

ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑΤΟΣ ΣΕ ΑΜΠΕΛΩΝΕΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΚΑΙΝΟΤΟΜΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ

N. Θεοτοκάτος^{✉1}, Π. Λόντρα¹, Α. Ευστρατιάδης²

¹Γεωπονικό Παν/μιο Αθηνών, Τμήμα ΑΦΠ-ΓΜ, Ιερά Οδός 75, 11855 Αθήνα, ²Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ηρώων Πολυτεχνείου 5, 15773 Αθήνα, ✉theotokatosnick@aua.gr

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία διερευνάται το πλέγμα νερού και ενέργειας σε αμπελώνες, όπου εφαρμόζονται καινοτόμες πρακτικές τόσο για τη διαχείριση του νερού μέσω συστημάτων συλλογής και αξιοποίησης του βρόχινου νερού, όσο και για την αξιοποίηση του ηλιακού δυναμικού με την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάνελ για την παραγωγή πράσινης ενέργειας. Η έρευνα επικεντρώνεται στη Νεμέα Κορινθίας και τη Νέα Αγχίαλο Μαγνησίας. Για τη διερεύνηση του μεγέθους των δεξαμενών συλλογής όμβριων υδάτων για αρδευτική χρήση στην καλλιέργεια αμπέλου, εφαρμόστηκε ένα μοντέλο ημερήσιου υδατικού ισοζυγίου, χρησιμοποιώντας ημερήσιες τιμές βροχόπτωσης και εξατμισοδιαπνοής για 20 υδρολογικά έτη (2001-2021). Επιπλέον, στα αγροτεμάχια μελέτης, εξετάστηκε η χρήση φωτοβολταϊκών πάνελ ως επιφάνεια συλλογής ομβρίων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η χρήση του συστήματος συλλογής όμβριων υδάτων με επιφάνεια συλλογής ίση με 500 m² για εκτάσεις καλλιεργειών από 0.5 έως 10 στρέμματα και με χρήση ομβροδεξαμενών από 10 έως 250 m³, μπορεί να εξασφαλίσει ποσοστά κάλυψης της ζήτησης από 60% έως 95%. Η παραγωγή πράσινης ενέργειας μέσω των πάνελ κυμάνθηκε από 149 έως 156 MWh ανά έτος.

Λέξεις κλειδιά: συλλογή ομβρίων, μοντέλο υδατικού ισοζυγίου, φωτοβολταϊκά πάνελ, πράσινη ενέργεια

OPTIMIZATION OF WATER AND ENERGY FOOTPRINT IN VINEYARDS USING INNOVATIVE TECHNOLOGIES

N. Theotokatos^{✉1}, P. Londra¹, A. Efstratiadis²

¹Agricultural University of Athens, Dept. of NRD-AE, 75 Iera Odos, 11855 Athens, ²National Technical University of Athens, School of Civil Engineering, 5 Iroon Polytechniou, 15773 Athens, ✉theotokatosnick@aua.gr

ABSTRACT

This study explores the water–energy nexus in vineyards, where innovative practices are applied for both water management through rainwater harvesting and solar energy utilization, via the installation of photovoltaic panels for green energy production. The research focuses on two regions in Greece: Nemea (Corinthia) and Nea Anchialos (Magnesia). To investigate the required size of rainwater harvesting tanks for irrigation use in vineyards, a daily water balance model was implemented, using daily precipitation and evapotranspiration data over a 20-year hydrological period (2001–2021). Additionally, the use of photovoltaic panels as a rainwater collection area was examined. The results showed that the use of a rainwater harvesting system with a rainwater collection area of 500 m², for cultivated areas of 0.5 to 10 stremmata, and with rainwater tanks ranging from 10 to 250 m³, can cover between 60% and 95% of the water demand. The production of green energy through photovoltaic panels ranged from 149 to 156 MWh per year.

Key words: rainwater harvesting, water balance model, photovoltaics, green energy

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το νερό και η ενέργεια αποτελούν δύο από τους κρίσιμους πόρους στη σύγχρονη γεωργία, με τη διαχείριση και τη διαθεσιμότητά τους να επηρεάζουν άμεσα την παραγωγικότητα και τη βιωσιμότητα των καλλιεργειών. Στο μεσογειακό κλίμα, όπου η βροχόπτωση παρουσιάζει έντονη εποχικότητα και οι ξηρές περίοδοι είναι συχνές και παρατεταμένες, η εξασφάλιση επαρκών ποσοτήτων νερού για άρδευση αποτελεί διαρκή πρόκληση.

Κατά τις τελευταίες δεκαετίες, η υπεράντληση των υπόγειων υδάτων έχει οδηγήσει σε αισθητή πτώση του υπογείου υδροφόρου ορίζοντα με αποτέλεσμα την υφαλμύριση των υπόγειων υδάτων και κατά συνέπεια την αλάτωση των εδαφών, απειλώντας τη βιωσιμότητα της αγροτικής παραγωγής σε βάθος χρόνου (European Environment Agency, 2019). Στην Ελλάδα, όπου η γεωργία ευθύνεται για περίπου το 85% των συνολικών υδατικών εκμεταλλεύσεων, τα προβλήματα αυτά είναι ιδιαίτερα έντονα. Η κατάσταση επιδεινώνεται από την εφαρμογή αναποτελεσματικών πρακτικών άρδευσης και την αυξανόμενη μεταβλητότητα του κλίματος.

Παράλληλα, η χώρα βρίσκεται σε φάση ενεργειακής μετάβασης, καθώς περιορίζει σταδιακά την εξάρτησή της από τον λιγνίτη και στρέφεται προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η μετάβαση αυτή προσθέτει νέα επίπεδα πολυπλοκότητας στη διαχείριση των πόρων στον γεωργικό τομέα (Hellenic Ministry of Environment and Energy, 2023).

Η καλλιέργεια της αμπέλου, ένας από τους ιστορικά και οικονομικά σημαντικότερους κλάδους της ελληνικής γεωργίας, είναι ιδιαίτερα ευάλωτη στις παραπάνω προκλήσεις. Οι αμπελώνες απαιτούν ακριβή και αποδοτική διαχείριση του νερού, καθώς η ποιότητα και η ποσότητα της παραγωγής σταφυλιών επηρεάζονται άμεσα από την υδατική επάρκεια. Η υπερβολική εξάρτηση από την άρδευση με υπόγειους υδάτινους πόρους είναι περιβαλλοντικά μη βιώσιμη και οικονομικά ασύμφορη, λόγω του υψηλού ενεργειακού κόστους που απαιτείται για άντληση και διανομή. Αυτό το ενεργειακό κόστος επιβαρύνει σημαντικά τη συνολική παραγωγική διαδικασία μειώνοντας την κερδοφορία των εκμεταλλεύσεων.

Στο πλαίσιο αυτό, η ανάγκη για ολοκληρωμένες και έξυπνες λύσεις που να βελτιστοποιούν ταυτόχρονα τη χρήση νερού και ενέργειας είναι επιτακτική. Μια πολλά υποσχόμενη προσέγγιση είναι ο συνδυασμός συστημάτων συλλογής όμβριων υδάτων με τεχνολογίες φωτοβολταϊκής ενέργειας. Τα συστήματα ομβροσυλλογής επιτρέπουν τη συλλογή και αποθήκευση βρόχινου νερού, μειώνοντας την εξάρτηση από υπόγειες πηγές και ενισχύοντας την αυτάρκεια των καλλιεργειών (Mitchell et al., 2008). Όταν συνδυάζονται με φωτοβολταϊκά πάνελ, δημιουργούνται υβριδικά συστήματα που προσφέρουν διπλή ωφέλεια: παραγωγή καθαρής ενέργειας και αύξηση της επιφάνειας συλλογής του βρόχινου νερού (Barron–Gafford et al., 2019).

Οι τεχνολογίες αυτές εναρμονίζονται πλήρως με τους στόχους της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας, η οποία προωθεί μια γεωργία ανθεκτική στην κλιματική αλλαγή, μέσα από την αποδοτική χρήση φυσικών πόρων και την ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (European Commission, 2020).

Πλήθος μελετών έχει αναδείξει τα οφέλη της εφαρμογής των συστημάτων συλλογής όμβριων υδάτων και φωτοβολταϊκών στον αγροτικό χώρο. Οι Mitchell et al. (2008) απέδειξαν ότι κατάλληλα σχεδιασμένες υποδομές αποθήκευσης μπορούν να ενισχύσουν σημαντικά τη διαθεσιμότητα νερού για άρδευση. Αντίστοιχα, οι Barron–Gafford et al. (2019), στο πλαίσιο της μελέτης των αγροβολταϊκών (agrivoltaics), έδειξαν ότι οι εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών όχι μόνο παρέχουν ενεργειακή αυτάρκεια, αλλά μειώνουν και τις απώλειες νερού λόγω εξάτμισης, ενισχύοντας την αποτελεσματικότητα των συστημάτων συλλογής.

Η παρούσα εργασία εξετάζει τη βελτιστοποίηση του υδατικού και ενεργειακού αποτυπώματος στην ελληνική αμπελοκαλλιέργεια μέσω της εφαρμογής συστημάτων συλλογής όμβριων υδάτων και φωτοβολταϊκών. Με βάση ιστορικές χρονοσειρές δεδομένων και την ανάπτυξη μοντέλου ημερήσιου υδατικού ισοζυγίου, αξιολογείται η αποδοτικότητα των συστημάτων αυτών σε δύο περιοχές με έντονο αμπελουργικό ενδιαφέρον, τη Νεμέα (Κορινθία) και τη Νέα Αγχίαλο (Μαγνησία). Στόχος της μελέτης είναι να διερευνηθεί ο βαθμός κάλυψης των αρδευτικών αναγκών μέσω ομβροσυλλογής, να εκτιμηθεί το ενεργειακό δυναμικό των φωτοβολταϊκών συστημάτων και να προταθούν βιώσιμες πρακτικές διαχείρισης των αμπελώνων. Τα αποτελέσματα αναμένεται να συμβάλουν στον ευρύτερο διάλογο για την «έξυπνη γεωργία» και την προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή, προσφέροντας χρήσιμες κατευθύνσεις σε παραγωγούς, ερευνητές και φορείς πολιτικής.

2. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 Περιοχή Μελέτης

Η παρούσα μελέτη εστιάζει σε δύο περιοχές έντονου οινολογικού ενδιαφέροντος: τη Νεμέα (Π.Ε. Κορινθίας) και τη Νέα Αγχίαλο (Π.Ε. Μαγνησίας). Οι δύο περιοχές επιλέχθηκαν λόγω της σημαντικής αμπελουργικής τους δραστηριότητας και των διαφορών τους σε κλιματικά και γεωγραφικά χαρακτηριστικά, που επιτρέπουν συγκριτική αξιολόγηση των προτεινόμενων τεχνολογιών. Συγκεκριμένα, στην περιοχή της Κορινθίας καλλιεργούνται περίπου 45.500 στρέμματα με την περιοχή της Νεμέας να αποτελεί τη μεγαλύτερη αμπελουργική ζώνη στην Ελλάδα, τόσο σε έκταση καλλιεργούμενων αμπελώνων και ετήσια παραγωγή κρασιού (220.000 HL), όσο και σε αριθμό οινοποιείων (40) (ΕΝΟΑΠ, 2015). Όσον αφορά στην περιοχή της Μαγνησίας η καλλιέργεια της αμπέλου δεν είναι τόσο έντονη όσο στην περιοχή της Κορινθίας, με συνολικά καλλιεργούμενα στρέμματα αμπελιού να μην ξεπερνούν τα 20.000, όμως στην περιοχή της Νέας Αγχιάλου στεγάζεται ένας από τους παλαιότερους αμπελουργικούς συνεταιρισμούς στην Ελλάδα, ο συνεταιρισμός «Δήμητρα», ο οποίος λειτουργεί από το 1811 και προμηθεύει την αγορά με γνωστές μάρκες κρασιών και αποσταγμάτων.

2.2 Κλιματολογικά και Βροχομετρικά δεδομένα

Το Ελληνικό κλίμα είναι τυπικά Μεσογειακό. Αυτό σημαίνει ότι η ψυχρή και βροχερή περίοδος διαρκεί από τα μέσα Οκτωβρίου έως το τέλος του Μαρτίου και η ζεστή και άνομβρη περίοδος από τέλη Απριλίου έως τον Σεπτέμβριο. Περεταίρω, λόγω της επίδρασης της τοπογραφίας σε διάφορες περιοχές της Ελλάδας εντοπίζονται διαφορές στο κλίμα της κάθε περιοχής με αποτέλεσμα να δημιουργείται μια ποικιλία κλιματολογικών συνθηκών. Για την εκπόνηση της παρούσας μελέτης, επιλέχθηκαν δύο αντιπροσωπευτικοί βροχομετρικοί σταθμοί, ένας από κάθε μία από τις περιοχές μελέτης όπου μελετάται η εγκατάσταση δεξαμενών συλλογής όμβριων υδάτων και φωτοβολταϊκών πάνελ, με βάση τη διαθεσιμότητα πλήρων χρονοσειρών ημερήσιων τιμών βροχόπτωσης.

Τα ημερήσια δεδομένα βροχόπτωσης που χρησιμοποιήθηκαν για τη διερεύνηση του όγκου των ομβροδεξαμενών αντλήθηκαν από τη βάση δεδομένων των εγκατεστημένων μετεωρολογικών σταθμών του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών και αφορούν στη χρονική περίοδο από το 2001 έως το 2021. Αυτή η περίοδος υπερβαίνει την ελάχιστη διάρκεια καταγραφής βροχόπτωσης που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του μεγέθους των δεξαμενών συλλογής ομβρίων, δηλαδή τα 10 έτη, όπως συνιστούν οι Mitchell et al. (2008).

2.3 Μοντέλο Ημερήσιου Υδατικού Ισοζυγίου

Η εξίσωση του μοντέλου ημερήσιου υδατικού ισοζυγίου που εφαρμόστηκε για τον προσδιορισμό του μεγέθους της ομβροδεξαμενής είναι (Londra et al., 2021):

$$S_t = S_{t-1} + R_t - D_t - E_t, \quad 0 \leq S_{t-1} \leq V_{\text{tank}} \quad (1)$$

Όπου: S_t είναι ο αποθηκευμένος όγκος νερού στην δεξαμενή στο τέλος της t ημέρας (m^3), S_{t-1} ο αποθηκευμένος όγκος νερού στο ξεκίνημα της t ημέρας (m^3), D_t η ημερήσια ανάγκη σε νερό (m^3), E_t η ημερήσια εξάτμιση του νερού ομβροδεξαμενής (m^3), V_{tank} η χωρητικότητα της ομβροδεξαμενής (m^3).

Στο μοντέλο ημερήσιου υδατικού ισοζυγίου χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου, οι ημερήσιες τιμές βροχόπτωσης, η επιφάνεια των φωτοβολταϊκών πάνελ ως επιφάνεια συλλογής, ο συντελεστής απορροής, ο όγκος της ομβροδεξαμενής και οι υδατικές ανάγκες της καλλιέργειας. Η εξάτμιση θεωρείται αμελητέα, καθώς μελετώνται δεξαμενές κλειστού τύπου.

2.3.1 Όγκος ομβροσυλλογής (R_t)

Η ημερήσια ποσότητα νερού που συλλέγεται από την επιφάνεια των πάνελ υπολογίζεται ως εξής:

$$R_t = C \cdot A_p \cdot P_t \quad (2)$$

Όπου: C ο συντελεστής απορροής, A_p η επιφάνεια των πάνελ ως επιφάνεια συλλογής (m^2), και P_t η ημερήσια βροχόπτωση στο τέλος της ημέρας t (m).

2.3.2 Ημερήσιες Υδατικές Ανάγκες (D_t)

Ο υπολογισμός των ημερήσιων αρδευτικών αναγκών D_t πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με την εξίσωση:

$$D_t = (ET_{c,t} - P_{ef,t})/n = (K_c \cdot ET_{o,t} - P_{ef,t})/n \quad (3)$$

Όπου ET_c είναι η ημερήσια εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας την t ημέρα (mm), K_c ο φυτικός συντελεστής για οινοποιήσιμη καλλιέργεια αμπέλου σύμφωνα με το μοντέλο Penman-Monteith, $ET_{o,t}$ η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς η οποία υπολογίστηκε με το μοντέλο εξατμισοδιαπνοής Penman-Monteith χρησιμοποιώντας τα δεδομένα του μετεωρολογικού σταθμού την t ημέρα, $P_{ef,t}$ η ενεργός βροχόπτωση, δηλαδή η ποσότητα της βροχής που θα διηθηθεί στο έδαφος, χάνοντας ένα ποσοστό της ποσότητάς της (20%), και n ο βαθμός απόδοσης του συστήματος άρδευσης. Θεωρώντας ότι το πότισμα γίνεται με στάγδην άρδευση με βαθμό απόδοσης 0.9, οι μέσες ετήσιες αρδευτικές ανάγκες της καλλιέργειας υπολογίστηκαν σε $350 \text{ m}^3/\text{στρέμμα}$ για την περιοχή της Αγχιάλου και $250 \text{ m}^3/\text{στρέμμα}$ για την περιοχή της Νεμέας.

2.3.3 Προσδιορισμός όγκου ομβροδεξαμενής

Λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω εξισώσεις, την ποσότητα του νερού που συλλέγεται από τις επιφάνειες των πάνελ και τις υδατικές ανάγκες της καλλιέργειας της αμπέλου, η ημερήσια ποσότητα νερού στην ομβροδεξαμενή υπολογίζεται ως:

$$\text{if } S_t > V_{\text{tank}} \text{ then } V_{\text{tank}}, \text{ if } S_t < 0 \text{ then } 0 \text{ esle } S_t = S_{\text{tank},t} \quad (4)$$

Όπου: $S_{\text{tank},t}$ είναι ο διαθέσιμος όγκος νερού εντός της ομβροδεξαμενής την t ημέρα.

Όταν η ομβροδεξαμενή δέχεται μεγαλύτερο όγκο νερού από τη χωρητικότητά της, η ποσότητα νερού υπερχειλίσσης O_t από την ομβροδεξαμενή μπορεί να υπολογισθεί ως:

$$\text{if } S_t > V_{\text{tank}} \text{ then } O_t = S_t - V_{\text{tank}} \text{ esle } O_t = 0 \quad (5)$$

Ο υπολογισμός του όγκου υπερχειλίσης πραγματοποιείται εφόσον έχουν καλυφθεί οι απαιτήσεις σε νερό.

Στην περίπτωση που ο αποθηκευμένος όγκος βρόχινου νερού στην ομβροδεξαμενή τη t ημέρα $S_{\text{tank},t}$ δεν επαρκεί για να καλύψει τη ζήτηση D_t , τότε η ζήτηση θα καλυφθεί από κάποια άλλη πηγή νερού (T_t), όπως γεώτρηση ή τοπικό δίκτυο άρδευσης και μπορεί να υπολογισθεί ως εξής:

$$\text{if } S_{\text{tank},t} < D_t \text{ then } T_t = D_t - S_{\text{tank},t} \text{ else } T_t = 0 \quad (6)$$

Στη παρούσα μελέτη, έχει θεωρηθεί ότι η ομβροδεξαμενή είναι αρχικά άδεια και η επιφάνεια συλλογής ομβρίων είναι 500 m^2 .

2.3.4 Συντελεστής αξιοπιστίας του συστήματος ομβροδεξαμενής

Ο συντελεστής αξιοπιστίας (Re) χρησιμεύει ως μία ένδειξη απόδοσης μιας δεξαμενής συλλογής όμβριων υδάτων στην κάλυψη ενός συγκεκριμένου επιπέδου ζήτησης. Αυτός ο συντελεστής υποδεικνύει την αποτελεσματικότητα της δεξαμενής στην παροχή επαρκούς ποσότητας νερού για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών της καλλιέργειας αμπέλου και ορίζεται ως (Londra et al., 2021):

$$\text{Re} = (N_f / N_{\text{tot}}) \cdot 100\% \quad (7)$$

Όπου N_f ο αριθμός των ημερών που η ζήτηση καλύφθηκε αποκλειστικά με νερό της ομβροδεξαμενής και N_{tot} οι συνολικές μέρες.

2.4 Φωτοβολταϊκά συστήματα

Τα φωτοβολταϊκά πάνελ που εγκαθίστανται σε αμπελώνες μπορούν να επιτελέσουν διπλή λειτουργία, συνδυάζοντας την παραγωγή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και τη συλλογή, μέσω της επιφανείας τους, όμβριων υδάτων για άρδευση. Συγκεκριμένα, για το σκοπό της μελέτης χρησιμοποιούνται πάνελ 400W για μεγιστοποίηση της απόδοσης. Αυτά τα πάνελ είναι στρατηγικά τοποθετημένα για να κατευθύνουν το νερό της βροχής σε δεξαμενή αποθήκευσης η οποία στη συνέχεια χρησιμοποιείται για άρδευση. Κάθε πάνελ εκτείνεται σε περίπου 2 m^2 . Επιπλέον, η κλίση των πάνελ βελτιστοποιείται για να ενισχύσει τόσο την παραγωγή ενέργειας όσο και τη συλλογή του νερού διασφαλίζοντας την αποτελεσματική χρήση των πόρων.

Σύμφωνα με τον Νόμο 5106/2024, οι φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις σε γεωργικές εκτάσεις πρέπει να συμμορφώνονται με αυστηρούς κανονισμούς. Οι αγρότες μπορούν να εγκαταστήσουν συστήματα έως 1 MW , υπό την προϋπόθεση ότι αυτό δεν καλύπτει περισσότερο από το $0,8\%$ της καλλιεργήσιμης γης ανά Περιφερειακή Ενότητα. Οι εγκαταστάσεις κάτω από 1 MW εξαιρούνται από την υποχρέωση λεπτομερών περιβαλλοντικών αδειών, υπό την προϋπόθεση απόκτησης «Πιστοποιητικού Εξαίρεσης από την Περιβαλλοντική Έγκριση» (Solarway, 2025). Τέτοιου είδους κανονισμοί διευκολύνουν τη βιώσιμη ενσωμάτωση των φωτοβολταϊκών στις γεωργικές πρακτικές. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζεται η μέση ετήσια μετρημένη ενεργειακή απόδοση φωτοβολταϊκών πάρκων στις περιοχές μελέτης σε kWh ανά εγκατεστημένη ισχύ kWp . Οι τιμές προέρχονται από δεδομένα φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων μέσης κλίμακας ($10\text{--}100 \text{ kWp}$) (Vokas and Lagogiannis, 2013).

Πίνακας 1. Μέση ετήσια ενεργειακή απόδοση φωτοβολταϊκών πάρκων ανά περιοχή μελέτης.

Περιοχή	Μέση ετήσια ενεργειακή απόδοση (kWh/kWp)
Νεμέα (Κορινθίας)	1560

Περιοχή	Μέση ετήσια ενεργειακή απόδοση (kWh/kWp)
Νέα Αγχίαλος (Μαγνησίας)	1490

2.4.1 Εκτίμηση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Σύμφωνα με τους κανονισμούς για φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις σε γεωργικές εκτάσεις, η μέγιστη επιτρεπόμενη εγκατεστημένη ισχύς για ηλιακούς συλλέκτες είναι συνήθως 1MW. Αυτός ο κανονισμός διασφαλίζει ότι τα συστήματα παραγωγής ηλιακής ενέργειας δεν επηρεάζουν την παραγωγή καλλιεργείων, επιτρέποντας παράλληλα τη βιώσιμη παραγωγή ενέργειας σε συνδυασμό με την γεωργία. Έτσι, λαμβάνοντας υπόψη τις τεχνικές προδιαγραφές των πάνελ, αλλά και των κανονισμών, σε περίπου 5 στρέμματα εγκατάστασης μπορούν να τοποθετηθούν περίπου 2500 πάνελ φτάνοντας τη μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύ του κανονισμού.

Στην παρούσα μελέτη εξετάζεται η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάνελ σε έκταση 500 m², με σκοπό την αξιολόγηση της ετήσιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από το σύστημα, το οποίο προτείνεται να εγκατασταθεί πλησίον του αμπελώνα. Η εκτίμηση της παραγωγής ενέργειας βασίζεται στην εγκατεστημένη ισχύ των πάνελ και στη διαθέσιμη επιφάνεια τοποθέτησης. Κάθε φωτοβολταϊκό πάνελ έχει επιφάνεια 2 m² και ονομαστική ισχύ 400 W (0,4 kW). Συνεπώς, στην επιφάνεια των 500 m² μπορούν να τοποθετηθούν 250 πάνελ.

Άρα, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς του συστήματος υπολογίζεται σε $250 \text{ πάνελ} \cdot 0.4 \text{ kW} = 100 \text{ kWp}$.

Η ετήσια παραγωγή ενέργειας στις περιοχές μελέτης εκτιμάται, λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές της μέσης ετήσιας ενεργειακής απόδοσης φωτοβολταϊκών του Πίνακα 1. Για σύστημα 100 kWp, η εκτιμώμενη ετήσια παραγωγή υπολογίζεται σε $100 \text{ kWp} \cdot 1490 \text{ kWh/kWp} = 149000 \text{ kWh} = 149 \text{ MWh}$ για την περιοχή της Αγχιάλου και αντίστοιχα 156 MWh για την περιοχή της Νεμέας.

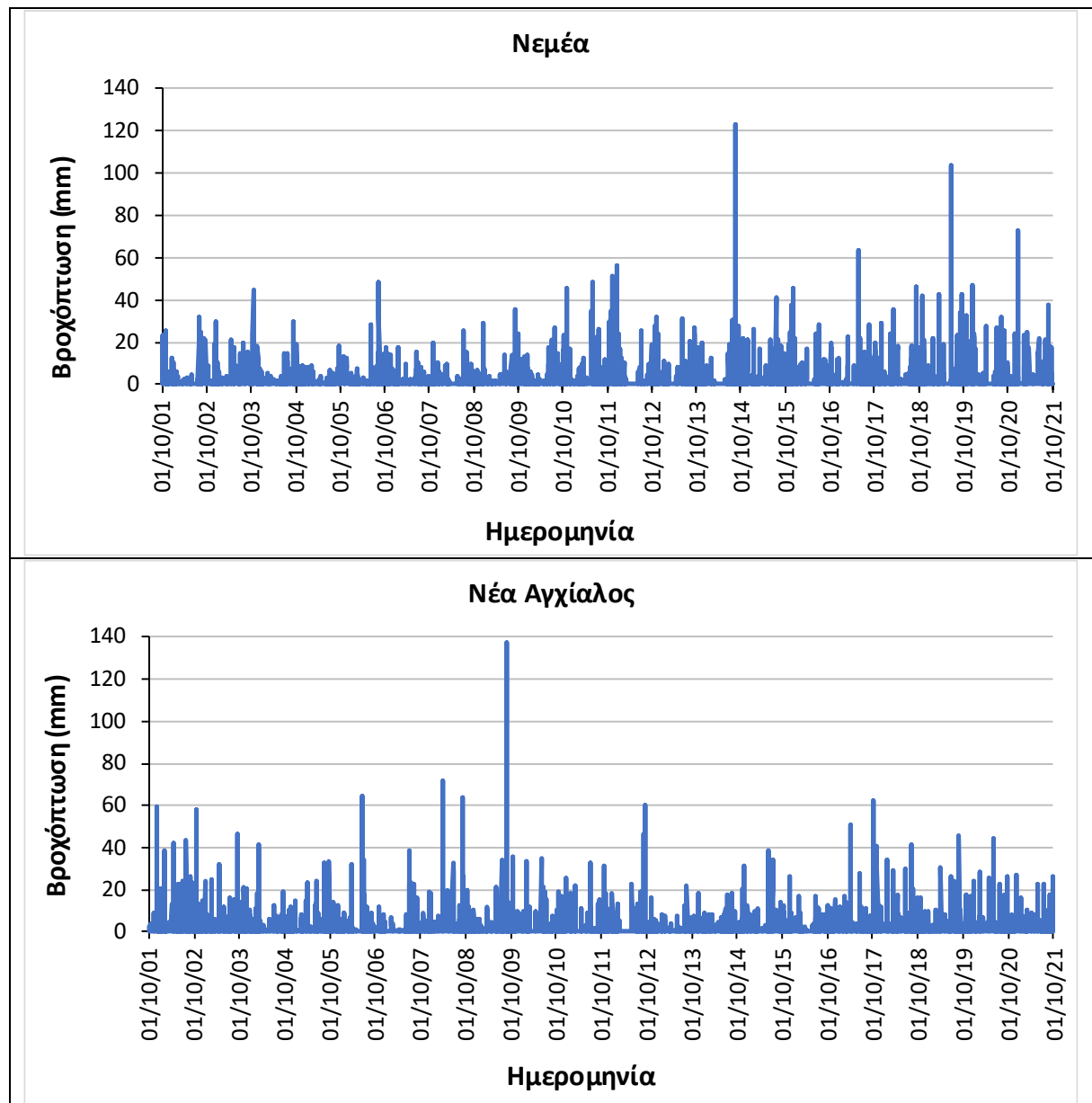
Η παραγόμενη αυτή ενέργεια μπορεί να καλύψει σημαντικό μέρος των ενεργειακών αναγκών του αμπελώνα ή να διοχετευθεί στο δίκτυο, συμβάλλοντας τόσο στη μείωση του ενεργειακού κόστους όσο και στην αύξηση της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας της εγκατάστασης.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Από την ανάλυση των ημερήσιων τιμών βροχόπτωσης (Σχήμα 1) για τους δύο μετεωρολογικούς σταθμούς υπολογίστηκαν η μέση ετήσια βροχόπτωση (P), η μέγιστη (N_{dd,max}), η ελάχιστη (N_{dd,min}) και η μέση (N_{dd}) διάρκεια των μέγιστων ετήσιων άνομβρων περιόδων, όπως αποτυπώνονται στον Πίνακα 2. Οι δύο σταθμοί εμφανίζουν διαφορά στη μέση ετήσια βροχόπτωση. Ωστόσο, η διάρκεια των άνομβρων περιόδων τους παραμένει παρόμοια, κυμαινόμενη από περίπου 2,5 έως 3 συνεχόμενους μήνες. Πιο συγκεκριμένα, ο σταθμός "Νεμέα" καταγράφει μέση ετήσια βροχόπτωση P = 637 mm και μέση μέγιστη άνομβρη περίοδο 45,2 ημέρες, ενώ ο σταθμός "Νέα Αγχίαλος" παρουσιάζει χαμηλότερη μέση ετήσια βροχόπτωση P = 485,5 mm, συνοδευόμενη από μια ελαφρώς μεγαλύτερη μέση μέγιστη άνομβρη περίοδο 52,1 ημερών.

Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά των μετεωρολογικών σταθμών των περιοχών μελέτης. Οι μεταβλητές που εξετάζονται είναι η μέση ετήσια βροχόπτωση (P), η μέση (N_{dd}), η μέγιστη (N_{dd,max}) και η ελάχιστη (N_{dd,min}) τιμή των μέγιστων ετήσιων άνομβρων περιόδων για τη χρονοσειρά μελέτης (2001-2021).

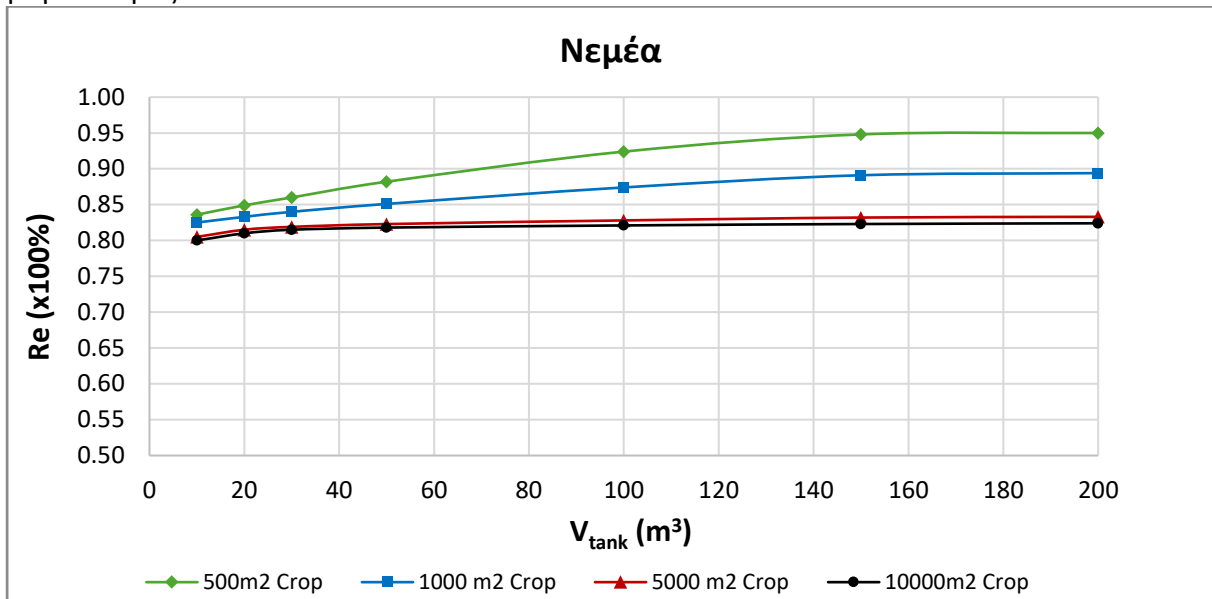
Μετεωρολογικός Σταθμός	Περιοχή	Υψόμετρο (m)	Γεωγραφικό Μήκος (Deg.)	Γεωγραφικό Πλάτος (Deg.)	Βροχόπτωση P(mm)	N _{dd} (Days)	N _{dd max} (Days)	N _{dd min} (Days)
Νεμέα	Κορινθία	305	22.65780	37.82630	637	45.2	91	21
Νέα Αγχίαλος	Μαγνησία	320	22.7943	37.8170	485.5	52.1	94	26



Σχήμα 1. Κατανομή ημερήσιων τιμών βροχόπτωσης για την περίοδο 2001-2021 των περιοχών μελέτης.

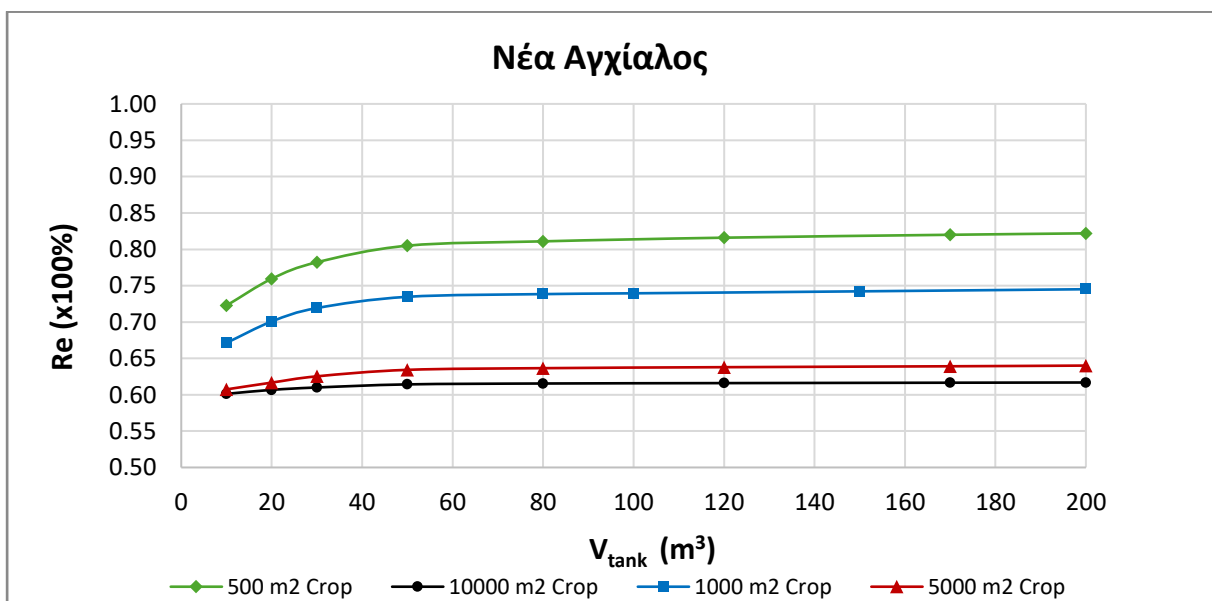
Στα Σχήματα 2 και 3 απεικονίζονται οι καμπύλες αξιοπιστίας του συστήματος συλλογής όμβριων υδάτων για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών συναρτήσει του όγκου της ομβροδεξαμενής για επιφάνεια συλλογής όμβριων 500 m² και καλλιεργούμενες εκτάσεις 500-10000 m² στις περιοχές Νεμέας και Νέας Αγχιάλου. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2, στην περίπτωση καλλιεργούμενης έκτασης 500 m², ο συντελεστής αξιοπιστίας (Re) του συστήματος κυμαίνεται από 84% έως 95% για ομβροδεξαμενές όγκου από 10 έως 200 m³, αντίστοιχα. Όσο αυξάνεται η καλλιεργούμενη έκταση μειώνεται ο συντελεστής αξιοπιστίας

για το ίδιο εύρος μεγέθους δεξαμενών δεδομένου ότι παραμένει ίδια η επιφάνεια ομβροσυλλογής. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι ο Re είναι σε όλες τις περιπτώσεις μεγαλύτερος του 80%.



Σχήμα 2. Καμπύλες αξιοπιστίας του συστήματος συλλογής όμβριων υδάτων για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών συναρτήσει του όγκου ομβροδεξαμενής (V_{tank}) για επιφάνεια συλλογής 500 m² και εκτάσεις καλλιέργειας που κυμαίνονται από 500 έως 10000 m² στην περιοχή της Νεμέας.

Στην περίπτωση της Νέας Αγχιάλου, ο συντελεστής αξιοπιστίας είναι μικρότερος, γεγονός αναμενόμενο δεδομένου ότι η περιοχή δέχεται περίπου 150 mm λιγότερη βροχόπτωση κατά μέσο όρο ετησίως, και αυτό βέβαια συνεπάγεται μικρότερη συλλογή βρόχινου νερού. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση καλλιεργούμενης έκτασης 500 m², ο συντελεστής αξιοπιστίας του συστήματος κυμαίνεται από 72% έως 82% για ομβροδεξαμενές όγκου από 10 έως 200 m³, αντίστοιχα. Ο Re μειώνεται όσο αυξάνεται η καλλιεργούμενη έκταση, αλλά παραμένει μεγαλύτερος του 60% σε όλες τις περιπτώσεις μελέτης.



Σχήμα 3. Καμπύλες αξιοπιστίας του συστήματος συλλογής όμβριων υδάτων για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών συναρτήσει του όγκου ομβροδεξαμενής για επιφάνεια συλλογής 500 m² και εκτάσεις καλλιέργειας που κυμαίνονται από 500 έως 10000 m² στην περιοχή της Νέας Αγχιάλου.

Περαιτέρω, αναλύοντας τα αποτελέσματα του μοντέλου παρατηρείται ότι ενώ η αύξηση του όγκου της δεξαμενής βελτιώνει την απόδοση του συστήματος, παρατηρούνται φθίνουσες αποδόσεις του συντελεστή αξιοπιστίας από κάποιους όγκους και άνω. Αυτό υποδηλώνει ότι η βελτιστοποίηση του μεγέθους της ομβροδεξαμενής με βάση τις πραγματικές ανάγκες άρδευσης είναι απαραίτητη για να μεγιστοποιηθεί η αποδοτικότητα και ταυτόχρονα να μειωθεί το κόστος. Επιπλέον, οι μεγαλύτερες εκτάσεις αμπελώνων απαιτούν μεγαλύτερες ποσότητες νερού, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει την αποτελεσματικότητα των συστημάτων συλλογής βρόχινου νερού, αν δεν προσαρμοστούν ανάλογα. Συνολικά, η μελέτη αυτή προσφέρει ένα αξιόπιστο πλαίσιο για την ενσωμάτωση των τεχνολογιών συλλογής βρόχινου νερού και φωτοβολταϊκών στην διαχείριση των αμπελώνων.

Τέλος, η παραγωγή πράσινης ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά πάνελ κυμαίνεται περίπου μεταξύ 149 και 156 MWh ετησίως, ανάλογα με τις κλιματικές συνθήκες και τον προσανατολισμό της εγκατάστασης των περιοχών μελέτης. Η παραγόμενη αυτή ενέργεια συμβάλλει ουσιαστικά στη μείωση του ενεργειακού αποτυπώματος του αμπελώνα και ενισχύει τη βιώσιμη ανάπτυξη μέσω αξιοποίησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα μελέτη διερεύνησε τη βελτιστοποίηση του υδατικού και ενεργειακού αποτυπώματος σε αμπελώνες ενσωματώνοντας συστήματα συλλογής όμβριων υδάτων και φωτοβολταϊκών σε δύο περιοχές της Ελλάδας με έντονο οινολογικό ενδιαφέρον. Στη Νεμέα, το σύστημα ομβροσυλλογής παρουσίασε συντελεστή αξιοπιστίας κοντά στο 95% για όγκο ομβροδεξαμενής 200 m³, επιφάνεια συλλογής ομβρίων από φωτοβολταϊκά 500 m² και καλλιεργούμενη έκταση 500 m². Στη Νέα Αγχιάλο, ο συντελεστής αξιοπιστίας για τα ίδια μεγέθη καλλιεργούμενης έκτασης, επιφάνειας συλλογής και όγκου ομβροδεξαμενής ανέρχεται σε 82%. Συνεπώς, ενσωμάτωση των φωτοβολταϊκών συστημάτων όχι μόνο συντελεί στην συλλογή του βρόχινου νερού, αλλά και στην παραγωγή πράσινης ηλεκτρικής ενέργειας. Στις περιοχές μελέτης, για επιφάνεια κάλυψης με φωτοβολταϊκά 500 m², η παραγωγή πράσινης ενέργειας κυμαίνεται μεταξύ 149 και 156 MWh ανά έτος.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι είναι εφικτή η σημαντική μείωση της εξάρτησης από το τοπικό δίκτυο, ενώ παράλληλα ενισχύεται η ενεργειακή αυτονομία. Μελλοντικές έρευνες θα μπορούσαν να επεκτείνουν το αντικείμενο μελέτης, συμπεριλαμβάνοντας οικονομικές αξιολογήσεις για την αποδοτικότητα κόστους και την απόδοση της επένδυσης σε διαφορετικές κλίμακες εφαρμογής. Επιπροσθέτως, η μελέτη της χρήσης αγροβολταϊκών, όπου τα πάνελ παρέχουν μερική σκίαση στα αμπέλια, θα μπορούσε να βελτιώσει περαιτέρω τα οφέλη αυτών των υβριδικών συστημάτων. Υιοθετώντας τέτοιες βιώσιμες πρακτικές, οι παραγωγοί αμπελώνων μπορούν να βελτιώσουν την αποδοτικότητα των πόρων, να ευθυγραμμιστούν με πολιτικές γεωργίας προσαρμοσμένες στην κλιματική αλλαγή και να συμβάλλουν στον ευρύτερο στόχο βιώσιμης διαχείρισης νερού και ενέργειας στην Ελληνική Γεωργία.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- European Commission, 2007. *Joint Research Centre, Annual production of electricity from photovoltaics in Greece*, https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis_en
- European Commission, (2020). *The European Green Deal*. Brussels: European Commission. Retrieved from https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en
- European Environment Agency, 2019. The impact of climate change on European ecosystems. Available at: <https://www.eea.europa.eu/publications/impact-climate-change-europe>
- Barron-Gafford, G.A., Pavao-Zuckerman, M.A., Minor, R.L., Sutter, L.F., Barnett-Moreno, I., Blackett, D.T., Thompson, M., Dimond, K., Gerlak, A.K., Nabhan, G.P. and Macknick, J.E., 2019. *Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands*. *Nature Sustainability*, 2(9), 848-855. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0364-5>
- Hellenic Ministry of Environment and Energy, 2023. *National energy and climate plan for Greece*. Available at: <https://ypen.gr/en/national-energy-climate-plan>
- Hellenic Statistical Authority. Annual Agricultural Statistical Survey, Crops Surveys 2020. *Area under vines with wine grapes and raisins by region* (<https://www.statistics.gr/en/statistics/-/publication/SPG63>)
- Londra, P.A., Kotsatos, I.-E., Theotokatos, N., Theocharis, A.T., Dercas, N., 2021. *Reliability Analysis of Rainwater Harvesting Tanks for Irrigation Use in Greenhouse Agriculture*. *Hydrology*, 8(3), 132. <https://doi.org/10.3390/hydrology8030132>
- Mitchell, V.G., McCarthy, D.T., Deletic, A., Fletcher, T.D. 2008. *Urban stormwater Harvesting—Sensitivity of a storage behaviour model*. *Environ. Model. Softw.* 23, 782–793.
- Solarway, 2025. *Αδειοδότηση φωτοβολταϊκών σταθμών [Οδηγός]*
- Vokas, G. A., and Lagogiannis, K. V., 2013. *PV Energy Production Over Greece: Comparison of Predicted and Measured Data of Medium-Scale Photovoltaic Parks*. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2(10), 3005–3011.
- Αγροτικός Οινοποιητικός Συνεταιρισμός Νέας Αγχιάλου «Δήμητρα», 2025. *Ιστορικά στοιχεία*. <https://dimitrawines.gr/>
- Ένωση Οινοπαραγωγών Αμπελώννα Πελοποννήσου (ΕΝΟΑΠ)., 2025. *Στοιχεία του Πελοποννησιακού Αμπελώνα*. <https://enoap.org/>
- Παπαζαφειρίου, Ζ. 1999. *Οι ανάγκες σε νερό των καλλιεργειών*. Εκδόσεις Ζήτη. ISBN 9789604315802.