίας, όπως είναι τα SUCROS (Simple and Universal CRop Simulator ) και WOFOST (WORld FOod STudies) (Van Ittersum *et al.*, 2003).

Η μηχανή αύξησης που βασίζεται στην έκφραση της τελικής βιομάζας ως συνάρτηση της συνολικής προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας ακολουθεί παρόμοια προσέγγιση με εκείνα της πρώτης κατηγορίας, ωστόσο είναι απλούστερη, αφού δεν προσομοιώνονται λεπτομερώς οι βιολογικές διαδικασίες με ιεραρχικό τρόπο. Αντίθετα, για τον υπολογισμό της τελικής βιομάζας χρησιμοποιείται η γραμμική εμπειρική σχέση του Monteith (1977):

$$BM = R \times \varepsilon \quad (1.2)$$

όπου με  $BM$  συμβολίζεται η τελική βιομάζα ανά μονάδα επιφανείας ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ),  $R$  είναι η συνολική ακτινοβολία ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ) και  $\varepsilon$  ένας συντελεστής ( $\text{kg}\cdot\text{MJ}^{-1}$ ) που ονομάζεται «αποδοτικότητα χρήσης της ακτινοβολίας» (Radiation Use Efficiency – RUE) και ενσωματώνει όλες τις ενδιάμεσες διαδικασίες από τη φωτοσύνθεση έως την αύξηση της ξηράς ουσίας του φυτού. Πλεονεκτήματα αυτής της μηχανής αύξησης είναι ο περιορισμένος αριθμός απαιτούμενων παραμέτρων και η ευκολία υπολογισμού του  $\varepsilon$ , καθώς η

τιμή του παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια της βλαστικής περιόδου και υπό ιδανικές αγρονομικές συνθήκες. Ωστόσο, σε συνθήκες έλλειψης νερού ή θρεπτικών συστατικών η (1.2) χάνει τη γραμμικότητα της, ενώ οι διακυμάνσεις που παρατηρούνται στην τιμή του  $\varepsilon$  μεταξύ καλλιεργειών, τοποθεσιών και καλλιεργητικών περιόδων, καθιστούν δύσκολη τη γενίκευση της για χρήση πέρα από το επίπεδο του αγρού από τον οποίο προήλθε (Steduto, 2006). Γνωστά βιο-φυσικά υποδείγματα που χρησιμοποιούν τη συγκεκριμένη μηχανή αύξησης είναι τα CropSyst (Stöckle *et al.*, 2003), STICS (Simulateur mulTIdisciplinaire pour les Cultures Standard) (Brisson *et al.*, 2003) και EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator) (Jones *et al.*, 1991).

Η τρίτη κατηγορία μηχανών αύξησης διαφέρει εντελώς από την προσέγγιση των δυο προηγούμενων, καθώς ο υπολογισμός της τελικής φυτικής βιομάζας δεν στηρίζεται στη μετατροπή των προϊόντων της φωτοσύνθεσης σε ξηρά ουσία, αλλά στην παρατήρηση πολλών ερευνητών (π.χ. Hanks, 1983) ότι υφίσταται μια γραμμική σχέση μεταξύ της τελικής βιομάζας και της διαπνοής του φυτού:

$$BM = T \times Wp \quad (1.3)$$

όπου  $BM$  η τελική βιομάζα ανά μονάδα επιφανείας ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ),  $T$  η συνολική διαπνοή (mm) και  $Wp$  ο «δείκτης αποδοτικότητας νερού» (water productivity) ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$ ). Όπως η (1.2), έτσι και η σχέση (1.3) είναι εμπειρική, κάτι που σημαίνει πως δεν προσομοιώνονται λεπτομερώς οι βιολογικές διαδικασίες με ιεραρχικό τρόπο. Ωστόσο θεωρείται πως προσφέρει μεγαλύτερη σταθερότητα, αφού παρουσιάζει μικρότερες διακυμάνσεις μεταξύ παρατηρούμενων και προβλεπόμενων τιμών της φυτικής βιομάζας, ακόμα και σε περιπτώσεις υδατικής καταπόνησης ή υψηλής αλατότητας. Επιπλέον, η δυνατότητα τυποποίησης (normalization) της τιμής της διαπνοής, διαιρώντας με την εξατμισοδιαπνοή του φυτού, η οποία αντιπροσωπεύει την εξατμιστική δύναμη της ατμόσφαιρας, επιτρέπει τη γενίκευση της (1.3) για χρήση σε διαφορετικές τοποθεσίες και υπό διαφορετικές κλιματικές συνθήκες. Αντίθετα, ως μειονέκτημα θεωρείται η δυσκολία υπολογισμού της διαπνοής του φυτού (Steduto, 2006), καθώς αυτή υπολογίζεται συνήθως ως εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας, δηλαδή ταυτόχρονα με την εξατμηση που προκαλεί η ίδια ποσότητα ακτινοβολίας (Allen *et al.*, 1998). Στη βιβλιογραφία υπάρχουν μόνο δυο βιο-φυσικά υποδείγματα που χρησιμοποιούν μηχανή ανάπτυξης βασισμένη στη σχέση βιομάζας-διαπνοής του φυτού. Πρόκειται για το CropSyst (Stöckle *et al.*, 2003)<sup>3</sup> και το AquaCrop (Steduto *et al.*, 2009; Steduto *et al.*, 2008).

---

<sup>3</sup> Το CropSyst προσφέρει στο χρήστη την επιλογή μεταξύ μηχανής αύξησης βιομάζας-ηλιακής ακτινοβολίας και βιομάζας-διαπνοής.

## 1.6 Σύνδεση οικονομικών και βιο-φυσικών υποδειγμάτων και παραδείγματα βιο-οικονομικών αναλύσεων

Από τις προηγούμενες παραγράφους είναι φανερό πως τα βιο-φυσικά υποδείγματα αποτελούν πολύπλοκες μαθηματικές διατυπώσεις που βασίζονται στην επιστημονική γνώση για να αναπαραστήσουν με ρεαλιστικό τρόπο το σύστημα φυτό-έδαφος-ατμόσφαιρα και να προβλέψουν με σχετική ακρίβεια τις τελικές αποδόσεις των καλλιεργειών. Ωστόσο, λόγω του γεωγραφικά αυστηρού σημειακού τους χαρακτήρα, από τον οποίο εξαρτάται η τιμή των περισσοτέρων παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση των επιμέρους βιο-φυσικών διαδικασιών, η χρήση τους σε επιστημονικά πεδία εκτός της γεωπονίας συναντά προβλήματα. Ειδικότερα, τα χρησιμοποιούμενα εδαφοκλιματικά δεδομένα αναφέρονται σε συγκεκριμένη γεωγραφική τοποθεσία (αγρός) και δεν λαμβάνουν υπόψη τη χωρική ετερογένεια κρίσιμων παραμέτρων όπως τα χαρακτηριστικά του εδάφους και το μικροκλίμα. Αυτό σημαίνει πως τα αποτελέσματα ενός βιο-φυσικού υποδείγματος δεν μπορούν να γενικευθούν για να αντιπροσωπεύσουν μια ευρύτερη γεωγραφική περιοχή, παρά μόνο υπό ισχυρές υποθέσεις σχετικά με τη φύση των χρησιμοποιούμενων δεδομένων (ομοιογένεια χαρακτηριστικών του εδάφους και κλιματικών συνθηκών).

Για την οικονομική επιστήμη, αυτή η έλλειψη χωρικής διάστασης αποτελεί σημαντικό μειονέκτημα καθώς σκοπός κάθε γεωργοοικονομολόγου ή περιβαλλοντικού οικονομολόγου είναι η γενίκευση των αποτελεσμάτων του βιο-φυσικού υποδείγματος σε ανώτερο γεωγραφικό επίπεδο από τον αγρό (τοπικό, περιφερειακό, κλπ.), προκειμένου να χρησιμεύσουν ως δεδομένα σε οικονομικές αναλύσεις. Επίσης, παρά την απλότητα χρήσης που προσφέρεται από πολλά βιο-φυσικά υποδείγματα, αυτά δεν παύουν να αποτελούν «μαύρα κουτιά» που δεν επιτρέπουν την κατανόηση των υποκείμενων φαινομένων, ενώ ταυτόχρονα απαιτούν σημαντικό αριθμό παραμέτρων, διαθέσιμων συνήθως μόνο σε όσους έχουν εξειδικευμένες γεωπονικές γνώσεις. Τα προβλήματα αυτά καθιστούν σαφές πως η αξιοποίηση αγρονομικών πληροφοριών στα πλαίσια βιο-οικονομικών αναλύσεων απαιτεί μια διεπιστημονική προσέγγιση για την εύρεση των κατάλληλων μεθόδων σύζευξης βιο-φυσικών και οικονομικών υποδειγμάτων και την αύξηση της αξιοπιστίας των εξαγόμενων αποτελεσμάτων.

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό πως η σύζευξη περιλαμβάνει δυο συνιστώσες. Η πρώτη αφορά στη διαδικασία γενίκευσης των αποτελεσμάτων του βιο-φυσικού υποδείγματος πέρα από το επίπεδο του αγρού και η δεύτερη αφορά στον τρόπο ενσωμάτωσης αυτών των αγρονομικών πληροφοριών στο οικονομικό υπόδειγμα. Η πρώτη απαίτηση συνήθως καλύπτεται με τη διατύπωση της υπόθεσης περί ομοιογενών εδαφοκλιματικών χαρακτηριστικών για όλες τις καλλιέργειες σε κάθε εκμετάλλευση.

Εναλλακτικά, και εφόσον υπάρχει διαθεσιμότητα ανάλογων στοιχείων, μπορεί να αντιστοιχηθεί διαφορετικό σύνολο εδαφοκλιματικών δεδομένων σε κάθε εκμετάλλευση ή ομάδα εκμεταλλεύσεων, για κάθε μια από τις οποίες ισχύει πάντα η υπόθεση της ομοιογένειας.

Σχετικά με τη δεύτερη συνιστώσα, στη βιβλιογραφία διακρίνονται δυο γενικές μέθοδοι με τις οποίες μπορούν να ενσωματωθούν αγρονομικές πληροφορίες σε ένα οικονομικό υπόδειγμα ΜΠ. Η πρώτη αφορά στη χρήση του βιο-φυσικού υποδείγματος για την εξειδίκευση συγκεκριμένων παραμέτρων, όπως οι οικονομικοί συντελεστές των μεταβλητών απόφασης στην αντικειμενική συνάρτηση, οι τεχνικοί συντελεστές των περιορισμών (τα στοιχεία του πίνακα **A**), ή/και το δεξί μέρος αυτών (διάνυσμα **b**). Για παράδειγμα, οι Taylor *et al.* (1992) χρησιμοποιούν το βιο-φυσικό υπόδειγμα EPIC και ένα υπόδειγμα ΓΠ βελτιστοποίησης του ακαθάριστου κέρδους πέντε αντιπροσωπευτικών (ως προς την παραγωγική κατεύθυνση και το είδος εδάφους) εκμεταλλεύσεων στην κοιλάδα Willamette του Όρεγκον, προκειμένου να μελετήσουν την αποτελεσματικότητα διαφόρων μέτρων πολιτικής στη μείωση της ρύπανσης από τη χρήση φωσφορικών και αζωτούχων λιπασμάτων. Στην περίπτωση αυτή, το EPIC χρησιμοποιείται για την εκτίμηση τόσο των αποδόσεων των καλλιεργειών υπό διαφορετικές καλλιεργητικές τεχνικές (μονοκαλλιέργεια ή εντός κάποιας αμειψισποράς και με διαφορετική μέθοδο κατεργασία εδάφους κάθε φορά), όσο και του αντίστοιχου επιπέδου ρύπανσης. Τα αποτελέσματα του EPIC εισάγονται στη συνέχεια ως τεχνικοί συντελεστές στους περιορισμούς του υποδείγματος ΓΠ.

Παρόμοια προσέγγιση ακολουθούν και οι Belhouchette *et al.* (2011) που μελετούν τις επιπτώσεις της εφαρμογής της οδηγίας 91/676EC «για την προστασία των υδάτων από τη νιτρορύπανση γεωργικής προέλευσης» στην περιοχή Midi-Pyrenees της Γαλλίας, χρησιμοποιώντας το υπόδειγμα FSSIM (Farm Systems SIMulator). Το FSSIM αποτελεί ένα ολοκληρωμένο βιο-οικονομικό υπόδειγμα που κατασκευάστηκε στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος SEAMLESS-IP. Τα τελευταία είχε ως στόχο την ανάπτυξη μιας ολοκληρωμένης μεθοδολογίας για την εκτίμηση των επιπτώσεων των μέτρων γεωργικής και περιβαλλοντικής πολιτικής στις οικονομικές επιδόσεις των γεωργικών εκμεταλλεύσεων και στους δείκτες βιώσιμης (αιφορικής) ανάπτυξης (Van Ittersum *et al.*, 2008). Στην εργασία των Belhouchette *et al.* (2011), το FSSIM αποτελείται από δυο ανεξάρτητες υπομονάδες, η πρώτη από τις οποίες περιλαμβάνει το βιο-φυσικό υπόδειγμα CropSyst και η δεύτερη ένα οικονομικό υπόδειγμα ΜΠ. Το τελευταίο μεγιστοποιεί το ακαθάριστο κέρδος εκμεταλλεύσεων που ανήκουν σε δυο ομοιογενείς ομάδες, προερχόμενες από τη ευρωπαϊκή βάση δεδομένων ΔΙΓΕΛΠ (Δίκτυο Γεωργικής Λογιστικής Πληροφόρησης). Σε κάθε ομάδα εκμεταλλεύσεων αντιστοιχίστηκε ένας συγκεκριμένος τύπος εδάφους, προκειμένου να υπολογιστούν, με τη βοήθεια του

CropSyst, οι αποδόσεις και οι απώλειες νιτρικών στο έδαφος για τις κυριότερες καλλιέργειες της περιοχής μελέτης. Τα αποτελέσματα του CropSyst χρησιμοποιήθηκαν στη συνέχεια ως οικονομικοί συντελεστές στην αντικειμενική συνάρτηση (αποδόσεις) και ως τεχνικοί συντελεστές των περιορισμών (απώλειες νιτρικών) του οικονομικού υποδείγματος ΜΠ.

Οι Rozakis *et al.* (2001) παρουσιάζουν μια ανάλογη εφαρμογή, στην οποία τα αποτελέσματα ενός βιο-φυσικού υποδείγματος χρησιμοποιήθηκαν ως οικονομικοί συντελεστές δραστηριοτήτων και ως σταθερά μέρη περιορισμών ενός πολυκριτήριου υποδείγματος ΜΠ. Ειδικότερα, υπολογίστηκε το οικονομικό αποτέλεσμα και οι απαιτήσεις σε νερό και άζωτο 44 αμειψισπορών αποτελούμενων από βαμβάκι, αραβόσιτο, κριθάρι και σιτάρι, σε δυο είδη εδάφους για μια υποθετική εκμετάλλευση 70 στρεμμάτων στη περιοχή της Θεσσαλίας, με τη βοήθεια ενός βιο-φυσικού υποδείγματος βασισμένου στο SUCROS (Danalatos, 1993). Επιλύοντας παραμετρικά ένα πρόβλημα μικτού – ακέραιου ΓΠ μεγιστοποίησης του γεωργικού εισοδήματος για διαφορετικές ποσότητες διαθέσιμου νερού άρδευσης, απομονώθηκαν οι οκτώ πιο κερδοφόρες αμειψισπορές σε κάθε λύση. Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε ένα υπόδειγμα πολυκριτήριου προγραμματισμού προκειμένου να εντοπιστούν οι λύσεις εκείνες που ικανοποιούσαν καλύτερα τρεις τεθέντες στόχους, τη μεγιστοποίηση του γεωργικού εισοδήματος, την ελαχιστοποίηση τη κατανάλωσης νερού και την ελαχιστοποίηση της ρύπανσης, για την οποία χρησιμοποιήθηκε ως δείκτης η ένταση της χρήσης του αζώτου.

Η δεύτερη γενική μέθοδος σύζευξης ενός βιο-φυσικού και ενός οικονομικού υποδείγματος ΜΠ συνίσταται στην εκτίμηση κατάλληλων συναρτήσεων της γενικής μορφής (1.4) που συνδέουν τις αποδόσεις των καλλιεργειών με την ποσότητα των χρησιμοποιούμενων συντελεστών παραγωγής, *ceteris paribus*.

$$Y_i = f(x_i^n | a_i^m) \quad (1.4)$$

Σε μια τέτοια αναλυτική διατύπωση, η απόδοση κάθε  $i$  καλλιέργειας,  $Y_i$ , θεωρείται εξαρτημένη (ενδογενής) μεταβλητή και οι  $n$  συντελεστές παραγωγής  $x_i^n$  (π.χ. νερό, λίπασμα) ανεξάρτητες (εξωγενείς) μεταβλητές, ενώ όλοι οι υπόλοιποι  $m$  παράγοντες,  $a_i^m$ , που επηρεάζουν την απόδοση λογίζονται ως παράμετροι (σταθερές). Οι συναρτήσεις αυτές εκτιμώνται στατιστικά από τα αποτελέσματα ενός βιο-φυσικού υποδείγματος τα οποία προκύπτουν από ασκήσεις προσομοίωσης, δηλαδή με την οριακή μεταβολή με προκαθορισμένο ή τυχαίο τρόπο των τιμών των ανεξάρτητων μεταβλητών. Στη συνέχεια, οι εκτιμημένες συναρτήσεις εισάγονται στην αντικειμενική συνάρτηση ενός υποδείγματος ΜΠ, αντικαθιστώντας την παράμετρο που αντιπροσωπεύει τη σημειακή (σταθερή) απόδοση κάθε καλλιέργειας, μετατρέποντας έτσι το υπόδειγμα σε μη

γραμμικό ως προς τη μεταβλητή  $x_i^n$ . Αυτό σημαίνει πως οι βέλτιστες αποδόσεις και οι αντίστοιχες χρησιμοποιούμενες ποσότητες παραγωγικών συντελεστών υπολογίζονται πλέον ενδογενώς και αντιπροσωπεύουν σημεία στα οποία ισχύει η γνωστή συνθήκη ισορροπίας κατά την οποία το οριακό κέρδος κάθε δραστηριότητας ισούται με την αξία του οριακού προϊόντος κάθε συντελεστή παραγωγής:  $\partial Y_i / \partial x_i^n = p^n / r_i$ , όπου  $p^n$  η αξία του  $n$  συντελεστή παραγωγής και  $r_i$  η ακαθάριστη πρόσοδος (οριακό κέρδος) της  $i$  δραστηριότητας.

Αν και επιλέγονται συνήθως μη γραμμικές συναρτησιακές μορφές, με αποτέλεσμα η (1.4) να έχει σχεδόν όλα τα επιθυμητά μαθηματικά χαρακτηριστικά μια καλώς ορισμένης συνάρτησης παραγωγής (Chambers, 1988), εντούτοις δεν μπορεί να θεωρηθεί ως τέτοια αφού ο αυστηρός ορισμός της προϋποθέτει την ελεγχόμενη χρήση ενός (τουλάχιστον) «απαραίτητου» μεταβλητού συντελεστή παραγωγής  $x_i^n$  με την ιδιότητα  $f(x_i^n = 0 | a_i^m) = 0$ . Ωστόσο, εκτιμημένες συναρτήσεις που προέρχονται από βιο-φυσικά υποδείγματα χρησιμοποιούν «φυσικούς» και όχι «απαραίτητους» συντελεστές παραγωγής ως ανεξάρτητες μεταβλητές. Οι χρησιμοποιούμενες ποσότητες των «φυσικών» συντελεστών δεν καθορίζονται αποκλειστικά από τον παραγωγό, καθώς μπορεί να έχουν φυσική προέλευση (π.χ. νερό βροχής ή προϋπάρχουσα ποσότητα αζώτου στο έδαφος), με αποτέλεσμα η παραπάνω ιδιότητα της συνάρτησης παραγωγής να μην ικανοποιείται. Έτσι, οι συναρτήσεις αυτές θα αποκαλούνται εφεξής «συναρτήσεις απόδοσης».

Η χρήση μη γραμμικών συναρτήσεων απόδοσης στα πλαίσια βιο-οικονομικών υποδειγμάτων ΜΠ είναι ιδιαίτερα συχνή στη βιβλιογραφία της γεωργικής και περιβαλλοντικής οικονομικής. Να σημειωθεί επίσης πως η ενσωμάτωση αγρονομικών πληροφοριών σε ένα οικονομικό υπόδειγμα με αυτό τον τρόπο προσφέρει τη δυνατότητα «παρακάμψης» του προβλήματος γενίκευσης των αποτελεσμάτων του βιο-φυσικού υποδείγματος πέρα από το επίπεδο του αγρού, αφού η ετερογένεια των εδαφοκλιματικών δεδομένων μπορεί να ληφθεί υπόψη κατά τη διαδικασία εκτίμησης των συναρτήσεων απόδοσης. Για παράδειγμα, οι Kamras *et al.* (2010) εκτιμούν τετραγωνικές συναρτήσεις απόδοσης – νερού για το βαμβάκι και το καλαμπόκι, οι οποίες στη συνέχεια εισάγονται σε ένα μη γραμμικό υπόδειγμα ΜΠ που χρησιμοποιεί δείγμα εκμεταλλεύσεων από το ΔΙΓΕΛΠ, προκειμένου να μελετηθούν οι επιπτώσεις από την τιμολόγηση του νερού άρδευσης στη Θεσσαλία. Οι συναρτήσεις αυτές προκύπτουν από παρατηρήσεις του Danalatos (1993) για τις αποδόσεις των καλλιεργειών κατά την περίοδο 1987-88 σε διαφορετικά εδάφη και διαφορετικές ποσότητες νερού και συνεπώς αποτελούν «μέσες» συναρτήσεις, αφού η εκτίμηση τους προκύπτει από σύνολο σημείων στο χώρο [απόδοση-άρδευση] που αντιστοιχούν σε διαφορετικές εδαφοκλιματικές συνθήκες και τεχνικές άρδευσης.

Ανάλογες προσεγγίσεις χρησιμοποιούνται συχνά και για τη μελέτη μέτρων πολιτικής που αποσκοπούν στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της γεωργικής δραστηριότητας, όπως η νιτρορύπανση. Στις περιπτώσεις αυτές, μαζί με τις συναρτήσεις απόδοσης εκτιμώνται και «συναρτήσεις εκπομπών» (emissions functions), οι οποίες συνδέουν την ποσότητα μιας εισροής με την αντίστοιχη αρνητική εξωτερική οικονομία της (π.χ. άζωτο – συγκέντρωση νιτρικών στο έδαφος). Ένα παράδειγμα δίνεται από τους Helfand και House (1995) οι οποίοι αναλύουν τη σχετική αποδοτικότητα μέτρων πολιτικής (φόροι και νόρμες) για τη μείωση της νιτρορύπανσης στην κοιλάδα Salina της Καλιφόρνια, χρησιμοποιώντας το βιο-φυσικό υπόδειγμα EPIC και ένα οικονομικό υπόδειγμα βελτιστοποίησης της κοινωνικής ευημερίας. Η μέθοδος τους περιλαμβάνει τον ορισμό 750 πιθανών συνδυασμών ποσοτήτων νερού και αζωτούχου λίπανσης για την καλλιέργεια μαρουλιού σε δύο διαφορετικούς τύπους εδαφών, οι οποίοι παράγουν, μέσω του EPIC, αντίστοιχα σημεία στους τρισδιάστατους χώρους [απόδοση – νερό – άζωτο] και [νιτρικά – νερό – άζωτο], από τα οποία εκτιμώνται συναρτήσεις τετραγωνικής ρίζας (square root functions) απόδοσης και εκπομπής νιτρικών.

Ένα ιδιαίτερο παράδειγμα σύζευξης βιο-φυσικού και οικονομικού υποδείγματος αποτελεί η εργασία των Jayet και Petsakos (2010), οι οποίοι χρησιμοποιούν το οικονομικό υπόδειγμα AROPAj (Galko & Jayet, 2011) και το βιο-φυσικό υπόδειγμα STICS για την κατασκευή εκθετικών συναρτήσεων απόδοσης – αζώτου και γραμμικών συναρτήσεων εκπομπής νιτρικών – αζώτου για τις κυριότερες γεωργικές δραστηριότητες στη Γαλλία, στα πλαίσια της ανάλυσης των επιπτώσεων ενός πιθανού φόρου στο άζωτο. Η ανάλυση βασίζεται στη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε από τους Godard *et al.* (2008) για τον ίδιο συνδυασμό υποδειγμάτων και ξεφεύγει από τον τοπικό χαρακτήρα άλλων εργασιών, όπως εκείνη των Helfand και House (1995), αφού πραγματοποιείται για ολόκληρη τη Γαλλία και λαμβάνει υπόψη την χωρική ετερογένεια σε εδαφοκλιματικές συνθήκες και εφαρμοζόμενες καλλιεργητικές πρακτικές. Ειδικότερα, το AROPAj χρησιμοποιεί τεχνικοοικονομικά στοιχεία εκμεταλλεύσεων από τη ευρωπαϊκή βάση δεδομένων ΔΙΓΕΛΠ για την κατασκευή ομοιογενών ομάδων εκμεταλλεύσεων ανάλογα με τη γεωγραφική τους θέση και την παραγωγική τους κατεύθυνση. Με τη χρήση ηλεκτρονικών χαρτών σε Ευρωπαϊκό επίπεδο για το κλίμα (MARS – Monitoring Agriculture from Remote Sensing)<sup>4</sup>, το υψόμετρο (DEM – Digital Elevation Model of Europe)<sup>5</sup>, τα είδη εδαφών (ESDB – European Soil Database)<sup>6</sup> και τις χρήσεις γης [CORINE (Coordination of Information on the Environment) Land Cover (CLC)]<sup>7</sup>, σε κάθε ομάδα εκμεταλλεύσεων αντιστοιχίζονται διαφορετικοί τύποι εδαφών, κλιματικών συνθηκών και καλλιεργητι-

<sup>4</sup> <http://www.marsop.info/marsop3/>.

<sup>5</sup> <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/digital-elevation-model-of-europe>.

<sup>6</sup> <http://eusoiils.jrc.ec.europa.eu/>.

<sup>7</sup> <http://www.eea.europa.eu/publications/COR0-landcover>.



κών τεχνικών, επιτρέποντας έτσι τη χρήση του STICS για την παραγωγή ενός αριθμού πιθανών συναρτήσεων αποδόσεων και αντίστοιχων συναρτήσεων εκπομπών. Η τελική επιλογή της κατάλληλης συνάρτησης απόδοσης σε κάθε καλλιέργεια κάθε ομάδας εκμεταλλεύσεων του AROPAj βασίζεται σε μια διαδικασία που περιλαμβάνει τη σύγκριση της παρατηρούμενης απόδοσης στο ΔΙΓΕΛΠ με τις αντίστοιχες παραγόμενες από το STICS και τη χρήση των προαναφερθέντων οριακών συνθηκών μεγιστοποίησης του κέρδους,  $\partial Y_i / \partial x_i^n = p^n / r_i$ .

Ανάλογη προσέγγιση ακολουθείται και στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, καθώς στο τέταρτο κεφάλαιο εκτιμώνται συναρτήσεις απόδοσης από δεδομένα που προκύπτουν με προσομοίωση (simulation) των τιμών συγκεκριμένων παραμέτρων του βιοφυσικού υποδείγματος, το οποίο παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 2. Η χωρική ετερογένεια λαμβάνεται υπόψη με έμμεσο τρόπο, αφού για όλες τις καλλιέργειες εκτιμώνται δυο διαφορετικές συναρτήσεις απόδοσης, συγκεκριμένα για ένα έδαφος άνευ δομής (ελαφρύ - αμμώδες) και ένα έδαφος καλής δομής (μέσο έως βαρύ - πηλώδες έως αργιλώδες). Η διαφοροποίηση μεταξύ των δυο εδαφών αφορά, μεταξύ άλλων, στην περιεκτικότητα τους σε άργιλο και στη φαινόμενη πυκνότητα, παράμετροι που επηρεάζουν πολλές από τις μηχανικές και υδρολογικές ιδιότητες κάθε εδάφους.



# 2 Κατασκευή του βιο-φυσικού υποδείγματος

---

## 2.1 Εισαγωγή

Η διερεύνηση και ο ποσοτικός προσδιορισμός της σχέσης μεταξύ του εδαφικού νερού και της απόδοσης των καλλιεργειών αποτελεί ένα από τα θεμελιώδη και διαχρονικά ερωτήματα που απασχολούν τη γεωπονική επιστήμη. Τις τελευταίες δεκαετίες έχει αποδειχτεί πως απάντηση στο ερώτημα αυτό μπορεί να δώσει η έννοια της «εξατμισο-διαπνοής», η οποία χρησιμοποιείται για να περιγράψει την ταυτόχρονη απομάκρυνση νερού από το σύστημα έδαφος-φυτό προς την ατμόσφαιρα, μέσω των διαδικασιών της εξάτμισης και της διαπνοής.

Ως *εξάτμιση* ορίζεται η διαδικασία κατά την οποία ποσότητα νερού από μια επιφάνεια (π.χ. νερού ή εδάφους) μεταπίπτει από υγρή σε αέρια κατάσταση (υδρατμοί) και στη συνέχεια απομακρύνεται προς την ατμόσφαιρα. Για να λάβει χώρα η αλλαγή φάσης του νερού απαιτείται ενέργεια, η οποία προέρχεται κυρίως από την ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της γης. Η απομάκρυνση όμως των υδρατμών εξαρτάται από τη διαφορά πίεσης μεταξύ των υδρατμών της εξατμιζόμενης επιφάνειας και εκείνων της ατμόσφαιρας, καθώς όταν ο αέρας πάνω από την εξατμιζόμενη επιφάνεια είναι κορεσμένος, η ένταση της εξάτμισης περιορίζεται (οι υδρατμοί μετακινούνται από ένα σημείο υψηλής συγκέντρωσης ή πίεσης σε ένα άλλο χαμηλής συγκέντρωσης ή πίεσης). Το σημείο κορεσμού εξαρτάται με τη σειρά του από τη θερμοκρασία, ενώ η διαφορά πίεσης υδρατμών επηρεάζεται από την ταχύτητα του ανέμου, με τη βοήθεια του οποίου αντικαθίσταται ο κορεσμένος αέρας πάνω από την εξατμιζόμενη επιφάνεια με νέο, ξηρότερο. Έτσι, για τον υπολογισμό της έντασης της εξάτμισης πρέπει να λαμβάνονται πάντα υπόψη οι προαναφερθέντες τέσσερις κλιματικοί παράγοντες, δηλαδή η ηλιακή ακτινοβολία, η πίεση των υδρατμών, η θερμοκρασία και η ταχύτητα του ανέμου.

Ως *διαπνοή* ορίζεται η φυσιολογική λειτουργία των φυτών κατά την οποία μόρια νερού εντός των φυτικών ιστών μετατρέπονται σε υδρατμούς και απομακρύνονται από τα στόματα των φύλλων. Πρόκειται δηλαδή για ένα φαινόμενο διάχυσης υδρατμών από το εσωτερικό του φύλλου στην εξωτερική ατμόσφαιρα. Τα στόματα στα περισσότερα φυτά είναι ανοικτά κατά τη διάρκεια της ημέρας, αλλά καθώς τα στόματα αποτελούν ταυτόχρονα τις πύλες εισόδου του διοξειδίου του άνθρακα που απαιτείται για τη φωτοσύνθεση του φυτού, κάθε φυτό διαθέτει έναν εσωτερικό μηχανισμό που ρυθμίζει τις δυο διαδικασίες (πρόσληψη CO<sub>2</sub> και απώλεια υδρατμών) ώστε αφενός να μην εμποδίζεται η φωτοσύνθεση και αφετέρου να περιορίζεται ο κίνδυνος της αφυδάτωσης του φυ-

τού. Έτσι, φαίνεται πως η συγκέντρωση του CO<sub>2</sub> γύρω από το φύλλο και η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας επιδρούν στο άνοιγμα των στομάτων (άρα και στο ρυθμό της διαπνοής). Επιπλέον, η διαπνοή επηρεάζεται από τα χαρακτηριστικά του φυτού (π.χ. διαστάσεις φύλλων) και κυρίως από τη διαθεσιμότητα νερού στο έδαφος, από την οποία εξαρτάται ο ρυθμός απορρόφησης του από το φυτό. Να σημειωθεί στο σημείο αυτό πως όλο σχεδόν το νερό που προσλαμβάνεται από το έδαφος χάνεται μέσω της διαπνοής και μόνο ένα μικρό ποσοστό παραμένει στο φυτό για την εξυπηρέτηση των αναγκών του. Τέλος, η κίνηση των υδρατμών από το εσωτερικό των φύλλων στην εξωτερική ατμόσφαιρα εξαρτάται από όλους εκείνους τους κλιματικούς παράγοντες που επηρεάζουν και το φαινόμενο της εξάτμισης (Μανέτας, 2003).

Από τους παραπάνω ορισμούς της εξάτμισης και της διαπνοής γίνεται φανερό πως η εξατμισοδιαπνοή αποτελεί έναν ικανοποιητικό δείκτη των αρδευτικών αναγκών του φυτού σε μια χρονική περίοδο, αφού αναφέρεται στην απώλεια υγρασίας τόσο από τα φύλλα όσο και από το έδαφος στο οποίο αναπτύσσεται το φυτό. Στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζεται η κατασκευή ενός βιο-φυσικού υποδείγματος στηριζόμενο στην έννοια της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας. Αυτό σημαίνει πως χρησιμοποιείται η τρίτη κατηγορία «μηχανών αύξησης» της ενότητας 1.5.2 που αφορά στη σχέση μεταξύ της τελικής βιομάζας και της διαπνοής του φυτού και η οποία συνδυάζει την αναλυτικότητα με την απλότητα που απαιτείται για τη χρήση του υποδείγματος στα πλαίσια μιας βιο-οικονομικής ανάλυσης σε γεωγραφικό επίπεδο υψηλότερο του αγρού.

## **2.2 Δυναμική εξατμισοδιαπνοή και εξατμισοδιαπνοή αναφοράς**

Το ερευνητικό και πρακτικό ενδιαφέρον που παρουσιάζει η έννοια της εξατμισοδιαπνοής, οδήγησε στην ανάπτυξη πολλών διαφορετικών μεθόδων υπολογισμού της που μπορούν να διακριθούν σε τρεις κατηγορίες, ανάλογα με το είδος των παραμέτρων που αποτελούν τη βάση των υπολογισμών: (α) σε αυτές που βασίζονται στη θερμοκρασία του αέρα (π.χ. Hargreaves, 1994; Blaney & Criddle, 1962), (β) σε αυτές που βασίζονται στην ηλιακή ακτινοβολία (π.χ. Priestley & Taylor, 1972; Makkink, 1957) και (γ) σε εκείνες που χρησιμοποιούν συνδυασμό κλιματικών και φυτικών παραμέτρων και ονομάζονται συνδυασμένες μέθοδοι (π.χ. Allen *et al.*, 1998; Monteith, 1981; Penman, 1963). Η παρουσίαση των μεθόδων ξεφεύγει από τους σκοπούς της παρούσας διατριβής, ωστόσο είναι αναγκαίο να γίνει μια σύντομη ιστορική αναδρομή στην εξέλιξη της συνδυασμένης μεθόδου Penman-Monteith κατά FAO-56, στην οποία βασίζεται το βιο-φυσικό υπόδειγμα που παρουσιάζεται στην παρούσα διατριβή και θεωρείται σήμερα ως η πιο αξιόπιστη μέθοδος υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής μιας καλλιέργειας.

Η πρώτη συνδυασμένη μέθοδος παρουσιάστηκε από τον Penman (1948) και αφορούσε στον υπολογισμό της δυναμικής (μέγιστης) εξατμισοδιαπνοής από μια επιφάνεια νερού ή υγρού εδάφους. Ως «δυναμική εξατμισοδιαπνοή» ορίζεται ο ρυθμός απώλειας νερού από το υγρό έδαφος και την υπερκείμενη φυτική επιφάνεια, υπό συνθήκες πλήρους διαθεσιμότητας νερού (Παπαζαφειρίου, 1999). Η εξίσωση του Penman βασίζεται στο ακόλουθο ισοζύγιο ροών ενέργειας<sup>8</sup>:

$$\lambda \cdot E = R_n - H - G \quad (2.1)$$

Το γινόμενο  $\lambda \cdot E$  εκφράζει τη ποσότητα της ενέργειας που απομακρύνεται από μια επιφάνεια με το μηχανισμό της εξάτμισης, όπου  $\lambda$  η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης, δηλαδή η ενέργεια που απαιτείται για την εξάτμιση μιας μονάδας νερού ( $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) και  $E$  ο ρυθμός της εξάτμισης ( $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ). Το  $R_n$  αντιπροσωπεύει την ολική καθαρή ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της γης ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ), το  $H$  είναι η ροή της αισθητής θερμότητας στον αέρα ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ) και το  $G$  η ροή αισθητής θερμότητας στο έδαφος ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ). Τα  $H$  και  $G$  αφορούν δηλαδή σε απώλεια ενέργειας λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας του αέρα και του εδάφους αντίστοιχα.

Η τελική εξίσωση που διατύπωσε ο Penman λαμβάνει υπόψη το παραπάνω ισοζύγιο ενέργειας και ταυτόχρονα περιλαμβάνει δυο αεροδυναμικούς παράγοντες που επηρεάζουν τη μετακίνηση των υδρατμών, την πίεση τους και την ταχύτητα του αέρα:

$$\lambda \cdot ET = (R_n - G) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} f(u_z)(e_s - e_a) \quad (2.2)$$

όπου με  $ET$  συμβολίζεται η εξατμισοδιαπνοή ( $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ),  $\Delta$  είναι η κλίση της καμπύλης της κορεσμένης πίεσης υδρατμών ( $\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ),  $\gamma$  είναι η ψυχρομετρική σταθερά ( $\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ),  $e_a$  η πραγματική πίεση υδρατμών ( $\text{kPa}$ ),  $e_s$  είναι η πίεση κορεσμού υδρατμών ( $\text{kPa}$ ) και  $f(u_z)$  μια γραμμική συνάρτηση της οριζόντιας ταχύτητας του αέρα, όπου  $u_z$  η ταχύτητα του αέρα σε ύψος  $z$  από την επιφάνεια του εδάφους ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ). Συνεπώς, η δυναμική εξατμισοδιαπνοή μπορεί να εκφραστεί είτε ως ροή ενέργειας ( $\lambda \cdot ET$ ), είτε ως ισοδύναμο βάθος εξατμιζόμενου νερού ανά μονάδα χρόνου ( $ET$ ).

Να σημειωθεί στο σημείο αυτό πως στη πραγματικότητα η εξίσωση (2.2) αφορά στη δυναμική εξάτμιση από μια ελεύθερη επιφάνεια νερού. Αντίθετα, η εξάτμιση από μια υγρή επιφάνεια εδάφους εκτιμήθηκε ως ένα ποσοστό της υπολογισθείσας εξάτμισης από μια επιφάνεια νερού υπό τις ίδιες κλιματικές συνθήκες. Το ποσοστό αυτό εξαρτά-

<sup>8</sup> Η εξίσωση (2.1) αναφέρεται στις ροές ενέργειας από και προς μια επιφάνεια εδάφους (π.χ. ένα στρέμμα =  $1000 \text{ m}^2$ ) ανά ημέρα. Συνεπώς, η ομοιόμορφη εξάτμιση ενός  $\text{mm}$  ( $10^{-3} \text{ m}$ ) νερού από ένα στρέμμα αντιστοιχεί σε όγκο νερού ίσο με  $1 \text{ m}^3$ . Η πυκνότητα του νερού ισούται περίπου με  $1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  και συνεπώς το γινόμενο  $\lambda \cdot E$  μετράται σε  $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ .

ται από την εποχή της μέτρησης και κυμαίνεται από 0.6 το χειμώνα, έως 0.8 το καλοκαίρι. Ο Penman (1963) παραμετροποίησε αργότερα την εξίσωση (2.2) για τον υπολογισμό της δυναμικής εξατμισοδιαπνοής και από χορτοτάπητες.

Πολλοί ερευνητές (π.χ. Monteith, 1965; Rijtema, 1965) πρότειναν την τροποποίηση της εξίσωσης του Penman με την αντικατάσταση της συνάρτησης της ταχύτητας του αέρα,  $f(u_z)$ , από έναν όρο αεροδυναμικής αντίστασης και την επιπλέον εισαγωγή ενός όρου επιφανειακής αντίστασης στη μεταφορά υδρατμών. Η αεροδυναμική αντίσταση αφορά στους περιορισμούς που συναντά η κάθετη μετακίνηση υδρατμών και θερμότητας μεταξύ φυτού και ατμόσφαιρας και εξαρτάται από την ταχύτητα του αέρα, το ύψος και την «τραχύτητα» του φυλλώματος, δηλαδή την επίδραση που έχει στα φαινόμενα μεταφοράς η αρχιτεκτονική κατασκευής και η πυκνότητα του. Η επιφανειακή αντίσταση αφορά στους περιορισμούς στη μετακίνηση υδρατμών μέσω των στομάτων και εντός του φυλλώματος. Ειδικότερα, καθώς το εσωτερικό του φύλλου είναι ήδη κορεσμένο από υδρατμούς, η κίνηση τους από το μεσόφυλλο ως την εξωτερική ατμόσφαιρα συναντά μια σειρά από αντιστάσεις, στις οποίες συνυπολογίζεται και η αντίσταση από τα στόματα που μπορεί να μην είναι πλήρως ανοικτά. Η επιφανειακή αντίσταση αποτελεί το άθροισμα όλων των επιμέρους αντιστάσεων εντός του φύλλου, διορθωμένο με το δείκτη φυλλικής επιφάνειας του φυτού, (Leaf Area Index – LAI), ο οποίος ορίζεται ως η συνολική επιφάνεια του φυλλώματος ανά μονάδα επιφάνειας εδάφους ( $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ ). Ο λόγος για τη διόρθωση αυτή είναι πως αφενός η διαπνέουσα επιφάνεια είναι μεγαλύτερη για φυλλοστοιβάδες με LAI μεγαλύτερο της μονάδας, αφετέρου σε μια καλλιέργεια με πυκνή φυτοκόμηση, η διαπνοή είναι λιγότερο έντονη στα κατώτερα φύλλα (Allen *et al.*, 1994; Monteith, 1965).

Η πιο γνωστή εξίσωση για τον υπολογισμό της δυναμικής εξατμισοδιαπνοής που περιλαμβάνει όρους επιφανειακής και αεροδυναμικής αντίστασης, παρουσιάστηκε από τον Monteith (1981) και έχει την ακόλουθη μορφή:

$$\lambda \cdot ET = \frac{\Delta(R_n - G) + 0.622\lambda \cdot \rho_a \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \quad (2.3)$$

όπου  $\rho_a$  η μέση πυκνότητα του αέρα υπό σταθερή πίεση ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ), ενώ τα  $r_a$  και  $r_s$  η αεροδυναμική και η επιφανειακή αντίσταση αντίστοιχα ( $\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ ). Στη διεθνή βιβλιογραφία, η εξίσωση (2.3) έχει επικρατήσει να ονομάζεται «συνδυασμένη μέθοδος Penman-Monteith» και αποτέλεσε τη βάση για τη διατύπωση της *συνδυασμένης μεθόδου Penman-Monteith κατά FAO-56* που θα παρουσιαστεί στη συνέχεια.

Από την περιγραφή των δυο αντιστάσεων (αεροδυναμική και επιφανειακή) γίνεται φανερό πως πρόκειται για μεγέθη των οποίων η μέτρηση είναι ιδιαίτερα δύσκολη, αφού αποτελούν αθροίσματα επιμέρους αντιστάσεων που εμφανίζονται τόσο στο εσωτερικό του φύλλου όσο και εντός του φυλλώματος. Για λόγους απλούστευσης, η εξίσωση (2.3) βασίζεται στην υπόθεση πως η αεροδυναμική και η επιφανειακή αντίσταση λειτουργούν σε σειρά, ξεκινώντας από το εσωτερικό του φύλλου μέχρι κάποιο ύψος αναφοράς, δημιουργώντας έτσι ένα γραμμικό «μεγάλο φύλλο ενιαίου στρώματος» (single layer big leaf model). Μια πολύ αναλυτική παρουσίαση της σχετικής θεωρίας υπολογισμού των αντιστάσεων και των βημάτων κατασκευής της συνδυασμένης εξίσωσης Penman-Monteith παρουσιάζεται από τον Allen (2005).

Παρά την υπόθεση για ένα μεγάλο γραμμικό φύλλο, η απευθείας χρήση της εξίσωσης (2.3) για την εκτίμηση της δυναμικής εξατμισοδιαπνοής είναι πολύ δύσκολη, αφού ερευνητικά αποτελέσματα για τιμές των  $r_a$  και  $r_s$  δεν υπάρχουν παρά για ελάχιστες καλλιέργειες. Αυτό οφείλεται κυρίως στη δυσκολία μέτρησης των παραμέτρων από τις οποίες εξαρτώνται οι δυο αυτές αντιστάσεις, όπως για παράδειγμα το ύψος του φυτού και η φυλλική επιφάνεια, που μεταβάλλονται συνεχώς με το πέρασμα του χρόνου. Τέλος έχει αποδειχτεί πως η επιφανειακή αντίσταση επηρεάζεται και από την υδατική κατάσταση του φυτού, αφού πιθανή υδατική καταπόνηση επιδρά στο άνοιγμα των στομάτων (Pereira & Allen, 1999).

Η λύση που επιλέχτηκε τελικά για να αντιμετωπιστούν οι παραπάνω δυσκολίες ήταν ο υπολογισμός της δυναμικής εξατμισοδιαπνοής μιας «καλλιέργειας αναφοράς» και η αναγωγή της σε άλλες καλλιέργειες με τη χρήση συντελεστών που ονομάστηκαν «φυτικοί συντελεστές». Η δυναμική εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας αναφοράς ονομάστηκε «εξατμισοδιαπνοή αναφοράς»,  $ETo$ , και επέτρεψε τη μελέτη της επίδρασης της εξατμιστικής δύναμης της ατμόσφαιρας σε ένα υγρό έδαφος και μια φυτική επιφάνεια ανεξάρτητα από τον τύπο του εδάφους, το είδος του φυτού, το στάδιο της βλαστικής περιόδου αυτού και των εφαρμοζόμενων καλλιεργητικών τεχνικών, προσφέροντας έτσι ένα κοινό σημείο σύγκρισης σε κάθε περίπτωση. Παράλληλα, απλοποιήθηκε σημαντικά η διαδικασία υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής μιας καλλιέργειας, αφού η εκτίμηση των κατάλληλων φυτικών συντελεστών είναι ευκολότερη από την απευθείας εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής και την πειραματική επιβεβαίωση της (Παπαζαφειρίου, 1999).

Η υπόθεση στην οποία στηρίζεται η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς είναι η ύπαρξη μιας συγκεκριμένης καλλιέργειας αναφοράς, ικανής να αναπτυχθεί σε οποιοδήποτε σημείο της γης και με την οποία είναι δυνατό να εκτιμηθεί μια εξίσωση υπολογισμού της  $ETo$  που δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα υπό διάφορες κλιματικές συνθήκες. Η έννοια της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς παρουσιάστηκε αρχικά από τους Wright και Jensen

(1972), ενώ η χρήση της καθιερώθηκε μετά τη δημοσίευση του εγγράφου FAO-24 από τους Doorenbos και Pruitt (1977), οι οποίοι ανέλυσαν μετρήσεις λυσιμέτρων σε διάφορες περιοχές της γης και παρουσίασαν μια πρώτη μέθοδο υπολογισμού της  $ET_o$ . Η μέθοδος των Doorenbos και Pruitt αποτέλεσε μια βελτιωμένη έκδοση της εξίσωσης του Penman και χρησιμοποιούσε μια πιο ευαίσθητη συνάρτηση ταχύτητας του αέρα, σε συνδυασμό με ένα συντελεστή προσαρμογής, ώστε η διαδικασία υπολογισμού να μπορεί να εφαρμοστεί σε περιοχές με διαφορετικές κλιματικές συνθήκες:

$$ET_o = c \cdot \left[ \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) + 2.7 \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} g(u_z)(e_s - e_a) \right] \quad (2.4)$$

όπου  $c$  ο συντελεστής προσαρμογής και  $g(u_z)$  η νέα συνάρτηση της ταχύτητας του αέρα. Η εξίσωση (2.4) ονομάστηκε «τροποποιημένη μέθοδος Penman κατά FAO-24» και αποτέλεσε τη συνιστώμενη μέθοδο εκτίμησης της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς για αρκετά χρόνια, ως την αναθεώρηση της μέσω του εγγράφου FAO-56 (Allen *et al.*, 1998), αφού βρέθηκε ότι υπερεκτιμά την  $ET_o$  έως και 35% σε ορισμένες περιπτώσεις (Jensen *et al.*, 1990).

Ο ορισμός που έδωσαν οι Doorenbos και Pruitt για την καλλιέργεια αναφοράς ήταν: «Μια εκτεταμένη επιφάνεια πράσινου χορτοτάπητα, ομοιόμορφου ύψους 8 έως 15 cm, δυναμικά αναπτυσσόμενη που σκιάζει πλήρως το έδαφος και δεν έχει έλλειψη νερού». Ωστόσο, ο ορισμός αυτός δημιουργεί μια ασάφεια σχετικά με το είδος του φυτού που θα χρησιμοποιηθεί ως καλλιέργεια αναφοράς, καθώς το είδος του χορτοτάπητα επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα (η μετρούμενη εξατμισοδιαπνοή είναι μεγαλύτερη σε φυτά τύπου C-3), ενώ προβλήματα προσαρμοστικότητας σε διαφορετικές κλιματικές συνθήκες περιορίζουν την αξιοπιστία των μετρήσεων, αφού αυξάνουν τη μεροληψία στην εκτίμηση των μετρούμενων παραμέτρων. Επίσης, οι συνεχείς κοπές του χορτοτάπητα επηρεάζουν τα  $r_a$ ,  $r_s$  και το ποσοστό ανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας (albedo)<sup>9</sup> λόγω των συνεχών μεταβολών του ύψους του, παρά το γεγονός ότι αυτό μπορεί να διατηρηθεί με προσεκτική συντήρηση μεταξύ 8 και 15 cm (Allen *et al.*, 1994).

Η μηδική έχει επίσης χρησιμοποιηθεί ως καλλιέργεια αναφοράς, αφού παρουσιάζει τα ακόλουθα επιθυμητά χαρακτηριστικά: (α) είναι φυτό που καλλιεργείται ευρέως ανά τον κόσμο και έχει μελετηθεί αρκετά, (β) έχει ανεπτυγμένο ριζικό σύστημα που τη βοηθάει να αντισταθεί σε πιθανή υδατική καταπόνηση και άρα να δίνει πιο αξιόπιστες μετρήσεις εξατμισοδιαπνοής υπό διαφορετικές κλιματικές συνθήκες και (γ) η φυλλική της επιφάνεια και κατά συνέπεια η επιφανειακή και η αεροδυναμική της αντίσταση εί-

<sup>9</sup> Το albedo είναι ένας αδιάστατος συντελεστής ο οποίος μετράει το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που δεν απορροφάται από το φυτό αλλά αντανακλάται από αυτό πίσω στην ατμόσφαιρα. Δεν πρόκειται για φυτική σταθερά αλλά εξαρτάται από την αρχιτεκτονική του φυτού και την έκταση της φυλλικής του επιφάνειας.



ναι παρόμοια με πολλές άλλες καλλιέργειες (Wright & Jensen, 1972). Ωστόσο, τα προβλήματα που αναφέρθηκαν παραπάνω για τον χορτοτάπητα ισχύουν και στην περίπτωση της μηδικής. Έτσι, η μειωμένη προσαρμοστικότητα σε ψυχρά κλίματα δεν επιτρέπουν την ευρεία χρήση της ως καλλιέργεια αναφοράς, ενώ και οι συνεχείς κοπές της μηδικής περιορίζουν την αξιοπιστία των μετρήσεων (Allen *et al.*, 1994).

Τα προβλήματα αυτά, καθώς και το γεγονός πως η μέθοδος Penman κατά FAO-24 υπερεκτιμούσε σημαντικά την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς, οδήγησαν το Μάιο του 1990 στη σύσταση από τον FAO (Food and Agriculture Organization – Οργανισμός Τροφίμων και Γεωργίας) μιας διεθνούς επιτροπής επιστημόνων και ερευνητών, προκειμένου να αναβαθμιστούν και να αναθεωρηθούν οι μέθοδοι εκτίμησης των απαιτήσεων των καλλιεργειών σε νερό. Η επιτροπή, αφού έλαβε υπόψη αρκετές μελέτες (π.χ. Jensen *et al.*, 1990), πρότεινε την υιοθέτηση της συνδυασμένης μεθόδου Penman-Monteith ως την πλέον αντιπροσωπευτική για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς και τυποποίησε τις διαδικασίες για τον υπολογισμό των απαραίτητων μετεωρολογικών παραμέτρων. Παράλληλα, δόθηκε ένας σαφής ορισμός της καλλιέργειας αναφοράς, η οποία πλέον ορίζεται ως μια υποθετική καλλιέργεια με ύψος φυτών 0.12 m, επιφανειακή αντίσταση  $70 \text{ s}\cdot\text{m}^{-1}$  και albedo 0.23. Η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς προσεγγίζει με αυτό τον τρόπο την πραγματική εξατμισοδιαπνοή που εμφανίζει μια επιφάνεια πρασίνου ομοιόμορφου ύψους, που αναπτύσσεται φυσιολογικά με επαρκείς ποσότητες διαθέσιμου νερού (Allen *et al.*, 1998). Η επιλογή μιας υποθετικής καλλιέργειας έλυσε με απλό τρόπο τα προβλήματα διαχείρισης και προσαρμοστικότητας μιας πραγματικής καλλιέργειας χορτοτάπητα ή μηδικής που αναφέρθηκαν προηγουμένως, προσφέροντας έτσι ένα κοινό σημείο αναφοράς ανεξάρτητα από την τοποθεσία και τις επικρατούσες κλιματικές συνθήκες.

Συνδυάζοντας την αρχική εξίσωση Penman-Monteith με τις εξισώσεις για την αεροδυναμική αντίσταση και την αντίσταση των φύλλων σε μια υποθετική καλλιέργεια με τα παραπάνω χαρακτηριστικά, η επιτροπή του FAO διατύπωσε τη νέα εξίσωση υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς ως εξής:

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{mean} + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (2.5)$$

όπου  $T_{mean}$  η μέση ημερήσια θερμοκρασία σε ύψος 2 μέτρων ( $^{\circ}\text{C}$ ) και  $u_2$  η ταχύτητα του ανέμου στο ίδιο ύψος ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Η μέση ημερήσια θερμοκρασία ορίζεται ως το ημί-άθροισμα της μέγιστης και ελάχιστης ημερήσιας θερμοκρασίας,  $T_{mean} = (T_{max} + T_{min})/2$ . Η παραπάνω εξίσωση ονομάζεται «συνδυασμένη μέθοδος Penman-Monteith κατά FAO-56» και αποτελεί πλέον την προτεινόμενη μέθοδο υπολογισμού της  $ET_o$ .

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται αναλυτικά οι διαδικασίες υπολογισμού όλων των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στην εξίσωση (2.5) της συνδυασμένης μεθόδου Penman-Monteith κατά FAO-56. Οι διαδικασίες αυτές τυποποιήθηκαν από την επιτροπή ειδικών του FAO προκειμένου να δημιουργηθεί μια ενιαία μεθοδολογία εκτίμησης της τιμής της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς και δημοσιεύτηκαν στο έγγραφο FAO-56 (Allen *et al.*, 1998).

## 2.3 Υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς

### 2.3.1 Ροές ενέργειας

Η ένταση της απώλειας νερού από το σύστημα έδαφος – φυτό προς την ατμόσφαιρα, μέσω των φαινομένων της εξάτμισης και της διαπνοής, καθορίζεται πρωτίστως από την ενέργεια που δέχεται το σύστημα και εκφράζεται ως ένα ισοζύγιο ενεργειακών ροών που δίνεται από την εξίσωση (2.1). Από τις ροές ενέργειας του ισοζυγίου αυτού, η συνδυασμένη μέθοδος Penman Monteith κατά FAO-56 απαιτεί τη γνώση της τιμής της ολικής καθαρής ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της γης,  $R_n$ , και της ροής αισθητής θερμότητας στο έδαφος,  $G$  (βλέπε εξίσωση 2.5).

Το  $R_n$  μπορεί να υπολογιστεί ως η διαφορά μεταξύ της καθαρής εισερχόμενης ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος ( $R_{ns}$ ) και της εξερχόμενης ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος,  $R_{nl}$  (όλα μετρούμενα σε  $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ):

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (2.6)$$

Πιο συγκεκριμένα, η ηλιακή ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος,  $R_{ns}$ , που φτάνει στην επιφάνεια του εδάφους προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας του, με αποτέλεσμα το έδαφος να εκπέμπει με τη σειρά του ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος (γήινη ακτινοβολία) προς την ατμόσφαιρα. Καθώς θερμαίνεται η ατμόσφαιρα, εκπέμπει και αυτή ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος προς όλες τις κατευθύνσεις (ατμοσφαιρική ακτινοβολία) με αποτέλεσμα ένα μέρος να καταλήγει πίσω στην επιφάνεια της γης (Φλόκας, 1997). Έτσι, η επιφάνεια της γης εκπέμπει και προσλαμβάνει ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος, όμως καθώς η εξερχόμενη ακτινοβολία είναι σχεδόν πάντα μεγαλύτερη της εισερχόμενης, το πρόσημο της  $R_{nl}$  είναι αρνητικό, αντιπροσωπεύοντας απώλεια ενέργειας.

Η ολική καθαρή ακτινοβολία,  $R_n$ , έχει θετικό πρόσημο κατά τη διάρκεια της ημέρας, αφού μόνο ένα μέρος της γήινης ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος επιστρέφει στο έδαφος και συνεπώς  $|R_{ns}| > |R_{nl}|$ . Αντίθετα, το πρόσημο της  $R_n$  είναι αρνητικό κατά τη διάρκεια της νύχτας, όπου  $R_{ns} = 0$ . Ωστόσο, η ολική καθαρή ακτινοβολία που φτάνει

στην επιφάνεια της γης στη διάρκεια ενός εικοσιτετραώρου θεωρείται πως έχει θετικό πρόσημο (Allen *et al.*, 1998).

Η καθαρή ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος,  $R_{ns}$ , υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$R_{ns} = (1 - a)R_s$$

όπου  $a$  είναι το ποσοστό αντανάκλασης της ακτινοβολίας (albedo) από μια επιφάνεια που στη περίπτωση της υποθετικής καλλιέργειας χορτοτάπητα ισούται με 0.23. Το  $R_s$  αντιπροσωπεύει τη *προσπίπτουσα* στη γη ακτινοβολία, δηλαδή την «εξασθενημένη» ακτινοβολία που τελικά φτάνει στη γη λόγω φαινομένων σκέδασης-διάχυσης και απορρόφησης από το οξυγόνο, το διοξείδιο του άνθρακα, τους υδρατμούς και τον κοριοτό της ατμόσφαιρας (Φλόκας, 1997). Έτσι, το  $R_{ns}$  εκφράζει την *καθαρή* ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στη γη, αν αφαιρεθεί το ποσοστό της ακτινοβολίας που αντανακλάται από την επιφάνεια του εδάφους. Το  $R_s$  με τη σειρά του μπορεί να προσδιοριστεί από τη σχέση του Ångström:

$$R_s = (a_s + b_s \frac{n}{N})R_A \quad (2.7)$$

όπου  $a_s$  και  $b_s$  είναι εμπειρικές σταθερές για τις οποίες οι Doorenbos και Pruitt (1977) προτείνουν τιμές 0.25 και 0.50 αντίστοιχα,  $n/N$  είναι ο λόγος της πραγματικής ημερήσιας ηλιοφάνειας και  $R_A$  η *εξωγήινη* ηλιακή ακτινοβολία (μετρούμενη σε  $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ). Η τελευταία εκφράζει την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε μια γεωγραφική τοποθεσία και διαφέρει ανάλογα με τη μέρα του έτους, εξαιτίας της συνεχώς διαφοροποιούμενης γωνίας πτώσης των ηλιακών ακτινών λόγω της κίνησης της γης. Αν και οι Doorenbos και Pruitt (1977) δημοσίευσαν πίνακες με μηνιαίες τιμές της  $R_A$  ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος ενός τόπου, ημερήσιες τιμές μπορούν να υπολογιστούν με βάση την παρακάτω εξίσωση των Duffie και Beckman (1991):

$$R_A = 37.6J_r(\omega_s \cdot \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega_s) \quad (2.8)$$

όπου  $J_r$  είναι η σχετική απόσταση μεταξύ ηλίου και γης (αδιάστατο),  $\omega_s$  η γωνία του ηλίου την ώρα δύσης (rad),  $\varphi$  το γεωγραφικό πλάτος (rad) και  $\delta$  είναι η κλίση του ηλίου (rad). Τα παραπάνω μεγέθη εξαρτώνται από την ημέρα του έτους,  $d$ , και μπορούν να υπολογιστούν από τις εξισώσεις (2.9) έως (2.11):

$$J_r = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi d}{365}\right) \quad (2.9)$$

$$\delta = 0.409 \sin\left(\frac{2\pi d}{365} - 1.39\right) \quad (2.10)$$

$$\omega_s = \arccos(-\tan \varphi \cdot \tan \delta) \quad (2.11)$$

Επιστρέφοντας στη σχέση (2.6), η καθαρή ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος,  $R_{nl}$ , μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη σχέση:

$$R_{nl} = \sigma \left( \frac{T_{Kmax}^4 + T_{Kmin}^4}{2} \right) (0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) \left( 1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 035 \right) \quad (2.12)$$

όπου  $\sigma$  είναι η σταθερά του Boltzman ( $4.903 \times 10^{-9} \text{ MJ}\cdot\text{K}^{-4}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ),  $T_{Kmax}$  είναι η μέγιστη και  $T_{Kmin}$  η ελάχιστη ημερήσια απόλυτη θερμοκρασία αντίστοιχα ( $K = ^\circ\text{C} + 273.16 \text{ K}$ ),  $e_a$  είναι η πραγματική πίεση υδρατμών (kPa),  $R_s$  είναι η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία που ορίστηκε στην εξίσωση (2.7) και  $R_{so}$  είναι η ακτινοβολία ολικής αιθρίας, δηλαδή η ακτινοβολία που θα έφτανε στη γη σε ύψος  $z$  αν ο ουρανός ήταν αίθριος και η τιμή της μπορεί να προσεγγιστεί από τη σχέση:

$$R_{so} = (0.75 + 2 \times 10^{-5}z)R_A$$

Η εξίσωση (2.12) αποτελεί μια τροποποιημένη έκφραση του νόμου Stefan-Boltzmann, σύμφωνα με τον οποίο ένα φαιό σώμα εκπέμπει ακτινοβολία ανάλογη της τέταρτης δύναμης της απόλυτης θερμοκρασίας του. Πιο συγκεκριμένα, όπως προαναφέρθηκε, η γη αρχικά εκπέμπει και στη συνέχεια δέχεται ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος από την ατμόσφαιρα. Ωστόσο, η ακτινοβολία που δέχεται είναι μικρότερη από την εκπεμπόμενη λόγω της επίδρασης των υδρατμών, των νεφών, του κονιορτού και του διοξειδίου του άνθρακα της ατμόσφαιρας που επίσης με τη σειρά τους δέχονται και εκπέμπουν ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος. Η επίδραση των υδρατμών στη  $R_{nl}$  εκφράζεται μέσω του όρου  $[0.34 - 0.14\sqrt{e_a}]$  και η επίδραση της νέφωσης με το  $[1.35R_s/R_{so} - 035]$ .

Η ροή αισθητής θερμότητας στο έδαφος,  $G$  ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ), αναφέρεται στο ποσό του ημερήσιου ενεργειακού ισοζυγίου (2.1) που επιφέρει αύξηση της θερμοκρασίας του εδάφους. Όταν το έδαφος θερμαίνεται, το  $G$  είναι θετικό, ενώ όταν το έδαφος ψύχεται είναι αρνητικό. Ημερήσιες τιμές της ροής αισθητής θερμότητας στο έδαφος,  $G_i$ , μπορούν να υπολογιστούν από την εξίσωση των van Wijk και de Vries (1963), η οποία βασίζεται στην υπόθεση πως η μεταβολή της θερμοκρασίας του εδάφους έπεται χρονικά της μεταβολής της θερμοκρασίας του αέρα:

$$G_d = c_s \frac{T_d - T_{d-1}}{\Delta t} \Delta z$$

όπου  $c_s$  η θερμική αγωγιμότητα του εδάφους ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$ ),  $T_d$  και  $T_{d-1}$  η μέση θερμοκρασία την ημέρα  $d$  και την προηγούμενη ( $d - 1$ ) αντίστοιχα ( $^\circ\text{C}$ ),  $\Delta t$  το χρονικό

εύρος των υπολογισμών, το οποίο για ημερήσιες τιμές του αντιστοιχεί σε 1 ημέρα και  $\Delta z$  το βάθος του εδάφους στο οποίο επιδρά η ροή αισθητής θερμότητας (m). Όταν χρησιμοποιούνται ημερήσια βήματα για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς, το βάθος του εδάφους,  $\Delta z$ , που δέχεται την επίδραση της  $G$  θεωρείται πως είναι μικρό και φτάνει έως τα 10-20 cm. Επίσης, τυχόν φυτική κάλυψη του εδάφους περιορίζει την ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια του εδάφους, μειώνοντας ακόμα περισσότερο την τιμή του  $G$ . Και στις δυο περιπτώσεις η τελική τιμή του  $G$  είναι πολύ μικρότερη της ολικής καθαρής ηλιακής ακτινοβολίας,  $R_n$  γι' αυτό και κατά τον ημερήσιο υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς μπορεί και να παραληφθεί. Αντίθετα, όταν οι υπολογισμοί αφορούν σε μηνιαίες περιόδους, το βάθος του επηρεαζόμενου εδάφους θεωρείται πως μπορεί να φτάσει τα 2 m γι' αυτό και το  $G$  πρέπει να λαμβάνεται πάντα υπόψη (Allen *et al.*, 1998).

### 2.3.2 Οι υδρατμοί της ατμόσφαιρας

Οι υδρατμοί της ατμόσφαιρας παίζουν σημαντικό ρόλο στον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς, γιατί μέσω της πίεσης που ασκούν σε ένα συγκεκριμένο όγκο αέρα επηρεάζουν τη κίνηση των μορίων του νερού από την επιφάνεια του φύλλου προς τον αέρα και αντίστροφα. Η πίεση αυτή των υδρατμών (μετρούμενη σε kPa) δεν είναι σταθερή, αλλά εξαρτάται από τη θερμοκρασία,  $T$  (°C). Όταν ο αέρας πάνω από το φυτό είναι κορεσμένος, υπάρχει ισορροπία στη ροή μορίων νερού προς και από το φυτό, δηλαδή ο αέρας δεν μπορεί να αποθηκεύσει επιπλέον μόρια νερού. Στη περίπτωση αυτή, η πίεση που ασκείται από τους υδρατμούς του αέρα ονομάζεται *πίεση κορεσμού υδρατμών* ( $e^o$ ) και υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση του Tetens (1930):

$$e^o(T) = 0.6108 \exp\left(\frac{17.27T}{T + 273.3}\right) \quad (2.13)$$

Ημερήσιες τιμές της πίεσης κορεσμού υδρατμών ( $e_s$ ) υπολογίζονται ως ο μέσος όρος της  $e^o$  για τη μέγιστη και ελάχιστη ημερήσια θερμοκρασία:

$$e_s = \frac{e^o(T_{max}) + e^o(T_{min})}{2} \quad (2.14)$$

Η κλίση της γραμμής πίεσης κορεσμού υδρατμών,  $\Delta$ , δίνεται από την παραγωγή της  $e^o$  ως προς τη θερμοκρασία,  $T$ , για  $T = T_{mean}$ . Έτσι, από την εξίσωση (2.13):

$$\Delta = \frac{de^o}{dT}(T_{mean}) = \frac{2054 \exp\left(\frac{17.27T_{mean}}{T_{mean} + 237.3}\right)}{(T_{mean} + 237.3)^2}$$

Η *πραγματική πίεση υδρατμών*,  $e_a$ , μπορεί να εκτιμηθεί με διάφορους τρόπους, ανάλογα με τη διαθεσιμότητα των μετεωρολογικών δεδομένων. Μεγαλύτερη ευκολία, αλλά και πιθανώς μικρότερη ακρίβεια (Bos *et al.*, 2009), παρουσιάζει η εκτίμηση του  $e_a$  με βάση τη μέση ημερήσια σχετική υγρασία, η οποία είναι συνήθως διαθέσιμη στις περισσότερες χρονολογικές σειρές μετεωρολογικών δεδομένων. Στην περίπτωση αυτή, το  $e_a$  ισούται με:

$$e_a = \frac{RH_{mean}}{100} \left[ \frac{e^o(T_{max}) + e^o(T_{min})}{2} \right]$$

Ή αλλιώς, από την εξίσωση (2.14),  $e_a = e_s \times (RH_{mean}/100)$ , όπου  $RH_{mean}$  είναι η μέση ημερήσια σχετική υγρασία (%),  $T_{max}$  είναι η μέγιστη και  $T_{min}$  η ελάχιστη ημερήσια θερμοκρασία αντίστοιχα (°C).

Η *ψυχρομετρική σταθερά*,  $\gamma$  (kPa·°C<sup>-1</sup>), αντιπροσωπεύει την ισορροπία μεταξύ της αισθητής θερμότητας που προσκτήθηκε από τον αέρα και αυτής που μετατρέπεται σε λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης, μπορεί δε να υπολογιστεί από την σχέση του Brunt (1952):

$$\gamma = \frac{c_p \cdot P}{\varepsilon \cdot \lambda}$$

όπου  $P$  είναι η ατμοσφαιρική πίεση,  $\lambda$  είναι η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης,  $\varepsilon$  ο λόγος του μοριακού βάρους των υδρατμών προς εκείνο του ξηρού αέρα, που ισούται με  $\varepsilon = 0.622$  (αδιάστατο) και  $c_p$  η ειδική θερμότητα του αέρα (MJ·kg<sup>-1</sup>·°C<sup>-1</sup>), ήτοι η ενέργεια που απαιτείται για να αυξηθεί η θερμοκρασία του αέρα κατά ένα βαθμό υπό σταθερή πίεση. Για μέσες ατμοσφαιρικές συνθήκες, οι Allen *et al.* (1998) προτείνουν τη χρήση της τιμής  $c_p = 1.013 \times 10^{-3}$  MJ·kg<sup>-1</sup>·°C<sup>-1</sup>.

*Ατμοσφαιρική πίεση*,  $P$  (kPa) ονομάζεται η πίεση που ασκεί η ατμόσφαιρα στην επιφάνεια της γης και μπορεί να υπολογιστεί εμπειρικά από τη σχέση των Burman *et al.* (1987), ως συνάρτηση της θερμοκρασίας,  $T_{K0}$  (°K) σε έναν τόπο αναφοράς (συνήθως χρησιμοποιείται η επιφάνεια της θάλασσας) και της υψομετρικής διαφοράς μεταξύ του τόπου της μέτρησης,  $z$  (m), και του τόπου αναφοράς,  $z_0$  (m):

$$P = P_0 \left[ \frac{T_{K0} - 0.0065(z - z_0)}{T_{K0}} \right]^{\frac{g}{0.0065R}} \quad (2.15)$$

όπου  $P_0$  η ατμοσφαιρική πίεση στην επιφάνεια της θάλασσας (kPa),  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας που ισούται με 9.8 m·s<sup>-2</sup> και  $R$  η ειδική σταθερά των αερίων (με τιμή 287 J·kg<sup>-1</sup>·°K<sup>-1</sup>). Αν θεωρήσουμε ότι σε ύψος  $z_0 = 0$  και σε θερμοκρασία  $T_{K0} = 293$  °K (ή

ισοδύναμα 20 °C) η ατμοσφαιρική πίεση ισούται με  $P_0 = 101.3$  kPa, τότε η εξίσωση (2.15) μπορεί να γραφτεί ως:

$$P = 101.3 \left( \frac{293 - 0.0065z}{293} \right)^{5.26}$$

Η λανθάνουσα θερμότητα εξατμίσσης,  $\lambda$  ( $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) εκφράζει την ενέργεια που απαιτείται για τη μετατροπή μιας ποσότητας νερού από υγρή σε αέρια μορφή, σε σταθερές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας και μπορεί να υπολογιστεί ως συνάρτηση της μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας,  $T_{mean}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ).

$$\lambda = 2.501 - 2.361 \times 10^{-3} T_{mean}$$

Ωστόσο, αφού η διακύμανση της  $\lambda$  σε μεταβολές της θερμοκρασίας είναι σχετικά μικρή, οι Allen *et al.* (1998) προτείνουν την απλοποίηση της σε  $2.453 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ , η οποία αφορά στην τιμή της  $\lambda$  στο επίπεδο της θάλασσας και σε θερμοκρασία  $20^{\circ}\text{C}$ .

### 2.3.3 Υπολογισμός της *ETo* με ελλιπή κλιματικά δεδομένα

Είναι προφανές πως για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς με τη συνδυασμένη μέθοδο Penman Monteith κατά FAO-56 (εξίσωση 2.5) απαιτείται ένας σημαντικός αριθμός κλιματικών παραμέτρων, οι οποίες μπορεί να μην είναι πάντα διαθέσιμες ή να ενσωματώνουν σημαντικά σφάλματα μετρήσεων. Στις περιπτώσεις αυτές οι Bos *et al.* (2009) προτείνουν τη χρήση της μεθόδου Hargreaves-Samani (Hargreaves & Samani, 1985) η οποία προκύπτει στατιστικά από την (2.5) αλλά χρησιμοποιεί μόνο δεδομένα θερμοκρασίας:

$$ETo = 0.0023 \times 0.408R_A \times (T_{mean} + 17.8) \times (TD)^{0.5} \quad (2.16)$$

όπου  $R_A$  η εξωγήινη ηλιακή ακτινοβολία ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ), η οποία ορίστηκε στην εξίσωση (2.8),  $T_{mean}$  η μέση ημερήσια θερμοκρασία ( $^{\circ}\text{C}$ ) και  $TD$  η διαφορά μεταξύ ημερήσιας μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας ( $^{\circ}\text{C}$ ), δηλαδή  $TD = T_{max} - T_{min}$ .

Μειονέκτημα της μεθόδου Hargreaves-Samani είναι η υπερεκτίμηση της *ETo* σε πολύ υγρές (τροπικές) περιοχές και η υποεκτίμηση της σε πολύ ξηρές. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού, οι Droogers και Allen (2002) προσέθεσαν το ύψος της βροχόπτωσης στην εξίσωση (2.16), καταλήγοντας τελικά στην ακόλουθη σχέση, η οποία όμως χρησιμοποιείται για μηνιαίες και όχι ημερήσιες εκτιμήσεις της *ETo*:

$$ETo = 0.0013 \times 0.408R_A \times (T_{mean} + 17.0) \times (TD - 0.0123P)^{0.76}$$

Οι Ράπτη κ.α. (2009) μελέτησαν την αξιοπιστία της εξίσωσης (2.16) για χρήση στις Ελληνικές συνθήκες (περιοχή Νιγηρίας) και κατέληξαν πως η μέθοδος Hargreaves-Samani δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Επιπλέον, πρότειναν την αλλαγή του όρου  $(TD)^{0.5}$  σε  $(TD)^{0.475}$ , αφού με αυτό τον τρόπο μειώνεται το μέσο τετραγωνικό σφάλμα μεταξύ των αποτελεσμάτων της μεθόδου και εκείνων της Penman Monteith κατά FAO-56, η οποία θεωρείται πως υπερέχει κάθε άλλης μεθόδου, ειδικά σε κλιματικές συνθήκες που προσομοιάζουν με αυτές της Ελλάδας (Γεωργίου κ.α., 2000).

## 2.4 Εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας

Με τον όρο «εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας»,  $ETc$  ( $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ ), αναφερόμαστε στην πραγματική εξατμισοδιαπνοή ενός φυτού υπό κανονικές συνθήκες υγρασίας, δηλαδή χωρίς την εμφάνιση υδατικής καταπόνησης. Η εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας διαφέρει από την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς,  $ETo$ , αφού η τελευταία αναφέρεται σε μια υποθετική καλλιέργεια με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Οι δύο τους συνδέονται μέσω του αδιάστατου φυτικού συντελεστή  $Kc$ :

$$ETc = Kc \times ETo$$

Η προηγούμενη σχέση υποδηλώνει πως η  $ETc$  περιλαμβάνει τόσο την επίδραση των καιρικών συνθηκών, οι οποίες λαμβάνονται υπόψη κατά τον υπολογισμό της  $ETo$ , όσο και των ιδιαιτέρων χαρακτηριστικών της εξεταζόμενης καλλιέργειας που εκφράζονται μέσω της τιμής του  $Kc$ . Πιο συγκεκριμένα, ο φυτικός συντελεστής αντιπροσωπεύει τη συγκεντρωτική επίδραση που έχουν στην εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας: (1) το ύψος του φυτού, (2) το ποσοστό ανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας (albedo) από το φυτό, (3) η αντίσταση της φυλλικής επιφάνειας στην ανταλλαγή υδρατμών με την ατμόσφαιρα και (4) η εξάτμιση του εδάφους γύρω από το φυτό. Η διαφορά στα χαρακτηριστικά αυτά μεταξύ της εξεταζόμενης καλλιέργειας και της καλλιέργειας αναφοράς αντανακλάται στη διαφορά μεταξύ των  $ETc$  και  $ETo$ . Το γεγονός πως το  $Kc$  αντιπροσωπεύει συγκεκριμένες ιδιότητες του φυτού ανεξάρτητα από τις επικρατούσες κλιματικές συνθήκες, έχει οδηγήσει στην ευρεία αποδοχή της συγκεκριμένης μεθόδου υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής για χρήση σε διαφορετικές τοποθεσίες.

Καθώς η καλλιέργεια αναπτύσσεται, η τιμή του φυτικού συντελεστή μεταβάλλεται συνεχώς αφού διαφοροποιούνται τα χαρακτηριστικά τα οποία εκφράζει, δηλαδή το ύψος του φυτού και η έκταση της φυλλικής επιφάνειας, τα οποία με τη σειρά τους επηρεάζουν το albedo της καλλιέργειας και το ποσοστό της  $ETc$  που προέρχεται από την εξάτμιση του εδάφους γύρω από το φυτό. Έτσι, ο φυτικός συντελεστής λαμβάνει διαφορετική τιμή, ανάλογα με το στάδιο της βλαστικής περιόδου. Τα στάδια αυτά είναι (Παπαζαφειρίου, 1999):



1. *Το αρχικό στάδιο.* Το στάδιο αυτό ξεκινά με τη σπορά (ή τη φύτευση) και φτάνει μέχρι το ποσοστό εδαφικής φυτοκάλυψης να ανέρχεται σε περίπου 10%. Κατά την περίοδο αυτή η  $ET_c$  κυριαρχείται από την εξάτμιση του εδάφους, αφού η διαπνοή του φυτού είναι περιορισμένη λόγω της μικρής φυλλικής του επιφάνειας. Η τιμή του  $K_c$  κατά το στάδιο αυτό,  $K_{c_{ini}}$ , θεωρείται σταθερή και μπορεί να υπολογιστεί ως συνάρτηση της συχνότητας ύγρανσης του εδάφους (από βροχή ή άρδευση) και της μέσης τιμής της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς κατά την ίδια περίοδο.
2. *Στάδιο ταχείας ανάπτυξης.* Το στάδιο αυτό αρχίζει από το 10% φυτοκάλυψης του προηγούμενου σταδίου και τελειώνει με τη πλήρη κάλυψη του εδάφους από τη φυλλική επιφάνεια του φυτού. Λόγω της ταχείας ανάπτυξης της καλλιέργειας κατά το στάδιο αυτό, η τιμή του φυτικού συντελεστή ( $K_{c_{dev}}$ ) αυξάνεται γραμμικά, ενώ η εξατμισοδιαπνοή εξαρτάται ολοένα περισσότερο από τη διαπνοή του φυτού.
3. *Στάδιο μέσης περιόδου.* Ξεκινάει από την πλήρη φυτοκάλυψη, περιλαμβάνει την ανθοφορία και εκτείνεται χρονικά μέχρι το σχηματισμό των καρπών. Κατά το στάδιο αυτό, η τιμή του φυτικού συντελεστή ( $K_{c_{mid}}$ ) θεωρείται ότι παραμένει σταθερή λόγω της πλήρους φυτοκάλυψης και είναι υψηλότερη από κάθε άλλο στάδιο της βλαστικής περιόδου.
4. *Τελικό στάδιο.* Αρχίζει με την ωρίμανση των καρπών και τελειώνει με τη συγκομιδή. Η τιμή του φυτικού συντελεστή ( $K_{c_{fin}}$ ) κατά το στάδιο αυτό μειώνεται αφού η λειτουργία των στομάτων των φύλλων περιορίζεται λόγω της φυσιολογικής γήρανσης του φυτού. Η μείωση αυτή θεωρείται για λόγους ευκολίας πως είναι γραμμική, ενώ η τελική τιμή του φυτικού συντελεστή ( $K_{c_{end}}$ ) επηρεάζεται από την εδαφική υγρασία πριν τη συγκομιδή, με αποτέλεσμα να λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές σε φυτά που συγκομίζονται νωπά.

Η διάρκεια τόσο της βλαστικής περιόδου όσο και των επιμέρους σταδίων εξαρτώνται από τις κλιματικές συνθήκες και κυρίως τη θερμοκρασία που επηρεάζει το ρυθμό ανάπτυξης της καλλιέργειας. Η επίδραση της θερμοκρασίας εκφράζεται μέσα από την έννοια της «βαθμοημέρας» (degree day), η οποία αποτελεί δείκτη της απαιτούμενης συσσώρευσης θερμότητας προκειμένου να εκκινήσουν οι διάφορες βιολογικές διεργασίες που ορίζουν τα φαινολογικά στάδια κάθε φυτού (Russelle *et al.*, 1984). Αυτό φανερώνει πως η διάρκεια κάθε σταδίου της βλαστικής περιόδου εξαρτάται από την τοποθεσία και συνεπώς πρόκειται για μεγέθη που πρέπει να εκτιμηθούν πειραματικά κατά περίπτωση. Ενδεικτικές τιμές διάρκειας των σταδίων για διάφορες καλλιέργειες και κλιματικές συνθήκες δίνονται από τους Allen *et al.* (1998) στο έγγραφο FAO-56.

Να σημειωθεί πως ο φυτικός συντελεστής μπορεί να οριστεί και να υπολογιστεί με δυο διαφορετικούς τρόπους. Ο πρώτος αφορά στη χρήση μιας μοναδικής τιμής του  $Kc$  που περιλαμβάνει τόσο την εξάτμιση όσο και τη διαπνοή και ονομάζεται *μονός συντελεστής*. Με το δεύτερο τρόπο, το  $Kc$  αναλύεται σε δυο συνιστώσες, κάθε μια από τις οποίες περιγράφει ξεχωριστά τις διαδικασίες της διαπνοής του φυτού και της εξάτμισης του εδάφους γύρω από το φυτό και συνεπώς ονομάζεται *διπλός συντελεστής*:

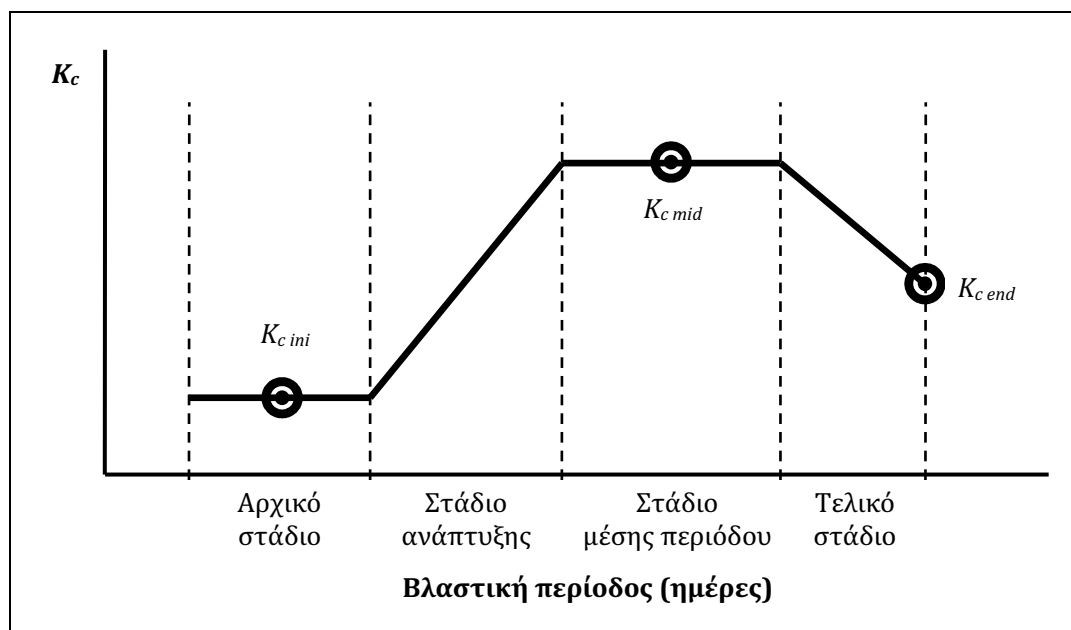
$$Kc = Kcb + Ke \quad (2.17)$$

Ο συντελεστής  $Kcb$  ονομάζεται «βασικός φυτικός συντελεστής» και αναφέρεται στην τιμή που λαμβάνει το  $Kc$  όταν η εξάτμιση είναι μηδενική, αλλά η εδαφική υγρασία είναι αρκετή για να μην επηρεάζεται η διαπνοή του φυτού. Αναλόγως, το  $Ke$  αντιπροσωπεύει την τιμή του  $Kc$  που οφείλεται στην εξάτμιση του εδάφους. Ο διπλός συντελεστής είναι αναλυτικότερος και περισσότερο πολύπλοκος σε σύγκριση με το μονό, γι' αυτό και χρησιμοποιείται συνήθως στις περιπτώσεις εκείνες όπου απαιτούνται λεπτομερέστεροι υπολογισμοί της εξατμισοδιαπνοής των φυτών, όπως για παράδειγμα για ερευνητικούς σκοπούς ή για την κατάρτιση αναλυτικών προγραμμάτων άρδευσης. Για τις ανάγκες της παρούσας διατριβής επιλέχθηκε η χρήση του μονού φυτικού συντελεστή, καθώς η εξίσωση (2.17) αυξάνει την πολυπλοκότητα των υπολογισμών, αλλά δεν προσφέρει την απαραίτητη αναλυτική προστιθέμενη αξία σε ένα βιο-οικονομικό υπόδειγμα.

## **2.5 Υπολογισμός του μονού φυτικού συντελεστή κατά στάδιο ανάπτυξης**

### **2.5.1 Γενικά**

Ο υπολογισμός του φυτικού συντελεστή αποτελεί το δεύτερο βήμα για την εκτίμηση των αναγκών των καλλιεργειών σε νερό. Η τιμή του  $Kc$  ανά στάδιο ανάπτυξης διαφέρει για κάθε φυτό ανάλογα με τις κλιματικές συνθήκες, την καλλιεργούμενη ποικιλία, το είδος του εδάφους και την ακολουθούμενη καλλιεργητική τεχνική και (Παπαζαφειρίου, 1999). Μια πρώτη γραφική απεικόνιση των τιμών του  $Kc$  παρουσιάζεται στο σχήμα 2.1.



**Σχήμα 2.1: Μεταβολές τιμής φυτικού συντελεστή κατά τη διάρκεια της βλαστικής περιόδου (Πηγή: Allen *et al.*, 1998)**

Οι Allen *et al.* (1998) δίνουν ενδεικτικές τιμές των  $K_{c_{ini}}$ ,  $K_{c_{mid}}$  και  $K_{c_{end}}$  διαφόρων καλλιεργειών, οι οποίες ωστόσο αποτελούν απλά προσεγγίσεις και κατά συνέπεια δεν μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστες για χρήση σε οποιοδήποτε σημείο της γης, αφού οι πραγματικές τους τιμές εξαρτώνται από τις επικρατούσες κλιματικές συνθήκες (πίνακας 2.1). Ιδιαίτερα για το αρχικό στάδιο δίνεται μόνο μια τιμή του  $K_{c_{ini}}$  για κάθε ομάδα καλλιεργειών, η οποία θεωρείται πως είναι αντιπροσωπευτική της ομάδας. Χαρακτηριστικά πρέπει να αναφερθεί πως ο Παπαζαφειρίου (1999) υπολόγισε τις τιμές των παραπάνω συντελεστών για καλαμπόκι, βαμβάκι, τεύτλα και βιομηχανική ντομάτα, οι οποίες διαφέρουν από τους αντίστοιχους που δίνονται από τους Allen *et al.* (1998). Η διαδικασία υπολογισμού των φυτικών συντελεστών κάθε σταδίου παρουσιάζεται στις επόμενες παραγράφους.

**Πίνακας 2.1: Ενδεικτικές τιμές φυτικών συντελεστών και μέσου ύψους των καλλιεργειών**

	$K_{c_{ini}}$	$K_{c_{mid}}$	$K_{c_{end}}$	Μέσο ύψος (m)
Σιτάρι <sup>1</sup>	0.70	1.15	0.25	1.0
Βαμβάκι <sup>1</sup>	0.35	1.15-1.20	0.70-0.50	1.2-1.5
Αραβόσιτος <sup>1</sup>	0.30	1.20	0.60	2.0
Μηδική <sup>1</sup>	0.40	1.20	1.15	0.7
Καπνός <sup>2</sup>	0.50	1.15	0.8	2.0

<sup>1</sup> Πηγή: Allen *et al.*, 1998

<sup>2</sup> Πηγή: [http://www.fao.org/nr/water/cropinfo\\_tobacco.html](http://www.fao.org/nr/water/cropinfo_tobacco.html)

## 2.5.2 Φυτικός συντελεστής αρχικού σταδίου

Όπως προαναφέρθηκε, η εξατμισοδιαπνοή κατά το αρχικό στάδιο βασίζεται κυρίως στο φαινόμενο της εξάτμισης, αφού το φυτό δεν έχει ακόμη αναπτύξει τη φυλλική του επιφάνεια. Η εξίσωση με την οποία μπορεί να υπολογιστεί η τιμή του  $Kc_{ini}$  είναι:

$$Kc_{ini} = \frac{E_s}{ETo_{ini}} \quad (2.18)$$

Όπου  $E_s$  ( $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ ) είναι ο ρυθμός εξάτμισης νερού από μια επιφάνεια εδάφους κατά το αρχικό στάδιο της βλαστικής περιόδου και  $ETo_{ini}$  η μέση εξατμισοδιαπνοή αναφοράς την ίδια χρονική περίοδο (επίσης σε  $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ ). Όσο συχνότερα υγραίνεται το έδαφος (από βροχή ή άρδευση) και όσο πιο έντονη είναι αυτή η ύγρανση, τόσο μεγαλύτερος θα είναι ο ρυθμός εξάτμισης,  $E_s$ , και άρα η τιμή του φυτικού συντελεστή. Αντίθετα, ατμοσφαιρικές συνθήκες που αντιστοιχούν σε υψηλότερο  $ETo_{ini}$  έχουν ως αποτέλεσμα μικρότερες τιμές του  $Kc_{ini}$ . Έτσι, για τον υπολογισμό του φυτικού συντελεστή κατά το αρχικό στάδιο της βλαστικής περιόδου είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη (α) η εξατμιστική δύναμη της ατμόσφαιρας, (β) το μέσο χρονικό διάστημα μεταξύ διαδοχικών υγράνσεων από βροχή ή άρδευση και (γ) η ένταση της ύγρανσης αυτής, δηλαδή η ποσότητα του νερού της βροχής ή της άρδευσης (μετρούμενη σε mm).

Ξεκινώντας από το μέσο χρονικό διάστημα μεταξύ δυο διαδοχικών υγράνσεων, αυτό υπολογίζεται διαιρώντας τον αριθμό των υγράνσεων κατά το αρχικό στάδιο με τον αριθμό των ημερών του σταδίου. Οι Allen *et al.* (1998) ορίζουν ως «ύγρανση» ή «συμβάν ύγρανσης» τη βροχόπτωση ή άρδευση με ύψος (ή βάθος αντίστοιχα) μεγαλύτερη «κάποιων χιλιοστών». Αυστηρότερα, ως ύγρανση ορίζεται η βροχή ή άρδευση με ένταση μεγαλύτερη του  $0.2 \times ETo_{ini}$ . Έτσι, ο μέσος χρόνος (ημέρες) μεταξύ δυο διαδοχικών υγράνσεων κατά την αρχική περίοδο,  $t_w$ , μπορεί να δοθεί προσεγγιστικά από τον ακόλουθο τύπο:

$$t_w = \frac{L_{ini}}{n_w + 0.5}$$

Στην παραπάνω εξίσωση,  $L_{ini}$  είναι ο αριθμός των ημερών του αρχικού σταδίου και  $n_w$  ο αριθμός των υγράνσεων κατά το ίδιο στάδιο.

Η εξάτμιση του νερού από μια επιφάνεια εδάφους διακρίνεται χρονικά σε δυο φάσεις που εξαρτώνται από τον περιοριστικό παράγοντα του φαινομένου της εξάτμισης. Η πρώτη φάση ξεκινάει αμέσως μετά από βροχή ή άρδευση, οπότε η περιεκτικότητα σε νερό των ανώτερων στρωμάτων του εδάφους θεωρείται ότι είναι ίση με την υδατοϊκανότητα του. Η υδατοϊκανότητα (Field Capacity) αναφέρεται σε εκείνη τη περιεκτικό-

τητα του εδάφους σε νερό που θεωρείται ιδανική για την ανάπτυξη των φυτών και η οποία προκύπτει μετά την απομάκρυνση του πλεονάζοντος νερού από το ριζόστρωμα λόγω της βαρύτητας, λίγες μέρες μετά από βροχή ή άρδευση (Παπαζαφειρίου, 1999).

Η πρώτη φάση χαρακτηρίζεται από επάρκεια υγρασίας, με αποτέλεσμα η επιφάνεια του εδάφους να παραμένει υγρή, ενώ η εξάτμιση πραγματοποιείται με το μέγιστο δυνατό ρυθμό. Συνεπώς η ένταση του φαινομένου εξαρτάται αποκλειστικά από την εξατμιστική ικανότητα της ατμόσφαιρας που εκφράζεται από την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς, γι' αυτό και η φάση αυτή ονομάζεται «περιοριζόμενη από την ενέργεια» (energy limited stage). Ο ρυθμός εξάτμισης κατά τη φάση αυτή,  $E_{s1}$  ( $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ ), μπορεί να εκτιμηθεί από τη σχέση:

$$E_{s1} = 1.15 \times ET_{o_{ini}} \quad (2.19)$$

Ο συντελεστής 1.15 δείχνει πως η εξάτμιση μπορεί να είναι μεγαλύτερη της μέσης εξατμισοδιαπνοής, κυρίως λόγω της μικρότερης ανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας, ελλείψει φυλλικής επιφάνειας. Κατά τη φάση αυτή, η ποσότητα του νερού, ή ισοδύναμα, το συνολικό βάθος νερού που δύναται να εξατμιστεί από τα επιφανειακά εδαφικά στρώματα χωρίς περιορισμό ονομάζεται *άμεσα εξατμίσιμο νερό* (readily evaporable water), συμβολίζεται με  $REW$  (mm) και εξαρτάται από τις υδραυλικές ιδιότητες του εδάφους.

Με το πέρασμα του χρόνου η εδαφική υγρασία μειώνεται συνεχώς και ένα μέρος της εξάτμισης τελικά πραγματοποιείται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Η δεύτερη φάση, η οποία ονομάζεται «περιοριζόμενη του εδάφους» (soil limited stage), ξεκινάει όταν η εξάτμιση ξεπεράσει ένα κρίσιμο βάθος, ίσο με  $REW$ , μετά το οποίο δεν είναι δυνατή η μεταφορά μορίων νερού από τα κατώτερα εδαφικά στρώματα προς την επιφάνεια του εδάφους με ρυθμό που να καλύπτει την υψηλή εξατμιστική ικανότητα της ατμόσφαιρας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η εξάτμιση να μειώνεται όσο ελαττώνεται η περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό, μέχρι την τελική παύση της. Ο μέσος ρυθμός της εξάτμισης κατά τη δεύτερη φάση,  $E_{s2}$  ( $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ ), μπορεί να γραφτεί ως συνάρτηση της εναπομένουσας ποσότητας εδαφικού νερού, που με τη σειρά του εξαρτάται από το βάθος,  $D_e$ , που βρίσκεται αυτό:

$$E_{s2}(D_e) = E_{s1} \left( \frac{TEW - D_e}{TEW - REW} \right) \quad (2.20)$$

όπου  $TEW$  το συνολικό εξατμίσιμο νερό (Total Evaporable Water) που αντιπροσωπεύει τη συνολική ποσότητα εξατμιζόμενου νερού (mm) και στις δυο φάσεις της εξάτμισης, δηλαδή μέχρι τη στιγμή της οριστικής παύσης της. Ο διαιρέτης στη δεξιά πλευρά της

εξίσωσης (2.20) αντιπροσωπεύει το διαθέσιμο εξατμιζόμενο νερό στο τέλος της πρώτης φάσης και ο διαιρετέος την εναπομένονσα ποσότητα εδαφικού νερού σε διάφορα βάθη. Προφανώς η παραπάνω εξίσωση έχει νόημα για  $D_e > REW$ , αφού για οποιαδήποτε άλλη τιμή του  $D_e$ , η εξάτμιση ισούται με  $E_{s1}$ . Το  $TEW$  με τη σειρά του μπορεί να εκτιμηθεί από την εξίσωση:

$$TEW = 1000(\theta_{FC} - 0.5\theta_{WP})Z_e \quad (2.21)$$

όπου τα  $\theta_{FC}$  και  $\theta_{WP}$  συμβολίζουν την υδατοϊκανότητα του εδάφους και τη περιεκτικότητα του σε νερό στο σημείο μόνιμης μάρανσης αντίστοιχα ( $m^3 \cdot m^{-3}$ ).  $Z_e$  είναι το βάθος του εδάφους που υπόκειται σε εξάτμιση και το οποίο κυμαίνεται μεταξύ 0.1 – 0.15 μέτρων. Όταν η πραγματική του τιμή είναι άγνωστη, το  $Z_e$  μπορεί να θεωρηθεί ίσο με 0.15 μέτρα. Σύμφωνα με τη σχέση (2.21), η συνολική ποσότητα νερού που μπορεί να χαθεί λόγω της εξάτμισης αντιστοιχεί σε βάθος νερού που βρίσκεται πιο κάτω από το σημείο μόνιμης μάρανσης (Permanent Wilting Point), δηλαδή το κατώτατο όριο της εδαφικής υγρασίας, πέρα από το οποίο τα φυτά αδυνατούν να αντλήσουν την απαραίτητη ποσότητα νερού και μαραίνονται (Παπαζαφειρίου, 1999).

Όταν η εξατμιστική δύναμη της ατμόσφαιρας είναι χαμηλή ( $ETo_{ini} < 5 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ), όπως για παράδειγμα μπορεί να συμβεί κατά τη διάρκεια του χειμώνα, η τιμή του  $TEW$  μπορεί να είναι μικρότερη από αυτή που δίνεται από την εξίσωση (2.21). Στη περίπτωση αυτή, το  $TEW$  μπορεί να εκτιμηθεί με τη σχέση:

$$TEW = 1000(\theta_{FC} - 0.5\theta_{WP})Z_e \sqrt{\frac{ETo_{ini}}{5}} \quad (2.22)$$

Λαμβάνοντας υπόψη πως η εξάτμιση περιλαμβάνει τις δυο φάσεις που αναλύθηκαν προηγουμένως, ο φυτικός συντελεστής  $Kc_{ini}$ , όπως ορίστηκε στην εξίσωση (2.18), εξαρτάται από την τιμή του  $E_s$ . Αυτή με τη σειρά της εξαρτάται από τη σχέση μεταξύ του μέσου χρονικού διαστήματος μεταξύ δυο διαδοχικών υγράνσεων,  $t_w$ , και του χρόνου ολοκλήρωσης της πρώτης φάσης της εξάτμισης,  $t_1$ , που ορίζεται ως:

$$t_1 = \frac{REW}{E_{s1}}$$

Αν  $t_1 > t_w$  η πρώτη φάση της εξάτμισης δε θα έχει ολοκληρωθεί μέχρι την επόμενη ύγρανση του εδάφους, οπότε  $E_s = E_{s1}$  κι έτσι ο φυτικός συντελεστής έχει τιμή 1.15, όπως προκύπτει από τις εξισώσεις (2.18) και (2.19). Αντίθετα, αν  $t_1 < t_w$  η εξάτμιση θα έχει περάσει στη δεύτερη φάση πριν την επόμενη ύγρανση, κι έτσι το  $Kc_{ini}$  υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$Kc_{ini} = \frac{TEW - (TEW - REW) \exp \left[ \frac{-(t_w - t_1) E_{s1} \left( 1 + \frac{REW}{TEW - REW} \right)}{TEW} \right]}{t_w \times ETo_{ini}}$$

Οι παραπάνω σχέσεις ισχύουν όταν μετά από την ύγρανση, η περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό θεωρηθεί πως είναι ίση με υδατοϊκανότητα του. Στην πραγματικότητα, μια βροχή ή άρδευση είναι πιθανό να μην έχει την απαραίτητη ένταση, με αποτέλεσμα το τελικό  $TEW$  να είναι μικρότερο από εκείνο που υπολογίζεται μέσω των εξισώσεων (2.21) και (2.22). Πιο συγκεκριμένα, αν οριστεί ως  $W_{ini}$  το αρχικό ισοδύναμο βάθος νερού στα επιφανειακά στρώματα του εδάφους κατά το ξεκίνημα του αρχικού σταδίου, τότε η συνολική ποσότητα νερού που δέχεται το έδαφος καθ' όλη τη διάρκεια του αρχικού σταδίου θα ισούται με  $(n_w \times P_{mean} + W_{ini})$ , όπου  $n_w$  ο αριθμός των υγράνσεων και  $P_{mean}$  (mm) η μέση ένταση ενός φαινομένου ύγρανσης, η οποία υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$P_{mean} = \frac{P + IR}{n_w}$$

Με  $P$  και  $IR$  συμβολίζονται οι συνολικές ποσότητες νερού βροχής και άρδευσης αντίστοιχα κατά το αρχικό στάδιο της βλαστικής περιόδου (σε mm). Σε κάθε φαινόμενο ύγρανσης με  $P_{mean} < TEW$ , η εδαφική υγρασία θα ισούται με  $(P_{mean} + W_{ini}/n_w)$ , η οποία μπορεί να είναι είτε μεγαλύτερη είτε μικρότερη από το υπολογιζόμενο  $TEW$  και για το λόγο αυτό πρέπει να χρησιμοποιηθούν οι «διορθωμένες» τιμές  $TEW_{cor}$  και  $REW_{cor}$  που προκύπτουν από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$TEW_{cor} = \min \left[ TEW, \left( P_{mean} + \frac{W_{ini}}{n_w} \right) \right]$$

$$REW_{cor} = REW \left\{ \min \left[ \left( \frac{P_{mean} + \frac{W_{ini}}{n_w}}{TEW} \right), 1 \right] \right\}$$

όπου το  $TEW$  προέρχεται από μια εκ των εξισώσεων (2.21) και (2.22).

### 2.5.3 Φυτικοί συντελεστές υπολοίπων σταδίων

Για τα  $Kc_{mid}$  και  $Kc_{end}$ , όταν η μέση ελάχιστη σχετική υγρασία ( $RH_{min}$ ) είναι περίπου ίση με 45% και η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 2 μέτρων ( $u_2$ ) ίση με  $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι τιμές του πίνακα 2.1. Για διαφορετικές τιμές ελάχιστης σχετικής υγρασίας και ταχύτητας ανέμου, οι Allen *et al.* (1998) προτείνουν τη χρήση της παρακάτω σχέσης:

$$Kc = Kc_{(\text{πίνακας})} + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3}$$

Όπου  $Kc_{(\text{πίνακας})}$  είναι η αντίστοιχη τιμή του πίνακα 2.1,  $RH_{min}$  η μέση ελάχιστη σχετική υγρασία κατά το αντίστοιχο στάδιο της βλαστικής περιόδου (στάδιο μέσης περιόδου ή το τελικό στάδιο) και  $h$  το μέσο ύψος (m) του φυτού κατά το στάδιο της μέσης περιόδου, ενδεικτικές τιμές του οποίου επίσης δίνονται επίσης από τον πίνακα 2.1. Η ημερήσια ελάχιστη σχετική υγρασία μπορεί να υπολογιστεί με την εξίσωση:

$$RH_{min} = \frac{e^o(T_{dew})}{e^o(T_{max})} 100$$

όπου  $T_{dew}$  η θερμοκρασία στο σημείο δρόσου, δηλαδή η θερμοκρασία στην οποία, κατά την ψύξη του αέρα, η πραγματική πίεση των υδρατμών γίνεται ίση με την πίεση κορεσμού. Να σημειωθεί πως η εύρεση αξιόπιστων μετρήσεων για το  $T_{dew}$  αποτελεί σημαντικό πρόβλημα στη χρήση συνδυασμένων μεθόδων υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής, κάτι που σημειώθηκε και από τον Penman (1948). Για το λόγο αυτό, όταν δεν υπάρχουν παρατηρήσεις για το σημείο δρόσου, θεωρείται πως  $T_{dew} = T_{min}$ .

Γνωρίζοντας ακριβώς τη διάρκεια (σε ημέρες) των διαφόρων σταδίων της βλαστικής περιόδου και λαμβάνοντας υπόψη πως οι τιμές των  $Kc_{ini}$  και  $Kc_{mid}$  είναι σταθερές, οι ημερήσιες τιμές των  $Kc_{dev}$  και  $Kc_{fin}$  μπορούν να υπολογιστούν από τον τύπο:

$$Kc_d = Kc_{prev} + \left(\frac{d - \sum L_{prev}}{L_{stage}}\right) (Kc_{next} - Kc_{prev}) \quad (2.23)$$

Στην παραπάνω εξίσωση το  $Kc_d$  συμβολίζει την τιμή του  $Kc$  την ημέρα  $d$ , τα  $Kc_{prev}$  και  $Kc_{next}$  είναι οι τιμές του φυτικού συντελεστή κατά το προηγούμενο και επόμενο στάδιο αντίστοιχα,  $\sum L_{prev}$  είναι η διάρκεια (σε ημέρες) όλων των προηγούμενων σταδίων και  $L_{stage}$  είναι η διάρκεια του παρόντος σταδίου, δηλαδή εκείνο στο οποίο αναφέρεται η  $d$  μέρα. Στην περίπτωση του  $Kc_{fin}$ , το  $Kc_{next}$  αντιστοιχεί στην τελική τιμή του φυτικού συντελεστή, δηλαδή το  $Kc_{end}$ . Είναι προφανές πως για τον υπολογισμό οποιασδήποτε τιμής  $Kc_d$  απαιτείται μόνο η γνώση των  $Kc_{ini}$ ,  $Kc_{mid}$  και  $Kc_{end}$ , αφού οι υπόλοιπες μπορούν να υπολογιστούν από την εξίσωση (2.23) με τη βοήθεια των τριών προαναφερθέντων τιμών.

## 2.6 Πραγματική εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας

Η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς ( $ET_o$ ) και η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας ( $ET_c$ ) αναφέρονται σε ιδανικές ατμοσφαιρικές και αγρονομικές συνθήκες, δηλαδή πρόκειται για μεγέθη που δίνουν τις μέγιστες τιμές εξατμισοδιαπνοής για τις επικρατούσες κλιμα-



τικές συνθήκες και το είδος της καλλιέργειας. Όταν η εδαφική υγρασία δεν είναι αρκετή για να διατηρηθεί ο μέγιστος ρυθμός της διαπνοής, προκαλείται υδατική καταπόνηση στο φυτό κι έτσι η εξατμισοδιαπνοή μειώνεται. Η μείωση αυτή αποδίδεται μαθηματικά με τον αδιάστατο *συντελεστή υδατικής καταπόνησης*,  $K_s$ , ο οποίος για ιδανικές συνθήκες εδαφικής υγρασίας ισούται με 1, ενώ για περιπτώσεις υδατικής καταπόνησης είναι μικρότερος της μονάδας ( $K_s < 1$ ). Η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας υπό μη ιδανικές συνθήκες εδαφικής υγρασίας,  $ETc_{adj}$ , υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας το  $K_s$  με το φυτικό συντελεστή της καλλιέργειας, ή ισοδύναμα με το  $ETc$ :

$$ETc_{adj} = K_s \times K_c \times ET_o = K_s \times ETc$$

Ο υπολογισμός της τιμής του  $K_s$  πραγματοποιείται σε ημερήσια βάση και μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση του ελλείμματος νερού από το ριζόστρωμα,  $Dr$  (mm):

$$K_s(Dr) = \frac{TAW - Dr}{TAW - RAW} \quad (2.24)$$

όπου  $TAW$  το *συνολικό διαθέσιμο νερό* ή *διαθέσιμη υγρασία* (Total Available Water) και  $RAW$  το *άμεσα διαθέσιμο νερό* ή *ωφέλιμη υγρασία* (Readily Available Water), όλα μετρούμενα σε mm.

Το  $Dr$  παίρνει τιμή μηδέν όταν η υγρασία του εδάφους αντιστοιχεί στη υδατοϊκανότητα του, αλλά στη συνέχεια αυξάνεται λόγω της απομάκρυνσης του νερού από το έδαφος λόγω εξάτμισης και διαπνοής. Το  $TAW$  αντιπροσωπεύει τη συνολική ποσότητα του νερού που δύναται να απορροφήσει η καλλιέργεια από το έδαφος. Αριθμητικά ισούται με εκείνη την περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό που αντιστοιχεί στη διαφορά μεταξύ της υδατοϊκανότητας και του σημείου μάρανσης, ενώ η τιμή του μπορεί να εκτιμηθεί με την εξίσωση:

$$TAW = 1000(\theta_{FC} - \theta_{WP})Zr \quad (2.25)$$

όπου τα  $\theta_{FC}$  και  $\theta_{WP}$  συμβολίζουν την περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό στην υδατοϊκανότητα του και στο σημείο μάρανσης αντίστοιχα ( $m^3 \cdot m^{-3}$ ) και  $Zr$  είναι το βάθος του ριζοστρώματος (m).

Μετά από μια βροχή ή άρδευση που επαναφέρει το έδαφος στην υδατοϊκανότητα του, η απορρόφηση νερού από την καλλιέργεια γίνεται με ρυθμό ίσο με την εξατμισοδιαπνοή της ( $ETc$ ), δηλαδή καλύπτεται πλήρως η διαπνοή και συνεπώς δεν παρατηρείται υδατική καταπόνηση. Αυτό συνεχίζεται μέχρι τη στιγμή που η περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία πέσει κάτω από ένα κρίσιμο όριο (το οποίο συμβολίζεται με  $\theta_z$  και μετράται σε  $m^3 \cdot m^{-3}$ ), μετά το οποίο ο ρυθμός απορρόφησης νερού από το ριζικό σύστημα της

καλλιέργειας αρχίζει σταδιακά να μειώνεται, αφού αυτή καθίσταται δυσκολότερη λόγω του συνεχώς μειούμενου δυναμικού του εδαφικού νερού. Το  $RAW$  εκφράζει εκείνη ακριβώς την ποσότητα εδαφικού νερού που μπορεί να απορροφηθεί από το φυτό μέχρι την εμφάνιση υδατικής καταπόνησης, δηλαδή μέχρι η περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία να μειωθεί πέρα από το  $\theta_t$ . Η τιμή του  $RAW$  μπορεί να εκτιμηθεί με τη σχέση:

$$RAW = p \times TAW \quad (2.26)$$

όπου με  $p$  συμβολίζεται το κλάσμα του  $TAW$  που μπορεί να αφαιρεθεί από το ριζόστρωμα πριν την εμφάνιση υδατικής καταπόνησης στην καλλιέργεια και ονομάζεται *συντελεστής ή παράγοντας ωφελιμότητας*. Το  $p$  μπορεί να λάβει τιμές από 0 έως 1 και εξαρτάται από την εξατμιστική ικανότητα της ατμόσφαιρας, η οποία για κάθε καλλιέργεια δίνεται από την εξατμισοδιαπνοή της,  $ETc$ . Λόγω της (2.26), η εξίσωση (2.24) μπορεί να γραφτεί εναλλακτικά ως:

$$Ks(Dr) = \frac{TAW - Dr}{(1 - p)TAW}$$

Η χρήση του παράγοντα ωφελιμότητας,  $p$ , για τον υπολογισμό του  $RAW$  αποτελεί ουσιαστικά μονόδρομο, αφού ο ανεξάρτητος υπολογισμός του τελευταίου για τους άπειρους συνδυασμούς εδάφους-καλλιέργειας-κλίματος είναι πρακτικά ανέφικτος (Παπαζαφειρίου, 1999). Έτσι, η έκφραση του  $RAW$  ως κλάσμα του  $TAW$  διευκολύνει τους υπολογισμούς, καθώς στη βιβλιογραφία μπορεί να βρει κανείς τιμές του  $p$  που έχουν προκύψει από πειραματικά δεδομένα. Ειδικότερα, οι Doorenbos και Pruiitt (1977) δίνουν ενιαίες τιμές για ομάδες καλλιεργειών σε διάφορα επίπεδα εξατμισοδιαπνοής, ενώ οι Allen *et al.* (1998) δίνουν γενικές τιμές του  $p$  για διάφορες καλλιέργειες που αφορούν σε όλη τη βλαστική περίοδο και αναφέρονται σε ένα μέσο ρυθμό εξατμισοδιαπνοής  $ETc = 5 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$  (πρώτη στήλη του πίνακα 2.2). Εναλλακτικά, ο FAO δίνει τιμές του συντελεστή ωφελιμότητας ξεχωριστά για κάθε στάδιο της βλαστικής περιόδου (υπόλοιπες στήλες του πίνακα 2.2).

**Πίνακας 2.2: Ενδεικτικές τιμές παράγοντα ωφελιμότητας για  $ETc = 5 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$**

	$p^1$	$p_{ini}^2$	$p_{dev}^2$	$p_{mid}^2$	$p_{fin}^2$
Σιτάρι	0.55	0.60	0.60	0.60	0.90
Βαμβάκι	0.65	0.60	0.60	0.60	0.90
Αραβόσιτος	0.55	0.50	0.50	0.50	0.80
Μηδική	0.55	-	-	-	-
Καπνός	-	0.40	0.40	0.50	0.65

<sup>1</sup> Πηγή: Allen *et al.*, 1998

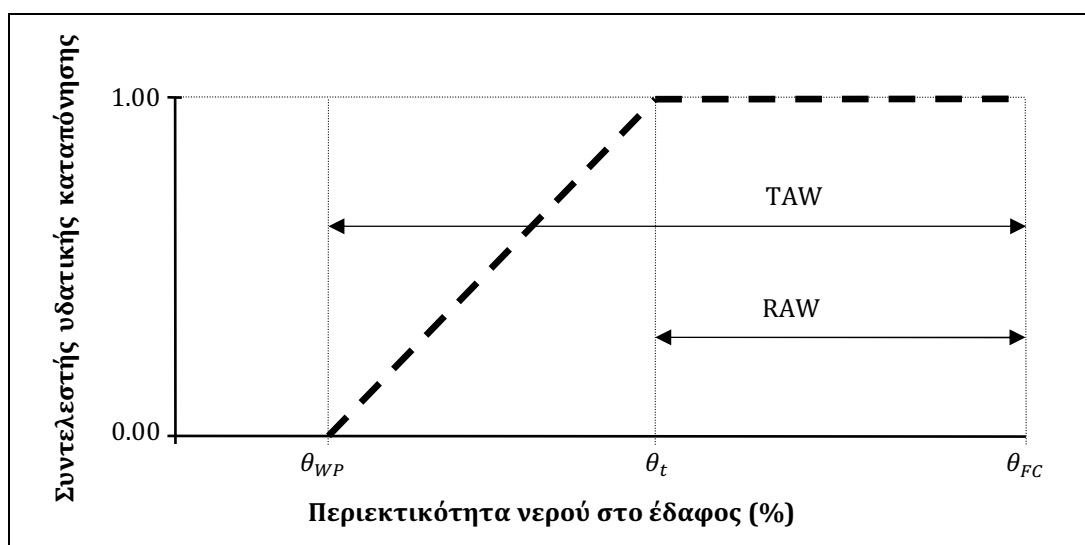
<sup>2</sup> Πηγή: <http://www.fao.org/nr/water/cropinfo.html>

Όταν οι ατμοσφαιρικές συνθήκες αντιστοιχούν σε επίπεδα εξατμισοδιαπνοής μικρότερα των  $3 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ , οι τιμές του  $p$  πρέπει να αυξηθούν κατά 5-10% και να μειωθούν κατά το ίδιο ποσοστό για  $ETc \geq 8 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$  (Παπαζαφειρίου, 1999). Ένας απλούστερος τρόπος προσαρμογής της γενικής τιμής του  $p$  για ατμοσφαιρικές συνθήκες που αντιστοιχούν σε  $ETc \neq 5 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$  προσφέρεται από την εξίσωση:

$$p = p_{(\text{πίνακας})} + 0.04(5 - ETc) \quad (2.27)$$

Όπου  $p_{(\text{πίνακας})}$  η γενική τιμή του συντελεστή ωφελιμότητας, η οποία αντιστοιχεί στην πρώτη στήλη του πίνακα 2.2. Να σημειωθεί πως παρά την προσαρμογή μέσω της εξίσωσης (2.27), ο ορισμός του συντελεστή υδατικής καταπόνησης με τη χρήση του  $p$ , δηλαδή ως συνάρτηση των ατμοσφαιρικών συνθηκών μέσω της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας, δεν είναι απόλυτα σωστός. Πιο συγκεκριμένα, η απορρόφηση νερού από το ριζικό σύστημα των φυτών εξαρτάται επίσης από τις υδραυλικές ιδιότητες του εδάφους που διαμορφώνουν το δυναμικό του εδαφικού νερού και συνεπώς επηρεάζουν τη κίνηση του στο ριζόστρωμα. Για το λόγο αυτό, οι Allen *et al.* (1998) προτείνουν την αύξηση της τιμής του  $p_{(\text{πίνακας})}$  κατά 5-10% σε αμμώδη-ελαφρά εδάφη, στα οποία η κίνηση του νερού είναι ταχεία, ενώ στα πιο συνεκτικά-αργιλώδη εδάφη το  $p_{(\text{πίνακας})}$  μπορεί να μειωθεί κατά 5-10%, αφού η κίνηση του νερού είναι πιο περιορισμένη.

Επιστρέφοντας στην εξίσωση (2.24), η υδατική καταπόνηση στο φυτό ξεκινάει όταν  $Dr > RAW$ , δηλαδή όταν η περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό πέσει κάτω από το κρίσιμο όριο  $\theta_t$  (σχήμα 2.2), πέρα από το οποίο η εδαφική υγρασία δεν επαρκεί για τη διατήρηση ενός υψηλού ρυθμού εξατμισοδιαπνοής. Αυτό σημαίνει πως η εξίσωση (2.24) ισχύει μόνο για  $Dr > RAW$ , αφού σε κάθε άλλη περίπτωση  $Ks = 1$ .



**Σχήμα 2.2:** Η διακύμανση του συντελεστή υδατικής καταπόνησης,  $Ks$ , για διάφορα επίπεδα εδαφικής υγρασίας (Πηγή: Allen *et al.*, 1998)

Ο υπολογισμός του  $K_s$  πραγματοποιείται σε ημερήσια βάση μέσω ενός ημερήσιου υδατικού ισοζυγίου στη ζώνη του ριζοστρώματος που λαμβάνει υπόψη τις αντίστοιχες μεταβολές στη τιμή του  $Dr$  λόγω βροχής ή άρδευσης:

$$Dr_d = Dr_{d-1} - IR_d + ETc_d - (P_d - RO_d - DP_d) - CR_d \quad (2.28)$$

όπου  $Dr_d$  το έλλειμμα νερού στο ριζόστρωμα την ημέρα  $d$ ,  $Dr_{d-1}$  το έλλειμμα νερού στο τέλος της προηγούμενης ημέρας,  $d - 1$ , (ή ισοδύναμα, στην έναρξη της ημέρας  $d$ ),  $IR_d$  είναι η ποσότητα του νερού άρδευσης,  $ETc_d$  η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας,  $P_d$  το ύψος της βροχόπτωσης,  $RO_d$  η επιφανειακή απορροή του νερού της βροχής,  $DP_d$  είναι η ποσότητα του νερού που χάνεται λόγω διήθησης στα βαθύτερα εδαφικά στρώματα και  $CR_d$  η τριχοειδής ανύψωση του νερού από υποκείμενο υδροφόρο ορίζοντα. Όλα τα παραπάνω μεγέθη μετρούνται σε mm. Οι όροι σε παρένθεση αποτελούν τη *χρήσιμη βροχή* (Παπαζαφειρίου, 1999), δηλαδή το μέρος της βροχής που αποθηκεύεται στη ζώνη του ριζοστρώματος και μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τις καλλιέργειες για την κάλυψη των αναγκών τους σε νερό, αφού πρώτα αφαιρεθεί η ποσότητα που χάνεται λόγω απορροής και βαθιάς διήθησης.

Τα φαινόμενα της επιφανειακής απορροής ( $RO$ ) και της βαθιάς διήθησης ( $DP$ ) εμφανίζονται στο έδαφος όταν η (α) ένταση της βροχής είναι μεγαλύτερη από το ρυθμό απορρόφησης του νερού από το ριζόστρωμα και (β) όταν η ποσότητα του νερού είναι τέτοια ώστε να επιτυγχάνεται ο υδατικός κορεσμός του εδάφους (USDA, 2004). Ειδικότερα, όταν η ένταση της βροχής ξεπεράσει τη διηθητική ικανότητα του εδάφους, το επιπλέον νερό λιμνάζει και χάνεται μέσω της επιφανειακής απορροής. Αντίθετα όταν η ένταση της βροχής είναι μικρή αλλά το ύψος μεγάλο και υπερβαίνει τη δυνατότητα κατακράτησης νερού από το έδαφος ( $TAW$ ), τότε το επιπλέον νερό χάνεται με βαθιά διήθηση (Παπαζαφειρίου, 1999).

Το πρώτο ενδεχόμενο δεν μπορεί να διαπιστωθεί με βάση τα ημερήσια στοιχεία που συνήθως έχει στη διάθεση του ο αναλυτής, αφού αυτά αναφέρονται σε ημερήσιο ύψος βροχής και όχι στην ένταση της. Για το λόγο αυτό θεωρήθηκε πως η *χρήσιμη βροχή* αποτελεί το 75% του συνολικού ημερήσιου ύψους βροχόπτωσης, ενώ το υπόλοιπο 25% αφορά στο νερό που χάνεται λόγω βαθιάς διήθησης και επιφανειακής απορροής (Burton, 2010). Όταν η *χρήσιμη βροχή* επαρκεί για να προκαλέσει τον υδατικό κορεσμό των επιφανειακών στρωμάτων του εδάφους, το οποίο σημαίνει πως το έδαφος έχει επανέλθει στην υδατοϊκανότητα του και έχει μηδενιστεί το έλλειμμα νερού, τα  $RO$  και  $DP$  που ακολουθούν τον κορεσμό μπορούν να αγνοηθούν. Συγκεκριμένα, η εξίσωση (2.24) διατυπώθηκε προκειμένου να βρεθεί η χρονική στιγμή κατά την οποία το  $Dr$  θα είναι μικρότερο από το  $RAW$ , οπότε και θα πρέπει να εφαρμοστεί η κατάλληλη ποσό-

τητα νερού άρδευσης για να επανέλθει το έδαφος στην υδατοϊκανότητα του και να μη-δενιστεί το έλλειμμα νερού. Αν η χρήσιμη βροχή από μόνη της επαρκεί για το σκοπό αυτό, τότε ο υπολογισμός της επιφανειακής απορροής δεν θα έχει τίποτε να προσφέρει στην εκτίμηση των αναγκών των φυτών σε νερό, καθώς το έδαφος θα είναι ήδη στην υδατοϊκανότητα του. Για τους λόγους αυτούς, τα φαινόμενα της επιφανειακής απορροής και της βαθιάς διήθησης δε λαμβάνονται υπόψη στην ανάλυση που ακολουθεί.

## 2.7 Υπολογισμός της τελικής απόδοσης της καλλιέργειας

### 2.7.1 Εμπειρικές συναρτήσεις απόδοσης

Η εξατμισοδιαπνοή αποτελεί σήμερα την κεντρική έννοια στην οποία στηρίζεται η κατασκευή όλων των βιοφυσικών υποδειγμάτων που απαντώνται στη διεθνή βιβλιογραφία, ενώ εμπειρικές συναρτήσεις που έχουν διατυπωθεί τα τελευταία χρόνια επιτρέπουν την ποσοτικοποίηση της σχέσης μεταξύ της εξατμισοδιαπνοής και της οικονομικής απόδοσης των καλλιεργειών. Η πιο γνωστή και ευρύτερα χρησιμοποιούμενη συνάρτηση απόδοσης είναι των Doorenbos και Kassam (1979), η οποία παρουσιάστηκε στα πλαίσια του εγγράφου FAO-33:

$$\left(1 - \frac{Y_r}{Y_{max}}\right) = B \left(1 - \frac{ET_r}{ET_{max}}\right) \quad (2.29)$$

όπου  $Y_r$  και  $Y_{max}$  η πραγματική και μέγιστη πιθανή απόδοση της καλλιέργειας υπό άριστες καλλιεργητικές και κλιματικές συνθήκες αντίστοιχα ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ),  $ET_{max}$  η μέγιστη και  $ET_r$  η πραγματική εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας και  $B$  ο συντελεστής απόκρισης παραγωγής, ο οποίος αντιπροσωπεύει την ευαισθησία της καλλιέργειας σε πιθανή υδατική καταπόνηση. Δημοσιευμένες τιμές του  $B$  αφορούν τόσο σε κάθε στάδιο της βλαστικής περιόδου όσο και στη συνολική διάρκεια αυτής (πίνακας 2.3).

**Πίνακας 2.3: Τιμές συντελεστή απόκρισης παραγωγής κατά στάδιο και για όλη τη βλαστική περίοδο**

	$B$	$B_{ini}$	$B_{dev}$	$B_{mid}$	$B_{fin}$
Σιτάρι	1.15	0.20	0.60	0.50	-
Βαμβάκι	0.85	0.20	0.50	-	0.25
Αραβόσιτος	1.25	0.40	0.40	1.30	0.50
Μηδική	1.10	-	-	-	-
Καπνός	0.90	0.20	1.00	0.50	0.50

Πηγή: <http://www.fao.org/nr/water/cropinfo.html>

Σύμφωνα με όσα παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους, η  $ET_{max}$  αντιστοιχεί στην εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας,  $ET_c$ , ενώ η  $ET_r$  στην προσαρμοσμένη

εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας,  $ETc_{adj}$ , που προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό της  $ETc$  με τον συντελεστή υδατικής καταπόνησης  $Ks$ . Ο τελευταίος πλέον ορίζεται για όλη τη βλαστική περίοδο και όχι σε ημερήσια βάση. Έτσι, η (2.29) μπορεί να γραφτεί εναλλακτικά ως

$$\left(1 - \frac{Y_r}{Y_{max}}\right) = B \left(1 - \frac{Ks \times ETc}{ETc}\right) = B(1 - Ks) \quad (2.30)$$

Η εξίσωση (2.30) ισχύει όταν η έλλειψη εδαφικής υγρασίας κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλη τη βλαστική περίοδο και η τιμή του συντελεστή  $B$  για κάθε καλλιέργεια αντιστοιχεί στην πρώτη στήλη του πίνακα 2.4. Αντίθετα, όταν η έλλειψη νερού εντοπίζεται σε ένα συγκεκριμένο στάδιο της βλαστικής περιόδου, η εξίσωση ένα μετασχηματίζεται σε

$$\left(1 - \frac{Y_r}{Y_{max}}\right) = B_k \left(1 - \frac{ET_{r,k}}{ET_{max,k}}\right)$$

όπου  $B_k$  ο συντελεστής απόκρισης παραγωγής του σταδίου  $k$ ,  $ET_{r,k}$  η πραγματική εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας και  $ET_{max,k}$  η μέγιστη δυνατή εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας κατά το ίδιο στάδιο. Η χρήση ξεχωριστού συντελεστή απόκρισης παραγωγής για κάθε στάδιο της βλαστικής περιόδου επιτρέπει την αναγνώριση των κρίσιμων περιόδων για την ανάπτυξη κάθε καλλιέργειας και την επίτευξη ικανοποιητικών αποδόσεων, βελτιώνοντας έτσι τον προγραμματισμό των αρδεύσεων, ειδικά σε περιπτώσεις περιορισμένης διαθεσιμότητας νερού.

Μια επίσης γνωστή συνάρτηση απόδοσης, και από τις πρώτες που παρουσιάστηκαν στη σχετική βιβλιογραφία είναι εκείνη του Jensen (1968):

$$\frac{Y_r}{Y_{max}} = \prod_{k=1}^K \left(\frac{ET_{r,k}}{ET_{max,k}}\right)^{\lambda_k}$$

όπου  $\lambda_k$  ο συντελεστής απόκρισης παραγωγής του σταδίου  $k$ , με ενδεικτικό εύρος τιμών από 0.2 έως 1.5. Όπως και στην εξίσωση των Doorenbos και Kassam, η σχετική απόδοση  $Y_r/Y_{max}$  θεωρείται πως είναι ανάλογη της σχετικής εξατμισοδιαπνοής, δηλαδή του λόγου  $ET_r/ET_{max}$ . Έτσι, πιθανή έλλειψη εδαφικού νερού περιορίζει τη διαπνοή ( $ET_r < ET_{max}$ ) και προκαλεί υδατική καταπόνηση με αποτέλεσμα την πτώση της τελικής απόδοσης, το ύψος της οποίας εξαρτάται από το συντελεστή απόκρισης παραγωγής της καλλιέργειας.

Το σημαντικότερο μειονέκτημα της εξίσωσης του Jensen είναι η ελλιπής εμπειρική τεκμηρίωση του, αφού δεν υπάρχουν δημοσιευμένες τιμές του  $\lambda_k$  για πολλές καλλιέργειες. Αντίθετα, συντελεστές απόκρισης παραγωγής για τη συνάρτηση των Doorenbos

και Kassam δίνονται για μεγάλο αριθμό καλλιεργειών από τον FAO<sup>10</sup>, κάτι που καθιστά την εξίσωση πιο εύκολα εφαρμόσιμη.

Η συνάρτηση του Jensen έχει όμως δυο σημαντικά αναλυτικά πλεονεκτήματα σε σχέση με την αντίστοιχη των Doorenbos και Kassam. Αυτά είναι η (α) ενσωμάτωση στην τελική απόδοση της καλλιέργειας πιθανών υδατικών ελλείψεων σε οποιοδήποτε στάδιο (ή στάδια) της βλαστικής περιόδου και (β) η δυνατότητα χρήσης της ακόμα και σε χρονικά διαστήματα μικρότερα του σταδίου της βλαστικής περιόδου (π.χ. ανά εβδομάδα ή δεκαήμερα). Αντίθετα, στη συνάρτηση των Doorenbos και Kassam δεν δίνονται διευκρινήσεις για το πώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι διάφορες τιμές του  $B$  σε περίπτωση που η έλλειψη νερού παρατηρείται σε περισσότερα από ένα στάδια και όταν η έλλειψη αυτή δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη σε όλη τη βλαστική περίοδο.

Μια λύση στο παραπάνω πρόβλημα δόθηκε από τους Rao *et al.* (1988), οι οποίοι συνέκριναν τα αποτελέσματα προσομοιώσεων της συνάρτησης του Jensen, με δυο παραλλαγές της εξίσωσης των Doorenbos και Kassam:

(α) την προσθετική μορφή:

$$\frac{Y_r}{Y_{max}} = 1 - \sum_{k=1}^4 B_k \left( 1 - \frac{ET_{r,k}}{ET_{max,k}} \right)$$

(β) και τη μορφή γινομένου:

$$\frac{Y_r}{Y_{max}} = \prod_{k=1}^4 \left[ 1 - B_k \left( 1 - \frac{ET_{r,k}}{ET_{max,k}} \right) \right] \quad (2.31)$$

Τα αποτελέσματα έδειξαν πως η μορφή γινομένου και η εξίσωση του Jensen δίνουν παρόμοιες σχετικές αποδόσεις, αφού διαφέρουν λιγότερο από 5% σε όλα τα επίπεδα σχετικής εξατμισοδιαπνοής και συνεπώς προτείνεται η χρήση τους για τις περιπτώσεις εκείνες για τις οποίες η απλή εξίσωση των Doorenbos και Kassam δεν είναι εφαρμόσιμη. Αντίθετα, σε καλλιέργειες με υψηλές τιμές του συντελεστή  $B_k$ , η προσθετική μορφή έδωσε κατά περίπτωση αρνητικές σχετικές αποδόσεις, κάτι που φυσικά δεν μπορεί να θεωρηθεί ρεαλιστικό.

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας επιλέχτηκε η εξίσωση (2.31), αφού αποτελεί την ευρύτερα χρησιμοποιούμενη και την καλύτερα τεκμηριωμένη συνάρτηση, για την οποία δίνονται τιμές των συντελεστών απόκρισης παραγωγής για τις κυριότερες καλλιέργειες παγκοσμίως.

<sup>10</sup> <http://www.fao.org/landandwater/aglw/cropwater/>

## 2.7.2 Εναλλακτική τετραγωνική συνάρτηση

Οι προαναφερθείσες συναρτήσεις απόδοσης υποδηλώνουν πως η μέγιστη απόδοση μιας καλλιέργειας επιτυγχάνεται όταν η σχετική εξατμισοδιαπνοή είναι ίση με τη μονάδα, δηλαδή όταν δεν παρατηρείται έλλειψη εδαφικού νερού μεγαλύτερη από την άμεσα διαθέσιμη υγρασία του εδάφους ( $Dr \leq RAW$ ). Μια εξαίρεση στον κανόνα αυτό αποτελεί η καλλιέργεια βαμβακιού στην Ελλάδα, στην οποία η μέγιστη απόδοση επιτυγχάνεται υπό συνθήκες υδατικής καταπόνησης που αντιστοιχούν σε ένα λόγο άρδευσης προς εξατμισοδιαπνοή περίπου 0.65 (N. Δαναλάτος, προσωπική επικοινωνία, 2011). Ειδικότερα, η Ελλάδα βρίσκεται στο βορειότερο άκρο της ζώνης καλλιέργειας, αφού η χαμηλότερη μέση θερμοκρασία σε σχέση με άλλες θερμότερες περιοχές όπου καλλιεργείται βαμβάκι περιορίζει τη διάρκεια της βλαστικής περιόδου. Καθώς το άνοιγμα κάθε καρυδιού απαιτεί συγκεκριμένο αριθμό βαθμομερών, η ταυτόχρονη ωρίμανση όλων των καρυδιών καθίσταται δύσκολη όταν ο αριθμός τους είναι μεγάλος. Για το λόγο αυτό, ο FAO<sup>11</sup> προτείνει ήδη από το δεύτερο στάδιο της βλαστικής περιόδου μια ελαφριά υδατική καταπόνηση προκειμένου να περιοριστεί η βλαστική αύξηση του φυτού προς όφελος ενός μεγαλύτερου αριθμού ανοιχτών καρυδιών. Η παρατήρηση αυτή έχει επιβεβαιωθεί και πειραματικά στην Ελλάδα, αφού παρατηρήθηκε αρνητική συσχέτιση μεταξύ της εφαρμοζόμενης άρδευσης και του αριθμού ανοικτών καρυδιών ανά μονάδα επιφάνειας καλλιεργούμενης έκτασης (Danalatos, 1993). Επιπλέον, η υπερβολική υγρασία κατά τα αρχικά στάδια μπορεί να οψιμίσει την παραγωγή, ενώ κατά την καρποφορία περιορίζεται το άνοιγμα των ώριμων καρυδιών και διευκολύνεται η πτώση των νεαρών καρυδιών (Παπακώστα-Τασοπούλου, 2002).

Σε μαθηματικούς όρους, η παραπάνω ιδιαιτερότητα της καλλιέργειας βαμβακιού μεταφράζεται σε μια κοίλη συνάρτηση απόδοσης ως προς τη σχετική εξατμισοδιαπνοή, η οποία παρουσιάζει μέγιστο σε τιμή  $Ks < 1$ . Για το λόγο αυτό, προτείνεται μια τετραγωνική συνάρτηση της μορφής

$$\frac{Y_r}{Y_{max}} = b_1 Ks + b_2 Ks^2 \quad (2.32)$$

όπου  $b_1$  και  $b_2$  είναι παράμετροι που πρέπει να υπολογιστούν. Η εξίσωση (2.32) δεν περιέχει σταθερό όρο γιατί η απόδοση οφείλει να είναι μηδενική για  $Ks = 0$ . Να σημειωθεί πως ο συντελεστής απόκρισης παραγωγής,  $B$ , του βαμβακιού που αντιστοιχεί στην εξίσωση (2.30) ισούται με 0.85 (από τον πίνακα 2.3), κάτι που συνεπάγεται πως για  $Ks = 0$ , η τελική απόδοση είναι το 15% της μέγιστης δυνατής. Στην πραγματικότητα, η συγκεκριμένη τιμή του  $B$  οφείλεται σε αριθμητικούς και όχι θεωρητικούς λόγους, αφού εξάλλου η εξίσωση των Doorenbos και Kassam δεν έχει επαληθευτεί για τιμές  $Ks < 0.5$ .

<sup>11</sup> [http://www.fao.org/nr/water/cropinfo\\_cotton.html](http://www.fao.org/nr/water/cropinfo_cotton.html)



Σε κάθε περίπτωση, αν η μέγιστη απόδοση που προκύπτει από την τετραγωνική συνάρτηση (2.32) επιτυγχάνεται σε κάποιο  $Ks_{max} > 0$  τότε:

$$1 = b_1 Ks_{max} + b_2 Ks_{max}^2 \quad (2.33)$$

από την αναγκαία συνθήκη πρώτης τάξης ως προς  $Ks_{max}$ :

$$b_1 + 2b_2 Ks_{max} = 0 \quad (2.34)$$

Για δεδομένη τιμή του  $Ks_{max}$ , οι εξισώσεις (2.33) και (2.34) αποτελούν ένα σύστημα δυο εξισώσεων με αγνώστους τα  $b_1$  και  $b_2$ , η επίλυση του οποίου δίνει τα ακόλουθα αποτελέσματα:

$$b_1 = \frac{2}{Ks_{max}} \quad \text{και} \quad b_2 = -\frac{1}{Ks_{max}^2}$$

Μειονέκτημα της προτεινόμενης συνάρτησης είναι πως, λόγω του καθαρά εμπειρικού της χαρακτήρα, δεν επιτρέπει το διαχωρισμό μεταξύ των σταδίων της βλαστικής περιόδου. Παρά το πρόβλημα αυτό, η (2.32) πλεονεκτεί της αντίστοιχης των Doorenbos και Kassam, αφού εξασφαλίζει τη ρεαλιστικότερη αναπαράσταση της σχέσης απόδοσης-εξατμισοδιαπνοής στην καλλιέργεια βαμβακιού στην Ελλάδα, έστω και αν αυτό επιτυγχάνεται σε λιγότερο αναλυτικό επίπεδο.

### 2.7.3 Η μέγιστη απόδοση της καλλιέργειας

Ως μέγιστη απόδοση,  $Y_{max}$  ( $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ ), ορίζεται η παραγωγή που δύναται να επιτύχει μια καλλιέργεια όταν είναι άριστα προσαρμοσμένη στο περιβάλλον όπου αναπτύσσεται (θερμοκρασία, ηλιακή ακτινοβολία, χαρακτηριστικά εδάφους κλπ.) και ταυτόχρονα επικρατούν ιδανικές αγρονομικές συνθήκες, δηλαδή επάρκεια νερού και θρεπτικών συστατικών, σωστός αερισμός των ριζών, ιδανική θερμοκρασία εδάφους και έλλειψη εντομολογικών ή μυκητολογικών ασθeneιών.

Η μέγιστη απόδοση εξαρτάται κυρίως από τα γενετικά χαρακτηριστικά της καλλιέργειας και το βαθμό προσαρμοστικότητας της στις υπάρχουσες εδαφοκλιματικές συνθήκες. Όσον αφορά στο εναέριο περιβάλλον, οι σημαντικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν τη μέγιστη απόδοση είναι η ηλιακή ακτινοβολία και η θερμοκρασία. Πιο συγκεκριμένα, η ηλιακή ακτινοβολία παρέχει την απαραίτητη ενέργεια για τη φωτοσύνθεση των φυτών και συνεπώς επιδρά στη παραγωγή βιομάζας και καρπών. Έτσι, περιοχές που βρίσκονται σε γεωγραφικό πλάτος 20-30 μοιρών παρέχουν τις προϋποθέσεις για τις υψηλότερες αποδόσεις, αφού χαρακτηρίζονται από προσπίπτουσα ακτινοβολία μεγάλης έντασης και από πολλές ώρες ηλιοφάνειας. Ανάλογα, η θερμοκρασία του αέρα επη-

ρεάζει τη φωτοσύνθεση και την αναπνοή των φυτών και καθορίζει την έναρξη, ολοκλήρωση ή παύση των διαφόρων σταδίων ανάπτυξης μιας καλλιέργειας, επιδρώντας έτσι στην ανάπτυξη των καρπών και στο ύψος της τελικής παραγωγής (Καραμάνος, 1989).

Οι Doorenbos και Kassam (1979), στα πλαίσια του εγγράφου FAO-33 παρουσιάζουν δυο μεθόδους για τον υπολογισμό της μέγιστης απόδοσης, τη μέθοδο *Wageningen* και τη μέθοδο της *Αγρο-οικολογικής Ζώνης*. Και οι δυο στηρίζονται στην εργασία του de Wit (1965) ο οποίος χρησιμοποίησε ημερήσια κλιματικά δεδομένα για την ποσοτική εκτίμηση του αντίστοιχου ρυθμού φωτοσύνθεσης (εκφραζόμενος μέσω της παραγωγής ξηρής φυτικής ουσίας), θέτοντας έτσι τις βάσεις για την ανάπτυξη της μεγάλης οικογένειας δυναμικών βιο-φυσικών υποδειγμάτων του πανεπιστήμιου του Wageningen κατά τις τελευταίες δεκαετίες (Bouman *et al.*, 1996).

Η μέθοδος του Wageningen αφορά στην εργασία των Slabbers *et al.* (1979), οι οποίοι παρουσίασαν μια γενική σχέση υπολογισμού του  $Y_{max}$  για μηδική, αραβόσιτο, σόργο και σιτάρι που βασίζεται στην αναγωγή των αποτελεσμάτων μιας «τυπικής» καλλιέργειας σε κάποια από τις τέσσερις προαναφερθείσες, με τη βοήθεια συντελεστών που εξαρτώνται από τις δεδομένες κλιματικές συνθήκες και κάποια χαρακτηριστικά της καλλιέργειας, συγκεκριμένα το δείκτη συγκομιδής και τη διάρκεια της βλαστικής περιόδου:

$$Y_{max} = Y_o \left[ \frac{ET_{max}}{(e_s - e_a)} \right] K \cdot T_c \cdot H_c \cdot G_c$$

όπου  $Y_o$  ο ρυθμός παραγωγής ξηρής φυτικής ουσίας της «τυπικής» καλλιέργειας (σε  $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ),  $ET_{max}$  η μέση μέγιστη ημερήσια εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας (σε  $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ),  $e_s$  και  $e_a$  είναι η πίεση κορεσμού των υδρατμών και η πραγματική πίεση υδρατμών αντίστοιχα στη μέση θερμοκρασία της ατμόσφαιρας (mbar),  $K$  είναι ένας αδιάστατος συντελεστής με τον οποίο μετατρέπεται η παραγωγή ξηράς ουσίας της «τυπικής καλλιέργειας» στην αντίστοιχη παραγωγή μιας εκ των τεσσάρων καλλιεργειών για τις οποίες εφαρμόζεται η μέθοδος,  $T_c$  είναι επίσης ένας συντελεστής αναγωγής των «τυπικών» κλιματικών συνθηκών στις πραγματικές,  $H_c$  είναι ο δείκτης συγκομιδής της καλλιέργειας (το ποσοστό της συνολικής βιομάζας της καλλιέργειας που συγκομίζεται) και  $G_c$  η διάρκεια της βλαστικής περιόδου (ημέρες). Από τις παραπάνω παραμέτρους, το  $ET_{max}$  αντιστοιχεί στην εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας,  $ET_c$ , που παρουσιάστηκε στις προηγούμενες παραγράφους, οι τιμές των  $K$ ,  $T_c$ ,  $H_c$  και  $G_c$  δίνονται από πίνακες, ενώ το  $Y_o$  μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση του de Wit (1965):

$$Y_o = F \cdot y_o + (1 - F)y_c \quad (2.35)$$

όπου  $F$  το μέσο κλάσμα της ημέρας που ο ουρανός είναι νεφοσκεπής,  $y_o$  η μέση ημερήσια παραγωγή ξηρής φυτικής ουσίας της «τυπικής καλλιέργειας» σε μια νεφοσκεπή ημέρα ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ ) και  $y_c$  η μέση ημερήσια παραγωγή ξηρής φυτικής ουσίας σε μέρα ολικής αιθρίας ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ ). Τα  $y_o$  και  $y_c$  ανά μήνα και για διάφορα γεωγραφικά πλάτη υπολογίστηκαν από τον de Wit (1965) και παρουσιάζονται στον πίνακα 2.4.

**Πίνακας 2.4: Παραγωγή ξηρής φυτικής ουσίας της τυπικής καλλιέργειας σε μια νεφοσκεπή ( $y_o$ ) και σε μια αίθρια ημέρα ( $y_c$ ) ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ )**

Μήνας	Γεωγραφικό πλάτος 30° B		Γεωγραφικό πλάτος 40° B	
	$y_o$	$y_c$	$y_o$	$y_c$
Ιανουάριος	137	281	99	219
Φεβρουάριος	168	333	137	283
Μάρτιος	200	385	178	353
Απρίλιος	232	437	223	427
Μάιος	241	471	253	480
Ιούνιος	261	489	268	506
Ιούλιος	258	483	263	497
Αύγουστος	243	456	239	455
Σεπτέμβριος	216	412	200	390
Οκτώβριος	182	356	155	314
Νοέμβριος	148	299	112	241
Δεκέμβριος	130	269	91	204

Πηγή: Παπαζαφειρίου, 1999

Η μέθοδος της Αγρο-οικολογικής Ζώνης πρωτοπαρουσιάστηκε από τον Kassam (1977) και στη συνέχεια δημοσιεύτηκε από τον FAO (1978) στα πλαίσια ερευνητικού προγράμματος ορισμού αγρο-οικολογικών ζωνών με βάση τα εδαφικά, μορφολογικά και κλιματικά χαρακτηριστικά διαφόρων περιοχών, προκειμένου να προωθηθεί ο προγραμματισμός στη χρήση της γης και η καλύτερη αξιοποίηση των φυσικών πόρων. Η μέθοδος βασίζεται επίσης στον υπολογισμό της παραγόμενης ξηρής φυτικής ουσίας μιας «τυπικής» καλλιέργειας με την εξίσωση (2.35) για δεδομένες κλιματικές συνθήκες. Σε αντίθεση ωστόσο με τη μέθοδο Wageningen, η χρήση της μεθόδου της Αγρο-οικολογικής Ζώνης δεν περιορίζεται στη μηδική, στον αραβόσιτο, στο σόργο και στο σιτάρι, αλλά δύναται να χρησιμοποιηθεί για διάφορες καλλιέργειες, προσαρμόζοντας τα αποτελέσματα της «τυπικής» καλλιέργειας με τη βοήθεια συντελεστών που αντιπροσωπεύουν τις γενετικά ελεγχόμενες διεργασίες κατά την ανάπτυξη των φυτών. Έτσι, η μέγιστη πιθανή απόδοση,  $Y_{max}$ , μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$Y_{max} = Y_o \cdot N_c \cdot H_c \cdot L_c \cdot G_c$$

όπου  $Y_o$  ο ρυθμός παραγωγής ξηρής φυτικής ουσίας της «τυπικής» καλλιέργειας (από την εξίσωση (2.35), μετρούμενο σε  $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ ),  $N_c$  ένας συντελεστής διόρθωσης της

παραγωγής ξηρής ουσίας που εξαρτάται από τη μέση θερμοκρασία της βλαστικής περιόδου,  $H_c$  είναι ο δείκτης συγκομιδής της καλλιέργειας,  $L_c$  ένας συντελεστής διόρθωσης που αφορά στο ρυθμό ανάπτυξης της καλλιέργειας και επηρεάζεται από το δείκτη φυλλικής επιφάνειας (LAI) και  $G_c$  η διάρκεια της βλαστικής περιόδου (ημέρες).

Ο υπολογισμός του  $Y_o$  βασίζεται στην αρχή του de Wit (1965), όπως αυτή εκφράζεται ποσοτικά από την εξίσωση (2.35), αλλά προσαρμόζεται ανάλογα με το είδος της εξεταζόμενης καλλιέργειας και τη μέση θερμοκρασία της βλαστικής περιόδου. Πιο συγκεκριμένα, οι Doorenbos και Kassam (1979) κατέταξαν τις κυριότερες καλλιέργειες σε τέσσερις ομάδες, ανάλογα με το είδος και τις κλιματικές συνθήκες κατά την ανάπτυξη τους:

1. Ψυχρές συνθήκες: φασόλι, λάχανο, μπιζέλι, πατάτα, τομάτα, ζαχαρότευτλα, σιτάρι.
2. Θερμές συνθήκες: μηδική, εσπεριδοειδή, βαμβάκι, πιπεριά, ρύζι, σόγια, ηλίανθος, καπνός, τομάτα.
3. Ψυχρές συνθήκες: κάποιες ποικιλίες αραβοσίτου και σόργου.
4. Θερμές συνθήκες: αραβόσιτος, σόργο, ζαχαροκάλαμο.

Υποθέτοντας έναν ωριαίο ρυθμό παραγωγής ξηράς ουσίας,  $y_m$ , για την «τυπική» καλλιέργεια ίσο με  $20 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ , οι αντίστοιχες τιμές  $y_m$  για τις τέσσερις ομάδες καλλιεργειών παρουσιάζονται στον πίνακα 2.5 και εξαρτώνται από τη μέση θερμοκρασία της βλαστικής περιόδου.

**Πίνακας 2.5: Ωριαίος ρυθμός παραγωγής ξηρής φυτικής ουσίας ( $y_m$ ) ανά ομάδα καλλιέργειας για διάφορες μέσες θερμοκρασίες ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ )**

Μέση θερμοκρασία (°C)	Ομάδες καλλιέργειας			
	1	2	3	4
10	15	0	5	0
15	20	15	45	5
20	20	32.5	65	45
25	15	35	65	65
30	5	35	65	65
35	0	32.5	45	65

Πηγή: Παπαζαφειρίου, 1999

Η τελική τιμή του  $Y_o$  υπολογίζεται από την εξίσωση (2.35) λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές του  $y_m$  κάθε καλλιέργειας και τις τιμές των  $y_o$  και  $y_c$  από τον πίνακα 2.5. Ειδικότερα, όταν  $y_m > 20 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ , τότε

$$Y_o = F(0.8 + 0.01y_m)y_o + (1 - F)(0.5 + 0.025y_m)y_c$$

Ενώ όταν  $y_m < 20 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$

$$Y_o = F(0.5 + 0.01y_m)y_o + (1 - F)(0.05y_m)y_c$$

Ο συντελεστής  $N_c$  αντιπροσωπεύει το κλάσμα εκείνο της ολικής ενέργειας που δέχεται η καλλιέργεια και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη της, καθώς το υπόλοιπο αποθηκεύεται με τη μορφή γλυκόζης και απελευθερώνεται στη συνέχεια μέσω της αναπνοής για τη συντήρηση της υπάρχουσας βιομάζας. Το  $N_c$  εξαρτάται από τη μέση θερμοκρασία της βλαστικής περιόδου ( $T_{mean}$ ), παίρνοντας τιμή 0.6 όταν  $T_{mean} < 20^\circ\text{C}$  και 0.5 όταν  $T_{mean} > 20^\circ\text{C}$ .

Όσον αφορά στο δείκτη συγκομιδής,  $H_c$ , οι Doorenbos και Kassam (1979) παρουσιάζουν εύρη τιμών τα οποία αναπαράγονται στον πίνακα 2.6.

**Πίνακας 2.6: Δείκτης συγκομιδής διαφόρων καλλιεργειών,  $H_c$**

Συγκρίσιμο προϊόν		$H_c$
Σιτάρι	Σπόρος	0.35-0.45
Βαμβάκι	Ίνα	0.08-0.12
Αραβόσιτος	Σπόρος	0.35-0.45
Μηδική	Σανός	0.80-0.90
Καπνός	Φύλλα	0.50-0.60

Πηγή: Παπαζαφειρίου, 1999

Καθώς ο ρυθμός της φωτοσύνθεσης εξαρτάται από τη φυλλική επιφάνεια της καλλιέργειας, είναι φανερό πως ο ρυθμός ανάπτυξης θα είναι χαμηλός στην αρχή της βλαστικής περιόδου, αλλά θα γίνεται υψηλότερος όσο αυξάνει η ενεργή φυλλική επιφάνεια (LAI). Έτσι, μπορεί να υποθεθεί πως ένας μέσος ρυθμός ανάπτυξης κατά τη διάρκεια της βλαστικής περιόδου είναι περίπου ίσος με το 50% του μέγιστου, ο οποίος εκφράζεται από το  $Y_o$  που υπολογίστηκε προηγουμένως. Υποθέτοντας πως για την «τυπική» καλλιέργεια το ενεργό LAI ισούται με  $5 \text{ m}^2\cdot\text{m}^{-2}$ , ο συντελεστής  $L_c$  χρησιμεύει στην εύρεση του μέσου ρυθμού ανάπτυξης στην περίπτωση που το ενεργό LAI της εξεταζόμενης καλλιέργειας είναι διαφορετικό από  $5 \text{ m}^2\cdot\text{m}^{-2}$  (πίνακας 2.7).

**Πίνακας 2.7: Τιμές του διορθωτικού παράγοντα,  $L_c$**

LAI ( $\text{m}^2\cdot\text{m}^{-2}$ )	$L_c$
1	0.20
2	0.30
3	0.40
4	0.48
$\geq 5$	0.50

Πηγή: Παπαζαφειρίου, 1999



# 3 Ρύθμιση υποδειγμάτων μαθηματικού προγραμματισμού

---

## 3.1 Εισαγωγή

Πριν χρησιμοποιηθεί ένα οικονομικό υπόδειγμα ΜΠ ως εργαλείο ανάλυσης πολιτικής πρέπει πρώτα να ελεγχθεί η αξιοπιστία του (έλεγχος αξιοπιστίας – validation). Οι Hazell και Norton (1986) προτείνουν έξι διαφορετικές μεθόδους για τον έλεγχο της αξιοπιστίας ενός υποδείγματος, από τις οποίες η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη είναι ο «έλεγχος της παραγωγής» (production test), όπου τα αποτελέσματα του υποδείγματος (οι τιμές των μεταβλητών απόφασης στην άριστη λύση) κατά το έτος βάσης συγκρίνονται με τις παρατηρήσεις της ίδιας περιόδου. Ένα υπόδειγμα που αδυνατεί να αναπαράγει τις παρατηρήσεις του έτους βάσης δε θεωρείται αξιόπιστο ως εργαλείο ανάλυσης πολιτικής, δηλαδή ο βαθμός προσαρμογής των αποτελεσμάτων στις παρατηρήσεις καθορίζει την αξιοπιστία του υποδείγματος.

Ξεκινώντας από τα υποδείγματα ΓΠ, οι McCarl και Spreen (2004) συνοψίζουν τους λόγους για τους οποίους ένα αντίστοιχο υπόδειγμα αποτυγχάνει στον έλεγχο αξιοπιστίας. Αυτοί μπορεί να αφορούν σε ασυνέπεια των δεδομένων που έχει στη διάθεση του ο ερευνητής, σε λανθασμένη εξειδίκευση της αντικειμενικής συνάρτησης ή των τεθέντων περιορισμών ή σε παραβίαση των υποθέσεων που διέπουν τη δομή ενός γραμμικού υποδείγματος. Ωστόσο, συχνά ένα μαθηματικό υπόδειγμα που έχει διατυπωθεί με θεωρητικά σωστό τρόπο και υποστηρίζεται από επαρκείς και ρεαλιστικούς περιορισμούς δεν καταφέρνει και πάλι να αναπαράγει τα αποτελέσματα του έτους βάσης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως οποιοδήποτε υπόδειγμα προγραμματισμού, ανεξάρτητα από το πώς είναι διατυπωμένο, δεν παύει να αποτελεί μια απλοποιημένη αναπαράσταση της πραγματικότητας με ό,τι αυτό συνεπάγεται για την αξιοπιστία του και την προβλεπτική του ικανότητα.

Μια συνηθισμένη αιτία για την οποία ένα υπόδειγμα ΓΠ αποτυγχάνει στον έλεγχο αξιοπιστίας είναι η ανεπάρκεια των δεδομένων με τα οποία δομούνται οι περιορισμοί του προβλήματος. Ειδικότερα, σύμφωνα με το θεμελιώδες θεώρημα του ΓΠ, κάθε γραμμικό πρόβλημα αριστοποίησης δίνει μη αρνητικές λύσεις σε αριθμό μεταβλητών ίσο με τον αριθμό των γραμμικά μη εξαρτημένων περιορισμών (Paris, 1991). Όταν τα διαθέσιμα δεδομένα δεν επαρκούν για τη διατύπωση ικανού αριθμού περιορισμών, η άριστη λύση διαφέρει από την παρατηρούμενη ακριβώς λόγω των μηδενικών λύσεων που προκύπτουν για μία ή περισσότερες άγνωστες μεταβλητές. Στην περίπτωση αυτή, το υπόδειγμα υποθέτει πως μια εκμετάλλευση για να επιτύχει ένα άριστο οικονομικό αποτέ-

λεσμα πρέπει να «υπερεξειδικευτεί» (overspecialize), φαινόμενο που θεωρείται ως ένα από τα βασικά προβλήματα των υποδειγμάτων ΓΠ.

Το πρόβλημα της «υπερεξειδίκευσης» είναι οξύτερο σε υποδείγματα που λειτουργούν σε περιφερειακό επίπεδο ή/και περιλαμβάνουν ένα δείγμα από αντιπροσωπευτικές εκμεταλλεύσεις, για κάθε μια από τις οποίες χρησιμοποιείται η ίδια αντικειμενική συνάρτηση και το ίδιο σύνολο περιορισμών και μεταβλητών απόφασης. Για το λόγο αυτό δεν είναι δυνατό να αποδοθούν πλήρως κάποια χαρακτηριστικά της παραγωγικής διαδικασίας που είναι ευδιάκριτα σε επίπεδο εκμετάλλευσης, όπως η διαφορετική ένταση χρήσης των παραγωγικών συντελεστών και η αποστρόφη των παραγωγών στον κίνδυνο, τα οποία δημιουργούν τάση για διαφοροποίηση της παραγωγής. Επίσης, σε περιπτώσεις δείγματος εκμεταλλεύσεων καθίσταται δυσκολότερη η συλλογή στοιχείων για τη διατύπωση επαρκούς αριθμού περιορισμών, με αποτέλεσμα συχνά να χρησιμοποιούνται στοιχεία που προέρχονται από τους περιφερειακούς μέσους όρους, οι οποίοι όμως διαφέρουν από τα πραγματικά παρατηρούμενα σε κάθε εκμετάλλευση.

Όταν ο βαθμός αξιοπιστίας υπολείπεται του επιθυμητού, επιβάλλεται η «ρύθμιση» ή «διαμέτρηση» (calibration) του υποδείγματος. Η απαίτηση αυτή οδήγησε στην υιοθέτηση κάποιων *ad hoc* λύσεων, όπως οι λεγόμενοι «περιορισμοί ευελιξίας» (flexibility constraints) που θέτουν όρια στις τιμές των μεταβλητών απόφασης, συνήθως στα παρατηρούμενα επίπεδα τους κατά το έτος βάσης (Day, 1963). Τέτοιοι περιορισμοί έχουν χρησιμοποιηθεί εκτεταμένα, κυρίως σε περιφερειακά υποδείγματα ΓΠ, όπως για παράδειγμα στην ανάλυση των επιπτώσεων της Agenda 2000 στο τομέα των σιτηρών και των ελαιοπρωτεϊνούχων φυτών στη Γαλλία από τους Sourie *et al.* (2001).

Ένας διαφορετικός τρόπος ρύθμισης είναι η χρήση μη γραμμικών αντικειμενικών συναρτήσεων, οι οποίες αφορούν είτε σε ενδογενή προσδιορισμό των τιμών ορισμένων ή όλων των παραγόμενων προϊόντων (π.χ. McCarl & Spreen, 1980), είτε στην εξειδίκευση της συμπεριφοράς των παραγωγών απέναντι στον κίνδυνο λόγω αβεβαιότητας τιμών και αποδόσεων (π.χ. Hardaker *et al.*, 2004). Να σημειωθεί πως ο ενδογενής προσδιορισμός τιμών δεν αποσκοπεί στη ρύθμιση του υποδείγματος, αλλά στη ρεαλιστικότερη αναπαράσταση των σχέσεων μεταξύ τιμών και παραγόμενων ποσοτήτων σε περιφερειακά υποδείγματα προγραμματισμού, στα οποία είναι απαραίτητο να βρεθεί το σημείο ισορροπίας στην αγορά του κάθε προϊόντος. Η αντίδραση όμως των παραγωγών στη διαφοροποίηση των τιμών των προϊόντων τους, λόγω της μη γραμμικής αντικειμενικής συνάρτησης οδηγεί σε σχέδια παραγωγής διαφορετικά από αυτά ενός υποδείγματος ΓΠ, αμβλύνοντας έτσι το πρόβλημα της υπερεξειδίκευσης. Παρομοίως, η χρήση μη γραμμικής αντικειμενικής συνάρτησης που εισάγει στο υπόδειγμα τους παράγοντες «αβεβαιότητα» και «κίνδυνο» μπορεί επίσης να αμβλύνει το πρόβλημα της υπερεξει-



δίκευσης. Αναλυτικότερη παρουσίαση των μεθόδων ενσωμάτωσης της αβεβαιότητας και της συμπεριφοράς των παραγωγών απέναντι στον κίνδυνο σε υποδείγματα ΜΠ πραγματοποιείται στην ενότητα 3.5.

Ο Θετικός Μαθηματικός Προγραμματισμός (ΘΜΠ) είναι μια μεθοδολογία που αναπτύχθηκε από τον Howitt (1995b), προκειμένου να αντιμετωπιστεί το παραπάνω πρόβλημα υπερεξειδίκευσης των κλασικών υποδειγμάτων ΓΠ και να επιτευχθεί η άριστη ρύθμισή τους. Να σημειωθεί πως αν και πρώτος ο Howitt παρουσίασε επίσημα τη συγκεκριμένη μέθοδο το 1995, οι αρχές και οι τεχνικές στις οποίες βασίζεται είχαν χρησιμοποιηθεί και νωρίτερα σε υποδείγματα προγραμματισμού που είχαν ως στόχο την ανάλυση επιπτώσεων από αλλαγές στο υφιστάμενο πλαίσιο αγροτικής πολιτικής είτε σε περιφερειακό, είτε σε εθνικό επίπεδο (π.χ. Bauer & Kasnakoglou, 1990). Η κεντρική ιδέα του ΘΜΠ είναι πως το παρατηρούμενο σχέδιο παραγωγής κατά το έτος βάσης είναι το άριστο, κάτι που σημαίνει πως η μέθοδος επιδιώκει να μεγιστοποιήσει το κέρδος του παραγωγού και ταυτόχρονα να εξηγήσει τη διαδικασία με την οποία λαμβάνονται αποφάσεις, αποτελώντας έτσι μια γέφυρα μεταξύ των οικονομετρικών μεθόδων και των μεθόδων βελτιστοποίησης (Heckelei, 2002). Το κύριο πλεονέκτημα του ΘΜΠ είναι πως επιτυγχάνει την ακριβή ρύθμιση υποδειγμάτων ΓΠ ακόμη και σε περιπτώσεις όπου ο αναλυτής δεν έχει στη διάθεση του επαρκή δεδομένα για να δομήσει έναν ικανό αριθμό γραμμικά ανεξάρτητων περιορισμών, με αποτέλεσμα αυτοί να είναι αριθμητικά λιγότεροι από τις μεταβλητές απόφασης. Ένα παράδειγμα της ικανότητας αυτής του ΘΜΠ δίνεται από τους Gohin και Chantreuil (1999), οι οποίοι χρησιμοποιούν μόνο ένα περιορισμό συνολικής διαθέσιμης γης.

Ο ΘΜΠ αποτελεί πλέον μια από τις σημαντικότερες μεθόδους κατασκευής υποδειγμάτων προγραμματισμού με συχνή χρήση σε εφαρμογές ανάλυσης πολιτικής, κυρίως λόγω της ικανότητας του να αναπαράγει τα αποτελέσματα του έτους βάσης χωρίς την ύπαρξη δεσμευτικών περιορισμών που μειώνουν την ελευθερία του υποδείγματος. Χαρακτηριστικά αναφέρονται τα Ευρωπαϊκά ερευνητικά προγράμματα CAPRI (Heckelei, 1997), EUROTOOLS (Paris & Arfini, 2000) και SEAMLESS (Van Ittersum *et al.*, 2008) για τα οποία αναπτύχθηκαν και εφαρμόστηκαν υποδείγματα βασισμένα στον ΘΜΠ.

### **3.2 Ανάλυση της μεθόδου ΘΜΠ**

Στην περίπτωση κατά την οποία η άριστη λύση ενός υποδείγματος ΓΠ δεν ταυτίζεται με τις παρατηρούμενες τιμές των μεταβλητών απόφασης, ο Howitt (1995b) αποδεικνύει πως μια αναγκαία και ικανή συνθήκη για την ακριβή ρύθμιση του υποδείγματος είναι η μη γραμμικότητα της αντικειμενικής συνάρτησης:

«Αν ο αριθμός των παρατηρούμενων μη μηδενικών μεταβλητών απόφασης ξεπερνά τον αριθμό των δεσμευτικών περιορισμών, τότε μια ικανή και αναγκαία συνθήκη για τη μεγιστοποίηση του κέρδους στα παρατηρούμενα επίπεδα είναι η μη γραμμικότητα της αντικειμενικής συνάρτησης για κάποιες από τις μεταβλητές απόφασης» (Howitt, 1995b: 339).

Η μη γραμμικότητα αναζητείται συνήθως στη συνάρτηση μεταβλητού κόστους με τον μετασχηματισμό της απλής γραμμικής σχέσης σε μια αντίστοιχη μη γραμμική, μέσω μιας διαδικασίας τριών βημάτων που θα αναλυθούν παρακάτω.

Η πρώτη φάση του ΘΜΠ έχει ως στόχο τον υπολογισμό ενός διανύσματος δυικών τιμών το οποίο στη συνέχεια θα χρησιμοποιηθεί στην εκτίμηση της νέας μη γραμμικής συνάρτησης μεταβλητού κόστους. Η μαθηματική διατύπωση της πρώτης φάσης του ΘΜΠ διαφέρει από την αντίστοιχη του απλού γραμμικού προβλήματος ως προς έναν επιπλέον περιορισμό «ρύθμισης» που δεν επιτρέπει στις μεταβλητές απόφασης να πάρουν τιμές μεγαλύτερες από εκείνες που παρατηρούνται κατά το έτος βάσης. Η χρήση του περιορισμού επιτρέπει την εύρεση των αντίστοιχων δυικών τιμών οι οποίες αντιπροσωπεύουν ένα είδος «μη παρατηρούμενης» πληροφορίας που είναι διαθέσιμη μόνο στον παραγωγό και συνιστά σημαντικό παράγοντα στην επιλογή του κατάλληλου σχεδίου παραγωγής, ενώ παράλληλα αποτελεί τη βάση της διαδικασίας μετασχηματισμού της αρχικής γραμμικής συνάρτησης μεταβλητού κόστους σε μη γραμμική.

Έτσι, το αρχικό πρόβλημα με τον επιπλέον περιορισμό ρύθμισης στην πρώτη φάση του ΘΜΠ διατυπώνεται ως

$$\max_{\mathbf{x} \geq 0} Z = (\mathbf{r} - \mathbf{c})^T \mathbf{x}$$

$$\text{Υπό περιορισμούς} \quad \mathbf{Ax} \leq \mathbf{b} \quad [\boldsymbol{\theta}] \quad (3.1)$$

$$\mathbf{x} \leq \mathbf{x}^*(1 + \varepsilon) \quad [\boldsymbol{\lambda}] \quad (3.2)$$

Στην ανισότητα (3.2), το διάνυσμα  $\mathbf{x}^*$  ( $I \times 1$ ) παριστάνει το παρατηρούμενο επίπεδο παραγωγής κάθε  $i$  δραστηριότητας ( $i \in I$ ), ενώ το  $\varepsilon$  είναι ένας πολύ μικρός αριθμός (π.χ. 0.000001) που προστίθεται για να αποφευχθεί ο εκφυλισμός (degeneracy) του προβλήματος λόγω της γραμμικής εξάρτησης που υπό άλλες συνθήκες θα προέκυπτε μεταξύ του περιορισμού (3.2) και του περιορισμού για τη συνολική έκταση που συνήθως περιλαμβάνεται στην ανισότητα (3.1)<sup>12</sup>. Το διάνυσμα  $\boldsymbol{\lambda}$ , διαστάσεως  $I \times 1$ , αντιπροσωπεύει τη δυική τιμή για κάθε δραστηριότητα  $i$  που προκύπτει από την εισαγωγή του περιορισμού (3.2). Οι Paris και Howitt (1998) ερμηνεύουν το  $\boldsymbol{\lambda}$  ως ένα διά-

<sup>12</sup> Στην πιο απλή του μορφή, ο πίνακας  $\mathbf{A}$  περιλαμβάνει μόνο τον περιορισμό για τη συνολική έκταση της εκμετάλλευσης:  $\sum_i x_i \leq b_i$ .

νυσμα «διαφορικού» οριακού κόστους, το οποίο αθροιζόμενο με το  $\mathbf{c}$  αποκαλύπτει το πραγματικό οριακό κόστος κάθε δραστηριότητας. Αυτό σημαίνει πως ο κάθε παραγωγός λαμβάνει αποφάσεις στηριζόμενος όχι στο «λογιστικό» κόστος παραγωγής αλλά στο αντίστοιχο «οικονομικό», το οποίο περιλαμβάνει – εκτός από τις πραγματοποιούμενες δαπάνες – και το κόστος ευκαιρίας κάθε δραστηριότητας που είναι γνωστό μόνο στον ίδιο. Γενικά μπορεί να λεχθεί πως το δυικό διάνυσμα  $\lambda$  ενσωματώνει οποιοδήποτε είδος μη παρατηρούμενης πληροφορίας, όπως προβλήματα εξειδίκευσης του αρχικού γραμμικού υποδείγματος, προσδοκίες σχετικά με τις τιμές των παραμέτρων και συμπεριφορά του παραγωγού απέναντι στον οικονομικό κίνδυνο (Heckelei, 2002).

Το διάνυσμα δραστηριοτήτων  $\mathbf{x}$  μπορεί να διαμεριστεί στα διανύσματα  $\mathbf{x}_P$  και  $\mathbf{x}_B$  που παριστάνουν τις «προτιμώμενες» και τις «οριακές» (ή μη προτιμώμενες) δραστηριότητες, με διαστάσεις  $P \times 1$  και  $(I - P) \times 1$  αντίστοιχα. Η διάκριση αυτή σχετίζεται με το είδος των δεσμευτικών περιορισμών για κάθε δραστηριότητα. Ειδικότερα, οι προτιμώμενες δραστηριότητες που περιέχονται στο διάνυσμα  $\mathbf{x}_P$  δεσμεύονται από τους περιορισμούς ρύθμισης (3.2), ενώ για τις οριακές δραστηριότητες, δεσμευτικοί είναι οι περιορισμοί που αφορούν στη διαθεσιμότητα των συντελεστών παραγωγής (ανισότητα 3.1). Ανάλογα μπορούν να διαμεριστούν και οι υπόλοιποι παράμετροι του αρχικού γραμμικού προβλήματος. Ο διαμερισμός αυτός φανερώνει πως οι δυικές τιμές των περιορισμών ρύθμισης είναι θετικές για τις προτιμώμενες δραστηριότητες ( $\lambda_P > 0$ ) και μηδέν για τις οριακές ( $\lambda_B = 0$ ).

Η δεύτερη φάση του ΘΜΠ συνίσταται στην εκτίμηση μιας μη γραμμικής συνάρτησης μεταβλητού κόστους που θα αντικαταστήσει την αντίστοιχη γραμμική στο αρχικό πρόβλημα ΓΠ της πρώτης φάσης. Η πιο συνηθισμένη μορφή μη γραμμικής συνάρτησης μεταβλητού κόστους που συναντάται στη βιβλιογραφία είναι η τετραγωνική, η οποία ορίζεται ως:

$$C(\mathbf{x}) = \mathbf{v}^T \mathbf{x} + \frac{1}{2} \mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x}$$

όπου  $\mathbf{v}$  είναι ένα  $I \times 1$  διάνυσμα που αναπαριστά το γραμμικό όρο της συνάρτησης και  $\mathbf{Q}$  ένας συμμετρικός και θετικά ημιορισμένος  $I \times I$  πίνακας που είναι είτε διαγώνιος είτε πλήρως ορισμένος με μη μηδενικά στοιχεία παντού. Το διάνυσμα του οριακού μεταβλητού κόστους,  $\mathbf{MC}$ , προκύπτει με παραγωγή της συνάρτησης  $C$  ως προς  $\mathbf{x}$ :

$$\mathbf{MC} = \mathbf{v} + \mathbf{Q}\mathbf{x} \quad (3.3)$$

Από την εξίσωση (3.3) είναι φανερό επίσης πως ο πίνακας  $\mathbf{Q}$  αποτελεί τη δεύτερη παράγωγο της  $C$  ως προς  $\mathbf{x}$ . Σύμφωνα με τους Paris και Howitt (1998), το διάνυσμα  $\mathbf{MC}$

υπολογιζόμενο στο σημείο  $\mathbf{x}^*$  αποτελεί το πραγματικό οριακό «οικονομικό» κόστος για τον παραγωγό κατά το έτος βάσης και πρέπει να ισούται με το άθροισμα του «λογιστικού» κόστους  $\mathbf{c}$  και του «διαφορικού» κόστους ευκαιρίας  $\boldsymbol{\lambda}$ :

$$\mathbf{v} + \mathbf{Q}\mathbf{x}^* = \mathbf{c} + \boldsymbol{\lambda} \quad (3.4)$$

Η εκτίμηση των αγνώστων στοιχείων του διανύσματος  $\mathbf{v}$  και του πίνακα  $\mathbf{Q}$  βασίζεται στην εξίσωση (3.4), η οποία αποτελεί ένα υποπροσδιορισμένο σύστημα  $I$  εξισώσεων και  $2I$  ή  $I + I(I + 1)/2$  αγνώστων μεταβλητών, ανάλογα με τη μορφή του πίνακα  $\mathbf{Q}$ <sup>13</sup>. Έτσι, στην περίπτωση του διαγώνιου πίνακα η εξίσωση (3.4) μπορεί να γραφτεί αναλυτικά ως:

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} q_{11} & & & \\ & q_{22} & & \\ & & \ddots & \\ & & & q_{II} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_1^* \\ x_2^* \\ \vdots \\ x_I^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_I \end{bmatrix}$$

Ή αλγεβρικά: 
$$v_i + q_{ij}x_j^* = c_i + \lambda_i$$

Και στην περίπτωση του πλήρως ορισμένου πίνακα  $\mathbf{Q}$ :

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & \cdots & q_{1I} \\ q_{21} & q_{22} & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{I1} & \cdots & \cdots & q_{II} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_1^* \\ x_2^* \\ \vdots \\ x_I^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_I \end{bmatrix}$$

Ή αλγεβρικά: 
$$v_i + \sum_{j=1}^I (q_{ij}x_j^*) = c_i + \lambda_i$$

Οι διάφοροι τρόποι εκτίμησης της (3.4) παρουσιάζονται στην επόμενη ενότητα. Σε κάθε περίπτωση, στην τρίτη φάση του ΘΜΠ η εκτιμημένη τετραγωνική συνάρτηση μεταβλητού κόστους  $C(\mathbf{x})$  αντικαθιστά την αρχική γραμμική συνάρτηση με αποτέλεσμα το τελικό μη γραμμικό υπόδειγμα να αναπαράγει ακριβώς τις παρατηρήσεις του έτους βάσης. Το τελικό πρόβλημα βελτιστοποίησης δεν περιλαμβάνει τους περιορισμούς ρύθμισης που εμφανίζονται στη πρώτη φάση του ΘΜΠ και διατυπώνεται ως:

$$\max_{\mathbf{x} \geq 0} Z = \mathbf{r}^T \mathbf{x} - \mathbf{v}^T \mathbf{x} - \frac{1}{2} \mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x}$$

Υπό περιορισμούς 
$$\mathbf{A} \mathbf{x} \leq \mathbf{b} \quad [\boldsymbol{\theta}]$$

<sup>13</sup> Όπως αναφέρει και ο Heckeley (2002), η ρύθμιση ενός υποδείγματος μπορεί να θεωρηθεί ως μια ειδική περίπτωση εκτίμησης αγνώστων παραμέτρων, η οποία όμως χαρακτηρίζεται πάντα από αρνητικό αριθμό βαθμών ελευθερίας.

Να σημειωθεί πως αν και τα υποδείγματα ΘΜΠ με τετραγωνική συνάρτηση μεταβλητού κόστους κυριαρχούν στη βιβλιογραφία (π.χ. Petsakos & Rozakis, 2009; De Frahan *et al.*, 2007; Arfini *et al.*, 2001; Heckelei & Britz, 2000), εντούτοις δεν υπάρχει περιορισμός ούτε ως προς το μετασχηματιζόμενο μέρος της αντικειμενικής συνάρτησης, ούτε ως προς την επιλεχθείσα μη γραμμική μορφή. Για παράδειγμα, οι Júdez *et al.* (2002) χρησιμοποιούν τετραγωνικές συναρτήσεις παραγωγής, ενώ ο Howitt (1995a) μια συνάρτηση σταθερής ελαστικότητας υποκατάστασης. Για λόγους πληρότητας της παρουσίασης της μεθόδου του ΘΜΠ, περιγράφεται στη συνέχεια ο τρόπος ρύθμισης ενός υποδείγματος ΓΠ με τη χρήση μιας τετραγωνικής συνάρτησης παραγωγής, όπως παρουσιάστηκε από τον Howitt (1995b). Στην περίπτωση αυτή, η τετραγωνική συνάρτηση παραγωγής ορίζεται αλγεβρικά ως:

$$Y_i = y_i x_i = \left( \gamma_i - \frac{1}{2} \delta_i x_i \right) x_i \quad (3.5)$$

Με  $Y_i$  συμβολίζεται το συνολικό ύψος της παραγωγής κάθε  $i$  καλλιέργειας, με  $y_i$  η αρχική (παρατηρούμενη) απόδοση,  $x_i$  είναι η καλλιεργούμενη έκταση, ενώ  $\gamma_i$  και  $\delta_i$  αποτελούν άγνωστες μη αρνητικές παραμέτρους της συνάρτησης παραγωγής. Η εξίσωση (3.5) υποδηλώνει μια αρνητική συσχέτιση μεταξύ απόδοσης και έκτασης, την οποία ο Howitt (1995b) αποδίδει στη συνεχώς μειούμενη ποιότητα της γης καθώς αυξάνεται η καλλιεργούμενη έκταση. Η αρχική γραμμική συνάρτηση παραγωγής ορίζεται ως το γινόμενο των αποδόσεων επί των αντίστοιχων εκτάσεων, δηλαδή ισούται με  $Y_i = y_i x_i$ . Από την (3.5) υπολογίζεται το μέσο προϊόν ( $AY_i$ ) και το οριακό προϊόν ( $MY_i$ ) της γης για κάθε  $i$  καλλιέργεια:

$$AY_i = \frac{Y_i}{x_i} = \gamma_i - \frac{1}{2} \delta_i x_i = y_i \quad (3.6)$$

$$MY_i = \frac{\partial Y_i}{\partial x_i} = \gamma_i - \delta_i x_i \quad (3.7)$$

Από τις εξισώσεις (3.6) και (3.7) φαίνεται πως για την αρχική γραμμική συνάρτηση παραγωγής ισχύει  $MY_i = AY_i = y_i$ , ενώ για την τετραγωνική συνάρτηση  $MY_i < AY_i = y_i$ , κάτι που οφείλεται στην κυρτότητα της (3.5) και δείχνει πως η τετραγωνική συνάρτηση αφορά σε επιλογές χρήσης του συντελεστή  $x_i$  εντός του ορθολογικού δεύτερου σταδίου της παραγωγής. Στην περίπτωση αυτή, ο Howitt (1995b) ερμηνεύει το  $\lambda$  ως τη διαφορά μεταξύ της αξίας του μέσου και του οριακού προϊόντος των «προτιμώμενων» δραστηριοτήτων στο σημείο  $x_i^*$ :

$$\lambda_i = p_i \left( \gamma_i - \frac{1}{2} \delta_i x_i^* \right) - p_i (\gamma_i - \delta_i x_i^*) \quad (3.8)$$

όπου με  $p_i$  συμβολίζεται η τιμή της  $i$  καλλιέργειας. Από την (3.8) το  $\delta_i$  υπολογίζεται ως

$$\delta_i = \frac{2\lambda_i}{p_i x_i^*} \quad (3.9)$$

Τέλος, το  $\gamma_i$  υπολογίζεται αντικαθιστώντας την (3.9) στην (3.6):

$$\gamma_i = y_i + \frac{\lambda_i}{p_i}$$

Τα παραπάνω φανερώνουν πως η αδυναμία αναπαραγωγής των αποτελεσμάτων του έτους βάσης από ένα υπόδειγμα ΓΠ οφείλεται στην υπόθεση πως το πραγματικό οριακό προϊόν του συντελεστή  $x_i$  είναι διαφορετικό από το αντίστοιχο μέσο προϊόν και συνεπώς δεν ισχύει η διπλή ισότητα  $MY_i = AY_i = y_i$ . Η διαφορά αυτή αποδίδεται σε ατέλειες της αγοράς και στην ετερογένεια της παραγωγής εξαιτίας διαφορών στην ποιότητα του εδάφους (Howitt, 1995a). Το τελικό πρόβλημα βελτιστοποίησης που ενσωματώνει την τετραγωνική συνάρτηση παραγωγής αναπαράγει ακριβώς τα αποτελέσματα του έτους βάσης και διατυπώνεται ως:

$$\max_{x_i \geq 0} Z = \sum_{i=1}^I \left[ p_i \left( \gamma_i - \frac{1}{2} \delta_i x_i \right) x_i - c_i x_i \right]$$

Υπό περιορισμούς

$$\sum_{i=1}^I a_{mi} x_i \leq b_m$$

όπου  $a_{mi}$  οι τεχνολογικοί συντελεστές, δηλαδή τα στοιχεία της τεχνολογικής μήτρας  $\mathbf{A}$  και  $b_m$  τα στοιχεία του διανύσματος  $\mathbf{b}$  που εκφράζει τη διαθεσιμότητα των συντελεστών παραγωγής στο δεξί μέρος των περιορισμών του αρχικού προβλήματος.

### 3.3 Τρόποι εκτίμησης της μη γραμμικής αντικειμενικής συνάρτησης

#### 3.3.1 Διαγώνιος πίνακας Q

Προκειμένου να ξεπεραστεί το υποπροσδιορισμένο πρόβλημα εκτίμησης των στοιχείων του  $\mathbf{v}$  και του  $\mathbf{Q}$ , η επιλογή διαγώνιου πίνακα, σε συνδυασμό με τη χρήση επιπλέον *ad hoc* τεχνικών αποτελούσε μονόδρομο στις αρχικές εφαρμογές του ΘΜΠ (Petsakos & Rozakis, 2009):

- Μια πολύ απλή μέθοδος, η οποία χρησιμοποιήθηκε κυρίως στις αρχικές εφαρμογές ΘΜΠ, είναι η εξίσωση των διανυσμάτων  $\mathbf{v}$  και  $\mathbf{c}$  (Bauer & Kasnakoglou, 1990). Συνεπώς, κάθε διαγώνιο  $q_i$  στοιχείο του  $\mathbf{Q}$  στο παρατηρούμενο  $x_i^*$  υπολογίζεται ως:

$$q_i = \frac{\lambda_i}{x_i^*}$$

- Μια άλλη μέθοδος που ονομάζεται «μέθοδος του μέσου κόστους» και παρουσιάστηκε από τους Heckeley και Britz (2000), ορίζει πως το μέσο μεταβλητό κόστος  $c_i$  κάθε δραστηριότητας στο αρχικό πρόβλημα ΓΠ πρέπει να ισούται με το αντίστοιχο μέσο κόστος του μη γραμμικού προβλήματος της τελικής φάσης του ΘΜΠ στο σημείο  $x_i^*$ . Από την τετραγωνική συνάρτηση μεταβλητού κόστους, το μέσο κόστος  $AC_i$  ως προς το επίπεδο παραγωγής  $x_i$  υπολογίζεται ως:

$$AC_i = v_i + \frac{1}{2}q_i x_i$$

Αυτό σημαίνει πως στο σημείο  $x_i^*$ :

$$v_i + \frac{1}{2}q_i x_i^* = c_i \quad (3.10)$$

Οι (3.4) και (3.10) αποτελούν ένα σύστημα δυο εξισώσεων με δυο αγνώστους από το οποίο προκύπτει:

$$q_i = \frac{2\lambda_i}{x_i^*} \quad \text{και} \quad v_i = c_i - \lambda_i$$

- Μια άλλη απλή μέθοδος συνίσταται στην απαλοιφή του διανύσματος  $\mathbf{v}$ , δηλαδή στηρίζεται στην υπόθεση πως αυτό ισούται με μηδέν (Arfini & Paris, 1995). Έτσι, κάθε διαγώνιο  $q_i$  στο σημείο  $x_i^*$  υπολογίζεται ως:

$$q_i = \frac{c_i + \lambda_i}{x_i^*}$$

- Μια εναλλακτική μέθοδος με πιο σαφή οικονομική ερμηνεία παρουσιάστηκε από τους Helming *et al.* (2001), οι οποίοι ορίζουν κάθε στοιχείο του πίνακα  $\mathbf{Q}$  ως συνάρτηση των ιδίων ελαστικοτήτων προσφοράς κάθε δραστηριότητας. Ειδικότερα, προκειμένου η βέλτιστη λύση του τελικού μη γραμμικού προβλήματος να ταυτίζεται με το παρατηρούμενο επίπεδο παραγωγής, πρέπει να ικανοποιούνται οι αναγκαίες συνθήκες πρώτης τάξης στο σημείο  $x_i^* > 0$ . Εκφράζοντας την ακαθάριστη πρόσοδο

ως το γινόμενο τιμών ( $p_i$ ) και αποδόσεων ( $y_i$ ), οι συνθήκες αυτές σε αλγεβρική μορφή ορίζουν πως:

$$p_i y_i - v_i - q_i x_i^* - \sum_{m=1}^M a_{im} \theta_m = 0 \quad (3.11)$$

Λύνοντας την (3.11) ως προς  $x_i^*$ :

$$x_i^* = \frac{1}{q_i} \left( p_i y_i - v_i - \sum_{m=1}^M a_{im} \theta_m \right) \quad (3.12)$$

Η ελαστικότητα προσφοράς,  $\varepsilon_i$ , της δραστηριότητας  $i$  στο παρατηρούμενο επίπεδο παραγωγής  $x_i^*$  που προκύπτει από την (3.12) ισούται με:

$$\varepsilon_i = \frac{\partial x_i^*}{\partial p_i} \frac{p_i}{x_i^*} = \frac{y_i p_i}{q_i x_i^*}$$

Συνεπώς, κάθε  $q_i$  ισούται με:

$$q_i = \frac{y_i p_i}{\varepsilon_i x_i^*} \quad (3.13)$$

Οι σταθεροί όροι της συνάρτησης κόστους,  $v_i$ , μπορούν στη συνέχεια να υπολογιστούν με αντικατάσταση της (3.13) στην εξίσωση (3.4):

$$v_i = c_i + \lambda_i - \frac{y_i}{\varepsilon_i} p_i$$

### 3.3.2 Πλήρως ορισμένος πίνακας Q

Είναι φανερό πως η διαγώνια μορφή του  $\mathbf{Q}$  καθιστά ευκολότερη την εκτίμηση των στοιχείων του, αφού αυτά είναι λιγότερα σε αριθμό. Ωστόσο υστερεί σε ρεαλισμό, καθώς δεν αναπαριστά την πραγματική σχέση υποκατάστασης ή συμπληρωματικότητας που παρατηρείται μεταξύ των δραστηριοτήτων, αλλά υποθέτει πως το οριακό κόστος της κάθε μιας εξαρτάται αποκλειστικά από το δικό της επίπεδο παραγωγής. Αντίθετα, όταν ο  $\mathbf{Q}$  είναι πλήρως ορισμένος, δηλαδή θεωρηθεί ως συμμετρικός με μη μηδενικά στοιχεία παντού, το οριακό κόστος της κάθε δραστηριότητας εξαρτάται και από το επίπεδο παραγωγής όλων των υπολοίπων.

Πρώτοι οι Paris και Howitt (1998) χρησιμοποίησαν έναν πλήρως ορισμένο πίνακα, αξιοποιώντας το κριτήριο της μέγιστης εντροπίας (maximum entropy) για την επίλυση του υποπροσδιορισμένου συστήματος που ορίζεται από την εξίσωση (3.4). Η έννοια της



εντροπίας εισήχθη από τον Shannon (1948) στα πλαίσια της θεωρίας της πληροφορίας, προκειμένου να περιγράψει την αβεβαιότητα που σχετίζεται με μια τυχαία μεταβλητή. Αργότερα ο Jaynes (1957), ορμώμενος από τη μηχανική και τη θερμοδυναμική καθιέρωσε την αρχή της μέγιστης εντροπίας, σύμφωνα με την οποία, η πραγματική κατανομή πιθανότητας εμφάνισης ενός ενδεχομένου είναι εκείνη που μεγιστοποιεί την εντροπία του ενδεχομένου. Το μέτρο της εντροπίας ( $H$ ) εκφράζεται μέσα από ένα διάνυσμα πιθανοτήτων  $\boldsymbol{\pi} = [\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_K]$  εμφάνισης  $K$  ενδεχομένων και αλγεβρικά ισούται με το άθροισμα των γινομένων κάθε  $\pi_k$  πιθανότητας (με  $k \in K$ ) επί τον λογάριθμο της (Shannon, 1948):

$$H(\pi_k) = - \sum_{k=1}^K \pi_k \ln(\pi_k)$$

Όπως στην κλασσική θερμοδυναμική, όπου η αύξηση της εντροπίας ενός συστήματος συνεπάγεται αύξηση της αστάθειας του, έτσι και η αύξηση της εντροπίας ενός μηνύματος αυξάνει την αβεβαιότητα σχετικά με το περιεχόμενο του. Αυτό σημαίνει πως για ένα σύνολο  $K$  ενδεχομένων η εντροπία μεγιστοποιείται όταν τα ενδεχόμενα είναι ισοπίθανα ( $\pi_1 = \pi_2 = \dots = \pi_K$ ), δηλαδή όταν η κατανομή των πιθανοτήτων τείνει να γίνει ομοιόμορφη.

*« Η μεγάλη πρόοδος που σημειώθηκε χάρη στη θεωρία της πληροφορίας οφείλεται στην ανακάλυψη πως υπάρχει ένα μοναδικό και αναμφισβήτητο κριτήριο για το 'ποσό της αβεβαιότητας' που αντιπροσωπεύει μια κατανομή συχνοτήτων, το οποίο συμφωνεί με τη διαίσθηση πως μια πεπλατυσμένη κατανομή αντιπροσωπεύει περισσότερη αβεβαιότητα από μια με οξεία κορυφή [...] » (Jaynes, 1957: 622).*

Η μεγιστοποίηση της εντροπίας προτείνεται από τον Jaynes (1957) για την επίλυση υποπροσδιορισμένων συστημάτων εξισώσεων, ενώ ως οικονομικό κριτήριο πρωτοπαρουσιάστηκε από τους Golan *et al.* (1996b) σε μια προσπάθεια να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της πολυσυγγραμικότητας (multicollinearity) που συνήθως ταλανίζει την ανάλυση παλινδρόμησης. Έκτοτε η μέθοδος έχει συχνά χρησιμοποιηθεί σε οικονομικές αναλύσεις, κυρίως στα οικονομικά της παραγωγής (π.χ. Zhang & Fan, 2001; Oude Lansink, 1999; Lence & Miller, 1998).

Κατά τη χρήση της μεθόδου της μέγιστης εντροπίας, είτε ως οικονομικό κριτήριο εκτίμησης παραμέτρων, είτε ως εργαλείο για την επίλυση συστημάτων εξισώσεων, το διάνυσμα των πιθανοτήτων  $\boldsymbol{\pi}$  πολλαπλασιάζεται με ένα διάνυσμα υποστηρικτικών τιμών  $\mathbf{z} = [z_1, z_2, \dots, z_K]$ , το οποίο επιλέγεται από τον αναλυτή με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι εφικτή η επίλυση του συστήματος. Αυτό σημαίνει πως οι τιμές που παίρνουν τα στοιχεία του διανύσματος των υποστηρικτικών πρέπει να συγκεντρώνονται γύρω από

τις πιθανές τιμές των ζητούμενων παραμέτρων. Έτσι, οι υποστηρικτικές τιμές παίζουν το ρόλο μιας πιθανής αρχικής λύσης, της προσδοκώμενης τιμής της παραμέτρου, η οποία στη συνέχεια, με τη μεγιστοποίηση της εντροπίας του συστήματος υπό ένα σύνολο περιορισμών, διαμορφώνεται στο τελικό της ύψος.

Ένα παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου δίνεται παρακάτω με το κλασικό γραμμικό υπόδειγμα παλινδρόμησης  $\mathbf{y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \mathbf{e}$ , όπου  $\mathbf{y}$  το  $N \times 1$  διάνυσμα της εξαρτημένης μεταβλητής,  $\mathbf{X}$  ο πίνακας ( $N \times T$ ) των ανεξάρτητων (ερμηνευτικών) μεταβλητών,  $\boldsymbol{\beta}$  το  $T \times 1$  διάνυσμα των υπό εκτίμηση παραμέτρων και  $\mathbf{e}$  το  $N \times 1$  διάνυσμα των διαταρακτικών όρων (σφαλμάτων). Η χρήση του κριτηρίου της μέγιστης εντροπίας συνίσταται στην εύρεση μιας διακριτής κατανομής πιθανότητας που αντιστοιχεί σε ένα διάνυσμα υποστηρικτικών τιμών, καθορισμένο εκ των προτέρων, για καθένα από τα  $T$  στοιχεία του διανύσματος  $\boldsymbol{\beta}$  και τα  $N$  στοιχεία του διανύσματος  $\mathbf{e}$ . Αν τα υποστηρικτικά αυτά διανύσματα γραφτούν ως  $\mathbf{z}_t^\beta$  και  $\mathbf{z}_n^e$  αντίστοιχα (με  $t \in T$  και  $n \in N$ ), το πρόβλημα μεγιστοποίησης της εντροπίας μπορεί να γραφτεί ως:

$$\max H(\pi_{tk}^\beta, \pi_{nk}^e) = - \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \pi_{tk}^\beta \ln(\pi_{tk}^\beta) - \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N \pi_{nk}^e \ln(\pi_{nk}^e)$$

Υπό περιορισμούς

$$y_n = X_{nt}\beta_t + e_n$$

$$\sum_{k=1}^K z_{tk}^\beta \pi_{tk}^\beta = \beta_t \quad \sum_{k=1}^K \pi_{tk}^\beta = 1$$

$$\sum_{k=1}^K z_{nk}^e \pi_{nk}^e = e_n \quad \sum_{k=1}^K \pi_{nk}^e = 1$$

$$\pi_{tk}^\beta, \pi_{nk}^e \geq 0$$

όπου  $y_n$ ,  $\beta_t$ ,  $e_n$  και  $X_{nt}$  τα στοιχεία των διανυσμάτων  $\mathbf{y}$ ,  $\boldsymbol{\beta}$ ,  $\mathbf{e}$  και του πίνακα  $\mathbf{X}$ , ενώ τα  $\pi_{tk}^\beta$  και  $\pi_{nk}^e$  είναι οι πιθανότητες που αντιστοιχούν στις υποστηρικτικές τιμές  $z_{tk}^\beta$  και  $z_{nk}^e$ , με τη βοήθεια των οποίων κάθε στοιχείο των  $\boldsymbol{\beta}$  και  $\mathbf{e}$  μπορεί να γραφτεί ως μια προσδοκώμενη τιμή.

Να σημειωθεί πως αν και δεν υπάρχει κάποιος κανόνας που να ορίζει τον ιδανικό αριθμό υποστηρικτικών τιμών,  $K$ , οι Golan *et al.* (1996a) απέδειξαν πως η διακύμανση του εκτιμητή της μέγιστης εντροπίας είναι αρνητικά συσχετισμένη με τον αριθμό των υποστηρικτικών τιμών. Σε επαλήθευση του ευρήματος αυτού, οι Heckelei και Britz (2000) διαπίστωσαν πως η επιλογή ενός διανύσματος με περισσότερα από 4 στοιχεία δεν μειώνει σημαντικά τη διακύμανση του εκτιμητή. Η τελική επιλογή εξαρτάται

συνεπώς από τον αναλυτή και τα παραδείγματα στη βιβλιογραφία κυμαίνονται από  $K = 2$  (Bailey *et al.*, 2004) έως  $K = 5$  (Petsakos & Rozakis, 2009; Paris & Howitt, 1998).

Επιστρέφοντας στην εκτίμηση της τετραγωνικής συνάρτησης κόστους στα πλαίσια του ΘΜΠ, οι Paris και Howitt (1998) πρότειναν την παραγοντοποίηση Cholesky για να εξασφαλίσουν πως ο πίνακας  $\mathbf{Q}$  είναι συμμετρικός και θετικά ορισμένος. Με τη παραγοντοποίηση αυτή, ο  $\mathbf{Q}$  μπορεί να γραφτεί ως γινόμενο τριών πινάκων:  $\mathbf{Q} = \mathbf{LDL}^T$ , όπου  $\mathbf{L}$  ένας κάτω τριγωνικός πίνακας με μονάδες στην κύρια διαγώνιο,  $\mathbf{L}^T$  ο ανάστροφος του και  $\mathbf{D}$  ένας διαγώνιος πίνακας. Αν και στην παραπάνω διατύπωση η συμμετρία του πίνακα  $\mathbf{Q}$  είναι προφανής αφού προέρχεται από το γινόμενο συμμετρικών πινάκων, η θετική οριστικότητα του δεν είναι ορατή, αλλά εξασφαλίζεται από την υπόθεση πως τα στοιχεία του  $\mathbf{D}$  είναι μη αρνητικά (Σοφιανός & Τυχόπουλος, 2005). Ακολουθεί ένα παράδειγμα με ένα πίνακα  $3 \times 3$ :

$$\begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & & \\ L_{21} & 1 & \\ L_{31} & L_{32} & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} D_{11} & & \\ & D_{22} & \\ & & D_{33} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & L_{12} & L_{13} \\ & 1 & L_{23} \\ & & 1 \end{bmatrix}$$

Με το κριτήριο της μέγιστης εντροπίας επιδιώκεται η εύρεση μιας διακριτής κατανομής πιθανοτήτων για κάθε  $i$  στοιχείο του διανύσματος  $\mathbf{v}$  και κάθε  $ij$  στοιχείο των πινάκων  $\mathbf{L}$  και  $\mathbf{D}$ , έτσι ώστε αυτά να ορίζονται ως προσδοκώμενες τιμές. Παριστάνοντας τις κατανομές αυτές ως διανύσματα  $\boldsymbol{\pi}_i^V$ ,  $\boldsymbol{\pi}_{ij}^L$  και  $\boldsymbol{\pi}_{ij}^D$ , διαστάσεως  $K \times 1$ , και χρησιμοποιώντας τα διανύσματα υποστηρικτικών τιμών  $\mathbf{z}_i^V$ ,  $\mathbf{z}_{ij}^L$  και  $\mathbf{z}_{ij}^D$  αντίστοιχα (επίσης διάστασης  $K \times 1$ ), το τελικό πρόβλημα μεγιστοποίησης της εντροπίας γράφεται ως:

$$\max H(\boldsymbol{\pi}_{ik}^V, \boldsymbol{\pi}_{ijk}^L, \boldsymbol{\pi}_{ijk}^D) = - \sum_{i,k} \pi_{ik}^V \ln(\pi_{ik}^V) - \sum_{i,j,k} \pi_{ijk}^L \ln(\pi_{ijk}^L) - \sum_{i,j,k} \pi_{ijk}^D \ln(\pi_{ijk}^D)$$

Υπό περιορισμούς

$$\mathbf{v} + \mathbf{Q}\mathbf{x}^* = \mathbf{c} + \boldsymbol{\lambda}$$

$$\sum_k z_{ik}^V \pi_{ik}^V = v_i \quad \sum_k \pi_{ik}^V = 1 \quad \forall i = 1, 2, \dots, I$$

$$\sum_k z_{ijk}^L \pi_{ijk}^L = L_i \quad \sum_k \pi_{ijk}^L = 1 \quad \forall i < j$$

$$\sum_k z_{ijk}^D \pi_{ijk}^D = D_i \quad \sum_k \pi_{ijk}^D = 1 \quad \forall i = j$$

$$\pi_{ik}^V, \pi_{ijk}^L, \pi_{ijk}^D \geq 0$$

$$\forall k = 1, 2, \dots, K$$

Στις προηγούμενες παραγράφους, για τις άγνωστες παραμέτρους της συνάρτησης μεταβλητού κόστους, ο όρος «εκτίμηση» χρησιμοποιήθηκε εσκεμμένα αντί του όρου «υπολογισμός», γιατί θεωρείται προτιμότερος εξαιτίας των διαφορετικών τρόπων επίλυσης του υποπροσδιορισμένου προβλήματος της δεύτερης φάσης του ΘΜΠ. Εξάλλου, η διαδικασία που ακολουθείται μοιάζει αρκετά με την ανάλυση παλινδρόμησης, κατά την οποία, με δεδομένη τη συναρτησιακή μορφή και ένα σύνολο παρατηρήσεων, επιδιώκεται η εκτίμηση των παραμέτρων της συνάρτησης. Η διαφορά εντοπίζεται στην ύπαρξη ακριβώς μιας παρατήρησης που αφορά στο έτος βάσης (αντί πολλών παρατηρήσεων στην ανάλυση παλινδρόμησης), με την οποία επιχειρείται να εκτιμηθούν οι παράμετροι της μη γραμμικής συνάρτησης κόστους.

### 3.4 Κριτική της μεθόδου ΘΜΠ

Από τα παραπάνω προκύπτουν τα δυο βασικά πλεονεκτήματα της μεθόδου του ΘΜΠ έναντι των κλασσικών προβλημάτων ΓΠ. Αυτά είναι η ικανότητα ρύθμισης του υποδείγματος χωρίς τη χρήση περιορισμών ελλιπούς εμπειρικής δικαιολόγησης και η ομαλότερη αντίδραση των παραγωγών σε αλλαγές του οικονομικού περιβάλλοντος, λόγω της μη γραμμικής αντικειμενικής συνάρτησης.

Από την άλλη, ένα σημαντικό μειονέκτημα του ΘΜΠ είναι η αδυναμία του να λάβει υπόψη δραστηριότητες που δεν εμφανίζονται στο υφιστάμενο σχέδιο παραγωγής μιας εκμετάλλευσης. Ο λόγος είναι πως η έλλειψη παρατηρήσεων κατά το έτος βάσης, στις οποίες βασίζεται η διαδικασία εκτίμησης του πίνακα  $\mathbf{Q}$ , δεν επιτρέπει τη ρύθμιση του υποδείγματος όταν στη διαδικασία περιλαμβάνονται δραστηριότητες για τις οποίες ισχύει  $\mathbf{x}^* = 0$ . Σε μαθηματικούς όρους, αυτό σημαίνει πως η εξίσωση (3.4) εκφυλίζεται σε  $\mathbf{v} = \mathbf{c} + \lambda$ , γεγονός που δεν επιτρέπει την εκτίμηση μιας μη γραμμικής συνάρτησης κόστους για τις μη παρατηρούμενες δραστηριότητες, αφού τα στοιχεία του  $\mathbf{Q}$  μπορούν να πάρουν οποιαδήποτε τιμή.

Στη βιβλιογραφία έχουν εμφανιστεί δυο μέθοδοι αντιμετώπισης του προβλήματος των μη παρατηρούμενων δραστηριοτήτων. Η πρώτη είναι η μέθοδος των Röhm και Dabbert (2003) και οι επεκτάσεις της (Cortignani & Severini, 2009), που όμως αφορούν σε δραστηριότητες που είναι παρόμοιες με εκείνες που εμφανίζονται στο υφιστάμενο σχέδιο παραγωγής (π.χ. διαφορετικές ποικιλίες της ίδιας καλλιέργειας) και όχι σε εντελώς νέες δραστηριότητες. Η δεύτερη μέθοδος είναι εκείνη της «αυτό-επιλογής» (self-selection approach) των Paris και Arfini (2000), η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αναλύσεις σε επίπεδα υψηλότερα της εκμετάλλευσης και να λάβει υπόψη όλες τις δραστηριότητες που εμφανίζονται σε ένα δείγμα  $F$  εκμεταλλεύσεων. Η συγκεκριμένη μέθοδος στηρίζεται στην κατασκευή μιας εικονικής εκμετάλλευσης που περιλαμβάνει

αθροιστικά το σύνολο των δραστηριοτήτων που εμφανίζονται στο δείγμα (το οποίο αποτελείται πλέον από  $F + 1$  εκμεταλλεύσεις), ενώ όλες οι εκμεταλλεύσεις χαρακτηρίζονται από τον ίδιο πίνακα  $\mathbf{Q}$ . Η συνάρτηση κόστους της εικονικής εκμετάλλευσης ορίζεται ως  $C(\mathbf{x}) = 0.5\mathbf{x}^T\mathbf{Q}\mathbf{x}$  και κάθε πραγματικής εκμετάλλευσης  $f$  (με  $f \in F$ ) ως  $C_f(\mathbf{x}) = 0.5\mathbf{x}^T\mathbf{Q}\mathbf{x} + \mathbf{U}_f^T\mathbf{x}$ . Έτσι, το διάνυσμα  $\mathbf{U}_f \geq 0$  μεταφράζεται ως μια απόσταση από τη συνάρτηση κόστους της εικονικής εκμετάλλευσης, η οποία αντιπροσωπεύει την πιο αποδοτική τεχνολογία παραγωγής. Πρόκειται δηλαδή για μια έννοια παρόμοια με εκείνη της «συνάρτησης απόστασης» (distance function) που χρησιμοποιείται ευρύτατα στα οικονομικά της παραγωγής για τη μέτρηση της αποδοτικότητας (Coelli *et al.*, 2005), με τη διαφορά πως ο μόνος παραγωγικός συντελεστής που λαμβάνεται υπόψη είναι το ίδιο το επίπεδο της παραγωγής,  $\mathbf{x}$ . Μια πιο αναλυτική παρουσίαση των μεθόδων των Röhm και Dabbert (2003) και των Paris και Arfini (2000), μαζί με ένα παράδειγμα εφαρμογής της τελευταίας δίνεται από τους Petsakos και Rozakis (2009).

Ένα ακόμα σημείο κριτικής του ΘΜΠ αποτελεί η, θεωρούμενη από πολλούς, δομική ασυνέπεια που εμφανίζει και η οποία αναλύεται στις επόμενες παραγράφους. Προκειμένου το αρχικό γραμμικό υπόδειγμα με τους επιπλέον περιορισμούς ρύθμισης να αναπαράγει τις παρατηρήσεις του έτους βάσης, θα πρέπει οι αναγκαίες συνθήκες πρώτης τάξης να ικανοποιούνται ακριβώς στο  $\mathbf{x}^*$ . Υποθέτοντας επίσης πως  $\boldsymbol{\theta} > 0$ <sup>14</sup>, οι συνθήκες αυτές ορίζουν πως:

$$\mathbf{r} - \mathbf{c} - \mathbf{A}^T\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\lambda} = 0 \quad (3.14)$$

Χρησιμοποιώντας το διαμερισμό των παραμέτρων του αρχικού γραμμικού προβλήματος σε «προτιμώμενες» και «οριακές» που παρουσιάστηκε στην ενότητα 3.2, η (3.14) μπορεί να γραφτεί αναλυτικά ως:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{r}_P - \mathbf{c}_P \\ \mathbf{r}_B - \mathbf{c}_B \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} (\mathbf{A}_P)^T \\ (\mathbf{A}_B)^T \end{bmatrix} \boldsymbol{\theta} - \begin{bmatrix} \boldsymbol{\lambda}_P \\ \boldsymbol{\lambda}_B \end{bmatrix} = 0 \quad (3.15)$$

Αφού  $\boldsymbol{\lambda}_B = 0$ , η (3.15) μπορεί να χωριστεί σε δυο εξισώσεις:

$$\mathbf{r}_P - \mathbf{c}_P - (\mathbf{A}_P)^T\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\lambda}_P = 0 \quad \text{και} \quad \mathbf{r}_B - \mathbf{c}_B - (\mathbf{A}_B)^T\boldsymbol{\theta} = 0$$

Ή αλλιώς

$$\mathbf{r}_P - \mathbf{c}_P - (\mathbf{A}_P)^T\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\lambda}_P = 0$$

<sup>14</sup> Η απαίτηση αυτή ικανοποιείται πάντα όταν υπάρχει ένας μόνο ενεργός περιορισμός (π.χ. συνολική έκταση εκμετάλλευσης). Στην περίπτωση περισσοτέρων περιορισμών, η ισχύς της συγκεκριμένης υπόθεσης εξαρτάται από τον αριθμό των μεταβλητών απόφασης και τον αριθμό των γραμμικά ανεξάρτητων μεταβλητών.

και

$$\boldsymbol{\theta} = (\mathbf{r}_B - \mathbf{c}_B)[(\mathbf{A}_B)^T]^{-1} \quad (3.16)$$

Σύμφωνα με τους Heckeley και Wolff (2003), η εξίσωση (3.16) δείχνει πως για κάθε  $m$  συντελεστή, η δυική του τιμή, η οποία εκφράζεται από το αντίστοιχο  $\theta_m$  στοιχείο του διανύσματος  $\boldsymbol{\theta}$ , εξαρτάται αποκλειστικά από τις τιμές των παραμέτρων των οριακών δραστηριοτήτων στην αντικειμενική συνάρτηση. Αυτό σημαίνει πως οποιαδήποτε μεταβολή της ακαθάριστης προσόδου ή/και του μεταβλητού κόστους μιας προτιμώμενης δραστηριότητας δεν θα έχει καμία επίδραση στο κόστος ευκαιρίας των συντελεστών παραγωγής, κάτι που δεν μπορεί να θεωρηθεί ρεαλιστικό. Αυτό χαρακτηρίζεται ως μια δομική ασυνέπεια του ΘΜΠ, την οποία ο Heckeley (2002) προσπαθεί να αποδείξει χρησιμοποιώντας τις αναγκαίες συνθήκες πρώτης τάξης του τελικού μη γραμμικού υποδείγματος. Ξεκινώντας από τη συνάρτηση Lagrange:

$$L(\mathbf{x}) = \mathbf{r}^T \mathbf{x} - \mathbf{v}^T \mathbf{x} - \frac{1}{2} \mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + \boldsymbol{\theta}^T (\mathbf{b} - \mathbf{A} \mathbf{x})$$

Και υποθέτοντας όπως προηγουμένως πως  $\boldsymbol{\theta} > 0$ , οι συνθήκες πρώτης τάξης στο σημείο  $\mathbf{x}^* > 0$  ορίζουν πως:

$$\frac{\partial L}{\partial \mathbf{x}}(\mathbf{x}^*) = \mathbf{r} - \mathbf{v} - \mathbf{Q} \mathbf{x}^* - \mathbf{A}^T \boldsymbol{\theta} = 0 \quad (3.17)$$

και

$$\frac{\partial L}{\partial \boldsymbol{\theta}} = \mathbf{A} \mathbf{x}^* - \mathbf{b} = 0 \quad (3.18)$$

Επιλύοντας την (3.17) ως προς  $\mathbf{x}^*$ :

$$\mathbf{x}^* = \mathbf{Q}^{-1}(\mathbf{r} - \mathbf{v} - \mathbf{A}^T \boldsymbol{\theta}) \quad (3.19)$$

Στη συνέχεια, αντικαθιστώντας την (3.19) στην (3.18) προκύπτει ότι:

$$\boldsymbol{\theta} = (\mathbf{A} \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{A}^T)^{-1} [\mathbf{A} \mathbf{Q}^{-1}(\mathbf{r} - \mathbf{v}) - \mathbf{b}] \quad (3.20)$$

Η παραπάνω εξίσωση δείχνει πως οι δυικές τιμές των συντελεστών παραγωγής εξαρτώνται από τις τιμές των παραμέτρων όλων των παρατηρούμενων (μη αρνητικών) δραστηριοτήτων, κάτι που έρχεται σε αντίθεση με την εξίσωση (3.16). Επιπλέον, οι Heckeley και Wolff (2003) υποστηρίζουν πως οι δυικές τιμές  $\boldsymbol{\theta}$  του αρχικού γραμμικού υποδείγματος «επιβάλλονται» στο τελικό μη γραμμικό υπόδειγμα, ανεξάρτητα από το

αν αντιστοιχούν σε ρεαλιστικές τιμές που παρατηρούνται στην πραγματικότητα (π.χ. το ενοίκιο εδάφους που προκύπτει ως δυική τιμή του περιορισμού της συνολικής διαθέσιμης καλλιεργούμενης γης). Να σημειωθεί πως στην περίπτωση ενός διαγώνιου πίνακα  $\mathbf{Q}$  και όταν ο μόνος ενεργός περιορισμός αφορά ακριβώς στη συνολική έκταση, οι Gohin και Chantreuil (1999) προτείνουν την εισαγωγή μιας προεκτιμημένης δυικής τιμής (ενοικίου) της γης κατευθείαν στην εξίσωση (3.17) και στη συνέχεια την επίλυση της ως προς τα στοιχεία του  $\mathbf{Q}$ . Με τον τρόπο αυτό, το τελικό μη γραμμικό υπόδειγμα παρουσιάζει τις «σωστές» δυικές τιμές και η ρύθμιση επιτυγχάνεται χωρίς να είναι απαραίτητη η πρώτη φάση του ΘΜΠ.

Ένα μαθηματικό υπόδειγμα κατασκευασμένο για ανάλυση πολιτικής δεν κρίνεται μόνο από την ικανότητα του να αναπαράγει τις παρατηρήσεις του έτους βάσης αλλά και από την ακρίβεια των αποτελεσμάτων του. Στο σημείο αυτό ασκείται επίσης έντονη κριτική στο ΘΜΠ, αφού στην περίπτωση ενός διαγώνιου πίνακα, οι διάφορες *ad hoc* μέθοδοι επίλυσης που παρουσιάστηκαν προηγουμένως οδηγούν σε διαφορετικά μεταξύ τους αποτελέσματα. Για παράδειγμα, η μέθοδος του «μέσου κόστους» οδηγεί σε έναν πίνακα  $\mathbf{Q}$  που είναι αριθμητικά διπλάσιος από εκείνον που παράγεται αν το διάνυσμα  $\mathbf{v}$  τεθεί ίσο με  $\mathbf{c}$ .

Η επιλογή διαφορετικού τρόπου επίλυσης συνεπάγεται επίσης διαφορετικό τρόπο αντιμετώπισης των οριακών δραστηριοτήτων. Ειδικότερα, στις δυο πρώτες μεθόδους, κάθε στοιχείο  $q_i$  του πίνακα  $\mathbf{Q}$  υπολογίζεται ως συνάρτηση της δυικής τιμής  $\lambda_i$  του περιορισμού ρύθμισης της  $i$  δραστηριότητας, με αποτέλεσμα τα στοιχεία  $q_B$  που αντιστοιχούν στις  $I - P$  οριακές δραστηριότητες να είναι μηδέν, αφού  $\lambda_B = 0$ . Αυτό παράγει μια γραμμική (σταθερή) συνάρτηση μεταβλητού κόστους για τις οριακές δραστηριότητες της μορφής  $\mathbf{c}_B = \mathbf{v}_B$ , ενώ για τις προτιμώμενες δραστηριότητες το μεταβλητό κόστος είναι μια αύξουσα συνάρτηση του  $\mathbf{x}$  που ορίζεται ως  $\mathbf{c}_P = \mathbf{v}_P + \mathbf{Q}_P \mathbf{x}_P$ . Η παρατήρηση αυτή δεν ισχύει για την τρίτη μέθοδο επίλυσης, η οποία βασίζεται στην υπόθεση πως το διάνυσμα  $\mathbf{v}$  ισούται με μηδέν, καθώς όλα τα στοιχεία  $q_i$  υπολογίζονται ως συνάρτηση της αντίστοιχης τιμής του  $x_i$ . Όπως φαίνεται επίσης από την εξίσωση (3.20), οι δυικές τιμές  $\theta$  των συντελεστών παραγωγής στο τελικό μη γραμμικό πρόβλημα είναι διαφορετικές σε κάθε μια από τις μεθόδους επίλυσης, λόγω του διαφορετικού τρόπου υπολογισμού των στοιχείων του  $\mathbf{Q}$ . Από τα παραπάνω προκύπτει πως η επιλογή οποιασδήποτε *ad hoc* μεθόδου δεν μπορεί να δικαιολογηθεί ούτε θεωρητικά ούτε εμπειρικά και συνεπώς αποτελεί μια αυθαίρετη απόφαση που εξαρτάται από τον αναλυτή.

Στην περίπτωση ενός πλήρως ορισμένου πίνακα  $\mathbf{Q}$  με μη μηδενικά στοιχεία παντού, η χρήση της μεθόδου της μέγιστης εντροπίας προσφέρει μια ενδιαφέρουσα σύζευξη οικο-

νομετρικών μεθόδων και μαθηματικού προγραμματισμού. Ωστόσο, οι τελικές εκτιμήσεις είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες στη διακύμανση των διανυσμάτων υποστηρικτικών τιμών, με αποτέλεσμα οι Paris και Caputo (2001) να συνιστούν τη χρήση της μεθόδου μόνο στην περίπτωση κατά την οποία το πραγματικό εύρος τιμών των υπό εκτίμηση παραμέτρων είναι γνωστό εκ των προτέρων. Οι Paris και Howitt (1998) διαπίστωσαν πως όσο μικρότερο είναι το εύρος των υποστηρικτικών τιμών τόσο μειώνεται η διακύμανση των εκτιμήσεων που προκύπτουν από διαφορετικές επιλογές υποστηρικτικών διανυσμάτων. Παρατήρησαν επίσης πως τη μεγαλύτερη συμβολή στα διαφορετικά αποτελέσματα (διακύμανση) έχουν τα διαγώνια στοιχεία του  $\mathbf{Q}$ , τα οποία, όπως παρουσιάστηκε παραπάνω, συνδέονται με την ελαστικότητα προσφοράς της δραστηριότητας  $i$  ως προς την τιμή της. Καθώς ο πίνακας  $\mathbf{Q}$  αποτελεί στην πραγματικότητα τη δεύτερη παράγωγο της συνάρτησης κόστους ως προς  $\mathbf{x}$ , η επίλυση του υποπροσδιορισμένου συστήματος (3.4) είτε με κάποια από τις προαναφερθείσες *ad hoc* μεθόδους (στην περίπτωση διαγώνιου πίνακα), είτε με το κριτήριο της μέγιστης εντροπίας (για πλήρως ορισμένο πίνακα) ενσωματώνει σημαντικό βαθμό μεροληψίας, με αποτέλεσμα τη διαφορετική συμπεριφορά του υποδείγματος ανάλογα με τον τρόπο επίλυσης ή τα επιλεχθέντα διανύσματα υποστηρικτικών τιμών αντίστοιχα. Ειδικότερα, το υποπροσδιορισμένο πρόβλημα που προκύπτει κατά τη δεύτερη φάση της μεθόδου μπορεί να επιλυθεί από άπειρο συνδυασμό παραμέτρων και συνεπώς μπορούν να προκύψουν άπειρες πιθανές μορφές του πίνακα  $\mathbf{Q}$  και του διανύσματος  $\mathbf{v}$ . Ειδικά στην περίπτωση του κριτηρίου της μέγιστης εντροπίας, η μεροληψία αυτή οφείλεται στο γεγονός πως η σύζευξη οικονομετρικών και μεθόδων προγραμματισμού μέσω του ΘΜΠ βασίζεται σε μια μοναδική παρατήρηση (το έτος βάσης).

Μια απλή λύση για τη μείωση της μεροληψίας κατά την εκτίμηση ενός πλήρως ορισμένου πίνακα  $\mathbf{Q}$  είναι ο ορισμός των στοιχείων του ως συνάρτηση της ίδιας και τη σταυροειδούς ελαστικότητας προσφοράς των δραστηριοτήτων, κατά τρόπο ανάλογο της μεθόδου των Helming *et al.* (2001) που παρουσιάστηκε παραπάνω για ένα διαγώνιο πίνακα  $\mathbf{Q}$ . Ειδικότερα, οι αναγκαίες συνθήκες πρώτης τάξης του τελικού μη γραμμικού προβλήματος ορίζουν (σε αλγεβρική μορφή) πως  $\forall i, j \in I$  ισχύει

$$\sum_{j=1}^I q_{ij}x_i = p_i y_i - v_i - \sum_{m=1}^M a_{im}\theta_m \quad (3.21)$$

Λύνοντας για οποιοδήποτε  $x_n$ , όπου  $n \in I$ , το αριστερό μέρος της (3.21) μπορεί να χωριστεί σε δύο όρους, όπως φαίνεται στην επόμενη εξίσωση:



$$q_{in}x_n + \sum_{j=1}^{I-1} q_{ij}x_j = p_i y_i - v_i - \sum_{m=1}^M a_{im}\theta_m$$

Και τελικά:

$$x_n = \frac{1}{q_{in}} \left[ p_i y_i - v_i - \sum_{m=1}^M a_{im}\theta_m - \sum_{j=1}^{I-1} q_{ij}x_j \right] \quad (3.22)$$

Κάθε μερική παράγωγος  $\partial x_n / \partial p_i$  ισούται με  $y_i / q_{in}$  (ή με  $y_i / q_{ni}$ , λόγω της συμμετρίας του  $\mathbf{Q}$ ). Αυτό σημαίνει πως από την εξίσωση (3.22) μπορεί να προκύψει μια πλήρης μήτρα ελαστικότητας ( $\mathbf{E}$ ) με  $\varepsilon_{ij}$  στοιχεία, τα οποία υπολογίζονται ως:

$$\mathbf{E} = \varepsilon_{ij} = \frac{\partial x_j}{\partial p_i} \frac{p_i}{x_j} = \frac{y_i}{q_{ij}} \frac{p_i}{x_j} \quad (3.23)$$

Ή αναλυτικότερα, σε μορφή πινάκων:

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \cdots & \varepsilon_{1I} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \varepsilon_{I1} & \cdots & \varepsilon_{II} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{y_1}{q_{11}} \frac{p_1}{x_1} & \cdots & \frac{y_I}{q_{1I}} \frac{p_I}{x_I} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{y_1}{q_{I1}} \frac{p_1}{x_1} & \cdots & \frac{y_I}{q_{II}} \frac{p_I}{x_I} \end{bmatrix}$$

Από την εξίσωση (3.23) καθίσταται φανερό πως κάθε  $q_{ij}$  στοιχείο του πίνακα  $\mathbf{Q}$  συνδέεται με τη σταυροειδή ελαστικότητα προσφοράς της  $i$  καλλιέργειας ως προς την τιμή της  $j$  καλλιέργειας, μέσω της σχέσης<sup>15</sup>:

$$q_{ij} = \frac{y_i}{\varepsilon_{ij}} \frac{p_i}{x_j}$$

Συνεπώς, ο πίνακας  $\mathbf{Q}$  μπορεί να εκτιμηθεί στο παρατηρούμενο σημείο  $x_i^*$  και για δεδομένες τιμές  $\varepsilon_{ij}$ , οι οποίες μπορούν να προέλθουν από οικονομετρικά υποδείγματα. Η συγκεκριμένη μέθοδος ωστόσο έχει επίσης δεχτεί κριτική, καθώς το υπόδειγμα που προκύπτει υποδηλώνει ελαστικότητες διαφορετικές από εκείνες που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση του πίνακα  $\mathbf{Q}$ . Αυτό μπορεί να διαπιστωθεί εμπειρικά με μια άσκηση προσομοίωσης, μεταβάλλοντας συνεχώς τις τιμές,  $p_i$ . Ο λόγος είναι πως στην εξίσωση (3.23) το κόστος ευκαιρίας των συντελεστών παραγωγής,  $\theta$ , θεωρείται πως παραμένει σταθερό ανεξάρτητα από τις τελικές τιμές του  $\mathbf{x}$ , ενώ στην πραγματικότητα το  $\theta$  είναι συνάρτηση της τελικής λύσης του υποδείγματος (Heckelei, 2002). Οι Mérel και Bucaram (2010) αποκαλούν αυτή τη μέθοδο ρύθμισης «μυωπική» ακριβώς γιατί οι

<sup>15</sup> Όταν  $i = j$  τότε πρόκειται για την ίδια ελαστικότητα προσφοράς.

μεταβολές του  $\theta$  ως αποτέλεσμα της μεταβολής της τελικής λύσης δεν λαμβάνονται υπόψη. Αναγνωρίζουν ωστόσο πως στην περίπτωση των τυπικών υποδειγμάτων ΘΜΠ, η χρήση εξωγενών πληροφοριών (ελαστικότητας προσφοράς) δεν επαρκεί για τη ρύθμιση του υποδείγματος και τον ταυτόχρονο έλεγχο της συμπεριφοράς του σε μεταβολές των τιμών των παραμέτρων, καθώς η μια και μοναδική παρατήρηση δεν περιέχει πληροφορίες για τις ιδιότητες δεύτερης τάξης του υποδείγματος στο σημείο  $\mathbf{x}^*$ . Να σημειωθεί πως αν και η εργασία των Mérel και Bucaram (2010) εστιάζει σε διαγώνιους πίνακες  $\mathbf{Q}$ , η κριτική αφορά το σύνολο των υποδειγμάτων ΘΜΠ που χρησιμοποιούν ελαστικότητα προσφοράς ως εξωγενείς πληροφορίες.

## 3.5 Οικονομικά υποδείγματα αβεβαιότητας και κινδύνου

### 3.5.1 Εισαγωγή

Η αβεβαιότητα για τις τιμές των παραμέτρων παραβιάζει μια από τις βασικότερες υποθέσεις στις οποίες στηρίζονται τα υποδείγματα ΓΠ και μπορεί να οδηγήσει σε αποτυχία των ελέγχων αξιοπιστίας που βασίζονται στην αναπαραγωγή των παρατηρήσεων του έτους βάσης. Σύμφωνα με το ασθενές αξίωμα μεγιστοποίησης του κέρδους (Varian, 1992), για δεδομένα διανύσματα μεταβλητού κόστους  $\mathbf{c}^t$  και ακαθάριστη προσόδου  $\mathbf{r}^t = \mathbf{p}^t \mathbf{y}^t$ , όπου  $\mathbf{p}^t$  και  $\mathbf{y}^t$  τα διανύσματα τιμών και αποδόσεων αντίστοιχα, υπάρχει ένα συγκεκριμένο σχέδιο παραγωγής  $\mathbf{x}^t$  το οποίο μεγιστοποιεί το συνολικό ακαθάριστο κέρδος. Επιλογή οποιουδήποτε άλλου εφικτού σχεδίου παραγωγής (π.χ.  $\mathbf{x}^s$ ) θα έχει ως αποτέλεσμα ακαθάριστα κέρδη ίσα ή μικρότερα σε σχέση με εκείνα που επιτυγχάνονται με το  $\mathbf{x}^t$ . Αυτό σημαίνει πως όταν οι προσδοκίες του παραγωγού σχετικά με τις αναμενόμενες τιμές, αποδόσεις και κόστη διαφέρουν από εκείνα που τελικά παρατηρούνται ( $\mathbf{r}^t \neq E[\mathbf{r}^t]$  και  $\mathbf{c}^t \neq E[\mathbf{c}^t]$ ), το υπόδειγμα του αναλυτή δεν θα καταφέρει να αναπαράγει τις παρατηρήσεις του έτους βάσης, γιατί αυτές αποτελούν παραγωγικές επιλογές στηριζόμενες σε λανθασμένες προσδοκίες παραμέτρων. Επιπλέον, η γραμμική αντικειμενική συνάρτηση στα κλασικά υποδείγματα ΓΠ αντιπροσωπεύει μια ουδέτερη στάση απέναντι στον οικονομικό κίνδυνο, ενώ εμπειρικές αποδείξεις συνηγορούν υπέρ του αντιθέτου (π.χ. Petsakos *et al.*, 2009; Chavas & Holt, 1990).

Από τα παραπάνω προκύπτει πως αν και η αβεβαιότητα και ο κίνδυνος αποτελούν πιθανές αιτίες αποτυχίας αναπαραγωγής των παρατηρήσεων του έτους βάσης, δεν έχει δημοσιευτεί μέχρι σήμερα κάποια εργασία που να πραγματεύεται τη ρύθμιση ενός υποδείγματος ΜΠ και η οποία να λαμβάνει υπόψη τους παραπάνω παράγοντες σε ένα πλαίσιο ΘΜΠ (υπολογισμός δυικών τιμών περιορισμών ρύθμισης και χρήση συνθηκών πρώτης τάξης). Συγκεκριμένα, όλα τα υποδείγματα ΘΜΠ που έχουν εμφανιστεί μέχρι τώρα στη βιβλιογραφία επιδιώκουν αποκλειστικά την αντικατάσταση της αρχικής

γραμμικής συνάρτησης κόστους (ή παραγωγής) με μια μη γραμμική, ενώ πρόσφατα, το ενδιαφέρον φαίνεται να στρέφεται και σε προσπάθειες ενσωμάτωσης τιμών ελαστικότητας προσφοράς στον αλγόριθμο του ΘΜΠ (π.χ. Kanellopoulos *et al.*, 2010; Mérel & Bucaram, 2010). Να σημειωθεί, ωστόσο, πως η εκτίμηση της πραγματικής στάσης του παραγωγού έναντι του κινδύνου, ως μέσο ρύθμισης υποδειγμάτων εκμεταλλεύσεων ΜΠ, έχει επιχειρηθεί στο παρελθόν, αλλά σε ένα λιγότερο αυστηρά μαθηματικό πλαίσιο, το οποίο είτε δεν εξασφαλίζει ακριβή ρύθμιση (π.χ. Brink & McCarl, 1978), είτε στηρίζεται σε υποθέσεις που δεν θεωρούνται ρεαλιστικές (Wiens, 1976). Τέτοια υποδείγματα θα συζητηθούν στις επόμενες παραγράφους.

Στη συνέχεια συζητούνται οι δυο κυριότερες μέθοδοι με τους οποίους μπορεί να ενσωματωθεί ο κίνδυνος και η αβεβαιότητα σε ένα οικονομικό υπόδειγμα. Επίσης, παρουσιάζεται μια νέα μέθοδος ρύθμισης υποδειγμάτων ΜΠ που αποτελεί μια διαφορετική εκδοχή του ΘΜΠ και λαμβάνει υπόψη τους παράγοντες αυτούς. Συγκεκριμένα, θεωρείται πως το αρχικό υπόδειγμα ΓΠ αποτυγχάνει να αναπαράγει τις παρατηρήσεις του έτους βάσης επειδή ο παραγωγός δεν είναι ουδέτερος απέναντι στον οικονομικό κίνδυνο, ενώ η πραγματική συμπεριφορά του μπορεί να αποκαλυφθεί από τις δυικές τιμές των περιορισμών ρύθμισης, όπως αυτοί που συναντώνται στην πρώτη φάση των κλασικών υποδειγμάτων ΘΜΠ. Η προτεινόμενη μέθοδος ρύθμισης αφορά στην ανάλυση του «μη ενσωματωμένου κινδύνου» που αντιμετωπίζουν οι παραγωγοί, όπως αυτός ορίστηκε στο κεφάλαιο 1. Καταστάσεις «ενσωματωμένου κινδύνου» δεν λαμβάνονται υπόψη στην παρούσα διατριβή, καθώς ο τρόπος ανάλυσης τους (διακριτός στοχαστικός προγραμματισμός) δεν είναι συμβατός με τη διαδικασία τριών βημάτων του ΘΜΠ, η οποία βασίζεται στις αναγκαίες συνθήκες πρώτης τάξης για τη ρύθμιση του υποδείγματος.

### **3.5.2 Η υπόθεση της προσδοκώμενης χρησιμότητας**

Η πιο γνωστή μέθοδος ενσωμάτωσης του παράγοντα «κίνδυνος» σε ένα οικονομικό υπόδειγμα είναι η θεωρία της προσδοκώμενης χρησιμότητας (Expected Utility – E-U). Η E-U παρουσιάστηκε αρχικά από τον Bernoulli (1738) ως μια εξήγηση των παραδόξων που σχετίζονται με το κριτήριο της μαθηματικής προσδοκίας των κερδών σε τυχερά παίγνια (λοταρίες)<sup>16</sup>, αλλά θεμελιώθηκε αξιωματικά αρκετά αργότερα από τους von Neumann και Morgenstern (1947). Η E-U υποθέτει πως όταν ικανοποιούνται κάποια αξιώματα συμπεριφοράς (προτιμήσεων), τότε ένα άτομο (ή αλλιώς μια οικονομική μονάδα) που βρίσκεται αντιμέτωπο με επιλογές που αφορούν σε ένα τυχερό παίγνιο με στοχαστικές χρηματικές αποδόσεις, επιδιώκει τη μεγιστοποίηση της προσδοκώμενης

---

<sup>16</sup> Πρόκειται για το τυχερό παίγνιο που οδηγεί στο παράδοξο του St. Petersburg. Στο παίγνιο αυτό, το κριτήριο της μαθηματικής προσδοκίας των κερδών ορίζει πως ο παίκτης έχει συμφέρον να στοιχηματίσει ένα άπειρο χρηματικό ποσό, γεγονός που αντιβαίνει στην κοινή λογική.

τιμής της χρησιμότητας των αποδόσεων και όχι των προσδοκώμενων αποδόσεων των επιλογών αυτών.

Τα σημαντικότερα αξιώματα στα οποία στηρίζεται η υπόθεση της E-U είναι τα ακόλουθα:

- *Αξίωμα της σύγκρισης (ordering axiom):* Για οποιεσδήποτε αποδόσεις  $M$  και  $L$  ισχύει μόνο μια από τις ακόλουθες σχέσεις:  $M > L, M \sim L, M < L$ .
- *Αξίωμα της μεταβατικότητας (transitivity axiom):* Για οποιεσδήποτε αποδόσεις  $M, L$  και  $N$ , αν  $M > L$  και  $L > N$  τότε ισχύει πως  $M > N$ .
- *Αξίωμα της ανεξαρτησίας (independence axiom):* Αν κάποιος προτιμά την απόδοση  $M$  από την απόδοση  $L$  (δηλαδή  $M > L$ ), τότε μια λοταρία που περιλαμβάνει την  $M$  και μια οποιαδήποτε άλλη απόδοση  $N$ , θα είναι προτιμότερο από τη λοταρία που περιλαμβάνει τα  $L$  και  $N$ . Μαθηματικά αυτό διατυπώνεται ως  $\pi M + (1 - \pi)N > \pi L + (1 - \pi)N$ , όπου  $\pi \in (0,1]$ .
- *Αξίωμα της συνέχειας (continuity axiom):* Αν για αποδόσεις  $M, L$  και  $N$  οι προτιμήσεις ενός ατόμου ορίζουν πως  $M \succcurlyeq L \succcurlyeq N$ , τότε υπάρχει ένας αριθμός  $\varepsilon \in [0,1]$  τέτοιος ώστε  $\varepsilon M + (1 - \varepsilon)N = L$ .

Αν ισχύουν τα παραπάνω αξιώματα, τότε μπορεί να οριστεί μια συνάρτηση προσδοκώμενης χρησιμότητας  $U(a) = E[u(a)]$ , όπου  $u(a)$  μια συνάρτηση χρησιμότητας και  $a$  μια διακριτή τυχαία μεταβλητή που αντιπροσωπεύει μια στοχαστική απόδοση (ή οικονομικό όφελος) και παίρνει τιμή  $a(x_n)$  όταν πραγματοποιηθεί το ενδεχόμενο  $x_n$  με (υποκειμενική) πιθανότητα  $\pi_n$ :

$$U(a) = \sum_{n=1}^N u(a(x_n)) \pi_n \quad (3.24)$$

Στην περίπτωση που το  $a$  είναι συνεχής τυχαία μεταβλητή με συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας  $f(a)$ , η συνάρτηση χρησιμότητας  $U$  ορίζεται ως:

$$U(a) = \int u(a)f(a)da$$

Ένα παράδειγμα προερχόμενο από τη γεωργική παραγωγή αποτελεί η επιλογή μεταξύ δυο καλλιεργειών  $A$  και  $B$ , η οποία εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες  $x_n$  που αναμένεται να εμφανιστούν με πιθανότητα  $\pi_n$ . Τα ενδεχόμενα  $x_n$  εκφράζουν διαφορετικές καταστάσεις φύσης (states of nature) και συνεπώς το τελικό ακαθάριστο

κέρδος των καλλιεργειών,  $a_i(x_n)$ , με  $i = A, B$ , λογίζεται ως τυχαία μεταβλητή. Αν ο παραγωγός ιεραρχεί τις προτιμήσεις του σύμφωνα με τη συνάρτηση χρησιμότητας  $u(a_i(x_n))$ , τότε η τελική επιλογή θα αφορά στην καλλιέργεια με την υψηλότερη προσδοκώμενη χρησιμότητα,  $E[u(a_i)]$ .

Να σημειωθεί πως η συνάρτηση  $U(a)$  μπορεί να οριστεί μέχρι έναν γραμμικό μετασχηματισμό της  $u(a)$ , έστω  $v(a) = b_1 + b_2u(a)$ . Έτσι, αν ισχύει πως  $E[u(a_1)] > E[u(a_2)]$ , τότε  $b_1 + b_2E[u(a_1)] > b_1 + b_2E[u(a_2)]$ , και συνεπώς  $E[v(a_1)] > E[v(a_2)]$ . Αυτό σημαίνει πως οι  $u$  και  $v$  αντιπροσωπεύουν τις ίδιες προτιμήσεις απέναντι στον κίνδυνο (Chavas, 2004). Οι συναρτήσεις  $u$  με την παραπάνω ιδιότητα, δηλαδή εκείνες όπου η προσδοκώμενη τιμή παράγει την ίδια ιεράρχηση προτιμήσεων μετά από ένα γραμμικό μετασχηματισμό τους, ονομάζονται συναρτήσεις von Neumann – Morgenstern προς τιμήν των θεμελιωτών της θεωρίας. Επίσης, στα περισσότερα εγχειρίδια, οι  $u$  και  $U$  ορίζονται συνήθως ως συνάρτηση του τελικού πλούτου,  $W$ , ο οποίος ισούται με  $W = \omega + a$ , όπου  $\omega$  ο αρχικός πλούτος του ατόμου. Σύμφωνα με τη διατύπωση αυτή, το  $\omega$  αποτελεί το σταθερό και το  $a$  το στοχαστικό μέρος του τελικού πλούτου. Στα πλαίσια της αναθεωρημένης ΚΑΠ, μπορεί να θεωρηθεί πως το  $\omega$  αντιστοιχεί στην ενιαία ενίσχυση που λαμβάνουν οι παραγωγοί και άρα συνιστά μια μη στοχαστική πρόσοδο.

Η E-U κατέχει κυρίαρχη θέση σε αναλύσεις που σχετίζονται με τη λήψη επιχειρησιακών αποφάσεων υπό συνθήκες αβεβαιότητας, ενώ ταυτόχρονα αποτελεί τη βάση της θεωρίας παιγνίων που αποτελεί πλέον ένα θεμελιωμένο και ταχέως αναπτυσσόμενο κλάδο της οικονομικής επιστήμης (Βαρουφάκης, 2007). Αυτό οφείλεται στην απλότητα της σχέσης (3.24), η οποία απαιτεί την εκτίμηση μιας κατανομής πιθανότητας για τις τυχαίες μεταβλητές που αποτελούν την πηγή της αβεβαιότητας και την εξειδίκευση μιας συνάρτησης χρησιμότητας με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Στην πράξη όμως η εκτίμηση μιας διακριτής ή συνεχούς κατανομής πιθανότητας για μια τυχαία μεταβλητή που αντιπροσωπεύει αβέβαια ενδεχόμενα δεν είναι καθόλου εύκολη υπόθεση, αφού η εκτίμηση αυτής της αβεβαιότητας είναι υποκειμενική και διαφέρει μεταξύ των ατόμων, κάτι που οδηγεί σε διαφορετικό τρόπο συμπεριφοράς έναντι του οικονομικού κινδύνου (Chavas, 2004). Στην περίπτωση μιας μοναδικής τυχαίας μεταβλητής, το πρόβλημα της υποκειμενικότητας μπορεί να ξεπεραστεί με τη χρήση θεωρητικών κατανομών, όπως είναι για παράδειγμα η κανονική ή η ομοιόμορφη κατανομή. Ωστόσο, η αξιοπιστία οποιασδήποτε θεωρητικής κατανομής δύσκολα μπορεί να ελεγχθεί στατιστικά, ενώ ειδικά στην περίπτωση της γεωργίας, οι Ramirez *et al.* (2003) απορρίπτουν την υπόθεση της κανονικότητας των αποδόσεων των καλλιεργειών. Επίσης, όταν η αβεβαιότητα αφορά σε περισσότερες από μια τυχαίες μεταβλητές, η εκτίμηση και χρήση πολυμεταβλητών από κοινού κατανομών πιθανότητας αποτελεί μια ιδιαίτερα δύσκολη υπό-

θεση, γι' αυτό και οι εφαρμογές περιορίζονται στη πολυμεταβλητή κανονική κατανομή (Hardaker *et al.*, 2004).

Αναφορικά με την κατάλληλη συνάρτηση χρησιμότητας, η τελική επιλογή εξαρτάται από τον αναλυτή, αφού κάθε συνάρτηση που αντιπροσωπεύει συμπεριφορά αποστροφής κινδύνου οφείλει να έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Ειδικότερα, η  $u$  πρέπει να είναι κοίλη, δηλαδή  $u'(W) > 0$  και  $u''(W) < 0$ , κάτι που μεταφράζεται σε μειούμενη οριακή χρησιμότητα του πλούτου. Ένα μέτρο της κοιλότητας της  $u$  είναι ο «συντελεστής απόλυτης αποστροφής κινδύνου» (absolute risk aversion) που ορίστηκε από τον Pratt (1964) ως<sup>17</sup>:

$$\varphi(W) = -\frac{u''(W)}{u'(W)} \quad (3.25)$$

Μια άλλη επιθυμητή ιδιότητα της  $u$  είναι ο μειούμενος συντελεστής απόλυτης αποστροφής κινδύνου (Decreasing Absolute Risk Aversion – DARA), δηλαδή  $d\varphi/dW < 0$ . Προτιμήσεις DARA υποδηλώνουν πως ένα άτομο αυξάνει τη ροπή του προς τον οικονομικό κίνδυνο, όσο μειώνεται η στοχαστική απόδοση ενός τυχερού παιγνίου σε σχέση με τον αρχικό του πλούτο. Ένα άλλο μέτρο του βαθμού αποστροφής κινδύνου, που ονομάζεται «συντελεστής σχετικής αποστροφής κινδύνου» (relative risk aversion),  $\varphi_r$ , υπολογίζεται από την ελαστικότητα της οριακής χρησιμότητας του πλούτου:

$$\varphi_r(W) = -\frac{du'(W)/u'(W)}{dW/W} = -W \frac{u''(W)}{u'(W)} \quad (3.26)$$

Από τις εξισώσεις (3.25) και (3.26) γίνεται φανερό πως ισχύει  $\varphi_r = \varphi W$ . Το  $\varphi_r$  δεν λαμβάνει υπόψη τη μονάδα μέτρησης του πλούτου, αφού αποτελεί ένα μέτρο ελαστικότητας. Ο ορισμός (3.26) έχει προκαλέσει διχογνωμία μεταξύ των ερευνητών για το αν μια συμπεριφορά αποστροφής κινδύνου υποδηλώνει σταθερό, μειούμενο ή αυξανόμενο  $\varphi_r$ . Για παράδειγμα, όπως εξηγούν οι Eeckhoudt *et al.* (2005), προτιμήσεις DARA παράγουν δυο αντίθετα μεταξύ τους αποτελέσματα, δηλαδή μια μείωση του  $\varphi_r$  (λόγω μείωσης της τιμής του  $\varphi$ ) και ταυτόχρονα μια αύξηση του (λόγω αύξησης του  $W$ ). Η τελική τιμή του  $\varphi_r$  προφανώς εξαρτάται από τη σχετική ισχύ των δυο αυτών αποτελεσμάτων, η οποία όμως μπορεί να μην είναι σταθερή σε όλο το πεδίο ορισμού της  $u$ . Να σημειωθεί ωστόσο πως οι Hardaker *et al.* (2004) θεωρούν μια τιμή  $\varphi_r = 1$  ως τυπική για συμπεριφορά αποστροφής έναντι του κινδύνου.

<sup>17</sup> Όπως θα δειχτεί παρακάτω, η εξίσωση (3.25) ορίζεται σε μια γειννίαση της προσδοκώμενης τιμής του τελικού πλούτου,  $E[W]$  και συνεπώς αποτελεί στην πραγματικότητα μια τοπική ιδιότητα της συνάρτησης χρησιμότητας.

Ένα τρίτο μέτρο αποστροφής κινδύνου αποτελεί το «ασφάλιστρο κινδύνου» (risk premium),  $R$ , το οποίο ορίζεται ως το βέβαιο χρηματικό ποσό που είναι διατεθειμένο να δεχτεί ένα άτομο προκειμένου να καταστεί αδιάφορο μεταξύ ενός στοχαστικού οφέλους  $a$  και ενός βέβαιου οφέλους  $E[a] - R$ . Αυτό μπορεί να γραφτεί σε όρους προτιμήσεων ως:

$$\{\omega + a\} \sim \{\omega + E[a] - R\} \quad (3.27)$$

Το άθροισμα  $\omega + E[a] - R$  στο δεξί μέρος της εξίσωσης (3.27) ονομάζεται βέβαιο ισοδύναμο (Certainty Equivalent - CE) του  $W$ , δηλαδή το βέβαιο χρηματικό ποσό με το οποίο ένα άτομο θα ήταν διατεθειμένο να ανταλλάξει τον στοχαστικό πλούτο  $W = \omega + a$ . Αυτό μεταφράζεται μαθηματικά ως:

$$E[u(\omega + a)] = u(\omega + E[a] - R) \quad (3.28)$$

Εφόσον έχει απαιτηθεί η συνάρτηση  $u$  να είναι γνησίως αύξουσα ( $u'(W) > 0$ ), ορίζεται η συνάρτηση  $u^{-1}$  με αποτέλεσμα η (3.28) να μπορεί να γραφτεί ως:

$$R = \omega + E[a] - u^{-1}(E[u(\omega + a)]) \quad (3.29)$$

Από την (3.29) προκύπτει πως το ασφάλιστρο κινδύνου αποτελεί γενικά μια συνάρτηση του αρχικού πλούτου,  $\omega$ , και της κατανομής πιθανότητας του  $a$ , η οποία δίνεται από την προσδοκώμενη τιμή  $E[a]$  (Chavas, 2004). Με βάση τα παραπάνω, μια αρνητική πρώτη παράγωγος  $dR/d\omega < 0$  υποδηλώνει προτιμήσεις DARA, κάτι το οποίο μεταφράζεται σε μείωση της προθυμίας για ασφάλιση όσο αυξάνεται το σταθερό μέρος του πλούτου ενός ατόμου.

Για λόγους πληρότητας της παρουσίασης είναι αναγκαία μια παρένθεση για την απόδειξη της εξίσωσης (3.25), όπως αυτή δόθηκε από τον Pratt (1964), και η οποία επιτρέπει τη διερεύνηση της σχέσης μεταξύ του απόλυτου συντελεστή αποστροφής κινδύνου,  $\varphi$ , και του ασφαλίστρου κινδύνου,  $R$ . Ξεκινώντας από τον ορισμό του ασφαλίστρου κινδύνου ως το χρηματικό ποσό που ικανοποιεί την εξίσωση (3.28), η συνάρτηση χρησιμότητας  $u(\omega + a)$  μπορεί να προσεγγιστεί με ένα πολυώνυμο Taylor δευτέρου βαθμού σε μια γειτνίαση του  $\omega + E[a] = \mu$ :

$$\begin{aligned} u(\omega + a) &\approx u(\mu) + u'(\mu)(\omega + a - \mu) + \frac{u''(\mu)}{2}(\omega + a - \mu)^2 \\ &= u(\mu) + u'(\mu)(\omega + a - \omega - E[a]) + \frac{u''(\mu)}{2}(\omega + a - \omega - E[a])^2 \end{aligned}$$

$$= u(\mu) + u'(\mu)(a - E[a]) + \frac{u''(\mu)}{2}(a - E[a])^2$$

Η προσδοκώμενη τιμή της παραπάνω μορφής της συνάρτησης χρησιμότητας ισούται με

$$\begin{aligned} E[u(\omega + a)] &\approx E[u(\mu)] + u'(\mu)E(a - E[a]) + \frac{u''(\mu)}{2}E(a - E[a])^2 \\ &= u(\mu) + \frac{u''(\mu)}{2}Var(W) \end{aligned} \quad (3.30)$$

Στην παραπάνω εξίσωση  $E[u(\mu)] = u(\mu)$ , αφού το  $u(\mu)$  είναι ένας σταθερός αριθμός και εκφράζει τη χρησιμότητα για  $W = \mu$ . Επίσης, ο όρος  $E(a - E[a])$  ισούται με μηδέν, αφού  $E(a - E[a]) = E[a] - E[a] = 0$ . Τέλος, η διακύμανση του τελικού πλούτου ισούται με  $Var(W) = E(W - E[W])^2 = E(a - E[a])^2$ , δηλαδή η διακύμανση του πλούτου ισούται με τη διακύμανση του στοχαστικού μέρους του πλούτου. Στη συνέχεια ο Pratt (1964) προσέγγισε το δεξί μέρος της εξίσωσης (3.28), δηλαδή το  $u(\omega + E[a] - R)$ , με ένα πολυώνυμο πρώτου βαθμού, πάλι σε μια γειτνίαση του  $\omega + E[a] = \mu$ :

$$\begin{aligned} u(\omega + E[a] - R) &\approx u(\mu) + u'(\mu)(\omega + E[a] - R - \mu) \\ &= u(\mu) + u'(\mu)(\omega + E[a] - R - \omega - E[a]) \\ &= u(\mu) - Ru'(\mu) \end{aligned} \quad (3.31)$$

Αντικαθιστώντας τις (3.30) και (3.31) στην εξίσωση (3.28) προκύπτει πως

$$u(\mu) + \frac{u''(\mu)}{2}Var(W) = u(\mu) - Ru'(\mu)$$

Και λύνοντας ως προς  $R$ :

$$R = -\frac{1}{2} \frac{u''(\mu)}{u'(\mu)} Var(W) \quad (3.32)$$

Η εξίσωση (3.32) δείχνει πως το ασφάλιστρο κινδύνου είναι ανάλογο του λόγου  $-u''/u'$  (δηλαδή του συντελεστή απόλυτης αποστροφής κινδύνου) και της διακύμανσης του τελικού πλούτου όταν αυτός εκτιμάται στο σημείο  $W = \mu$ . Πρόκειται για την έκφραση «στα μικρά» (in the small) που χρησιμοποιεί ο Pratt (1964) για να χαρακτηρίσει το συντελεστή αποστροφής κινδύνου και το ασφάλιστρο κινδύνου όταν αυτά δεν λαμβάνουν την ίδια τιμή σε όλο το πεδίο ορισμού του τελικού πλούτου. Ο όρος «στα μικρά» αναφέρεται συνεπώς σε τοπικές και όχι γενικές (ολικές) τιμές των  $\varphi$  και  $R$ , κάτι που είναι εμφανές και από τη εξίσωση (3.32), η οποία εξαρτάται από τις τιμές των  $u'$  και  $u''$  σε μια γειτνίαση της προσδοκώμενης τιμής του τελικού πλούτου. Να σημειωθεί πως για



κάποιες συναρτήσεις χρησιμότητας, οι τιμές των  $\varphi$  και  $R$  παραμένουν σταθερές σε όλο το πεδίο ορισμού του τελικού πλούτου και συνεπώς πρόκειται για ολικές τιμές, ή αλλιώς «στα μεγάλα» (in the large). Οι προτιμήσεις που προκύπτουν από ανάλογες συναρτήσεις έχει καθιερωθεί να ονομάζονται «σταθερού συντελεστή απόλυτης αποστροφής κινδύνου» (Constant Absolute Risk Aversion – CARA). Μια τέτοια συνάρτηση είναι η αρνητική εκθετική συνάρτηση χρησιμότητας (negative exponential), η οποία, όπως θα δειχτεί στη συνέχεια, χρησιμοποιείται ευρύτατα για την ανάλυση του οικονομικού κινδύνου σε υποδείγματα ΜΠ στο γεωργικό τομέα.

Παρά τη γενική αποδοχή της θεωρίας E-U, πολλοί ερευνητές αμφισβητούν την ικανότητα της να αντιπροσωπεύει τη συμπεριφορά ενός ατόμου έναντι του κινδύνου, καθώς αποδεικνύουν πως συχνά παραβιάζονται τα αξιώματα στα οποία στηρίζεται. Για παράδειγμα, το σημαντικότερο από τα αξιώματα που παρουσιάστηκαν προηγουμένως θεωρείται εκείνο της ανεξαρτησίας, στο οποίο βασίζεται και η γραμμικότητα της συνάρτησης  $u$  ως προς τις πιθανότητες. Ωστόσο ο Allais (1954) αποδεικνύει, μέσω ενός πειράματος που ονομάστηκε «παράδοξο Allais», πως οι υποθέσεις της E-U δεν οδηγούν σε συνεπείς επιλογές, γεγονός που οφείλεται στην μη γραμμικότητα της  $u$  ως προς τις πιθανότητες. Παρόμοια εργαστηριακά πειράματα από διάφορους ερευνητές (π.χ. Just & Peterson, 2010; Rabin, 2000) έχουν δείξει πως, υπό συγκεκριμένες συνθήκες, η πραγματική συμπεριφορά του ατόμου έναντι του κινδύνου αποκλίνει από τις επιταγές της θεωρίας E-U. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη διαφόρων θεωριών, εναλλακτικών της E-U, όπως η «θεωρία προοπτικής» (prospect theory) των Kahneman και Tversky (1979) και η «θεωρία μη προσδοκώμενης χρησιμότητας» (non-expected utility theory) (Machina, 2004).

Παρά το προφανές ενδιαφέρον που παρουσιάζουν οι παραπάνω εναλλακτικές θεωρίες, η περαιτέρω συζήτηση τους είναι έξω από τους σκοπούς του παρόντος κεφαλαίου όπου επιδιώκεται η παρουσίαση των βασικών χαρακτηριστικών της θεωρίας E-U στην οποία στηρίζεται το εναλλακτικό υπόδειγμα ΘΜΠ που θα αναλυθεί στη συνέχεια. Σε κάθε περίπτωση, εξαιτίας της κριτικής που έχει δεχτεί, η E-U χρησιμοποιείται όχι ως ένα «θετικό» εργαλείο πρόβλεψης της συμπεριφοράς του ατόμου έναντι του κινδύνου, αλλά ως ένα υπόδειγμα «κανονιστικής» συμπεριφοράς, δηλαδή επιδιώκει την εύρεση της βέλτιστης απόφασης υπό συνθήκες αβεβαιότητας (Binmore, 2009; Βαρουφάκης, 2007), όπως αντίστοιχα πράττει και ο ΓΠ υπό συνθήκες βεβαιότητας.

### **3.5.3 Το κριτήριο E-V στην ανάλυση του οικονομικού κινδύνου**

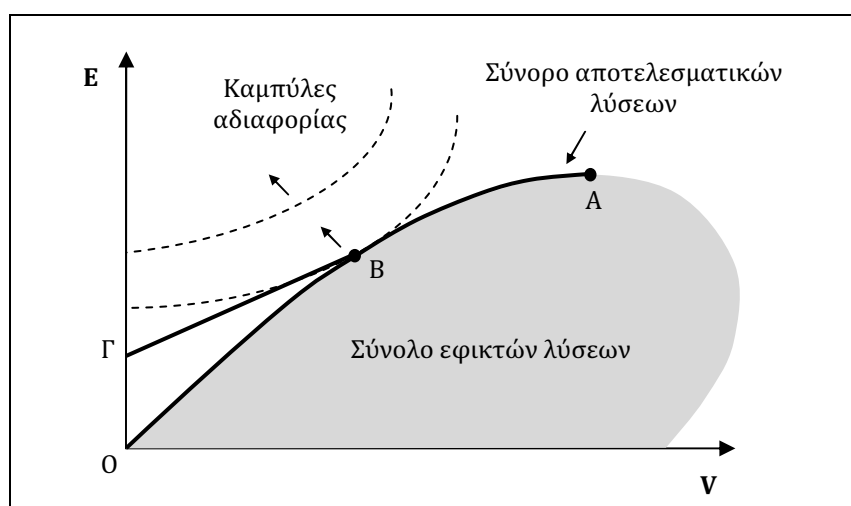
Μια εξίσου συνηθισμένη μέθοδος οικονομικής ανάλυσης υπό συνθήκες αβεβαιότητας και κινδύνου είναι η «ανάλυση αναμενόμενης απόδοσης – διακύμανσης» (mean-variance analysis – E-V) που στηρίζεται στη θεωρία χαρτοφυλακίου (portfolio theory)

του Markowitz (1952) και έχει χρησιμοποιηθεί εκτεταμένα σε χρηματοοικονομικές αναλύσεις. Το κριτήριο<sup>18</sup> E-V υποθέτει πως η επιλογή χαρτοφυλακίου (καλλιεργειών) ενός παραγωγού εξαρτάται από την απόδοση (αναμενόμενο κέρδος) εναλλακτικών παραγωγικών σχεδίων και από τη διακύμανση τους, η οποία ερμηνεύεται ως ένα μέτρο του κινδύνου που αντιμετωπίζει ο παραγωγός. Συγκεκριμένα, η επιλογή χαρτοφυλακίου αφορά σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης που επιδιώκει την εύρεση του σχεδίου παραγωγής με την ελάχιστη διακύμανση ( $Var$ ) για δεδομένο επίπεδο αναμενόμενης απόδοσης  $E$  και διατυπώνεται ως:

$$\min_{\mathbf{x} \geq 0} Var = \mathbf{x}^T \mathbf{V} \mathbf{x}$$

Υπό περιορισμούς  $\mathbf{A} \mathbf{x} \leq \mathbf{b}$  και  $\mathbf{g}^T \mathbf{x} = E$

όπου  $\mathbf{V}$  ο συμμετρικός  $I \times I$  πίνακας διακύμανσης-συνδιακύμανσης των αναμενόμενων κερδών κάθε δραστηριότητας,  $\mathbf{g}$  και  $\mathbf{x}$  τα διανύσματα ( $I \times I$ ) των μέσων κερδών και του επιπέδου παραγωγής κάθε δραστηριότητας αντίστοιχα, ενώ το  $E$  συμβολίζει το αναμενόμενο επίπεδο απόδοσης (συνολικού κέρδους) που πρέπει να επιτυγχάνει το χαρτοφυλάκιο (σχέδιο παραγωγής) που θα επιλεγεί. Με παραμετρική επίλυση του παραπάνω προβλήματος ως προς  $E$  είναι δυνατή η αναγνώριση των αποτελεσματικότερων (βέλτιστων) κατά Pareto χαρτοφυλακίων σε όρους απόδοσης/κινδύνου τα οποία μπορούν να παρασταθούν σχηματικά σε ένα γράφημα «αναμενόμενη απόδοση – διακύμανση» (E-V) σχηματίζοντας την κοίλη καμπύλη AO (σχήμα 3.1).



**Σχήμα 3.1: Το σύνορο των αποτελεσματικών λύσεων και το άριστο σχέδιο παραγωγής (Πηγή: Hazell & Norton, 1986)**

<sup>18</sup> Αν και ετυμολογικά οι έννοιες «ανάλυση», «κριτήριο» και «μέθοδος» διαφέρουν, για τις ανάγκες της παρούσας διατριβής, θεωρούνται ταυτόσημες και χρησιμοποιούνται εναλλακτικά η μία της άλλης.

Η θέση και το σχήμα της καμπύλης ΑΟ προσδιορίζεται από τα δεδομένα με βάση τα οποία υπολογίστηκαν οι αναμενόμενες αποδόσεις και από τις τιμές των διακυμάνσεων-συνδιακυμάνσεων των αποδόσεων αυτών. Η βέλτιστη θέση που θα επιλέξει ο κάθε παραγωγός πάνω στην καμπύλη αποτελεσματικών χαρτοφυλακίων (σημείο Β στο σχήμα 3.1) εξαρτάται από τη συνάρτηση χρησιμότητας του (καμπύλες αδιαφορίας). Έτσι ακόμα και αν δύο παραγωγοί έχουν ταυτόσημες προσδοκίες και δυνατότητες (δηλαδή την ίδια καμπύλη E-V), διαφοροποίηση της στάσης ως προς τον κίνδυνο (υποκειμενικός παράγων) θα τους οδηγήσει σε διαφορετικές επιλογές.

Αν μεταξύ των επιλογών υπάρχει κάποια που παρουσιάζει μηδενικό κίνδυνο (συνήθως μια τέτοια επιλογή δίνει χαμηλή απόδοση π.χ. ομόλογα δημοσίου) τότε η γραμμή που ξεκινά από το σημείο της απόδοσης της επιλογής αυτής (Γ πάνω στον κάθετο άξονα), και εφάπτεται στην καμπύλη, μετατοπίζει το σύνορο των αποτελεσματικών λύσεων. Τα χαρτοφυλάκια που βρίσκονται πάνω στο ευθύγραμμο τμήμα ΓΒ (περιλαμβάνουν το χαρτοφυλάκιο του σημείου Β και κάποιο ποσοστό της επιλογής με μηδενικό κίνδυνο, ποσοστό που αυξάνεται όσο πλησιάζουμε στον κάθετο άξονα) είναι προτιμότερα από τα αντίστοιχα σημεία της καμπύλης ΟΒ διότι για καθένα από τα τελευταία υπάρχει ένα σημείο της ΓΒ που δίνει μεγαλύτερη απόδοση για τον ίδιο κίνδυνο. Στη γεωργία, τυπική επιλογή με μηδενικό κίνδυνο είναι η ενοικίαση γης (Blank, 2001). Αν λειτουργεί ανάλογη αγορά, το ενοίκιο γης δίνει την απόδοση απαλλαγμένη κινδύνου. Επομένως κάποιοι παραγωγοί θα ενοικιάσουν μέρος της γης τους, καλλιεργώντας την υπόλοιπη σύμφωνα με το χαρτοφυλάκιο (παραγωγικό σχέδιο) Β. Για αυτούς τους παραγωγούς ισχύει το θεώρημα του διαχωρισμού του Tobin (1958) που αποδεικνύει ότι το χαρτοφυλάκιο που επιλέγουν είναι ανεξάρτητο της καμπύλης προτίμησης τους (καθορίζεται από το ύψος απόδοσης της επιλογής με μηδενικό κίνδυνο και από τη θέση της καμπύλης E-V), ενώ οι υπόλοιποι θα χρησιμοποιήσουν το σύνολο της καλλιεργήσιμης γης επιλέγοντας ένα χαρτοφυλάκιο που βρίσκεται στο τμήμα της καμπύλης ΒΑ, ανάλογα με τις προτιμήσεις τους στον κίνδυνο.

Παράγωγος του κριτηρίου E-V είναι η «ανάλυση αναμενόμενης απόδοσης – τυπικής απόκλισης» (mean-standard deviation analysis – E-σ), η οποία προτάθηκε επίσης από τον Markowitz (1952) ως εναλλακτική της E-V και εφαρμόστηκε πρώτη φορά από τον Tobin (1958) στα πλαίσια της εργασίας του για τη μελέτη της ρευστότητας ως επενδυτική επιλογή που περιορίζει τον οικονομικό κίνδυνο. Το κριτήριο E-σ χρησιμοποιεί την τυπική απόκλιση,  $\sigma$ , ως μέτρο του κινδύνου που αντιμετωπίζει ο παραγωγός και αναμενόμενα παράγει το ίδιο σύνορο αποτελεσματικών λύσεων με τη μέθοδο E-V, αφού η τυπική απόκλιση δεν είναι παρά η τετραγωνική ρίζα της διακύμανσης που χρησιμοποιεί το τελευταίο. Αργότερα ο Baumol (1963) παρουσίασε μια παραλλαγή του κριτηρίου E-σ το οποίο ονόμασε «αναμενόμενο κέρδος – όριο εμπιστοσύνης» (expected gain-

confidence limit – E-L) και στηρίζεται στη μεγιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης  $L = E - \varphi_L \sigma$ , υπό τους συνήθεις περιορισμούς  $\mathbf{Ax} \leq \mathbf{b}$ . Το  $\varphi_L$  είναι μια παράμετρος αποστροφής κινδύνου, ανάλογη του  $\varphi$  που ορίστηκε στην εξίσωση (3.25). Η ιδιαιτερότητα του κριτηρίου E-L συνίσταται στον τρόπο ερμηνείας της αντικειμενικής συνάρτησης όταν τα κέρδη κάθε δραστηριότητας κατανέμονται κανονικά. Στην περίπτωση αυτή, το  $\varphi_L$  αντιπροσωπεύει τον αριθμό των τυπικών αποκλίσεων γύρω από τον μέσο της κατανομής, ενώ η εξίσωση  $L = E - \varphi_L \sigma$  ερμηνεύεται ως το μονόπλευρο  $a\%$  τμήμα της κατανομής που αντιστοιχεί σε επίπεδο κέρδους που επιτυγχάνεται με πιθανότητα  $(1 - a)\%$ .

Ο Freund (1956) παρουσίασε ένα διαφορετικό γραμμικό υπόδειγμα E-V, το οποίο βασίζεται στη μεγιστοποίηση της E-U ενός παραγωγού, υπό τους συνήθεις γραμμικούς περιορισμούς της μορφής  $\mathbf{Ax} \leq \mathbf{b}$  και τους περιορισμούς μη αρνητικότητας. Η προσέγγιση του βασίζεται στην υπόθεση πως τα ακαθάριστα κέρδη κάθε καλλιέργειας,  $g_i$  (με  $i \in I$ ), ακολουθούν κανονική κατανομή με μέσο  $\bar{g}_i$  και διακύμανση  $\sigma_i^2$  και πως επιπλέον οι προτιμήσεις του παραγωγού μπορούν να αναπαρασταθούν από μια αρνητική εκθετική συνάρτηση χρησιμότητας της μορφής:

$$u(W) = -e^{-\varphi W} \quad (3.33)$$

Όπου  $\varphi$  ένας σταθερός συντελεστής απόλυτης αποστροφής κινδύνου. Το συνολικό ακαθάριστο κέρδος (ή συνολικός τελικός πλούτος),  $W$ , κατανέμεται επίσης κανονικά με μέσο  $\mu = \bar{\mathbf{g}}^T \mathbf{x}$  και διακύμανση  $\sigma^2 = \mathbf{x}^T \mathbf{V} \mathbf{x}$ . Η προσδοκώμενη χρησιμότητα του παραγωγού μπορεί συνεπώς να υπολογιστεί ως:

$$E[u(W)] = \int_{-\infty}^{+\infty} -e^{-\varphi W} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-(W-\mu)^2/\sigma^2} dW$$

Η επίλυση του παραπάνω ολοκληρώματος οδηγεί τελικά στην ακόλουθη συνάρτηση προσδοκώμενης χρησιμότητας (βλέπε Silberberg & Suen, 2001, σελ. 407-408):

$$E[u] = -e^{-\varphi(\mu - 0.5\varphi\sigma^2)} \quad (3.34)$$

Αποδεικνύεται πως η μεγιστοποίηση της (3.34) ισοδυναμεί με τη μεγιστοποίηση της μη στοχαστικής συνάρτησης  $T = \mu - 0.5\varphi\sigma^2$  υπό τους συνήθεις γραμμικούς περιορισμούς. Έτσι, το τελικό πρόβλημα διατυπώνεται ως

$$\max_{\mathbf{x} \geq 0} T = \bar{\mathbf{g}}^T \mathbf{x} - \frac{1}{2} \varphi \mathbf{x}^T \mathbf{V} \mathbf{x} \quad (3.35)$$

$$\text{Υπό περιορισμούς} \quad \mathbf{A} \mathbf{x} \leq \mathbf{b} \quad [\boldsymbol{\theta}]$$

Υποδείγματα E-V και E-σ που είτε ακολουθούν τη μέθοδο του Markowitz για την παραγωγή του συνόρου αποτελεσματικών λύσεων, είτε χρησιμοποιούν αντικειμενικές συναρτήσεις όπως του Freund και του Baumol έχουν χρησιμοποιηθεί εκτεταμένα σε ερευνητικές εργασίες στο αντικείμενο της γεωργικής οικονομικής και ειδικότερα στη διαχείριση γεωργικών εκμεταλλεύσεων. Ο λόγος είναι αφενός η ευκολία στη μαθηματική διατύπωση τους και αφετέρου η δυνατότητα συνεκτίμησης του κινδύνου και της αβεβαιότητας που προέρχεται από περισσότερες από μια τυχαίες μεταβλητές, καθώς τόσο το  $\bar{\mathbf{g}}$  όσο και ο πίνακας  $\mathbf{V}$  μπορούν εύκολα να υπολογιστούν από οποιαδήποτε εμπειρική κατανομή (ή χρονολογική σειρά) τιμών και αποδόσεων καλλιεργειών. Τυπικές εφαρμογές αφορούν στον προσδιορισμό του άριστου παραγωγικού σχεδίου, όπως για παράδειγμα την κατανομή της καλλιεργήσιμης γης σε αροτραίες καλλιέργειες (Brink & McCarl, 1978) ή στην υποβοήθηση επιλογής κατάλληλων σιτηρεσιών για την ικανοποίηση των θρεπτικών αναγκών των ζώων (Tores-Rojo, 2001). Πιο πρόσφατα, και στα πλαίσια της ενδιάμεσης αναθεώρησης της ΚΑΠ, γραμμικά υποδείγματα E-V χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη της αντίδρασης των παραγωγών στον τομέα των σιτηρών στην Αγγλία και την Ιρλανδία (Roche & McQuinn, 2004) και στην καλλιέργεια του βαμβακιού στη Θεσσαλία (Petsakos *et al.*, 2009). Σε βιο-οικονομικές αναλύσεις, αντικειμενικές συναρτήσεις όπως αυτή του Baumol έχουν χρησιμοποιηθεί από τους Semaan *et al.* (2007) στη μελέτη της αποτελεσματικότητας μέτρων πολιτικής για τη μείωση της νιτρορύπανσης στην Απουλία της Ιταλίας και από τους Louhichi *et al.* (2010) σε ένα παράδειγμα εφαρμογής του βιο-οικονομικού υποδείγματος FSSIM.

### 3.5.4 Συμβατότητα E-V και E-U

Η ευρύτετη χρήση του κριτηρίου E-V (και E-σ) σε οικονομικές αναλύσεις που λαμβάνουν υπόψη την αβεβαιότητα και τον κίνδυνο, αποτέλεσε την αιτία για μια μεγάλη συζήτηση στη σχετική βιβλιογραφία για το αν και υπό ποιες συνθήκες υποδείγματα E-V μπορούν να δώσουν εφικτές λύσεις που είναι συνεπείς με την υπόθεση μεγιστοποίησης της E-U. Βασική προϋπόθεση για να ισχύει αυτό είναι η δυνατότητα ορισμού μιας συνάρτησης προσδοκώμενης χρησιμότητας στον χώρο E-V (ή E-σ) που να εξαρτάται από τις ροπές πρώτης και δεύτερης τάξης της εμπειρικής κατανομής του πλούτου, δηλαδή  $E[u] = W(m_1, m_2)$ , όπου  $m_1 = E[W] = \mu$  και  $m_2 = Var(W) = \sigma^2$ . Ωστόσο, ο Borch (1969) αποδεικνύει πως η ύπαρξη μιας καμπύλης αδιαφορίας στον χώρο E-V (ή E-σ) εξασφαλίζεται μόνο με την υπόθεση της κανονικής κατανομής των τυχαίων μεταβλητών (αποδόσεων), ενώ ο Feldstein (1969) δείχνει πως μια αναγκαία, αλλά όχι απαραί-

τητα ικανή, συνθήκη για μια κοίλη καμπύλη αδιαφορίας (η οποία υποδηλώνει αποστροφή κινδύνου) είναι μια συνάρτηση χρησιμότητας τετραγωνικής μορφής.

Η παραπάνω συζήτηση είχε ως αποτέλεσμα ο Tobin (1969) να παραδεχτεί πως η μέθοδος E-σ είναι συνεπής με τη μεγιστοποίηση της E-U μόνο στην περίπτωση μιας τετραγωνικής συνάρτησης χρησιμότητας ή/και στην περίπτωση που ο τελικός πλούτος (δηλαδή τα πιθανά χαρτοφυλάκια) κατανέμεται κανονικά. Όπως θα αποδειχτεί στις επόμενες παραγράφους, οι υποθέσεις αυτές είναι πολύ ισχυρές και ταυτόχρονα προβληματικές, λόγω των περιορισμών που επιβάλλουν στον τρόπο αναπαράστασης της συμπεριφοράς του ατόμου απέναντι στον κίνδυνο. Πιο συγκεκριμένα, για μια τετραγωνική συνάρτηση χρησιμότητας της μορφής  $u(W) = b_0 + b_1W + b_2W^2$ , η E-U υπολογίζεται ως:

$$\begin{aligned} E[u(\omega)] &= E[b_0] + E[b_1W] + E[b_2W^2] \\ &= b_0 + b_1E[W] + b_2E[W^2] \\ &= b_0 + b_1E[W] + b_2E[W^2] + b_2(E[W])^2 - b_2(E[W])^2 \\ &= b_0 + b_1E[W] + b_2[E[W^2] - (E[W])^2] + b_2(E[W])^2 \\ &= b_0 + b_1E[W] + b_2Var(W) + b_2(E[W])^2 \end{aligned}$$

Οι παραπάνω εξισώσεις αποδεικνύουν πως η προσδοκώμενη τιμή μιας τετραγωνικής συνάρτησης χρησιμότητας μπορεί πράγματι να γραφτεί ως μια αθροιστική (γραμμική) συνάρτηση της μέσης τιμής και της διακύμανσης της εμπειρικής κατανομής της τυχαίας μεταβλητής. Ωστόσο, η τετραγωνική συνάρτηση έχει την ανεπιθύμητη ιδιότητα του αυξανόμενου συντελεστή απόλυτης αποστροφής κινδύνου (Increasing Absolute Risk Aversion - IARA). Ξεκινώντας από την εξίσωση (3.25), η πρώτη παράγωγος του  $\varphi$  ως προς  $W$  ισούται με:

$$\frac{d\varphi}{dW} = -\frac{u'''(W)}{u'(W)} + \left(\frac{u''(W)}{u'(W)}\right)^2$$

Για την τετραγωνική συνάρτηση ισχύει (εξ' ορισμού της  $u$ ) πως  $u' = b_1 + 2b_2W > 0$  και  $u'' = 2b_2 < 0$ , αλλά  $u''' = 0$ . Αυτό όμως συνεπάγεται πως  $d\varphi/dW > 0$  και άρα μια τετραγωνική συνάρτηση αντιπροσωπεύει προτιμήσεις IARA σε όλο το πεδίο ορισμού της. Αυξανόμενος συντελεστής απόλυτης αποστροφής κινδύνου σημαίνει πως ένα άτομο αυξάνει τη ροπή του προς τον οικονομικό κίνδυνο, όσο αυξάνεται η στοχαστική απόδοση ενός τυχερού παιγνίου σε σχέση με τον αρχικό του πλούτο,  $\omega$ . Προτιμήσεις IARA μεταφράζονται επίσης σε αύξηση της προθυμίας για ασφάλιση όσο αυξάνεται το  $\omega$ . Αυτό όμως δεν μπορεί να θεωρηθεί ρεαλιστικό, καθώς το  $\omega$  αφορά στο μέρος του

πλούτου που δεν ενέχει αβεβαιότητα και άρα δεν συνεπάγεται οικονομικό κίνδυνο (Pratt, 1964).

Στην περίπτωση της υπόθεσης περί κανονικής κατανομής των αποδόσεων των τυχαίων μεταβλητών (και συνεπώς του τελικού πλούτου), είναι αναγκαία μια συνάρτηση χρησιμότητας που να αντιπροσωπεύει προτιμήσεις CARA, όπως η εκθετική που χρησιμοποιεί ο Freund. Έτσι, η E-U γράφεται επίσης ως μια αθροιστική συνάρτηση της μέσης τιμής και της διακύμανσης της εμπειρικής κατανομής των τυχαίων μεταβλητών. Το βασικότερο μειονέκτημα της υπόθεσης κανονικότητας είναι φυσικά η περιορισμένη δυνατότητα ελέγχου της, ειδικά σε οικονομικές αναλύσεις στον γεωργικό τομέα, λόγω έλλειψης επαρκών στοιχείων. Για να δικαιολογήσουν την υπόθεση αυτή, οι Hazell και Norton (1986) επικαλούνται το κεντρικό οριακό θεώρημα υποστηρίζοντας πως εφόσον το (στοχαστικό) ακαθάριστο κέρδος κάθε δραστηριότητας,  $g_i$ , εξαρτάται από μεγάλο αριθμό ανεξάρτητων τυχαίων μεταβλητών, τότε η κατανομή του θα προσεγγίζει την κανονική. Ένα δεύτερο μειονέκτημα της μεθόδου του Freund προέρχεται από την εκθετική συνάρτηση χρησιμότητας, η οποία συνεπάγεται σταθερό συντελεστή απόλυτης αποστροφής στον κίνδυνο (CARA). Ειδικότερα, προτιμήσεις CARA υποδηλώνουν πως  $dR/d\omega = 0$ , δηλαδή ένα άτομο εμφανίζει την ίδια διάθεση για ασφάλιση, ή ισοδύναμα, τη ροπή προς ένα στοχαστικό όφελος, ανεξάρτητα από τον πλούτο του. Επιπλέον, η εκτίμηση του (σταθερού) συντελεστή απόλυτης αποστροφής του κινδύνου,  $\varphi$ , παρουσιάζει σημαντικές δυσκολίες και μπορεί να ενσωματώσει σημαντικό ποσοστό μεροληψίας, αφού συνήθως εξαρτάται από το πώς αντιλαμβάνεται ο αναλυτής τη συμπεριφορά του ατόμου έναντι του κινδύνου. Για παράδειγμα, η τιμή του  $\varphi$  στην εργασία του Freund έχει επιλεγθεί αυθαίρετα να είναι ίση με 1/1250.

Γενικές συνθήκες σύμφωνα με τις οποίες τα κριτήρια E-V και E-σ παράγουν λύσεις συνεπείς με τη μεγιστοποίηση της E-U παρουσιάστηκαν από τον Meyer (1987). Οι συνθήκες αυτές ορίζουν πως οι στοχαστικές αποδόσεις,  $a$ , όλων των υποψήφιων μετοχών (δραστηριοτήτων) που δύνανται να συνθέσουν ένα χαρτοφυλάκιο (καλλιεργητικό σχέδιο παραγωγής) πρέπει να ακολουθούν μια κατανομή της γενικής μορφής  $a = \mu + e\sigma$ , όπου  $\mu = E[a]$ ,  $e$  μια τυχαία μεταβλητή με  $E[e] = 0$  και  $\sigma$  ένα μέτρο τυπικής απόκλισης, συμμετρικό ως προς το μέσο  $\mu$  της κατανομής του  $a$  (mean preserving spread). Πρόκειται για τις λεγόμενες «συνθήκες τόπου και κλίμακας» (location and scale conditions) στις οποίες το  $\mu$  εκφράζει τον «τόπο» και το  $\sigma$  την «κλίμακα». Οι δυο αυτές παράμετροι ορίζουν μια οικογένεια κατανομών που διαφέρουν ως προς  $\mu$  και  $\sigma$  χωρίς να θέτουν περιορισμούς ως προς την αρχική κατανομή της τυχαίας μεταβλητής  $e$ . Εφόσον ισχύουν οι συνθήκες αυτές, είναι δυνατός ο ορισμός μιας συνάρτησης E-U στο χώρο E-V (ή E-σ), ενώ η κλίση των παραγόμενων καμπυλών αδιαφορίας αντικατοπτρίζει τη στάση του ατόμου έναντι του κινδύνου. Για παράδειγμα, κυρτές καμπύλες, όπως αυτές που απει-

κονίζονται στο σχήμα 3.1, υποδηλώνουν αποστροφή κινδύνου, αφού όσο αυξάνεται η διακύμανση (κίνδυνος), η αναμενόμενη απόδοση πρέπει να αυξάνεται με μεγαλύτερο ρυθμό έτσι ώστε οι επιλογές να παραμένουν στην ίδια καμπύλη αδιαφορίας. Ακολουθώντας τον ίδιο συλλογισμό, η κυρτότητα υποδηλώνει προτίμηση και η γραμμικότητα ουδετερότητα απέναντι στον κίνδυνο (Chavas, 2004).

Όταν κατέστη φανερό πως οι συνθήκες μεγιστοποίησης της E-U εξασθενούν τα θεωρητικά θεμέλια των κριτηρίων E-V και E-σ, η προσοχή στράφηκε στην προσπάθεια προσέγγισης των αποτελεσμάτων E-U και όχι στην ακριβή αναπαραγωγή τους. Πρώτος ο Tsiang (1972) έδειξε πως προσεγγίσεις της συνάρτησης χρησιμότητας του τελικού στοχαστικού πλούτου ενός ατόμου, μέσω ενός πολυώνυμου Taylor σε μια γειτνίαση της μέσης τιμής του τελικού πλούτου,  $\mu = \omega + E[\alpha]$ , μπορεί να δώσει αποτελέσματα που αποτελούν μια πολύ καλή προσέγγιση της μεγιστοποίησης της E-U, εφόσον το στοχαστικό μέρος του πλούτου είναι σχετικά μικρό<sup>19</sup>. Αναλυτικότερα, ένα πολυώνυμο Taylor γύρω από το  $\mu$  γράφεται ως:

$$u(W) = u(\mu) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{u^{(n)}(\mu)}{n!} (W - \mu)^n \quad (3.36)$$

Η προσδοκώμενη τιμή της (3.36) μπορεί να γραφτεί ως:

$$E[u(W)] = u(\mu) + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{u^{(n)}(\mu)}{n!} m_n \quad (3.37)$$

όπου  $m_n$  η  $n$ -οστή κεντρική ροπή της κατανομής του  $W$  (με  $m_2 = \sigma^2$ ). Αν η σειρά συγκλίνει αρκούντως γρήγορα, ώστε οι ροπές μεγαλύτερες από  $m_2$  να είναι αρκετά μικρές και να μπορούν να αγνοηθούν, τότε η εξίσωση (3.37) μπορεί να γραφτεί ως:

$$E[u(W)] = u(\mu) + \frac{u''(\mu)}{2} \sigma^2 \quad (3.38)$$

Οι Levy και Markowitz (1979) παρουσίασαν μια εναλλακτική οικογένεια προσεγγίσεων της E-U – των οποίων η (3.38) αποτελεί μια ειδική περίπτωση – και εξέτασαν τη σειρά προτίμησης 149 χαρτοφυλακίων με βάση την εμπειρική κατανομή των ετήσιων αποδόσεων τους για μια περίοδο 10 ετών και για τρεις διαφορετικές συναρτήσεις χρησιμότητας, την εκθετική, τη λογαριθμική και τη συνάρτηση δύναμης (power function). Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με εκείνα προερχόμενα από τη μεγιστοποίηση της E-U για το ίδιο πρόβλημα επιλογής χαρτοφυλακίου, βρήκαν πως η ιεράρχηση των προτιμήσεων μεταξύ των δυο μεθόδων παρουσίαζαν ισχυρή συσχέτιση, με συντελεστή που η τιμή του

<sup>19</sup> Πρόκειται και πάλι για την έκφραση «στα μικρά».



συχνά ξεπερνούσε το 0.995<sup>20</sup>. Το κυριότερο συμπέρασμα των Levy και Markowitz ήταν πως προσεγγίσεις της E-U με συναρτήσεις που περιέχουν όρους προσδοκώμενων αποδόσεων και διακύμανσης, προερχόμενοι από την εμπειρική κατανομή μιας τυχαίας μεταβλητής, προσφέρουν μια πρακτική λύση στα προβλήματα που εμφανίζονται κατά την επιχειρησιακή εφαρμογή του κριτηρίου, δηλαδή στην επιλογή μιας συνάρτησης χρησιμότητας και στην εκτίμηση της κατάλληλης κατανομής πιθανότητας για την περιγραφή της αβεβαιότητας.

Οι Kroll *et al.* (1984) προχώρησαν ένα βήμα παραπέρα και πραγματοποίησαν παρόμοιες συγκρίσεις για τις ίδιες συναρτήσεις χρησιμότητας, αλλά για τα πιθανά χαρτοφυλάκια που μπορούν να παραχθούν από άπειρους συνδυασμούς ενός πεπερασμένου αριθμού ασφαλειών, δείχνοντας πως τα βέλτιστα χαρτοφυλάκια ήταν συχνά αυτά που μεγιστοποιούσαν τη συνάρτηση E-U. Παρόμοια αποτελέσματα αναφέρονται και από τον Pulley (1983), ο οποίος επίσης εφάρμοσε την προσέγγιση (3.38) χρησιμοποιώντας μια λογαριθμική συνάρτηση χρησιμότητας για την ιεράρχηση 10 χαρτοφυλακίων, το καθένα από τα οποία αποτελούνταν από τυχαίους συνδυασμούς 25 ασφαλειών. Ο Pulley έδειξε επίσης πως η (3.38) συνεχίζει να αποτελεί μια καλή προσέγγιση της E-U ακόμα και στην περίπτωση που οι αποδόσεις των ασφαλειών δεν ακολουθούν κάποια εμπειρική κατανομή, αλλά μια θεωρητική, όπως η κανονική, η λογαριθμικά κανονική (log-normal) και η κατανομή  $t$ .

Μια πολύ ενδιαφέρουσα ιδιότητα της (3.38), η οποία σημειώθηκε τόσο από τον Pulley (1983) όσο και από τον Tsiang (1972) είναι ότι η προσέγγιση της E-U βελτιώνεται καθώς αυξάνεται το ποσό του μη επενδεδυμένου κεφαλαίου, δηλαδή μειώνεται το στοχαστικό κομμάτι του τελικού πλούτου,  $a$ , συγκριτικά με το αντίστοιχο σταθερό,  $\omega$ . Στα οικονομικά της γεωργικής παραγωγής, η ιδιότητα αυτή σημαίνει πως η προσέγγιση βελτιώνεται όταν το σχέδιο παραγωγής περιλαμβάνει δραστηριότητες με μη στοχαστικά κέρδη, όπως για παράδειγμα η ενοικίαση γης. Το ίδιο ισχύει αν το  $\omega$  θεωρηθεί πως αντιστοιχεί στην ενιαία αποδεδεσμευμένη ενίσχυση που λαμβάνουν οι παραγωγοί στα πλαίσια της αναθεωρημένης ΚΑΠ.

Να σημειωθεί ωστόσο πως ο Loistl (1976) διαφωνεί με την προσέγγιση της E-U με ένα πολυώνυμο Taylor, αποδεικνύοντας πως για κάποιες γνωστές συναρτήσεις χρησιμότητας, όπως η λογαριθμική και η συνάρτηση δύναμης, το πολυώνυμο συγκλίνει μόνο στο διάστημα  $W \in [0, 2\mu]$ , κάτι που φυσικά θεωρείται αρκετά περιοριστικό. Ο Loistl επίσης υποστηρίζει πως η προσέγγιση «δεν δουλεύει» γιατί η πραγματική τιμή της E-U με μια

---

<sup>20</sup> Στην περίπτωση αυτή, η E-U υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας μια ομοιόμορφη κατανομή για τις αποδόσεις κάθε χαρτοφυλακίου. Έτσι, σε κάθε ετήσια (παρατηρούμενη) απόδοση του κάθε χαρτοφυλακίου αντιστοιχίθηκε η ίδια πιθανότητα εμφάνισης.

συνάρτηση που περιέχει τις ροπές πρώτης και δεύτερης τάξης της τυχαίας μεταβλητής επιτυγχάνεται μόνο στις δυο περιπτώσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω, δηλαδή με τετραγωνική συνάρτηση χρησιμότητας ή/και συνάρτηση CARA σε συνδυασμό με κανονική κατανομή της τυχαίας μεταβλητής. Ο Hlawitschka (1994), ωστόσο, απορρίπτει το τελευταίο επιχείρημα του Loistl, υποστηρίζοντας πως αφού η  $E[u(W)]$  αποτελεί συνάρτηση τακτικής και όχι απόλυτης χρησιμότητας, το ζητούμενο της χρήσης ενός πολυώνυμου Taylor δεν είναι η αριθμητική προσέγγιση της τιμής της E-U, αλλά της ιεράρχησης των προτιμήσεων. Έξαλλου, σύμφωνα με την ιδιότητα μιας συνάρτησης χρησιμότητας von Neumann – Morgenstern, ένας γραμμικός μετασχηματισμός της  $u(W)$  θα δώσει διαφορετικές τιμές της  $E[u(W)]$  χωρίς να αλλάζει την ιεράρχηση των προτιμήσεων.

Επιπλέον ο Hlawitschka αποδεικνύει με εμπειρικό τρόπο πως ένα πολυώνυμο Taylor δευτέρου βαθμού σε μια γειτνίαση του  $\mu$  μπορεί να δώσει πολύ καλές προσεγγίσεις της E-U, ακόμα και αν η τελευταία εκτιμηθεί σε τιμές του  $W$  που βρίσκονται εκτός του προαναφερθέντος διαστήματος αριθμητικής σύγκλισης. Το συμπέρασμα αυτό βασίστηκε σε παρατηρήσεις της ιεράρχησης προτιμήσεων χαρτοφυλακίων, αποτελούμενα είτε από κοινές μετοχές (common stocks) είτε από προαιρετικά δικαιώματα αγοράς (call options)<sup>21</sup>. Το χαρακτηριστικό των κοινών μετοχών είναι πως η τελική τους τιμή παρουσιάζει μικρή διακύμανση και άρα βρίσκεται συνήθως εντός του διαστήματος  $[0, 2\mu]$ , σε αντίθεση με τα προαιρετικά δικαιώματα αγοράς που παρουσιάζουν μεγάλη διακύμανση και η τελική τους τιμή συχνά είναι μεγαλύτερη από  $2\mu$ . Εκείνο όμως που παρουσιάζει ακόμα μεγαλύτερο ενδιαφέρον είναι πως για τα προαιρετικά δικαιώματα αγοράς, η συνάρτηση δύναμης και η λογαριθμική συνάρτηση χρησιμότητας έδωσαν καλύτερες προσεγγίσεις της E-U από την αντίστοιχη εκθετική, παρόλο που για την τελευταία, μια προσέγγιση Taylor σε μια γειτνίαση του  $\mu$  συγκλίνει αριθμητικά για κάθε τιμή του τελικού πλούτου. Αυτό δείχνει πως η ποιότητα της προσέγγισης της E-U από ένα πολυώνυμο Taylor δευτέρου βαθμού δεν μπορεί να κριθεί από τη σύγκλιση ή μη των άπειρων όρων της σειράς.

Οι Levy και Markowitz (1979) αποδεικνύουν επίσης πως η προσέγγιση (3.38) υποδηλώνει συντελεστή αποστροφής κινδύνου «στα μικρά» που τείνει ασυμπτωτικά προς το συντελεστή της αρχικής συνάρτησης χρησιμότητας που προσεγγίζεται. Αυτό γίνεται εύκολα αντιληπτό αν ληφθεί υπόψη πως η εξίσωση (3.38) είναι ακριβώς ίδια με την εξίσωση (3.30), την οποία ο Pratt (1964) χρησιμοποίησε για τον ορισμό του συντελεστή

---

<sup>21</sup> Προαιρετικά δικαιώματα αγοράς ονομάζονται οι συμβάσεις που δίνουν στον κάτοχο το δικαίωμα – αλλά όχι την υποχρέωση – αγοράς ενός περιουσιακού στοιχείου από τον αντισυμβαλλόμενο πωλητή εντός ενός καθορισμένου χρονικού διαστήματος και σε μια προσυμφωνημένη τιμή. Τα προαιρετικά δικαιώματα αγοράς ανήκουν στα παράγωγα χρηματοοικονομικά μέσα (derivatives) και αποτελούν ένα πολύ αποτελεσματικό μέσο μείωσης του χρηματοοικονομικού κινδύνου (hedging).

απόλυτης αποστροφής κινδύνου,  $\varphi$ , και του ασφαλιστρού κινδύνου,  $R$ . Η συγκεκριμένη παρατήρηση υποδηλώνει επίσης πως η συζήτηση για την αποδοχή ή μη της προσέγγισης E-U με ένα πολυώνυμο Taylor δευτέρου βαθμού φαντάζει ως ένα «θεωρητικό παράδοξο», καθώς για την απόδειξη της σχέσης (3.32), με την οποία ορίστηκε το ασφαλιστρού κινδύνου, η ισχύς της προσέγγισης (3.38) δεν αμφισβητείται. Με άλλα λόγια, θα μπορούσε να ειπωθεί πως και ο ορισμός των  $\varphi$  και  $R$  από τον Pratt (1964) υπόκειται στην ίδια κριτική σχετικά με την ποιότητα της προσέγγισης της E-U από ένα πολυώνυμο Taylor, κάτι το οποίο όμως δεν έχει απασχολήσει τη σχετική βιβλιογραφία. Σε κάθε περίπτωση, τα εμπειρικά αποτελέσματα που προκύπτουν από τις εργασίες όλων των ερευνητών που συζητήθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους επιβεβαιώνουν την ποιότητα της προσέγγισης της E-U με ένα πολυώνυμο Taylor.

Επιστρέφοντας στον ορισμό του  $R$  ως το χρηματικό ποσό που ικανοποιεί την εξίσωση  $E[u(\omega + a)] = u(\omega + E[a] - R)$ , η μεγιστοποίηση της E-U είναι ισοδύναμη με τη μεγιστοποίηση της συνάρτησης  $u(\omega + E[a] - R)$ , όπου με  $\omega + E[a] - R$  συμβολίζεται το βέβαιο ισοδύναμο ( $CE$ ) του τελικού πλούτου. Αφού η  $u$  είναι εξ' ορισμού μια αύξουσα συνάρτηση του  $W$  (και κατ' επέκταση του  $CE$ ), η μεγιστοποίηση της E-U είναι ισοδύναμη με τη μεγιστοποίηση του  $CE$ , το οποίο μπορεί να γραφτεί ως:

$$CE = \mu - \frac{1}{2} \left( -\frac{u''}{u'} \right) \sigma^2 \quad (3.39)$$

Η συζήτηση που προηγήθηκε σχετικά με την ποιότητα της προσέγγισης της E-U από ένα πολυώνυμο Taylor δευτέρου βαθμού αποδεικνύει πως ο ορισμός (3.39) του  $CE$  μπορεί να χρησιμοποιηθεί για λήψη αποφάσεων υπό συνθήκες αβεβαιότητας και κινδύνου με τρόπο συνεπή προς το κριτήριο της E-U, ακόμα και στην περίπτωση συναρτήσεων χρησιμότητας DARA και μη κανονικής κατανομής του πλούτου. Ωστόσο, σε σύγκριση με τη μορφή  $CE = \mu - 0.5\varphi\sigma^2$  του Freund (βλέπε εξίσωση 3.35), η (3.39) δεν προσφέρει παρά μια προσέγγιση του κριτηρίου E-U (δηλαδή συνέπεια προτιμήσεων και όχι αριθμητική προσέγγιση της τιμής της E-U). Προφανώς, όταν η  $u$  είναι αρνητική εκθετική, οι δύο εξισώσεις παίρνουν τη μορφή (3.35), ωστόσο, αν ο τελικός πλούτος δεν κατανέμεται κανονικά, η ποιότητα της προσέγγισης της E-U αποτελεί ένα εμπειρικό ζήτημα.

Αν και τα παραπάνω συζητούνται στα περισσότερα εγχειρίδια που πραγματεύονται τον τρόπο λήψης αποφάσεων υπό συνθήκες αβεβαιότητας και κινδύνου (π.χ. Robison & Barry, 1987), δεν λαμβάνονται συνήθως υπόψη σε εμπειρικές αναλύσεις, καθώς υιοθετούνται οι υποθέσεις της εκθετικής συνάρτησης χρησιμότητας (CARA) και της κανονικής κατανομής του πλούτου. Μια προφανής εξήγηση για την επιλογή αυτή είναι πως οι συναρτήσεις CARA επιτρέπουν την εύρεση μιας καθολικής τιμής του  $\varphi$  (αυτό που ονομάζεται «στα μεγάλα»). Αντίθετα, οι τιμές του  $\varphi$  που προκύπτουν από συναρτήσεις

DARA αφορούν σε μια τοπική ιδιότητα της συνάρτησης χρησιμότητας («στα μικρά») και συνεπώς δεν είναι εύκολη η σύγκριση του  $\varphi$  μεταξύ ατόμων με διαφορετικό επίπεδο τελικού πλούτου. Για παράδειγμα, δημοσιευμένες τιμές του συντελεστή αποστροφής κινδύνου που βασίζονται στις υποθέσεις αυτές είναι εύκολο να βρεθούν στη σχετική βιβλιογραφία, γεγονός που επιτρέπει τη σύγκριση της συμπεριφοράς των ατόμων έναντι του κινδύνου σε διαφορετικές περιοχές και υπό διαφορετικές καλλιεργητικές και κοινωνικοοικονομικές συνθήκες. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα στα υποδείγματα E-L, αφού όπως προαναφέρθηκε, το  $\varphi$  αντιστοιχεί σε ένα μέτρο απόστασης (τυπικές αποκλίσεις) του τελικού πλούτου από το μέσο της κατανομής του. Η μόνη γνωστή εξαίρεση που γνωρίζει ο γράφων είναι η εργασία των Gómez-Limón *et al.* (2003), οι οποίοι εκτιμούν τον συντελεστή απόλυτης αποστροφής κινδύνου χρησιμοποιώντας ένα υπόδειγμα πολυκριτήριου προγραμματισμού που βασίζεται στην προσέγγιση (3.39) του CE, εξηγώντας ταυτόχρονα πως η επιλογή τους δεν αποτελεί παρά μια προσέγγιση της E-U.

### **3.6 Ρύθμιση υποδειγμάτων προγραμματισμού και οικονομικός κίνδυνος**

Η ανάγκη ρύθμισης ενός υποδείγματος ΜΠ σπάνια αποτέλεσε την κύρια αιτία εισαγωγής στην αντικειμενική συνάρτηση μη γραμμικών διατυπώσεων για τη μαθηματική αναπαράσταση της αβεβαιότητας και του συνεπαγόμενου οικονομικού κινδύνου. Ωστόσο, ο υπολογισμός της τιμής του συντελεστή απόλυτης αποστροφής κινδύνου,  $\varphi$ , σε υποδείγματα E-V με αντικειμενική συνάρτηση όπως του Freund και του Baumol συχνά οδηγούσε τους αναλυτές στην υιοθέτηση μια έμμεσης διαδικασίας ρύθμισης. Ειδικότερα, η παραμετρική επίλυση του υποδείγματος για διάφορες τιμές του  $\varphi$  επέτρεπε την επιλογή της τιμής εκείνης για την οποία το παραγόμενο σχέδιο παραγωγής προσέγγιζε το παρατηρούμενο κατά το έτος βάσης (π.χ. Brink & McCarl, 1978). Η διαδικασία αυτή όμως δεν εγγυάται την ακριβή ρύθμιση του υποδείγματος γιατί δεν λαμβάνονται υπόψη οι αναγκαίες συνθήκες βελτιστοποίησης πρώτης τάξης, όπως αντίθετα συμβαίνει με σαφή τρόπο από τη μέθοδο ΘΜΠ. Επιπλέον, οι Hazell και Norton (1986) διακρίνουν δυο σημαντικά προβλήματα που σχετίζονται με τη συγκεκριμένη μέθοδο. Το πρώτο αφορά στην πιθανότητα οι παραγωγοί να έχουν πρόσβαση σε αγορές ασφάλισης, με αποτέλεσμα η τελική τιμή του  $\varphi$  που προκύπτει από την παραμετρική επίλυση του υποδείγματος να μην αντανακλά την πραγματική στάση τους έναντι του κινδύνου. Το δεύτερο πρόβλημα αφορά στη μεροληπτική εκτίμηση της τιμής του  $\varphi$  εξαιτίας σφαλμάτων εξειδίκευσης του υποδείγματος. Για παράδειγμα, σε περίπτωση αποτυχίας ρεαλιστικής αναπαράστασης της τεχνολογίας παραγωγής, η τελική τιμή του  $\varphi$  μπορεί να

είναι εσφαλμένη, αφού η παράλειψη σημαντικών περιορισμών επηρεάζει το συντελεστή αποστροφής κινδύνου, αυξάνοντας την τιμή του (Musser *et al.*, 1989).

Παρά τα προβλήματα αυτά, η παραπάνω μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί για την ενσωμάτωση του οικονομικού κινδύνου σε υποδείγματα ΘΜΠ και ειδικότερα για τις ανάγκες ρύθμισης του βιο-οικονομικού υποδείγματος FSSIM (Jeder *et al.*, 2011; Louhichi *et al.*, 2010) που αναπτύχθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος SEAMLESS (Van Ittersum *et al.*, 2008). Αναλυτικότερα, η διαδικασία της ρύθμισης ξεκινά με ένα υπόδειγμα μεγιστοποίησης μια γραμμικής αντικειμενικής συνάρτησης χρησιμότητας  $L = \bar{\mathbf{r}}^T \mathbf{x} - \mathbf{c}^T \mathbf{x} - \varphi_L \sigma$ , όπου με  $\bar{\mathbf{r}}$  συμβολίζεται το διάνυσμα της προσδοκώμενης ακαθάριστης προσόδου (πρόκειται για τη μέθοδο E-L που παρουσιάστηκε νωρίτερα<sup>22</sup>), το οποίο επιλύεται παραμετρικά για διάφορες τιμές του  $\varphi_L$ , ώστε να βρεθεί η τιμή εκείνη με την οποία προσεγγίζονται καλύτερα οι παρατηρήσεις του έτους βάσης. Αν τα αποτελέσματα του υποδείγματος δεν αναπαράγουν ακριβώς τις παρατηρήσεις του έτους βάσης, τότε προστίθεται η τετραγωνική συνάρτηση κόστους μέσα από τη συνήθη διαδικασία των τριών βημάτων του ΘΜΠ, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται η ακριβής ρύθμιση του υποδείγματος. Συνεπώς η συγκεκριμένη μέθοδος οδηγεί σε μια υβριδική αντικειμενική συνάρτηση η οποία πλέον περιλαμβάνει γραμμικά και μη γραμμικά κόστη, ένα (σταθερό) συντελεστή απόλυτης αποστροφής κινδύνου και έναν όρο τυπικής απόκλισης που αναπαριστά την αβεβαιότητα σχετικά με τον τελικό πλούτο του παραγωγού:

$$L = \bar{\mathbf{r}}^T \mathbf{x} - \mathbf{v}^T \mathbf{x} - \mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} - \varphi_L \sigma$$

Η συγκεκριμένη μέθοδος υποδηλώνει πως η αδυναμία ρύθμισης οφείλεται κατά κύριο λόγο (ή ακόμα και αποκλειστικά) στη στάση του παραγωγού έναντι του κινδύνου, την οποία προσπαθεί να αναπαράγει ο αναλυτής. Ωστόσο, δεν επιτυγχάνει παρά μια προσέγγιση, πιθανώς μεροληπτική, του συντελεστή απόλυτης αποστροφής κινδύνου εξαιτίας των προαναφερθέντων προβλημάτων. Επιπλέον, η χρήση του ΘΜΠ ως συμπλήρωμα της μεθόδου της παραμετρικής επίλυσης αναιρεί την τελευταία καθώς εξασφαλίζεται η ακριβής ρύθμιση του υποδείγματος ανεξάρτητα από την τιμή του  $\varphi_L$  που έχει επιλεγεί. Τέλος, οι προβληματικές υποθέσεις περί κανονικής κατανομής των κερδών των δραστηριοτήτων και μιας σταθερής τιμής του  $\varphi_L$  συνεχίζουν να ισχύουν.

<sup>22</sup> Στην περίπτωση αυτή ο όρος της τυπικής απόκλισης δεν αναφέρεται στην εμπειρική κατανομή των στοχαστικών κερδών κάθε δραστηριότητας (ή ισοδύναμα του τελικού πλούτου), αλλά σε διαφορετικές καταστάσεις φύσης (εδαφοκλιματικές συνθήκες) οι οποίες προέρχονται από προσομοιώσεις με ένα βιο-φυσικό υπόδειγμα.

Μια διαφορετική προσέγγιση ρύθμισης στηριζόμενη στον οικονομικό κίνδυνο δίνεται από τον Wiens (1976), ο οποίος μελετά τα καλλιεργητικά σχέδια και τον τρόπο κατανομής των παραγωγικών συντελεστών υπό συνθήκες αβεβαιότητας αποδόσεων σε ένα δείγμα εκμεταλλεύσεων στην Κίνα. Στην εργασία αυτή εφαρμόζεται ένα υπόδειγμα ΜΠ με την αντικειμενική συνάρτηση που προτείνει ο Freund. Υποθέτοντας επιπλέον πως οι δυικές τιμές,  $\theta$ , των κλασικών γραμμικών περιορισμών  $\mathbf{Ax} \leq \mathbf{b}$  προσεγγίζουν τις πραγματικές τιμές των συντελεστών στην ελεύθερη αγορά ( $\xi = \theta$ , όπου  $\xi$  το  $M \times 1$  διάνυσμα των τιμών των συντελεστών), τότε ο συντελεστής  $\varphi$  μπορεί να υπολογιστεί από τις αναγκαίες συνθήκες πρώτης τάξης:

$$\mathbf{x}^T(\bar{\mathbf{g}} - \varphi\mathbf{Vx} - \mathbf{A}^T\theta) = 0 \quad (3.40)$$

Για  $\xi = \theta$  και για το παρατηρούμενο σχέδιο παραγωγής,  $\mathbf{x}^* > 0$ , η (3.40) είναι ισοδύναμη με:

$$\varphi \mathbf{I}_I = \frac{\bar{\mathbf{g}} - \mathbf{A}^T\xi}{\mathbf{Vx}^*} \quad (3.41)$$

όπου  $\mathbf{I}_I$  ο ταυτοτικός πίνακας. Το μεγαλύτερο πρόβλημα της μεθόδου που προτείνει ο Wiens (εκτός των υποθέσεων περί κανονικής κατανομής πλούτου και προτιμήσεις CARA) είναι πως το  $\varphi$  αποτελεί βαθμωτό (scalar) αριθμό, δηλαδή διάνυσμα  $1 \times 1$ , ενώ το δεξί μέρος της (3.41) αντιστοιχεί σε ένα διάνυσμα διάστασης  $I \times 1$ . Αυτό σημαίνει πως η (3.41) μπορεί να οδηγήσει σε διαφορετικές τιμές του  $\varphi$ , το οποίο φυσικά δεν μπορεί να γίνει αποδεκτό (Paris, 1979). Ένα επιπλέον πρόβλημα είναι η υπόθεση  $\xi = \theta$ , η οποία δύσκολα μπορεί να δικαιολογηθεί στην πράξη. Ο λόγος είναι πως το σύνολο των περιορισμών ενός υποδείγματος ΜΠ μπορεί να περιλαμβάνει μαθηματικές διατυπώσεις που αφορούν σε αγρονομικές ή άλλες σχέσεις (π.χ. αμειψισπορές) και συνεπώς δεν αντιπροσωπεύουν εμπορεύσιμα αγαθά. Επιπλέον, το κόστος ευκαιρίας (δυική τιμή) για παραγωγικούς συντελεστές που παράγονται από την ίδια την εκμετάλλευση (π.χ. κοπριά που χρησιμοποιείται στη λίπανση καλλιεργειών) είναι συνήθως πολύ διαφορετικό από την αντίστοιχη τιμή της αγοράς, εφόσον βέβαια αυτή υπάρχει.

## 3.7 Ενσωμάτωση του οικονομικού κίνδυνου σε υποδείγματα ΘΜΠ

### 3.7.1 Εισαγωγή

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται μια εναλλακτική μέθοδος ρύθμισης ενός υποδείγματος ΜΠ που λαμβάνει υπόψη με σαφή τρόπο τον οικονομικό κίνδυνο. Η προτεινόμενη

μέθοδος ακολουθεί τα συνήθη τρία στάδια του ΘΜΠ, ξεκινώντας από ένα υπόδειγμα μεγιστοποίησης της προσδοκώμενης λογαριθμικής χρησιμότητας του τελικού πλούτου, εκφραζόμενη μέσω του βεβαίου ισοδυνάμου ( $CE$ ) του, στο οποίο προστίθενται επιπλέον περιορισμοί ρύθμισης που δεσμεύουν την τελική λύση στα παρατηρούμενα επίπεδα παραγωγής. Γίνεται έτσι κατανοητό πως δεν υιοθετούνται οι υποθέσεις της εκθετικής συνάρτησης χρησιμότητας και της κανονικής κατανομής του τελικού πλούτου, οι οποίες κρίνονται ως μη ρεαλιστικές λόγω των προβλημάτων που αναλύθηκαν παραπάνω, και συνεπώς η εξειδίκευση  $CE$  που χρησιμοποιείται προσφέρει μια προσέγγιση της E-U και όχι αριθμητική ταύτιση. Ταυτόχρονα με τη ρύθμιση του υποδείγματος παρουσιάζεται και μια απλή υπολογιστική διαδικασία που επιτρέπει να ληφθούν υπόψη και δραστηριότητες που δεν παρατηρούνται κατά το έτος βάσης, κάτι που όπως προαναφέρθηκε, αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα του ΘΜΠ.

Έστω ένας παραγωγός που μεγιστοποιεί μια λογαριθμική συνάρτηση χρησιμότητας της μορφής  $u(W) = \ln(W)$ . Η λογαριθμική έχει όλες τις απαραίτητες ιδιότητες μιας συνάρτησης χρησιμότητας που υποδηλώνει προτιμήσεις DARA ( $u' > 0$ ,  $u'' < 0$  και  $d\phi/dW < 0$ ) και θεωρείται ιδανική για χρηματοοικονομικές αναλύσεις (Rubinstein, 1976), ενώ δίνει πολύ ικανοποιητικές προσεγγίσεις της E-U, όπως αποδεικνύεται από τις εργασίες των Levy και Markowitz (1979), Pulley (1983), Kroll *et al.* (1984) και Hlawitschka (1994). Μειονέκτημα της λογαριθμικής συνάρτησης χρησιμότητας είναι ο μη ορισμός της για μηδενικό πλούτο και ο σταθερός συντελεστής σχετικής αποστροφής κινδύνου (ισούται με 1) που σημαίνει πως δεν επηρεάζεται από το επίπεδο του πλούτου. Όπως υποστηρίζει ο Tsiang (1972: 357), η ιδανική συνάρτηση χρησιμότητας πρέπει να παρουσιάζει  $d\phi/dW < 0$  και  $d\phi_r/dW > 0$ , κάτι που σημαίνει πως πρέπει να είναι μεταξύ της λογαριθμικής και της εκθετικής συνάρτησης χρησιμότητας.

Ο τελικός πλούτος του παραγωγού ορίζεται ως  $W = \omega + (\mathbf{r} - \mathbf{c})^T \mathbf{x}$ , όπου  $\omega$  ο αρχικός πλούτος, ή το ποσό της ενιαίας ενίσχυσης στα πλαίσια της αναθεωρημένης ΚΑΠ,  $\mathbf{r}$  και  $\mathbf{c}$  τα  $I \times 1$  διανύσματα της ακαθάριστης προσόδου και των μεταβλητών δαπανών αντίστοιχα, ενώ με  $\mathbf{x}$  συμβολίζεται το  $I \times 1$  διάνυσμα των μεταβλητών απόφασης (π.χ. εκτάσεις καλλιεργειών). Κάθε  $r_i$  στοιχείο του  $\mathbf{r}$  ορίζεται ως το γινόμενο των τιμών ( $p_i$ ) και των αποδόσεων ( $y_i$ ) των καλλιεργειών, ώστε  $r_i = p_i y_i$  (με  $i \in I$ ). Το πρόβλημα μεγιστοποίησης της χρησιμότητας του πλούτου του παραγωγού υπό τους συνήθεις γραμμικούς περιορισμούς της μορφής  $\mathbf{Ax} \leq \mathbf{b}$  μπορεί να διατυπωθεί ως:

$$\max_{\mathbf{x} \geq 0} u = \ln(\omega + (\mathbf{r} - \mathbf{c})^T \mathbf{x})$$

$$\text{Υπό περιορισμούς} \quad \mathbf{Ax} \leq \mathbf{b} \quad [\boldsymbol{\theta}]$$

Ο παραπάνω ορισμός του πλούτου δεν περιέχει στοχαστικά μέρη και καθιστά το  $W$  αύξουσα συνάρτηση του  $\mathbf{x}$ , όπως ακριβώς και στα κλασικά υποδείγματα ΓΠ. Συνεπώς, αφού η λογαριθμική συνάρτηση αποτελεί απλά ένα μονοτονικό μετασχηματισμό του τελικού πλούτου,  $W$ , το πρόβλημα μεγιστοποίησης της χρησιμότητας του παραγωγού είναι ισοδύναμο με τη μεγιστοποίηση του  $W$  υπό τους ίδιους περιορισμούς και συνεπώς εκφυλίζεται σε ένα κλασικό υπόδειγμα ΓΠ. Αυτό σημαίνει πως αν το υποκείμενο πρόβλημα ΓΠ αδυνατεί να αναπαράγει τις παρατηρήσεις του έτους βάσης, τότε θα ισχύει το ίδιο και για το υπερκείμενο πρόβλημα μεγιστοποίησης της  $u$ . Όμως αν τα  $p_i$  και  $y_i$  (και συνεπώς κάθε  $r_i$  στοιχείο του διανύσματος  $\mathbf{r}$ ) είναι στοχαστικές και ανεξάρτητες μεταβλητές<sup>23</sup> με γνωστές εμπειρικές κατανομές για μια περίοδο  $T$  ετών, τότε μπορεί να ειπωθεί πως το παραπάνω υπόδειγμα αποτυγχάνει στον έλεγχο αξιοπιστίας γιατί στην πραγματικότητα ο παραγωγός δε μεγιστοποιεί τη χρησιμότητα του, αλλά την προσδοκώμενη λογαριθμική χρησιμότητα του τελικού του πλούτου, η οποία μπορεί να εκφραστεί με το βέβαιο ισοδύναμο,  $CE$ , όπως αυτό ορίστηκε στην εξίσωση (3.39). Με τη λογαριθμική συνάρτηση χρησιμότητας το  $CE$  γράφεται ως:

$$CE = \omega + (\bar{\mathbf{r}} - \mathbf{c})^T \mathbf{x} - \frac{1}{2} \frac{\mathbf{x}^T \mathbf{V} \mathbf{x}}{[\omega + (\bar{\mathbf{r}} - \mathbf{c})^T \mathbf{x}]} \quad (3.42)$$

Το  $\bar{\mathbf{r}}$  συμβολίζει την προσδοκώμενη τιμή του διανύσματος της ακαθάριστης προσόδου, με στοιχεία  $\bar{r}_i = \bar{p}_i \bar{y}_i$ , όπου  $\bar{p}_i$  και  $\bar{y}_i$  οι προσδοκώμενες τιμές και αποδόσεις κάθε δραστηριότητας αντίστοιχα. Ορίζοντας το προσδοκώμενο ακαθάριστο κέρδος κάθε καλλιέργειας ως  $\bar{g}_i = \bar{r}_i - c_i$ , οι όροι διακύμανσης και συνδιακύμανσης του πίνακα  $\mathbf{V}$  υπολογίζονται ως  $Var(g_i) = Var(p_i y_i) = Var(r_i)$  και  $Cov(g_i, g_j) = Cov(p_i y_i, p_j y_j) = Cov(r_i, r_j)$  αντίστοιχα, δηλαδή είναι ανεξάρτητοι των μεταβλητών δαπανών  $c_i$ .

Σχετικά με την παρατήρηση του Loistl (1976) για τη σύγκλιση του πολυωνύμου Taylor, το διάστημα της σύγκλισης για τη λογαριθμική συνάρτηση χρησιμότητας ορίζεται ως  $\{0, 2[\omega + (\bar{\mathbf{r}} - \mathbf{c})^T \mathbf{x}]\}$ . Οποιαδήποτε θετική τιμή του αρχικού πλούτου,  $\omega$ , εξασφαλίζει μια επίσης θετική τιμή του  $W$  και συνεπώς το πολυώνυμο δεν ικανοποιεί το κριτήριο της σύγκλισης μόνο όταν  $W > 2[\omega + (\bar{\mathbf{r}} - \mathbf{c})^T \mathbf{x}]$ , δηλαδή στην περίπτωση ταυτόχρονου

<sup>23</sup> Η υπόθεση περί ανεξαρτησίας των  $p_i$  και  $y_i$  μπορεί να δικαιολογηθεί σε επίπεδο εκμετάλλευσης καθώς πρόκειται για προσδοκίες τιμών και αποδόσεων των παραγωγών. Ειδικότερα, οι τελικές αποδόσεις εξαρτώνται από τις προσδοκώμενες κλιματικές συνθήκες, οι δε τιμές είναι εξωγενείς παράμετροι (τουλάχιστον για τα σιτηρά) και συνεπώς θεωρείται πως δεν υπάρχει κάποιο είδος συσχέτισης μεταξύ τους.



διπλασιασμού των  $\omega$  και  $[(\bar{\mathbf{r}} - \mathbf{c})^T \mathbf{x}]$ . Αν το  $\omega$  ερμηνευτεί ως το ποσό της ενιαίας ενίσχυσης είναι ιδιαίτερα απίθανο να παρουσιάσει τέτοια αύξηση, τουλάχιστον βραχυχρόνια. Εξάλλου, οι περιορισμοί συνολικής γης που συνήθως περιλαμβάνονται σε υποδείγματα εκμεταλλεύσεων ΜΠ δεν επιτρέπουν και τον ταυτόχρονο διπλασιασμό της κερδοφορίας των καλλιεργειών. Συνεπώς είναι λογικό να θεωρηθεί πως το  $W$  θα περιέχεται πάντα στο παραπάνω διάστημα και το πολυώνυμο Taylor θα συγκλίνει πάντα σε ένα σταθερό αριθμό. Σε κάθε περίπτωση, όπως απέδειξε ο Hlawitschka (1994), η προσέγγιση της E-U από ένα πολυώνυμο Taylor δευτέρου βαθμού παραμένει ικανοποιητική ακόμα και αν ο τελικός πλούτος βρίσκεται εκτός του διαστήματος  $\{0, 2[\omega + (\bar{\mathbf{r}} - \mathbf{c})^T \mathbf{x}]\}$ .

### 3.7.2 Προβλήματα ρύθμισης υποδειγμάτων οικονομικού κινδύνου

Ένα υπόδειγμα  $CE$  δεν εγγυάται, ωστόσο, την ακριβή αναπαραγωγή των παρατηρήσεων του έτους βάσης, κάτι που αποδεικνύεται από τις προαναφερθείσες εργασίες των Louhichi *et al.* (2010) και Wiens (1976). Σύμφωνα με τη θεωρία του ΘΜΠ, αυτό οφείλεται σε μη παρατηρούμενες πληροφορίες οι οποίες είναι γνωστές μόνο στον παραγωγό και μεταφράζονται σε προβλήματα μέτρησης παραμέτρων, λανθασμένης εξειδίκευσης του υποδείγματος ή/και σε επιπλέον οριακά κόστη που δεν εμφανίζονται σε βάσεις με τεχνικοοικονομικά δεδομένα εκμεταλλεύσεων (π.χ. ΔΙΓΕΛΠ). Όλες αυτές οι πληροφορίες περιέχονται στο δυικό διάνυσμα  $\lambda$  των περιορισμών ρύθμισης που χρησιμοποιούνται στην πρώτη φάση του ΘΜΠ.

Σε ό,τι αφορά τα επιπλέον μη παρατηρούμενα οριακά κόστη, αυτά είναι το αποτέλεσμα κοινωνικοοικονομικών παραγόντων (π.χ. διατήρηση παραδοσιακών καλλιεργειών) ή/και τεχνικών περιορισμών που δεν επιτρέπουν την εγκατάσταση μιας καλλιέργειας σε ορισμένα εδάφη. Για παράδειγμα, η επέκταση μιας καλλιέργειας σε μη κατάλληλα εδάφη συνεπάγεται επιπλέον κόστη για τη διόρθωση των φυσικών χαρακτηριστικών τους, όπως η γονιμότητα, το pH, η αλατότητα και η δυνατότητα στράγγισης. Όλα τα παραπάνω αντιστοιχούν στον ισχυρισμό του Howitt (1995b) περί μειωμένης οριακής απόδοσης των εδαφών (ή ισοδύναμα, σε αυξανόμενο οριακό κόστος), λόγω της ετερογένειας των διαθέσιμων εδαφών μιας εκμετάλλευσης. Ένα ακόμη παράδειγμα μη παρατηρούμενου οριακού κόστους είναι η ίδια εργασία του παραγωγού, η οποία αποτελεί μια τεκμαρτή δαπάνη που όμως δεν εμφανίζεται σε βάσεις με τεχνικοοικονομικά δεδομένα εκμεταλλεύσεων, παρά το γεγονός ότι παίζει σημαντικό ρόλο ειδικά σε καλλιέργειες με μεγάλες απαιτήσεις σε ανθρώπινη εργασία (π.χ. καπνός).

Σε κάθε περίπτωση, αυτά τα μη παρατηρούμενα οριακά κόστη αυξάνουν το συντελεστή απόλυτης αποστροφής κινδύνου ενός παραγωγού με μια λογαριθμική συνάρτηση χρη-

σιμότητας και συνεπώς επηρεάζουν τη συμπεριφορά του έναντι του οικονομικού κινδύνου. Εξάλλου, σύμφωνα με τους Robison και Barry (1987), ο οικονομικός κίνδυνος αντιστοιχεί σε ένα επιπλέον «κρυφό» κόστος κι έτσι για να αναλάβει μια εκμετάλλευση οποιαδήποτε δραστηριότητα υψηλής διακύμανσης κερδών οφείλει να καλύψει το κόστος αυτό, κάτι που έχει ως πιθανό αποτέλεσμα τη διαφοροποίηση του βέλτιστου σχεδίου παραγωγής.

Περνώντας σε προβλήματα εξειδίκευσης της αντικειμενικής συνάρτησης (δηλαδή του  $CE$ ), τα  $\bar{p}_i$  και  $\bar{y}_i$  αντιπροσωπεύουν τις προσδοκίες του παραγωγού σχετικά με τις τιμές και τις αποδόσεις των καλλιεργειών του και συνεπώς αποτελούν υποκειμενικές πληροφορίες οι οποίες δεν είναι συνήθως διαθέσιμες στον αναλυτή. Αν και η θεωρία της συμπεριφοράς της επιχείρησης υπό συνθήκες αβεβαιότητας ορίζει τη χρήση της μέσης τιμής της εμπειρικής κατανομής των παραπάνω παραμέτρων (Sandmo, 1971), αυτό μπορεί να μην είναι ούτε απαραίτητο ούτε ρεαλιστικό, ειδικά στην περίπτωση κατά την οποία τα δεδομένα εμφανίζουν χρονικές τάσεις ή όταν οι αποφάσεις του παραγωγού βασίζονται σε υποκειμενικές πληροφορίες ή αντιλήψεις. Για παράδειγμα, οι Brink και McCarl (1978) κρίνουν τη μέση τιμή της εμπειρικής κατανομής των ακαθάριστων κερδών ως μη ρεαλιστική και αντιπροτείνουν τη χρήση του πενταετούς κινητού μέσου ως καταλληλότερο δείκτη προσδοκιών.

Η παραπάνω συζήτηση φανερώνει πως οι «πραγματικές» προσδοκίες των παραγωγών για τις (στοχαστικές) τιμές και αποδόσεις θα διαφέρουν γενικά από τα  $\bar{p}_i$  και  $\bar{y}_i$ . Επιπλέον, τα  $\bar{p}_i$  και  $\bar{y}_i$  υπολογίζονται από εμπειρικές κατανομές τιμών και αποδόσεων για μια περίοδο  $T$  ετών. Το πρόβλημα εντοπίζεται στην προέλευση των δεδομένων αυτών, αφού συνήθως αφορούν μέσους όρους σε εθνικό ή περιφερειακό επίπεδο και άρα είναι ακατάλληλα για χρήση σε υποδείγματα εκμεταλλεύσεων. Έτσι, οι διαφορετικές, σε κάθε εκμετάλλευση, εδαφοκλιματικές συνθήκες και τεχνικές καλλιέργειας έχουν ως αποτέλεσμα μια σημαντική μεταβλητότητα των διακυμάνσεων των κερδών των καλλιεργειών, η οποία όμως δεν λαμβάνεται υπόψη. Προφανώς το ίδιο ισχύει και για τον πίνακα διακύμανσης-συνδιακύμανσης  $\mathbf{V}$  με τον οποίο ο αναλυτής κατασκεύασε το υπόδειγμα του, ο οποίος μπορεί να διαφέρει σημαντικά από τον πραγματικό πίνακα της εκμετάλλευσης,  $\mathbf{S}$ , που είναι γνωστός μόνο στον παραγωγό.

### 3.7.3 Η ρύθμιση ενός υποδείγματος οικονομικού κινδύνου

Από τα παραπάνω προκύπτει η υπόθεση στην οποία βασίζεται η προτεινόμενη μέθοδος ρύθμισης. Συγκεκριμένα, η μεγιστοποίηση του  $CE$  ενός παραγωγού θα αναπαράγει τις παρατηρήσεις του έτους βάσης μόνο αν ο αναλυτής γνωρίζει (α) τις προσδοκίες του

παραγωγού, (β) τον πραγματικό πίνακα διακύμανσης – συνδιακύμανσης  $\mathbf{S}$  και (γ) τα μη παρατηρούμενα οριακά κόστη κάθε καλλιέργειας που επηρεάζουν τη συμπεριφορά του παραγωγού έναντι του κινδύνου. Έτσι, ο ΘΜΠ χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των παραμέτρων αυτών, ώστε οι αναγκαίες συνθήκες πρώτης τάξης να ικανοποιούνται ακριβώς στο παρατηρούμενο σημείο  $\mathbf{x}^* > 0$ .

Η ανάλυση που ακολουθεί θα περιοριστεί στην εκτίμηση του πίνακα  $\mathbf{S}$  και στα επιπλέον οριακά κόστη. Αυτό σημαίνει πως οι προσδοκίες του παραγωγού για τις τιμές και τις αποδόσεις θεωρείται πως συμπίπτουν με τις παρατηρούμενες τιμές κατά το έτος βάσης. Ο λόγος είναι πως σε στατικά υποδείγματα προγραμματισμού, όπως αυτά που εξετάζονται στην παρούσα διατριβή, είναι δύσκολο να καθοριστούν πρακτικοί κανόνες που να επιτρέπουν την εκτίμηση των προσδοκιών των παραγωγών. Αντίθετα, σε δυναμικά υποδείγματα προγραμματισμού ή οικονομετρικές εφαρμογές έχουν αναπτυχθεί απλοί κανόνες εκτίμησης των προσδοκιών αυτών, όπως για παράδειγμα η μέθοδος «προσαρμοζόμενων προσδοκιών» (adaptive expectations method) (π.χ. Sckokai & Moro, 2006; Chavas & Holt, 1990), σύμφωνα με την οποία το σφάλμα πρόβλεψης τη μια χρονιά χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της τιμής της παραμέτρου το επόμενο έτος. Αυτό μπορεί να εκφραστεί αλγεβρικά ως  $E_t[p_i^{t+1}] = p_i^t + E[p_i^t - E_{t-1}[p_i^t]]$ , όπου ο όρος  $E_t[p_i^{t+1}]$  συμβολίζει την προσδοκία κατά το έτος  $t$  για την τιμή της παραμέτρου το έτος  $t + 1$ . Ο όρος  $E[p_i^t - E_{t-1}[p_i^t]]$  αντιπροσωπεύει τη μέση διαφορά μεταξύ της πραγματικής και της προσδοκώμενης τιμής της παραμέτρου, η οποία ανανεώνεται κάθε έτος.

Αντίθετα από τις προσδοκίες των τιμών των προϊόντων, οι προσδοκώμενες αποδόσεις των καλλιεργειών σε στατικά βιο-οικονομικά υποδείγματα προγραμματισμού μπορούν να εκτιμηθούν με τη χρήση συναρτήσεων απόδοσης. Ειδικότερα, η απόφαση για το είδος και το μέγεθος (έκταση) κάθε δραστηριότητας λαμβάνεται στην αρχή της καλλιεργητικής περιόδου, στηριζόμενη σε μια εκτίμηση της ποσότητας των συντελεστών παραγωγής που αναμένεται να χρησιμοποιηθούν (π.χ. δυνατότητα του αρδευτικού συστήματος να εξυπηρετήσει συγκεκριμένη αρδευόμενη έκταση) και της τελικής εκτιμώμενης παραγωγής. Η τελευταία αποτελεί συνεπώς την προσδοκία του παραγωγού σχετικά με τις αποδόσεις των καλλιεργειών του και εκφράζεται μέσω των συναρτήσεων απόδοσης, οι οποίες μπορεί να θεωρηθεί πως αντιπροσωπεύουν τη γνώση και την εμπειρία του παραγωγού σχετικά με τις βιολογικές και τεχνικές διαδικασίες που καθορίζουν τη γεωργική παραγωγή. Για λόγους απλότητας της παρουσίασης θα θεωρηθεί πως κατά τη ρύθμιση του υποδείγματος οι προσδοκώμενες αποδόσεις των καλλιεργειών συμπίπτουν με τις παρατηρούμενες.

Επιστρέφοντας στη ρύθμιση του υποδείγματος μεγιστοποίησης του  $CE$ , προτείνεται μια διαδικασία τριών βημάτων, παρόμοια με εκείνη που ακολουθείται στα κλασικά

υποδείγματα ΘΜΠ. Έτσι εξειδικεύεται ένα υπόδειγμα  $CE$  που χρησιμοποιεί την (3.42) ως αντικειμενική συνάρτηση, δηλαδή περιλαμβάνει τον πίνακα συνδιακύμανσης  $\mathbf{V}$  και την αρχική γραμμική συνάρτηση κόστους και το διάνυσμα  $\mathbf{r}$  στη θέση του  $\bar{\mathbf{r}}^{24}$ , αλλά με επιπλέον περιορισμούς ρύθμισης που εξασφαλίζουν πως οι μεταβλητές απόφασης (έκταση καλλιεργειών) θα λάβουν τις παρατηρούμενες τιμές τους κατά το έτος βάσης:

$$\max_{\mathbf{x} \geq 0} CE = \omega + (\mathbf{r} - \mathbf{c})^T \mathbf{x} - \frac{1}{2} \frac{\mathbf{x}^T \mathbf{V} \mathbf{x}}{[\omega + (\mathbf{r} - \mathbf{c})^T \mathbf{x}]}$$

$$\text{Υπό περιορισμούς} \quad \mathbf{A} \mathbf{x} \leq \mathbf{b} \quad [\boldsymbol{\theta}]$$

$$\mathbf{x} \leq \mathbf{x}^*(1 + \varepsilon) \quad [\boldsymbol{\lambda}]$$

Οι αναγκαίες συνθήκες πρώτης τάξης για την άριστη λύση στο σημείο  $\mathbf{x}^*$  ορίζουν πως:

$$\mathbf{r} - \mathbf{c} - \frac{\mathbf{V} \mathbf{x}^*}{[\omega + (\mathbf{r} - \mathbf{c})^T \mathbf{x}^*]} + \frac{\mathbf{x}^{*T} \mathbf{V} \mathbf{x}^* (\mathbf{r} - \mathbf{c})}{2[\omega + (\mathbf{r} - \mathbf{c})^T \mathbf{x}^*]^2} - \mathbf{A}^T \boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\lambda} = 0 \quad (3.43)$$

Το επόμενο βήμα στα κλασικά υποδείγματα ΘΜΠ είναι η εκτίμηση μιας εναλλακτικής, μη γραμμικής (τετραγωνικής) συνάρτησης κόστους η οποία θα ενσωματώνει κάθε άγνωστο, μη παρατηρούμενο κόστος, το οποίο εκφράζεται από το δυικό διάνυσμα  $\boldsymbol{\lambda}$ . Σε αριθμητικούς όρους, η μη γραμμικότητα είναι αναγκαία για την παρουσία του διανύσματος  $\mathbf{x}$  στις συνθήκες πρώτης τάξης, έτσι ώστε αυτές να ικανοποιούνται ακριβώς στο σημείο  $\mathbf{x}^*$ . Στην εξίσωση (3.43), όμως, τέτοια απαίτηση δεν υπάρχει καθώς η αρχική εξειδίκευση του  $CE$  είναι ήδη μη γραμμική. Αυτό σημαίνει πως η εναλλακτική συνάρτηση κόστους μπορεί να έχει τη μορφή  $C(\mathbf{x}) = (\mathbf{c} + \mathbf{u})^T \mathbf{x}$ , δηλαδή να αποτελεί μια γραμμική συνάρτηση που διαφέρει από την αρχική,  $C(\mathbf{x}) = \mathbf{c}^T \mathbf{x}$ , ως προς την μεγαλύτερη κλίση της κατά  $\mathbf{u}$ .

Να σημειωθεί πως στην περίπτωση αυτή, ο τελικός πλούτος,  $W = \omega + (\mathbf{r} - \mathbf{c} - \mathbf{u})^T \mathbf{x}$ , δεν αντιπροσωπεύει πλέον πραγματικές χρηματικές αξίες, αλλά τεκμαρτές, καθώς περιλαμβάνει και μη λογιστικά κόστη, τα οποία εκφράζονται από το διάνυσμα  $\mathbf{u}$ . Συνεπώς, το ασφάλιστρο κινδύνου,  $R = \mathbf{x}^T \mathbf{S} \mathbf{x} / [\omega + (\mathbf{r} - \mathbf{c} - \mathbf{u})^T \mathbf{x}]$ , αποτελεί ένα τεκμαρτό μέτρο αύξησης του τελικού πλούτου με το οποίο ο παραγωγός καθίσταται αδιάφορος μεταξύ του στοχαστικού ποσού  $W$  και του βεβαίου ποσού  $E[W]$ .

Έστω τώρα ένα υπόδειγμα  $CE$ , το οποίο αναπαράγει τα αποτελέσματα του έτους βάσης και περιλαμβάνει την «πραγματική» συνάρτηση κόστους  $C(\mathbf{x}) = (\mathbf{c} + \mathbf{u})^T \mathbf{x}$ , και τον «πραγματικό» πίνακα  $\mathbf{S}$ :

<sup>24</sup> Υπενθυμίζεται πως για λόγους απλότητας της παρουσίασης θεωρήθηκε πως οι προσδοκίες των παραγωγών σχετικά με τις τιμές και τις αποδόσεις συμπίπτουν με τις παρατηρήσεις.

$$\max_{\mathbf{x} \geq 0} CE = \omega + (\mathbf{r} - \mathbf{c} - \mathbf{v})^T \mathbf{x} - \frac{1}{2} \frac{\mathbf{x}^T \mathbf{S} \mathbf{x}}{[\omega + (\mathbf{r} - \mathbf{c} - \mathbf{v})^T \mathbf{x}]}$$

$$\text{Υπό περιορισμούς} \quad \mathbf{A} \mathbf{x} \leq \mathbf{b} \quad [\boldsymbol{\theta}]$$

Οι αναγκαίες συνθήκες πρώτης τάξης ικανοποιούνται ακριβώς στο σημείο  $\mathbf{x}^*$ :

$$\mathbf{r} - \mathbf{c} - \mathbf{v} - \frac{\mathbf{S} \mathbf{x}^*}{[\omega + (\mathbf{r} - \mathbf{c} - \mathbf{v})^T \mathbf{x}^*]} + \frac{\mathbf{x}^{*T} \mathbf{S} \mathbf{x}^* (\mathbf{r} - \mathbf{c} - \mathbf{v})}{2[\omega + (\mathbf{r} - \mathbf{c} - \mathbf{v})^T \mathbf{x}^*]^2} - \mathbf{A}^T \boldsymbol{\theta} = 0 \quad (3.44)$$

Χρησιμοποιώντας τη λογική του ΘΜΠ, εξισώνοντας τις (3.43) και (3.44) προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση

$$\begin{aligned} \mathbf{v} + \frac{\mathbf{S} \mathbf{x}^*}{[\omega + (\mathbf{r} - \mathbf{c} - \mathbf{v})^T \mathbf{x}^*]} - \frac{\mathbf{x}^{*T} \mathbf{S} \mathbf{x}^* (\mathbf{r} - \mathbf{c} - \mathbf{v})}{2[\omega + (\mathbf{r} - \mathbf{c} - \mathbf{v})^T \mathbf{x}^*]^2} \\ = \frac{\mathbf{V} \mathbf{x}^*}{[\omega + (\mathbf{r} - \mathbf{c})^T \mathbf{x}^*]} - \frac{\mathbf{x}^{*T} \mathbf{V} \mathbf{x}^* (\mathbf{r} - \mathbf{c})}{2[\omega + (\mathbf{r} - \mathbf{c})^T \mathbf{x}^*]^2} + \boldsymbol{\lambda} \end{aligned} \quad (3.45)$$

Η (3.45) αντιστοιχεί στην εξίσωση (3.4) των κλασικών ειδικεύσεων ΘΜΠ και απαιτεί οι δυικές τιμές  $\boldsymbol{\theta}$  να είναι ίσες και στα δυο υποδείγματα, κάτι που όπως αναλύθηκε στη ενότητα 3.4 έχει αποτελέσει αντικείμενο κριτικής. Όπως και στην περίπτωση των κλασικών υποδειγμάτων ΘΜΠ με πλήρως ορισμένο πίνακα  $\mathbf{Q}$ , η εκτίμηση των  $\mathbf{v}$  και  $\mathbf{S}$  μέσω της εξίσωσης (3.45) αποτελεί ένα υποπροσδιορισμένο σύστημα  $I + I(I + 1)/2$  αγνώστων μεταβλητών και  $I$  εξισώσεων. Αυτό σημαίνει πως η εκτίμηση των παραπάνω παραμέτρων πρέπει να βασιστεί σε ένα υπόδειγμα μεγιστοποίησης της εντροπίας των υποκείμενων κατανομών των παραμέτρων αυτών.

Ξεκινώντας από τον πίνακα  $\mathbf{S}$ , όταν χρησιμοποιούνται εθνικοί (ή περιφερειακοί) μέσοι όροι μιας περιόδου  $T$  ετών για τον υπολογισμό τιμών και αποδόσεων κάθε  $i$  καλλιέργειας, οι «πραγματικές» τιμές της εκμετάλλευσης κάθε έτος  $t \in T$  θα ισούνται με το γινόμενο του (εθνικού) στατιστικού εκείνου του έτους και ενός ποσοστιαίου όρου σφάλματος, το οποίο αντιπροσωπεύει τη διαφορά μεταξύ των δυο παραπάνω τιμών. Συμβολίζοντας με  $\tilde{p}_i^t$  την εθνική μέση τιμή της καλλιέργειας  $i$  κατά το έτος  $t$ , η «πραγματική» τιμή της εκμετάλλευσης κατά το ίδιο έτος θα είναι ίση με  $p_i^t = ep_i^t \cdot \tilde{p}_i^t$ , όπου  $ep_i^t$  είναι το αντίστοιχο σφάλμα. Η ίδια διαδικασία μπορεί να ακολουθηθεί και για τις αποδόσεις των καλλιεργειών, δηλαδή  $y_i^t = ey_i^t \cdot \tilde{y}_i^t$ , όπου  $\tilde{y}_i^t$  οι εθνικές μέσες αποδόσεις και  $ey_i^t$  οι αντίστοιχοι όροι σφάλματος.

Μια εναλλακτική μέθοδος για την εκτίμηση του  $y_i^t$  είναι ο ορισμός του σε σχέση με τη μέγιστη δυνατή απόδοση που μπορεί να πετύχει μια καλλιέργεια κατά τα έτη ενδιαφέροντος. Πρόκειται για το λεγόμενο «δυναμικό παραγωγής» της καλλιέργειας,

για τον υπολογισμό του οποίου λαμβάνονται υπόψη οι διαφορετικές κλιματικές συνθήκες κάθε έτους και συνεπώς απαιτείται η χρήση ενός βιο-φυσικού υποδείγματος. Παράδειγμα δυναμικού παραγωγής αποτελεί η μέγιστη απόδοση που χρησιμοποιείται στην εξίσωση των Doorenbos και Kassam (1979) και η οποία παρουσιάστηκε στην ενότητα 2.7.1. Αν η μέγιστη απόδοση της καλλιέργειας  $i$  κατά το έτος  $t$  οριστεί ως  $Ymax_i^t$ , τότε κάθε όρος σφάλματος,  $ey_i^t$ , ορίζεται ως μια ποσοστιαία απόκλιση από το  $Ymax_i^t$ , με αποτέλεσμα η αντίστοιχη «πραγματική» απόδοση της καλλιέργειας στην εκμετάλλευση να υπολογίζεται ως  $y_i^t = ey_i^t \cdot Ymax_i^t$ .

Μια ακόμα απλούστερη μέθοδος είναι ο ορισμός του  $y_i^t$  γύρω από την παρατηρούμενη απόδοση κατά το έτος βάσης. Η επιλογή αυτή μπορεί να δικαιολογηθεί, ιδιαίτερα για τις αρδευόμενες καλλιέργειες, καθώς οι αποδόσεις συνήθως κυμαίνονται εντός ενός συγκεκριμένου εύρους τιμών, το οποίο μπορεί να θεωρηθεί πως αντιπροσωπεύει την αποδοτικότητα του εδάφους και του αρδευτικού συστήματος και γενικά τη δυνατότητα της εκμετάλλευσης να υποστηρίζει παρόμοια επίπεδα αποδόσεων. Η λογική αυτή αντιστοιχεί στην έννοια του «ενσωματωμένου κινδύνου» (Dorward, 1999) που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 1 και αναφέρεται σε καταστάσεις κινδύνου στις οποίες ο παραγωγός μπορεί να ασκήσει κάποιο βαθμό ελέγχου μέσω διαδοχικών αποφάσεων που ανανεώνονται με το πέρασμα του χρόνου (π.χ. τροποποίηση πρόγραμμα άρδευσης ή λίπανσης). Η ίδια μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί και σε μη αρδευόμενες καλλιέργειες, ωστόσο, στην περίπτωση αυτή το εύρος των πιθανών τιμών απόδοσης είναι σαφώς μεγαλύτερο, αφού ο παραγωγός δεν ασκεί έλεγχο στη χορηγούμενη ποσότητα του νερού, το οποίο αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα καθορισμού της τελικής απόδοσης<sup>25</sup>.

Σε αντίθεση με τα  $p_i^t$  και  $y_i^t$ , η επιλογή κατάλληλων υποστηρικτικών τιμών για το διάνυσμα  $\mathbf{u}$  αποτελεί μια υποκειμενική διαδικασία που εξαρτάται από τον αναλυτή. Πρόκειται για το ίδιο πρόβλημα μεροληψίας που συναντάται και στα κλασικά υποδείγματα ΘΜΠ, ειδικά στην περίπτωση ενός πλήρως ορισμένου πίνακα  $\mathbf{Q}$ . Ένας πρακτικός κανόνας που μπορεί να εφαρμοστεί είναι ο περιορισμός  $\mathbf{r} - \mathbf{c} > \mathbf{u}$ , έτσι ώστε το τεκμαρτό ακαθάριστο κέρδος κάθε καλλιέργειας να είναι θετικό. Αυτό σημαίνει πως κάθε στοιχείο  $u_i$  του  $\mathbf{u}$  ορίζεται ως  $u_i = (r_i - c_i)ey_i$ , όπου  $ey_i$  ο αντίστοιχος όρος σφάλματος.

Στα πλαίσια ενός υποδείγματος μέγιστης εντροπίας, κάθε όρος σφάλματος, ανεξάρτητα από τον τρόπο με τον οποίο ορίζεται, εκφράζεται ως η προσδοκώμενη τιμή μιας άγνωστης διακριτής κατανομής (διανύσματος) πιθανοτήτων  $\mathbf{pr}_i^t = [pr_{i1}^t, pr_{i2}^t, \dots, pr_{iK}^t]$

<sup>25</sup> Ο παραγωγός δεν ασκεί κανένα είδος ελέγχου έναντι ειδικών καιρικών συνθηκών ή άλλων καταστάσεων που οδηγούν σε μεγάλες απώλειες παραγωγής. Παρόμοιες περιπτώσεις, οι οποίες αντιπροσωπεύουν καταστάσεις «μη ενσωματωμένου κινδύνου», δεν λαμβάνονται υπόψη γιατί συνήθως οι παραγωγοί αποζημιώνονται για το απολεσθέν εισόδημα, με αποτέλεσμα ο τελικός τους πλούτος να μένει πρακτικά ανεπηρέαστος.

και  $\mathbf{py}_i^t = [\pi y_{i1}^t, \pi y_{i2}^t, \dots, \pi y_{iK}^t]$  που αντιστοιχεί σε ένα διάνυσμα υποστηρικτικών τιμών  $\mathbf{zp}_i = [zp_{i1}, zp_{i2}, \dots, zp_{iK}]$  και  $\mathbf{zy}_i = [zy_{i1}, zy_{i2}, \dots, zy_{iK}]$ , για τιμές και αποδόσεις αντίστοιχα. Παρομοίως, η διακριτή κατανομή πιθανότητας κάθε στοιχείου  $v_i$  του διανύσματος  $\mathbf{v}$  εκφράζεται ως  $\mathbf{pv}_i = [\pi v_{i1}, \pi v_{i2}, \dots, \pi v_{iK}]$  και οι υποστηρικτικές τιμές ως  $\mathbf{zv}_i = [zv_{i1}, zv_{i2}, \dots, zv_{iK}]$ . Υποθέτοντας πως ο αρχικός πίνακας  $\mathbf{V}$  είναι γνωστός (δηλαδή μπορεί να υπολογιστεί από εθνικούς ή περιφερειακούς μέσους όρους τιμών και αποδόσεων), το υπόδειγμα μέγιστης εντροπίας μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$\max H(\pi p_{ik}^t, \pi y_{ik}^t, \pi v_{ik}) = - \sum_{i,t,k} \pi p_{ik}^t \ln(\pi p_{ik}^t) - \sum_{i,t,k} \pi y_{ik}^t \ln(\pi y_{ik}^t) - \sum_{i,k} \pi v_{ik} \ln(\pi v_{ik})$$

$$\text{Υπό περιορισμούς} \quad p_i^t = ep_i^t \cdot \tilde{p}_i^t \quad y_i^t = ey_i^t \cdot \tilde{y}_i^t \quad q_i = (r_i - c_i)ev_i$$

$$\sum_{k=1}^K zp_{ik} \cdot \pi p_{ik}^t = ep_i^t \quad \sum_{k=1}^K \pi p_{ik}^t = 1 \quad \pi p_{ik}^t \geq 0$$

$$\sum_{k=1}^K zy_{ik} \cdot \pi y_{ik}^t = ey_i^t \quad \sum_{k=1}^K \pi y_{ik}^t = 1 \quad \pi y_{ik}^t \geq 0$$

$$\sum_{k=1}^K zv_{ik} \cdot \pi v_{ik} = ev_i \quad \sum_{k=1}^K \pi v_{ik} = 1 \quad \pi v_{ik} \geq 0$$

$$\mu_i = \frac{1}{T} \sum_t p_i^t y_i^t \quad s_i^2 = \frac{1}{T-1} \sum_t (p_i^t y_i^t - \mu_i)^2$$

$$s_{ij} = \frac{1}{T-1} \sum_t (p_j^t y_j^t - \mu_j)(p_i^t y_i^t - \mu_i)$$

$$\mathbf{v} + \frac{\mathbf{Sx}^*}{[\omega + (\mathbf{r} - \mathbf{c} - \mathbf{u})^T \mathbf{x}^*]} - \frac{\mathbf{x}^{*T} \mathbf{Sx}^* (\mathbf{r} - \mathbf{c} - \mathbf{u})}{2[\omega + (\mathbf{r} - \mathbf{c} - \mathbf{u})^T \mathbf{x}^*]^2}$$

$$= \frac{\mathbf{Vx}^*}{[\omega + (\mathbf{r} - \mathbf{c})^T \mathbf{x}^*]} - \frac{\mathbf{x}^{*T} \mathbf{Vx}^* (\mathbf{r} - \mathbf{c})}{2[\omega + (\mathbf{r} - \mathbf{c})^T \mathbf{x}^*]^2} + \lambda$$

όπου με  $H$  συμβολίζεται το μέτρο της εντροπίας,  $\mu_i$  είναι η μέση ακαθάριστη πρόσδοδος της  $i$  δραστηριότητας σε μια περίοδο  $T$  ετών,  $s_i^2$  είναι η αντίστοιχη διακύμανση (τα διαγώνια στοιχεία του πίνακα  $\mathbf{S}$ ) και  $s_{ij}$  η συνδιακύμανση των προσόδων των  $i$  και  $j$  δραστηριοτήτων (τα εκτός διαγωνίου στοιχεία του  $\mathbf{S}$ ). Η μεγιστοποίηση της εντροπίας του παραπάνω συστήματος οδηγεί σε εκτιμήσεις των  $\mathbf{v}$  και  $\mathbf{S}$  που επιτρέπουν τη ρύθμιση του υποδείγματος  $CE$ .

Να σημειωθεί πως σε περίπτωση που το υφιστάμενο πλαίσιο αγροτικής πολιτικής ορίζει τη λήψη ενισχύσεων (όπως για παράδειγμα προ της ενδιάμεσης αναθεώρησης

της ΚΑΠ το 2003), τότε το ακαθάριστο κέρδος κάθε καλλιέργειας υπολογίζεται ως  $g_i = (p_i + h_i)y_i + \zeta_i - c_i$ , όπου  $h_i$  οι επιδοτήσεις στην παραγωγή και  $\zeta_i$  οι στρεμματικές ενισχύσεις. Αυτό σημαίνει πως οι όροι διακύμανσης και συνδιακύμανσης των πινάκων  $\mathbf{V}$  και  $\mathbf{S}$  υπολογίζονται ως

$$Var(g_i) = Var(p_i y_i) + h_i^2 Var(y_i) + 2h_i Cov(p_i y_i, y_i) \quad (3.46)$$

και

$$Cov(g_i, g_j) = Cov(p_i y_i, p_j y_j) + h_i h_j Cov(y_i, y_j) + h_i Cov(y_i, p_j y_j) + h_j Cov(p_i y_i, y_j) \quad (3.47)$$

Από τις εξισώσεις (3.46) και (3.47) γίνεται φανερό πως οι πίνακες  $\mathbf{V}$  και  $\mathbf{S}$  εξαρτώνται μόνο από τα,  $p_i$ ,  $y_i$  και  $h_i$ , ή αλλιώς από την ακαθάριστη πρόσοδο των καλλιεργειών αλλά χωρίς σε αυτές να συμπεριλαμβάνονται οι στρεμματικές ενισχύσεις. Ο συγκεκριμένος τρόπος έκφρασης των διακυμάνσεων και συνδιακυμάνσεων των ακαθάριστων κερδών απομονώνει την επίδραση κάθε συστατικού στοιχείου του  $g_i$  στους  $\mathbf{V}$  και  $\mathbf{S}$  και συνεπώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση σεναρίων που αφορούν σε σημαντικές αλλαγές του πλαισίου αγροτικής πολιτικής. Για παράδειγμα, αν η ανάλυση αφορά σε μια ελληνική εκμετάλλευση για οποιοδήποτε έτος μέχρι το 2005 (τελευταίο έτος για το οποίο η ΚΑΠ προέβλεπε επιδοτήσεις στην παραγωγή  $h_i \geq 0$ ), οι πίνακες  $\mathbf{V}$  και  $\mathbf{S}$  θα αφορούν σε τιμές και αποδόσεις των προηγούμενων ετών και θα αποτελούνται από στοιχεία  $Var(g_i)$  και  $Cov(g_i, g_j)$ , όπως αυτά ορίζονται από τις εξισώσεις (3.46) και (3.47). Αντίθετα, σε ένα σενάριο πρόβλεψης για οποιοδήποτε έτος μετά το 2006 (πρώτο έτος εφαρμογής της αναθεωρημένης ΚΑΠ και της κατάργησης των επιδοτήσεων στην παραγωγή  $h_i = 0$ ), οι όροι διακυμάνσεων και συνδιακυμάνσεων απλοποιούνται σε  $Var(g_i) = Var(p_i y_i)$  και  $Cov(g_i, g_j) = Cov(p_i y_i, p_j y_j)$ .

Η προηγούμενη συζήτηση φανερώνει μια σημαντική υπόθεση στην οποία στηρίζεται το υπόδειγμα οικονομικού κινδύνου που αναπτύσσεται στην παρούσα ενότητα: για δεδομένες (γνωστές με βεβαιότητα) ενισχύσεις και μεταβλητές δαπάνες κατά το έτος  $T + 1$ , το άριστο σχέδιο παραγωγής της εκμετάλλευσης εξαρτάται από την εμπειρία που αποκόμισε ο παραγωγός κατά τα προηγούμενα  $T$  έτη σχετικά με τις αποδόσεις των καλλιεργειών και τις τιμές πώλησης του τελικού προϊόντος. Αυτό υποθέτει με τη σειρά του πως κάθε  $i$  δραστηριότητα εμφανιζόταν στο σχέδιο παραγωγής της εκμετάλλευσης κατά τα προηγούμενα  $T$  χρόνια, ενώ οι επιτευχθείσες τιμές και αποδόσεις εκφράζονται από τον πίνακα  $\mathbf{S}$ .

Σε βάσεις διαστρωματικών δεδομένων, η ύπαρξη μιας δραστηριότητας σε προηγούμενα σχέδια παραγωγής φυσικά δεν είναι δυνατό να επαληθευτεί. Αυτό όμως δε μεταβάλλει



την ερμηνεία του πίνακα  $\mathbf{S}$ , γιατί ακόμα και αν μια δραστηριότητα εμφανίζεται για πρώτη φορά κατά το έτος βάσης (δηλαδή στο υφιστάμενο-παρατηρούμενο από τον αναλυτή σχέδιο παραγωγής), οι παραπάνω παράμετροι μπορεί να θεωρηθεί πως εκφράζουν την προσωπική εκτίμηση του παραγωγού για τις τιμές και αποδόσεις της εν λόγω δραστηριότητας αν αυτή εμφανιζόταν στο σχέδιο παραγωγής της εκμετάλλευσης κατά τα προηγούμενα έτη. Σε κάθε περίπτωση, ο  $\mathbf{S}$  αναφέρεται σε διαφορετικές «καταστάσεις φύσης» (states of nature) που έχουν ως αποτέλεσμα τη διακύμανση της ακαθάριστης προσόδου της εκμετάλλευσης και συνεπώς εκφράζει την αβεβαιότητα της παραγωγικής διαδικασίας. Έτσι, η χρήση είτε ιστορικών δεδομένων από εθνικούς μέσους όρους (όπως στην περίπτωση του πίνακα  $\mathbf{V}$ ) είτε «παρατηρούμενων στην εκμετάλλευση» αποδόσεων και τιμών (όπως για τον πίνακα  $\mathbf{S}$ ) δεν είναι παρά ένας τρόπος εξειδίκευσης  $T$  διαφορετικών καταστάσεων φύσης.

### 3.8 Επέκταση του ΘΜΠ σε μη παρατηρούμενες δραστηριότητες

Ένα ενδιαφέρον χαρακτηριστικό της μεθόδου ρύθμισης που παρουσιάστηκε στις προηγούμενες παραγράφους είναι πως επιτρέπει την εφαρμογή μιας απλής υπολογιστικής διαδικασίας για την ενσωμάτωση στον αλγόριθμο του ΘΜΠ δραστηριοτήτων που δεν παρατηρούνται στο σχέδιο παραγωγής μιας εκμετάλλευσης κατά το έτος βάσης. Η διαδικασία αυτή στηρίζεται στη λογική του μικρού αριθμού  $\varepsilon$  που χρησιμοποιείται στην πρώτη φάση όλων των υποδειγμάτων ΘΜΠ. Ειδικότερα, μπορεί θεωρηθεί πως η έκταση κάθε μη παρατηρούμενης δραστηριότητας ισούται ακριβώς με  $\varepsilon$ , με αποτέλεσμα να πρόκειται για μια «εικονική» δραστηριότητα που όμως περιλαμβάνεται στο (επαυξημένο) διάνυσμα  $\bar{\mathbf{x}}^*$  των παρατηρούμενων δραστηριοτήτων. Το τελευταίο έχει διάσταση  $N \times 1$  και μπορεί να διαμεριστεί σε ένα  $I \times 1$  διάνυσμα πραγματικών δραστηριοτήτων και σε ένα  $(N - I) \times 1$  εικονικών δραστηριοτήτων<sup>26</sup>.

Το υπόδειγμα που χρησιμοποιείται στην πρώτη φάση του ΘΜΠ με τους επιπλέον περιορισμούς ρύθμισης θα αναπαράγει το  $\bar{\mathbf{x}}^*$  και θα δώσει ένα διάνυσμα δυικών τιμών  $\lambda$ , το οποίο πιθανώς να αφορά και σε εικονικές δραστηριότητες. Η λέξη «πιθανώς» χρησιμοποιείται εσκεμμένα, καθώς, όπως αναλύθηκε στην ενότητα 3.2, μόνο οι «προτιμώμενες» δραστηριότητες χαρακτηρίζονται από θετικές δυικές τιμές  $\lambda$  (ο περιορισμός ρύθμισης είναι γι' αυτές δεσμευτικός). Το αν μια δραστηριότητα είναι προτιμώμενη εξαρτάται από τη δομή και το είδος των περιορισμών, καθώς και από τον οικονομικό συντελεστή της δραστηριότητας στην αντικειμενική συνάρτηση (ακαθάριστο κέρδος ανά στρέμμα,  $g_n$ ). Έτσι, η τελική τιμή της  $n$  προτιμώμενης δραστηριότητας (με  $n \in N$ ) κατά την επίλυση του αρχικού υποδείγματος θα ισούται με  $x_n^*(1 + \varepsilon)$ . Σε αντίθετη περίπτωση, η τι-

<sup>26</sup> Υπενθυμίζεται πως το αρχικό διάνυσμα  $\mathbf{x}^*$  των παρατηρούμενων δραστηριοτήτων είχε διάσταση  $I \times 1$ .

μής της θα ισούται με  $x_n^*(1 - \kappa_n \varepsilon)$ , όπου  $\kappa_n$  μια παράμετρος η οποία εξαρτάται από τον αριθμό και το τελικό επίπεδο όλων των υπολοίπων δραστηριοτήτων. Αν μια εικονική δραστηριότητα είναι ταυτόχρονα και προτιμώμενη, η τελική της τιμή θα ισούται με  $\varepsilon(1 + \varepsilon)$ , ενώ διαφορετικά θα ισούται είτε με  $\varepsilon(1 - \kappa_n \varepsilon)$ , είτε με μηδέν, αν  $\kappa_n \geq 1/\varepsilon$ , λόγω του περιορισμού μη αρνητικότητας της μεταβλητής  $\mathbf{x}$ . Αυτό σημαίνει πως μια εικονική, μη προτιμώμενη δραστηριότητα στην πρώτη φάση του ΘΜΠ θα παίρνει πάντα μηδενική τιμή αφού το  $\varepsilon$  είναι ένας πολύ μικρός αριθμός.

Η δεύτερη φάση της προτεινόμενης μεθόδου ρύθμισης που παρουσιάστηκε στις προηγούμενες παραγράφους στηρίζεται στην (3.45) για την εκτίμηση των αγνώστων παραμέτρων  $\mathbf{v}$  και  $\mathbf{S}$ , οι οποίες όμως πλέον περιέχουν το σύνολο των  $N$  δραστηριοτήτων (παρατηρούμενες και εικονικές). Η εξίσωση (3.45) προσφέρει μια «αριθμητική σταθερότητα» παρά την ύπαρξη των εικονικών δραστηριοτήτων. Ο όρος «αριθμητική σταθερότητα» χρησιμοποιείται εδώ για να καταδείξει πως οι πολύ μικρές τιμές που λαμβάνουν οι εικονικές δραστηριότητες δεν προκαλούν προβλήματα στη διαδικασία εκτίμησης των  $\mathbf{v}$  και  $\mathbf{S}$ , καθώς το διάνυσμα  $\mathbf{x}$  αφενός εμφανίζεται και στις δυο πλευρές της εξίσωσης και αφετέρου παρουσιάζει συμμετρία σε κάθε κλασματικό όρο (ίδια τάξη μεγέθους σε αριθμητή και παρονομαστή).

Αντίθετα, σε κλασικά υποδείγματα ΘΜΠ το  $\mathbf{x}$  εμφανίζεται μόνο σε μια πλευρά της εξίσωσης (3.4), με αποτέλεσμα η προτεινόμενη διαδικασία να μην μπορεί να εφαρμοστεί. Πιο συγκεκριμένα, για  $x_n^* = \varepsilon$  η αντίστοιχη τιμή του πίνακα  $\mathbf{Q}$  (ή τιμές, όταν ο  $\mathbf{Q}$  είναι πλήρως ορισμένος) πρέπει να είναι αρκούντως μεγάλη (της ίδιας τάξης μεγέθους με το  $\varepsilon$ ) ώστε να ισχύει η (3.4). Αυτό σημαίνει πως το οριακό κόστος της εικονικής δραστηριότητας θα είναι υπερβολικά υψηλό και συνεπώς μη ρεαλιστικό. Η παραπάνω συζήτηση φανερώνει πως η αδυναμία ενσωμάτωσης μη παρατηρούμενων δραστηριοτήτων στον αλγόριθμο του ΘΜΠ αποτελεί περισσότερο ένα υπολογιστικό και λιγότερο ένα θεωρητικό πρόβλημα.

# 4 Εξειδίκευση του βιο-φυσικού υποδείγματος

---

## 4.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά η εκτίμηση συναρτήσεων απόδοσης-νερού, ακολουθώντας τη μεθοδολογία υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 2. Συγκεκριμένα, εξειδικεύονται όλες οι εξισώσεις για το βαμβάκι, τον αραβόσιτο, το σιτάρι, τη μηδική και τον καπνό (Virginia) και διατυπώνονται υποθέσεις σχετικά με τις τιμές κάποιων εξωγενών παραμέτρων (π.χ. μέγιστο βάθος ριζοστρώματος), οι οποίες επηρεάζουν τις τελικές αποδόσεις των καλλιεργειών. Επίσης εκτιμώνται δυο συναρτήσεις απόδοσης για κάθε καλλιέργεια, οι οποίες αναφέρονται σε ένα «τυπικό» αμμώδες (ελαφρό) έδαφος άνευ δομής και σε ένα έδαφος με καλή δομή (πηλώδες-μέσης σύστασης και αργιλώδες-συνεκτικό) αντίστοιχα.

Ο λόγος για τον οποίο κρίθηκε αναγκαία η εκτίμηση συνεχών συναρτήσεων απόδοσης είναι η αδυναμία ενσωμάτωσης των εξισώσεων που παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 2 απευθείας στο υπερκείμενο οικονομικό υπόδειγμα, λόγω των αριθμητικών και υπολογιστικών δυσκολιών που παρουσιάζει ένα τέτοιο εγχείρημα. Για παράδειγμα, ο ημερήσιος υπολογισμός του εδαφικού υδατικού ισοζυγίου αφορά στην πραγματικότητα σε μια σειρά από εξισώσεις διαφορών. Η βελτιστοποίηση ενός παρόμοιου συστήματος εξισώσεων διαφορών αποτελεί ένα πρόβλημα διακριτού δυναμικού προγραμματισμού, η υπολογιστική πολυπλοκότητα του οποίου είναι ανάλογη της διάρκειας της βλαστικής περιόδου και του αριθμού των καλλιεργειών που χρησιμοποιούνται ως μεταβλητές απόφασης στο υπερκείμενο στατικό βιο-οικονομικό υπόδειγμα. Αυτό με τη σειρά του αυξάνει την πολυπλοκότητα ενός βιο-οικονομικού υποδείγματος ΜΠ, χωρίς όμως να συνοδεύεται από την απαραίτητη προστιθέμενη αναλυτική αξία για το οικονομικό μέρος του υποδείγματος, αφού οι μεταβλητές που βελτιστοποιούνται μέσω της αντικειμενικής συνάρτησης (ακαθάριστο κέρδος και απόδοση καλλιεργειών) αφορούν στο τέλος της περιόδου και όχι στα ενδιάμεσα στάδια.

Μια ιδιαιτερότητα των συναρτήσεων που εκτιμήθηκαν είναι το είδος της ανεξάρτητης μεταβλητής. Ειδικότερα, στη βιβλιογραφία συναντώνται συνήθως συναρτήσεις απόδοσης ως προς το νερό άρδευσης προερχόμενες από πειραματικά δεδομένα αγρών (π.χ. Llewelyn & Featherstone, 1997; Berck & Helfand, 1990; Paris & Knapp, 1989; Hexem & Heady, 1978). Οι συναρτήσεις αυτές, ωστόσο, δύσκολα μπορούν να γενικευθούν σε τοπικό ή/και εθνικό επίπεδο, αφού αφορούν ακριβώς στις εδαφοκλιματικές συνθήκες του αγρού από τον οποίο προήλθαν. Για παράδειγμα, σε περιοχές με συχνές βροχοπτώσεις,

η βροχή μπορεί να καλύψει σημαντικό μέρος της απαιτούμενης ποσότητας νερού και συνεπώς συναρτήσεις που δεν λαμβάνουν υπόψη τη συγκεκριμένη τοπική ιδιαιτερότητα δε μπορούν να θεωρηθούν αντιπροσωπευτικές των περιοχών αυτών. Στην παρούσα διατριβή, αντίθετα, προτείνεται η εκτίμηση συναρτήσεων απόδοσης ως προς τη συνολική ποσότητα νερού,  $W$ , που δέχεται το σύστημα έδαφος-φυτό. Ειδικότερα, η συνολική ποσότητα νερού αφορά στο άθροισμα  $W = \sum_a (P_a + IR_a)$ , όπου  $P_a$  η ωφέλιμη βροχή και  $IR_a$  το ύψος της άρδευσης. Με τον τρόπο αυτό συνυπολογίζεται η επίδραση και των δυο πηγών νερού στην τελική απόδοση μιας καλλιέργειας, με αποτέλεσμα οι προκύπτουσες συναρτήσεις απόδοσης να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περιοχές με διαφορετικές εδαφοκλιματικές συνθήκες.

Όπως θα αναλυθεί και στη συνέχεια, εξαιτίας της έλλειψης συγκεκριμένων εδαφολογικών δεδομένων, πραγματοποιείται μια άσκηση προσομοίωσης που έχει ως στόχο την «παραγωγή» τιμών εδαφικών παραμέτρων με τις οποίες «τρέχει» το υπόδειγμα. Επιπλέον, τα κλιματικά δεδομένα δεν αφορούν σε ένα συγκεκριμένο έτος αλλά σε μια χρονοσειρά 31 ετών, με αποτέλεσμα να λαμβάνεται υπόψη η διακύμανση της θερμοκρασίας και κυρίως των βροχοπτώσεων (ποσοτικά και χρονικά). Έτσι, οι εκτιμώμενες συναρτήσεις λαμβάνουν υπόψη τη διακύμανση των τιμών όλων των εδαφοκλιματικών παραμέτρων που παρατηρείται στην πραγματικότητα και συνεπώς πρόκειται για γενικές συναρτήσεις κατάλληλες για βιο-οικονομικά υποδείγματα που βασίζονται σε δείγμα εκμεταλλεύσεων, των οποίων η μεν γενική τοποθεσία (π.χ. Νομός) είναι συγκεκριμένη, η δε ακριβής γεωγραφική θέση είναι άγνωστη.

## 4.2 Βλαστικές περιόδους

Το πρώτο βήμα στην αριθμητική εξειδίκευση του βιο-φυσικού υποδείγματος είναι η οριοθέτηση του καλλιεργητικού έτους σε σχέση με το αντίστοιχο ημερολογιακό και ο προσδιορισμός των σταδίων της βλαστικής περιόδου κάθε καλλιέργειας. Έτσι, η έναρξη κάθε καλλιεργητικού έτους ορίστηκε την 1 Νοεμβρίου και το τέλος της στις 31 Οκτωβρίου του επόμενου ημερολογιακού έτους. Ο συγκεκριμένος ορισμός κρίθηκε απαραίτητος λόγω των χρονικά διαφορετικών περιόδων ανάπτυξης των καλλιεργειών και επιτρέπει τη χρήση ενός κοινού χρονικού σημείου αναφοράς τόσο για τις χειμερινές όσο και για τις ανοιξιάτικες αροτραίες καλλιέργειες.

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2, τόσο η έναρξη όσο και η διάρκεια κάθε σταδίου της βλαστικής περιόδου διαφέρουν από έτος σε έτος, καθώς εξαρτώνται από τις τοπικές κλιματικές συνθήκες. Για παράδειγμα οι έντονες βροχοπτώσεις μπορούν να καθυστερήσουν τη σπορά και να οψιμίσουν την παραγωγή. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, όλες οι ημερομηνίες που σχετίζονται με την έναρξη και λήξη σταδίων της βλαστικής

περιόδου θεωρήθηκαν ως παράμετροι (σταθερές) του βιο-φυσικού υποδείγματος και καθορίστηκαν πριν την πραγματοποίηση οποιασδήποτε άσκησης προσομοίωσης (σχήμα 4.1). Παρομοίως, πειραματικά αποτελέσματα για τη μέση διάρκεια των σταδίων των καλλιεργειών που προσομοιώνονται στην παρούσα διατριβή δίνονται στον πίνακα 4.1.

**Πίνακας 4.1: Διάρκεια σταδίων βλαστικής περιόδου καλλιεργειών που αναπτύσσονται στην Ελλάδα (ημέρες)**

	Αρχικό στάδιο	Στάδιο ανάπτυξης	Στάδιο μέσης περιόδου	Τελικό στάδιο	Σύνολο
Σιτάρι <sup>1#</sup>	20	115	50	20	205
Βαμβάκι <sup>1</sup>	30	60	45	25	160
Αραβόσιτος <sup>1</sup>	25	40	60	25	150
Καπνός <sup>1*</sup>	10	20	50	15	95
Μηδική <sup>2</sup>					
1 <sup>η</sup> κοπή	10	20	20	10	60
Επόμενες κοπές	5	10	10	5	30

<sup>1</sup> Πηγή: Παπαζαφειρίου, 1999

<sup>2</sup> Πηγή: Allen *et al.*, 1998

# Τα νούμερα αυτά αφορούν σε πεδινές περιοχές. Για τις ορεινές δίνονται 20/140/50/20 (σύνολο 230).

\* Η βλαστική περίοδος ξεκινά με τη μεταφύτευση.

Η μηδική αποτελεί μια ειδική περίπτωση αροτραίας καλλιέργειας, καθώς η ετήσια απόδοση της εξαρτάται τόσο από τον αριθμό των κοπών όσο και από την παραγωγή βιομάζας στο χρονικό διάστημα μεταξύ αυτών. Συνολικά προσομοιώθηκαν 5 κοπές μηδικής, κάθε μια από τις οποίες λογίστηκε ως μια ξεχωριστή καλλιέργεια με προκαθορισμένη βλαστική περίοδο που περιλαμβάνει τα συνήθη 4 τέσσερα στάδια ανάπτυξης. Ειδικότερα, όπως προτείνεται από τους Allen *et al.* (1998), το χρονικό διάστημα από τη σπορά έως την πρώτη κοπή έχει διάρκεια 60 ημέρες και για τον υπολογισμό του  $Kc_{ini}$  και των φυτικών συντελεστών των υπολοίπων σταδίων ( $Kc_{dev}$ ,  $Kc_{mid}$ ,  $Kc_{end}$ ) χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις που περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 2. Αντίθετα, μετά την πρώτη κοπή και για κάθε επόμενη, το  $Kc_{ini}$  θεωρείται ίσο με 0.4, αφού πλέον δεν προσομοιώνεται το φύτρωμα του σπόρου και η ανάπτυξη του ριζιδίου. Οι υπόλοιποι φυτικοί συντελεστές υπολογίζονται σύμφωνα με τα προβλεπόμενα.



θερμοκρασίες που παρατηρούνται κατά την περίοδο πριν την πρώτη κοπή της μηδικής, οι οποίες περιορίζουν το ρυθμό ανάπτυξης της ξηράς ουσίας της καλλιέργειας (σε αντίθεση, για παράδειγμα, με τις θερμοκρασίες του καλοκαιριού, ήτοι μετά την τρίτη κοπή).

### 4.3 Εδαφοκλιματικά δεδομένα

Ξεκινώντας από τα κλιματικά δεδομένα, χρησιμοποιήθηκε η βάση δεδομένων της ECA&D (European Climate Assessment & Dataset<sup>27</sup>) που προσφέρει ημερήσιες μετρήσεις για την περίοδο 1976-2009, από μετεωρολογικούς σταθμούς εγκατεστημένους σε διάφορες περιοχές της Ευρώπης και της Ελλάδας. Οι μετρήσεις αυτές περιλαμβάνουν ύψος βροχόπτωσης, μέση, μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία, μέση σχετική υγρασία και ποσοστό νέφωσης και μπορούν να χαρακτηριστούν ως οι ελάχιστες απαιτούμενες για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς με τη συνδυασμένη μέθοδο Penman-Monteith κατά FAO-56. Για τις ανάγκες της παρούσας διατριβής επιλέχθηκε ο σταθμός Λάρισας<sup>28</sup>, από τον οποίο αντλήθηκαν δεδομένα για 31 συνολικά έτη, συγκεκριμένα από το 1976 έως το 2006, αφού για τα έτη 2007-2009 τα ημερήσια δεδομένα δεν ήταν πλήρη.

Λόγω της διαθεσιμότητας ημερήσιων τιμών για τις αναγκαίες κλιματικές παραμέτρους, ο υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς ( $ET_o$ ) και κατ' επέκταση της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας ( $ET_c$ ) και της προσαρμοσμένης τιμής αυτής ( $ET_{c_{adj}}$ ) πραγματοποιήθηκε σε ημερήσια βήματα προσφέροντας έτσι την απαραίτητη λεπτομέρεια στην εκτίμηση των συνολικών απωλειών της καλλιέργειας σε νερό κατά τη διάρκεια της βλαστικής της περιόδου. Μια παράμετρος που δεν περιλαμβάνεται στη βάση δεδομένων της ECA&D (τουλάχιστον για την Ελλάδα) είναι ημερήσιες μετρήσεις της ταχύτητας του αέρα,  $u_z$ . Σε ανάλογες περιπτώσεις, οι Allen *et al.* (1998) προτείνουν τη χρήση μιας τυπικής μέσης τιμής  $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Ωστόσο, μετά από υπολογιστικά πειράματα εκτιμήθηκε πως η συγκεκριμένη τιμή του ανέμου είναι υψηλή για τις ελληνικές συνθήκες, καθώς οδηγεί σε υπερβολικά υψηλές τιμές της  $ET_o$  ( $10\text{-}11 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ ), ιδιαίτερα τους θερμούς μήνες του καλοκαιριού. Για το λόγο αυτό υιοθετήθηκε μια τιμή ταχύτητας αέρα  $1.25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , ώστε η μέγιστη τιμή της  $ET_o$  να ανέρχεται σε  $6\text{-}7 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$  το καλοκαίρι και σε ακραίες περιπτώσεις τα  $8 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ .

Οι αναγκαίες παράμετροι για το έδαφος αφορούν στο άμεσα εξατμίσιμο νερό ( $REW$ ) και στην περιεκτικότητα εδαφικής υγρασίας στην υδατοϊκανότητα ( $\theta_{FC}$ ) και στο σημείο μόνιμης μάρανσης ( $\theta_{WP}$ ). Αντίθετα με τις κλιματικές συνθήκες, η καταγραφή των

<sup>27</sup> <http://eca.knmi.nl/dailydata/index.php>

<sup>28</sup> Γεωγραφικές συντεταγμένες: γεωγραφικό πλάτος  $39^\circ 39' 00''$  Β, γεωγραφικό μήκος  $22^\circ 27' 00''$  Α και υψόμετρο 73 m.

οποίων απαιτεί απλά την ύπαρξη ενός μετεωρολογικού σταθμού, η γνώση των παραπάνω χαρακτηριστικών του εδάφους προέρχεται από αναλυτικούς εδαφολογικούς χάρτες που η σύνθεσή τους βασίζεται σε εκτεταμένες αναλύσεις με κόστος πολλαπλάσιο από το αντίστοιχο που απαιτείται για την εγκατάσταση ενός μετεωρολογικού σταθμού. Η σημαντικότερη διαφορά, ωστόσο, που παρουσιάζουν τα χαρακτηριστικά του εδάφους σε σχέση με τις επικρατούσες κλιματικές συνθήκες είναι η μικρότερη διαφοροποίηση τους αφού ελλείπουν οι ακραίες τιμές. Παραδείγματα κλιματικών ακραίων τιμών είναι η μέγιστη θερμοκρασία του καλοκαιριού ή η ελάχιστη του χειμώνα (συνθήκες παγετού) και οι ισχυροί άνεμοι που πιθανώς επικρατούν κάποιες μέρες του έτους και επηρεάζουν την τιμή της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς. Τέτοιες ακραίες τιμές δεν παρατηρούνται στα εδαφικά χαρακτηριστικά, αφού για δεδομένους τύπους εδαφών, τιμές παραμέτρων όπως η μηχανική σύσταση, η υδατοϊκανότητα και το σημείο μάρανσης βρίσκονται εντός προκαθορισμένων αριθμητικών ορίων.

Στη βιβλιογραφία συναντά κανείς ερευνητικές εργασίες που επιχειρούν να εκτιμήσουν παραμέτρους που σχετίζονται με την υγρασία του εδάφους ως συνάρτηση άλλων εδαφικών παραμέτρων (pedotransfer functions). Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η συσχέτιση της εδαφικής υγρασίας με το «δυναμικό πίεσης»  $h$  (kPa) από τους Richards και Weaver (1944), οι οποίοι διαπίστωσαν πως το σημείο μόνιμης μάρανσης για τα περισσότερα γεωργικά εδάφη αντιστοιχεί σε ένα δυναμικό πίεσης περίπου -1500 kPa. Το δυναμικό πίεσης εκφράζει την πίεση που ασκεί το εδαφικό προφίλ στο νερό και μαζί με το «δυναμικό βαρύτητας» συνθέτουν το «ολικό δυναμικό», το οποίο ορίζεται ως η ενέργεια που απαιτείται για τη μετακίνηση μιας ποσότητας εδαφικού νερού από μια θέση σε μια άλλη<sup>29</sup>. Κατά σύμβαση, το  $h$  παίρνει αρνητικές τιμές σε ένα ακόρεστο έδαφος και τείνει προς το μηδέν όταν αυτό είναι κορεσμένο σε υγρασία. Ο λόγος είναι πως το δυναμικό πίεσης εκφράζει την άσκηση μιας μύζησης (αρνητικής πίεσης) για την υπερνίκηση των δυνάμεων που είναι υπεύθυνες για τη συγκράτηση του νερού από τα εδαφομόρια. Οι δυνάμεις αυτές είναι ισχυρότερες όταν η περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό είναι μικρή, με αποτέλεσμα η απαιτούμενη μύζηση για την υπερνίκηση τους να είναι μεγάλη (Πουλοβασίλης, 2010).

Αντίθετα με το σημείο μάρανσης, η υδατοϊκανότητα δεν αναφέρεται σε ένα μοναδικό δυναμικό πίεσης καθώς αυτό έχει βρεθεί πως εξαρτάται από τη μηχανική σύσταση του εδάφους. Ειδικότερα, η υδατοϊκανότητα αντιστοιχεί σε διαφορετικές τιμές  $h$  ανάλογα με την περιεκτικότητα του εδάφους σε άργιλο. Ενδεικτικές τιμές δυναμικού πίεσης

---

<sup>29</sup> Στην πραγματικότητα, για τον υπολογισμό του ολικού δυναμικού του εδαφικού νερού είναι απαραίτητη επίσης η γνώση του «οσμωτικού δυναμικού» (osmotic potential), το οποίο εκφράζει την πίεση λόγω της ύπαρξης διαλυτών στο εδαφικό διάλυμα. Ωστόσο, το οσμωτικό δυναμικό είναι αριθμητικά πολύ μικρό και δεν λαμβάνεται υπόψη παρά μόνο σε αλατούχα εδάφη (Ehlers & Goss, 2003).



στην υδατοϊκανότητα είναι -10 kPa για αμμώδη εδάφη, -20 kPa για μέσα εδάφη και -33 kPa για αργιλώδη εδάφη (USDA, 1991).

Μια εμπειρική σχέση εκτίμησης της εδαφικής υγρασίας για διάφορες τιμές δυναμικού πίεσης παρουσιάστηκε από τον Driessen (1986):

$$\theta(h) = \theta_0 \exp[\gamma \ln^2(10|h|)] \quad (4.1)$$

όπου  $\theta(h)$  η εδαφική υγρασία ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ) σε δυναμικό πίεσης  $h$  (kPa),  $\theta_0$  η εδαφική υγρασία στον κορεσμό ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ) και  $\gamma$  μια εδαφική σταθερά ( $\text{kPa}^{-2}$ ). Οι Danalatos *et al.* (1994) εξειδίκευσαν την (4.1) για χρήση σε εδάφη της Ελλάδας, εκφράζοντας τη σταθερά  $\gamma$  ως συνάρτηση της ποσοστιαίας (%) περιεκτικότητας αργίλου ( $CL$ ):

$$\gamma = -0.01824 + 0.0001865CL \quad (4.2)$$

$$\gamma = -0.03650 + 0.0009317CL \quad (4.3)$$

Η εξίσωση (4.2) αναφέρεται σε πηλώδη και αργιλώδη εδάφη με καλή δομή και η (4.3) σε ελαφρά εδάφη άνευ δομής. Το  $\theta_0$  μπορεί να θεωρηθεί πως αντιστοιχεί περίπου σε μηδενικό δυναμικό πίεσης και ισούται με το «πορώδες» του εδάφους. Το τελευταίο αποτελεί ένα αδιάστατο μέγεθος που εκφράζει το τμήμα του εδάφους το οποίο καταλαμβάνεται από πόρους που περιέχουν νερό και αέρα, μπορεί δε να υπολογιστεί από τη σχέση (Παπαζαφειρίου, 1999):

$$f = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_p} \quad (4.4)$$

όπου με  $f$  συμβολίζεται το πορώδες, με  $\rho_b$  η «φαινόμενη πυκνότητα» (bulk density) και με  $\rho_p$  η «πραγματική πυκνότητα» του εδάφους. Η πραγματική πυκνότητα ορίζεται ως η μάζα της μονάδας όγκου των στερεών του εδάφους ( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ), ενώ η φαινόμενη πυκνότητα ορίζεται ως η μάζα του όγκου του ξηρού εδάφους (επίσης σε  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ), στο οποίο περιλαμβάνονται τόσο τα στερεά όσο και οι πόροι, με αποτέλεσμα να ισχύει πάντα  $\rho_b < \rho_p$ . Η πραγματική πυκνότητα σε όλα τα ορυκτά γεωργικά εδάφη μπορεί να θεωρηθεί σταθερή και ίση με  $2.65 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ , οπότε το πορώδες αποτελεί συνάρτηση της φαινόμενης πυκνότητας του εδάφους, η οποία με τη σειρά της εξαρτάται από την υφή του. Έτσι τα συνεκτικά εδάφη (υψηλή περιεκτικότητα σε άργιλο) έχουν μικρότερη φαινόμενη πυκνότητα από τα ελαφριά (αμμώδη) και κατά συνέπεια παρουσιάζουν μεγαλύτερο πορώδες και υψηλότερο  $\theta_0$  (Παπαζαφειρίου, 1999).

Από τις εξισώσεις (4.1) έως (4.4) μπορούν να προκύψουν αριθμητικά η υδατοϊκανότητα και το σημείο μάρανσης κάθε εδάφους, εφόσον είναι γνωστές η περιεκτικότητα σε άρ-

γίλο και η φαινόμενη πυκνότητα του. Αυτό σημαίνει πως για τα εδάφη που προσομοιώνονται στην παρούσα διατριβή το ποσοστό της αργίλου μπορεί να θεωρηθεί πως κυμαίνεται μεταξύ 8% και 40%. Αντίθετα, η φαινόμενη πυκνότητα δεν αποτελεί αμιγώς φυσικό χαρακτηριστικό του εδάφους, καθώς η τιμή της επηρεάζεται εξίσου από τον τρόπο κατεργασίας του εδάφους που επιλέγει κάθε παραγωγός. Για παράδειγμα, μεγάλος αριθμός καλλιεργητικών επεμβάσεων, αν και σε ορισμένες περιπτώσεις κρίνεται απαραίτητος για τη βελτίωση της υφής του εδάφους, μπορεί να οδηγήσει στη συμπίεση του αυξάνοντας τη φαινόμενη πυκνότητα. Αυτό με τη σειρά του έχει δυσμενείς επιπτώσεις στην τελική παραγωγή λόγω της μείωσης του πορώδους που οδηγεί σε κακό αερισμό και μείωση της ικανότητας κατακράτησης νερού.

Ένα επιπλέον στοιχείο που απαιτείται για τον υπολογισμό του φυτικού συντελεστή του αρχικού σταδίου,  $Kc_{ini}$ , είναι το άμεσα εξατμίσιμο νερό ( $REW$ ) κάθε εδάφους. Οι μόνες πηγές πληροφόρησης στην περίπτωση αυτή είναι το έγγραφο FAO-56 (Allen *et al.*, 1998) και η βιβλιοθήκη του βιο-φυσικού υποδείγματος AquaCrop (Steduto *et al.*, 2008), στα οποία δίνονται απλά ενδεικτικές τιμές (ή εύρη τιμών) του  $REW$ . Οι τιμές αυτές αναπαράγονται στον πίνακα 4.2, μαζί με ενδεικτικές τιμές φαινόμενης πυκνότητας κάθε τύπου εδάφους.

**Πίνακας 4.2: Ενδεικτικές τιμές φαινόμενης πυκνότητας ( $\rho_b$ ) και άμεσα εξατμίσιμου ( $REW$ ) ανά κατηγορία εδάφους.**

Κατηγορία εδάφους	Υφή εδάφους	$REW$ (mm)		$\rho_b$ ( $mg \cdot m^{-3}$ ) <sup>3</sup>
		AquaCrop <sup>1</sup>	FAO-56 <sup>2</sup>	
Αμμώδεις (Ελαφρό)	Άμμος (S)	4	2-7	1.62-1.70
	Πηλοαμμώδεις (LS)	5	4-8	1.54-1.70
Πηλώδεις (Μέσης σύστασης)	Αμμώδης πηλός (SL)	7	6-10	1.43-1.64
	Αμμοαργιλώδης πηλός (SCL)	9	-	1.34-1.48
	Αργιλώδης πηλός (CL)	11	-	1.29-1.37
	Πηλός (L)	9	8-10	1.33-1.57
	Ιλυσπηλώδεις (SiL)	11	8-11	1.34-1.60
	Ιλσοαργιλώδης πηλός (SiCL)	13	8-11	1.26-1.32
Αργιλώδεις (συνεκτικό ή βαρύ)	Αμμοαργιλώδεις (SC)	10	-	1.28-1.36
	Ιλσοαργιλώδεις (SiC)	14	8-12	1.20-1.26
	Άργιλος (C)	14	8-12	1.20-1.31

<sup>1</sup> Πηγή: Βάση δεδομένων AquaCrop (Steduto *et al.*, 2008)

<sup>2</sup> Πηγή: Allen, *et al.*, 1998

<sup>3</sup> Πηγή: [http://www.pedosphere.com/resources/bulkdensity/triangle\\_US.cfm](http://www.pedosphere.com/resources/bulkdensity/triangle_US.cfm)

#### 4.4 Το μέγιστο βάθος του ριζοστρώματος

Καθώς αναπτύσσεται το ριζικό σύστημα της καλλιέργειας, η συνολική διαθέσιμη υγρασία ( $TAW$ ) αυξάνεται αφού το φυτό μπορεί σταδιακά να απορροφά νερό από ολοένα και μεγαλύτερα βάθη. Η εκτίμηση του βάθους του ριζοστρώματος,  $Zr_d$ , για κάθε μέρα  $d$  της βλαστικής περιόδου μπορεί να γίνει με γραμμική παρεμβολή όπως παρουσιάζεται στην παρακάτω εξίσωση (Allen *et al.*, 1998):

$$Zr_d = Zr_0 + \frac{d - dr_0}{dr_{max} - dr_0} (Zr_{max} - Zr_0) \quad (4.5)$$

όπου  $Zr_0$  είναι το βάθος των ενεργών ριζών κατά το φύτερωμα του σπόρου (ή τη μεταφύτευση), το οποίο λαμβάνει χώρα την ημέρα  $dr_0$ , ενώ με  $Zr_{max}$  συμβολίζεται το μέγιστο δυνατό βάθος των ενεργών ριζών που επιτυγχάνεται την ημέρα  $dr_{max}$  και μπορεί να θεωρηθεί πως αντιστοιχεί στην ημέρα της πλήρους ανάπτυξης της φυτοκόμης. Ο υπολογισμός του  $Zr_d$  ξεκινά από την ημέρα του φυτρώματος ( $dr_0$ ), το οποίο θεωρείται πως λαμβάνει χώρα 10 ημέρες μετά τη σπορά στις εαρινές καλλιέργειες και μετά από 20 στις χειμερινές.

Η εξίσωση (4.5) καθιστά απαραίτητη τη γνώση των φαινολογικών χαρακτηριστικών μιας καλλιέργειας (όπως το  $dr_{max}$ ), τα οποία όμως διαφέρουν σε κάθε περιοχή λόγω των ιδιαίτερων εδαφικών χαρακτηριστικών και κλιματικών συνθηκών. Εναλλακτικά της εξίσωσης (4.5), η οποία απαιτεί τη γνώση *a priori* του  $dr_{max}$ , προτείνεται η χρήση μιας γραμμικής σχέσης που στηρίζεται σε ένα μέσο ρυθμό επιμήκυνσης της ρίζας,  $\vartheta_r$ , μετρούμενο σε  $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ :

$$Zr_d = \min[Zr_{max}, (\vartheta_r d + Zr_0)] \quad (4.6)$$

Η εξίσωση (4.5) διαφέρει από την (4.6) καθώς η πρώτη υπολογίζει το ρυθμό αύξησης της ρίζας για δεδομένο  $dr_{max}$ , ενώ η δεύτερη υπολογίζει το  $dr_{max}$  με βάση έναν προκαθορισμένο ρυθμό αύξησης,  $\vartheta_r$ , ενδεικτικές τιμές του οποίου μπορούν να αναζητηθούν στη βιβλιογραφία. Για παράδειγμα, οι Ehlers και Goss (2003) δίνουν ένα ρυθμό επιμήκυνσης της ρίζας της βρώμης ίσο με  $2 \text{ cm}\cdot\text{d}^{-1}$ , ενώ για το βαμβάκι η Παπακώστα-Τασοπούλου (2002) ένα εύρος  $1.2$  έως  $5 \text{ cm}\cdot\text{d}^{-1}$ . Για τις ανάγκες του υποδείγματος επιλέχθηκε ο υπολογισμός του  $Zr_d$  μέσω της εξίσωσης (4.6) χρησιμοποιώντας ένα μέσο ρυθμός επιμήκυνσης  $1.5 \text{ cm}\cdot\text{d}^{-1}$ . Επίσης, το  $Zr_0$  τέθηκε ίσο με  $70 \text{ mm}$ , επιλογή που αποτελεί μια μέση τιμή του εύρους  $40\text{-}100 \text{ mm}$  που προτείνεται από τον Παπαζαφειρίου (1999).

Προφανώς, τόσο το  $\vartheta_r$  όσο και το  $Zr_{max}$  εξαρτώνται από πολυάριθμους παράγοντες, η ανάλυση των οποίων αυξάνει την πολυπλοκότητα οποιουδήποτε βιο-φυσικού υποδείγματος. Για παράδειγμα, ο ρυθμός ανάπτυξης του ριζικού συστήματος εξαρτάται, μεταξύ άλλων, από τη θερμοκρασία και το σωστό αερισμό του εδάφους, ενώ το μέγιστο βάθος της ρίζας περιορίζεται από την ύπαρξη αδιαπέραστων στρωμάτων και καθορίζεται από το επίπεδο εδαφικής υγρασίας κατά τα πρώτα στάδια της ζωής του φυτού, οπότε και λαμβάνει χώρα η ανάπτυξη του ριζικού συστήματος. Ειδικότερα, η ρίζα απορροφά το νερό από τα ανώτερα εδαφικά στρώματα κι έπειτα επεκτείνεται για να αντλήσει το νερό που βρίσκεται σε μεγαλύτερα βάθη (ακολουθεί την εδαφική υγρασία). Η

διαδικασία αυτή θα τερματιστεί όταν η υγρασία στα κατώτερα εδαφικά στρώματα κατέλθει στο σημείο μόνιμης μάρανσης, οπότε το φυτό δεν μπορεί να αντλήσει άλλο νερό. Αυτό σημαίνει πως η έλλειψη εδαφικής υγρασίας, ήδη από τα επιφανειακά στρώματα του εδάφους, θα περιορίσει την ανάπτυξη του ριζικού συστήματος. Παρομοίως, η ρίζα δεν αυξάνει σε βάθος όταν οι αρδεύσεις ή οι βροχοπτώσεις είναι συχνές και έντονες, γιατί το έδαφος επανέρχεται στην υδατοϊκανότητα του και το απαραίτητο νερό μπορεί ξανά να απορροφηθεί από μικρά βάθη. Έτσι, όταν οι επιφανειακές αυτές στρώσεις είναι υγρές κατά τα πρώτα στάδια της ζωής του φυτού, λόγω συχνών βροχών ή ποτισμάτων, το φυτό αναπτύσσει ρηχό ριζικό σύστημα και συνεπώς θα παρουσιάζει μειωμένη αντοχή σε μελλοντική πιθανή έλλειψη νερού.

Λόγω της αυξημένης πολυπλοκότητας που παρουσιάζει η προσομοίωση της ανάπτυξης του ριζικού συστήματος, έχουν αναπτυχθεί αναλυτικά υποδείγματα ειδικά για το σκοπό αυτό (π.χ. Dunbabin *et al.*, 2002). Στα περισσότερα βιο-φυσικά υποδείγματα που έχουν παρουσιαστεί τα τελευταία χρόνια (π.χ. AquaCrop), το  $Zr_{max}$  αποτελεί μια παράμετρο, η τιμή της οποίας δεν επηρεάζεται από την πορεία ανάπτυξης της καλλιέργειας και το σύστημα διαχείρισης της. Ανάλογη προσέγγιση ακολουθείται και στην παρούσα εργασία, αφού επιλέχτηκε η χρήση προκαθορισμένων τιμών για τις αρδευόμενες καλλιέργειες.

Οι Allen *et al.* (1998), βασισμένοι σε στοιχεία των Doorenbos και Pruitt (1977) δίνουν δυο ενδεικτικές τιμές του  $Zr_{max}$  για διάφορες καλλιέργειες, από τις οποίες η πρώτη προτείνεται για χρήση σε προγραμματισμό αρδεύσεων (αποφυγή εμφάνισης υδατικής καταπόνησης) και η δεύτερη σε περιπτώσεις κατά τις οποίες εμφανίζεται υδατική καταπόνηση, είτε λόγω ανεπάρκειας νερού άρδευσης, είτε λόγω προσομοίωσης μιας μη αρδευόμενης καλλιέργειας (πίνακας 4.3). Οι τιμές αυτές όμως κρίνονται υπερβολικά υψηλές, καθώς αφορούν στο μέγιστο βάθος του ριζικού συστήματος και όχι σε εκείνο του ριζοστρώματος. Στην παρούσα διατριβή, αντίθετα, το  $Zr_{max}$  θεωρείται πως αντιστοιχεί στο μέγιστο βάθος του ριζοστρώματος και όχι στο μέγιστο βάθος μεμονωμένων ριζών, οι οποίες μπορεί σε κάποιες περιπτώσεις να φτάσουν ή και να ξεπεράσουν τα 2 m σε καλλιέργειες όπως το βαμβάκι, ο αραβόσιτος και το σιτάρι. Ειδικότερα, το ριζόστρωμα αναφέρεται στο ανώτερο τμήμα του ριζικού συστήματος που περιέχει το 80-90% των ενεργών ριζών και από το οποίο τα φυτά αντλούν το μεγαλύτερο μέρος του νερού (Παπαζαφειρίου, 1999).

**Πίνακας 4.3: Μέγιστο βάθος ριζοστρώματος,  $Zr_{max}$  (m)**

	FAO	Επιλογή
Σιτάρι	1.5-1.8 <sup>1</sup>	Υπολογίζεται ενδογενώς
Βαμβάκι	1.0-1.7 <sup>1</sup>	0.70
Αραβόσιτος	1.0-1.7 <sup>1</sup>	0.70
Μηδική	1.0-2.0 <sup>1</sup>	1.00
Καπνός	0.80 <sup>2</sup>	0.55

<sup>1</sup> Πηγή: Allen *et al.*, 1998

<sup>2</sup> Πηγή: [http://www.fao.org/nr/water/cropinfo\\_tobacco.html](http://www.fao.org/nr/water/cropinfo_tobacco.html)

Για τη μέτρηση του μέγιστου βάθους του ριζοστρώματος, προκειμένου αυτό να χρησιμοποιηθεί σε προγραμματισμό αρδεύσεων, οι Driessen και Konijn (1992) χρησιμοποιούν την έννοια του *ισοδύναμου βάθους ριζοστρώματος* (equivalent rooting depth). Συγκεκριμένα, οι ρίζες δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες σε όλο το εδαφικό προφίλ, γ' αυτό και συχνά αντί του βάθους τους μετράται η πυκνότητα τους σε συγκεκριμένα βάθη (δηλαδή το συνολικό μήκος των ριζών ανά μονάδα όγκου εδάφους, μετρούμενο σε  $\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ ). Έτσι, το ισοδύναμο βάθος του ριζοστρώματος είναι το βάθος εκείνο στο οποίο περιέχεται το μεγαλύτερο ποσοστό του ριζικού συστήματος και άρα οι ρίζες θεωρείται πως είναι σχεδόν ομοιόμορφα κατανεμημένες. Το ισοδύναμο βάθος του ριζοστρώματος μπορεί να υπολογιστεί εμπειρικά ως το 70% των τιμών του  $Zr_{max}$  που εμφανίζονται στη βιβλιογραφία. Οι τελικές επιλεχθείσες τιμές του μέγιστου βάθους του ριζοστρώματος παρουσιάζονται στη δεύτερη στήλη του πίνακα 4.3.

Σε αντίθεση με τις αρδευόμενες καλλιέργειες, η εκτίμηση του πιθανού μέγιστου βάθους του ριζοστρώματος του σιταριού (ξηρικό) αποτελεί μια πολύπλοκη υπόθεση, καθώς εξαρτάται από το ύψος της βροχόπτωσης κατά την ανάπτυξη της καλλιέργειας, περίοδος που οριοθετείται χρονικά από την αρχή της καλλιεργητικής περιόδου, έως το τέλος Φεβρουαρίου. Μια απλή μέθοδος εκτίμησης του μέγιστου βάθους του ριζοστρώματος του σιταριού παρουσιάζεται στη συνέχεια. Ειδικότερα, η ωφέλιμη βροχή,  $P$ , από τον Οκτώβριο έως το τέλος του Φεβρουαρίου (περίοδος ανθοφορίας) θα διαμορφώνει το συνολικό διαθέσιμο εδαφικό νερό,  $TAW_{max}$  (η μέγιστη τιμή του  $TAW$  που επιτυγχάνεται όταν το ριζόστρωμα φτάσει το μέγιστο βάθος του). Αυτό σημαίνει πως το  $P$  περιλαμβάνει και τις βροχές του τέλους της προηγούμενης καλλιεργητικής περιόδου (συγκεκριμένα από 1-31 Οκτωβρίου σύμφωνα με το σχήμα 4.1). Έτσι, το  $Zr_{max}$  μπορεί να εκτιμηθεί από την ακόλουθη εξίσωση:

$$Zr_{max} = \frac{P}{1000(\theta_{FC} - \theta_{WP})} \quad (4.7)$$

Η εξίσωση (4.7) προκύπτει από την εξίσωση (2.25), αντικαθιστώντας το  $TAW$  με το  $P$  και λύνοντας ως προς  $Zr$ , ενώ υποδηλώνει πως το  $Zr_{max}$  για τις ξηρικές καλλιέργειες

λαμβάνει διαφορετική τιμή σε κάθε τύπο εδάφους. Ειδικότερα, εφόσον το συνολικό διαθέσιμο νερό σε κάθε χρονική περίοδο είναι δεδομένο (διαμορφώνεται από το  $P$ ), το μέγιστο βάθος του ριζοστρώματος θα εξαρτάται από τη δυνατότητα κατακράτησης νερού από το έδαφος, δηλαδή τη διαφορά μεταξύ  $\theta_{FC}$  και  $\theta_{WP}$ . Τα εδάφη άνευ δομής (αμμώδη – ελαφρά) έχουν τη μικρότερη δυνατότητα κατακράτησης νερού, με συνέπεια το υπολογιζόμενο μέγιστο βάθος του ριζοστρώματος από τη σχέση (4.7) να είναι μεγαλύτερο σε σχέση με τα αργιλώδη εδάφη. Να σημειωθεί πως στην πραγματικότητα οι μεγαλύτεροι πόροι που σχηματίζονται ανάμεσα στα εδαφομόρια των ελαφρών εδαφών επιτρέπουν την ευκολότερη διείσδυση των ριζών, αλλά η διείσδυση αυτή ταυτόχρονα περιορίζεται από τη μικρή διαθεσιμότητα εδαφικής υγρασίας. Έτσι, τις ιδανικότερες συνθήκες για την ανάπτυξη των ριζών προσφέρουν τα μέσης σύστασης (πηλώδη) εδάφη τα οποία έχουν υψηλότερη δυνατότητα κατακράτησης νερού από τα αμμώδη αλλά ταυτόχρονα υψηλότερο πορώδες από τα βαρύτερα αργιλώδη εδάφη (Ehler & Goss, 2003). Ωστόσο, η αριθμητική εξειδίκευση του  $Zr_{max}$  πέρα από τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εξίσωση (4.7) βρίσκεται εκτός του αντικείμενου της παρούσας διατριβής. Εξάλλου, πληροφορίες για τις τιμές εδαφικών παραμέτρων σε επίπεδο εκμετάλλευσης συνήθως δεν είναι διαθέσιμες (και δεν θα μπορούσε να είναι λόγω της εδαφικής ετερογένειας). Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται η γενική κατηγορία των «εδαφών καλής δομής», η οποία όμως δεν διαχωρίζει μεταξύ πηλωδών και αργιλωδών εδαφών και συνεπώς δεν επιτρέπει τη διατύπωση επιπλέον υποθέσεων σχετικά με το πραγματικό βάθος του ριζικού συστήματος σε διαφορετικά εδάφη.

Στο σημείο αυτό πρέπει να διευκρινιστεί πως μια σημαντική υπόθεση στην οποία στηρίζεται η μεθοδολογία προγραμματισμού αρδεύσεων που παρουσιάζεται στο έγγραφο FAO-56 (Allen *et al.*, 1998), αφορά στην αρχική υδατική κατάσταση του εδάφους. Συγκεκριμένα, θεωρείται πως το έδαφος βρίσκεται στην υδατοϊκανότητα του ( $\theta_{FC}$ ) και συνεπώς δεν λαμβάνεται υπόψη κάποιο αρχικό έλλειμμα εδαφικής υγρασίας. Αντίθετα, αν υποθεθεί πως η αρχική περιεκτικότητα υγρασίας του εδάφους ισούται με  $\theta_{WP}$ , το υδατικό έλλειμμα στην αρχή της βλαστικής περιόδου μπορεί να υπολογιστεί για τις εαρινές (αρδευόμενες) καλλιέργειες με τη βοήθεια της συνολικής ποσότητας βροχής,  $P$ , κατά το διάστημα από την αρχή της καλλιεργητικής περιόδου έως τη σπορά (Βλέπε σχήμα 4.1). Αφού το  $P$  αποτελεί την υδατική εισροή στο σύστημα, το αρχικό έλλειμμα εδαφικής υγρασίας κατά τη σπορά της καλλιέργειας θα ισούται με  $Dr_0 = \max[0, (TAW_{max} - P)]$ . Για την κάλυψη αυτού του ελλείμματος στις αρδευόμενες καλλιέργειες, η συνήθης γεωργική πρακτική περιλαμβάνει ένα πότισμα ύψους ακριβώς  $Dr_0$  πριν ή μετά τη σπορά (προάρδευση) για την υποβοήθηση της βλάστησης του σπόρου.

Η ίδια μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί και για τις ξηρικές καλλιέργειες (σιτάρι), με τη διαφορά πως το  $P$  αναφέρεται στις βροχές του φθινοπώρου έως τη σπορά και ειδικότερα από 1 Οκτωβρίου έως 14 Νοεμβρίου (σύμφωνα με τις ημερομηνίες που παρουσιάζονται στο σχήμα 4.1). Το συνολικό ύψος της βροχής κατά την περίοδο αυτή συνήθως είναι αρκετό για να επαναφέρει τα επιφανειακά εδαφικά στρώματα στην υδατοϊκανότητα τους, επιτρέποντας έτσι τη σπορά. Σε περίπτωση όμως που  $Dr_0 > 0$ , το ημερήσιο υδατικό ισοζύγιο πρέπει να προσαρμοστεί κατάλληλα αφού το έλλειμμα αυτό δεν μπορεί να καλυφθεί με προάρδευση. Συγκεκριμένα, λόγω της υπόθεσης περί ομογένειας του εδάφους σε όλο το βάθος του, το  $Dr_0$  συνεπάγεται ένα αρχικό επίπεδο εδαφικής υγρασίας  $\theta_\alpha$ , τέτοιο ώστε  $\theta_{WP} \leq \theta_\alpha \leq \theta_{FC}$ . Επίσης, για κάθε 1 mm του ριζοστρώματος, το  $Dr_0$  θα ισοδυναμεί με ένα έλλειμμα υγρασίας ίσο με  $Dr_0/Zr_{max}$  mm. Η ύπαρξη του  $Dr_0$  σημαίνει επίσης πως ένας ρυθμός επιμήκυνσης της ρίζας  $\vartheta_r$  θα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της διαθέσιμης υγρασίας (ή αλλιώς το ύψος του διαθέσιμου προς πρόσληψη νερού) κατά  $\Delta TAW/\Delta d = 1000(\theta_\alpha - \theta_{WP})\vartheta_r$  mm και όχι κατά  $1000(\theta_{FC} - \theta_{WP})\vartheta_r$  mm, όπως θα συνέβαινε αν το έδαφος ήταν εξαρχής στην υδατοϊκανότητα του. Αλγεβρικά αυτό ισοδυναμεί με την προσθήκη ενός επιπλέον όρου στο ημερήσιο υδατικό ισοζύγιο που εκφράζει μια αύξηση του ελλείμματος εδαφικής υγρασίας κατά  $(Dr_0/Zr_{max})\vartheta_r$ , έως ότου  $Zr_d = Zr_{max}$ .

Σε περίπτωση βροχόπτωσης την  $d$  ημέρα ( $P_d$ ), το βρόχινο νερό θα διαχυθεί σε όλο το βάθος του ριζοστρώματος, με αποτέλεσμα το επίπεδο εδαφικής υγρασίας να αυξηθεί. Αυτό σημαίνει πως η βροχή θα επιδράσει σε όλο το  $Zr_{max}$  και όχι μόνο στο  $Zr_d$ , στο βάθος δηλαδή όπου θα έχει φτάσει η ρίζα την ημέρα  $d$ . Έτσι, μέχρι το  $Zr_d$ , η βροχή θα μειώσει το έλλειμμα υγρασίας κατά  $(P_d/Zr_{max})Zr_d$  και το υπολογισθέν έλλειμμα  $Dr_d$  την ημέρα  $d$  θα ισούται με

$$Dr_d = Dr_{d-1} + ETc_d + \frac{Dr_0}{Zr_{max}}\vartheta_r - \frac{P_d}{Zr_{max}}Zr_d \quad (4.8)$$

για το οποίο ισχύει  $0 \leq Dr_d \leq TAW_d$ , όπου  $TAW_d = 1000(\theta_{FC} - \theta_{WP})Zr_d$ . Παράλληλα, για βάθη από  $Zr_d$  μέχρι  $Zr_{max}$  το έλλειμμα υγρασίας θα μειωθεί κατά  $(P_d/Zr_{max})(Zr_{max} - Zr_d)$ . Αν το αρχικό έλλειμμα για τα βάθη αυτά ήταν ίσο με  $(Dr_0/Zr_{max})(Zr_{max} - Zr_d)$ , το νέο έλλειμμα,  $Dr_0^N$ , υπολογίζεται ως εξής

$$Dr_0^N = \frac{Dr_0 - P_d}{Zr_{max}}(Zr_{max} - Zr_d) \quad (4.9)$$

Από την (4.9) προκύπτει πως αν  $Dr_0 > P_d$ , τότε κάθε επόμενη αύξηση του μήκους της ρίζας θα αντιστοιχεί σε ένα επιπλέον «προσαρμοσμένο» έλλειμμα  $[(Dr_0 - P_d)/Zr_{max}]\vartheta_r$ , δηλαδή μικρότερο από εκείνο που παρατηρούνταν πριν τη βροχή. Αντίθετα, αν

$Dr_0 \leq P_d$ , οι εδαφικές στρώσεις από  $Zr_d$  έως  $Zr_{max}$  επανέρχονται στην υδατοϊκανότητα τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να απαλείφεται ο όρος  $(Dr_0/Zr_{max})\theta_r$  από την εξίσωση (4.8) για τα υδατικά ισοζύγια από την ημέρα  $d + 1$  έως την  $d_{r_{max}}$ , δηλαδή την ημέρα κατά την οποία επιτυγχάνεται το  $Zr_{max}$ . Στην περίπτωση αυτή, η βροχή επιδρά πλέον μόνο μέχρι το βάθος  $Zr_d$ , και συνεπώς ο όρος  $(P_d/Zr_{max})Zr_d$  αντικαθίσταται από το  $P_d$ , με αποτέλεσμα η (4.8) να επανέρχεται στην αρχική μορφή (2.28).

Η παραπάνω συζήτηση φανερώνει πως, ειδικά για τις ξηρικές καλλιέργειες, η ύπαρξη ή μη ενός αρχικού ελλείμματος εδαφικής υγρασίας μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την τελική απόδοση, εξαιτίας της τροποποίησης του αριθμητικού υπολογισμού του ημερήσιου υδατικού ισοζυγίου. Για το λόγο αυτό θεωρήθηκε πως σε όλες τις καλλιέργειες το επίπεδο εδαφικής υγρασίας στην αρχή της καλλιεργητικής περιόδου ισούται με  $\theta_{WP}$ . Έτσι, το  $Dr_0$  υπολογίζεται ξεχωριστά για κάθε καλλιέργεια με βάση το ύψος της χρήσιμης βροχής έως την εποχή της σποράς. Ένας επιπλέον περιορισμός που τέθηκε στην υπολογισθείσα τιμή του  $Dr_0$  για το σιτάρι, είναι πως το έλλειμμα αυτό δεν μπορεί να αντιστοιχεί σε μια περιεκτικότητα υγρασίας μικρότερη της κρίσιμης τιμής  $\theta_c$  (σχήμα 2.2), κάτω από την οποία ξεκινά η υδατική καταπόνηση. Ο περιορισμός αυτός διατυπώνεται ως  $Dr_0 < p \times TAW_{max}$ , όπου  $p$  ο (μη προσαρμοσμένος) συντελεστής ωφελιμότητας και ο οποίος για το σιτάρι παίρνει τιμή 0.55 (βλέπε πίνακα 2.2). Η αιτιολόγηση του περιορισμού είναι πως η χειμερινή σπορά του σιταριού πραγματοποιείται όταν η εδαφική υγρασία είναι ικανοποιητική για το φύτεμα του σπόρου. Αυτό σημαίνει πως καταστάσεις κατά τις οποίες το αρχικό έλλειμμα υγρασίας είναι σημαντικό δεν συναντώνται στην πράξη και συνεπώς δεν έχει νόημα η προσομοίωση τους.

#### 4.5 Υπολογισμός των φυτικών συντελεστών

Η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας ( $ET_c$ ) εξαρτάται από τις τιμές που λαμβάνουν οι φυτικοί συντελεστές,  $K_c$ , κάθε σταδίου της βλαστικής περιόδου. Ο υπολογισμός των  $K_{c_{dev}}$ ,  $K_{c_{mid}}$  και  $K_{c_{end}}$  αποτελεί μια τετριμμένη διαδικασία, στηριζόμενη στις εξισώσεις που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 2 και δεν χρήζει περαιτέρω ανάλυσης. Αντίθετα, ο φυτικός συντελεστής του αρχικού σταδίου,  $K_{c_{ini}}$ , παρουσιάζει υπολογιστικές δυσκολίες που αναλύονται στη συνέχεια. Συγκεκριμένα, ο υπολογισμός του απαιτεί τη γνώση της μέσης έντασης ενός φαινομένου ύγρανσης ( $P_{mean}$ ), του αριθμού των υγράνσεων κατά το αρχικό στάδιο ( $n_w$ ) και του αρχικού ισοδύναμου βάθους του νερού στα επιφανειακά στρώματα του εδάφους ( $W_{ini}$ ).

Το  $P_{mean}$  απαιτεί τη γνώση του αριθμού των υγράνσεων,  $n_w$ , που με τη σειρά του εξαρτάται από τον αριθμό των αρδεύσεων (και των βροχών) κατά το αρχικό στάδιο της βλαστικής περιόδου. Αυτό ωστόσο αποτελεί ένα υπολογιστικό παράδοξο, αφού ο αριθ-



μός των αρδεύσεων εξαρτάται από το  $Kc_{ini}$ , που καθορίζει τις ημερήσιες απώλειες εδαφικής υγρασίας, η τιμή του οποίου όμως εξαρτάται ακριβώς με τη σειρά του από τα  $P_{mean}$  και  $n_w$ . Για το λόγο αυτό, είτε χρησιμοποιούνται προεκτιμημένες τιμές του  $Kc_{ini}$ , είτε για τους υπολογισμούς αγνοούνται οι αρδεύσεις. Για παράδειγμα, ο Παπαζαφειρίου (1999: 228), υπολογίζει το  $Kc_{ini}$  σε καλλιέργεια αραβοσίτου λαμβάνοντας υπόψη μόνο τη συχνότητα της βροχής. Η επιλογή αυτή δικαιολογείται από τη μικρή διάρκεια του πρώτου σταδίου της βλαστικής περιόδου και τις μειωμένες απαιτήσεις σε νερό που παρουσιάζουν οι περισσότερες αρδευόμενες κατά το στάδιο αυτό. Η συγκεκριμένη επιλογή πραγματοποιήθηκε επίσης στα πλαίσια της παρούσας διατριβής και άρα το  $Kc_{ini}$  υπολογίστηκε με βάση τη συχνότητα των βροχών. Γενικά, η άρδευση είναι δυνατό να ληφθεί υπόψη στον υπολογισμό του  $n_w$  όταν πρόκειται για προγραμματισμένες αρδεύσεις που πραγματοποιούνται ανά τακτά χρονικά διαστήματα.

Το  $W_{ini}$ , όπως προτείνεται και από τους Allen *et al.* (1998), μπορεί να θεωρηθεί πως αντιστοιχεί στο συνολικό εξατμίσσιμο νερό,  $TEW$  (εξισώσεις 2.21 και 2.22), κάτι που σημαίνει πως εδαφική υγρασία στα ανώτερα εδαφικά στρώματα είναι υψηλή κατά την έναρξη του πρώτου σταδίου της βλαστικής περιόδου (δηλαδή σε βάθη έως 0.15 m τα οποία υπόκεινται σε εξατμισμό). Η υπόθεση αυτή συνδέεται με το ζήτημα της αρχικής υδατικής κατάστασης του εδάφους κατά την έναρξη της βλαστικής περιόδου, το οποίο συζητήθηκε αναλυτικά στις προηγούμενες παραγράφους. Ειδικότερα, λόγω της παραδοχής πως δεν υφίσταται κάποιο αρχικό έλλειμμα εδαφικής υγρασίας στα ανώτερα εδαφικά στρώματα στις αρδευόμενες καλλιέργειες (λόγω μιας προάρδευσης), το  $W_{ini}$  θεωρείται πως είναι ίσο με  $TEW$ . Για λόγους οικονομίας, ωστόσο, θεωρήθηκε πως το ίδιο ισχύει και για τις ξηρικές καλλιέργειες, παρόλο που στην περίπτωση αυτή, η επαλήθευση της συγκεκριμένης υπόθεσης εξαρτάται από το αρχικό υδατικό έλλειμμα  $Dr_0$ .

#### 4.6 Η μέγιστη απόδοση των καλλιεργειών

Για τον υπολογισμό της μέγιστης απόδοσης κάθε καλλιέργειας επιλέχτηκε η μέθοδος της Αγρο-οικολογικής Ζώνης που παρουσιάστηκε στην ενότητα 2.7.3. Ακολουθώντας την προβλεπόμενη διαδικασία, οι καλλιέργειες αντιστοιχήθηκαν σε κάποια από τις τέσσερις ομάδες, κάθε μια από τις οποίες συνεπάγεται διαφορετικό ωριαίο ρυθμό παραγωγής ξηράς ουσίας, ανάλογα με τη μέση θερμοκρασία της βλαστικής περιόδου (πίνακας 2.5).

Για όλες τις καλλιέργειες, πλην του βαμβακιού, υιοθετήθηκε μια τιμή του συντελεστή  $L_c$  ίση με 0.5, η οποία αντιστοιχεί σε δείκτη φυλλικής επιφάνειας (LAI) μεγαλύτερο των 5  $m^2 \cdot m^{-2}$ . Αντίθετα, η μέγιστη τιμή του LAI για το βαμβάκι είναι μεταξύ 3 και 4  $m^2 \cdot m^{-2}$ .

(Κωτούλας, 2010), η οποία αντιστοιχεί σε συντελεστή  $L_c$  μεταξύ 4.0 και 4.8. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε μια τελική «μέση» τιμή ίση με 4.4.

Προκειμένου οι υπολογιζόμενες αποδόσεις να ανταποκρίνονται καλύτερα σε εκείνες που παρατηρούνται σε βάσεις τεχνικοοικονομικών δεδομένων εκμεταλλεύσεων (π.χ. ΔΙΓΕΛΠ), οι τιμές του δείκτη συγκομιδής ( $H_c$ ), που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τροποποιημένοι σε σχέση με αυτές που παρουσιάζονται στον πίνακα 2.6. Ειδικότερα, για τον αραβόσιτο και τον καπνό επιλέχθηκαν οι τιμές 0.55 και 0.40 αντίστοιχα. Αντίθετα, για το σιτάρι και τη μηδική χρησιμοποιήθηκαν οι συντελεστές 0.45 και 0.9 αντίστοιχα, από τον πίνακα 2.6. Η τροποποίηση του  $H_c$  μπορεί να δικαιολογηθεί, αφού ο δείκτης συγκομιδής δεν αποτελεί μια σταθερά της καλλιέργειας, αλλά εξαρτάται από πολλούς βιολογικούς και κλιματικούς παράγοντες που παρουσιάζουν σημαντική διακύμανση μεταξύ διαδοχικών ετών. Για παράδειγμα, οι Kemanian *et al.* (2007) βρήκαν μια σημαντική γραμμική συσχέτιση μεταξύ της τιμής του  $H_c$  διαφόρων καλλιεργειών και του ποσοστού της φυτικής βιομάζας που παράγεται μετά την άνθηση, γεγονός που υποδηλώνει πως η ηλιακή ακτινοβολία (μέσω της φωτοσύνθεσης) επηρεάζει το δείκτη συγκομιδής.

Για το βαμβάκι, το  $H_c$  επίσης τροποποιήθηκε κατάλληλα ώστε να αναφέρεται σε σύσπορη ποσότητα και όχι απλά στην ποσότητα της ίνας. Ειδικότερα, η περιεκτικότητα του συγκομιζόμενου σύσπορου βαμβακιού σε ίνα ανέρχεται σε 37-42% για τις ποικιλίες που καλλιεργούνται στην Ελλάδα (Παπακώστα-Τασοπούλου, 2002). Αυτό σημαίνει πως ο ζητούμενος δείκτης συγκομιδής υπολογίζεται με τη διαίρεση της τιμής του  $H_c$  που αναγράφεται στον πίνακα 2.6 με το παραπάνω ποσοστό περιεκτικότητας σε ίνα του σύσπορου βαμβακιού. Οι τιμές του  $H_c$  που προκύπτουν βρίσκονται εντός του διαστήματος [0.19, 0.32], από τις οποίες επιλέχθηκε τελικά μια τιμή ίση με 0.25 καθώς έδωσε αποτελέσματα πολύ κοντά στις μέγιστες αποδόσεις βαμβακιού που παρατηρούνται σε βάσεις τεχνικοοικονομικών δεδομένων εκμεταλλεύσεων (περίπου 450 κιλά/στρέμμα).

## **4.7 Η προσομοίωση της ανάπτυξης των καλλιεργειών**

### **4.7.1 Προγραμματισμός αρδεύσεων**

Αναγκαία προϋπόθεση για την εκτίμηση συναρτήσεων απόδοσης, εκτός της αριθμητικής εξειδίκευσης των εξισώσεων που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 2, είναι η αυτοματοποίηση της διαδικασίας προγραμματισμού των αρδεύσεων με τη βοήθεια λογικών κανόνων που καθορίζουν την κατανομή μιας δεδομένης ποσότητας νερού άρδευσης σε κάθε στάδιο της βλαστικής περιόδου. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η πραγματοποίηση μιας άσκησης προσομοίωσης που επιτρέπει την εκτίμηση της τελικής απόδοσης μιας καλλιέργειας για διαφορετικές ποσότητες νερού (άρδευσης και φυσικής προέλευ-

σης) με αποτέλεσμα να παράγεται ένα σύνολο σημείων στο δισδιάστατο χώρο [απόδοση-νερό]. Το τελευταίο αποτελεί τη βάση για την οικονομετρική εκτίμηση των συναρτήσεων απόδοσης με τη χρήση της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων (Ordinary Least Squares – OLS).

Η ποσότητα νερού που θα κατανέμεται σε κάθε στάδιο της βλαστικής περιόδου πρέπει να εξαρτάται τόσο από τη διάρκεια του σταδίου όσο και από την επίπτωση που έχει πιθανή έλλειψη νερού κατά το στάδιο αυτό στην τελική απόδοση της καλλιέργειας, η οποία εκφράζεται από τον συντελεστή απόκρισης παραγωγής  $B_k$ . Έτσι, αν οριστεί το αυθαίρετο μέγεθος  $R = \sum_k L_k B_k$ , όπου  $L_k$  η διάρκεια του  $k$  σταδίου της βλαστικής περιόδου, τότε το νερό που θα αντιστοιχεί (προϋπολογίζεται) στο στάδιο αυτό θα ισούται με  $W_k = W_{tot} \times [(L_k B_k)/R]$ , όπου με  $W_{tot}$  συμβολίζεται το συνολικό διαθέσιμο νερό άρδευσης. Να σημειωθεί ωστόσο πως  $k = 2,3,4$ , αφού για λόγους που σχετίζονται με τον υπολογισμό του  $Kc_{ini}$ , και οι οποίοι αναλύθηκαν στην ενότητα 4.5, θεωρείται πως δεν πραγματοποιούνται αρδεύσεις κατά το πρώτο στάδιο της βλαστικής περιόδου των καλλιεργειών. Επίσης, λόγω της εμπειρικής τετραγωνικής συνάρτησης που χρησιμοποιείται στο βαμβάκι (ενότητα 2.7.2), το νερό άρδευσης κατανεμήθηκε ομοιόμορφα σε όλη τη βλαστική περίοδο.

Όταν υπάρχει διαθέσιμο νερό, μια άρδευση πραγματοποιείται την ημέρα  $d$  όταν ο συντελεστής υδατικής καταπόνησης,  $Ks$ , κατά την ημέρα  $d - 1$  πέσει κάτω από μια προκαθορισμένη «κρίσιμη» τιμή. Το ύψος κάθε άρδευσης την  $d$  ημέρα ( $IR_d$ ) θεωρήθηκε ίσο με το έλλειμμα εδαφικής υγρασίας κατά την ημέρα  $d - 1$ , δηλαδή  $IR_d = Dr_{d-1}$ . Μετά από κάθε άρδευση το διαθέσιμο νερό μειώνεται σταδιακά έως ότου πιθανώς να μηδενιστεί. Σε αντίθετη περίπτωση η ποσότητα που απομένει,  $RW_k$ , προστίθεται στο διαθέσιμο νερό του επόμενου σταδίου της βλαστικής περιόδου, το οποίο πλέον ισούται με  $W_{k+1} = W_{tot} \times [(L_{k+1} B_{k+1})/R] + RW_k$ .

Σε αντίθεση με τις υπόλοιπες αρδευόμενες καλλιέργειες, η προσομοίωση της ανάπτυξης της μηδικής πραγματοποιήθηκε με διαφορετικό τρόπο, προκειμένου να ληφθούν υπόψη οι πέντε κοπές κατά τους μήνες Μάιο έως Σεπτέμβριο (σχήμα 4.1). Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 4.2, κάθε κοπή της μηδικής θεωρήθηκε ως μια καλλιέργεια και για το λόγο αυτό το υπόδειγμα «έτρεξε» ξεχωριστά για κάθε μια από αυτές. Ειδικότερα, το έλλειμμα εδαφικής υγρασίας στο πέρας της τελευταίας μέρας της  $c$  κοπής θεωρήθηκε πως ισούται με το αρχικό έλλειμμα υγρασίας ( $Dr_0$ ) της κοπής  $c + 1$ . Επίσης, το νερό που πιθανώς απομένει στο τέλος της βλαστικής περιόδου κάθε κοπής προστίθεται στο διαθέσιμο του πρώτου σταδίου της επόμενης κοπής.

Είναι προφανές πως για την προσομοίωση της καλλιέργειας του σιταριού λήφθηκε υπόψη μόνο το νερό που προέρχεται από βροχοπτώσεις, καθώς πρόκειται για ξηρική

καλλιέργεια. Επίσης, γίνεται κατανοητό πως η τριχοειδής ανύψωση του νερού,  $CR$ , δε χρησιμοποιήθηκε κατά την άσκηση προσομοίωσης, παρά το γεγονός πως σε εδάφη με υψηλή υπόγεια στάθμη το  $CR$  μπορεί να αποτελέσει σημαντική πηγή νερού, ξεπερνώντας συχνά τα 2 mm την ημέρα (Bos *et al.*, 2009). Ο κυριότερος λόγος που οδήγησε στη συγκεκριμένη επιλογή είναι πως απαιτείται η γνώση του ακριβούς βάθους της υπόγειας στάθμης, καθώς πρόκειται για χαρακτηριστικό συγκεκριμένων εδαφών. Κάτι τέτοιο φυσικά δεν είναι δυνατό όταν στόχος της παρούσας εργασίας είναι η εκτίμηση συναρτήσεων απόδοσης για χρήση σε υποδείγματα εκμεταλλεύσεων των οποίων η ακριβής γεωγραφική τοποθεσία είναι άγνωστη. Επίσης, ο αναλυτικός υπολογισμός της ποσότητας νερού που δέχεται η καλλιέργεια από το φαινόμενο της τριχοειδούς ανύψωσης αποτελεί μια πολύπλοκη υπολογιστική διαδικασία που ξεφεύγει από τους σκοπούς αυτής της διατριβής. Ωστόσο, ακόμη και αν ήταν γνωστή η τιμή του  $CR$ , η ύπαρξη μιας σχετικά σταθερής εισροής στο σύστημα [έδαφος-καλλιέργεια] θα περιόριζε τη διακύμανση της ανεξάρτητης μεταβλητής (της συνολικής ποσότητας νερού) που είναι απαραίτητη για την εκτίμηση των συναρτήσεων απόδοσης.

#### 4.7.2 Η άσκηση προσομοίωσης

Όλες οι εξισώσεις του βιοφυσικού υποδείγματος γράφτηκαν σε κώδικα GAMS (General Algebraic Modelling System) (Brooke *et al.*, 1998) και εξειδικεύτηκαν για κάθε μια καλλιέργεια σύμφωνα με όσα συζητήθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους. Όπως γίνεται φανερό από τη συζήτηση στην ενότητα 4.3, δεν είναι δυνατή η αντιστοίχιση μιας συγκεκριμένης τιμής οποιασδήποτε εδαφικής παραμέτρου σε ένα τύπο εδάφους, αφού πρόκειται για εύρη τιμών και όχι για σημειακές εκτιμήσεις, με αποτέλεσμα η πραγματική τιμή μιας παραμέτρου να παρουσιάζει σημαντική διακύμανση μεταξύ ομοίων εδαφών. Για το λόγο αυτό, πραγματοποιήθηκε μια άσκηση προσομοίωσης προκειμένου να «γεννηθούν» παρατηρήσεις με διαφορετικές τιμές παραμέτρων που αντιστοιχούν στον ίδιο γενικό τύπο εδάφους (άνευ δομής και καλής δομής) και να αναπαρασταθεί η συγκεκριμένη χωρική ετερογένεια.

Το βιο-φυσικό υπόδειγμα «έτρεξε» συνολικά 41 φορές για κάθε καλλιέργεια και τύπο εδάφους και για τα 31 έτη (1976-2006) από τα οποία είχαν ληφθεί ημερήσια μετεωρολογικά δεδομένα. Η επιλογή για 41 επαναληπτικές επιλύσεις του υποδείγματος αποτελεί έναν συμβιβασμό μεταξύ της απαίτησης για ανάδειξη της εδαφικής ετερογένειας και της μείωσης της υπολογιστικής πολυπλοκότητας, αφού πρόκειται για ιδιαίτερα χρονοβόρα διαδικασία λόγω του μεγάλου αριθμού επαναλήψεων και του πλήθους των παραμέτρων. Κάθε «επανάληψη» (iteration) αφορούσε σε διαφορετικές τιμές συγκεκριμένων εδαφικών παραμέτρων για κάθε τύπο εδάφους. Οι παράμετροι αυτοί ήταν το ποσοστό της αργίλου, η φαινόμενη πυκνότητα ( $\rho_b$ ) και το άμεσα εξατμίσιμο νερό στις επι-

φανειακές στρώσεις του εδάφους (*REW*), ενώ οι τιμές των παραμέτρων σε κάθε επανάληψη ορίστηκαν κατά τρόπο αυτόματο (μέσω του αλγορίθμου επίλυσης του GAMS) από μια συνεχή ομοιόμορφη κατανομή σε προκαθορισμένα διαστήματα (εύρη) τιμών, διαφορετικά για κάθε τύπο εδάφους. Με τον τρόπο αυτό, οι συναρτήσεις που προέκυψαν λαμβάνουν υπόψη τη διακύμανση τόσο των εδαφικών, όσο και των μετεωρολογικών παραμέτρων. Ειδικά για τις τελευταίες (κυρίως η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας και το ύψος της βροχής), η κατανομή τους είναι ιδιαίτερα σημαντική στην εξέλιξη της καλλιέργειας καθώς επηρεάζει το χρόνο εφαρμογής και το ύψος της άρδευσης. Οι επιμέρους πληροφορίες σχετικά με την επιλεχθείσα διακύμανση των εδαφικών παραμέτρων κατά την άσκηση προσομοίωσης για διαφορετικούς τύπους εδάφους παρουσιάζονται αναλυτικά στον πίνακα 4.4.

**Πίνακας 4.4: Εύρη τιμών εδαφικών παραμέτρων στην άσκηση προσομοίωσης**

Έδαφος	Ποσοστό αργίλου (%)	Άμεσα εξατμίσιμο νερό, (mm)	Φαινόμενη πυκνότητα ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )
Άνευ δομής	8-12	2-8	1.54-1.70
Καλής δομής	15-40	8-14	1.20-1.36

Παράλληλα με τις μεταβολές των τιμών των παραπάνω εδαφικών παραμέτρων, κάθε επανάληψη αντιστοιχούσε και σε διαφορετική ποσότητα διαθέσιμου νερού άρδευσης,  $W_{tot}$ , για κάθε αρδευόμενη καλλιέργεια. Το εύρος του  $W_{tot}$  και οι κρίσιμες τιμές του συντελεστή υδατικής καταπόνησης για όλα τα στάδια της βλαστικής περιόδου κάθε καλλιέργειας παρουσιάζονται στον πίνακα 4.5, όπου φαίνεται πως στο πρώτο στάδιο δεν πραγματοποιούνται αρδεύσεις λόγω της υπόθεσης που σχετίζεται με τον υπολογισμό της τιμής του  $Kc_{ini}$  (βλέπε ενότητα 4.5).

**Πίνακας 4.5: Τιμές παραμέτρων αρδευομένων καλλιεργειών στην άσκηση προσομοίωσης**

Καλλιέργειες	$Ks_1$	$Ks_2$	$Ks_3$	$Ks_4$	$W_{tot}$ (mm)
Βαμβάκι	-	0.75	0.75	0.75	0-500
Αραβόσιτος	-	1.0	1.0	1.0	200-800
Καπνός	-	1.0	1.0	1.0	100-700
Μηδική					
1 <sup>η</sup> κοπή	-	1.0	1.0	1.0	0-80
Επόμενες κοπές	1.0	1.0	1.0	1.0	40-160

Η άσκηση προσομοίωσης «γέννησε» συνολικά 1271 παρατηρήσεις στο χώρο [απόδοση-νερό] για κάθε καλλιέργεια και για κάθε ένα από τους δυο τύπους εδάφους. Ο υπολογισμός της τελικής απόδοσης όλων των καλλιεργειών, πλην του βαμβακιού, βασίστηκε στην εξίσωση των Doorenbos και Kassam (1979). Αντίθετα, για το βαμβάκι χρησιμοποιήθηκε η τετραγωνική συνάρτηση που παρουσιάστηκε στην ενότητα 2.7.2 αφού κρίθηκε πως αναπαριστά καλύτερα τη σχέση απόδοσης-σχετικής εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας για τις Ελληνικές συνθήκες. Η τιμή της μέγιστης σχετικής εξατμισοδιαπνοής του βαμβακιού,  $Ks_{max}$ , θεωρήθηκε ίση με 0.8, η οποία είναι συνεπής με την υπόθεση πως ο άριστος λόγος της ποσότητας άρδευσης προς την εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας ισούται περίπου με 0.65<sup>30</sup>.

## 4.8 Εκτίμηση συναρτήσεων απόδοσης

### 4.8.1 Γενικά

Εξαιτίας των διαφορετικών κλιματικών συνθηκών σε κάθε ένα από τα 31 έτη που λήφθηκαν υπόψη, η ανεξάρτητη μεταβλητή (νερό -  $W$ ) «τυποποιήθηκε» διαιρώντας με την εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας για το αντίστοιχο έτος. Με αυτό τον τρόπο, το συνολικό νερό που δέχεται κάθε καλλιέργεια εκφράζεται ως ποσοστό της εξατμισοδιαπνοής της (δηλαδή  $W/ETc$ ), γεγονός που επιτρέπει αφενός το μερικό περιορισμό των ακραίων τιμών (outliers), μέσω του περιορισμού της διακύμανσης της ερμηνευτικής μεταβλητής, και αφετέρου διευρύνει τις προοπτικές επιχειρησιακής χρήσης των συναρτήσεων απόδοσης. Ειδικότερα, η εισαγωγή της  $ETc$  ως παράμετρο της συνάρτησης συνεπάγεται πως οι επικρατούσες κλιματικές συνθήκες, δηλαδή η επίδραση της εξατμιστικής δύναμης της ατμόσφαιρας λαμβάνεται πλέον υπόψη. Αυτό με τη σειρά του επιτρέπει την προσαρμογή των συναρτήσεων απόδοσης για την προσομοίωση διαφορετικών «καταστάσεων φύσης», ήτοι διαφορετικών κλιματικών σεναρίων.

Η συναρτησιακή μορφή που επιλέχθηκε για όλες τις καλλιέργειες εκτός του βαμβακιού είναι η λογιστική συνάρτηση (logistic function), η οποία εκφράζεται μαθηματικά ως

$$Y = \frac{Y_{MAX}}{1 + \exp \left[ b_0 + b_1 \left( \frac{W}{ETc} \right) \right]} \quad (4.10)$$

Χαρακτηριστικό της λογιστικής συνάρτησης είναι η ύπαρξη της μέγιστης απόδοσης της καλλιέργειας,  $Y_{MAX}$ , ως παραμέτρου, η οποία επιτρέπει τον ορισμό ενός ασυμπτωτικά μέγιστου άνω ορίου της τιμής του  $Y$ . Η ιδιότητα αυτή της λογιστικής συνάρτησης είναι

<sup>30</sup> Η αριθμητική συνέπεια οφείλεται στο γεγονός πως το 0.8 περιλαμβάνει και το νερό της βροχής που δέχεται η καλλιέργεια. Κατά συνέπεια, ο άριστος λόγος συνολικού νερού (άρδευση+βροχή) προς εξατμισοδιαπνοή θα είναι σαφώς μεγαλύτερος από το 0.65.

συνεπής με την μεθοδολογία στην οποία βασίστηκε το βιο-φυσικό υπόδειγμα της παρούσας διατριβής και συγκεκριμένα με τη συνάρτηση των Doorenbos και Kassam (1979) με την οποία υπολογίστηκαν οι αποδόσεις των καλλιεργειών. Το  $Y_{MAX}$  στην εξίσωση (4.10) αποτελεί τη μέγιστη τιμή του  $Y_{max}$  που υπολογίστηκε στην ενότητα 4.6 για κάθε καλλιέργεια για το σύνολο των 31 ετών (πίνακας 4.6).

**Πίνακας 4.6: Η μέγιστη απόδοση κάθε καλλιέργειας (κιλά/στρ) για την εκτίμηση των συναρτήσεων**

Καλλιέργειες	$Y_{MAX}$
Βαμβάκι	462.04
Αραβόσιτος	1757.56
Καπνός	642.27
Σιτάρι	558.89
Μηδική	1649.96
1 <sup>η</sup> κοπή	343.95
2 <sup>η</sup> κοπή	305.40
3 <sup>η</sup> κοπή	352.90
4 <sup>η</sup> κοπή	344.10
5 <sup>η</sup> κοπή	303.61

Πηγή: Ιδία επεξεργασία

Όπως προαναφέρθηκε, η τελική απόδοση της μηδικής εξαρτάται από την ποσότητα του χόρτου που κόβεται σε κάθε μια από τις πέντε κοπές που πραγματοποιούνται τους μήνες Μάιο, Ιούνιο, Ιούλιο, Αύγουστο και Σεπτέμβριο (σχήμα 4.1). Για το λόγο αυτό, κάθε κοπή θεωρήθηκε ως μια ξεχωριστή καλλιέργεια και συνεπώς προέκυψαν πέντε διαφορετικές συναρτήσεις απόδοσης για κάθε τύπο εδάφους, για τις οποίες χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές τιμές  $Y_{MAX}$ . Επιπλέον εκτιμήθηκε μια «συνολική» συνάρτηση απόδοσης μηδικής που αναφέρεται στη συνολική απόδοση της καλλιέργειας δηλαδή στο άθροισμα και των πέντε κοπών, για την οποία το  $Y_{MAX}$  ισούται με 1649.96 κιλά/στρ (πίνακας 4.6).

Η (4.10) είναι μη γραμμική ως προς τους συντελεστές  $b_0$  και  $b_1$ , κάτι που σημαίνει πως δεν μπορεί να εκτιμηθεί με την κλασική μέθοδο OLS. Για το λόγο αυτό εφαρμόζεται ο παρακάτω μετασχηματισμός:

$$Y = \frac{Y_{MAX}}{1 + \exp \left[ b_0 + b_1 \left( \frac{W}{ETC} \right) \right]} \Leftrightarrow$$

$$\frac{1}{Y} = \frac{1 + \exp \left[ b_0 + b_1 \left( \frac{W}{ETC} \right) \right]}{Y_{MAX}} \Leftrightarrow$$

$$\frac{Y_{MAX}}{Y} - 1 = \exp \left[ b_0 + b_1 \left( \frac{W}{ETc} \right) \right] \Leftrightarrow$$

$$\ln \left( \frac{Y_{MAX}}{Y} - 1 \right) = b_0 + b_1 \left( \frac{W}{ETc} \right) \quad (4.11)$$

Η εξίσωση (4.11) είναι πλέον γραμμική ως προς τις ζητούμενες παραμέτρους και η εξαρτημένη μεταβλητή παίρνει τη μορφή  $\ln[(Y_{MAX}/Y) - 1]$ . Η εκτιμώμενη συνάρτηση απόδοσης για  $N$  ζεύγη παρατηρήσεων  $(Y_n, W_n/ETc_n)$  γράφεται ως

$$\ln \left( \frac{Y_{MAX}}{Y_n} - 1 \right) = b_0 + b_1 \left( \frac{W_n}{ETc_n} \right) + e_n \quad \forall n \in N$$

όπου  $e_n$  οι σφαιρικοί διαταρακτικοί όροι του υποδείγματος, δηλαδή θεωρείται πως είναι ασυσχέτιστοι μεταξύ τους και έχουν σταθερή διακύμανση και μηδενική προσδοκώμενη τιμή.

Ειδικά για το σιτάρι, λόγω της μη ύπαρξης άρδευσης αλλά και την επίδρασης του βάθους του ριζικού συστήματος στην τελική απόδοση, επιλέχτηκε η τετραγωνική μορφή της μορφή της λογιστικής συνάρτησης (εξίσωση 4.12), η οποία σε υπολογιστικά πειράματα έδωσε υψηλότερη τιμή  $R^2$  αλλά και μια πιο ρεαλιστική γραφική αναπαράσταση της σχέσης απόδοσης-νερό σε σχέση με την αντίστοιχη γραμμική (4.11). Να σημειωθεί πως στην περίπτωση του σιταριού, το  $W_n$  περιλαμβάνει και τη βροχή που δέχτηκε η καλλιέργεια κατά τη διάρκεια του Οκτωβρίου, η οποία επηρεάζει τόσο το τελικό μήκος του ριζοστρώματος όσο και το ημερήσιο υδατικό ισοζύγιο μέσω του αρχικού ελλείμματος εδαφικής υγρασίας  $Dr_0$ .

$$\ln \left( \frac{Y_{MAX}}{Y_n} - 1 \right) = b_0 + b_1 \left( \frac{W_n}{ETc_n} \right) + b_2 \left( \frac{W_n}{ETc_n} \right)^2 + e_n \quad (4.12)$$

Η συναρτησιακή μορφή που επιλέχτηκε για το βαμβάκι είναι η πολυωνυμική δευτέρου βαθμού (τετραγωνική), κατ' αναλογία της εμπειρικής συνάρτησης απόδοσης-εξατμισοδιαπνοής που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των αποδόσεων του βαμβακιού (βλέπε ενότητα 2.7.2). Η τετραγωνική συνάρτηση εκφράζεται μαθηματικά ως:

$$Y_n = b_0 + b_1 \left( \frac{W_n}{ETc_n} \right) + b_2 \left( \frac{W_n}{ETc_n} \right)^2 + e_n$$

Σε όλα τα υποδείγματα εκτίμησης των συναρτήσεων απόδοσης υπολογίστηκαν οι συντελεστές προσδιορισμού  $R^2$  και πραγματοποιήθηκαν οι κλασικοί έλεγχοι στατιστικής σημαντικότητας των  $b_0$ ,  $b_1$  και  $b_2$  που στηρίζονται στην κατανομή  $t$  (δηλαδή ελέγχεται αν οι συντελεστές αυτοί είναι σημαντικά διαφορετικοί του μηδενός). Ένας



επιπλέον έλεγχος ήταν αυτός της πιθανής ετεροσκεδαστικότητας (μη σταθερής διακύμανσης) των διαταρακτικών όρων, η οποία οδηγεί σε μεροληπτική εκτίμηση των διακυμάνσεων των εκτιμητών  $\hat{b}_0$ ,  $\hat{b}_1$  και  $\hat{b}_2$ . Να σημειωθεί πως ακόμα και αν οι διαταρακτικοί όροι δεν είναι ομοσκεδαστικοί, οι εκτιμητές αυτοί παραμένουν αμερόληπτοι και συνεπείς, ωστόσο δεν είναι πλέον αποτελεσματικοί. Σε αριθμητικούς όρους, η ετεροσκεδαστικότητα μεταφράζεται σε υπερεκτίμηση ή υποεκτίμηση των τυπικών σφαλμάτων των  $\hat{b}_0$ ,  $\hat{b}_1$  και  $\hat{b}_2$ , γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα την αδυναμία εφαρμογής των κλασικών μεθόδων στατιστικής επαγωγής για τον έλεγχο του υποδείγματος. Για παράδειγμα, ο έλεγχος  $t$  υπό συνθήκες ετεροσκεδαστικότητας μπορεί να οδηγήσει σε μη απόρριψη της υπόθεσης πως κάποιος από τους συντελεστές είναι μηδέν, όταν στην πραγματικότητα ισχύει το αντίθετο.

Ο έλεγχος για την πιθανή ύπαρξη ετεροσκεδαστικότητας σχετίζεται συνήθως με την υπόθεση πως υπάρχει κάποιας μορφής σχέση (γραμμική ή μη γραμμική) μεταξύ των διαταρακτικών όρων και κάποιας ερμηνευτικής μεταβλητής. Ένας από τους πιο γνωστούς ελέγχους για την πιθανή ύπαρξη ετεροσκεδαστικότητας είναι το κριτήριο White (1980), το οποίο στηρίζεται σε μια βοηθητική παλινδρόμηση ανάμεσα στα τετράγωνα των καταλοίπων (residuals -  $\hat{\epsilon}_n$ ) και όλων των ερμηνευτικών μεταβλητών, των τετραγώνων τους και των γινομένων τους (cross-terms). Πρόκειται για έναν γενικό έλεγχο ο οποίος δεν προϋποθέτει ούτε τη γνώση της μεταβλητής (ή των μεταβλητών) που προκαλεί το πρόβλημα αλλά ούτε και της συναρτησιακής μορφής της σχέσης μεταξύ της μεταβλητής και των διαταρακτικών όρων. Σε ένα υπόδειγμα  $N$  παρατηρήσεων και  $T$  ερμηνευτικών μεταβλητών, η στατιστική έλεγχου είναι το  $T \times R^2$ , όπου το  $R^2$  αντιστοιχεί στο συντελεστή προσδιορισμού της βοηθητικής παλινδρόμησης. Υπό τη μηδενική υπόθεση της ομοσκεδαστικότητας (δεν υπάρχει σχέση μεταξύ κάποιας ερμηνευτικής μεταβλητής και των διαταρακτικών όρων), το  $T \times R^2$  κατανέμεται ασυμπτωτικά ως  $\chi^2$  με βαθμούς ελευθερίας ίσους με τον αριθμό των συντελεστών της βοηθητικής παλινδρόμησης (χωρίς το σταθερό όρο).

Ο έλεγχος White έδειξε πως όλα τα υποδείγματα χαρακτηρίζονται από ετεροσκεδαστικούς διαταρακτικούς όρους, κάτι που μπορεί να θεωρηθεί ως αναμενόμενο καθώς η ποσότητα νερού που δέχεται μια καλλιέργεια διαφέρει σημαντικά από έτος σε έτος λόγω διαφορετικής χρονικής κατανομής και του ακανόνιστου ύψους των βροχοπτώσεων. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος της ετεροσκεδαστικότητας χρησιμοποιήθηκε ο εκτιμητής του White (1980), ο οποίος συνίσταται στην αντικατάσταση του εκτιμητή της διακύμανσης των διαταρακτικών όρων,  $\hat{\sigma}_\epsilon^2$ , από το τετράγωνο των καταλοίπων. Ειδικότερα, η διακύμανση του εκτιμητή του  $t$ -οστού συντελεστή παλινδρόμησης ( $\hat{b}_t$ ) όπως προκύπτει από τη μέθοδο OLS εκφράζεται αλγεβρικά ως:

$$Var(\hat{b}_t) = \frac{\hat{\sigma}_e^2}{\sum_{n=1}^N (X_{tn} - \bar{X}_t)^2} \times \frac{1}{R_t^2} \quad (4.13)$$

$$\forall t \in T \text{ και } n \in N$$

Όπου  $X_{tn}$  και  $\bar{X}_t$  η  $n$ -οστή παρατήρηση και η μέση τιμή της  $t$  ανεξάρτητης μεταβλητής αντίστοιχα και  $R_t^2$  ο συντελεστής προσδιορισμού στην παλινδρόμηση της  $X_t$  με όλες τις υπόλοιπες ερμηνευτικές μεταβλητές. Σε περίπτωση ετεροσκεδαστικότητας, ο White απέδειξε πως ένας ασυμπτωτικά συνεπής εκτιμητής του  $Var(\hat{b}_t)$  μπορεί να προκύψει από την εξίσωση (4.13) αν ως εκτιμητής του  $\hat{\sigma}_e^2$  χρησιμοποιηθεί το τετράγωνο των διαταρακτικών όρων ( $\hat{e}_n^2$ ). Ο εκτιμητής του White χαρακτηρίζεται ως «ανθεκτικός στην ετεροσκεδαστικότητα» (heteroskedasticity-robust estimator) και αποτελεί τυπική επιλογή των περισσοτέρων λογισμικών πακέτων οικονομετρικής ανάλυσης.

Να σημειωθεί πως το πρόβλημα της ετεροσκεδαστικότητας δεν ήταν ιδιαίτερα σημαντικό στο βαμβάκι, τον αραβόσιτο και τον καπνό, αφού η χρήση του εκτιμητή White είχε πολύ μικρή επίδραση στις τιμές των τυπικών σφαλμάτων των συντελεστών (και κατά συνέπεια στη στατιστική  $t$ ). Αντίθετα ήταν ιδιαίτερα έντονο στο σιτάρι, λόγω της μη ύπαρξης άρδευσης, αλλά και στις διάφορες κοπές της μηδικής. Στη μηδική, η μεγάλη διακύμανση της ερμηνευτικής μεταβλητής οφείλεται στη μικρή χρονική διάρκεια της βλαστικής περιόδου που αντιστοιχεί σε κάθε κοπή (και κατ' επέκταση της υπολογιζόμενης  $ETc$ ), με αποτέλεσμα το νερό που δέχεται η καλλιέργεια από τις βροχοπτώσεις συχνά να υπερκαλύπτει τις απώλειες της εξατμισοδιαπνοής, οδηγώντας σε υψηλή τιμή του λόγου  $W/ETc$ .

#### 4.8.2 Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα της εκτίμησης συναρτήσεων απόδοσης-νερού για τις αροτραίες καλλιέργειες που προσομοιώνονται στην παρούσα διατριβή παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α', μαζί με μια σχηματική απεικόνιση της σχέσης απόδοσης-  $W/ETc$ . Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για το σκοπό αυτό ήταν το Eviews 7.0.

Σε όλες τις αρδευόμενες καλλιέργειες, όπως είναι αναμενόμενο, με την ίδια ποσότητα νερού σε εδάφη καλής δομής επιτυγχάνονται ελαφρά υψηλότερες αποδόσεις σε σχέση με τα εδάφη άνευ δομής, λόγω της υψηλότερης δυνατότητας κατακράτησης νερού ( $TAW$ ) που έχουν τα πρώτα. Ιδιαίτερη περίπτωση αποτελεί το βαμβάκι, στο οποίο η συγκεκριμένη παρατήρηση ισχύει μέχρι ένα ανώτατο όριο (περίπου 0.8, που αντιστοιχεί στην τιμή του  $Ks_{max}$ ). Μετά την τιμή αυτή η εικόνα αντιστρέφεται και η απόδοση φθίνει με ταχύτερο ρυθμό σε εδάφη καλής δομής. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως η μεγαλύτερη τιμή του  $TAW$  στα εδάφη αυτά συνεπάγεται μη επιθυμητά (υψηλά) επίπεδα υγρασίας που οδηγούν σε μεγαλύτερη πτώση της παραγωγής.

Χαρακτηριστικό τόσο της καλλιέργειας αραβοσίτου, όσο και του καπνού, είναι η επίτευξη της μέγιστης απόδοσης όταν ο λόγος νερού προς εξατμισοδιαπνοή ξεπεράσει την μονάδα (σχήματα A.2 και A.3 του Παραρτήματος Α'). Αυτό οφείλεται στις ιδιαίτερες απαιτήσεις των καλλιεργειών αυτών σε νερό, η οποία εκφράζεται από τον πολύ υψηλό συντελεστή απόκρισης παραγωγής τους (βλέπε πίνακα 2.3). Στην περίπτωση του καπνού, ωστόσο, η μέγιστη απόδοση επιτυγχάνεται λίγο νωρίτερα, κάτι που οφείλεται στη χαμηλότερη τιμή του  $B$  (1.25 για τον αραβόσιτο και 0.9 για τον καπνό). Μια άλλη σημαντική αιτία είναι η χρονική κατανομή των βροχοπτώσεων, οι οποίες εντοπίζονται συνήθως στα αρχικά στάδια της βλαστικής περιόδου, κατά τα οποία οι αρδευτικές ανάγκες των καλλιεργειών είναι σχετικά μικρές.

Η ίδια παρατήρηση ισχύει και για τις κοπές της μηδικής μετά την πρώτη, δηλαδή αυτές που πραγματοποιούνται τους μήνες Μάιο, Ιούνιο, Ιούλιο, Αύγουστο και Σεπτέμβριο. Αυτό οφείλεται σε ένα συνδυασμό τριών παραγόντων, συγκεκριμένα τις σημαντικές απώλειες υγρασίας εδαφικής (εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας) κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, την υψηλή τιμή του συντελεστή απόκρισης παραγωγής της μηδικής ( $B = 1.1$  από τον πίνακα 2.3) και τη μικρή διάρκεια των κοπών αυτών που οδηγεί σε υψηλή διακύμανση της ερμηνευτικής μεταβλητής. Αντίθετα, η κοπή του Απριλίου (πρώτη κοπή) αντιστοιχεί σε διπλάσια διάρκεια της βλαστικής περιόδου και επίσης οι ημερήσιες τιμές της  $ETc$  είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες του καλοκαιριού, οι βροχές συνήθως συχνότερες, ενώ το αρχικό έλλειμμα υγρασία μηδενικό καθώς καλύπτεται από την προάρδευση (στις υπόλοιπες κοπές το  $Dr_0$  αντιστοιχεί στο τελικό έλλειμμα υγρασίας της προηγούμενης κοπής).

Τέλος, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα αποτελέσματα του σιταριού. Όπως φαίνεται από το σχήμα A.4 του Παραρτήματος Α', για μικρές τιμές του λόγου  $W/ETc$  (περίπου μέχρι 0.5) τα εδάφη άνευ δομής εμφανίζουν ελαφρά υψηλότερες αποδόσεις σε σχέση με τα εδάφη καλής δομής. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στην επίδραση του αρχικού ελλείμματος εδαφικής υγρασίας ( $Dr_0$ ), η οποία, όπως φαίνεται από την εξίσωση (4.8), είναι διαφορετική στις δυο κατηγορίες εδαφών εξαιτίας του διαφορετικού μέγιστου βάθους του ριζοστρώματος. Ειδικότερα, οι όροι που επηρεάζονται είναι το επιπλέον ημερήσιο έλλειμμα  $(Dr_0/Zr_{max})\theta_r$  και η χρήσιμη βροχή που εκφράζεται ως  $(P_d/Zr_{max})Zr_d$ . Αρχικά, το  $Dr_0$  επηρεάζει περισσότερο τα εδάφη καλής δομής λόγω του μικρότερου  $Zr_{max}$ , ενώ το έλλειμμα αυτό θα συνεχίσει να υπολογίζεται μέχρι την ημέρα κατά την οποία είτε το ριζόστρωμα φτάσει το μέγιστο βάθος του είτε η χρήσιμη βροχή το μηδενίσει. Σε κάθε περίπτωση, στα εδάφη καλής δομής η απαλοιφή του όρου  $(Dr_0/Zr_{max})\theta_r$  από την εξίσωση (4.8) συμβαίνει νωρίτερα λόγω του μικρότερου  $Zr_{max}$ , κάτι που συνεπάγεται μεγαλύτερη επίδραση της χρήσιμης βροχής στο υδατικό ισοζύγιο μέσω του όρου  $(P_d/Zr_{max})Zr_d$ . Έτσι, για μικρές τιμές του

λόγου  $W/ETc$  (δηλαδή στην αρχή της βλαστικής περιόδου) τα εδάφη άνευ δομής πλεονεκτούν, ενώ η εικόνα αντιστρέφεται όσο ο λόγος αυτός αυξάνει, αφού πλέον το  $Dr_0$  μηδενίζεται γρηγορότερα στα εδάφη καλής δομής.

# 5 Εξειδίκευση και παράδειγμα επιχειρησιακής εφαρμογής του βιο-οικονομικού υποδείγματος

---

## 5.1 Εισαγωγή

Η χρήση των υδατικών πόρων στην αρδευόμενη γεωργία αντιπροσωπεύει ένα σημαντικό τμήμα της συνολικής κατανάλωσης νερού σε ευρωπαϊκό επίπεδο, το οποίο στις χώρες του νότου ανέρχεται σε 70-80% (Massarutto, 2003). Αυτό σημαίνει πως η ορθολογική διαχείριση για την εξοικονόμηση νερού και τη διατήρηση (ποιοτική και ποσοτική) των υδάτων οφείλει να λαμβάνει σοβαρά υπόψη τη ζήτηση του νερού άρδευσης. Δυο πολιτικές της ΕΕ που επηρεάζουν (ή αναμένεται να επηρεάσουν) τη ζήτηση αυτή και τις παραγωγικές αποφάσεις στο γεωργικό τομέα είναι η ΚΑΠ και η Οδηγία Πλαίσιο για το Νερό (ΟΠΝ)<sup>31</sup>. Η ΚΑΠ αποτελεί μια από τις ελάχιστες κοινές πολιτικές σε όλα τα κράτη μέλη της ΕΕ και τα τελευταία χρόνια έχει αναθεωρηθεί ριζικά με αποτέλεσμα να μετατραπεί σε ένα θεσμικό εργαλείο που στοχεύει πλέον στη στήριξη του γεωργικού εισοδήματος και στην ανάπτυξη του αγροτικού χώρου. Ιδιαίτερα η ενδιάμεση αναθεώρηση του 2003, όπως εφαρμόστηκε αρχικά από το 2006 και συνεχίστηκε μετά το 2009 με τον «έλεγχο υγείας» (health check), αποτέλεσε σημείο καμπής στην ιστορία της ΚΑΠ. Αυτό οφείλεται στην απόφαση για την αποσύνδεση των περισσότερων άμεσων ενισχύσεων από την παραγωγή και την ενσωμάτωση τους στην Ενιαία Αποδεσμευμένη Ενίσχυση (ΕΑΕ), η οποία εισπράττεται από τους παραγωγούς υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις που σχετίζονται κυρίως με την προστασία του περιβάλλοντος (πολλαπλή συμμόρφωση). Προχωρώντας ένα βήμα παραπέρα, η περιφερειοποίηση που έχει αποφασιστεί στα πλαίσια της αναθεώρησης της ΚΑΠ για την περίοδο 2013-2020 αναμένεται να μειώσει την ΕΑΕ που εισπράττουν οι Έλληνες παραγωγοί σε ιστορικούς κλάδους (και να την εξισορροπήσει σε άλλους), προωθώντας έτσι την περαιτέρω ανεξαρτητοποίηση του γεωργικού εισοδήματος από τις κοινοτικές ενισχύσεις.

Η αποδέσμευση και η διαφαινόμενη εξέλιξη της (περιφερειοποίηση) αποτελεί μια μεταρρύθμιση που ενώ επιδιώχθηκε για διάφορους λόγους (π.χ. δημοσιονομική σταθερότητα, απαίτηση για μια γεωργία περισσότερο φιλική προς το περιβάλλον, ευαισθητοποίηση των καταναλωτών στον τομέα της ποιότητας και της ασφάλειας των τροφίμων, συνεχιζόμενες διαπραγματεύσεις στα πλαίσια του Παγκόσμιου Οργανισμού Εμπορίου), αναμένεται να επηρεάσει σημαντικά τόσο τη ζήτηση νερού άρδευσης, όσο και των λοι-

---

<sup>31</sup> Οδηγία 2000/60/ΕΚ για τη θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων.

πών μεταβλητών συντελεστών παραγωγής. Αυτό επιβεβαιώνεται εμπειρικά, για παράδειγμα στη χρήση αζωτούχων λιπασμάτων στη Γαλλία (Jayet & Petsakos, 2010) και στην Αυστρία (Schmid *et al.*, 2007) και στην περίπτωση της άρδευσης στην Ισπανία (Gómez-Limón *et al.*, 2002) και στην Ελλάδα (Kampas *et al.*, 2010). Οι αλλαγές αυτές είναι αποτέλεσμα των μεταβολών στις παραγωγικές επιλογές των γεωργών τόσο σε εντατικό όσο και σε εκτατικό επίπεδο, δηλαδή στη χρήση νερού ανά στρέμμα και στον τρόπο χρήσης της γη.

Από την άλλη, η ΟΠΝ συστάθηκε προκειμένου να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της μη βέλτιστης διαχείρισης των υδάτινων πόρων, το οποίο οφείλεται στην ιδιαίτερη φύση του αγαθού «νερό». Συγκεκριμένα, τα δυο θεμελιώδη θεωρήματα της οικονομικής της ευημερίας ορίζουν πως η βέλτιστη κατά Pareto κατανομή των αγαθών σε μια κοινωνία εξασφαλίζεται από τη λειτουργία της αγοράς πλήρους ανταγωνισμού, υπό την προϋπόθεση πως υφίστανται σαφή δικαιώματα ιδιοκτησίας για κάθε αγαθό ώστε να είναι δυνατή η ανταλλαγή τους μεταξύ των ατόμων (δηλαδή να πρόκειται για ιδιωτικά αγαθά). Με τον όρο «αγαθό» εννοείται οποιοδήποτε προϊόν, φυσικό ή μη, που μπορεί να μεταβάλλει αρνητικά ή θετικά τη χρησιμότητα των ατόμων που το απολαμβάνουν. Τα άτομα θεωρείται επίσης πως χαρακτηρίζονται από «ορθολογική» συμπεριφορά, δηλαδή επιδιώκουν τη μεγιστοποίηση της χρησιμότητας τους βασιζόμενοι σε τέλεια πληροφόρηση για τις παρούσες και τις μελλοντικές τιμές των αγαθών (Perman *et al.*, 2003).

Το πρόβλημα στην περίπτωση του νερού είναι πως πρόκειται για αγαθό «ανοικτής πρόσβασης» (open access resource) δηλαδή χαρακτηρίζεται από ανταγωνισμό μεταξύ των ατόμων (rivalry) που το απολαμβάνουν, χωρίς όμως να είναι δυνατός ο αποκλεισμός κάποιου ατόμου από τη χρήση του (non excludability). Αυτό σημαίνει πως οι προϋποθέσεις για την άριστη κατά Pareto κατανομή των υδάτινων πόρων παραβιάζονται και συνιστούν μια τυπική περίπτωση «αποτυχίας της αγοράς» του τέλει ανταγωνισμού (market failure), αφού η απουσία δικαιωμάτων ιδιοκτησίας δεν επιτρέπει την εκτίμηση της πραγματικής αξίας του αγαθού. Αυτή η έλλειψη «μηνύματος που εκπέμπουν οι τιμές» (price signal) οδηγεί επίσης σε περιβαλλοντικά προβλήματα που προκύπτουν κατά τη χρήση του νερού, τα οποία συνεπάγονται ένα επιπλέον κόστος (αρνητική εξωτερικότητα) που είναι δύσκολο να μεταφραστεί σε συγκεκριμένη χρηματική αξία. Η αποτυχία της αγοράς σημαίνει πως ο τελικός χρήστης του νερού (ο γεωργός στη συγκεκριμένη περίπτωση) αναλαμβάνει ένα κόστος πολύ μικρότερο από την πραγματική συνολική αξία του αγαθού, με αποτέλεσμα η χρήση των υδάτων να είναι πολύ υψηλότερη από τη μέγιστη απαιτούμενη για την αειφορική διαχείριση τους.

Στα πλαίσια αυτά, και αναφορικά με τον γεωργικό τομέα, μια από τις απαιτήσεις της ΟΠΝ είναι η ανάκτηση του πλήρους κόστους χρήσης του νερού άρδευσης, κάτι που επι-

διώκεται μέσω της τιμολόγησης του. Το «πλήρες» κόστος ορίζεται ως το άθροισμα του «χρηματικού» κόστους (financial cost), του «κόστους σπανιότητας» (resource cost) και του περιβαλλοντικού κόστους (environmental cost) που προκύπτει από τη χρήση των υδάτων. Ειδικότερα, το χρηματικό κόστος αναφέρεται στο κόστος της ενέργειας, σε κόστη συντήρησης και σε αποσβέσεις του μονίμου και ημιμονίμου κεφαλαίου. Το κόστος σπανιότητας σχετίζεται με το κόστος ευκαιρίας που προέρχεται από τη μη χρήση του σε εναλλακτικές δραστηριότητες. Τέλος, το περιβαλλοντικό κόστος αφορά στη χρηματική αποτίμηση της μείωσης της κοινωνικής ευημερίας λόγω της περιβαλλοντικής υποβάθμισης που προκαλείται από τη χρήση του νερού στη γεωργία (European Commission, 2003).

Από τα παραπάνω προκύπτει πως η ΚΑΠ και η ΟΠΝ αποτελούν δυο πολιτικές που στοχεύουν, έμμεσα (η πρώτη) ή άμεσα (η δεύτερη), στην αειφορική διαχείριση των υδάτων. Το ερώτημα που εγείρεται είναι ο βαθμός της συμβατότητας των δυο αυτών πολιτικών, δηλαδή η μελέτη του βαθμού συνέργειας/συμπληρωματικότητας, ή αντίθεσης που παρουσιάζουν μεταξύ τους. Ειδικότερα, διερευνάται η συνδυαστική συμβολή που θα είχε η υποθετική τιμολόγηση του νερού άρδευσης (αν είχε εφαρμοστεί) και των μεταρρυθμίσεων της ΚΑΠ από το 2003 έως το 2013. Σε Ευρωπαϊκό επίπεδο, ο συγκεκριμένος προβληματισμός είχε τεθεί παλαιότερα από τους Gómez-Limón *et al.* (2002), οι οποίοι παρουσίασαν μια μελέτη για την περιοχή της Παλένσια της Ισπανίας. Η ανάλυση ωστόσο αφορούσε υποθετικά σενάρια μεταρρύθμισης της, τότε ισχύουσας, Agenda 2000, αφού η ενδιάμεση αναθεώρηση του 2003 δεν είχε λάβει ακόμα χώρα. Αντίθετα, αν και οι επιπτώσεις της τιμολόγησης του νερού σε περιοχές της Ελλάδας έχουν στο παρελθόν αποτελέσει αντικείμενο μελέτης (π.χ. Manos *et al.*, 2006; Latinopoulos, 2005), εντούτοις η συγκριτική ανάλυση της συνδυασμένης επίπτωσης της τιμολόγησης και των μεταρρυθμίσεων της ΚΑΠ έχει επιχειρηθεί μόνο από τους Kampas *et al.* (2010). Η μελέτη στηριζόταν σε ένα μη γραμμικό υπόδειγμα μεγιστοποίησης του ακαθάριστου κέρδους ενός δείγματος 324 εκμεταλλεύσεων από τη βάση δεδομένων του ΔΙΓΕΛΠ για την περιοχή της Θεσσαλίας, χρησιμοποιώντας συναρτήσεις απόδοσης-άρδευσης για τις καλλιέργειες του βαμβακιού και του αραβοσίτου, καθώς και μια αντίστροφη συνάρτηση ζήτησης για τη μηδική. Η ανάλυση περιελάμβανε την παραμετρική επίλυση του υποδείγματος για διάφορες τιμές νερού και για δυο διαφορετικά σενάρια πολιτικής, ένα που αναφερόταν στο καθεστώς της ΚΑΠ προ της ενδιάμεσης αναθεώρησης και ένα δεύτερο που προσομοίωνε το πλαίσιο πολιτικής μετά την εφαρμογή της αποδέσμευσης.

Η μελέτη περίπτωσης που παρουσιάζεται στο κεφάλαιο αυτό ακολουθεί πλήρως την αναλυτική λογική και το σκοπό της προαναφερθείσας εργασίας αλλά αναφέρεται σε ένα δείγμα εκμεταλλεύσεων από την περιοχή της Καρδίτσας για το έτος 2005 και χρησιμοποιεί το βιο-οικονομικό υπόδειγμα που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας

διατριβής. Επιπλέον, η παραμετρική επίλυση του υποδείγματος για διάφορες τιμές νερού πραγματοποιείται για τέσσερα σενάρια πολιτικής που αναφέρονται στη μορφή της ΚΑΠ (α) προ του 2006, (β) από το 2006 έως το 2008, (γ) από το 2009 έως το 2012 και (δ) από το 2013 κι έπειτα. Συνεπώς, σε σχέση με την εργασία των Kampas *et al.* (2010), εκτός του δείγματος και των σεναρίων πολιτικής, η παρούσα μελέτη περίπτωσης διαφοροποιείται ως προς δυο σημεία. Το πρώτο, και ταυτόχρονα σημαντικότερο, είναι πως χρησιμοποιείται ένα βιο-οικονομικό υπόδειγμα που μεγιστοποιεί τη χρησιμότητα του τελικού πλούτου των παραγωγών και συνεπώς λαμβάνεται υπόψη η συμπεριφορά τους έναντι του οικονομικού κινδύνου. Το δεύτερο σημείο διαφοροποίησης είναι η χρήση του *ad hoc* βιο-φυσικού υποδείγματος για την εκτίμηση συναρτήσεων απόδοσης-νερού για τις κυριότερες αροτραίες καλλιέργειες της περιοχής μελέτης και όχι απλά μόνο για βαμβάκι και αραβόσιτο.

Ο λόγος για τον οποίο επιλέχθηκε η συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης είναι πως πρόκειται για μια μεθοδολογικά συνδυαστική εφαρμογή που επιτυγχάνει να αναδείξει όλα τα χαρακτηριστικά του βιο-οικονομικού υποδείγματος που αναπτύχθηκε στην παρούσα διατριβή. Ειδικότερα, η μελέτη της αλληλεπίδρασης της ΚΑΠ και της ΟΠΝ απαιτεί ένα υπόδειγμα λήψης αποφάσεων σε επίπεδο εκμετάλλευσης που να ενσωματώνει σε σημαντικό βαθμό αγρονομικές πληροφορίες και να λαμβάνει υπόψη την ετερογένεια του γεωργικού τομέα, η οποία σχετίζεται τόσο με τις παραγωγικές αποφάσεις των καλλιεργητών, όσο και τις διαφορετικές κλιματικές συνθήκες που μπορεί να επικρατούν σε μια δεδομένη περιοχή. Η εξειδίκευση του βιο-οικονομικού υποδείγματος και ο τρόπος ανάδειξης της ετερογένειας αυτής παρουσιάζεται στις επόμενες παραγράφους.

## 5.2 Τεχνικοοικονομικά δεδομένα εκμεταλλεύσεων

Για το παράδειγμα εφαρμογής του βιο-οικονομικού υποδείγματος επιλέχθηκε ένα δείγμα 70 καπνοπαραγωγών εκμεταλλεύσεων από την περιοχή της Καρδίτσας. Πρόκειται για ένα υποσύνολο ενός ευρύτερου δείγματος που περιελάμβανε επίσης εκμεταλλεύσεις από την Αιτωλοακαρνανία (360) και το Κιλκίς (70) και χρησιμοποιήθηκε, όπως ήδη αναφέρθηκε στην εισαγωγή της παρούσας διατριβής, στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος PILOTEC. Στόχος του προγράμματος ήταν η διερεύνηση της δυνατότητας εκμεταλλεύσεων που καλλιεργούσαν καπνό (μέχρι το 2005, τελευταίο έτος πριν την εφαρμογή της ενδιάμεσης αναθεώρησης της ΚΑΠ) να στραφούν εναλλακτικά σε ενεργειακές καλλιέργειες, ειδικότερα σόργο, ηλίανθο και αγριαγκινάρα.

Οι εκμεταλλεύσεις του δείγματος, τόσο της Καρδίτσας όσο και των άλλων δυο περιοχών, προήλθαν από τη βάση δικαιούχων ποσοστώσεων καπνού του ΟΠΕΚΕΠΕ (Οργανισμός Πληρωμών και Ελέγχων Κοινοτικών Ενισχύσεων, Προσανατολισμού και Εγγυή-



σεων) για το έτος 2005 και επιλέχθηκαν με στρωματοποιημένη απλή τυχαία δειγματοληψία χωρίς επανάθεση, ενώ ως παράγοντες στρωματοποίησης επιλέχθηκαν ο νομός (τρία επίπεδα) και η ποικιλία καπνού (12 συνολικά επίπεδα). Στη συνέχεια συντάχθηκε ερωτηματολόγιο για τη συλλογή στοιχείων σχετικά με το μέγεθος και τη διάρθρωση του παραγωγικού συστήματος κάθε εκμετάλλευσης. Τα στοιχεία αυτά αφορούσαν στο είδος και την έκταση κάθε παραγωγικής δραστηριότητας, στην ιδιοκτησία ή ενοικίαση εδαφών και σε αναλυτικά στοιχεία κόστους ανά καλλιέργεια ή εκτροφή, συγκεκριμένα στην ποσότητα και στο είδος των χρησιμοποιούμενων χημικών εισροών (λιπάσματα, φυτοφάρμακα), τις ώρες ανθρώπινης και μηχανικής εργασίας (ιδίας ή αμειβόμενης) και στον τύπο και χρόνο των καλλιεργητικών επεμβάσεων. Συλλέχθηκαν επίσης στοιχεία για την παραγωγικότητα του εδάφους (γενικός τύπος εδάφους, κλίση), τα μηχανήματα, τις κατασκευές τις έγγειες βελτιώσεις, κοινωνικοοικονομικά στοιχεία για τους παραγωγούς και τις οικογένειές τους, καθώς και το ύψος της ΕΑΕ που αντιστοιχεί σε κάθε εκμετάλλευση (πίνακας 5.1).

**Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά δείγματος εκμεταλλεύσεων**

<b>Καλλιέργειες</b>	<b>Ποσοστό Εκμεταλλεύσεων</b>	<b>Συνολική έκταση στο δείγμα (στρ)</b>
<i>Καπνός</i>	100.0	1535
<i>Βαμβάκι</i>	94.3	4645
<i>Σ. Σιτάρι</i>	40.0	983
<i>Αραβόσιτος</i>	34.3	569
<i>Τομάτες</i>	5.7	366
<i>Μηδική</i>	5.7	90
<i>Πιπεριές</i>	10.0	64
<b>Σύνολο</b>		<b>8252</b>
<b>Μέσος όρος ΧΓΕ (στρ)</b>		117.9
<b>Μέσος όρος αρδευόμενης ΧΓΕ (στρ)</b>		103.8
<b>Μέσος όρος δικαιωμάτων (στρ)</b>		96.2
<b>Μέσος όρος ΕΑΕ (ευρώ)</b>		24654.4

Πηγή: Ίδια επεξεργασία

Από τον πίνακα 5.1 είναι εμφανές πως η κύρια παραγωγική κατεύθυνση των εκμεταλλεύσεων του δείγματος της Καρδίτσας αφορά σε αροτραίες καλλιέργειες (καπνός, βαμβάκι, αραβόσιτος και σκληρό σιτάρι), όπως παραδοσιακά ισχύει εξάλλου και για την ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλίας. Συνεπώς η συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης αποτελεί ένα αντιπροσωπευτικό παράδειγμα εφαρμογής της προτεινόμενης μεθοδολογίας, αφού τα παραγωγικά συστήματα που προσομοιώνονται αποτελούν μια μικρογραφία των αντίστοιχων που συναντώνται σε περιφερειακό επίπεδο.

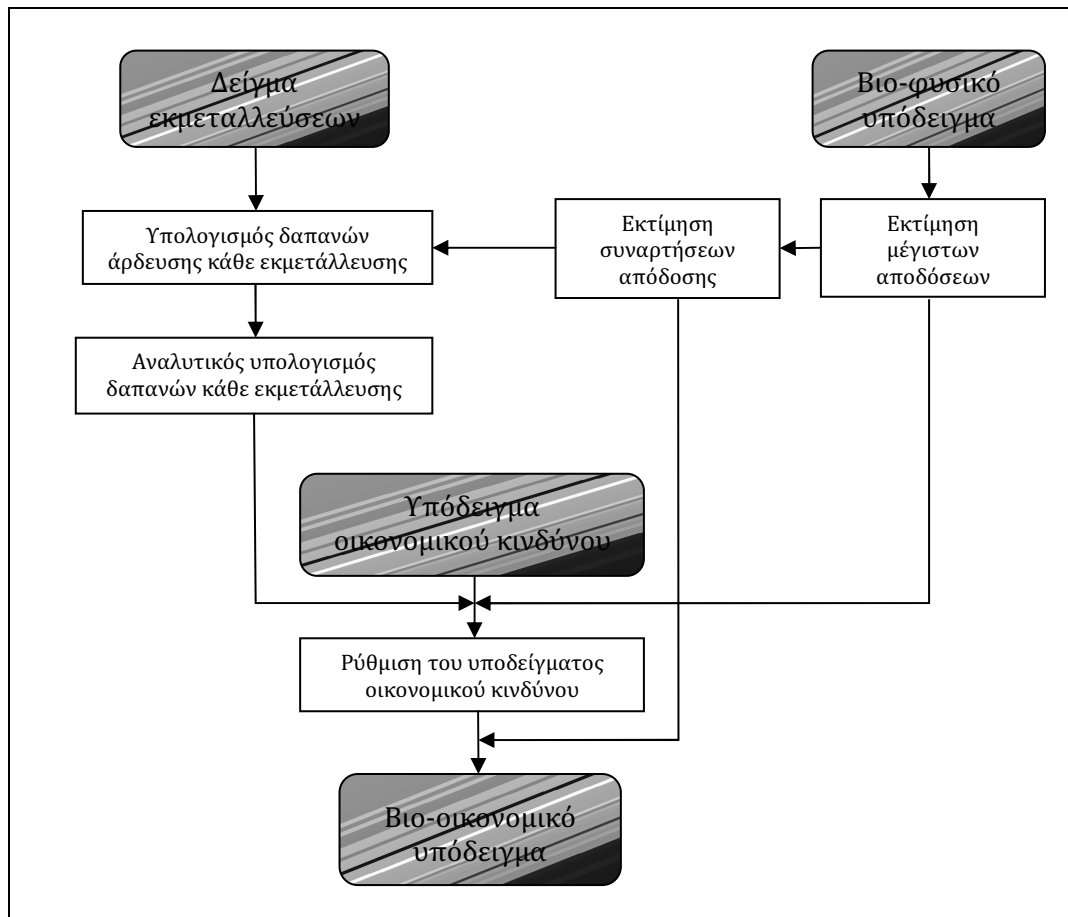
Τα δεδομένα των εκμεταλλεύσεων του δείγματος αναφέρονται στο 2005, τελευταίο έτος πριν την εφαρμογή των μέτρων της ενδιάμεσης αναθεώρησης στην Ελλάδα. Χαρακτηριστικό των εκμεταλλεύσεων του δείγματος, σύμφωνα με τον πίνακα 5.1, είναι το σχετικά μεγάλο μέγεθος τους, με μέσο όρο Χρησιμοποιούμενης Γεωργικής Έκτασης (ΧΓΕ) τα 117.9 στρέμματα, καθώς και το υψηλό ποσοστό αυτών που καλλιεργούν βαμβάκι (94%). Το βαμβάκι είναι από πλευράς έκτασης η σημαντικότερη καλλιέργεια του δείγματος και η παρουσία του, σε συνδυασμό με τη καλλιέργεια του καπνού (Virginia), δικαιολογεί το υψηλό ποσοστό των αρδευόμενων εκτάσεων (103.8 στρέμματα, ήτοι 88% της ΧΓΕ).

## 5.3 Κατασκευή του βιο-οικονομικού υποδείγματος

### 5.3.1 Εισαγωγή

Όπως προκύπτει από τα κεφάλαια που προηγήθηκαν, το τελικό βιο-οικονομικό υπόδειγμα αποτελεί μια σύζευξη του υποδείγματος οικονομικού κινδύνου που αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 3 και των συναρτήσεων απόδοσης-νερού που εκτιμήθηκαν στο κεφάλαιο 4. Για τη κατασκευή του υποδείγματος υπολογίστηκαν λεπτομερώς οι δαπάνες κάθε εκμετάλλευσης, εκτός από αυτές που σχετίζονται με την άρδευση (κόστος ενέργειας). Αυτές εκτιμήθηκαν με βάση τις συναρτήσεις απόδοσης για κάθε καλλιέργεια, όπως θα παρουσιαστεί αναλυτικά στις επόμενες παραγράφους. Τα βήματα που ακολουθούνται για την κατασκευή του υποδείγματος παρουσιάζονται στο σχήμα 5.1.

Το αρχικό υπόδειγμα οικονομικού κινδύνου που κατασκευάστηκε με τα δεδομένα των εκμεταλλεύσεων του δείγματος ρυθμίστηκε χρησιμοποιώντας τις παρατηρούμενες αποδόσεις των καλλιεργειών για το έτος βάσης ως παραμέτρους. Αυτό σημαίνει πως η ρύθμιση δεν αφορά στο τελικό βιο-οικονομικό υπόδειγμα αλλά στο αρχικό υπόδειγμα οικονομικού κινδύνου, αφού η ακολουθούμενη διαδικασία ρύθμισης (ΘΜΠ), η οποία στηρίζεται στις συνθήκες πρώτης τάξης ως προς το επίπεδο κάθε δραστηριότητας, δεν μπορεί να εφαρμοστεί όταν οι μεταβλητές απόφασης περιλαμβάνουν ταυτόχρονα και τη χρησιμοποιούμενη ποσότητα νερού άρδευσης (και κατά συνέπεια τις τελικές αποδόσεις των καλλιεργειών). Ο λόγος είναι πως η ποσότητα της άρδευσης και οι τελικές αποδόσεις που παρατηρούνται σε τεχνικοοικονομικά δεδομένα εκμεταλλεύσεων δεν αποτελούν προσδοκίες του παραγωγού στην αρχή κάθε περιόδου, αλλά αντίθετα αναφέρονται στην αντίδραση του παραγωγού στις κλιματικές συνθήκες που αντιμετωπίζει ημερησίως κατά τη διάρκεια της περιόδου.



**Σχήμα 5.1: Διαδικασία κατασκευής του βιο-οικονομικού υποδείγματος**

Ανάλογη προσέγγιση ακολουθείται και στην περίπτωση της σύζευξης του βιο-φυσικού υποδείγματος STICS (Brisson *et al.*, 2003) και του οικονομικού υποδείγματος AROPAj (Galko & Jayet, 2011; Jayet & Petsakos, 2010). Το τελευταίο αποτελεί ένα στατικό υπόδειγμα γραμμικού-μικτού ακέραιου προγραμματισμού (Mixed Integer Programming – MIP) που έχει ως στόχο την εκτίμηση των επιπτώσεων των μεταρρυθμίσεων της ΚΑΠ σε εθνικό (Γαλλία) και πανευρωπαϊκό επίπεδο. Το AROPAj δύναται να ενσωματώσει συναρτήσεις απόδοσης-αζώτου προερχόμενες από το STICS, αλλά η ρύθμιση του πραγματοποιείται *πριν* από τη σύζευξη αυτή. Η ρύθμιση του AROPAj αφορά στον επαναπροσδιορισμό κάποιων παραμέτρων του υποδείγματος μέσω μιας διαδικασίας που στηρίζεται σε μεθόδους προσομοίωσης (Monte Carlo) και σε αλγορίθμους κλίσεων (gradient), έτσι ώστε να μειωθεί η απόσταση μεταξύ των παρατηρήσεων του έτους βάσης και των λύσεων του υποδείγματος. Αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας ρύθμισης δίνεται από τους De Cara *et al.* (2005) και De Cara και Jayet (2000).

### 5.3.2 Αντικειμενική συνάρτηση

Όπως προαναφέρθηκε, το βιο-οικονομικό υπόδειγμα βασίζεται στη μεγιστοποίηση του βέβαιου ισοδύναμου του παραγωγού,  $CE$ , υπό ένα σύνολο περιορισμών που αντιπρο-

σωπεύουν τη διαθεσιμότητα των συντελεστών και την χρησιμοποιούμενη τεχνολογία παραγωγής. Σε διανυσματική μορφή, η αντικειμενική συνάρτηση του αρχικού υποδείγματος οικονομικού κινδύνου γράφεται ως

$$CE = \omega + \mathbf{x}_\rho^T [\mathbf{r} - \mathbf{c}_\rho(\mathbf{L}^z)] - \mathbf{x}_\phi^T \mathbf{c}_\phi - \frac{1}{2} \frac{\mathbf{x}_\rho^T \mathbf{V} \mathbf{x}_\rho}{[\omega + \mathbf{x}_\rho^T [\mathbf{r} - \mathbf{c}_\rho(\mathbf{L}^z)] - \mathbf{x}_\phi^T \mathbf{c}_\phi]}$$

Το οποίο μετά τη ρύθμιση παίρνει τη μορφή

$$CE = \omega + \mathbf{x}_\rho^T [\mathbf{r} - \mathbf{c}_\rho(\mathbf{L}^z) - \mathbf{v}] - \mathbf{x}_\phi^T \mathbf{c}_\phi - \frac{1}{2} \frac{\mathbf{x}_\rho^T \mathbf{S} \mathbf{x}_\rho}{[\omega + \mathbf{x}_\rho^T [\mathbf{r} - \mathbf{c}_\rho(\mathbf{L}^z) - \mathbf{v}] - \mathbf{x}_\phi^T \mathbf{c}_\phi]}$$

Ξεκινώντας με τις μεταβλητές του υποδείγματος, το διάνυσμα των δραστηριοτήτων  $\mathbf{x}$  έχει διαμεριστεί σε δυο μέρη, τα  $\mathbf{x}_\rho$  και  $\mathbf{x}_\phi$ , όπου το πρώτο αναπαριστά τις δραστηριότητες που συμμετέχουν στην ακαθάριστη πρόσοδο της εκμετάλλευσης (και συνεπώς διαμορφώνουν τους πίνακες συνδιακύμανσης  $\mathbf{V}$  και  $\mathbf{S}$ ), ενώ το δεύτερο αφορά σε δραστηριότητες που προσθέτουν μόνο στο συνολικό μεταβλητό κόστος. Το διάνυσμα  $\mathbf{x}_\phi$  έχει διάσταση  $2 \times 1$  και συνεπώς περιέχει δυο μόνο στοιχεία, συγκεκριμένα βίκο και αγρανάπαυση  $\mathbf{x}_\phi = [x_{vik}, x_{set}]$ . Ο βίκος χρησιμοποιείται ως ενδιάμεση καλλιέργεια για την ικανοποίηση της απαίτησης αμειψισποράς με ψυχανθή, όπως ορίζουν οι κανόνες ορθής γεωργικής πρακτικής. Στα πλαίσια της αναθεωρημένης ΚΑΠ, η αμειψισπορά με ψυχανθή αποτελεί πλέον υποχρέωση των παραγωγών για την ικανοποίηση της απαίτησης «πολλαπλής συμμόρφωσης» προκειμένου να είναι δυνατή η είσπραξη της ενιαίας ενίσχυσης. Ο συγκεκριμένος περιορισμός και ο τρόπος εξειδίκευσης του θα παρουσιαστεί στη συνέχεια. Οι οικονομικοί συντελεστές στην αντικειμενική συνάρτηση για τον βίκο και την αγρανάπαυση θεωρήθηκαν ίσοι με -10€ και -15€ ανά στρέμμα αντίστοιχα. Πρόκειται δηλαδή για δαπάνες, οι οποίες, στην περίπτωση της αγρανάπαυσης αποτελούν το κόστος κατ' αποκοπήν (ενοικιαζόμενης μηχανικής) εργασίας για τη διατήρηση του εδάφους σε «καλή γεωργική κατάσταση», ενώ για το βίκο περιλαμβάνουν μία άροση και τη σπορά.

Το διάνυσμα  $\mathbf{x}_\rho$  έχει διάσταση  $14 \times 1$  και διαμερίζεται με τη σειρά του σε δυο  $7 \times 1$  διανύσματα, το  $\mathbf{x}_{\rho_{gs}} = [x_{cot_{gs}}, x_{mze_{gs}}, x_{dwt_{gs}}, x_{tob_{gs}}, x_{alf_{gs}}, x_{tom_{gs}}, x_{pep_{gs}}]$  και το  $\mathbf{x}_{\rho_{ns}} = [x_{cot_{ns}}, x_{mze_{ns}}, x_{dwt_{ns}}, x_{tob_{ns}}, x_{alf_{ns}}, x_{tom_{ns}}, x_{pep_{ns}}]$  όπου  $ns$  και  $gs$  οι δείκτες που αναφέρονται σε εδάφη άνευ δομής και καλής δομής αντίστοιχα. Αυτό σημαίνει πως το διάνυσμα των υποψήφιων δραστηριοτήτων περιλαμβάνει τις καλλιέργειες που συναντώνται στο δείγμα των εκμεταλλεύσεων δηλαδή βαμβακιού, αραβοσίτου, σιταριού, καπνού, μηδικής, βιομηχανικής τομάτας (τομάτας για μεταποίηση) και πιπεριάς, σε δυο διαφορετικούς τύπους εδάφους. Ο προσδιορισμός της μορφής της κάθε δραστηριότητας (δηλαδή ο τύπος του εδάφους της καλλιέργειας) στο υφιστάμενο - παρατη-

ρούμενο σχέδιο παραγωγής στηρίζεται στα στοιχεία που συλλέχτηκαν για τις εκμεταλλεύσεις του δείγματος. Κατά τη ρύθμιση του υποδείγματος χρησιμοποιήθηκαν όλες οι καλλιέργειες του διανύσματος  $\mathbf{x}_p$ , με αποτέλεσμα οι πίνακες συνδιακύμανσης κάθε εκμετάλλευσης να έχουν διάσταση  $14 \times 14$ .

Το  $L^2$  αντιπροσωπεύει τον πίνακα ( $12 \times 14$ ) της αμειβόμενης ανθρώπινης εργασίας ανά μήνα και καλλιέργεια και αποτελεί μια ακόμα μεταβλητή του υποδείγματος. Σε αντίθεση με την ποσότητα του νερού, η οποία δεν λαμβάνεται υπόψη κατά τη ρύθμιση του υποδείγματος για τους λόγους που παρουσιάστηκαν παραπάνω, η τελική χρησιμοποιούμενη αμειβόμενη εργασία μπορεί να μεταφραστεί ως «προσδοκία» του παραγωγού στην αρχή της περιόδου, καθώς οι απαιτήσεις σε ανθρώπινη εργασία κάθε καλλιέργειας θεωρείται πως είναι σταθερές.

Περνώντας στις παραμέτρους του υποδείγματος, τα  $\mathbf{u}$ ,  $\mathbf{V}$  και  $\mathbf{S}$  αντιπροσωπεύουν αντίστοιχα το διάνυσμα του επιπλέον οριακού κόστους και τους πίνακες συνδιακύμανσης των ακαθάριστων κερδών της εκμετάλλευσης (τον αρχικό ή «εθνικό» και τον «πραγματικό» αντίστοιχα). Τα  $\mathbf{u}$  και  $\mathbf{S}$  θα εκτιμηθούν στη συνέχεια κατά τη ρύθμιση του υποδείγματος με τη μέθοδο που αναλύθηκε στην ενότητα 3.7.3. Το  $\omega$  αποτελεί τον αρχικό πλούτο του παραγωγού, ή με άλλα λόγια το μη στοχαστικό κομμάτι του πλούτου. Σύμφωνα με τα όσα παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 3, στα πλαίσια της αναθεωρημένης ΚΑΠ το  $\omega$  μπορεί να θεωρηθεί πως αντιπροσωπεύει την ενιαία ενίσχυση που λαμβάνει ο παραγωγός.

Η ακαθάριστη πρόσοδος κάθε καλλιέργειας  $i$  (ο δείκτης των καλλιεργειών που περιλαμβάνονται στο διάνυσμα  $\mathbf{x}_p$ , με  $i = 1, 2, \dots, 14$ ) γράφεται ως

$$r_i = (p_i + h_i)Y_i + \zeta_i$$

όπου  $Y_i$  η απόδοση κάθε  $i$  καλλιέργειας (κιλά/στρ) ενώ τα  $p_i$ ,  $h_i$  και  $\zeta_i$  ακολουθούν το συμβολισμό (notation) που υιοθετήθηκε στο κεφάλαιο 3 και εκφράζουν τις τιμές των προϊόντων (€/κιλό), τις ενισχύσεις στην παραγωγή (€/κιλό) και τις στρεμματικές ενισχύσεις (€/στρ) αντίστοιχα. Οι ενισχύσεις στην παραγωγή κατά το έτος βάσης αφορούν στις καλλιέργειες του καπνού, του βαμβακιού και της βιομηχανικής τομάτας, ενώ οι στρεμματικές ενισχύσεις σε εκείνες του σιταριού και του αραβοσίτου.

Ένα χαρακτηριστικό της εκδοχής της μεθόδου ΘΜΠ που προτείνεται στην παρούσα διατριβή είναι η δυνατότητα επέκτασης της προκειμένου να ληφθούν υπόψη και εναλλακτικές δραστηριότητες οι οποίες δεν παρατηρούνται στο υφιστάμενο σχέδιο παραγωγής μιας εκμετάλλευσης (βλέπε ενότητα 3.8). Η διαδικασία αυτή απαιτεί τον ορισμό, εκ των προτέρων, των τιμών των παραμέτρων που συνδέονται με τις μη παρατηρούμε-

νες δραστηριότητες, όπως ακριβώς ισχύει και στα κλασικά υποδείγματα ΓΠ. Για το λόγο αυτό έγινε η υπόθεση πως αν μια  $i_{ns}$  ( $i_{gs}$ ) καλλιέργεια εμφανίζεται στο υφιστάμενο σχέδιο παραγωγής, τότε η αντίστοιχη  $i_{gs}$  ( $i_{ns}$ ) θα χαρακτηρίζεται από την ίδια απόδοση ανά στρέμμα. Όταν μια  $i$  καλλιέργεια δεν εμφανίζεται καθόλου στο υφιστάμενο σχέδιο παραγωγής, τότε η απόδοση της ισούται με τον αντίστοιχο μέσο όρο του δείγματος (πίνακας 5.2). Ανάλογες υποθέσεις υιοθετήθηκαν για τις τιμές παραγωγού και τις στρεμματικές ενισχύσεις. Αντίθετα, οι επιδοτήσεις στην παραγωγή θεωρήθηκαν χαρακτηριστικό της εκμετάλλευσης και συνεπώς θεωρούνται μηδέν όταν δεν παρατηρούνται κατά το έτος βάσης.

**Πίνακας 5.2: Οικονομικά χαρακτηριστικά καλλιεργειών**

Καλλιέργεια	Μέση απόδοση (κιά/στρ)	Μέση τιμή (€/κιά)
Βαμβάκι	324.3	0.29
Αραβόσιτος	1294.0	0.14
Καπνός	461.5	0.40
Σιτάρι	321.1	0.14
Μηδική	1200.0	0.15
Πιπεριές	4000.0	0.32
Τομάτες	9482.3	0.06

Πηγή: Ιδία επεξεργασία

Το διάνυσμα των μεταβλητών δαπανών  $c_p$  αποτελεί το άθροισμα τριών τύπων δαπανών: (α) της δαπάνης μίσθωσης ξένης ανθρώπινης εργασίας, (β) της δαπάνης άρδευσης και (γ) ενός σταθερού όρου που περιλαμβάνει όλες τις υπόλοιπες δαπάνες που δεν σχετίζονται με την άρδευση ή τη μίσθωση ανθρώπινης εργασίας, αλλά αφορά σε δαπάνες σποράς, λίπανσης, καυσίμων, κατ' αποκοπήν μηχανικής εργασίας, καθώς και σε διάφορα τέλη ή γενικές δαπάνες. Κατά τη διαδικασία της ρύθμισης, από τους τρεις αυτούς τύπους δαπανών μόνο εκείνη της μίσθωσης ξένης ανθρώπινης εργασίας υπολογίζεται ενδογενώς, αφού, όπως προαναφέρθηκε, το  $L^Z$  (η αμειβόμενη ανθρώπινη εργασία ανά μήνα και καλλιέργεια) αποτελεί μεταβλητή του υποδείγματος. Η δαπάνη μίσθωσης ξένης εργασίας ( $cl_i$ ) για την κάλυψη των απαιτήσεων της  $i$  καλλιέργειας όταν δεν επαρκεί η εργασία του παραγωγού (ή/και της οικογένειας) θεωρείται πως έχει γραμμική μορφή και υπολογίζεται ως

$$cl_i = z_i \sum_{m=1}^{12} l_{mi}^z \quad (5.1)$$

όπου  $z_i$  η αμοιβή της εργασίας (€/ώρα) και  $l_{mi}^z$  οι ώρες ανθρώπινης ενοικιαζόμενης εργασίας για το μήνα  $m$  (το στοιχείο της  $m$  γραμμής και της  $i$  στήλης του πίνακα  $L^Z$ ). Ο

περιορισμός για την κάλυψη των απαιτήσεων σε ανθρώπινη εργασία των καλλιεργειών θα παρουσιαστεί αναλυτικά στη συνέχεια.

Οι δαπάνες άρδευσης θεωρούνται ως παράμετροι για τις ανάγκες του αρχικού υποδείγματος οικονομικού κινδύνου και υπολογίστηκαν με τη βοήθεια των συναρτήσεων απόδοσης και της παρατηρούμενης απόδοσης κάθε καλλιέργειας ( $Y^*$ ) σε κάθε εκμετάλλευση. Ειδικότερα, για κάθε μια από τις καλλιέργειες του κεφαλαίου 4 (βαμβάκι, αραβόσιτος, σιτάρι, μηδική, καπνός) υπολογίστηκε η μέση τιμή των εμπειρικών κατανομών της εξατμισοδιαπνοή ( $ETc$ ) και της ωφέλιμης βροχής ( $P$ ) κατά τη βλαστική περίοδο κάθε καλλιέργειας (πίνακας 5.3).

**Πίνακας 5.3: Μέσοι όροι μετεωρολογικών παραμέτρων καλλιεργειών**

Καλλιέργεια	Βροχή (mm)		ETc (mm·d <sup>-1</sup> )	
	Μ.Ο	Τ. Απόκλιση	Μ.Ο	Τ. Απόκλιση
<b>Βαμβάκι</b>	99.99	51.42	647.16	66.36
<b>Αραβόσιτος</b>	91.60	50.71	672.51	64.29
<b>Καπνός</b>	52.60	27.31	492.86	45.57
<b>Σιτάρι*</b>	261.16	67.54	282.41	47.52
<b>Μηδική</b>	118.21	51.90	633.28	59.17

\* Περιλαμβάνει και τις βροχές του φθινοπώρου πριν τη σοπορά  
Πηγή: Ιδία επεξεργασία

Με βάση τις τιμές του πίνακα 5.3 προέκυψαν οι αντίστοιχες για κάθε εκμετάλλευση κατά τρόπο αυτόματο (μέσω του αλγορίθμου επίλυσης του GAMS) από μια συνεχή ομοιόμορφη κατανομή που ορίστηκε σε ένα εύρος  $\pm 5\%$  των παραπάνω μέσων τιμών. Τα  $P$ ,  $ETc$  και η παρατηρούμενη απόδοση,  $Y^*$ , χρησιμοποιήθηκαν στη συνέχεια για τον υπολογισμό της «πραγματικής» ποσότητας άρδευσης ( $IR^*$ ) που αντιστοιχεί στις καλλιέργειες κάθε εκμετάλλευσης. Έτσι, για το βαμβάκι, ξεκινώντας από την τετραγωνική συνάρτηση

$$Y^* = \hat{b}_0 + \hat{b}_1 \left( \frac{IR^* + P}{ETc} \right) + \hat{b}_2 \left( \frac{IR^* + P}{ETc} \right)^2$$

υπολογίστηκε το  $IR^*$  κάθε εκμετάλλευσης ως

$$IR^* = ETc \left[ \frac{-\hat{b}_1 + \sqrt{(\hat{b}_1)^2 - 4\hat{b}_2(\hat{b}_0 - Y^*)}}{2\hat{b}_2} \right] - P \quad (5.2)$$

Ο αραβόσιτος, ο καπνός και η μηδική χρησιμοποιούν τη λογιστική συνάρτηση απόδοσης και συνεπώς το  $IR^*$  κάθε εκμετάλλευσης υπολογίζεται ως εξής:

$$\ln\left(\frac{Y_{MAX}}{Y^*} - 1\right) = \hat{b}_0 + \hat{b}_1 \left(\frac{IR^* + P}{ETc}\right) \Leftrightarrow$$

$$IR^* = ETc \left[ \frac{\ln\left(\frac{Y_{MAX}}{Y^*} - 1\right) - \hat{b}_0}{\hat{b}_1} \right] - P \quad (5.3)$$

Στις καλλιέργειες της βιομηχανικής τομάτας και της πιπεριάς, για τις οποίες δεν εκτιμήθηκε κάποια συνάρτηση απόδοσης, η ποσότητα νερού άρδευσης θεωρήθηκε ίση με 600 mm (ή ισοδύναμα 600 m<sup>3</sup>/στρ).

Οι δαπάνες άρδευσης κάθε καλλιέργειας ( $cw_i$ ) μπορούν να υπολογιστούν από την ακόλουθη σχέση (Περιφέρεια Θεσσαλίας, 2005):

$$cw_i = A_e \times HP \times T_i \times z_e \quad (5.4)$$

Το  $A_e$  είναι ένας συντελεστής που λαμβάνει διαφορετική τιμή ανάλογα με το είδος της ενέργειας  $e$  που χρησιμοποιεί η αντλία, όπου  $e = [oil, elec]$  (δηλαδή πετρέλαιο ή ρεύμα) ενώ οι αντίστοιχες τιμές του  $A_e$  είναι  $A_{oil} = 0.2$  και  $A_{elec} = 0.73$ . Με  $HP$  συμβολίζεται η ιπποδύναμη της αντλίας (ίπποι), χαρακτηριστικό απαραίτητο για την εκτίμηση της κατανάλωσης ενέργειας για χρόνο λειτουργίας  $T_i$  (ώρες). Τέλος, το  $z_e$  συμβολίζει την τιμή της ενέργειας (€ ανά λίτρο πετρελαίου ή τιμή κιλοβατώρας). Για δεδομένη παροχή της αντλίας,  $\Pi$  (m<sup>3</sup>/ώρα), ο χρόνος που απαιτείται για την άντληση μιας ποσότητας νερού  $IR_i^{a*}$  ισούται με

$$T = \frac{IR_i^{a*}}{\Pi} \quad (5.5)$$

Από τις (5.4) και (5.5) προκύπτει πως η δαπάνη άρδευσης  $i$  καλλιέργειας μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση της αντλούμενης ποσότητας νερού:

$$cw_i = A_e \times HP \times \frac{IR_i^{a*}}{\Pi} \times z_e \quad (5.6)$$

Να σημειωθεί πως η ποσότητα νερού που αντλείται, ( $IR_i^{a*}$ ) δεν συμπίπτει με την ποσότητα που φτάνει τελικά στο ριζόστρωμα των καλλιεργειών ( $IR_i^*$ ) και η οποία αντιστοιχεί στις εξισώσεις (5.2) και (5.3), αφού γενικά ισχύει  $IR_i^{a*} > IR_i^*$ . Ο λόγος είναι πως παρατηρούνται απώλειες νερού τόσο κατά τη μεταφορά του μέσω του αρδευτικού δικτύου, όσο και κατά την εφαρμογή του στο χωράφι. Πρόκειται για την «αποδοτικότητα διανομής» ( $E_d$ ) και την «αποδοτικότητα εφαρμογής» του νερού ( $E_a$ ), οι οποίες πρέπει να λαμβάνονται πάντα υπόψη κατά το σχεδιασμό ενός προγράμματος άρδευσης γιατί συνεπάγονται επιπρόσθετες ποσότητες νερού για την κάλυψη των αρδευτικών ανα-



γκών (Παπαζαφειρίου, 1998). Η αποδοτικότητα διανομής αφορά στην αναλογία ανάμεσα στο νερό που αντλείται από την πηγή τροφοδοσίας (αρδευτικό δίκτυο ή γεώτρηση) και αυτού που τελικά φτάνει στο χωράφι. Η αποδοτικότητα εφαρμογής αντιπροσωπεύει το ποσοστό του νερού που γίνεται διαθέσιμο στα φυτά (αποθηκεύεται στο ριζόστρωμα) ως προς το νερό που εφαρμόστηκε στο χωράφι και εξαρτάται από τον τρόπο άρδευσης, σε συνδυασμό με τα χαρακτηριστικά του εδάφους. Για παράδειγμα, απώλειες παρατηρούνται όταν η ποσότητα νερού άρδευσης υπερβαίνει τη δυνατότητα κατακράτησης νερού από το έδαφος (του  $TAW$ ), ή όταν ο ρυθμός εφαρμογής είναι μεγαλύτερος από τη διηθητική ικανότητα του εδάφους. Σε κάθε περίπτωση, η συνολική αποδοτικότητα της άρδευσης ( $E_f$ ) ισούται με το γινόμενο των επιμέρους τιμών αποδοτικότητας:  $E_f = E_d \times E_a$ . Ενδεικτικές τιμές των  $E_d$  και  $E_a$  δίνονται από τον Παπαζαφειρίου (1998)<sup>32</sup> και αναπαράγονται στον πίνακα 5.4.

**Πίνακας 5.4: Ενδεικτικές τιμές αποδοτικότητας διανομής και εφαρμογής σε αρδευτικά δίκτυα**

<b>Συντήρηση και λειτουργία δικτύου</b>	<b>Αποδοτικότητα διανομής, <math>E_d</math></b>
<i>Πολύ καλή</i>	0.60-0.70
<i>Ικανοποιητική</i>	0.50-0.60
<i>Ελλιπής</i>	0.35-0.45
<i>φτωχή</i>	0.25-0.35
<b>Μέθοδος άρδευσης</b>	<b>Αποδοτικότητα εφαρμογής, <math>E_a</math></b>
<i>Κατάκλυση</i>	0.60-0.80
<i>Αυλάκια</i>	0.55-0.70
<i>Καταιονισμός</i>	0.60-0.80
<i>Σταγόνες</i>	0.75-0.95

Πηγή: Παπαζαφειρίου, 1998

Από τις 70 εκμεταλλεύσεις του δείγματος, η πλειονότητα (67 συνολικά) χρησιμοποιεί ιδιωτικές γεωτρήσεις, κάτι που σημαίνει πως η αποδοτικότητα διανομής δε σχετίζεται με κάποιο αρδευτικό δίκτυο και συνεπώς η τιμή της πρέπει να είναι πολύ μεγαλύτερη από εκείνες που παρουσιάζονται στον πίνακα 5.4. Για το λόγο αυτό θεωρήθηκε πως  $E_d = 0.90$ . Για τις υπόλοιπες τρεις εκμεταλλεύσεις που χρησιμοποιούν το τοπικό αρδευτικό δίκτυο επιλέχτηκε μια αποδοτικότητα διανομής 0.65, δηλαδή θεωρήθηκε πως το δίκτυο «συντηρείται και λειτουργεί πολύ καλά». Τα δυο συστήματα άρδευσης που εμφανίζονται στο δείγμα αφορούν σε τεχνητή βροχή (καταιονισμό) και σε στάγδην. Η αποδοτικότητες εφαρμογής ( $E_a$ ) που επιλέχτηκαν για τα δυο αυτά συστήματα είναι

<sup>32</sup> Πρόκειται για αναδημοσίευση τιμών που παρουσιάστηκαν νωρίτερα από τους Bos και Nugteren (1974).

0.70 και 0.85 αντίστοιχα, οι οποίες αποτελούν τις «μέσες» τιμές εκείνων του πίνακα 5.4. Χρησιμοποιώντας τις υπολογισθέντες τιμές  $E_f$ , η εξίσωση (5.6) γράφεται ως

$$cw_i = A_e \times HP \times \frac{1}{\Pi} \frac{IR_i^*}{E_f} \times z_e \quad (5.7)$$

## 5.4 Οι περιορισμοί του υποδείγματος

### 5.4.1 Τεχνικοί περιορισμοί

Οι τεχνικοί περιορισμοί του υποδείγματος σχετίζονται με τη διαθεσιμότητα και τον τρόπο χρήσης των συντελεστών παραγωγής κάθε εκμετάλλευσης, δηλαδή του εδάφους, του νερού άρδευσης και της ανθρώπινης εργασίας. Αλγεβρικά εκφράζονται ως εξής:

1. *Συνολική έκταση:*

$$x_{set} + \sum_i x_i = b_{land} \quad (5.8)$$

Το άθροισμα των εκτάσεων κάθε καλλιέργειας,  $x_i$ , και της έκτασης που αφήνεται σε αγρανάπαυση ( $x_{set}$ ), πρέπει να ισούται με το σύνολο της διαθέσιμης έκτασης κάθε εκμετάλλευσης κατά το έτος βάσης ( $b_{land}$ ). Πρόκειται για μια παραλλαγή του κλασικού περιορισμού που απαιτεί η συνολική καλλιεργούμενη έκταση να είναι μικρότερη ή ίση από τη διαθέσιμη στην εκμετάλλευση ( $\sum_i x_i \leq b_{land}$ ). Με τη μετατροπή της ανισότητας σε ισότητα, λαμβάνεται υπόψη η δραστηριότητα «αγρανάπαυση» και επίσης εξασφαλίζεται μια θετική δυική τιμή για το έδαφος (κόστος ευκαιρίας). Όπως γίνεται φανερό από την εξίσωση (5.8), η καλλιέργεια του βίκου δεν λαμβάνεται υπόψη στον περιορισμό της συνολικής έκτασης αφού, όπως προαναφέρθηκε, ο βίκος χρησιμοποιείται ως ενδιάμεση καλλιέργεια για λόγους αμειψισποράς κι έτσι η έκταση που καταλαμβάνει περιλαμβάνεται ήδη στο δεξί μέρος του περιορισμού.

2. *Συνολική αρδευόμενη έκταση:*

$$\sum_r x_r \leq b_r$$

Το σύνολο των εκτάσεων των αρδευόμενων καλλιεργειών ( $x_r$ ) δεν μπορεί να ξεπεράσει τη συνολική αρδευθείσα έκταση κατά το έτος βάσης ( $b_r$ ). Πρόκειται για περιορισμό που σχετίζεται με τη διαθεσιμότητα εδαφών που έχουν δυνατότητα άρδευσης (δηλαδή την υποδομή άρδευσης ή πρόσβαση σε νερό). Οι αρδευόμενες καλλιέργειες του υποδείγματος είναι το βαμβάκι, ο αραβόσιτος, ο καπνός, η μηδική, η βιομηχανική τομάτα και η πι-

περιά. Αυτό σημαίνει πως ο δείκτης  $r$  αναφέρεται σε 12 καλλιέργειες (τις έξι προαναφερθείσες σε δυο διαφορετικούς τύπους εδαφών η κάθε μια).

Να σημειωθεί στο σημείο αυτό πως στην πραγματικότητα το  $b_r$ , αν και ορίζεται ως η διαθέσιμη αρδευόμενη έκταση κάθε εκμετάλλευσης (δηλαδή η έκταση στην οποία μπορούν να καλλιεργηθούν ποτιστικές καλλιέργειες), εντούτοις υπολογίζεται με βάση τις παρατηρούμενη αρδευθείσα έκταση της εκμετάλλευσης. Οι δυο αυτές κατηγορίες εδαφών δεν είναι απαραίτητο να ταυτίζονται, καθώς η πρώτη αναφέρεται στις συνολικές εν δυνάμει αρδευθείσες εκτάσεις, ενώ η δεύτερη στις συνολικές παρατηρούμενες κατά το έτος βάσης. Η συγκεκριμένη εξειδίκευση του περιορισμού αποτελεί συνεπώς μια απλοποίηση που δικαιολογείται από την έλλειψη στοιχείων σχετικά με την πραγματική έκταση αρδευόμενων εκτάσεων κάθε εκμετάλλευσης.

### 3. Περιορισμός διαθεσιμότητας εδαφών:

$$\sum_{i_{gs}} x_{i_{gs}} \leq b_{gs}$$

και

$$\sum_{i_{ns}} x_{i_{ns}} \leq b_{ns}$$

Ο περιορισμός σχετίζεται με τη διαθέσιμη έκταση ανά κατηγορία εδάφους. Έτσι, η συνολική έκταση που καταλαμβάνουν οι καλλιέργειες σε εδάφη καλής και άνευ δομής δεν μπορούν να ξεπεράσουν τις αντίστοιχες συνολικές εκτάσεις κατά το έτος βάσης. Το είδος του εδάφους σχετίζεται με τη συνάρτηση απόδοσης κάθε καλλιέργειας (βλέπε κεφάλαιο 4) και κατά συνέπεια με την τελική απόδοση και τη ζητούμενη ποσότητα νερού άρδευσης.

### 4. Περιορισμός αρδευτικού συστήματος:

Ο περιορισμός αρδευτικού συστήματος σχετίζεται με τις δυνατότητες της εκμετάλλευσης να αντλήσει νερό προκειμένου να καλυφθούν οι αντίστοιχες απαιτήσεις των καλλιεργειών και είναι συμπληρωματικός εκείνου της συνολικής αρδευόμενης έκτασης. Η τυπική μορφή του περιορισμού που χρησιμοποιείται στα περισσότερα υποδείγματα ΜΠ για την προτυποποίηση της περιορισμένης διαθεσιμότητας αρδευτικού νερού είναι η ακόλουθη:

$$\sum_r IR_r^a x_r \leq b_{water} \quad (5.9)$$

όπου το  $IR_r^a$  αναφέρεται στην «πραγματική» ποσότητα του νερού που αντλήθηκε από την εκμετάλλευση και ισούται με το πηλίκο του  $IR_r$ , το οποίο υπολογίστηκε από τις εξισώσεις (5.2) και (5.3), προς τη συνολική αποδοτικότητα της άρδευσης ( $E_f$ ). Το δεξί μέλος του περιορισμού ( $b_{water}$ ) αναφέρεται στη συνολική ποσότητα του νερού άρδευσης που αντλήθηκε κατά το έτος βάσης και υπολογίζεται ως  $\sum_r IR_r^{a*} x_r^*$ , όπου  $IR_r^{a*}$  η «πραγματική» ποσότητα νερού άρδευσης ανά στρέμμα που χρησιμοποιήθηκε κατά το έτος βάσης και  $x_r^*$  η παρατηρούμενη έκταση κάθε  $r$  δραστηριότητας. Να σημειωθεί πως ο συγκεκριμένος περιορισμός επίσης αποτελεί στην πραγματικότητα μια απλοποίηση εκείνου που αντιμετωπίζουν οι παραγωγοί και ο οποίος σχετίζεται με τη δυνατότητα του αρδευτικού τους συστήματος (αριθμός και παροχή αντλιών που έχουν στη διάθεση τους) να αρδεύσουν ικανοποιητικά το σύνολο των εκτάσεων τους κατά τις κρίσιμες ημέρες του καλοκαιριού. Μια διαφορετική προτυποποίηση του περιορισμού που επιχειρήθηκε δοκιμαστικά ήταν η ακόλουθη:

$$\sum_r ETc_r^{max} x_r \leq E_f \sum_\alpha \Pi_\alpha T^{max} \quad (5.10)$$

όπου  $ETc_r^{max}$  η μέγιστη τιμή ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής της  $r$  αρδευόμενης καλλιέργειας ( $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ ), η οποία παρατηρείται τους καλοκαιρινούς μήνες, συνήθως τον Ιούλιο. Με  $E_f$  συμβολίζεται η αποδοτικότητα της άρδευσης,  $\Pi_\alpha$  η παροχή της  $\alpha$  αντλίας ( $\text{m}^3$  ανά ώρα) και  $T^{max}$  η μέγιστη ημερήσια διάρκεια λειτουργίας της (ώρες). Προφανώς, όταν δεν ικανοποιείται ο περιορισμός (5.10), ο παραγωγός δεν θα μπορεί να καλύψει πλήρως τις αρδευτικές ανάγκες των καλλιεργειών του με αποτέλεσμα την εμφάνιση υδατικής καταπόνησης και τη μείωση των τελικών αποδόσεων.

Οι παράμετροι που απαιτούνται για την εξειδίκευση του περιορισμού είναι τα  $T^{max}$  και  $ETc^{max}$ . Το πρώτο μπορεί να θεωρηθεί πως ισούται με 18 ώρες ημερησίως, ενώ για το δεύτερο χρησιμοποιήθηκε η προσδοκώμενη (μέση) τιμή της εμπειρικής κατανομής της μέγιστης  $ETc$  κάθε καλλιέργειας για τα 31 έτη που λαμβάνονται υπόψη στην ανάλυση (πίνακας 5.5). Για τις καλλιέργειες πιπεριάς και τομάτας το  $ETc^{max}$  θεωρήθηκε ίσο με  $8 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ .

**Πίνακας 5.5: Μέγιστη τιμή  $ETc$  αρδευόμενων καλλιεργειών ( $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ )**

Καλλιέργεια	Μέγιστη $ETc$
Βαμβάκι	7.72
Αραβόσιτος	8.65
Καπνός	8.29
Μηδική	8.08
Τομάτες, Πιπεριές	8.00

Πηγή: Ιδία επεξεργασία

Η συγκεκριμένη μορφή του περιορισμού τελικά δεν προτιμήθηκε, καθώς υπολογιστικά πειράματα έδειξαν πως το αρδευτικό σύστημα κάποιων εκμεταλλεύσεων δεν μπορούσε να τον ικανοποιήσει για το υφιστάμενο (παρατηρούμενο) σχέδιο παραγωγής.

5. Περιορισμός διαθέσιμης ανθρώπινης εργασίας:

$$\sum_i x_i \psi_{m,i} \leq l_m^f + \sum_i l_{m,i}^z \quad (5.11)$$

όπου  $\psi_{m,i}$  οι απαιτήσεις σε ανθρώπινη εργασία της  $i$  καλλιέργειας το μήνα  $m$ . Οι μηνιαίες απαιτήσεις σε εργασία καλύπτονται από ένα συνδυασμό αμειβόμενης ( $l_{m,i}^z$ ) και οικογενειακής εργασίας (εργασία νοικοκυριού ή παραγωγού,  $l_m^f$ ). Όταν οι μηνιαίες απαιτήσεις ανθρώπινης εργασίας όλων των καλλιεργειών (αριστερό μέρος του περιορισμού 5.11) δεν ικανοποιούνται από τη διαθέσιμη εργασία του νοικοκυριού, τότε μόνο είναι απαραίτητη η μίσθωση ξένης εργασίας ( $l_{m,i}^z$ ), κάτι που συνεπάγεται μια δαπάνη  $cl_i$ , σύμφωνα με την εξίσωση (5.1).

**Πίνακας 5.6: Μέσες απαιτήσεις σε ανθρώπινη εργασία (ώρες/στρ)**

	cot	mze	tob	dwt	alf	pep	tom
Ιανουάριος			0.07				
Φεβρουάριος			2.91	0.10	0.13	1.99	0.32
Μάρτιος	0.03	0.35	1.63		0.19	0.54	0.13
Απρίλιος	0.50	0.43	3.30		0.11	5.52	0.93
Μάιος	3.60	0.22	5.60		0.39	7.93	4.00
Ιούνιος	0.16	0.10	2.19		0.75	1.43	0.10
Ιούλιος	0.44	0.01	5.82		0.82	22.38	0.10
Αύγουστος	0.04		8.13		0.83	21.38	0.05
Σεπτέμβριος	0.04	0.12	12.24		0.26	89.14	0.83
Οκτώβριος	0.08		32.62	0.71			
Νοέμβριος			1.2	0.06			
Δεκέμβριος							

cot: βαμβάκι, mze: αραβόσιτος, tob: καπνός, dwt: σιτάρι, alf: μηδική, pep: πιπεριά, tom: βιομηχανική τομάτα.

Πηγή: Ίδια επεξεργασία

Οι απαιτήσεις κάθε καλλιέργειας προέρχονται από τα δεδομένα των εκμεταλλεύσεων στο δείγμα, κατ' αναλογία με τις αποδόσεις των καλλιεργειών. Ειδικότερα, για κάθε καλλιέργεια και εκμετάλλευση υπολογίστηκαν οι συνολικές ώρες ανθρώπινης εργασίας ανά στρέμμα (οικογενειακής και αμειβόμενης), οι οποίες θεωρήθηκαν πως αποτελούν τις αντίστοιχες απαιτήσεις (τεχνολογία παραγωγής). Επίσης, αν μια  $i_{ns}$  ( $i_{gs}$ ) καλλιέργεια εμφανίζεται στο υφιστάμενο σχέδιο παραγωγής, τότε η αντίστοιχη  $i_{gs}$  ( $i_{ns}$ ) θεωρείται πως έχει τις ίδιες απαιτήσεις σε ώρες ανθρώπινης εργασίας ανά στρέμμα.

Όταν μια  $i$  καλλιέργεια δεν εμφανίζεται καθόλου στο υφιστάμενο σχέδιο παραγωγής, τότε οι απαιτήσεις εκτιμήθηκαν ως ο μέσος όρος από όλες τις εκμεταλλεύσεις του δείγματος για την καλλιέργεια αυτή (πίνακας 5.6).

Σε κάποιες καλλιέργειες η οικογενειακή εργασία δεν προέρχεται αποκλειστικά από τον παραγωγό, αλλά πιθανώς και από άλλα μέλη του νοικοκυριού, ιδιαίτερα σε συγκεκριμένα στάδια της βλαστικής περιόδου όπως είναι η μεταφύτευση ή η συγκομιδή (π.χ. καπνός και πιπεριά). Λόγω πολυπλοκότητας στην προτυποποίηση της ιδιαιτερότητας αυτής, θεωρήθηκε πως μόνο ο αρχηγός της εκμετάλλευσης συμμετέχει στην παραγωγική διαδικασία. Έτσι, η συνολική διαθέσιμη οικογενειακή εργασία κάθε μήνα θεωρήθηκε πως ανέρχεται σε 360 ώρες, δηλαδή 12 ώρες ημερησίως επί 30 ημέρες. Να σημειωθεί όμως πως τόσο η τιμή αυτή, όσο και οι τιμές που παρουσιάζονται στον πίνακα 5.6 δεν περιλαμβάνουν την ανθρώπινη εργασία που σχετίζεται με την άρδευση, αφού συνήθως οι αρδεύσεις πραγματοποιούνται από τον ίδιο τον παραγωγό. Ένα επιπλέον πρόβλημα είναι πως οι αρδεύσεις κάθε καλλιέργειας δεν προσδιορίζονται χρονικά, αφού το υπόδειγμα δεν επιτρέπει τέτοιου είδους ανάλυση. Για το λόγο αυτό υιοθετήθηκε η υπόθεση πως η ημερήσια χρήση κάθε υδραντλίας απαιτεί συνολικά δυο ώρες ανθρώπινης εργασίας (N. Δαναλάτος, προσωπική επικοινωνία, 2011), οι οποίες αφαιρούνται από τις συνολικές 360 ώρες ανά μήνα. Έτσι, η πραγματικά διαθέσιμη οικογενειακή εργασία κάθε μήνα  $m$  ισούται με

$$l_m^f = 360 - 60a$$

όπου  $a$  ο αριθμός των αντλιών που έχει στην κατοχή της η εκμετάλλευση. Ο συντελεστής 60 μπροστά από το  $a$  προκύπτει ως το γινόμενο των ημερών κάθε μήνα (30) και των ωρών ανθρώπινης εργασίας που απαιτούνται για κάθε άρδευση.

#### 5.4.2 Αγρονομικοί περιορισμοί

Οι αγρονομικοί περιορισμοί αφορούν σε αμειψισπορές με ψυχανθή για την ικανοποίηση των προτύπων ορθής γεωργικής πρακτικής και της πολλαπλής συμμόρφωσης (στην αναθεωρημένη ΚΑΠ)

##### 1. Αμειψισπορά με μηδική:

$$x_{alf} \leq 1.5 \sum_{rc} x_{rc}$$

Ο δείκτης  $rc$  συμβολίζει το σύνολο των καλλιεργειών που μπορούν να ενταχθούν σε σχέδιο αμειψισποράς με τη μηδική (βαμβάκι, σιτάρι, αραβόσιτος και καπνός). Πρόκειται για τη μαθηματική διατύπωση μιας πενταετούς αμειψισποράς κατά την οποία ένας

συγκεκριμένος αγρός καλλιεργείται τα τρία πρώτα χρόνια με μηδική και τα υπόλοιπα δυο με κάποια από τις παραπάνω καλλιέργειες. Έτσι, σε μια δεδομένη καλλιεργητική περίοδο ο αγρός έχει πιθανότητα 0.6 να περιέχει μηδική και 0.4 κάποια από τις υπόλοιπες καλλιέργειες. Σε μαθηματικούς όρους αυτό σημαίνει πως η έκταση της μηδικής πρέπει να είναι μικρότερη ή ίση με το 3/2 της συνολική έκτασης των υπολοίπων καλλιεργειών.

2. *Αμειψισπορά με ψυχανθές σε επιλέξιμες εκτάσεις (ΚΑΠ μετά το 2006):*

$$x_{vik} + x_{alf} \geq 0.2 \left( \sum_c x_c + x_{set} \right)$$

Ο συγκεκριμένος περιορισμός στηρίζεται στον οδηγό εφαρμογής της πολλαπλής συμμόρφωσης που εκδόθηκε από το Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων (ΥΠΑΑΤ, 2010), σύμφωνα με τον οποίο ο παραγωγός οφείλει κάθε έτος να καλλιεργεί και να ενσωματώνει στο έδαφος κάποιο ψυχανθές (βίκο στην παρούσα περίπτωση), συμπληρωματικά προς την εαρινή καλλιέργεια, στο 20% της αρόσιμης έκτασης της εκμετάλλευσης. Αρόσιμες είναι οι εκτάσεις που καλλιεργούνται για φυτική παραγωγή ή εκτάσεις που διατηρούνται σε καλή γεωργική και περιβαλλοντική κατάσταση (αγρανάπαυση) και στον παραπάνω περιορισμό συμβολίζονται με τον δείκτη  $c$ . Αντίθετα, σε αγροτεμάχια όπου έχει καλλιεργηθεί ή καλλιεργείται ψυχανθές δεν είναι αναγκαία η συγκεκριμένη αμειψισπορά. Για το λόγο αυτό οι εκτάσεις της μηδικής βρίσκονται στο αριστερό μέρος του περιορισμού. Ο συγκεκριμένος περιορισμός δεν χρησιμοποιείται κατά τη ρύθμιση του υποδείγματος καθώς αφορά σε ένα πλαίσιο πολιτικής που αντιστοιχεί στην αναθεωρημένη ΚΑΠ.

### 5.4.3 Θεσμικοί περιορισμοί και περιορισμοί αγοράς

Αφορούν σε περιορισμούς που σχετίζονται με τις συνθήκες αγοράς και τις υποχρεώσεις που απορρέουν από το υφιστάμενο πλαίσιο πολιτικής:

1. *Περιορισμός παραγωγής (ΚΑΠ πριν το 2006):*

$$x_{cot\_gs} + x_{cot\_ns} \leq b_{cot}$$

και

$$x_{tob\_gs} + x_{tob\_ns} \leq b_{tob}$$

Πρόκειται για περιορισμό που είναι σε ισχύ κατά το έτος βάσης (2005) και το οποίο αποτελεί το τελευταίο έτος πριν την εφαρμογή του μέτρου της αποδέσμευσης των επιδοτήσεων από την παραγωγή για το βαμβάκι και τον καπνό. Για το βαμβάκι, ο περιο-

ρισμός σχετίζεται με την ποινή της «συνυπευθυνότητας» δηλαδή τη μειωμένη ενίσχυση και τη μειωμένη ελάχιστη τιμή, εφόσον η συνολική παραγωγή στη χώρα ξεπερνούσε ένα συγκεκριμένο πλαφόν παραγωγής, το οποίο ονομαζόταν «Εθνική Εγγυημένη Ποσότητα» (ΕΕΠ) και για την Ελλάδα ανερχόταν σε 782 χιλιάδες τόνους<sup>33</sup>. Η ΕΕΠ ήταν ένα σταθεροποιητικό μέτρο που στόχευε κυρίως στο να διατηρηθούν οι κοινοτικές δαπάνες για το προϊόν μέσα σε προκαθορισμένα πλαίσια. Για τον καπνό, ο περιορισμός δικαιολογείται από την ύπαρξη ποσοτώσεων παραγωγής πέρα από τις οποίες δεν ήταν δυνατή η λήψη ενισχύσεων<sup>34</sup>.

## 2. Περιορισμός παραγωγής (ΚΑΠ μετά το 2006):

$$x_{cot\_gs} + x_{cot\_ns} \leq 1.2 b_{cot}$$

Ο περιορισμός σχετίζεται με τη μεταρρύθμιση του τομέα του βαμβακιού σύμφωνα με τον κανονισμό (ΕΚ) 864/2004, ο οποίος εφαρμόστηκε το 2006 και προέβλεπε την εισαγωγή μιας στρεμματικής επιδότησης ως συνδεδεμένη ενίσχυση στην καλλιέργεια. Ειδικότερα, ο 864/2004 προέβλεπε μια μέγιστη εγγυημένη έκταση 3.7 εκατομμυρίων στρεμμάτων και συνδεδεμένη ενίσχυση ύψους 59.4 €/στρ για τα πρώτα 3 εκατομμύρια στρέμματα και 34.28 €/στρ για τα υπόλοιπα 700 χιλιάδες στρέμματα. Ο κανονισμός 864/2004 τροποποιήθηκε αργότερα από τον κανονισμό (ΕΚ) 637/2008, ο οποίος προβλέπει πως για την Ελλάδα η βασική εθνική έκταση ανέρχεται στα 2.5 εκατομμύρια στρέμματα και η συνδεδεμένη ενίσχυση στα 80.56 €/στρ. Το ποσό αυτό θα μειώνεται αναλογικά με την υπέρβαση της βασικής εθνικής έκτασης. Ο κανονισμός 637/2008 εφαρμόζεται στα κράτη μέλη από το 2009.

Τα παραπάνω σημαίνουν πως το τελικό ύψος του τελικού ποσού της συνδεδεμένης ενίσχυσης δεν είναι γνωστό κατά την κατάρτιση του σχεδίου παραγωγής μιας εκμετάλλευσης. Στα πλαίσια αυτά, ο συγκεκριμένος περιορισμός εκφράζει την εκτίμηση των παραγωγών σχετικά με τη συνολική έκταση βαμβακιού στην Ελλάδα που εκδηλώνεται με μια «αναστολή» να επεκτείνουν την καλλιεργούμενη έκταση πέραν του 120% της παρατηρούμενης κατά το έτος βάσης, λόγω του κινδύνου μείωσης της στρεμματικής ενίσχυσης.

## 3. Περιορισμός κηπευτικών καλλιεργειών:

$$x_k \leq 1.1 x_k^* \tag{5.12}$$

<sup>33</sup> Κανονισμός (ΕΚ) αριθ. 1051/2001 του Συμβουλίου, για την ενίσχυση της βαμβακοπαραγωγής.

<sup>34</sup> Κανονισμός (ΕΚ) αριθ. 2072/1992 του Συμβουλίου, για την κοινή οργάνωση αγοράς του ακατέργαστου καπνού.



Ο περιορισμός (5.12) ορίζει πως οι εκτάσεις με κηπευτικά (πιπεριά και βιομηχανική τομάτα – αντιπροσωπεύονται από το δείκτη  $\kappa$ ) δεν μπορούν να αυξηθούν παραπάνω από 10% σε σχέση με τις παρατηρήσεις του έτους βάσης. Για τις πιπεριές ο περιορισμός σχετίζεται με την υπόθεση πως οι πολύ μεγάλες ποσότητες δεν είναι εύκολο να διατεθούν στην αγορά, αφού η κατανάλωση του προϊόντος περιορίζεται σε τοπικό επίπεδο. Για τις βιομηχανικές τομάτες, ο περιορισμός αφορά στη δυνατότητα της σχετικής μεταποιητικής βιομηχανίας να απορροφήσει την παραγωγή. Να σημειωθεί πως για τη ρεαλιστική προτυποποίηση των παραπάνω ιδιαιτεροτήτων είναι απαραίτητη η χρήση υποδειγμάτων μερικής ισορροπίας που περιλαμβάνουν κατάλληλα εκτιμημένες αντίστροφες συναρτήσεις ζήτησης (π.χ. McCarl & Spreen, 1980). Κάτι τέτοιο βρίσκεται ωστόσο εκτός των στόχων της παρούσας διατριβής, η οποία επικεντρώνεται στις αροτραίες καλλιέργειες που συνθέτουν τη πλειοψηφία των γεωργικών συστημάτων της Θεσσαλίας και των οποίων η τιμή καθορίζεται εξωγενώς σε διεθνές επίπεδο.

#### 4. Περιορισμός μέγιστης έκτασης καλλιεργειών:

$$x_i \leq 0.75 b_{land} \quad (5.13)$$

Η ανισότητα (5.13) αναφέρεται σε έναν περιορισμό μέγιστης έκτασης που σχετίζεται με τα όσα συζητούνται αναφορικά με τον τρόπο εφαρμογής του μέτρου της περιφερειοποίησης και των συνδεδεμένων περιβαλλοντικών υποχρεώσεων των παραγωγών. Έτσι, καμία καλλιέργεια δεν μπορεί (α) να ξεπερνά το 75% της συνολικής έκτασης της εκμετάλλευσης και (β) να είναι μικρότερη από το 25% αυτής. Προφανώς, στην περίπτωση δυο καλλιεργειών, η δεύτερη απαίτηση καλύπτεται εφόσον ικανοποιείται ο πρώτος περιορισμός για κάποια από τις δυο καλλιέργειες, ενώ και η μη γραμμικότητα του υποδείγματος ως προς  $x$  περιορίζει τις γωνιακές λύσεις, βοηθώντας στην ικανοποίηση του περιορισμού.

## 5.5 Η ρύθμιση του υποδείγματος

Όπως συζητήθηκε στην αρχή του παρόντος κεφαλαίου, η ρύθμιση του υποδείγματος προηγήθηκε της ενσωμάτωσης των συναρτήσεων απόδοσης στην αντικειμενική συνάρτηση και πραγματοποιήθηκε με τη διαδικασία που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3. Η κατασκευή του αρχικού πίνακα συνδιακύμανσης,  $V$ , κάθε εκμετάλλευσης βασίστηκε σε στοιχεία του ΥΠΑΑΤ<sup>35</sup> για την περίοδο 2000-2004, δηλαδή την πενταετία πριν το έτος βάσης. Ειδικότερα, τα στοιχεία του  $V$  υπολογίστηκαν ως όροι διακύμανσης και συνδιακύμανσης της ακαθάριστης προσόδου των καλλιεργειών χωρίς τις στρεμματικές ενισχύσεις, όπως ακριβώς προκύπτει από τις εξισώσεις (3.46) και (3.47) του κεφαλαίου

<sup>35</sup> [http://www.minagric.gr/greek/agro\\_pol/3.htm](http://www.minagric.gr/greek/agro_pol/3.htm)

3. Η βάση χρονολογικών σειρών του ΥΠΑΑΤ δεν περιλαμβάνει στοιχεία αποδόσεων για τη μηδική και τη βιομηχανική τομάτα κι έτσι, για λόγους απλότητας, θεωρήθηκε πως οι αποδόσεις των καλλιεργειών αυτών ήταν σταθερές και ίσες με 1000 κιλά/στρ και 8000 κιλά/στρ αντίστοιχα (πίνακας 5.7).

**Πίνακας 5.7: Ετήσιες αποδόσεις καλλιεργειών σε εθνικό επίπεδο (κιλά/στρ)**

	<b>cot</b>	<b>mze</b>	<b>tob</b>	<b>dwt</b>	<b>alf</b>	<b>pep</b>	<b>tom</b>
2000	305	969	329	234	1000	2636	8000
2001	329	961	337	206	1000	2589	8000
2002	314	1005	326	259	1000	2302	8000
2003	265	920	312	182	1000	2888	8000
2004	327	879	304	200	1000	3014	8000

cot: βαμβάκι, mze: αραβόσιτος, tob: καπνός, dwt: σιτάρι, alf: μηδική, pep: πιπεριά, tom: βιομηχανική τομάτα.

Πηγή: [http://www.minagric.gr/greek/agro\\_pol/3.htm](http://www.minagric.gr/greek/agro_pol/3.htm)

Η παραπάνω υπόθεση δεν οδηγεί σε μηδενικές τιμές διακύμανσης (διαγώνια στοιχεία του **V**), αφού αυτές εξαρτώνται ταυτόχρονα και από τις τιμές παραγωγού, για τις οποίες το ΥΠΑΑΤ προσφέρει αναλυτικότερα στοιχεία. Οι τιμές παραγωγού που χρησιμοποιήθηκαν στη ρύθμιση του υποδείγματος αποπληθωρίστηκαν και έγινε αναγωγή στο έτος βάσης (2005) χρησιμοποιώντας τους δείκτες τιμών παραγωγού που παρουσιάζονται στον πίνακα 5.8.

**Πίνακας 5.8: Αποπληθωρισμένοι δείκτες τιμών παραγωγού (2005=100)**

<b>Καλλιέργειες</b>	<b>2000</b>	<b>2001</b>	<b>2002</b>	<b>2003</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>
<i>Βαμβάκι</i>	116.3	91.9	105.4	126.8	103.7	100.0
<i>Αραβόσιτος</i>	118.9	118.1	115.9	114.9	105.5	100.0
<i>Καπνός</i>	110.0	110.3	130.9	108.2	117.9	100.0
<i>Σιτάρι</i>	110.8	118.7	111.3	108.8	104.1	100.0
<i>Μηδική</i>	79.6	78.2	83.0	96.0	104.2	100.0
<i>Πιπεριές</i>	97.7	98.3	105.1	117.1	101.3	100.0
<i>Τομάτες</i>	100.0	100.4	109.9	110.2	97.3	100.0

Πηγή: <http://epp.eurostat.ec.europa.eu>

Οι τελικές τιμές παραγωγού για την περίοδο 2000-2004 παρουσιάζονται στον πίνακα 5.9. Να σημειωθεί ωστόσο πως στην περίπτωση του βαμβακιού, η τιμή περιλαμβάνει και την επιδότηση στην παραγωγή. Για το λόγο αυτό, οι τιμές βαμβακιού του πίνακα 5.9 αφορούν σε εκείνες που δίνει το ΥΠΑΑΤ, από τις οποίες όμως αφαιρέθηκε ένα ποσό 0.59 €/κιλό που αντιστοιχεί στη μέση ενίσχυση στην παραγωγή κατά το έτος βάσης. Όπως αναλύθηκε στην ενότητα 3.7.3, ο λόγος για τον οποίο επιζητείται ο διαχωρισμός της εμπορικής τιμής του βαμβακιού από την επιδότηση του είναι η απαίτηση για την

εκτίμηση των επιμέρους συστατικών στοιχείων του «πραγματικού» πίνακα διακύμανσης κάθε εκμετάλλευσης, **S**, έτσι ώστε να μπορεί να προσαρμόζεται κατάλληλα όταν προσομοιώνεται οποιοδήποτε σενάριο πολιτικής.

**Πίνακας 5.9: Ετήσιες τιμές καλλιεργειών σε εθνικό επίπεδο (€/κίλο)**

	<b>cot</b>	<b>mze</b>	<b>dwt</b>	<b>tob</b>	<b>alf</b>	<b>tom</b>	<b>pep</b>
2000	0.144	0.116	0.118	0.482	0.226	0.060	0.573
2001	0.210	0.118	0.123	0.499	0.205	0.050	0.600
2002	0.197	0.123	0.126	0.565	0.193	0.043	0.533
2003	0.213	0.127	0.129	0.924	0.156	0.043	0.521
2004	0.265	0.131	0.133	0.543	0.144	0.052	0.503

cot: βαμβάκι, mze: αραβόσιτος, tob: καπνός, dwt: σιτάρι, alf: μηδική, pep: πιπεριά, tom: βιομηχανική τομάτα.

Πηγή: [http://www.minagric.gr/greek/agro\\_pol/3.htm](http://www.minagric.gr/greek/agro_pol/3.htm)

Όπως είναι προφανές, λόγω του διαφορετικού ύψους των επιδοτήσεων του βαμβακιού και του καπνού που λαμβάνουν οι παραγωγοί, ο αρχικός πίνακας συνδιακύμανσης, **V**, διαφέρει σε κάθε εκμετάλλευση. Ειδικότερα, η ακαθάριστη πρόσοδος ανά στρέμμα των καλλιεργειών (χωρίς τις στρεμματικές ενισχύσεις) για καθένα από τα πέντε έτη της περιόδου 2000-2004 υπολογίζεται ως  $r_i^t = (\tilde{p}_i^t + h_i)\tilde{y}_i^t$ , όπου  $\tilde{p}_i^t$  και  $\tilde{y}_i^t$  οι τιμές και οι αποδόσεις που παρουσιάζονται στους πίνακες 5.8 και 5.7 αντίστοιχα.

Ο αρχικός πλούτος κάθε παραγωγού,  $\omega$ , κατά τη ρύθμιση του υποδείγματος είναι μηδέν. Ο λόγος είναι πως κατά την προσομοίωση ενός σεναρίου πολιτικής που αναφέρεται στην ΚΑΠ προ της ενδιάμεσης αναθεώρησης, δεν υπάρχουν καλλιεργητικές δραστηριότητες που δεν ενέχουν κίνδυνο, ούτε κάποιας μορφής πρόσοδος που είναι ανεξάρτητη της παραγωγικής διαδικασίας. Για λόγους όμως υπολογιστικής λειτουργικότητας, ο αρχικός πλούτος θεωρήθηκε ίσος με 0.000001€. Η σχεδόν μηδενική τιμή του  $\omega$  δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα του υποδείγματος, αλλά αντίθετα κρίνεται απαραίτητη για την επίλυση του, καθώς το  $\omega$  εμφανίζεται στον παρονομαστή του κλασματικού όρου της αντικειμενικής συνάρτησης του αρχικού υποδείγματος. Ειδικότερα, μια θετική του τιμή  $\omega$  εξασφαλίζει πως ο παρονομαστής δεν θα ισούται με μηδέν κατά την επίλυση του υποδείγματος με κάποιον από τους μη γραμμικούς αλγόριθμους του GAMS.

Κατά την πρώτη φάση του τροποποιημένου υποδείγματος ΘΜΠ, το υπόδειγμα συμπληρώθηκε από τον επιπλέον περιορισμό  $\mathbf{x} \leq \mathbf{x}^*(1 + \varepsilon)$  με αποτέλεσμα να αναπαράγονται ακριβώς τα αποτελέσματα του έτους βάσης. Να σημειωθεί πως στις μη παρατηρούμενες δραστηριότητες στα σχέδια παραγωγής των εκμεταλλεύσεων δόθηκε μια τιμή ίση με  $\varepsilon = 0.000001$  στρ, με αποτέλεσμα οι προκύπτουσες τιμές του  $\lambda$  να αφορούν τόσο σε πραγματικές όσο και σε «εικονικές» δραστηριότητες.

Το επόμενο στάδιο στη διαδικασία ρύθμισης περιλαμβάνει την εκτίμηση του «πραγματικού» πίνακα συνδιακύμανσης των εκμεταλλεύσεων (**S**) και του διανύσματος μη παρατηρούμενου κόστους, **q**. Για το λόγο αυτό κατασκευάστηκε ένα υπόδειγμα μεγιστοποίησης της εντροπίας των αγνώστων κατανομών πιθανότητας που αντιστοιχούν σε καθένα από τα στοιχεία των **S** και **u**, σύμφωνα με τα όσα παρουσιάστηκαν στην ενότητα 3.7.3. Ειδικότερα, τα στοιχεία αυτά ορίζονται γύρω από αρχικές, προκαθορισμένες τιμές αποδόσεων και τιμών προϊόντων (για τα στοιχεία του **S**) και του παρατηρούμενου ακαθάριστου κέρδους (για το **u**). Έτσι, για τον πίνακα **S** (όπου αναζητούνται οι «πραγματικές» τιμές και αποδόσεις της εκμετάλλευσης κατά την περίοδο 2000-2004) ορίστηκαν ως αρχικές τιμές παραγωγού οι εθνικές τιμές που παρουσιάζονται στον πίνακα 5.9, ενώ χρησιμοποιήθηκαν πέντε υποστηρικτικές τιμές ( $K = 5$ ) που δίνονται στον πίνακα 5.10 και αναφέρονται στην ποσοστιαία απόκλιση των «πραγματικών» τιμών της εκμετάλλευσης από τις αντίστοιχες εθνικές.

**Πίνακας 5.10: Υποστηρικτικές τιμές για σφάλματα τιμών προϊόντων ( $zr_i$ )**

Καλλιέργειες	K				
	1	2	3	4	5
Βαμβάκι	0.90	0.95	1.00	1.05	1.10
Αραβόσιτος	0.96	0.98	1.00	1.02	1.04
Καπνός	0.80	0.90	1.00	1.10	1.20
Σιτάρι	0.96	0.98	1.00	1.02	1.04
Μηδική	0.60	0.80	1.00	1.20	1.40
Πιπεριές	0.80	0.90	1.00	1.10	1.20
Τομάτες	0.90	0.95	1.00	1.05	1.10

Όπως φαίνεται από τον πίνακα 5.10, επιλέχθηκαν διαφορετικές υποστηρικτικές τιμές για κάθε καλλιέργεια λόγω των ιδιαιτεροτήτων που παρουσιάζει η διαμόρφωση της τιμής αγοράς και η εμπορία των παραγόμενων προϊόντων. Έτσι, για τον αραβόσιτο και το σιτάρι, των οποίων η τιμή καθορίζεται σε παγκόσμιο επίπεδο, επιλέχθηκε ένα πολύ μικρό εύρος απόκλισης ( $\pm 4\%$ ) από τις εθνικές τιμές. Για τη μηδική, η ζήτηση της οποίας εξαρτάται από την ανάπτυξη κτηνοτροφικής δραστηριότητας σε τοπικό (κυρίως) επίπεδο και από τη σχετική κερδοφορία των υπολοίπων καλλιεργειών, το εύρος ανέρχεται σε  $\pm 40\%$ . Παρόμοια λογική χρησιμοποιήθηκε για την πιπεριά και τον καπνό, λόγω της ανελαστικής τους ζήτησης, αλλά το εύρος που επιλέχθηκε είναι μικρότερο της μηδικής ( $\pm 20\%$ ) καθώς η τιμή τους εξαρτάται κυρίως από την ποιότητα τους. Για το βαμβάκι και τη βιομηχανική τομάτα επιλέχθηκε ένα εύρος  $\pm 10\%$ . Για το βαμβάκι η επιλογή αυτή αντανάκλα τη διαμόρφωση της τιμής του σε διεθνές επίπεδο (που περιορίζει τις εγχώριες διακυμάνσεις των τιμών) αλλά και την εξάρτηση της τελικής τιμής παραγωγού από την ποιότητα του σύσπορου βαμβακιού που παραδίδεται στο εκκοκκιστήριο (π.χ. περι-

εκτικότητα υγρασίας και ξένων υλών). Από την άλλη, η τιμή της βιομηχανικής τομάτας διαμορφώνεται από τις αντίστοιχες μεταποιητικές βιομηχανίες και συνεπώς η διακύμανση της σε εθνικό επίπεδο είναι περιορισμένη.

Για την εκτίμηση των «πραγματικών» αποδόσεων της κάθε εκμετάλλευσης, ως αρχικές τιμές, αντί για τις «εθνικές» αποδόσεις του πίνακα 5.7 χρησιμοποιήθηκαν οι μέγιστες αποδόσεις που προέκυψαν από το βιο-φυσικό υπόδειγμα και οι οποίες για κάθε καλλιέργεια παρουσιάστηκαν στον πίνακα 4.6 του προηγούμενου κεφαλαίου (πρόκειται δηλαδή για το δυναμικό παραγωγής κάθε καλλιέργειας -  $Y_{MAX}$ ). Έτσι, οι όροι σφάλματος ορίζονται ως το ποσοστό μείωσης της τελικής απόδοσης σε σχέση με την αντίστοιχη μέγιστη. Με εξαίρεση το σιτάρι, το διάνυσμα υποστηρικτικών τιμών για όλες τις καλλιέργειες ορίστηκε με τρόπο ώστε οι «πραγματικές» αποδόσεις κάθε εκμετάλλευσης να βρίσκονται μεταξύ του  $Y_{MAX}$  και του  $0.6Y_{MAX}$  (πίνακας 5.11). Για το σιτάρι επιλέχτηκε ένα εύρος  $[0.3Y_{MAX}, 0.9Y_{MAX}]$ , το οποίο αντανακλά τη μεγαλύτερη εξάρτηση της τελικής απόδοσης της καλλιέργειας από τις καιρικές συνθήκες.

**Πίνακας 5.11: Υποστηρικτικές τιμές για σφάλματα αποδόσεων ( $zy_i$ )**

Καλλιέργειες	K				
	1	2	3	4	5
Βαμβάκι	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00
Αραβόσιτος	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00
Καπνός	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00
Σιτάρι	0.30	0.45	0.60	0.75	0.90
Μηδική	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00
Πιπεριές	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00
Τομάτες	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00

Για το διάνυσμα μη παρατηρούμενου κόστους,  $\mathbf{u}$ , οι υποστηρικτικές τιμές επιλέχτηκαν ώστε αυτό να είναι μη αρνητικό και ταυτόχρονα μικρότερο ή ίσο από το παρατηρούμενο ακαθάριστο κέρδος των καλλιεργειών κατά το έτος βάσης. Έτσι, χρησιμοποιήθηκε το ίδιο διάνυσμα υποστηρικτικών τιμών ( $\mathbf{zu}_i$ ) για όλες τις καλλιέργειες, το οποίο ορίστηκε ως  $[0, 0.25, 0.5, 0.75, 1]$ .

Με το υπόδειγμα μέγιστης εντροπίας εκτιμήθηκαν όλες οι άγνωστες παράμετροι της αντικειμενικής συνάρτησης, δηλαδή ο πίνακας  $\mathbf{S}$  και το διάνυσμα  $\mathbf{u}$ . Η επίλυση του νέου υποδείγματος με την εκτιμημένη αντικειμενική συνάρτηση, αλλά χωρίς τον επιπλέον περιορισμό ρύθμισης  $\mathbf{x} \leq \mathbf{x}^*(1 + \varepsilon)$ , έδωσε ως αποτέλεσμα τις παρατηρήσεις του έτους βάσης (εκτάσεις κάθε καλλιέργειας,  $\mathbf{x}$ ), επιτυγχάνοντας έτσι τη ζητούμενη ρύθμιση του.

## 5.6 Ενσωμάτωση των συναρτήσεων απόδοσης

### 5.6.1 Μετασχηματισμοί αντικειμενικής συνάρτησης και περιορισμών

Όπως αναλύθηκε στην ενότητα 5.3.1, η ενσωμάτωση των συναρτήσεων απόδοσης στο υπόδειγμα πραγματοποιήθηκε μετά την επιτυχή ρύθμιση του. Όπως όμως προαναφέρθηκε, για την καλλιέργεια πιπεριάς και βιομηχανικής τομάτας δεν εκτιμήθηκε συνάρτηση απόδοσης, με αποτέλεσμα οι αποδόσεις τους να θεωρούνται σταθερές, Παρομοίως για το σιτάρι, η προσδοκώμενη απόδοση σε κάθε εκμετάλλευση προκύπτει χρησιμοποιώντας τους μέσους όρους βροχής και εξατμισοδιαπνοής του πίνακα 5.3 και συνεπώς αποτελεί παράμετρο του υποδείγματος.

Η ενσωμάτωση έχει ως αποτέλεσμα τη διαφοροποίηση της μορφής της αντικειμενικής συνάρτησης, αφού πλέον εισάγεται στο υπόδειγμα μια επιπλέον μεταβλητή απόφασης (νερό άρδευσης). Έτσι η ακαθάριστη πρόσοδος ορίζεται ως:

$$r_i = (p_i + h_i)Y_i \left( \frac{W_i}{ETC_i} \right) + \zeta_i$$

όπου  $Y_i$  η συνάρτηση απόδοσης κάθε  $i$  καλλιέργειας και  $W_i$  το νερό που χορηγείται σε αυτή με φυσικό ή τεχνητό τρόπο ( $W_i = IR_i + P_i$ ). Ανάλογα, οι δαπάνες άρδευσης ανά στρέμμα εξαρτώνται από τις αποφάσεις του παραγωγού σε εντατικό επίπεδο (ποσότητα άρδευσης ανά στρέμμα):

$$cw_i(IR_i) = A_e \times HP \times \frac{1}{\Pi} \frac{IR_i}{E_f} \times z_e$$

Επίσης, μεταβάλλεται ο περιορισμός του αρδευτικού συστήματος (5.9), αφού το αριστερό του μέρος αφορά πλέον στο γινόμενο δυο μεταβλητών απόφασης.

Ένας ακόμα περιορισμός που μεταβάλλεται είναι εκείνος της παραγωγής βαμβακιού και καπνού για το έτος βάσης, ο οποίος είχε προτυποποιηθεί χρησιμοποιώντας τις εκτάσεις των καλλιεργειών. Μετά τη ρύθμιση και την ενσωμάτωση των συναρτήσεων απόδοσης η μορφή του περιορισμού άλλαξε προκειμένου το δεξί μέρος να αναφέρεται, όχι σε εκτάσεις, αλλά σε ποσότητες, όπως ακριβώς όριζαν οι αντίστοιχοι κανονισμοί της ΕΕ. Έτσι, η «νέα» μορφή των περιορισμών είναι:

$$Y_{cot\_gs}x_{cot\_gs} + Y_{cot\_ns}x_{cot\_ns} \leq \text{totsales}_{cot}$$

και

$$Y_{tob\_gs}x_{tob\_gs} + Y_{tob\_ns}x_{tob\_ns} \leq \text{totsales}_{tob}$$

όπου  $totsales_{cot}$  και  $totsales_{tob}$  συμβολίζουν τις πραγματοποιούμενες πωλήσεις σύσπορου βαμβακιού και καπνού αντίστοιχα, για τις οποίες ο παραγωγός εισέπραξε ενισχύσεις κατά το έτος βάσης και συνεπώς θεωρείται πως αντιπροσωπεύουν την ποσόστωση που του αναλογεί.

Να σημειωθεί πως η μορφή των λογιστικών συναρτήσεων απόδοσης επιβάλλει και την εισαγωγή ενός επιπλέον περιορισμού που θέτει ανώτατα και κατώτατα όρια στην τελική τιμή του λόγου  $(IR_i + P_i)/ETc_i$ . Συγκεκριμένα, το οριακό προϊόν ως προς την άρδευση αρχίζει να μειώνεται σε σχετικά υψηλές τιμές του λόγου  $(IR_i + P_i)/ETc_i$  (σημείο αλλαγής κοίλων) και στη συνέχεια η τελική απόδοση τείνει ασυμπτωτικά στο  $Y_{MAX}$  των καλλιεργειών. Σε οικονομικούς όρους, η περιοχή της καμπύλης απόδοσης πριν την αλλαγή των κοίλων αντιστοιχεί στο πρώτο στάδιο της παραγωγής και συνεπώς δεν συνιστά άριστη επιλογή για τον παραγωγό. Ωστόσο, μετά την αλλαγή των κοίλων η καμπύλη παραμένει συνεχώς στο δεύτερο στάδιο της παραγωγής καθώς το οριακό προϊόν τείνει ασυμπτωτικά στο μηδέν. Σε αλγοριθμικούς όρους, αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην είναι δυνατός υπολογισμός της ποσότητας άρδευσης στην οποία επιτυγχάνεται το  $Y_{MAX}$ , το οποίο με τη σειρά του δεν επιτρέπει μια πεπερασμένη βέλτιστη λύση για το  $IR_i$  με τους συνήθεις μη γραμμικούς αλγόριθμους επίλυσης του GAMS (CONOPT3 και MINOS). Για το λόγο αυτό θεωρήθηκε πως η μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει το κλάσμα  $(IR_i + P_i)/ETc_i$  σε κάθε εκμετάλλευση ισούται με 1.2 και η ελάχιστη με 0.8 για τον αραβόσιτο και 0.6 για τις υπόλοιπες καλλιέργειες.

Όπως γίνεται φανερό τόσο από τον ορισμό του διανύσματος  $x_p$ , και όσο και από την εξειδίκευση των περιορισμών του υποδείγματος, η μηδική προτυποποιήθηκε ως μια ενιαία καλλιέργεια καθώς δεν λήφθηκαν υπόψη οι διάφορες κοπές της. Ιδανικά, για τη ρεαλιστικότερη προτυποποίηση της καλλιέργειας θα έπρεπε να χρησιμοποιηθούν δυαδικές μεταβλητές (δηλαδή μεταβλητές που παίρνουν ακέραιες τις τιμές 0 ή 1). Ειδικότερα, μπορεί να υποθεθεί πως οι κοπές πρέπει να πραγματοποιούνται σε σειρά, δηλαδή δεν είναι δυνατή η  $c$  κοπή χωρίς την  $c - 1$ . Αυτό μπορεί να εκφραστεί μαθηματικά με τη χρήση των δυαδικών μεταβλητών  $\beta_{alf}^c$  ως εξής:

$$\beta_{alf}^1 \geq 0 \quad (5.14)$$

$$\beta_{alf}^1 - \beta_{alf}^2 \geq 0 \quad (5.15)$$

$$\beta_{alf}^2 - \beta_{alf}^3 \geq 0 \quad (5.16)$$

$$\beta_{alf}^3 - \beta_{alf}^4 \geq 0 \quad (5.17)$$

$$\beta_{alf}^4 - \beta_{alf}^5 \geq 0 \quad (5.18)$$

Αν πραγματοποιηθεί τόσο η πρώτη όσο και η δεύτερη κοπή ( $\beta_{alf}^1 = \beta_{alf}^2 = 1$ ), τότε θα ικανοποιείται η (5.15) αφού το δεξί μέρος της θα ισούται με 0. Αντίθετα, αν δεν πραγματοποιηθεί η πρώτη κοπή ( $\beta_{alf}^1 = 0$ ), τότε δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί ούτε η δεύτερη γιατί στην περίπτωση αυτή το δεξί μέρος της (5.15) θα ισούται με -1. Ανάλογα λειτουργούν οι περιορισμοί (5.16) έως (5.18).

Αν χρησιμοποιούνταν δυαδικές μεταβλητές η συνολική απόδοση της καλλιέργειας θα ισούταν με  $Y_{alf} = \sum_c Y_{alf}^c \beta_{alf}^c$ , όπου  $Y_{alf}^c$  η απόδοση της  $c$  κοπής. Ανάλογα θα μπορούσαν να οριστούν οι συνολικές απαιτήσεις ανθρώπινης εργασίας της καλλιέργειας από τον πίνακα 5.6, όπου κάθε μήνας από Μάιο έως Σεπτέμβριο αναφέρεται στις απαιτήσεις μιας κοπής. Με παρόμοιο τρόπο μπορούν να οριστούν και οι υπόλοιπες παράμετροι και μεταβλητές που σχετίζονται με τη μηδική, εκτός από τη συνολική έκταση της καλλιέργειας (μεταβλητή απόφασης) που λαμβάνει μια συγκεκριμένη τιμή στο σχέδιο παραγωγής της εκμετάλλευσης.

Το πρόβλημα με τη συγκεκριμένη εξειδίκευση της καλλιέργειας της μηδικής είναι η υπολογιστική δυσκολία που προκύπτει από την ύπαρξη ακέραιων μεταβλητών στο ήδη μη γραμμικό υπόδειγμα. Έτσι, το τελευταίο μετατρέπεται σε ένα υπόδειγμα μικτού ακέραιου - μη γραμμικού προγραμματισμού (Mixed Integer Non Linear Programming - MINLP), η επίλυση του οποίου είναι ιδιαίτερα απαιτητική σε υπολογιστική ισχύ και συχνά μη εφικτή με τους συνήθεις αλγόριθμους επίλυσης του GAMS. Υπολογιστικά πειράματα που πραγματοποιήθηκαν με τη συγκεκριμένη εξειδίκευση επαλήθευσαν τη δυσκολία αυτή.

### 5.6.2 Έλεγχος αξιοπιστίας

Με τη διαδικασία ρύθμισης που περιγράφηκε στην ενότητα 5.5, το υπόδειγμα οικονομικού κινδύνου αναπαρήγαγε τις παρατηρήσεις (εκτάσεις) του έτους βάσης, επιτυγχάνοντας έτσι στον έλεγχο αξιοπιστίας που πραγματοποιείται με τον «έλεγχο της παραγωγής». Ωστόσο, η ενσωμάτωση των συναρτήσεων απόδοσης τροποποιεί σημαντικά την αλγεβρική δομή του υποδείγματος και συνεπώς μεταβάλλονται τα αποτελέσματα του. Για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκε εκ νέου ο «έλεγχος της παραγωγής» για το τελικό βιο-οικονομικό υπόδειγμα, ο οποίος περιλαμβάνει την επίλυση του με τις συναρτήσεις απόδοσης για τα δεδομένα και τους περιορισμούς του έτους βάσης. Για τη μαθηματική αποτύπωση των αποτελεσμάτων του «ελέγχου της παραγωγής» χρησιμοποιήθηκε ο δείκτης Μέσης Ποσοστιαίας Απόκλισης (Percentage Average Deviation - PAD) που ορίζεται αλγεβρικά ως:



$$PAD = \frac{100\%}{I} \sum_{i=1}^I \left| \frac{x_i - x_i^*}{x_i^*} \right|$$

όπου με  $x_i$  συμβολίζεται το αποτέλεσμα του υποδείγματος (εκτάσεις) για την  $i$  καλλιέργεια και με  $x_i^*$  οι αντίστοιχες παρατηρούμενες εκτάσεις στο δείγμα κατά το έτος βάσης.

Οι Hazell και Norton (1986) προτείνουν έναν εμπειρικό κανόνα σύμφωνα με τον οποίο, ένα υπόδειγμα με δείκτη PAD μικρότερο του 5% θεωρείται «εξαιρετικό», μικρότερο του 10% «καλό» και μεγαλύτερο του 15% ως «μη αποδεκτό» και χρήζει διόρθωσης. Να σημειωθεί, ωστόσο, πως οι Hazell και Norton (1986) εστιάζουν κυρίως σε γραμμικά ή μη γραμμικά υποδείγματα προγραμματισμού στα οποία οι αποδόσεις των καλλιεργειών λογίζονται ως παράμετροι, κάτι το οποίο φυσικά δεν ισχύει για το βιο-οικονομικό υπόδειγμα που αναπτύχθηκε στην παρούσα διατριβή. Σε κάθε περίπτωση, η τιμή του PAD μετά την εισαγωγή των συναρτήσεων απόδοσης, όπως φαίνεται από τον πίνακα 5.12, είναι ίση με 13.1% και συνεπώς κρίνεται ικανοποιητική.

**Πίνακας 5.12: Έλεγχος αξιοπιστίας του τελικού βιο-οικονομικού υποδείγματος**

Καλλιέργειες	Εκτάσεις (στρ)		Απόκλιση (%)
	Παρατηρήσεις	Αποτελέσματα	
Βαμβάκι	4645	4424	4.8
Αραβόσιτος	569	502	11.9
Καπνός	1535	1394	9.2
Σιτάρι	983	1384	40.8
Μηδική	90	98	11.7
Πιπεριές	64	70	10.0
Τομάτες	366	378	3.2
<b>Μέση Ποσοστιαία Απόκλιση (PAD)</b>			<b>13.1</b>

## 5.7 Σενάρια πολιτικής και τιμολόγησης νερού

Με την τιμολόγηση του νερού, η συνολική δαπάνη άρδευσης κάθε εκμετάλλευσης (βλέπε εξίσωση 5.7) αυξήθηκε κατά  $p_w IR_i^\alpha$ , ή ισοδύναμα με  $p_w (IR_i/E_f)$ , όπου με  $p_w$  συμβολίζεται η τιμή του νερού άρδευσης. Έτσι, η τελική δαπάνη ισούται με

$$cw_i = A_e \times HP \times \frac{1}{\Pi} \frac{IR_i}{E_f} \times z_e + p_w \frac{IR_i}{E_f}$$

Τα εύρος τιμών νερού που εξετάστηκε είναι το  $[0, 0.2]$  €/m<sup>3</sup>. Ειδικότερα, το υπόδειγμα επιλύθηκε 11 συνολικά φορές, ξεκινώντας από τη μηδενική τιμή νερού, αυξανόμενη κάθε φορά κατά 0.02 €/m<sup>3</sup>.

Τα τέσσερα σενάρια πολιτικής για τα οποία πραγματοποιήθηκε η παραμετρική επίλυση του υποδείγματος αφορούν, όπως προαναφέρθηκε, στη μορφή της ΚΑΠ (α) προ του 2006, (β) από το 2006 έως το 2008, (γ) από το 2009 έως το 2012 και (δ) από το 2013 κι έπειτα. Ειδικότερα, το σενάριο (α) αναφέρεται στο έτος βάσης, το (β) στη μορφή της ΚΑΠ όπως διαμορφώθηκε μετά το 2006 με την εφαρμογή της αποδέσμευσης, της πολλαπλής συμμόρφωσης και της ΕΑΕ, ενώ το (γ) προσομοιώνει τον έλεγχο υγείας της ΚΑΠ και διαφέρει από το σενάριο (β) ως προς την αύξηση της δεσμευμένης ενίσχυσης στο βαμβάκι κατά τα προβλεπόμενα του κανονισμού 637/2008. Τέλος, το (δ) αποτελεί μια συνέχεια του προηγούμενου σεναρίου, κατά το οποίο όμως το ύψος της ΕΑΕ κάθε εκμετάλλευσης μειώνεται σημαντικά λόγω της εφαρμογής του μέτρου της περιφερειοποίησης. Αναλυτικότερα, οι περιορισμοί του υποδείγματος που χρησιμοποιούνται σε κάθε σενάριο παρουσιάζονται στον πίνακα 5.13.

**Πίνακας 5.13: Περιορισμοί σεναρίων πολιτικής**

Σενάρια	Τεχνικοί Περιορισμοί	Αγρονομικοί Περιορισμοί	Περιορισμοί Θεσμικοί και Αγοράς
<b>ΚΑΠ πριν το 2006</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Συνολική έκταση</li> <li>• Συνολική αρδευόμενη έκταση</li> <li>• Διαθεσιμότητα εδαφών</li> <li>• Περιορισμός αρδευτικού συστήματος</li> <li>• Περιορισμός διαθέσιμης ανθρώπινης εργασίας</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Αμειψισπορά με μηδική</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Περιορισμός παραγωγής (Παλαιά ΚΑΠ)</li> <li>• Περιορισμός κηπευτικών καλλιεργειών</li> </ul>
<b>ΚΑΠ 2006-2008</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Συνολική έκταση</li> <li>• Συνολική αρδευόμενη έκταση</li> <li>• Διαθεσιμότητα εδαφών</li> <li>• Περιορισμός αρδευτικού συστήματος</li> <li>• Περιορισμός διαθέσιμης ανθρώπινης εργασίας</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Αμειψισπορά με μηδική</li> <li>• Αμειψισπορά με ψυχανθή σε επιλέξιμες εκτάσεις</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Περιορισμός παραγωγής (Νέα ΚΑΠ)</li> <li>• Περιορισμός κηπευτικών καλλιεργειών</li> </ul>
<b>ΚΑΠ 2009-2012</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Συνολική έκταση</li> <li>• Συνολική αρδευόμενη έκταση</li> <li>• Διαθεσιμότητα εδαφών</li> <li>• Περιορισμός αρδευτικού συστήματος</li> <li>• Περιορισμός διαθέσιμης ανθρώπινης εργασίας</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Αμειψισπορά με μηδική</li> <li>• Αμειψισπορά με ψυχανθή σε επιλέξιμες εκτάσεις</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Περιορισμός παραγωγής (Νέα ΚΑΠ)</li> <li>• Περιορισμός κηπευτικών καλλιεργειών</li> </ul>
<b>ΚΑΠ Μετά το 2013</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Συνολική έκταση</li> <li>• Συνολική αρδευόμενη έκταση</li> <li>• Διαθεσιμότητα εδαφών</li> <li>• Περιορισμός αρδευτικού συστήματος</li> <li>• Περιορισμός διαθέσιμης ανθρώπινης εργασίας</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Αμειψισπορά με μηδική</li> <li>• Αμειψισπορά με ψυχανθή σε επιλέξιμες εκτάσεις</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Περιορισμός παραγωγής (Νέα ΚΑΠ)</li> <li>• Περιορισμός κηπευτικών καλλιεργειών</li> <li>• Περιορισμός μέγιστης καλλιεργούμενης έκτασης</li> </ul>

Για το πρώτο σενάριο, οι ενισχύσεις και οι τιμές των προϊόντων προέρχονται από τις παρατηρήσεις σε κάθε εκμετάλλευση του δείγματος, όπως εξηγήθηκε στην ενότητα 5.3.2. Αντίθετα, η εξειδίκευση των παραμέτρων αυτών για τα υπόλοιπα τρία σενάρια δεν είναι μια τετριμμένη υπόθεση, καθώς δεν αναφέρονται σε μεμονωμένα ημερολογιακά έτη, αλλά σε χρονικές περιόδους διάρκειας μερικών ετών. Επιπλέον, οι παράμετροι αυτοί θεωρείται πως αντιπροσωπεύουν τις προσδοκίες των παραγωγών, οι οποίες μπορεί να διαφέρουν από τις παρατηρούμενες σε κάθε περίοδο, και επίσης παραμένουν πάντα άγνωστες στον αναλυτή. Υπενθυμίζεται πως η ίδια υπόθεση είχε χρησιμοποιηθεί και κατά τη ρύθμιση του αρχικού υποδείγματος οικονομικού κινδύνου. Στην περίπτωση εκείνη, ωστόσο, η ύπαρξη των σημειακών παρατηρήσεων του έτους βάσης επέτρεψε τη χρήση τους ως αντιπροσωπευτικών των αντίστοιχων προσδοκιών των παραγωγών. Για τα σενάρια (β) έως (δ) κάτι τέτοιο δεν είναι δυνατό, αφού αφενός η βάση δεδομένων του ΥΠΑΑΤ παρέχει αναλυτικά στοιχεία τιμών για όλες τις καλλιέργειες μόνο μέχρι το έτος 2008, αφετέρου η διακύμανση τους είναι σημαντική. Χαρακτηριστικότερο παράδειγμα είναι η τιμή των σιτηρών, η οποία «εκτινάχτηκε» το 2008 και παρέμεινε σε υψηλά επίπεδα μέχρι και πρόσφατα.

Η παραπάνω συζήτηση φανερώνει πως για την προσομοίωση ενός ενιαίου σεναρίου πολιτικής, αντιπροσωπευτικού κάθε περιόδου, πρέπει να διατυπωθούν κάποιες υποθέσεις σχετικά με τις τιμές παραγωγού που χρησιμοποιούνται στο υπόδειγμα. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος χρησιμοποιήθηκαν οι μέσοι όροι της κατανομής του παρατηρούμενου ύψους των τιμών παραγωγού κατά τη ζητούμενη χρονική περίοδο.

**Πίνακας 5.14: Αποπληθωρισμένοι δείκτες τιμών παραγωγού (2005=100)**

<b>Καλλιέργειες</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>
<i>Βαμβάκι</i>	100.0	110.3	137.5	82.5
<i>Αραβόσιτος</i>	100.0	113.5	176.9	121.5
<i>Καπνός</i>	100.0	81.6	247.3	268.9
<i>Σιτάρι</i>	100.0	100.0	160.2	164.3
<i>Μηδική</i>	100.0	92.4	95.9	102.4
<i>Πιπεριές</i>	100.0	109.0	109.0	105.3
<i>Τομάτες</i>	100.0	95.5	106.3	106.4

Πηγή: <http://epp.eurostat.ec.europa.eu>

Να σημειωθεί στο σημείο αυτό πως το βιο-οικονομικό υπόδειγμα που αναπτύχθηκε στην παρούσα διατριβή στοχεύει σε βραχυπρόθεσμες ή μεσοπρόθεσμες αναλύσεις πολιτικής και ρυθμίστηκε για το έτος 2005 χρησιμοποιώντας δεδομένα εκμεταλλεύσεων για το ίδιο έτος. Αυτό σημαίνει πως αν η ρύθμιση πραγματοποιούταν με δεδομένα του έτους 2008 για τις ίδιες εκμεταλλεύσεις (οι οποίες λογικά δεν θα εμφάνιζαν το ίδιο σχέδιο παραγωγής με το 2005), ο πίνακας διακύμανσης **S** και τα επιπλέον οριακά κόστη **υ**

θα ήταν ενδεχομένως διαφορετικά. Για το λόγο αυτό, πραγματοποιήθηκε αναγωγή στο 2005 των τιμών που δίνει το ΥΠΑΑΤ για τα έτη 2006-2008, χρησιμοποιώντας τους αποπληθωρισμένους δείκτες τιμών παραγωγού του πίνακα 5.14. Οι ίδιες τελικές τιμές παραγωγού χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση των σεναρίων (β) έως (δ) και παρουσιάζονται αναλυτικά στον πίνακα 5.15.

**Πίνακας 5.15: Τιμές παραγωγού για τα σενάρια της αναθεωρημένης ΚΑΠ**

<b>Καλλιέργειες</b>	<b>Τιμές παραγωγού (€/κίλο)</b>
<i>Βαμβάκι</i>	0.305
<i>Αραβόσιτος</i>	0.142
<i>Καπνός</i>	0.335
<i>Σιτάρι</i>	0.142
<i>Μηδική</i>	0.168
<i>Πιπεριές</i>	0.730
<i>Τομάτες</i>	0.048

Ανάλογο πρόβλημα εμφανίζεται και στην περίπτωση της συνδεδεμένης ενίσχυσης του βαμβακιού στα σενάρια της αναθεωρημένης ΚΑΠ μετά το 2006, το ύψος της οποίας εξαρτάται από τη συνολική καλλιεργούμενη έκταση στη χώρα, η οποία φυσικά είναι άγνωστη κατά την κατάρτιση του σχεδίου παραγωγής κάθε εκμετάλλευσης. Για λόγους οικονομίας θεωρήθηκε πως η συνδεδεμένη ενίσχυση στο σενάριο (β) ανέρχεται στα 55€/στρ και για τα σενάρια (γ) και (δ) στα 75 €/στρ.

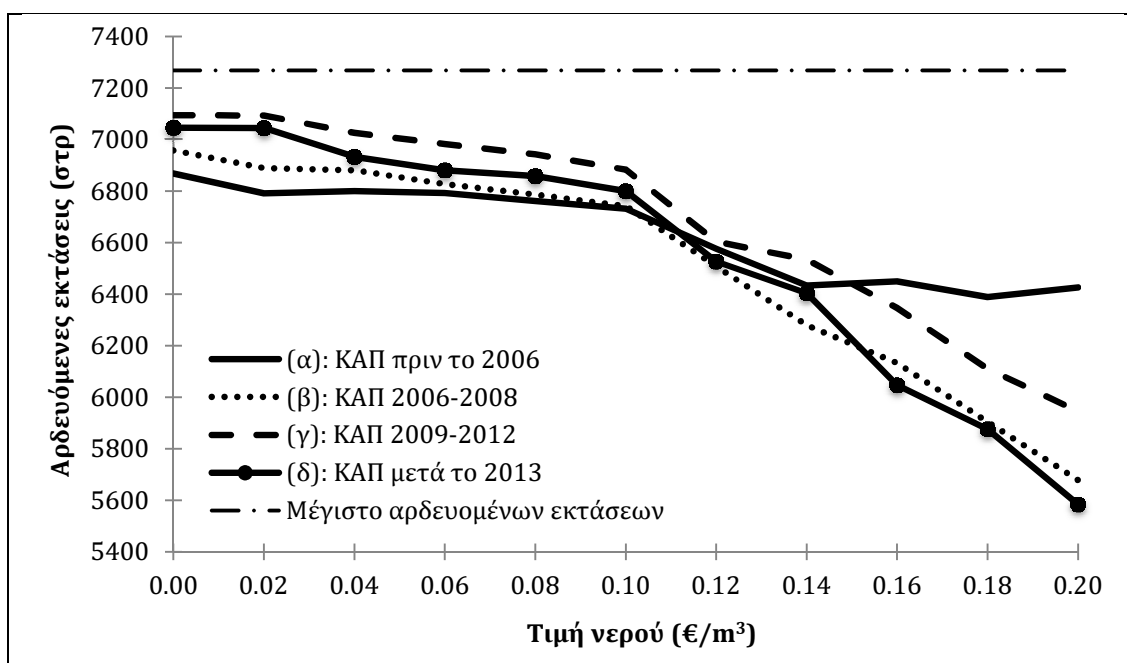
Τέλος, για την προτυποποίηση της περιφερειοποίησης της ενιαίας ενίσχυσης, μέτρο που αποτελεί βασικό στοιχείο του σεναρίου (δ), επιλέχθηκε ο ορισμός του ατομικού δικαιώματος (το ύψος της ΕΑΕ ανά στρέμμα) στα 75 €/στρ. Πρόκειται για μια σημαντική μείωση της ΕΑΕ ανά εκμετάλλευση (περίπου 70% κατά μέσο όρο), αφού, όπως φαίνεται από τον Πίνακα 5.1 το μέσο ατομικό δικαίωμα ανέρχεται σε 24654.4 €/96.2 στρ=256.28 €/στρ. Αν και αυτό δεν αποτελεί το «πραγματικό» σενάριο περιφερειοποίησης (η τελική μορφή του μέτρου δεν είχε αποφασιστεί κατά τη συγγραφή της διατριβής), η επιλογή χαμηλής ΕΑΕ επιτρέπει τη μελέτη της επίδρασης της τελευταίας στη διαμόρφωση του σχεδίου παραγωγής κάθε εκμετάλλευσης.

## **5.8 Αποτελέσματα**

### **5.8.1 Αρδευόμενες εκτάσεις**

Όπως ήταν αναμενόμενο, η αύξηση του κόστους άρδευσης, μέσω της τιμολόγησης του νερού, μειώνει το ακαθάριστο κέρδος ανά στρέμμα των αρδευόμενων καλλιεργειών και συνεπώς ευνοείται η αντικατάστασή τους από (ξηρικό) σιτάρι. Αυτό φαίνεται από το σχήμα 5.2, όπου παρατηρείται σταδιακή μείωση των αρδευόμενων εκτάσεων όσο αυ-

ξάνεται η τιμή του νερού. Να σημειωθεί πως για μηδενική τιμή νερού, το σενάριο (α) «ΚΑΠ πριν το 2006» αντιστοιχεί στα αποτελέσματα που προκύπτουν κατά τον έλεγχο αξιοπιστίας του τελικού βιο-οικονομικού υποδείγματος και τα οποία παρουσιάζονται στον πίνακα 5.12.



**Σχήμα 5.2: Αρδευόμενες εκτάσεις σε διαφορετικές τιμές νερού άρδευσης**

Χαρακτηριστικό του σχήματος 5.2 είναι πως σε αντίθεση με τα σενάρια που αναφέρονται στην αναθεωρημένη ΚΑΠ, το σενάριο (α) οδηγεί αρχικά σε μικρότερη αρδευόμενη έκταση και στη συνέχεια σε μικρότερο ρυθμό μείωσης των αρδευόμενων εκτάσεων. Η αρχικά μικρότερη αρδευόμενη έκταση οφείλεται στον περιορισμό παραγωγής για το βαμβάκι και τον καπνό, ο οποίος ορίζει πως οι πωλήσεις των δυο προϊόντων δεν πρέπει να ξεπεράσουν τις πωλήσεις κάθε εκμετάλλευσης κατά το έτος βάσης (ποσόστωση). Οι διαφορετικές αποδόσεις, σε σχέση με τις παρατηρούμενες, που προκύπτουν σε κάθε εκμετάλλευση έχουν ως αποτέλεσμα την ελαφρά μείωση των εκτάσεων των δυο καλλιεργειών προκειμένου να ικανοποιηθεί ο περιορισμός της παραγωγής. Η δε μείωση που παρατηρείται στη συνέχεια, λόγω της τιμολόγησης του νερού προκύπτει κυρίως από τη μείωση των εκτάσεων των υπολοίπων αρδευόμενων καλλιεργειών. Αντίθετα, οι εκτάσεις του καπνού παραμένουν σταθερές, ενώ για το βαμβάκι αυξάνονται οριακά κατά 3.6%.

Για τα σενάρια που αναφέρονται στην αναθεωρημένη ΚΑΠ, το (β) «ΚΑΠ 2006-2008» οδηγεί σε λιγότερες αρδευόμενες εκτάσεις μέχρι την τιμή νερού των 0.15 €/m³. Όπως και στην περίπτωση του σεναρίου (α), η μείωση των αρδευόμενων εκτάσεων και στα τρία σενάρια της αναθεωρημένης ΚΑΠ, καθώς αυξάνει η τιμή του νερού, οφείλεται στη

μείωση της έκτασης όλων των υπολοίπων αρδευομένων καλλιεργειών, εκτός όμως του βαμβακιού. Μάλιστα, στο σενάριο (β) η καλλιεργούμενη έκταση βαμβακιού παρουσιάζει μια ελαφρά αύξηση 2.26%. Ο πίνακας 5.16 παρουσιάζει αναλυτικά τις μεταβολές στις εκτάσεις των καλλιεργειών.

**Πίνακα 5.16: Καλλιεργούμενες εκτάσεις (στρ) σε διάφορες τιμές νερού και σε-  
νάρια πολιτικής**

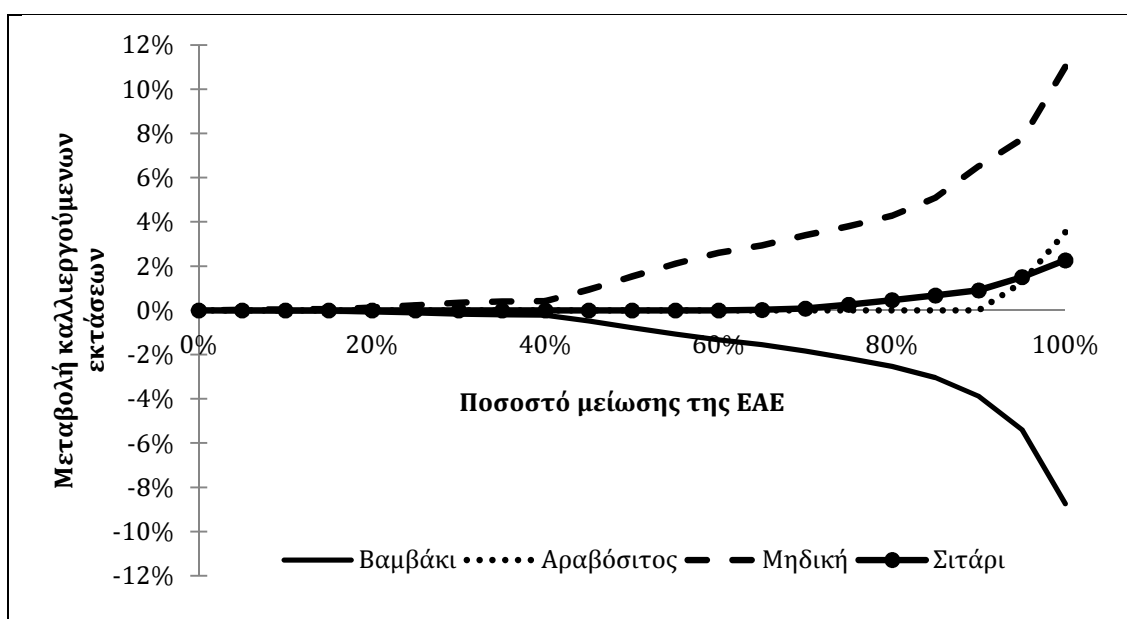
Τιμή νερού (€/m <sup>3</sup> )	cot	mze	tob	dwt	alf	pep	tom
<b>Σενάριο (α): ΚΑΠ πριν το 2006</b>							
0.00	4424	502	1394	1384	101	70	378
0.04	4426	404	1394	1453	129	70	377
0.08	4432	372	1394	1491	119	70	375
0.12	4457	245	1394	1676	34	70	377
0.16	4509	99	1394	1803		70	377
0.20	4583		1396	1827		70	377
<b>Σενάριο (α): ΚΑΠ 2006-2008</b>							
0.00	4662	334	24	1305	1585	61	293
0.04	4657	245	31	1372	1595	61	293
0.08	4717	141	50	1466	1526	61	293
0.12	4775	68	12	1744	1301	61	293
0.16	4984			2114	796	61	293
0.20	4967			2570	358	61	293
<b>Σενάριο (γ): ΚΑΠ 2009-2012</b>							
0.00	5353	125	117	1118	1147	61	293
0.04	5382	63	40	1226	1189	61	293
0.08	5400	10	87	1310	1092	61	293
0.12	5432		62	1649	757	61	293
0.16	5456		39	1901	499	61	293
0.20	5445			2302	147	61	293
<b>Σενάριο (δ): ΚΑΠ μετά το 2013</b>							
0.00	5010	205	49	1206	1429	61	293
0.04	5018	68	63	1319	1432	61	293
0.08	5015	15	76	1394	1399	61	293
0.12	5040		61	1721	1072	61	293
0.16	4989		42	2188	663	61	293
0.20	5047		35	2632	149	61	293

cot: βαμβάκι, mze: αραβόσιτος, tob: καπνός, dwt: σιτάρι, alf: μηδική, pep: πιπεριά, tom: βιομηχανική τομάτα.

Οι επιμέρους διαφορές μεταξύ των τριών σεναρίων εξηγούνται από τη συνδεδεμένη ενίσχυση στο βαμβάκι, το μεγαλύτερο ύψος της οποίας στα σενάκια (γ) και (δ) αποτελεί κίνητρο για την αύξηση της καλλιεργούμενης έκτασης σε σχέση με το σενάριο (β). Η τάση αυτή είναι πιο έντονη στο σενάριο (γ) «ΚΑΠ 2009-2012», όπου η συνδεδεμένη ενίσχυση των 75 €/στρ οδηγεί σε σημαντική αύξηση της καλλιέργειας βαμβακιού, έως το όριο του επιπλέον 20% που τίθεται από τον περιορισμό παραγωγής της καλλιέργειας. Αντίθετα, για το σενάριο (δ) «ΚΑΠ μετά το 2013» που χρησιμοποιεί το ίδιο ύψος συνδεδεμένης ενίσχυσης, το υπόδειγμα οδηγεί σε μικρότερη έκταση βαμβακιού σε σχέση με το σενάριο (γ). Αυτό οφείλεται στη συνδυασμένη επίδραση του περιορισμού

της μέγιστης καλλιεργούμενης έκτασης στο 75% της συνολικής διαθέσιμης σε κάθε εκμετάλλευσης και της μείωσης της ΕΑΕ λόγω περιφερειοποίησης.

Ωστόσο, η διάκριση της επιμέρους επίδρασης της μείωσης της ΕΑΕ και της ενεργοποίησης του περιορισμού της μέγιστης καλλιεργούμενης έκτασης στη διαμόρφωση των καλλιεργητικών σχεδίων των εκμεταλλεύσεων δεν είναι εφικτή. Αυτό που μπορεί να δειχθεί, ωστόσο, είναι η ευαισθησία του υποδείγματος σε μεταβολές της ΕΑΕ, δηλαδή οι λύσεις που προκύπτουν από την παραμετρική επίλυση του υποδείγματος για συνεχώς μειούμενες τιμές της ΕΑΕ. Έως ότου αυτή να μηδενιστεί. Ειδικότερα, η μείωση της ΕΑΕ στο σενάριο (δ) επηρεάζει τις καλλιεργητικές αποφάσεις των παραγωγών, αφού σύμφωνα με τη θεωρία στην οποία βασίστηκε η ρύθμιση του υποδείγματος, η ΕΑΕ αποτελεί το μη στοχαστικό κομμάτι του τελικού πλούτου του παραγωγού και συνεπώς, λόγω της λογαριθμικής συνάρτησης χρησιμότητας, η μείωση της αναμένεται να μεταβάλλει την οικονομική συμπεριφορά του παραγωγού. Η ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιείται δεν αφορά σε κάποιο σενάριο τιμολόγησης νερού (μηδενική τιμή) ενώ χρησιμοποιείται η συνδεδεμένη ενίσχυση των 75 €/στρ για το βαμβάκι, σε συνδυασμό με σημειακές αποδόσεις καλλιεργειών (δεν έχουν ενσωματωθεί οι συναρτήσεις απόδοσης στην αντικειμενική συνάρτηση). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο σχήμα 5.3.



**Σχήμα 5.3: Μεταβολή καλλιεργούμενων εκτάσεων σε διάφορες τιμές της ΕΑΕ**

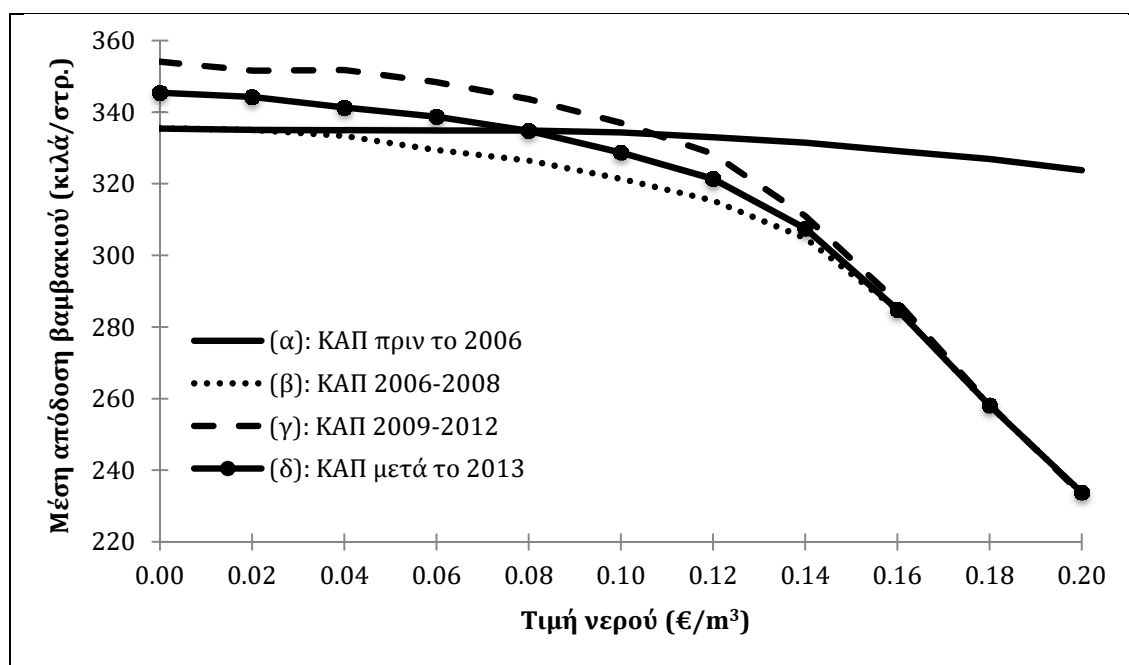
Όπως φαίνεται από το παραπάνω σχήμα, η επίδραση της μείωσης της ΕΑΕ στις καλλιεργούμενες εκτάσεις ξεκινά όταν η μείωση αυτή ξεπεράσει το 40%. Η επίδραση, ωστόσο, παραμένει μικρή μέχρι το όριο του 70% της μέσης μείωσης της ΕΑΕ που αντιστοιχεί στο σενάριο (δ). Επίσης, η μείωση των εκτάσεων του βαμβακιού και η αύξηση εκείνων της μηδικής υποδηλώνει πως η μέση διακύμανση του ακαθάριστου κέρδους του βαμ-

βακιού στο δείγμα είναι μεγαλύτερη από της μηδικής. Συνεπώς, η μείωση της ΕΑΕ (σταθερό κομμάτι του πλούτου) ωθεί τους γεωργούς να μεταβάλλουν το σχέδιο παραγωγής τους προκειμένου να μειώσουν ή να αντισταθμίσουν την αυξανόμενη έκθεση τους στον οικονομικό κίνδυνο.

### 5.8.2 Αποδόσεις αρδευομένων καλλιεργειών

Η προηγούμενη συζήτηση για τις μεταβολές στις αρδευόμενες εκτάσεις, ως αποτέλεσμα της τιμολόγησης του νερού, καθίσταται πληρέστερη όταν ταυτόχρονα εξεταστεί και η (αναμενόμενη) μεταβολή των αποδόσεων των καλλιεργειών. Έτσι, μία σημαντική παρατήρηση που προκύπτει από τα αποτελέσματα του υποδείγματος για το σενάριο (α) είναι πως η απόδοση του καπνού παραμένει σχεδόν σταθερή σε όλο το εύρος τιμών (πτώση κατά μέσο όρο 0.2%), ενώ η απόδοση του βαμβακιού παρουσιάζει μια μικρή πτώση κατά 3.6%. Σε ό,τι αφορά τον καπνό, η αντίδραση του υποδείγματος καταδεικνύει τη μεγάλη συμμετοχή των επιδοτήσεων στη διαμόρφωση του ακαθάριστου κέρδους της καλλιέργειας, το οποίο, παρά το επιπλέον κόστος άρδευσης, παραμένει ιδιαίτερα υψηλό και συνεπώς σχεδόν ανεπηρέαστο από την τιμολόγηση του νερού.

Αντίθετα, και τα τρία σενάρια που αναφέρονται στην αναθεωρημένη ΚΑΠ συνοδεύονται από μια σημαντική μείωση της απόδοσης του βαμβακιού, παρά το γεγονός πως, αρχικά, οι μέσες αποδόσεις διαφέρουν (σχήμα 5.4).



Σχήμα 5.4: Μέσες αποδόσεις βαμβακιού σε διαφορετικές τιμές νερού άρδευσης

Ειδικότερα, οι μέσες αποδόσεις των σεναρίων (β) έως (δ) για χαμηλές τιμές νερού παρουσιάζουν την ίδια ιεράρχηση με τις αρδευόμενες εκτάσεις του σχήματος 5.2, κάτι που



είναι ενδεικτικό της επίδρασης της συνδεδεμένης ενίσχυσης στη χρήση του νερού για την καλλιέργεια του βαμβακιού. Συγκεκριμένα, στα σενάρια (γ) και (δ) είναι δυνατή η επίτευξη υψηλότερων αποδόσεων καθώς η υψηλή συνδεδεμένη ενίσχυση καλύπτει επαρκέστερα τόσο το επιπλέον κόστος άρδευσης, όσο και την αρχική μείωση του (προσδοκώμενου) ακαθάριστου κέρδους της καλλιέργειας λόγω της αποσύνδεσης.

Χαρακτηριστικό του σχήματος 5.4 είναι πως οι αποδόσεις του βαμβακιού σταδιακά συγκλίνουν όταν η τιμή του νερού ξεπεράσει τα 0.14 €/m<sup>3</sup>, ή ισοδύναμα, όταν η απόδοση πέσει κάτω από τα 300 κιλά/στρ. Λαμβάνοντας υπόψη τη μορφή της συνάρτησης απόδοσης του βαμβακιού (σχήμα A.1 του Παραρτήματος Α') και τις μέσες τιμές ετήσιας βροχόπτωσης και *ETc* της καλλιέργειας από τον πίνακα 5.3, η απόδοση αυτή αντιστοιχεί περίπου σε μια ποσότητα νερού 200 χιλιοστών (m<sup>3</sup>/στρ), μέρος της οποίας καλύπτεται από τη βροχή, κυρίως στα αρχικά στάδια της βλαστικής περιόδου του βαμβακιού. Κατά συνέπεια, η σύγκλιση αφορά σε αποδόσεις που επιτυγχάνονται με ένα μέγιστο 2-3 ποτισμάτων.

Επίσης φαίνεται πως η περιφερειοποίηση στο σενάριο (δ) οδηγεί σε μειωμένη χρήση νερού άρδευσης στο βαμβάκι σε σχέση με το σενάριο (γ). Το αποτέλεσμα αυτό είναι σε πλήρη συμφωνία με την υπάρχουσα βιβλιογραφία και ονομάζεται ως «επίδραση πλούτου της πολιτικής» (wealth effect of policy). Για παράδειγμα, ο Hennessy (1998) έδειξε πως οι παραγωγοί με συναρτήσεις DARA, όπως η λογαριθμική, θα αυξήσουν την ένταση χρήσης του μεταβλητού συντελεστή αν εφαρμοστεί πολιτική αποδέσμευσης που αυξάνει τον τελικό πλούτο του παραγωγού. Αντίστοιχα, πολιτική που μειώνει την αποδεσμευμένη ενίσχυση θα μειώσει και την ένταση χρήσης του συντελεστή.

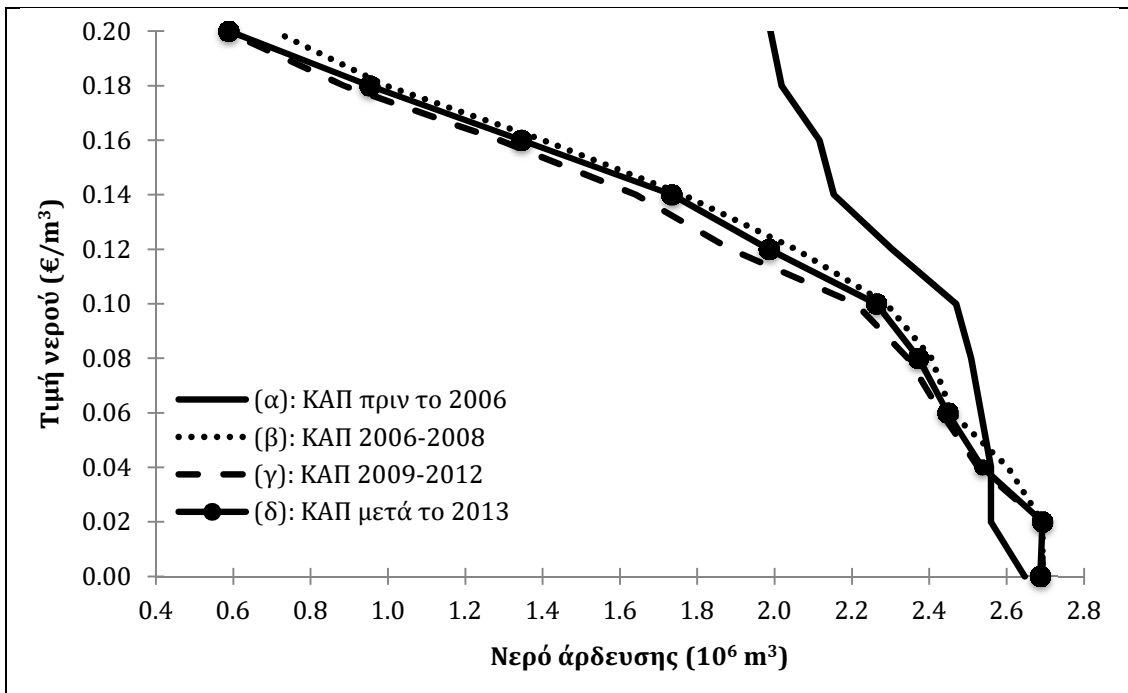
Από τις άλλες δυο αρδευόμενες καλλιέργειες με συναρτήσεις απόδοσης (αραβόσιτος και μηδική), μόνο η απόδοση του αραβοσίτου εμφανίζει μια συνολική πτώση 11.4% στο σενάριο (α), συγκεκριμένα μέχρι την τιμή νερού των 0.18 €/m<sup>3</sup>. Αντίθετα, οι μεταβολές των αποδόσεων στα υπόλοιπα σενάρια δεν είναι τόσο εμφανείς όσο στην περίπτωση του βαμβακιού. Αυτό οφείλεται στην κατάργηση της στρεμματικής ενίσχυσης των περίπου 50 €/στρ που λάμβανε η καλλιέργεια του αραβοσίτου κατά το έτος βάσης, η οποία επέτρεπε την ευκολότερη προσαρμογή της τελικής απόδοσης σε αυξανόμενες τιμές του νερού. Έτσι, κατά περίπτωση, οι μεταβολές της τιμής του νερού οδηγούν συχνότερα σε αλλαγή καλλιέργειας και λιγότερο συχνά σε μείωση της απόδοσης. Τα ίδια ισχύουν και για την καλλιέργεια της μηδικής, με τη σημείωση πως η τελική απόδοση της εξαρτάται στην πραγματικότητα από τον αριθμό των κοπών που ωστόσο δεν έχουν ληφθεί υπόψη.

Η επιλογή για αλλαγή της καλλιέργειας (εκτατική επίπτωση) αντί για τη μείωση της απόδοσης (μείωση της έντασης χρήσης της μεταβλητής εισροής) δικαιολογείται από τους Garrido και Calatrava (2010) οι οποίοι υποστηρίζουν πως η αντίδραση των παραγωγών στην αύξηση της τιμής του νερού δεν είναι απαραίτητα συνεχής. Επιπλέον, κυρίως σε καλλιέργειες υψηλού ακαθάριστου κέρδους, η βέλτιστη απόδοση της καλλιέργειας είναι ευαίσθητη σε αυξήσεις της δαπάνης άρδευσης μόνο όταν αυτή υπερβεί ένα «νεκρό» σημείο. Αυτό επιβεβαιώνεται στην περίπτωση του βαμβακιού και του καπνού στο σενάριο (α) κατά το οποίο οι αποδόσεις τους παραμένουν σχεδόν σταθερές.

Η συγκεκριμένη αντίδραση του υποδείγματος μπορεί να εξηγηθεί αν ληφθούν υπόψη οι μεγαλύτερες αρδευτικές απαιτήσεις του αραβοσίτου και της μηδικής σε σχέση με το βαμβάκι. Συγκεκριμένα, η παραγωγή ξηρικού βαμβακιού (άνευ άρδευσης) είναι δυνατή και οδηγεί σε μια μικρή απόδοση 120-180 κιλών/στρ, ανάλογα με τη βροχόπτωση κατά τη διάρκεια της βλαστικής περιόδου της καλλιέργειας. Κάτι τέτοιο είναι αδύνατο, για παράδειγμα, στον αραβόσιτο, αφού όπως φαίνεται από το σχήμα Α.2 του Παραρτήματος Α' (αλλά αποδεικνύεται και στην πράξη), η επίτευξη μιας απόδοσης άνω των 800 κιλών/στρ, που είναι ικανή να οδηγήσει σε θετικό ακαθάριστο κέρδος ανά στρέμμα, απαιτεί μια σημαντική ποσότητα νερού που πιθανώς να ξεπερνά τα 400 m<sup>3</sup>/στρ. Αυτό σημαίνει πως η τιμολόγηση του νερού, με τις δεδομένες συναρτήσεις απόδοσης και για τα σενάρια της αναθεωρημένης ΚΑΠ (χωρίς στρεμματική ενίσχυση), σύντομα καθιστά τον αραβόσιτο μη ανταγωνιστικό συγκριτικά με τις υπόλοιπες καλλιέργειες, κυρίως το βαμβάκι και το σιτάρι. Η μείωση της ανταγωνιστικότητας σχετίζεται αφενός με την αύξηση της δαπάνης άρδευσης της καλλιέργειας και αφετέρου με το αυξημένο κόστος ευκαιρίας που προκύπτει από τη χρήση σημαντικών ποσοτήτων νερού στον αραβόσιτο, οι οποίες θα μπορούσαν να διοχετευτούν σε άλλες καλλιέργειες που θα εξασφάλιζαν υψηλότερο ακαθάριστο κέρδος. Να σημειωθεί τέλος πως για τη μηδική, αν και η ξηρική της καλλιέργεια δεν είναι άγνωστη στην Ελλάδα, αυτή δεν λαμβάνεται υπόψη ως υποψήφιος κλάδος παραγωγής στην παρούσα διατριβή.

### **5.8.3 Συνολική ζήτηση νερού**

Η συνδυαστική επίδραση των μεταβολών στις αρδευόμενες εκτάσεις και στις αποδόσεις των καλλιεργειών, ως αποτέλεσμα της τιμολόγησης του νερού αποτυπώνεται καλύτερα στο σχήμα 5.5, όπου παρουσιάζεται η αθροιστική συνάρτηση ζήτησης για νερό άρδευσης που προκύπτει από τα αποτελέσματα του υποδείγματος για καθένα από τα τέσσερα εξεταζόμενα σενάρια πολιτικής.



**Σχήμα 5.5: Συνολική ζήτηση νερού άρδευσης σε διαφορετικές τιμές νερού**

Το σχήμα 5.5 αποκαλύπτει μια αντίθεση μεταξύ των στόχων της ΟΠΝ (όπως αυτή εκφράζεται από την τιμολόγηση του νερού) και της αναθεώρησης της ΚΑΠ, αφού για χαμηλές τιμές νερού, έως 0.04 €/m<sup>3</sup>, το σενάριο (α) οδηγεί σε μικρότερη ζήτηση νερού σε σχέση με τα υπόλοιπα τρία. Να σημειωθεί πως παρόμοια αποτελέσματα αναφέρονται και από τους Kampras *et al.* (2010), σύμφωνα με τους οποίους το σενάριο της ΚΑΠ προ της ενδιάμεσης αναθεώρησης οδηγεί σε μεγαλύτερη εξοικονόμηση νερού μέχρι και την τιμή των 0.06 €/m<sup>3</sup>. Αυτό οφείλεται στον περιορισμό της παραγωγής καπνού και βαμβακιού λόγω των ποσοστώσεων που ήταν σε ισχύ κατά το έτος βάσης, αποτέλεσμα το οποίο συμβαδίζει με τις μεταβολές στις αρδευόμενες εκτάσεις που παρουσιάζεται στο σχήμα 5.2. Αντίθετα, σε υψηλότερες τιμές νερού η κατάσταση αντιστρέφεται και τα σενάρια που αναφέρονται στην αναθεωρημένη ΚΑΠ επιτυγχάνουν σημαντική εξοικονόμηση. Επιπλέον, αν και η συνολική ζήτηση νερού στα σενάρια αυτά είναι σχεδόν ίδια, παρατηρείται μια μικρή διαφοροποίηση μεταξύ τους με το σενάριο (γ) να επιτυγχάνει ελαφρά μεγαλύτερη εξοικονόμηση νερού. Η εξήγηση και πάλι αναζητείται στις εκτάσεις του βαμβακιού, το οποίο αποτελεί την αρδευόμενη καλλιέργεια με τις χαμηλότερες απαιτήσεις σε νερό στο δείγμα. Αυτό σημαίνει πως η επέκταση της καλλιέργειας συγκριτικά με τα υπόλοιπα σενάρια, περιορίζει τις εκτάσεις των υπολοίπων αρδευόμενων καλλιεργειών και συνεπώς οδηγεί σε συγκριτικά χαμηλότερη ζήτηση νερού.

Μια εξίσου σημαντική παρατήρηση είναι η καθολικά ανελαστική ζήτηση του νερού στο σενάριο (α), ενώ το ίδιο παρατηρείται μέχρι την τιμή των 0.10 €/m<sup>3</sup> και για τα υπόλοι-

πα τρία σενάρια. Η ανελαστικότητα οφείλεται στη μοναδικότητα που χαρακτηρίζει το συντελεστή «νερό», λόγω της αδυναμίας υποκατάστασης του από κάποια άλλη εισροή, γεγονός που το καθιστά ως τη σημαντικότερη εισροή στη γεωργική παραγωγή (Garrido & Calatrava, 2010).

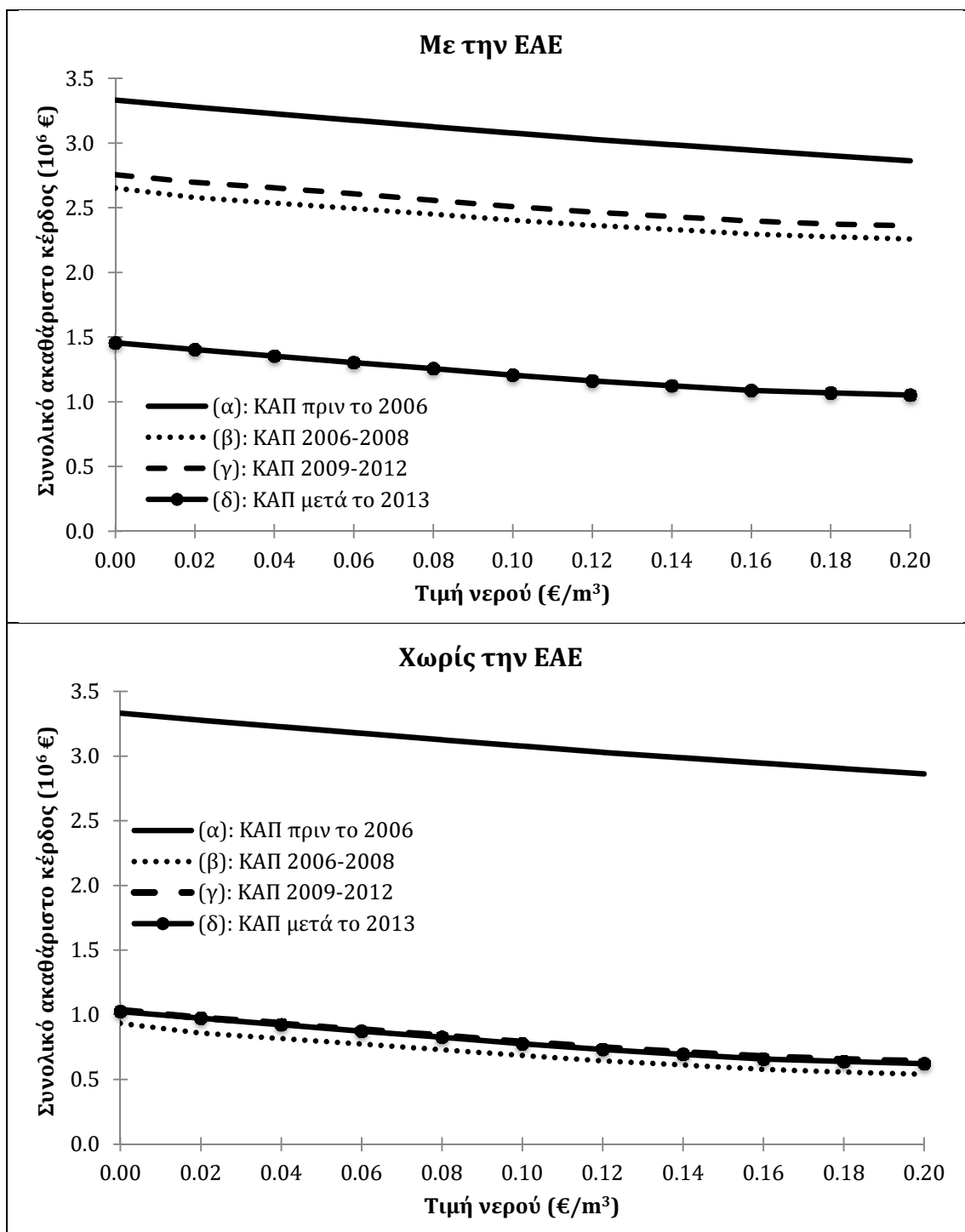
Η ανελαστική ζήτηση νερού άρδευσης σε κάποια τμήματα της καμπύλης επιβεβαιώνεται από τα εμπειρικά ευρήματα στη σχετική βιβλιογραφία, τόσο από το εξωτερικό (π.χ. Iglesias & Blanco, 2008; Gómez-Limón & Riesgo, 2004; Gómez-Limón & Berbel, 2000), όσο και από την Ελλάδα (Kampas *et al.*, 2010; Manos *et al.*, 2006; Latinopoulos, 2005). Σε αντίθεση ωστόσο με την παρούσα διατριβή, σε καμιά από τις προαναφερθείσες εργασίες, με εξαίρεση τους Kampas *et al.* (2010), δε γίνεται χρήση συναρτήσεων απόδοσης. Αυτό σημαίνει πως οι μεταβολές στη ζήτηση του νερού οφείλονται αποκλειστικά στη μείωση της έκτασης των αρδευόμενων καλλιεργειών κι έτσι οι καμπύλες ζήτησης χαρακτηρίζονται από ταυτόχρονα ελαστικά και ανελαστικά τμήματα.

#### **5.8.4 Ακαθάριστο κέρδος εκμεταλλεύσεων και αποδοτικότητα εξοικονόμησης νερού άρδευσης**

Όπως είναι αναμενόμενο, η τιμολόγηση του νερού οδηγεί σε σταδιακή μείωση του συνολικού ακαθάριστου κέρδους των εκμεταλλεύσεων, ανεξάρτητα από το εξεταζόμενο σενάριο πολιτικής. Από το σχήμα 5.6 γίνεται φανερό πως η ΕΑΕ<sup>36</sup>, στο συγκεκριμένο δείγμα, δεν αντισταθμίζει την απώλεια εισοδήματος λόγω της αποσύνδεσης των ενισχύσεων από την παραγωγή. Έτσι το τελικό ακαθάριστο κέρδος στα σενάρια (β) και (γ) της αναθεωρημένης ΚΑΠ, μαζί με την ΕΑΕ, παρουσιάζεται μειωμένο σε σχέση με το σενάριο (α) κατά περίπου 13%. Όταν δεν συνυπολογίζεται η ΕΑΕ, η πτώση των ακαθάριστων κερδών φτάνει έως και το 70%. Αν και το ποσοστό αυτό είναι ιδιαίτερα υψηλό, μπορεί να θεωρηθεί φυσιολογικό αν ληφθεί υπόψη πως πρόκειται για ένα δείγμα καπνοπαραγωγικών εκμεταλλεύσεων οι οποίες εισέπρατταν σημαντικά ποσά ενισχύσεων μέσω της καλλιέργειας του καπνού. Μια δεύτερη παρατήρηση είναι πως το σενάριο της περιφερειοποίησης (μείωση της ΕΑΕ στα 75€/στρ) οδηγεί σε μεγάλη πτώση των ακαθάριστων κερδών των εκμεταλλεύσεων τα οποία διαμορφώνονται σε επίπεδα περίπου 40% χαμηλότερα σε σχέση με τα σενάρια (β) και (γ).

---

<sup>36</sup> Σε αυστηρά λογιστικούς όρους, η ΕΑΕ δεν αποτελεί μέρος του ακαθάριστου κέρδους μιας εκμετάλλευσης γιατί δεν συνδέεται με την παραγωγική διαδικασία. Για το λόγο αυτό, κατά την παρουσίαση της μεθοδολογίας ρύθμισης γίνεται λόγος για τον «τελικό πλούτο», ο οποίος περιλαμβάνει τόσο το ακαθάριστο κέρδος (στοχαστικό), όσο και την ΕΑΕ (μη στοχαστικό).



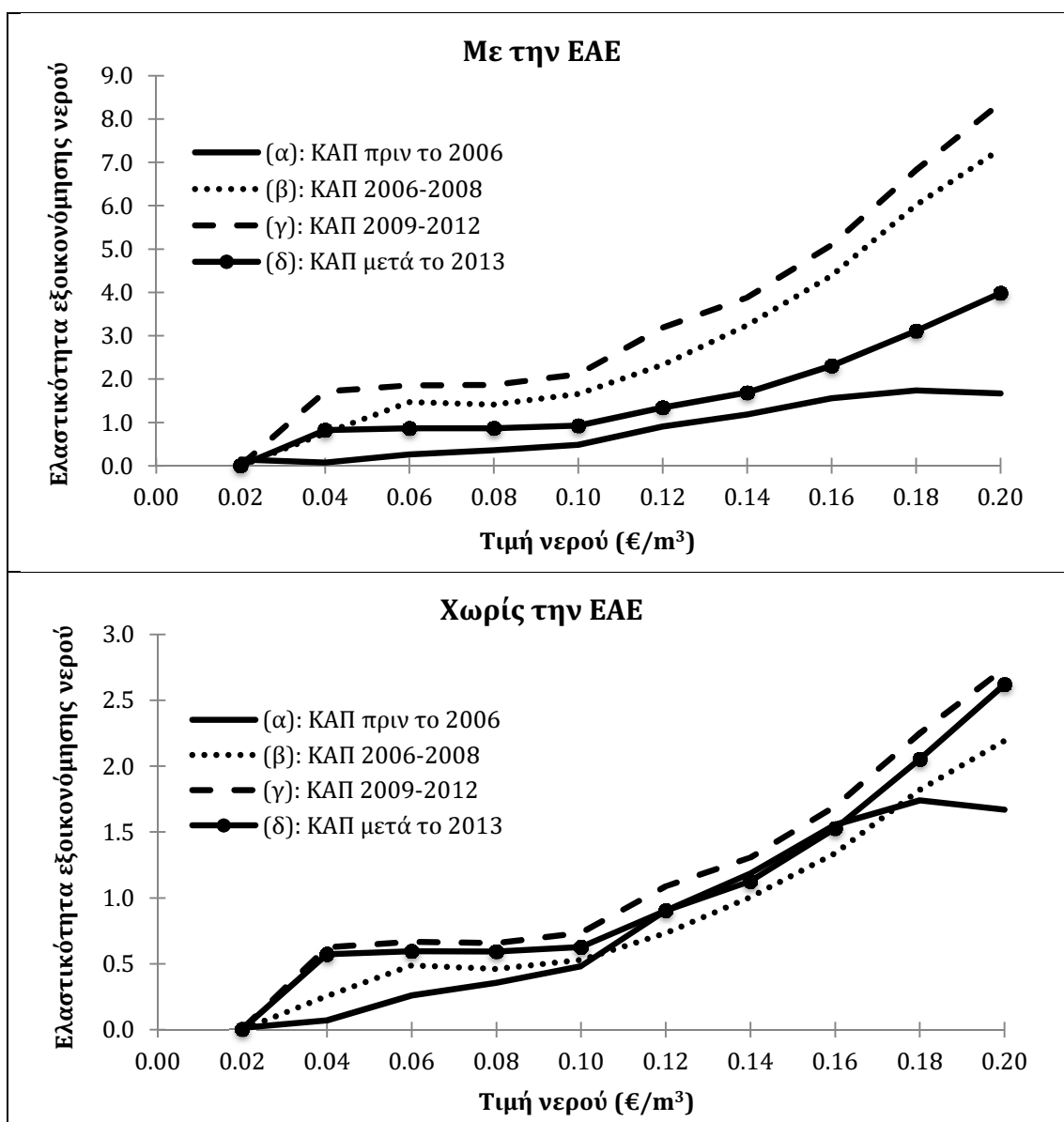
**Σχήμα 5.6: Μεταβολή του ακαθάριστου κέρδους των εκμεταλλεύσεων σε διαφορετικές τιμές νερού**

Οι μεταβολές στα οικονομικά αποτελέσματα των εκμεταλλεύσεων και στη συνολική ζήτηση νερού που συζητήθηκε στην ενότητα 5.8.3, επιτρέπουν τον υπολογισμό ενός δείκτη ελαστικότητας που εκφράζει το ποσοστό του νερού που εξοικονομείται για μια ποσοστιαία μείωση του συνολικού ακαθάριστου κέρδους των εκμεταλλεύσεων του δείγματος. Πρόκειται για την τοξοειδή (μέση) ελαστικότητα μεταξύ δυο σημείων  $a$  και

$b$ , στα οποία αντιστοιχούν διαφορετικές τιμές ζήτησης και ακαθάριστου κέρδους. Η ελαστικότητα αυτή ορίζεται αλγεβρικά ως

$$E_W = \frac{\Delta W}{\Delta GM} \left( \frac{GM_a + GM_b}{W_a + W_b} \right)$$

όπου με  $\Delta W$  συμβολίζεται η μεταβολή της ζήτησης νερού μεταξύ των  $W_a$  και  $W_b$ , ενώ με  $\Delta GM$  συμβολίζεται η αντίστοιχη μεταβολή του ακαθάριστου κέρδους, δηλαδή η διαφορά μεταξύ των  $GM_a$  και  $GM_b$ .



Σχήμα 5.7: Οικονομική αποδοτικότητα εξοικονόμησης νερού

Λόγω της επίδρασης της ΕΑΕ στη διαμόρφωση του ακαθάριστου κέρδους των εκμεταλλεύσεων, ο δείκτης  $E_W$  παίρνει διαφορετικές τιμές ανάλογα με το αν λαμβάνεται υπόψη

η ΕΑΕ στον υπολογισμό του. Ειδικότερα, όπως φαίνεται και από το σχήμα 5.7, η ποσοστιαία μείωση του ακαθάριστου κέρδους κατά τον συνυπολογισμό της ΕΑΕ είναι μικρότερη, γεγονός που οδηγεί σε υψηλότερες τιμές του  $E_W$ . Αυτό σημαίνει πως για τα σενάρια που αναφέρονται στην αναθεωρημένη ΚΑΠ, μια ποσοστιαία απώλεια πλούτου οδηγεί σε πολύ μεγαλύτερη ποσοστιαία εξοικονόμηση νερού σε σχέση με το σενάριο (α). Αυτό είναι ιδιαίτερα εμφανές στο σενάριο (γ), το οποίο περιλαμβάνει το πλήρες ποσό της ΕΑΕ σε συνδυασμό με την υψηλή συνδεδεμένη ενίσχυση στο βαμβάκι.

Ο ρόλος της συνδεδεμένης ενίσχυσης του βαμβακιού στη διαμόρφωση της υψηλής τιμής του δείκτη  $E_W$  είναι σημαντικός, καθώς καθιστά οικονομικότερη τη μείωση της ζήτησης νερού, ακόμα και όταν η ΕΑΕ δεν λαμβάνεται υπόψη. Στην περίπτωση αυτή, το σενάριο (γ) οδηγεί σε μια τιμή  $E_W$  που είναι καθολικά υψηλότερη όλων των υπολοίπων σεναρίων. Είναι επίσης ενδιαφέρον πως χωρίς την ΕΑΕ το σενάριο (β) εμφανίζεται λιγότερο αποδοτικό σε σχέση με το (α) για τιμές νερού μεταξύ 0.10 και 0.18 €/m<sup>3</sup>. Το εύρημα αυτό έρχεται σε αντίθεση με αυτό των *Kampas et al.* (2010), σύμφωνα με τους οποίους η αναθεωρημένη ΚΑΠ είναι οικονομικά πιο αποδοτική στην εξοικονόμηση νερού άρδευσης σε όλο το εύρος των εξεταζόμενων τιμών. Η αναντιστοιχία αυτή αποδίδεται στις διαφορές μεταξύ των δειγμάτων εκμεταλλεύσεων. Στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιείται ένα σχετικά μικρό δείγμα 70 εκμεταλλεύσεων με παραγωγικό προσανατολισμό σε καπνό και βαμβάκι και συνεπώς τα αποτελέσματα που προκύπτουν σχετίζονται άμεσα με τις μεταβολές που επιφέρει η τιμολόγηση στις δυο αυτές καλλιέργειες.

## 5.9 Συμπεράσματα

Η συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης οδήγησε σε τρία σημαντικά συμπεράσματα σχετικά με την αλληλεπίδραση της ΚΑΠ και της ΟΠΝ, όπως αυτή προτυποποιήθηκε μέσω της τιμολόγησης του νερού. Το πρώτο είναι πως η ΚΑΠ στη σημερινή, αλλά και τη μελλοντική της μορφή, πιθανώς να αποτελέσει τροχοπέδη στους στόχους της ΟΠΝ για ορθολογικότερη διαχείριση των υδάτων, αν η (αναμενόμενη) τιμή του νερού άρδευσης περιοριστεί σε επίπεδα μικρότερα των 0.04€/m<sup>3</sup>.

Το δεύτερο συμπέρασμα είναι πως οι συνδεδεμένες ενισχύσεις του βαμβακιού προκαλούν σημαντική στρέβλωση του «μηνύματος των τιμών» που λαμβάνουν οι παραγωγοί, με αποτέλεσμα να ευνοείται η εξάπλωση της καλλιέργειας εις βάρος των υπολοίπων αρδευόμενων καλλιεργειών. Ωστόσο, η επίδραση της συνδεδεμένης στρεμματικής ενίσχυσης στην ζήτηση νερού είναι κατά πολύ μικρότερη σε σχέση με τις ενισχύσεις στην παραγωγή που δίνονταν στον καπνό και στο βαμβάκι πριν την ενδιάμεση αναθεώρηση της ΚΑΠ. Στην περίπτωση αυτή, οι ενισχύσεις συντηρούσαν τόσο τις αποδόσεις όσο και

τις εκτάσεις των δυο αυτών καλλιεργειών σε υψηλά επίπεδα, γεγονός που αντικατοπτρίζεται στην πολύ ανελαστική ζήτηση νερού άρδευσης κατά το αντίστοιχο σενάριο πολιτικής.

Τέλος, η περιφερειοποίηση συνιστά ένα μέτρο πολιτικής που σε απόλυτους όρους εξοικονόμησης νερού εμφανίζεται να έχει γενικά τις ίδιες επιπτώσεις με το υφιστάμενο καθεστώς της ΚΑΠ. Αντίθετα, εμφανίζει μειωμένη οικονομική αποδοτικότητα, κυρίως λόγω της απώλειας ενός σταθερού και βέβαιου εισοδήματος από πλευράς παραγωγών, γεγονός που πιθανώς να τους οδηγήσει σε καλλιεργητικές επιλογές που μειώνουν την έκθεση τους στον οικονομικό κίνδυνο. Σε κάθε περίπτωση πρέπει να σημειωθεί πως η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων που παρουσιάστηκαν στο παρόν κεφάλαιο εξαρτάται άμεσα από τα χαρακτηριστικά του δείγματος εκμεταλλεύσεων που χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση. Αυτό σημαίνει πως η γενίκευση των συμπερασμάτων της μελέτης περίπτωσης πρέπει να γίνει με προσοχή λόγω της ετερογένειας του αγροτικού χώρου και του γεωργικού τομέα που συνεπάγεται διαφορετικές εδαφοκλιματικές συνθήκες, διαφορετικές τεχνικές καλλιέργειες και διαφορετικές αντιλήψεις, στόχους και προσδοκίες αποδόσεων από τους παραγωγούς.



## 6 Συμπερασματικές παρατηρήσεις

---

Στην παρούσα διατριβή παρουσιάζεται μια προσέγγιση βιο-οικονομικής ανάλυσης σε επίπεδο γεωργικής εκμετάλλευσης, η οποία συνδυάζει σύγχρονες μεθόδους ΜΠ και ένα βιο-φυσικό υπόδειγμα για την ποσοτική εκτίμηση της σχέσης μεταξύ νερού άρδευσης και τελικής απόδοσης των σημαντικότερων αροτραίων καλλιεργειών της Ελλάδας (βαμβάκι, καπνός, αραβόσιτος, σιτάρι και μηδική). Ειδικότερα, εξειδικεύεται μια εναλλακτική εκδοχή της μεθόδου ΘΜΠ η οποία λαμβάνει υπόψη τον οικονομικό κίνδυνο που αντιμετωπίζουν οι παραγωγοί και ταυτόχρονα επιτυγχάνει την ακριβή αναπαραγωγή των παρατηρήσεων του έτους βάσης (ρύθμιση), ιδιότητα που κρίνεται αναγκαία για την αποδοχή ενός οικονομικού υποδείγματος ως εργαλείο ανάλυσης αγροτικής πολιτικής. Το βιο-φυσικό υπόδειγμα στηρίζεται στην έννοια της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας, μέσω της οποίας υπολογίζεται το ημερήσιο υδατικό ισοζύγιο στο ριζόστρωμα, προκειμένου να εκτιμηθεί η επίπτωση μιας πιθανής έλλειψης νερού στην τελική απόδοση. Ο τρόπος εξειδίκευσης του βιο-φυσικού υποδείγματος είναι απόλυτα προσαρμοσμένος στις απαιτήσεις εφαρμογών ανάλυσης αγροτικής πολιτικής και ο ρόλος του συνίσταται στην «τροφοδότηση» του υπερκείμενου υποδείγματος ΘΜΠ με συνεχείς συναρτήσεις απόδοσης-νερού για την ταυτόχρονη εκτίμηση της αντίδρασης των παραγωγών τόσο σε εκτατικό επίπεδο (επιλογή καλλιεργειών) όσο και σε εντατικό (χρήση νερού άρδευσης).

Από τη θεωρητική ανάλυση της μεθόδου ρύθμισης που αναπτύσσεται στην παρούσα διατριβή, γίνεται φανερό πως παρουσιάζει σημαντικές διαφορές σε σύγκριση με τα κλασικά υποδείγματα ΘΜΠ. Η πρώτη αφορά στην αντικειμενική συνάρτηση και την ακολουθούμενη λογική του προβλήματος ρύθμισης του υποδείγματος. Συγκεκριμένα, ο στόχος δεν είναι η μετατροπή της αρχικής γραμμικής συνάρτησης σε μη γραμμική, αλλά η αναγνώριση και επανεκτίμηση των παραμέτρων εκείνων της αντικειμενικής συνάρτησης που δεν επιτρέπουν την αναπαραγωγή των παρατηρήσεων του έτους βάσης. Αυτό δείχνει πως η μεθοδολογία του ΘΜΠ μπορεί να ξεφύγει από τα στενά πλαίσια της μη γραμμικής συνάρτησης κόστους και συνεπώς μπορεί να επιτύχει τη ρύθμιση ενός υποδείγματος ΜΠ λαμβάνοντας υπόψη τη συμπεριφορά του παραγωγού έναντι του οικονομικού κινδύνου. Μάλιστα αυτό επιτυγχάνεται χωρίς την περιοριστική και ενδεχομένως μη ρεαλιστική υπόθεση του σταθερού συντελεστή αποστροφής κινδύνου, αφού θεωρείται πως η χρησιμότητα του τελικού πλούτου των παραγωγών έχει λογαριθμική μορφή. Σε κάθε περίπτωση, πρέπει πάντα να λαμβάνεται υπόψη πως το κριτήριο που χρησιμοποιείται για την προτυποποίηση της συμπεριφοράς έναντι του κινδύνου δεν

είναι παρά μια προσέγγιση εκείνου της προσδοκώμενης χρησιμότητας. Ωστόσο, όπως έχει αποδειχτεί στη σχετική βιβλιογραφία, η προσέγγιση αυτή είναι τόσο καλή που συχνά τα δυο κριτήρια οδηγούν σε ταυτόσημες επιλογές.

Ένα επιπλέον σημαντικό πλεονέκτημα της προτεινόμενης μεθόδου, το οποίο προκύπτει από τη χρήση της λογαριθμικής συνάρτησης χρησιμότητας, είναι πως το τελικό υπόδειγμα οικονομικού κινδύνου μπορεί να λάβει υπόψη μια ενδεχόμενη μεταβολή του σταθερού μέρους του πλούτου,  $\omega$ , το οποίο θεωρείται πως, σε βραχυπρόθεσμο διάστημα, αντιπροσωπεύει στη σημερινή συγκυρία την ενιαία αποδεσμευμένη ενίσχυση που λαμβάνουν οι παραγωγοί στα πλαίσια της αναθεωρημένης ΚΑΠ. Αυτό είναι εφικτό λόγω της μη γραμμικής σχέσης του  $\omega$  με τη μεταβλητή απόφασης  $x$  στον κλασματικό όρο της αντικειμενικής συνάρτησης. Η δυνατότητα αυτή είναι πολύ σημαντική, αφού το υπόδειγμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την *ex ante* ανάλυση των επιπτώσεων της περιφερειοποίησης, η οποία αναμένεται να μεταβάλλει το ύψος της ενιαίας ενίσχυσης και συνεπώς να επηρεάσει τις καλλιεργητικές αποφάσεις των παραγωγών. Αντίθετα, τόσο τα κλασικά υποδείγματα οικονομικού κινδύνου με σταθερό συντελεστή  $\varphi$ , όσο και τα συνήθη υποδείγματα ΘΜΠ με την τετραγωνική συνάρτηση κόστους είναι ουδέτερα σε μεταβολές του  $\omega$ , αφού αυτό εισέρχεται γραμμικά στην αντικειμενική συνάρτηση και συνεπώς δεν εμφανίζεται στις αναγκαίες συνθήκες πρώτης τάξης.

Επίσης, η αντικειμενική συνάρτηση που προτείνεται για τη ρύθμιση του υποδείγματος προσφέρει μεγαλύτερο βαθμό ευελιξίας σε σχέση με την αντίστοιχη των κλασικών υποδειγμάτων ΘΜΠ, καθώς η τυπική μορφή των τελευταίων δεν επιτρέπει την εξειδίκευση επιπλέον στοιχείων κόστους. Για παράδειγμα, η ενσωμάτωση συναρτήσεων απόδοσης προϋποθέτει πως η συνάρτηση κόστους είναι προσθετική και διαχωριζόμενη (additive - separable) ως προς τους συντελεστές παραγωγής, δηλαδή το νερό άρδευσης στην παρούσα περίπτωση, έτσι ώστε να είναι δυνατός ο ενδογενής υπολογισμός της δαπάνης άρδευσης. Αντίθετα, τα μη γραμμικά κόστη στα τυπικά υποδείγματα ΘΜΠ αποτελούν συνάρτηση του διανύσματος των δραστηριοτήτων,  $x$ , με αποτέλεσμα να μην προσδιορίζεται η τεχνολογία παραγωγής.

Η μέθοδος ρύθμισης που προτείνεται στην παρούσα διατριβή επιλύει επίσης ένα από τα σημαντικότερα μειονεκτήματα του ΘΜΠ που είναι η αδυναμία του τελευταίου να λάβει υπόψη δραστηριότητες που δεν εμφανίζονται στο σχέδιο παραγωγής κατά το έτος βάσης. Αυτό γίνεται εφικτό θεωρώντας πως το επίπεδο παραγωγής (εκτάσεις) των μη παρατηρούμενων δραστηριοτήτων δεν είναι μηδέν, αλλά αρκούντως μικρό ώστε πρακτικά να θεωρείται μηδενικό (0.000001 στρ). Η χρήση μιας μη γραμμικής αντικειμενικής συνάρτησης, ήδη από την πρώτη φάση της προτεινόμενης μεθόδου, εξασφαλίζει πως η διαδικασία εκτίμησης των αγνώστων παραμέτρων στο υπόδειγμα της μέ-

γιστης εντροπίας δεν θα αντιμετωπίσει προβλήματα αριθμητικής ασυμβατότητας, όπως θα συνέβαινε αν η ίδια μέθοδος εφαρμοζόταν σε ένα τυπικό υπόδειγμα ΘΜΠ.

Παρά τα παραπάνω πλεονεκτήματα, το υπόδειγμα διατηρεί ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των κλασικών υποδειγμάτων ΘΜΠ, το οποίο αποτελεί την κύρια αιτία για την κριτική που δέχεται η συγκεκριμένη μέθοδος ρύθμισης. Συγκεκριμένα, η εκτίμηση των αγνώστων παραμέτρων στηρίζεται σε ένα υποπροσδιορισμένο σύστημα εξισώσεων (οι άγνωστοι είναι περισσότεροι από τις εξισώσεις), κάτι που σημαίνει πως αυτό μπορεί να έχει άπειρες λύσεις. Η χρήση του κριτηρίου της μέγιστης εντροπίας αμβλύνει το πρόβλημα, ωστόσο προσθέτει σημαντικό ποσό μεροληψίας στην τελική λύση γιατί οι υποστηρικτικές τιμές που επιλέγονται από τον αναλυτή είναι συνήθως αυθαίρετες. Για παράδειγμα, οι Paris και Howitt (1998), στην εργασία με την οποία εισήγαγαν το κριτήριο της μέγιστης εντροπίας στα πλαίσια του ΘΜΠ, επέλεξαν δυο διαφορετικά σύνολα υποστηρικτικών τιμών για τα στοιχεία των πινάκων **D** και **L**, από το γινόμενο των οποίων προκύπτει ο πίνακας **Q**. Ειδικότερα, όλες οι τιμές που επιλέχθηκαν για τον **D** ήταν μη αρνητικές, προκειμένου να εξασφαλιστεί η κυρτότητα της συνάρτησης κόστους, αλλά οι τιμές για τον **L** επικεντρώθηκαν γύρω από το μηδέν. Η παραπάνω επιλογή δεν αιτιολογείται, πέρα από την απαίτηση για εξασφάλιση μιας εφικτής λύσης.

Η προτεινόμενη μέθοδος ρύθμισης καταφέρνει να περιορίσει το πρόβλημα της μεροληψίας – χωρίς ωστόσο να το εξαφανίζει – αφού οι υποστηρικτικές τιμές ορίζονται σε σχέση με υπάρχουσες παραμέτρους της εκμετάλλευσης και άρα εντός ρεαλιστικών και μη αυθαίρετων ορίων με πραγματική οικονομική ή αγρονομική σημασία. Για παράδειγμα, τα άγνωστα στοιχεία του «πραγματικού» πίνακα συνδιακύμανσης της εκμετάλλευσης (τιμές και αποδόσεις καλλιεργειών) μπορούν να προκύψουν από υπάρχουσες χρονοσειρές δεδομένων. Ιδιαίτερα όμως για τις αποδόσεις, η χρήση του δυναμικού παραγωγής ως υποστηρικτικό σημείο για την εκτίμηση των «πραγματικών» αποδόσεων κάθε εκμετάλλευσης ενισχύει τη διεπιστημονική προσέγγιση η οποία αποτελεί κύριο στόχο της παρούσας διατριβής.

Περνώντας στο βιο-φυσικό υπόδειγμα που κατασκευάστηκε για τις ανάγκες της παρούσας διατριβής, η δομή του είναι ευέλικτη και συνεπώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση συναρτήσεων απόδοσης-νερού ανεξάρτητα από την περιοχή προέλευσης των χωρικών δεδομένων. Έτσι, αν και η μελέτη περίπτωσης βασίστηκε σε συναρτήσεις που προέκυψαν από εδαφοκλιματικά δεδομένα που προσέγγιζαν όσο το δυνατόν περισσότερο τα πραγματικά της Θεσσαλίας (εδαφολογικές συναρτήσεις για εδάφη της περιοχής και πολυετή μετεωρολογικά δεδομένα από το σταθμό της Λάρισας), η ίδια διαδικασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για οποιαδήποτε περιοχή της Ελλάδας εφόσον είναι διαθέσιμα τα απαραίτητα στοιχεία.

Η διαθεσιμότητα αυτή είναι δεδομένη για τις απαιτούμενες κλιματικές παραμέτρους του υποδείγματος (θερμοκρασία, υγρασία, ταχύτητα ανέμου και νέφωση), καθώς ανάλογα στοιχεία από μεγάλο αριθμό μετεωρολογικών σταθμών είναι διαθέσιμα στο διαδίκτυο. Αντίθετα, κάτι ανάλογο δεν ισχύει για τις βιολογικές και εδαφικές παραμέτρους του υποδείγματος. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν όλες εκείνες οι παράμετροι που σχετίζονται με τον υπολογισμό της μέγιστης απόδοσης της καλλιέργειας, δηλαδή του δυναμικού παραγωγής, καθώς και το μέγιστο μήκος του ριζοστρώματος το οποίο επηρεάζει σημαντικά την αντοχή του φυτού στην υδατική καταπόνηση. Πληροφορίες για τις παραμέτρους αυτές μπορούν να αναζητηθούν στη σχετική βιβλιογραφία, χωρίς, ωστόσο, να είναι εύκολος ο αριθμητικός προσδιορισμός της τιμής τους. Η κατάσταση είναι ακόμη πιο συγκεχυμένη για τις εδαφικές παραμέτρους του υποδείγματος, λόγω της σημαντικής χωρικής ετερογένειας που τις χαρακτηρίζει. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε η πραγματοποίηση μιας άσκησης προσομοίωσης που επέτρεψε την εκτίμηση συναρτήσεων που αντιστοιχούν σε δυο γενικές κατηγορίες εδαφών της περιοχής, για τα οποία είναι γνωστό το εύρος τιμών των ζητούμενων παραμέτρων.

Αν και η προτεινόμενη μέθοδος κατασκευής ενός βιο-φυσικού υποδείγματος στηρίζεται σε θεμελιωμένες αρχές βιολογίας, μετεωρολογίας και φυσιολογίας φυτών, δεν παύει να αποτελεί μια απλοποίηση ενός ιδιαίτερα πολύπλοκου φυσικού συστήματος. Στα πλαίσια αυτά, ένας σημαντικός περιορισμός της μεθόδου αποτελεί η υπόθεση πως, πέρα από την εδαφική υγρασία, δεν υπάρχει άλλος παράγοντας που να επιδρά αρνητικά στην παραγωγικότητα των καλλιεργειών. Αυτό σημαίνει πως σημαντικά χαρακτηριστικά, κυρίως του εδάφους, δεν λαμβάνονται υπόψη. Τυπικό παράδειγμα αποτελεί η οργανική ουσία, η οποία αυξάνει τη δυνατότητα συγκράτησης νερού και ιόντων του εδάφους και συνεπώς επηρεάζει το ημερήσιο υδατικό ισοζύγιο. Άλλο παράδειγμα είναι η αδυναμία ποσοτικοποίησης της σχέσης μεταξύ νερού, αζώτου (ή άλλων θρεπτικών μακροστοιχείων) και αποδόσεων, γεγονός που θα επέτρεπε μια πιο ολοκληρωμένη προσομοίωση του συστήματος έδαφος-φυτό. Τέλος, μια ακόμα παραδοχή είναι η ομογένεια του εδάφους σε όλο το βάθος του ριζοστρώματος μιας καλλιέργειας.

Να σημειωθεί, ωστόσο, πως τα περισσότερα βιο-φυσικά υποδείγματα που συναντά κανείς στη βιβλιογραφία λαμβάνουν υπόψη, σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό, όλα τα προαναφερθέντα προβλήματα. Στα υποδείγματα αυτά, η μέθοδος του εγγράφου FAO-56 δεν αποτελεί παρά ένα υποσύνολο ενός ευρύτερου συνόλου εξισώσεων και αλγορίθμων που σαν στόχο έχουν τη ρεαλιστική προσομοίωση της διαδικασίας ανάπτυξης των καλλιεργειών. Για το λόγο αυτό εξάλλου, όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 1.6, τα υποδείγματα αυτά είναι αδιαφανή για όλους όσοι προέρχονται από επιστημονικά πεδία εκτός της γεωπονίας και συνεπώς απαιτούν προσαρμογή για να καλύψουν διαφορετικές ερευνητικές απαιτήσεις. Η παραπάνω συζήτηση αποκαλύπτει πως το βιο-φυσικό

υπόδειγμα που αναπτύχθηκε στην παρούσα διατριβή δεν έχει τις φιλοδοξίες των αναλυτικότερων υποδειγμάτων που συναντώνται στη βιβλιογραφία και τα οποία συχνά χρησιμοποιούνται για πειραματικούς σκοπούς στο επίπεδο του αγρού. Ακόμα και αυτά όμως δεν αποτελούν παρά απλοποιήσεις μιας ιδιαίτερα πολύπλοκης πραγματικότητας. Συνεπώς πρέπει να χρησιμοποιούνται ως εργαλεία κατανόησης της πραγματικότητας αυτής και όχι για την πλήρη προσομοίωση της, και πάντα μέσα στα όρια που προκύπτουν από τους περιορισμούς και τους λόγους που οδήγησαν στην κατασκευή τους (Brisson *et al.*, 2003).

Συνοψίζοντας, η προτεινόμενη μέθοδος καλύπτει τις ανάγκες του βιο-οικονομικού υποδείγματος που αναπτύσσεται στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, καθώς ο στόχος της περιορίζεται στην εκτίμηση συναρτήσεων απόδοσης-νερού, προκειμένου να αποδοθούν ποσοτικά οι αντίστοιχες προσδοκίες των παραγωγών και να τροφοδοτηθούν οικονομικά υποδείγματα ανάλυσης πολιτικής. Αυτό σημαίνει πως οι προκύπτουσες συναρτήσεις, αν και επιζητείται η ακρίβεια, δεν έχουν ως στόχο την τέλεια αναπαράσταση της σχέσης μεταξύ νερού και τελικών αποδόσεων, καθώς ο παραγωγός με τη σειρά του δεν έχει τέλεια γνώση όλων των βιο-φυσικών και εδαφοκλιματικών παραγόντων που καθορίζουν την παραγωγικότητα των καλλιεργειών του.

Τέλος, ένα σημαντικό πρόβλημα που διαπιστώθηκε κατά την εκπόνηση της διατριβής και συγκεκριμένα κατά την επίλυση τόσο του βιο-φυσικού, όσο και του τελικού βιο-οικονομικού υποδείγματος, είναι η πολυπλοκότητα των υπολογισμών που συνεπάγεται αυξημένες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ. Για το βιο-φυσικό υπόδειγμα, αυτό σχετίζεται κυρίως με τον μεγάλο αριθμό παραμέτρων και το γεγονός πως τα υδατικά ισοζύγια υπολογίζονται ημερησίως σε κάθε καλλιέργεια και για μεγάλο αριθμό ετών. Μια λύση είναι ο υπολογισμός των ισοζυγίων σε μηνιαία ή ακόμα και σε ετήσια βάση, εις βάρος όμως της αναλυτικότητας και της ακρίβειας των υπολογισμών, αφού πολλές από τις παραμέτρους ορίζονται συνήθως σε επίπεδο ημέρας (π.χ. *TAW*, *RAW*, *Ks*). Προφανώς η τελική επιλογή εξαρτάται από τον επιθυμητό βαθμό λεπτομέρειας, που με τη σειρά του εξαρτάται από τη μορφή του υπερκείμενου οικονομικού υποδείγματος. Για παράδειγμα, σε ένα υπόδειγμα που στηρίζεται σε μια αντιπροσωπευτική «μέση» εκμετάλλευση πιθανώς να επαρκεί ο μηνιαίος υπολογισμός των υδατικών ισοζυγίων.

Το τελικό βιο-οικονομικό υπόδειγμα επίσης εμφανίζει υπολογιστικές δυσκολίες στην επίλυση του, λόγω του μεγάλου αριθμού μη γραμμικών σχέσεων μεταξύ των μεταβλητών του. Μια εναλλακτική πρόταση για την απλοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης του υποδείγματος είναι η χρήση των συναρτήσεων απόδοσης για την εξειδίκευση ενός υποσυνόλου δραστηριοτήτων για κάθε καλλιέργεια, το οποίο θα περιλαμβάνει διαφορετικά επίπεδα χρήσης νερού, τελικής απόδοσης και μεταβλητών δαπανών. Έτσι, η

βέλτιστη χρήση νερού άρδευσης θα λαμβάνεται έμμεσα υπόψη από το υπόδειγμα, καθώς δεν θα συνιστά πλέον μεταβλητή απόφασης. Για παράδειγμα, η καλλιέργεια βαμβακιού θα μπορούσε να προτυποποιηθεί ως τέσσερις διαφορετικές δραστηριότητες, κάθε μία από τις οποίες θα αφορά σε διαφορετικά επίπεδα χρήσης νερού. Αν και μια τέτοια επιλογή συνεπάγεται σημαντική αύξηση του αριθμού των μεταβλητών απόφασης, θα οδηγήσει σε σαφώς μειωμένες υπολογιστικές απαιτήσεις, αφού οι μη γραμμικές σχέσεις στην αντικειμενική συνάρτηση θα περιορίζονται στον υπολογισμό της διακύμανσης του τελικού πλούτου.

Σε κάθε περίπτωση, και ανεξάρτητα από τον τρόπο εξειδίκευσης της αντικειμενικής συνάρτησης, η ενσωμάτωση στο υπόδειγμα πληροφοριών που σχετίζονται με άλλες εισροές, όπως το άζωτο κρίνεται αναγκαία προκειμένου η εκτίμηση των επιπτώσεων οποιουδήποτε σεναρίου πολιτικής να αποκτήσει μια επιπλέον περιβαλλοντική διάσταση, εκτός της εξοικονόμησης νερού η οποία αναλύθηκε ως παράδειγμα στην παρούσα διατριβή.

Με όλες τις εγγενείς αδυναμίες και πιθανές παραλείψεις, η παρούσα εργασία συμβάλλει στην πληρέστερη κατανόηση των χαρακτηριστικών των συστημάτων αροτραίων καλλιεργειών και προσφέρει το αναγκαίο θεωρητικό υπόβαθρο για την ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου συστήματος λήψης αποφάσεων που θα επιτρέπει την εκτίμηση των επιπτώσεων από αλλαγές στο υφιστάμενο πλαίσιο γεωργικής ή/και περιβαλλοντικής πολιτικής, σε γεωγραφικό επίπεδο ανώτερο από το τοπικό, στο οποίο περιορίστηκε η περίπτωση μελέτης της διατριβής. Η εφικτότητα ενός τέτοιου εγχειρήματος εξαρτάται προφανώς από τη διαθεσιμότητα τεχνικοοικονομικών δεδομένων εκμεταλλεύσεων, απαίτηση που μπορεί να καλυφθεί από αντίστοιχες βάσεις δεδομένων σε εθνικό ή Ευρωπαϊκό επίπεδο, όπως το ΔΙΓΕΛΠ. Τέλος, η βιο-οικονομική προσέγγιση που αναλύεται στην παρούσα διατριβή μπορεί να συνδυαστεί με υποδείγματα δραστηριοτήτων κτηνοτροφικών εκμεταλλεύσεων, επιλογή η οποία θα επιτρέψει τη λεπτομερέστερη προτυποποίηση των οικονομικών αποφάσεων των παραγωγών και την ενσωμάτωση σε οποιαδήποτε επιχειρούμενη ανάλυση πολιτικής των αλληλεπιδράσεων που παρατηρούνται μεταξύ του γεωργικού και του κτηνοτροφικού τομέα.

# Βιβλιογραφία

---

## Ξένη

1. Allais, M. (1954). Le Comportement de l'Homme Rationnel Devant le Risque, Critique des Postulats et Axiomes de l'Ecole Américaine. *Econometrica* 21: 503-546.
2. Allen, R. (2005). Penman-Monteith Equation. In: Daniel, H. (Ed.), *Encyclopedia of Soils in the Environment* (Vol. 3, pp. 180-188). Elsevier, Oxford.
3. Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. FAO, Rome.
4. Allen, R. G., Smith, M., Perrier, A. & Pereira, L. S. (1994). An Update for the Definition of Reference Evapotranspiration. *Bulletin of the International Commission on Irrigation and Drainage* 43(2): 1-34.
5. Amador, F., Sumpsi, J. M. & Romero, C. (1998). A non-interactive methodology to assess farmers' utility functions: An application to large farms in Andalusia, Spain. *European Review of Agricultural Economics* 25(1): 92-102.
6. Antle, J. M. & Capalbo, S. M. (2001). Econometric-Process Models for Integrated Assessment of Agricultural Production Systems. *American Journal of Agricultural Economics* 83(2): 389-401.
7. Arfini, F. (2001). Mathematical Programming Models Employed in the Analysis of the Common Agricultural Policy. Working Paper No. 9. Osservatorio Sulle Politiche Agricole dell' UE, Italian National Institute of Agricultural Economics, Italy. Available from <http://purl.umn.edu/14803>.
8. Arfini, F., Brasili, C., Fanfani, R., Mazzocchi, M., Montresor, E. & Paris, Q. (2001). Tools for evaluating EU agricultural policies: An integrated approach. *Statistical Methods & Applications* 10: 191-210.
9. Arfini, F. & Paris, Q. (1995). A positive mathematical programming model for regional analysis of agricultural policies. Paper presented at the conference "The Regional Dimension in Agricultural Economics and Policies". June 26-28, Ancona, Italy.
10. Bailey, A., Balcombe, K., Thirtle, C. & Jenkins, L. (2004). ME Estimation of Input and Output Biases of Technical and Policy Change in UK Agriculture, 1953 to 2000. *Journal of Agricultural Economics* 55(2): 385-400.
11. Barbier, B. & Bergeron, G. (1999). Impact of policy interventions on land management in Honduras: results of a bioeconomic model. *Agricultural Systems* 60(1): 1-16.
12. Bartolini, F., Bazzani, G. M., Gallerani, V., Raggi, M. & Viaggi, D. (2007). The impact of water and agriculture policy scenarios on irrigated farming

- systems in Italy: An analysis based on farm level multi-attribute linear programming models. *Agricultural Systems* 93(1-3): 90-114.
13. Bauer, S. & Kasnakoglou, H. (1990). Non-linear programming models for sector and policy analysis. *Economic Modelling* 7(3): 275-290.
  14. Baumol, W. J. (1963). An Expected Gain-Confidence Limit Criterion for Portfolio Selection. *Management Science* 10(1): 174-182.
  15. Belhouchette, H., Louhichi, K., Therond, O., Mouratiadou, I., Wery, J., Van Ittersum, M. & Flichman, G. (2011). Assessing the impact of the Nitrate Directive on farming systems using a bio-economic modelling chain. *Agricultural Systems* 104(2): 135-145.
  16. Berck, P. & Helfand, G. (1990). Reconciling the von Liebig and Differentiable Crop Production Functions. *American Journal of Agricultural Economics* 72(4): 985-996.
  17. Bernoulli, D. (1738). Specimen Theoriae Novae de Mensura Sortis [Papers of the Imperial Academy of Sciences in Petersburg, Vol. V, pp. 175-192] Trans. by Sommer, L. (1954). Exposition of a New Theory on the Measurement of Risk. *Econometrica* 22(1): 23-36.
  18. Binmore, K. (2009). *Rational Decisions*. Princeton University Press, New Jersey.
  19. Blaney, H. F. & Criddle, W. D. (1962). Determining consumptive use and irrigation water requirements. USDA Technical Bulletin No. 1275, Washington.
  20. Blank, S. C. (2001). Producers get squeezed up the farming food chain: A theory on crop portfolio composition and land use. *Review of Agricultural Economics* 23(2): 404-422.
  21. Borch, K. (1969). A Note on Uncertainty and Indifference Curves. *The Review of Economic Studies* 36(1): 1-4.
  22. Bos, M. G., Kselik, R. A. L., Allen, R. G. & Molden, D. J (2009). *Water Requirements for Irrigation and the Environment*. Springer, New York.
  23. Bos, M. G. & Nugteren, J. (1974). *On irrigation efficiencies*. International Institute for Land reclamation and Improvement, Wageningen, The Netherlands.
  24. Bouman, B. A. M., van Keulen, H., van Laar, H. H. & Rabbinge, R. (1996). The 'School of de Wit' crop growth simulation models: A pedigree and historical overview. *Agricultural Systems* 52(2-3): 171-198.
  25. Brink, L. & McCarl, B. (1978). The Tradeoff Between Expected Return and Risk About Corn-Belt Farmers. *American Journal of Agricultural Economics* 60(2): 259-263.
  26. Brisson, N., Gary, C., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, Z., Bertuzzi, P., Burger, P., Bussi re, F., Cabidoche, Y. M., Cellier, P., Debaeke, P., Gaudill re, J. P., H nault, C., Maraux, F., Seguin, B. & Sinoquet, H. (2003). An overview of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy* 18: 309-332.



27. Brooke, A., Kendrick, D., Meeraus, A. & Raman, R. (1998). GAMS: A User's Guide. GAMS Development Co.
28. Brunt, D. (1952). *Physical and Dynamical Meteorology* (2ed.). University Press, Cambridge.
29. Burman, R. D., Jensen, M. E. & Allen, R. G. (1987). Thermodynamic factors in evapotranspiration. In James, L. G. & English, M. G. (Eds.). *Proceedings of the Irrigation and Drainage Specialists Conference*, Portland, Ore, ASCE: 28-30.
30. Burton, M. A (2010). *Irrigation Management: Principles and Practices*. CABI, Wallingford, UK.
31. Buysse, J., Van Huylenbroeck, G. & Lauwers, L. (2007). Normative, positive and econometric mathematical programming as tools for incorporation of multifunctionality in agricultural policy modelling. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 120(1): 70-81.
32. Castellazzi, M. S., Wood, G. A., Burgess, P. J., Morris, J., Conrad, K. F. & Perry, J. N. (2008). A systematic representation of crop rotations. *Agricultural Systems* 97(1-2): 26-33.
33. Chambers, R. G. (1988). *Applied Production Analysis: A Dual Approach*. Cambridge University Press, New York.
34. Chavas, J. P. (2004). *Risk Analysis in Theory and Practice*. Elsevier Academic Press, London.
35. Chavas, J. P. & Holt, M. T. (1990). Acreage Decisions under Risk: The Case of Corn and Soybeans. *American Journal of Agricultural Economics* 72(3): 529-538.
36. Cocks, K. D. (1968). Discrete Stochastic Programming. *Management Science* 15(1): 72-79.
37. Coelli, T., Rao, D. S. P., O'Donnell, C. J. & Battese, G. E. (2005). *An Introduction to Efficiency and Productivity Analysis* (2ed.). Springer, New York.
38. Cortignani, R. & Severini, S. (2009). Modeling farm-level adoption of deficit irrigation using Positive Mathematical Programming. *Agricultural Water Management* 96(12): 1785-1791.
39. Danalatos, N. (1993). Quantified analysis for selected land-use systems in the Larissa region, Greece. PhD Thesis, Agricultural University of Wageningen, Wageningen.
40. Danalatos, N. G., Kosmas, C. S., Driessen, P. M. & Yassoglou, N. (1994). Estimation of the draining soil moisture characteristic from standard data as recorded in routine soil surveys. *Geoderma* 64(1-2): 155-165.
41. Day, R. H. (1963). On Aggregating Linear Programming Models of Production. *Journal of Farm Economics* 45(4): 797-813.
42. De Cara, S., Houzé, M. & Jayet, P. A. (2005). Methane and Nitrous Oxide Emissions from Agriculture in the EU: A Spatial Assessment of Sources and Abatement Costs. *Environmental and Resource Economics* 32: 551-583.

43. De Cara, S. & Jayet, P. A. (2000). Emissions of greenhouse gases from agriculture: the heterogeneity of abatement costs in France. *European Review of Agricultural Economics* 27(3): 281-303.
44. De Wit, C. T. (1965). *Photosynthesis of leaf canopies*. Agricultural research reports No. 663. Centre for Agricultural Publications and Documentation, Wageningen.
45. Doorenbos, J & Pruitt, W. O. (1977). *Guidelines for predicting crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 24. FAO, Rome.
46. Doorenbos, J. & Kassam, A.H. (1979). *Yield Response to Water*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33. FAO, Rome.
47. Dorward, A. & Parton, K. (1997). Quantitative Whole Farm Models and Embedded Risk in Complex, Diverse and Risk Prone Agriculture. *Quarterly Journal of International Agriculture* 36: 317-330.
48. Dorward, A. (1999). Modelling embedded risk in peasant agriculture: methodological insights from northern Malawi. *Agricultural Economics* 21(2): 191-203.
49. Driessen, P. M. (1986). The water balance of the soil. In: Van Keulen, H. & Wolf, J. (Eds.), *Modelling of Agricultural Production, Weather, Soils and Crops* (pp. 76-116). Pudoc, Wageningen.
50. Driessen, P. M. & Konijn, N. T. (1992). *Land-use systems analysis*. Wageningen Agricultural University, Department of Soil Science & Geology, Wageningen.
51. Droogers, P. & Allen, R. G. (2002). Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. *Irrigation and Drainage Systems* 16: 33-45.
52. Duffie, J. L. & Beckman, W. L. (1991). *Solar engineering and thermal processes* (2ed.). Wiley, New York.
53. Dunbabin, V. M., Diggle, A. J., Rengel, Z. & van Hugten, R. (2002). Modelling the interactions between water and nutrient uptake and root growth. *Plant and Soil* 239(1): 19-38.
54. Eeckhoudt, L., Gollier, C. & Schlesinger, H. (2005). *Economic and Financial Decisions under Risk*. Princeton University Press, New Jersey.
55. Ehlers, W. & Goss, M. (2003). *Water Dynamics in Plant Production*. CABI, Wallingford, UK.
56. European Commission (2003). Economics and the Environment - The Implementation Challenge of the Water Framework Directive. Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive (2000/60/EC). Guidance Document No. 1. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
57. FAO (1978). Report on the Agro-Ecological Zones Project. Vol. 1. Methodology and Results for Africa. FAO, Rome.

58. Feldstein, M. S. (1969). Mean-Variance Analysis in the Theory of Liquidity Preference and Portfolio Selection. *The Review of Economic Studies* 36(1): 5-12.
59. Freund, R. J. (1956). The Introduction of Risk into a Programming Model. *Econometrica* 24(3): 253-263.
60. Galko, E. & Jayet, P. A. (2011). Economic and environmental effects of decoupled agricultural support in the EU. *Agricultural Economics* 42: 605-618.
61. Garrido, A. & Calatrava, J. (2010). Agricultural Water Pricing: EU and Mexico. Sustainable Management of Water Resources in Agriculture. OECD Publishing, OECD. Available from <http://www.oecd.org/dataoecd/25/38/45015101.pdf>.
62. Godard, C., Roger-Estrade, J., Jayet, P. A., Brisson, N. & Le Bas, C. (2008). Use of available information at a European level to construct crop nitrogen response curves for the regions of the EU. *Agricultural Systems* 97(1-2): 68-82.
63. Goetz, R. U., Schmid, H. & Lehmann, B. (2006). Determining the economic gains from regulation at the extensive and intensive margins. *European Review of Agricultural Economics* 33(1): 1-30.
64. Gohin, A. & Chantreuil, F. (1999). La programmation mathématique positive dans les modèles d'exploitation agricole: Principes et importance du calibrage. *Cahiers d'Economie et Sociologie Rurales* 52: 59-78.
65. Golan, A., Judge, G. & Perloff, J. M. (1996a). A Maximum Entropy Approach to Recovering Information From Multinomial Response Data. *Journal of the American Statistical Association* 91(434): 841-853.
66. Golan, E., Judge, G. & Miller, D. (1996b). *Maximum Entropy Econometrics*. Wiley, Chichester, UK.
67. Gómez-Limón, J. A., Arriaza, M. & Berbel, J. (2002). Conflicting Implementation of Agricultural and Water Policies in Irrigated Areas in the EU. *Journal of Agricultural Economics* 53(2): 259-281.
68. Gómez-Limón, J. A., Arriaza, M. & Riesgo, L. (2003). An MCDM analysis of agricultural risk aversion. *European Journal of Operational Research* 151: 569-585.
69. Gómez-Limón, J. A. & Berbel, J. (2000). Multicriteria analysis of derived water demand functions: a Spanish case study. *Agricultural Systems* 63: 49-72.
70. Gómez-Limón, J. A. & Riesgo, L. (2004). Irrigation water pricing: differential impacts on irrigated farms. *Agricultural Economics* 31: 47-66.
71. Gómez-Limón, J. A., Riesgo, L. & Arriaza, M. (2004). Multi-Criteria Analysis of Input Use in Agriculture. *Journal of Agricultural Economics* 55(3): 541-564.

72. Goudriaan, J. & Van Laar, H. H. (1994). *Modelling Potential Crop Growth Processes. Textbook with exercises* (Current Issues in Production Ecology, Vol. 2). Kluwer, Dordrecht, the Netherlands.
73. Guyomard, H., Baudry, M. & Carpentier, A. (1996). Estimating crop supply response in the presence of farm programmes: application to the CAP. *European Review of Agricultural Economics* 23(4): 401-420.
74. Hanks, J. R. (1983). Yield and water-use relationships: An overview. In: Taylor, H. M., Jordan, W. R. & Sinclair, T. R. (Eds.), *Limitations to efficient water use in crop production* (pp. 393-411). American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin.
75. Hardaker, J. B., Huirne, J. R., Anderson, J. R. & Lien, G. (2004). *Copying with Risk in Agriculture*. CAB International, Wallingford, UK.
76. Hargreaves, G. H. (1994). Defining and using reference evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 120(6): 1132-1139.
77. Hargreaves, G. H. & Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Transactions of ASAE* 1(2): 96-99.
78. Hazell, P. B. R. & Norton, R. D. (1986). *Mathematical Programming for Economic Analysis in Agriculture*. Macmillan Co, New York.
79. Heckeley, T. (1997). Positive Mathematical Programming: Review of the standard approach. CAPRI Working Paper. University of Bonn.
80. Heckeley, T. (2002). Calibration and estimation of programming models for agricultural supply analysis. Habilitation Thesis, University of Bonn, Germany.
81. Heckeley, T. & Britz, W. (2000). Positive Mathematical Programming with Multiple Data Points: A Cross-Sectional Estimation Procedure. *Cahiers d' Economie et Sociologie Rurales* 57: 28-50.
82. Heckeley, T. & Wolff, H. (2003). Estimation of constrained optimisation models for agricultural supply analysis based on generalized maximum entropy. *European Review of Agricultural Economics* 30(1): 27-50.
83. Helfand, G. E. & House, B. W. (1995). Regulating Nonpoint Source Pollution under Heterogeneous Conditions. *American Journal of Agricultural Economics* 77(4): 1024-1032.
84. Helming, J. F. M., Peeters, L. & Veendendall, P. J. J. (2001). Assessing the consequences of environmental policy scenarios in Flemish agriculture. In Heckeley, T., Witzke, H. P. & Henrichsmeyer, W. (Eds.), *Agricultural Sector Modelling and Policy Information Systems*. Proceedings of the 65th EAAE Seminar, 29-31 March, Bonn University, Vauk Verlag Kiel: 237-245.
85. Hennessy, D. A. (1998). The production effects of agricultural income support policies under uncertainty. *American Journal of Agricultural Economics* 80(1): 46-57.
86. Hexem, R. W. & Heady, E. O. (1978). *Water Production Functions for Irrigated Agriculture*. Iowa State University Press, Ames, Iowa.

87. Hlawitschka, W. (1994). The Empirical Nature of Taylor-Series Approximation to Expected Utility. *The American Economic Review* 84(3): 713-719.
88. Howitt, R. E. (1995a). A Calibration Method for Agricultural Economic Production Models. *Journal of Agricultural Economics* 46(2): 147-159.
89. Howitt, R. E. (1995b). Positive Mathematical Programming. *American Journal of Agricultural Economics* 77(2): 329-342.
90. Iglesias, E. & Blanco, M. (2008). New directions in water resources management: The role of water pricing policies. *Water Resources Research* 44(6): W06417.
91. Jame, Y. W. & Cutforth, H. W. (1996). Crop growth models for decision support systems. *Canadian Journal of Plant Science* 76: 9-19.
92. Janssen, S. & Van Ittersum, M. K. (2007). Assessing farm innovations and responses to policies: A review of bio-economic farm models. *Agricultural Systems* 94(3): 622-636.
93. Jayet, P. A. & Petsakos, A. (2010). Evaluating the efficiency of a N-input tax under different policy scenarios at different scales. Paper presented at the 120th EAAE Seminar: "External Cost of Farming Activities: Economic Evaluation, Risk Considerations, Environmental Repercussions and Regulatory Framework". 2-4 September, Chania, Crete.
94. Jaynes, E. T. (1957). Information Theory and Statistical Mechanics. *Physics Review* 106: 620-630.
95. Jeder, H., Sghaier, M. & Louhichi, K. (2011). Impact of water pricing policy on the sustainability of the irrigated farming systems: a case study in the south-east of Tunisia. *New Medit* 10(1): 50-57.
96. Jensen, M. E. (1968). Water Consumption by Agricultural Plants. In: Kozlowski, T. T. (Ed.), *Plant Water Consumption and Response* (Water Deficits and Plant Growth, Vol. 2, pp. 1-22). Academic Press, New York.
97. Jensen, M. E., Burman, R. D. & Allen, R. G. (1990). *Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements*. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 70. American Society of Civil Engineers, New York.
98. Johnson, S. L., Adams, R. M. & Perry, G. M. (1991). The On-Farm Costs of Reducing Groundwater Pollution. *American Journal of Agricultural Economics* 73(4): 1063-1073.
99. Jones, C. A., Dyke, P. T., Williams, J. R., Kiniry, J. R., Benson, V. W. & Griggs, R. H. (1991). EPIC: An Operational Model for Evaluation of Agricultural Sustainability. *Agricultural Systems* 37: 341-350.
100. Júdez, L., de Miguel, J. M., Mas, J. & Bru, R. (2002). Modeling Crop Regional Production Using Positive Mathematical Programming. *Mathematical and Computer Modelling* 35: 77-86.
101. Just, D. R. & Peterson, H. H. (2010). Is Expected Utility Theory Applicable? A Revealed Preference Test. *American Journal of Agricultural Economics* 92(1): 16-27.

102. Kahneman, D. & Tversky, A. (1979). Prospect Theory: An Analysis of Decision Under Risk. *Econometrica* 47(2): 263-292.
103. Kampas, A., Petsakos, A. & Rozakis, S. (2010). Price induced water irrigation: Unraveling conflicts and synergies between European agricultural and water policies. Working Paper 2010-5. Agricultural University of Athens, Department of Agricultural Economics.
104. Kanellopoulos, A., Berentsen, P., Heckelei, T., Van Ittersum, M. & Oude Lansink, A. (2010). Assessing the Forecasting Performance of a Generic Bio-Economic Farm Model Calibrated With Two Different PMP Variants. *Journal of Agricultural Economics* 61(2): 274-294.
105. Kassam, A.H. (1977). Net biomass production and yield of crops. Present and Potential Land Use by Agro-ecological Zones Project. FAO, Rome.
106. Kaufmann, R. K. & Snell, S. E. (1997). A Biophysical Model of Corn Yield: Integrating Climatic and Social Determinants. *American Journal of Agricultural Economics* 79(1): 178-190.
107. Kemanian, A. R., Stöckle, C. O., Huggins, D. R. & Viega, L. M. (2007). A simple method to estimate harvest index in grain crops. *Field Crops Research* 103: 208-216.
108. Kroll, Y., Levy, H. & Markowitz, H. M. (1984). Mean-Variance Versus Direct Utility Maximization. *The Journal of Finance* 39(1): 47-61.
109. Kruseman, G. & Bade, J. (1998). Agrarian Policies for Sustainable Land Use: Bio-economic Modelling to Assess the Effectiveness of Policy Instruments. *Agricultural Systems* 58(3): 465-481.
110. Larson, D. M., Helfand, G. E. & House, B. W. (1996). Second-Best Tax Policies to Reduce Nonpoint Source Pollution. *American Journal of Agricultural Economics* 78(4): 1108-1117.
111. Latinopoulos, P. (2005). Valuation and Pricing of Irrigation Water: An analysis in Greek Agricultural Areas. *Global NEST Journal* 7(3): 323-335.
112. Lehtonen, H. (2001). Principles, structure and application of dynamic regional sector model of Finnish agriculture. PhD Thesis, Agrifood Research Finland, Economic Research (MTTL), Helsinki.
113. Lence, S. H. & Miller, D. J. (1998). Estimation of multi-output production functions with incomplete data: A generalised maximum entropy approach. *European Review of Agricultural Economics* 25(2): 188-209.
114. Levy, H. & Markowitz, H. M. (1979). Approximating Expected Utility by a Function of Mean and Variance. *The American Economic Review* 69(3): 308-317.
115. Llewelyn, R. V. & Featherstone, A. M. (1997). A Comparison of Crop Production Functions Using Simulated Data for Irrigated Corn in Western Kansas. *Agricultural Systems* 54(4): 521-538.
116. Loistl, O. (1976). The Erroneous Approximation of Expected Utility by Means of a Taylor's Series Expansion: Analytic and Computational Results. *The American Economic Review* 66(5): 904-910.

117. Louhichi, K., Kanellopoulos, A., Janssen, S., Flichman, G., Blanco, M., Hengsdijk, H., Heckeley, T., Berentsen, P., Oude Lansink, A. & Van Ittersum, M. . (2010). FSSIM, a bio-economic farm model for simulating the response of EU farming systems to agricultural and environmental policies. *Agricultural Systems* 103(8): 585-597.
118. Machina, M. J. (2004). Nonexpected Utility Theory. In: Teugels, J. L. & Sundt, B. (Eds.), *Encyclopedia Of Actuarial Science* (Vol. 2, pp. 1173-1179). Wiley, Chichester, UK.
119. Makkink, J. F. (1957). Testing the Penman formula by means of lysimeters. *Journal of the Institution of Water Engineers* 11(3): 277-288.
120. Manos, B., Bournaris, T., Kamruzzaman, M., Begum, M., Anjuman, A. & Papathanasiou, J. (2006). Regional Impact of Irrigation Water Pricing in Greece under Alternative Scenarios of European Policy: A Multicriteria Analysis. *Regional Studies* 40(9): 1055 - 1068.
121. Markowitz, H. M. (1952). Portfolio Selection. *The Journal of Finance* 7(1): 77-91.
122. Massarutto, A. (2003). Water pricing and irrigation water demand: economic efficiency versus environmental sustainability. *European Environment* 13(2): 100-119.
123. McCarl, B. A. & Spreen, T. H. (1980). Price Endogenous Mathematical Programming as a Tool for Sector Analysis. *American Journal of Agricultural Economics* 62(1): 87-102.
124. McCarl, B. A. & Spreen, T. H. (2004). Applied Mathematical Programming Using Algebraic Systems. Available from <http://agecon2.tamu.edu/people/faculty/mccarl-bruce/books.htm>
125. Mérel, P. & Bucaram, S. (2010). Exact calibration of programming models of agricultural supply against exogenous supply elasticities. *European Review of Agricultural Economics* 37(3): 395-418.
126. Meyer, J. (1987). Two-moment Decision Models and Expected Utility Maximization. *The American Economic Review* 77(3): 421-430.
127. Monteith, J. L. (1965). Evaporation and Environment. *Symposia of the Society of Experimental Biology* 19: 205-234.
128. Monteith, J. L. (1977). Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B* 281: 277-294.
129. Monteith, J. L. (1981). Evaporation and surface temperature. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 107(451): 1-27.
130. Musser, W. N., McCarl, B. A. & Smith, G. S. . (1989). An investigation of the relationship between constraint omission and risk aversion in firm risk programming models. *Southern Journal of Agricultural Economics* 18: 147-154.

131. Oude Lansink, A. (1999). Generalised maximum entropy estimation and heterogeneous technologies. *European Review of Agricultural Economics* 26(1): 101-115.
132. Pandey, S. & Hardaker, J. B. (1995). The role of modelling in the quest for sustainable farming systems. *Agricultural Systems* 47(4): 439-450.
133. Pannell, D. J., Malcolm, B. & Kingwell, R. (2000). Are we risking too much? Perspectives on risk in farm modelling. *Agricultural Economics* 23(1): 69-78.
134. Pannell, D.J. (1997). Sensitivity analysis of normative economic models: theoretical framework and practical strategies. *Agricultural Economics* 16(2): 139-152.
135. Paris, Q. (1979). Revenue and Cost Uncertainty, Generalized Mean-Variance, and the Linear Complementarity Problem. *American Journal of Agricultural Economics* 61(2): 268-275.
136. Paris, Q. (1991). *An Economic Interpretation of Linear Programming*. Iowa State University Press, Iowa.
137. Paris, Q. (1992). The von Liebig Hypothesis. *American Journal of Agricultural Economics* 74(4): 1019-1028.
138. Paris, Q. & Arfini, F. (2000). Frontier Cost Functions, Self-Selection, Price Risk, PMP and Agenda 2000. Working Paper Series No. 20. EUROTOOLS.
139. Paris, Q. & Caputo, M. R. (2001). Sensitivity of the GME Estimates to Support Bounds. Working Paper No. 01-008. Department of Agricultural Economics, University of California Davis.
140. Paris, Q. & Howitt, R. E. (1998). An Analysis of Ill-Posed Production Problems Using Maximum Entropy. *American Journal of Agricultural Economics* 80(1): 124-138.
141. Paris, Q. & Knapp, K. (1989). Estimation of von Liebig Response functions. *American Journal of Agricultural Economics* 71(1): 178-186.
142. Penman, H. L. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London A*193: 120-146.
143. Penman, H. L. (1963). Vegetation and Hydrology. Technical Communication No. 53. Commonwealth Bureau of Soils, Harpenden, England.
144. Pereira, L. S. & Allen, R. G. (1999). Crop water requirements. In: van Lier, H. N. (Ed.), *Land and Water Engineering* (CIGR Handbook of Agricultural Engineering, Vol. 1, pp. 213-261). American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, Michigan.
145. Perman, R., Ma, Y., McGilvray, J. & Common, M. (2003). *Natural Resource and Environmental Economics*. Pearson Education, Harlow, England.
146. Petsakos, A. & Rozakis, S. (2009). Critical review and state-of-the-art of PMP models: an application to Greek arable agriculture. In: Rezitis, A. (Ed.), *Research Topics in Agricultural and Applied Economics* (E-book, Vol. 1, pp. 36-61). Bentham Science Publishers.



147. Petsakos, A., Rozakis, S. & Tsiboukas, K. (2009). Risk optimal farm plans in the context of decoupled subsidy payments: the case of cotton production in Thessaly. *Journal of Farm Management* 13(7): 467-483.
148. Pratt, J. W. (1964). Risk Aversion in the Small and in the Large. *Econometrica* 32(1/2): 122-136.
149. Priestley, C. H. B. & Taylor, R. J. (1972). On the assessment of the surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review* 100: 81-92.
150. Pulley, L. B. (1983). Mean-Variance Approximations to Expected Logarithmic Utility. *Operations Research* 31(4): 685-696.
151. Rabin, M. (2000). Risk Aversion and Expected-Utility Theory: A Calibration Theorem. *Econometrica* 68(5): 1281-1292.
152. Rae, A. N. (1971a). An Empirical Application and Evaluation of Discrete Stochastic Programming in Farm Management. *American Journal of Agricultural Economics* 53(4): 625-638.
153. Rae, A. N. (1971b). Stochastic Programming, Utility, and Sequential Decision Problems in Farm Management. *American Journal of Agricultural Economics* 53(3): 448-460.
154. Ramirez, O. A., Misra, S. & Field, J. (2003). Crop-Yield Distributions Revisited. *American Journal of Agricultural Economics* 85(1): 108-120.
155. Rao, N. H., Sarma, P. B. S. & Chander, S. (1988). A Simple Dated Water-Production Function for Use in Irrigated Agriculture. *Agricultural Water Management* 13(1): 25-32.
156. Rardin, R. L. (2000). *Optimization in Operations Research*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
157. Rehman, T. & Romero, C. (1993). The Application of the MCDM Paradigm to the Management of Agricultural Systems: Some Basic Considerations. *Agricultural Systems* 41: 239-255.
158. Richards, L. A. & Weaver, L. R. (1944). Moisture retention by some irrigated soils as related to soil moisture tension. *Journal of Agricultural Research* 69: 215-235.
159. Rijtema, E. (1965). An analysis of actual evapotranspiration. Agricultural Research report No. 69. Centre for Agricultural Publications and Documentation, Wageningen.
160. Robison, L. J. & Barry, P. J. (1987). *The Competitive Firm's Response to Risk*. Macmillan Publishing Company, New York.
161. Roche, M. J. & McQuinn, K. (2004). Riskier product portfolio under decoupled payments. *European Review of Agricultural Economics* 31(2): 111-123.
162. Röhm, O & Dabbert, S. (2003). Integrating Agri-Environmental Programs into Regional Programming Models: An Extension of Positive Mathematical Programming. *American Journal of Agricultural Economics* 85(1): 254-265.

163. Romero, C. & Rehman, T. (2003). *Multiple Criteria Analysis for Agricultural Decisions* (2ed.). Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
164. Rozakis, S., Danalatos, N. & Tsiboukas, K. (2001). Crop Rotation in Thessaly: Bio-economic Modeling for Efficient Farm Management. *MEDIT* No. 4: 50-57.
165. Rozakis, S., Tsiboukas, K. & Korasidis, M. (2008). CAP Reform Impacts to Greek Cotton Farmers: A Mathematical Programming Approach. *Journal of Agricultural and Food Economics* 3(1-2): 85-106.
166. Ruben, R. , Moll, H. & Kuyvenhoven, A. (1998). Integrating Agricultural Research and Policy Analysis: Analytical Framework and Policy Applications for Bio-economic Modeling. *Agricultural Systems* 58(3): 331-349.
167. Rubinstein, M. (1976). The Strong Case for the Generalized Logarithmic Utility Function as the Premier Model of Financial Markets. *Journal of Finance* 31: 555-571.
168. Russelle, M. P., Wilhelm, W. W., Olson, R. A. & Power, J. F. (1984). Growth Analysis Based on Degree Days. *Crop Science* 24: 28-32.
169. Sandmo, A. (1971). On the Theory of the Competitive Firm Under Price Uncertainty. *The American Economic Review* 61(1): 65-73.
170. Schmid, E., Sinabell, F. & Hofreither, M. F. (2007). Phasing out of environmentally harmful subsidies: Consequences of the 2003 CAP reform. *Ecological Economics* 60(3): 596-604.
171. Sckokai, P. & Moro, D. (2006). Modeling the Reforms of the Common Agricultural Policy for Arable Crops under Uncertainty. *American Journal of Agricultural Economics* 88(1): 43-56.
172. Sckokai, P. & Moro, D. (2009). Modelling the impact of the CAP Single Farm Payment on farm investment and output. *European Review of Agricultural Economics* 36(3): 395-423.
173. Semaan, J., Flichman, G., Scardigno, A. & Steduto, P. (2007). Analysis of nitrate pollution control policies in the irrigated agriculture of Apulia Region (Southern Italy): A bio-economic modelling approach. *Agricultural Systems* 94(2): 357-367.
174. Shannon, C.E. (1948). A Mathematical Theory of Communication. *Bell system Technical Journal* 27(July and October): 379-423, 623-656.
175. Sharples, J. A. (1969). The Representative Farm Approach to Estimation of Supply Response. *American Journal of Agricultural Economics* 51(2): 353-361.
176. Silberberg, E. & Suen, W. (2001). *The Structure of Economics* (3rd ed.). McGraw-Hill, New York.
177. Sinclair, T. R. & Seligman, N. (2000). Criteria for publishing papers on crop modeling. *Field Crops Research* 68: 165-172.

178. Slabbers, P. J., Herrendorf, V. Sorbello & Stapper, M. (1979). Evaluation of simplified water-crop yield models. *Agricultural Water Management* 2(2): 95-129.
179. Sourie, J. C., Millet, G., Kervegant, E. & Bonnafous, P. (2001). Incidences de L'agenda 2000 Sur L'offre de Céréales, D'oléagineux et de Protéagineux: Applications du Modèle MAORIE. Etudes Economiques No. 38. INRA, Thiverval-Grignon, France.
180. Steduto, P. (2006). Biomass Water-Productivity. Comparing the Growth-Engines of Crop Models. WUEMED training course "Integrated approaches to improve drought tolerance in crops", June 5-10 2006. Faculty of Agriculture, Bologna. Available from <http://www.distagenomics.unibo.it/wuemed/>.
181. Steduto, P., Hsiao, T. C., Raes, D. & Fereres, E. (2009). AquaCrop - The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles. *Agronomy Journal* 101(3): 426-437.
182. Steduto, P., Raes, D., Hsiao, T. C., Fereres, E., Heng, L., Izzi, G. & Hoogeveen, J. (2008). AquaCrop: A new model for crop prediction under water deficit conditions. In: Lopez-Francos, A. (Ed.), *Drought management: Scientific and technological innovations* (Options Méditerranéennes, Series A, No. 80, pp. 285-292). CIHEAM-IAMZ, Zaragoza.
183. Stöckle, C. O., Donatelli, M. & Nelson, R. (2003). CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy* 18: 289-307.
184. Sumpsi, J. M., Amador, F. & Romero, C. (1996). On farmers' objectives: A multi-criteria approach. *European Journal of Operational Research* 96: 64-71.
185. Taylor, M. L., Adams, R. M. & Miller, S. F. (1992). Farm-Level Response to Agricultural Effluent Control Strategies: The Case of the Willamette Valley. *Journal of Agricultural and Resource Economics* 17(1): 173-185.
186. Teh, C. (2006). *Introduction to mathematical modeling of crop growth*. BrownWalker Press, Boca Raton, Florida.
187. Tetens, O. (1930). Uber einige meteorologische Begriffe. *Zeitschrift fur Geophysik* 6: 297-309.
188. Tobin, J. (1958). Liquidity Preference as Behavior Towards Risk. *The Review of Economic Studies* 25(2): 65-86.
189. Tobin, J. (1969). Comment on Borch and Feldstein. *The Review of Economic Studies* 36(1): 13-14.
190. Tores-Rojo, J. M. (2001). Risk management in the design of a feeding ration: a portfolio theory approach. *Agricultural Systems* 68(1): 1-20.
191. Tsiang, S. C. (1972). The Rationale of the Mean-Standard Deviation Analysis, Skewness Preference, and the Demand for Money. *The American Economic Review* 62(3): 354-371.

192. Tsur, Y. & Dinar, A. (1997). The Relative Efficiency and Implementation Costs of Alternative Methods for Pricing Irrigation Water. *World Bank Economic Review* 11(2): 243-262.
193. USDA (1991). Soil-Plant-Water Relationships (2ed.). National Engineering Handbook, Section 15 Irrigation, Chapter 1, USDA, Soil Conservation Service. Available from <http://www.info.usda.gov/>
194. USDA (2004). Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall. National Engineering Handbook, Part 630 Hydrology, Chapter 10, USDA, Natural Resources Conservation Service.
195. Van Dam, A. M., Leffelaar, P. A. & Rabbinge, R. (1997). Systems approaches and simulation in curricular programs: the Wageningen experience. *European Journal of Agricultural Education and Extension* 4(1): 39-48.
196. Van Ittersum, M. K., Ewert, F., Heckeley, T., Wery, J., Alkan Olsson, J., Andersen, E., Bezlepkina, I., Brouwer, F., Donatelli, M., Flichman, G., Olsson, L., Rizzoli, A. E., Van der Wal, T., Wien, J. E. & Wolf, J. (2008). Integrated assessment of agricultural systems - a component-based framework for the European Union (SEAMLESS). *Agricultural Systems* 96(1-3): 150-165.
197. Van Ittersum, M. K., Leffelaar, P. A., Van Keulen, H., Kropff, M. J., Bastiaans, L. & Goudriaan, J. (2003). On approaches and applications of the Wageningen crop models. *European Journal of Agronomy* 18: 201-234.
198. Van Wijk, W. R. & De Vries, D. A. (1963). Periodic temperature variations in a homogeneous soil. In: Van Wijk, W. R. (Ed.), *Physics of the Plant Environment* (pp. 102-143). North Holland, Amsterdam.
199. Varian, H. R. (1992). *Microeconomic Analysis* (3rd ed.). Norton, New York.
200. Von Neumann, J. & Morgenstern, O. (1947). *Theory of Games and Economic Behavior* (2nd ed.). Princeton University Press, Princeton.
201. Wallace, M. T. & Moss, J. E. (2002). Farmer Decision-Making with Conflicting Goals: A Recursive Strategic Programming Analysis. *Journal of Agricultural Economics* 53(1): 82-100.
202. Weersink, A., Jeffrey, S. & Pannell, D. J. (2004). Farm-Level Modeling for Bigger Issues. *Review of Agricultural Economics* 24(1): 123-140.
203. White, H. (1980). A Heteroscedasticity Consistent Covariance Matrix Estimator and a Direct Test of Heteroscedasticity. *Econometrica* 48(4): 817-838.
204. Wiens, T. B. (1976). Peasant Risk Aversion and Allocative Behavior: A Quadratic Programming Experiment. *American Journal of Agricultural Economics* 58(4): 629-635.
205. Wright, J. L. & Jensen, M. E. (1972). Peak Water Requirements of Crops in Southern Idaho. *Journal of the Irrigation and Drainage Division ASCE* 96(IR2): 193-201.
206. Zhang, X. & Fan, S. (2001). Estimating Crop-Specific Production Technologies in Chinese Agriculture: A Generalized Maximum Entropy Approach. *American Journal of Agricultural Economics* 83(2): 378-388.

## Ελληνική

1. Βαρουφάκης, Γ. (2007). *Θεωρία Παιγνίων*. Gutenberg, Αθήνα.
2. Γεωργίου, Π., Παπαμιχαήλ, Δ. & Παπαζαφειρίου, Ζ. (2000). Συγκριτική αξιολόγηση των μεθόδων Penman και Penman-Monteith με τη βοήθεια εκτιμήσεων εξατμισοδιαπνοής αναφοράς στην Ελλάδα. Εργασία που παρουσιάστηκε στο 5ο Πανελλήνιο Συνέδριο Μετεωρολογίας - Κλιματολογίας - Φυσικής της Ατμόσφαιρας, 28-30 Σεπτεμβρίου, Θεσσαλονίκη.
3. Δαμιανός, Δ., Παπαγεωργίου, Κ. & Σπαθής, Π. (2006). *Η Ελληνική Αγροτική Οικονομία στο Παγκόσμιο Πλαίσιο*. Σταμούλης, Αθήνα.
4. Καραμάνος, Α. Ι. (1989). Γενική Γεωργία. Μέρος Ι. *Το Εναέριο Περιβάλλον*. Γεωργικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα.
5. Κωτούλας, Β. Ε. (2010). Μελέτη των Επιδράσεων της Ελλειμματικής Άρδευσης σε Καλλιέργεια Βαμβακιού (*Gossypium hirsutum* L., cv. Celia). Διδακτορική διατριβή, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Επιστήμης της Φυτικής Παραγωγής, Εργαστήριο Γεωργίας, Αθήνα.
6. Μανέτας, Ι. (2003). Πρόσληψη και Μεταφορά νερού. Σε: Ρουμπελάκη-Αγγελάκη, Κ. Α. (Επιμ.), *Φυσιολογία φυτών. Από το μόριο στο περιβάλλον* (σελ. 41-98). Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, Ηράκλειο.
7. Παπαζαφειρίου, Ζ. Γ. (1998). *Αρχές και πρακτική των αρδεύσεων*. Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
8. Παπαζαφειρίου, Ζ. Γ. (1999). *Οι ανάγκες σε νερό των καλλιεργειών*. Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
9. Παπακώστα-Τασοπούλου, Δ. (2002). *Βιομηχανικά Φυτά. Ζαχαρότευτλα, Βαμβάκι, Καπνός*. Σύγχρονη Παιδεία, Θεσσαλονίκη.
10. Περιφέρεια Θεσσαλίας (2005). Τεχνικοοικονομικοί Δείκτες Κλάδων Φυτικής και Ζωικής Παραγωγής Έτους 2005. Περιφέρεια Θεσσαλίας, Διεύθυνση Αγροτικής Ανάπτυξης. Διαθέσιμο από <http://www.4489.syzefxis.gov.gr/dga.asp>.
11. Πουλοβασίλης, Α. (2010). *Εισαγωγή στις Αρδεύσεις*. Έμβρυο, Αθήνα.
12. Ράπτη, Χ., Ευαγγελίδης, Χ. & Αραμπατζής, Γ. (2009). Συγκριτική Αξιολόγηση Μεθόδων Υπολογισμού Εξατμισοδιαπνοής Αναφοράς. Εργασία που παρουσιάστηκε στο 6ο Πανελλήνιο Συνέδριο Εταιρείας Γεωργικών Μηχανικών Ελλάδος, 8-10 Οκτωβρίου, Θεσσαλονίκη.
13. Σοφιανός, Γ. Σ. & Τυχόπουλος, Ε. Θ. (2005). *Αριθμητική Ανάλυση*. Σταμούλης, Αθήνα.
14. ΥΠΑΑΤ (2010). Οδηγός Εφαρμογής για την Πολλαπλή Συμμόρφωση. Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων, Διεύθυνση Αγροτικής Πολιτικής και Τεκμηρίωσης, Αθήνα. Διαθέσιμο από [http://www.minagric.gr/greek/agro\\_pol/KAP/Kap.htm](http://www.minagric.gr/greek/agro_pol/KAP/Kap.htm).
15. Φλόκας, Α. Θ. (1997). *Μαθήματα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας*. Ζήτη, Θεσσαλονίκη.



# Παράρτημα Α': Συναρτήσεις απόδοσης

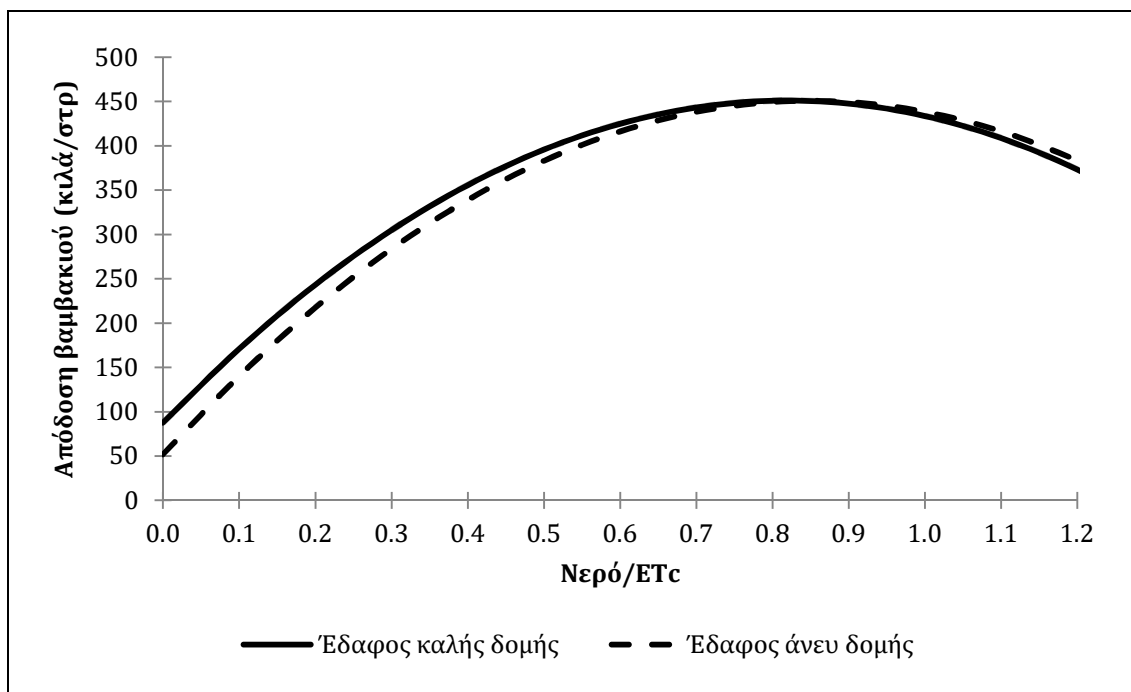
## Βαμβάκι

Πίνακας Α.1: Αποτελέσματα εκτίμησης συνάρτησης απόδοσης-νερού βαμβακιού σε εδάφη καλής δομής και άνευ δομής

	Καλής δομής	Άνευ δομής
$\hat{b}_0$	87.370 (26.637)**	51.716 (14.122)**
$\hat{b}_1$	886.406 (60.579)**	938.278 (59.051)**
$\hat{b}_2$	-540.362 (-37.527)**	-551.795 (-36.617)**
$R^2$	0.8984	0.8933
$N$	1271	1271

\* $p < 0.05$ ; \*\* $p < 0.01$

Σχήμα Α.1: Αποδόσεις βαμβακιού σε εδάφη καλής δομής και άνευ δομής



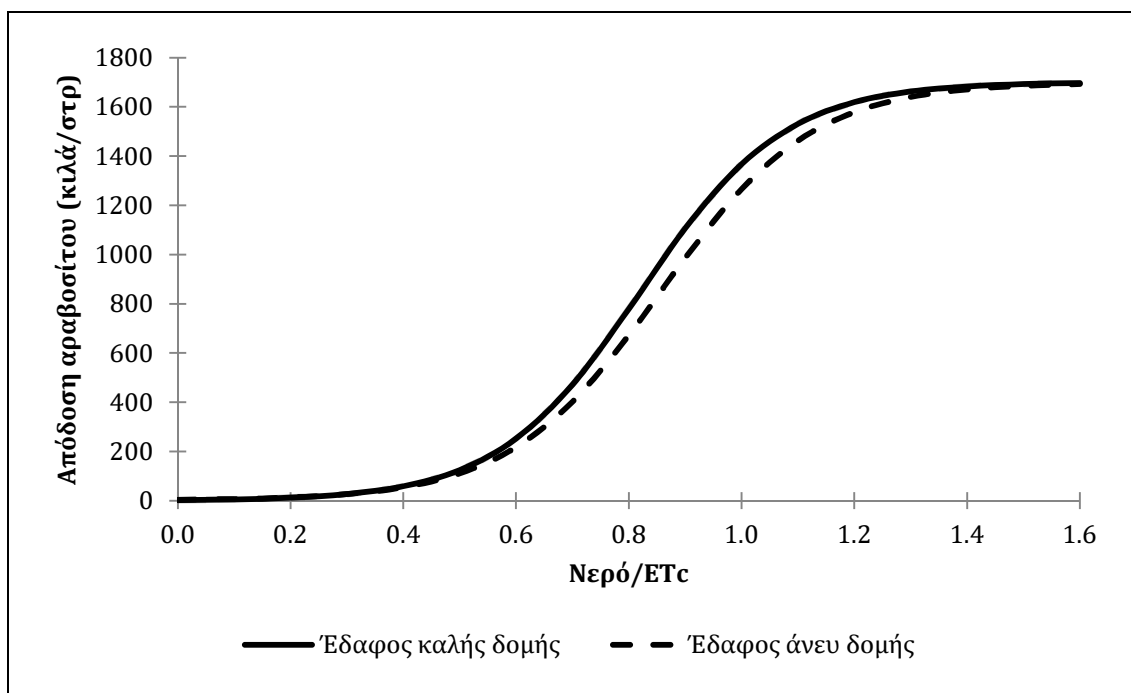
## Αραβόσιτος

Πίνακας Α.2: Αποτελέσματα εκτίμησης συνάρτησης απόδοσης-νερού αραβοσίτου σε εδάφη καλής δομής και άνευ δομής

	Καλής δομής	Άνευ δομής
$\hat{b}_0$	6.482 (63.571)**	6.409 (57.975)**
$\hat{b}_1$	-7.894 (-61.615)**	-7.481 (-57.224)**
$R^2$	0.828	0.814
$N$	1129	1152

\* $p < 0.05$ ; \*\* $p < 0.01$

Σχήμα Α.2: Αποδόσεις αραβοσίτου σε εδάφη καλής δομής και άνευ δομής





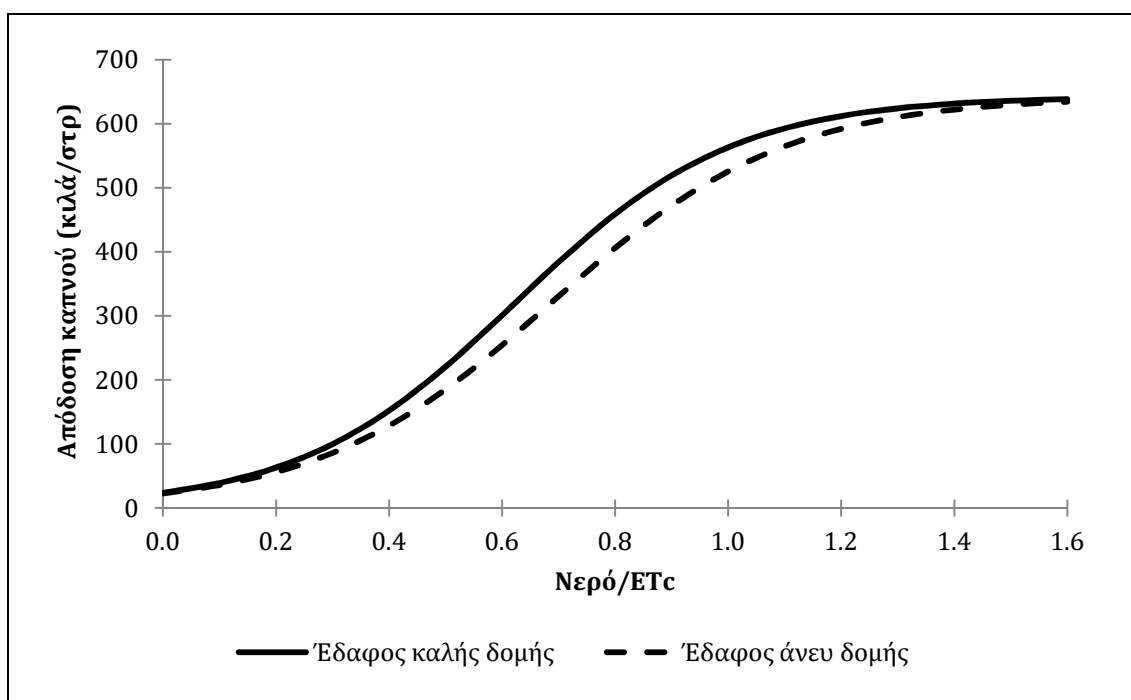
## Καπνός

Πίνακας Α.3: Αποτελέσματα εκτίμησης συνάρτησης απόδοσης-νερού καπνού σε εδάφη καλής δομής και άνευ δομής

	Καλής δομής	Άνευ δομής
$\hat{b}_0$	3.258 (55.038)**	3.314 (58.06)**
$\hat{b}_1$	-5.219 (-73.900)**	-4.818 (-77.592)**
$R^2$	0.876	0.888
$N$	1268	1268

\* $p < 0.05$ ; \*\* $p < 0.01$

Σχήμα Α.3: Αποδόσεις καπνού σε εδάφη καλής δομής και άνευ δομής



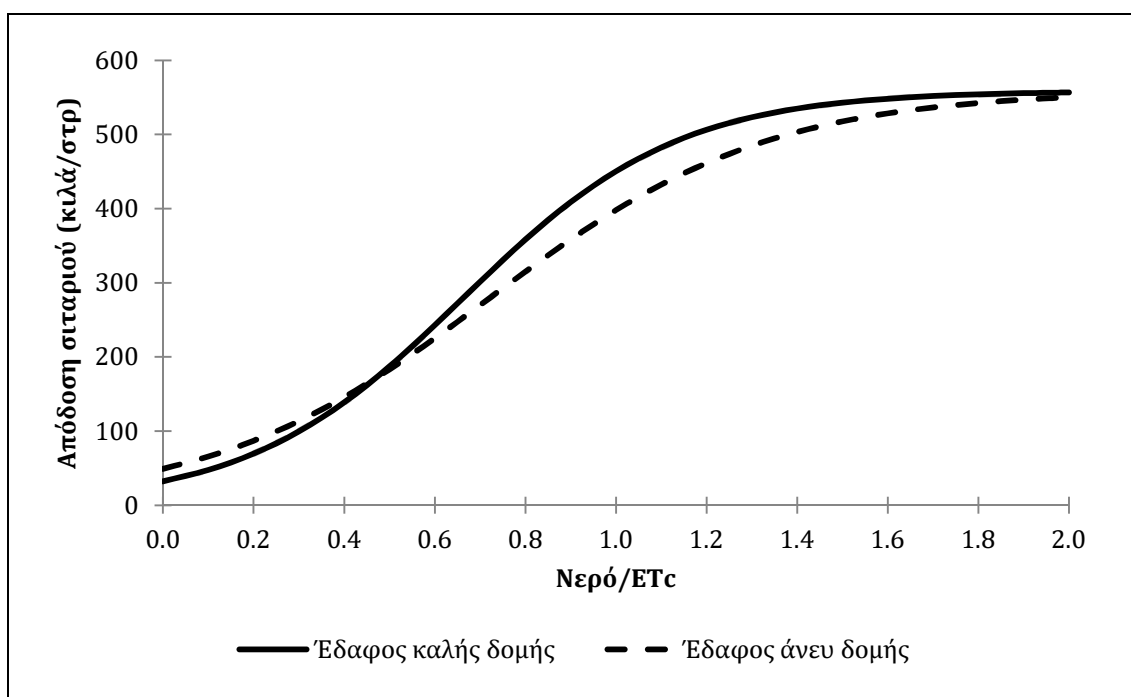
## Σιτάρι

Πίνακας Α.4: Αποτελέσματα εκτίμησης συνάρτησης απόδοσης-νερού σιταριού σε εδάφη καλής δομής και άνευ δομής

	Καλής δομής	Άνευ δομής
$\hat{b}_0$	2.799 (49.874)**	2.343 (45.096)**
$\hat{b}_1$	-5.808 (-52.002)**	-4.735 (-51.732)**
$\hat{b}_2$	1.584 (38.094)**	1.488 (38.609)**
$R^2$	0.827	0.815
$N$	1271	1271

\* $p < 0.05$ ; \*\* $p < 0.01$

Σχήμα Α.4: Αποδόσεις σιταριού σε εδάφη καλής δομής και άνευ δομής



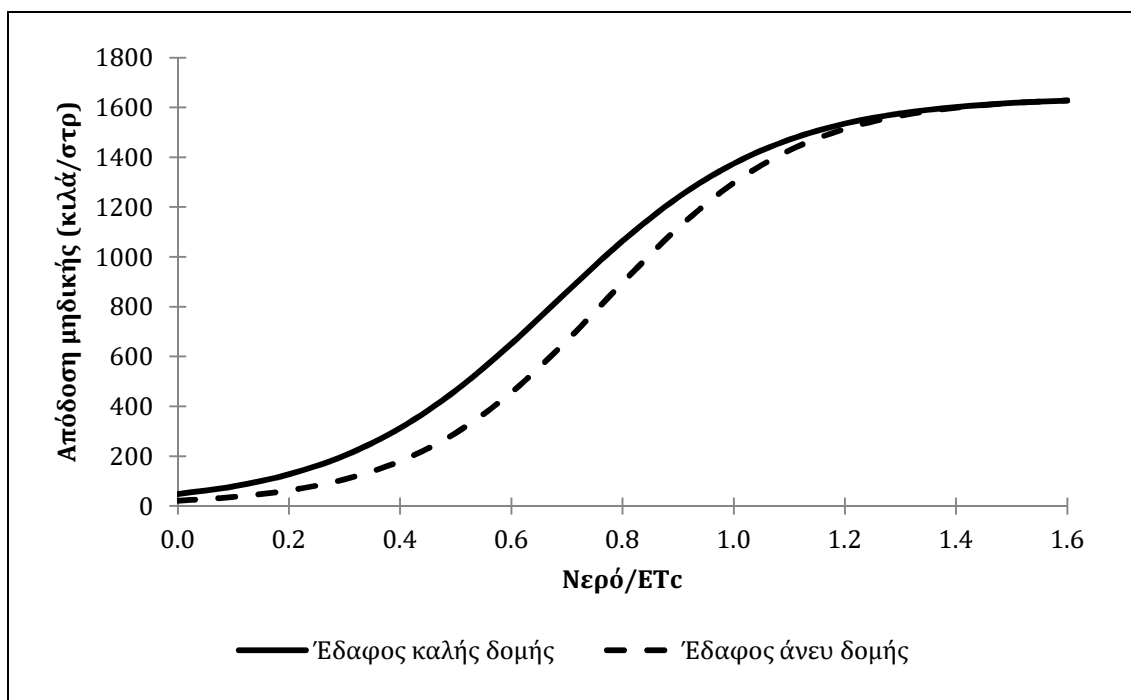
## Μηδική (συνολικά 5 κοπές)

Πίνακας Α.5: Αποτελέσματα εκτίμησης συνάρτησης απόδοσης-νερού μηδικής σε εδάφη καλής δομής και άνευ δομής

	Καλής δομής	Άνευ δομής
$\hat{b}_0$	3.500 (50.342)**	4.377 (68.640)**
$\hat{b}_1$	-5.139 (-69.006)**	-5.700 (-89.419)**
$R^2$	0.809	0.868
$N$	1271	1271

\* $p < 0.05$ ; \*\* $p < 0.01$

Σχήμα Α.5: Αποδόσεις μηδικής σε εδάφη καλής δομής και άνευ δομής



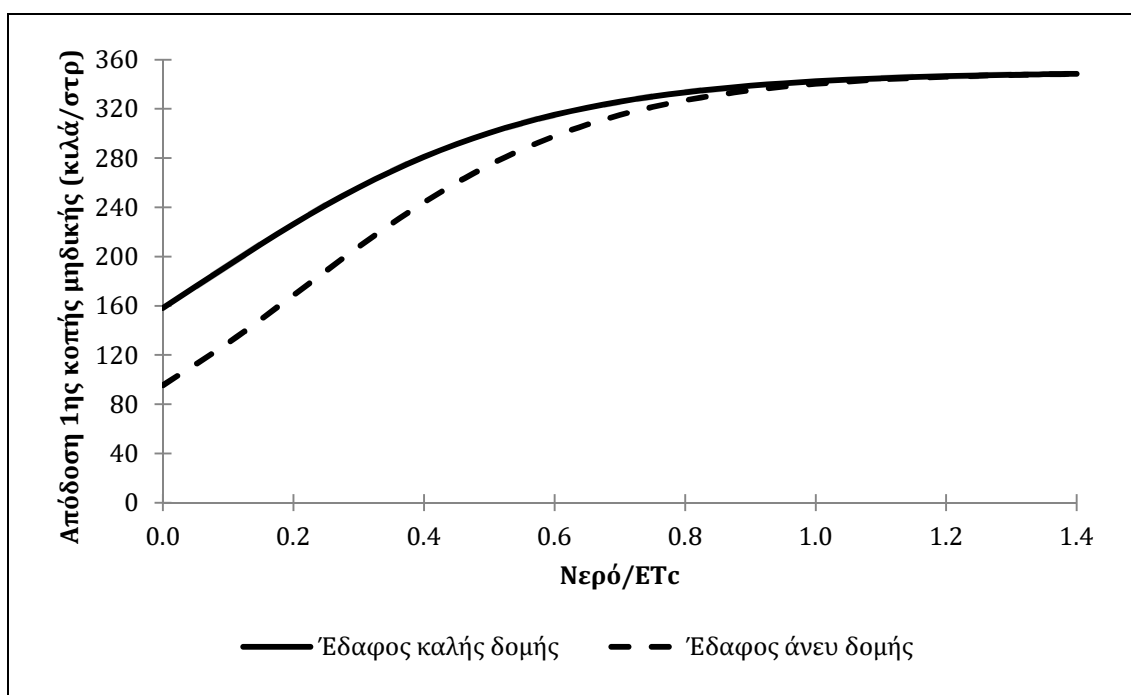
## Μηδική (1<sup>η</sup> κοπή)

Πίνακας Α.6: Αποτελέσματα εκτίμησης συνάρτησης απόδοσης-νερού 1<sup>ης</sup> κοπής μηδικής σε εδάφη καλής δομής και άνευ δομής

	Καλής δομής	Άνευ δομής
$\hat{b}_0$	0.194 (5.694)**	0.982 (38.855)**
$\hat{b}_1$	-3.992 (-49.181)**	-4.538 (-83.940)**
$R^2$	0.698	0.849
$N$	1242	1240

\* $p < 0.05$ ; \*\* $p < 0.01$

Σχήμα Α.6: Αποδόσεις 1<sup>ης</sup> κοπής μηδικής σε εδάφη καλής δομής και άνευ δομής



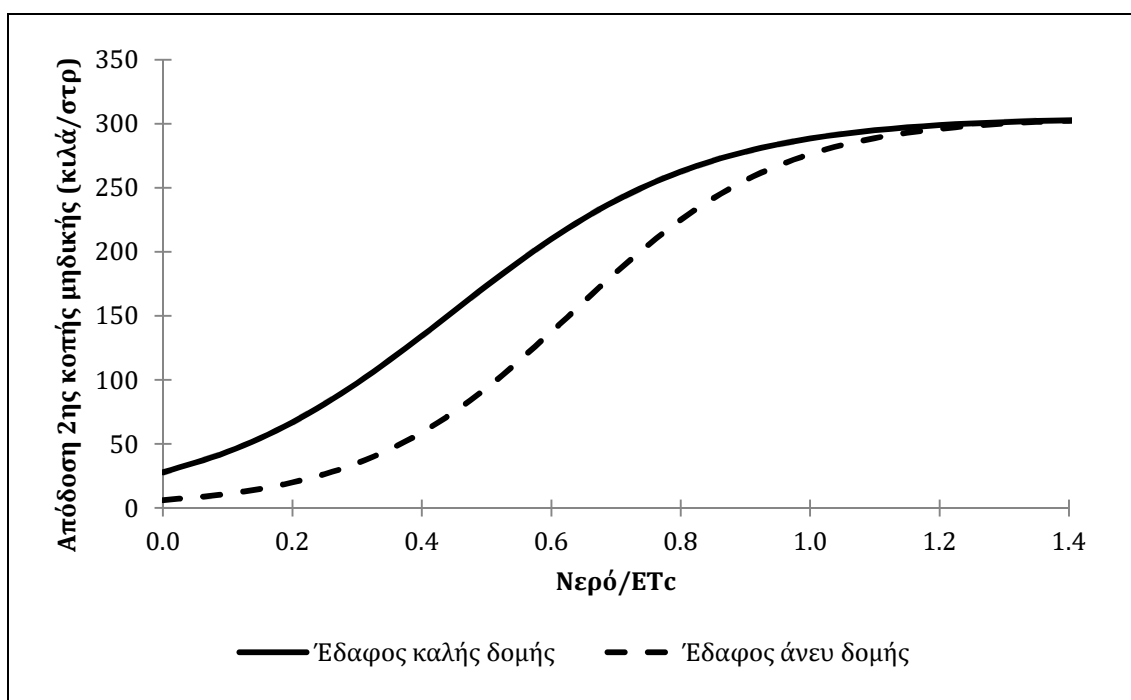
## Μηδική (2<sup>η</sup> κοπή)

Πίνακας Α.7: Αποτελέσματα εκτίμησης συνάρτησης απόδοσης-νερού 2<sup>ης</sup> κοπής μηδικής σε εδάφη καλής δομής και άνευ δομής

	Καλής δομής	Άνευ δομής
$\hat{b}_0$	2.303 (23.378)**	3.892 (33.017)**
$\hat{b}_1$	-5.156 (-33.756)**	-6.156 (-35.457)**
$R^2$	0.550	0.702
$N$	1173	1040

\* $p < 0.05$ ; \*\* $p < 0.01$

Σχήμα Α.7: Αποδόσεις 2<sup>ης</sup> κοπής μηδικής σε εδάφη καλής δομής και άνευ δομής



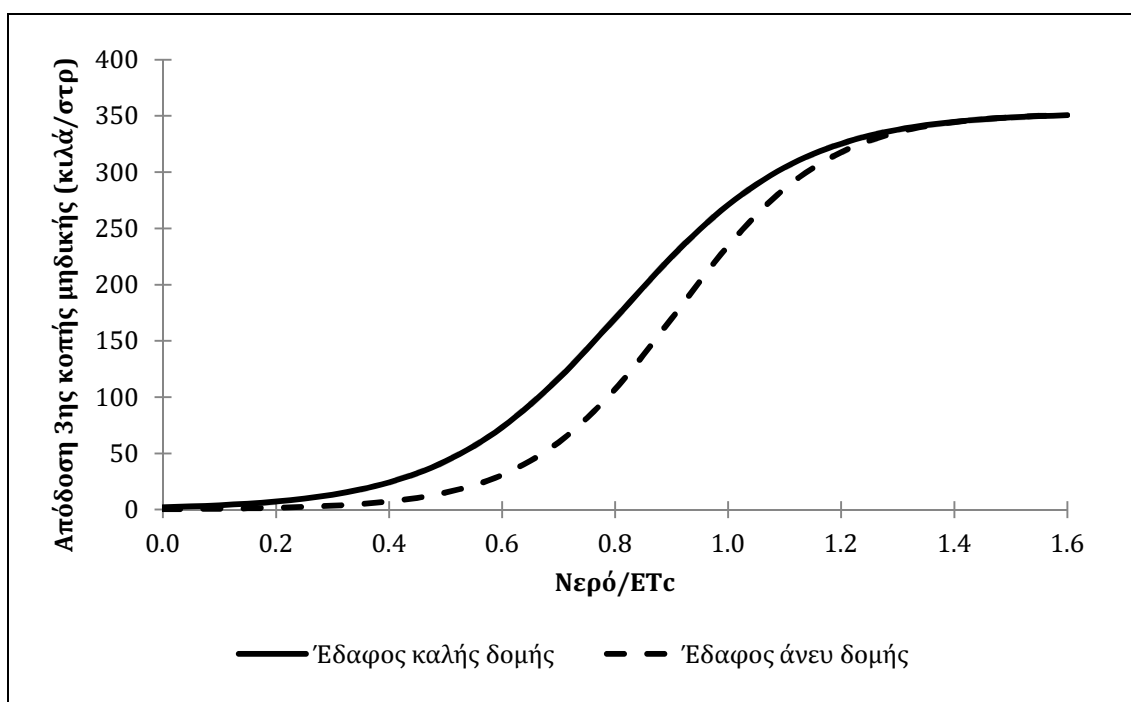
## Μηδική (3<sup>η</sup> κοπή)

Πίνακας Α.8: Αποτελέσματα εκτίμησης συνάρτησης απόδοσης-νερού 3<sup>ης</sup> κοπής μηδικής σε εδάφη καλής δομής και άνευ δομής

	Καλής δομής	Άνευ δομής
$\hat{b}_0$	5.148 (31.178)**	6.900 (31.576)**
$\hat{b}_1$	-6.342 (-27.065)**	-7.585 (-33.127)**
$R^2$	0.573	0.610
$N$	1021	768

\* $p < 0.05$ ; \*\* $p < 0.01$

Σχήμα Α.8: Αποδόσεις 3<sup>ης</sup> κοπής μηδικής σε εδάφη καλής δομής και άνευ δομής



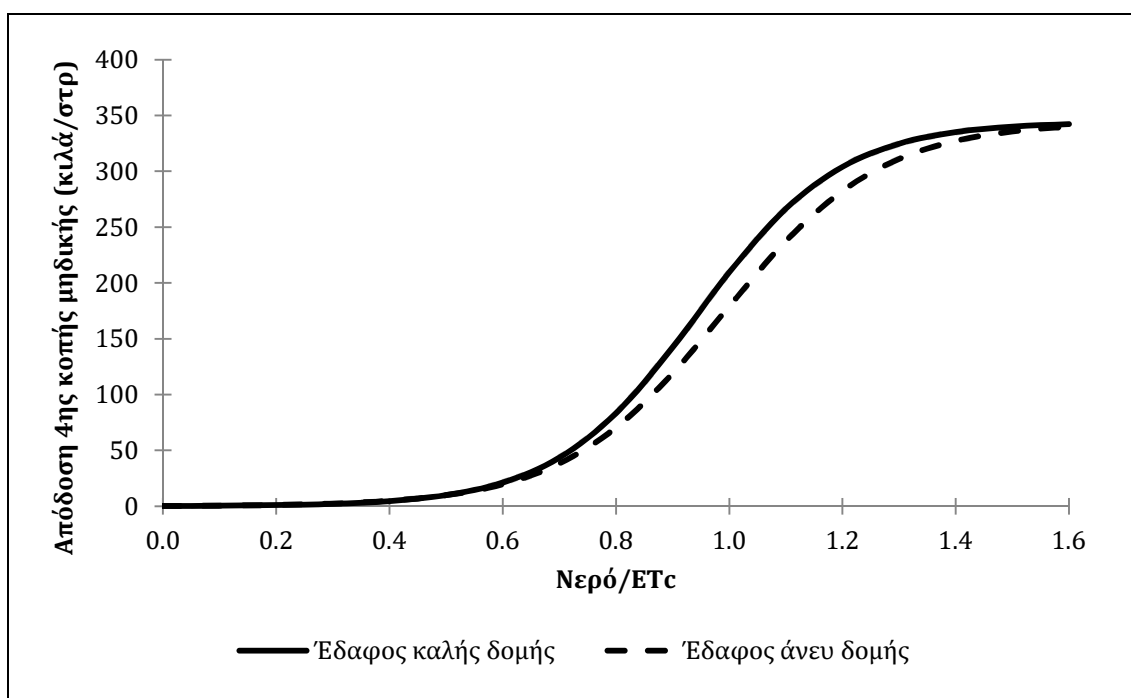
## Μηδική (4<sup>η</sup> κοπή)

Πίνακας Α.9: Αποτελέσματα εκτίμησης συνάρτησης απόδοσης-νερού 4<sup>ης</sup> κοπής μηδικής σε εδάφη καλής δομής και άνευ δομής

	Καλής δομής	Άνευ δομής
$\hat{b}_0$	7.474 (22.367)**	7.114 (48.223)**
$\hat{b}_1$	-7.914 (-24.649)**	-7.195 (-47.798)**
$R^2$	0.591	0.747
$N$	903	842

\* $p < 0.05$ ; \*\* $p < 0.01$

Σχήμα Α.9: Αποδόσεις 4<sup>ης</sup> κοπής μηδικής σε εδάφη καλής δομής και άνευ δομής



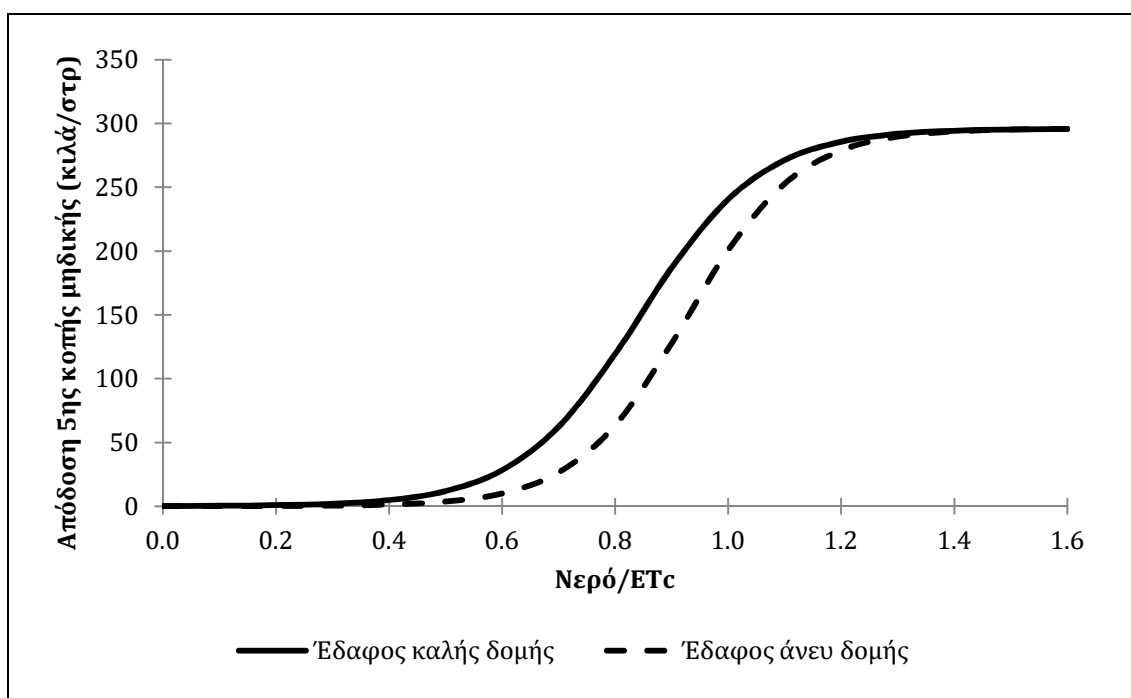
## Μηδική (5<sup>η</sup> κοπή)

Πίνακας Α.10: Αποτελέσματα εκτίμησης συνάρτησης απόδοσης-νερού 5<sup>ης</sup> κοπής μηδικής σε εδάφη καλής δομής και άνευ δομής

	Καλής δομής	Άνευ δομής
$\hat{b}_0$	7.836 (28.844)**	9.472 (19.055)**
$\hat{b}_1$	-9.303 (-28.111)**	-10.217 (-18.392)**
$R^2$	0.633	0.494
$N$	838	756

\* $p < 0.05$ ; \*\* $p < 0.01$

Σχήμα Α.10: Αποδόσεις 5<sup>ης</sup> κοπής μηδικής σε εδάφη καλής δομής και άνευ δομής





# Παράρτημα Β': Σύμβολα και μονάδες μέτρησης Κεφαλαίου 2

---

d	ημέρα
g	γραμμάριο
kg	κιλό
mg	milligram = $10^{-3}$ γραμμάρια
ha	εκτάριο
m	μέτρο
s	δευτερόλεπτο
cm	εκατοστό
mm	χιλιοστό
J	joule
MJ	megajoule
kPa	kilopascal
K	Θερμοκρασία σε βαθμούς Κέλβιν
°C	Θερμοκρασία σε βαθμούς κελσίου
rad	ακτίνιο
bar	Μονάδα πίεσης bar = 100 kPa
mbar	millibar
<hr/>	
$\lambda$	Η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης ( $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ )
$E$	Ο ρυθμός της εξάτμισης ( $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ )
$H$	Η ροή της αισθητής θερμότητας στον αέρα ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ )
$G$	Η ροή αισθητής θερμότητας στο έδαφος ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ )
$R_n$	Η ολική καθαρή ακτινοβολία ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ )
$R_{nl}$	Η εξερχόμενη ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ )
$R_{ns}$	Η εισερχόμενη ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ )
$R_s$	Η προσπίπτουσα στη γη ακτινοβολία ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ )
$R_A$	Η εξωγήινη ηλιακή ακτινοβολία ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ )
$n/N$	Ο λόγος της πραγματικής ημερήσιας ηλιοφάνειας
$J_r$	Η σχετική απόσταση μεταξύ ηλίου και γης
$\omega_s$	Η γωνία του ηλίου την ώρα δύσης (rad)
$\varphi$	Το γεωγραφικό πλάτος (rad)
$\delta$	Η κλίση του ηλίου (rad)
$\sigma$	Η σταθερά του Boltzman ( $4.903 \times 10^{-9} \text{ MJ}\cdot\text{K}^{-4}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ )
$T$	Θερμοκρασία (°C)
$T_K$	Θερμοκρασία (K)
$T_{mean}$	Η μέση ημερήσια θερμοκρασία (°C)
$T_{min}$	Η ελάχιστη ημερήσια θερμοκρασία (°C)
$T_{max}$	Η μέγιστη ημερήσια θερμοκρασία (°C)
$T_{dew}$	Η ημερήσια θερμοκρασία στο σημείο δρόσου (°C)

$c_s$	Η θερμική αγωγιμότητα του εδάφους ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$ )
$e^o$	Η πίεση κορεσμού υδρατμών (kPa)
$e_s$	Η ημερήσια πίεση κορεσμού υδρατμών (kPa)
$e_a$	Η ημερήσια πραγματική πίεση υδρατμών (kPa)
$\Delta$	Η κλίση της γραμμής πίεσης κορεσμού υδρατμών
$RH_{mean}$	Η μέση ημερήσια σχετική υγρασία (%)
$RH_{min}$	Η ελάχιστη ημερήσια σχετική υγρασία (%)
$\gamma$	Η ψυχομετρική σταθερά ( $\text{kPa}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$ )
$c_p$	Η ειδική θερμότητα του αέρα ( $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$ )
$P$	Ατμοσφαιρική πίεση (kPa)
$R$	Η ειδική σταθερά των αερίων ( $287 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{K}^{-1}$ )
$u_2$	Η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 2 m από την επιφάνεια του εδάφους ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )
$ET_o$	Η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς ( $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ )
$ET_c$	Η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας ( $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ )
$K_c$	Ο φυτικός συντελεστής
$K_{c_{ini}}$	Ο φυτικός συντελεστής του αρχικού σταδίου
$K_{c_{dev}}$	Ο φυτικός συντελεστής του σταδίου ανάπτυξης
$K_{c_{mid}}$	Ο φυτικός συντελεστής του σταδίου μέσης περιόδου
$K_{c_{fin}}$	Ο φυτικός συντελεστής του τελικού σταδίου
$K_{c_{end}}$	Η τελική τιμή του φυτικού συντελεστή
$E_s$	Η εξάτμιση νερού κατά το αρχικό στάδιο της βλαστικής περιόδου ( $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ )
$E_{s1}$	Ο ρυθμός εξάτμισης κατά την πρώτη φάση του φαινομένου ( $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ )
$E_{s2}$	Ο ρυθμός εξάτμισης κατά τη δεύτερη φάση του φαινομένου ( $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ )
$t_1$	Ο χρόνος ολοκλήρωσης της πρώτης φάσης της εξάτμισης (d)
$ET_{o_{ini}}$	Η μέση $ET_o$ κατά το αρχικό στάδιο της βλαστικής περιόδου ( $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ )
$t_w$	Ο μέσος χρόνος μεταξύ δυο διαδοχικών υγράνσεων (d)
$n_w$	Ο αριθμός των υγράνσεων κατά το αρχικό στάδιο της βλαστικής περιόδου
$P_{mean}$	Η μέση ένταση ενός φαινομένου ύγρανσης (mm)
$L_{ini}$	Ο αριθμός των ημερών του αρχικού σταδίου
$L_{stage}$	Ο αριθμός των ημερών ενός σταδίου της βλαστικής περιόδου
$TEW$	Το συνολικό εξατμισμό νερό (mm)
$REW$	Το εύκολα εξατμισμό νερό (mm)
$Z_e$	Το βάθος του εδάφους που υπόκειται σε εξάτμιση (m)
$\theta_{FC}$	Η εδαφική υγρασία στην υδατοϊκανότητα (%)
$\theta_{WP}$	Η εδαφική υγρασία στο σημείο μόνιμης μάρανσης (%)
$W_{ini}$	Το αρχικό βάθος εδαφικού νερού στο ξεκίνημα του αρχικού σταδίου (mm)
$ET_{c_{adj}}$	Η προσαρμοσμένη εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας ( $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ )
$TAW$	Το συνολικό διαθέσιμο νερό (mm)
$RAW$	Το άμεσα διαθέσιμο νερό (mm)
$Dr$	Το ημερήσιο έλλειμμα εδαφικής υγρασίας στο ριζόστρωμα (mm)
$K_s$	Ο συντελεστής υδατικής καταπόνησης
$Zr_d$	Το βάθος του ριζοστρώματος την ημέρα $d$ (m)
$Zr_{max}$	Το μέγιστο βάθος του ριζοστρώματος (m)

$p$	Ο παράγοντας ωφελιμότητας
$IR$	Βάθος άρδευσης (mm)
$CR$	Ύψος νερού τριχοειδούς ανύψωσης (mm)
$P$	Το ύψος της βροχής (mm)
$RO$	Νερό που χάνεται λόγω επιφανειακής απορροής (mm)
$DP$	Νερό που χάνεται λόγω βαθιάς διήθησης (mm)
$Y_{max}$	Η μέγιστη απόδοση της καλλιέργειας ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ )
$Y_r$	Η πραγματική απόδοση της καλλιέργειας ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ )
$B$	Ο συντελεστής απόκρισης παραγωγής
$B_k$	Ο συντελεστής απόκρισης παραγωγής του $k$ σταδίου
$ET_{max}$	Η μέγιστη εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας ( $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ )
$ET_r$	Η πραγματική εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας ( $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ )
$Y_o$	Ο ρυθμός παραγωγής ξηρής φυτικής ουσίας της «τυπικής» καλλιέργειας ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ )
$y_c$	Η μέση ημερήσια παραγωγή ξηρής φυτικής ουσίας σε μέρα ολικής αιθρίας ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ )
$y_o$	Η μέση ημερήσια παραγωγή ξηρής φυτικής ουσίας της «τυπικής καλλιέργειας» σε μια νεφοσκεπή ημέρα ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ )
$N_c$	Συντελεστής διόρθωσης με βάση τη μέση θερμοκρασία
$H_c$	Ο δείκτης συγκομιδής της καλλιέργειας
$L_c$	Συντελεστής διόρθωσης με βάση το LAI
$G_c$	Η διάρκεια της βλαστικής περιόδου
$y_m$	Ο ωριαίος ρυθμός παραγωγής ξηρής φυτικής ουσίας της «τυπικής καλλιέργειας» ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ )