

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ



Διπλωματική Εργασία

**ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΥ
ΥΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΑΠΟΡΡΩΝ ΣΕ
ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ**

Επιτροπή
Επ. Καθ. Ε. Βαρουχάκης (επιβλέπων),
Καθ. Μ. Γαλετάκης,
Καθ. Ζ. Αγιουτάντης (University of Kentucky)

Ζερβογιάννης Ιωάννης 2018020061

Χανιά 2024

Περιεχόμενα

Περίληψη	7
Abstract.....	9
1.Εισαγωγή	12
1.1 Η έννοια του Υγροβιότοπου	12
1.2 Ο υδρολογικός κύκλος.....	15
1.3 Υπόγεια ύδατα	17
1.3 Μεταλλευτική εκμετάλλευση και ύπαρξη νερού	19
2.Υδατικό Ισοζύγιο	26
2.1 Έννοια του Υδατικού ισοζυγίου.....	26
2.2 Σημασία του υδατικού ισοζυγίου στην περιοχή μελέτης.....	27
3.Περιοχή Μελέτης-Ολυμπιάδα	29
3.1 Ιστορικά στοιχεία και χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης.....	29
3.2 Υδρογεωλογία περιοχής Ολυμπιάδας	31
3.3 Κοιτασματολογία της περιοχής Ολυμπιάδα	36
4.Λογισμικό WETBUD	38
4.1 Λειτουργία του WETBUD.....	38
4.2 Μοντέλα προγράμματος	41
4.3 Καρτέλες προγράμματος.....	42
4.4 Εξισώσεις υπολογισμού του προγράμματος.....	43
4.5 Βάση δεδομένων Wetbud	46

5.Εισαγωγή δεδομένων.....	47
5.1 Μοντέλο Wetbud	47
5.2 Εισαγωγή δεδομένων στο πρόγραμμα.....	49
6.Αποτελέσματα Wetbud.....	56
6.1 Δεδομένα.....	56
6.2 Ανάλυση Δεδομένων	59
6.2.1 Υγροβιότοπος 1.500 m ² της περιοχής της Ολυμπιάδας	59
6.2.2 Υγροβιότοπος 4.500 m ² της περιοχής Ολυμπιάδας	67
6.2.3 Σύγκριση των 1.500m ² και των 4.500m ²	74
Συμπεράσματα	76
Μελέτη για περαιτέρω έρευνα.....	77
Βιβλιογραφία	79

Περιεχόμενα εικόνων

Εικόνα 1. Εικονική απεικόνιση του Υδρολογικού Κύκλου (NASA, 2024).....	16
Εικόνα 2. Εικονική απεικόνιση υπόγειων υδροφόρων (Υπόγεια ύδατα, 2020).....	18
Εικόνα 3 Ανυπαρξία διαπερατότητας του εδάφους (Thompson, T. M., Daniels, W. L., Whittecar, G. R., & Agioutantis, Z., 2016).....	22
Εικόνα 4 Ύπαρξη επικοινωνίας του νερού με το υπέδαφος (Thompson, T. M., Daniels, W. L., Whittecar, G. R., & Agioutantis, Z., 2016).....	23
Εικόνα 5 Η ροή του νερού (Thompson, T. M., Daniels, W. L., Whittecar, G. R., & Agioutantis, Z., 2016).....	24
Εικόνα 6 Υπερχείλιση του υδροβιότοπου (Thompson, T. M., Daniels, W. L., Whittecar, G. R., & Agioutantis, Z., 2016).....	25
Εικόνα 7. Θέση της Ολυμπιάδας σε σχέση με την υπόλοιπη Ελλάδα. (Google Maps, 2024).....	29
Εικόνα 8. Ανάπτυξη του υδρογραφικού δικτύου της περιοχής σε συνδυασμό με την τεκτονική της (Λαμπίρη, 2009)	32
Εικόνα 9. Κάλυψη γης της περιοχής μελέτης(cover, 2000)	34
Εικόνα 10. Ανάπτυξη του υδρογραφικού δικτύου στις έξι υπολεκάνες της περιοχής μελέτης (Λαμπίρη, 2009).....	35
Εικόνα 11 Καιρικά Δεδομένα (Thompson, T. M., Daniels, W. L., Whittecar, G. R., & Agioutantis, Z., 2016)	40
Εικόνα 12 Υπολογισμός μηνιαίων μετρήσεων (Thompson, T. M., Daniels, W. L., Whittecar, G. R., & Agioutantis, Z., 2016)	40
Εικόνα 13 Το προηγμένο μοντέλο του Wetbud (Thompson, T. M., Daniels, W. L., Whittecar, G. R., & Agioutantis, Z., 2016)	41

Εικόνα 14. Καρτέλα Περιγραφής και Σχολίων των Έργων (Wetbud, October 2022).....	42
Εικόνα 15. Καρτέλα Μετεωρολογικών Σταθμών των Έργων (Wetbud, October 2022).....	43
Εικόνα 16. Υψόμετρο Επιφανείας Νερού (Wetbud, October 2022).	48
Εικόνα 17. Καρτέλα υποβολής μεταβαλλόμενων στοιχείων υδροβιότοπου....	49
Εικόνα 18. Καρτέλα καθορισμού αρχικών εισροών και μέθοδος εισροής υπόγειων νερών	50
Εικόνα 19. Καρτέλα καθορισμού μεθόδου εκροών υπόγειων νερών.....	51
Εικόνα 20. Καρτέλα παραμέτρων τοποθεσίας για του υδροβιότοπο, συμπεριλαμβανομένων των συντελεστών αποθήκευσης και του μέσου υψομέτρου του βυθού.....	52
Εικόνα 21. Καρτέλα παραμέτρων καναλιού και δεδομένα ροής.	54
Εικόνα 22.Καρτέλα διαγράμματος κατασκευής τεχνητού καναλιού ροής.	55
Εικόνα 23. Καρτέλα επιλογής Project και παραμέτρων του.....	56
Εικόνα 24. Καρτέλα καθορισμού παραμέτρων του υδροβιότοπου της Ολυμπιάδας	58
Εικόνα 26. Καρτέλα αποτελεσμάτων στάθμης νερού για τον υδροβιότοπο των 1.500 m² κανονικής περιόδου της περιοχής της Ολυμπιάδας.	59
Εικόνα 27. Καρτέλα αποτελεσμάτων πραγματικού νερού κανονικής περιόδου με στάθμη νερού σε cm κατά την διάρκεια του έτους για τον υδροβιότοπο των 1.500 m² της περιοχής της Ολυμπιάδας.	60
Εικόνα 28. Καρτέλα αποτελεσμάτων κατακρήμνισης κανονικής περιόδου ανά μήνα σε cm για τον υδροβιότοπο των 1.500 m² της περιοχής της Ολυμπιάδας. .	61

Εικόνα 29. Καρτέλα αποτελεσμάτων απορροής από το υδροβιότοπο σε κανονική περίοδο ανά μήνα σε cm για τον υδροβιότοπο των 1.500 m² της περιοχής της Ολυμπιάδας.62

Εικόνα 30 Καρτέλα αποτελεσμάτων της καθαρής απώλειας/κέρδους νερού για τον υδροβιότοπο των 1500 m² της περιοχής Ολυμπιάδας ανά μήνα σε cm.63

Εικόνα 31. Καρτέλα διακυμάνσεων εκροής σε κανονική περίοδο ανά μήνα για τον υδροβιότοπο των 1.500 m² της περιοχής της Ολυμπιάδας.65

Εικόνα 32. Καρτέλα σύνθετων αποτελεσμάτων υδρολογικού ισοζυγίου του υδροβιότοπου σε κανονική περίοδο για υδροβιότοπο των 1.500 m² της περιοχής Ολυμπιάδας.66

Εικόνα 33. Καρτέλα υδρολογικού ισοζυγίου για τον υδροβιότοπο των 4.500 m² της περιοχής Ολυμπιάδας.68

Εικόνα 34. Καρτέλα υδρολογικού ισοζυγίου του υδροβιότοπου για πραγματικό νερό στην περιοχή της Ολυμπιάδας των 4.500 m² της περιοχής Ολυμπιάδας ανά μήνα σε cm.69

Εικόνα 35. Καρτέλα αποτελεσμάτων συνολικής απορροής ανά μήνα σε cm του υδροβιότοπου των 4.500 m² της περιοχής Ολυμπιάδας.70

Εικόνα 36. Καρτέλα αποτελεσμάτων καθαρής απώλεια/κέρδους νερού για τον υδροβιότοπο των 4.500 m² της περιοχής Ολυμπιάδας ανά μήνα σε cm.71

Εικόνα 37. Καρτέλα αποτελεσμάτων εκροής για τον υδροβιότοπο των 4.500 m² της περιοχής Ολυμπιάδας ανά μήνα σε cm.72

Εικόνα 38 Καρτέλα υδρολογικού ισοζυγίου για τον υδροβιότοπο των 4.500 m² της περιοχής Ολυμπιάδας ανά μήνα.73

Περίληψη

Η σύγχρονη μεταλλευτική δραστηριότητα διαμορφώνει ένα πολύπλοκο περιβάλλον που επηρεάζει σημαντικά τους υδατικούς πόρους, καθώς η εξόρυξη και η επεξεργασία μεταλλευμάτων συνδέονται στενά με τα υπόγεια και επιφανειακά ύδατα. Ένας υδροβιότοπος παίζει σημαντικό ρόλο στο περιβάλλον και η διατήρησή του σε οικολογική λειτουργία με το απαιτούμενο νερό είναι απαραίτητη. Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στη μοντελοποίηση του υδρολογικού ισοζυγίου ενός υδροβιότοπου με την χρήση του λογισμικού Wetbud, για πρώτη φορά στον ελληνικό χώρο, λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση επιφανειακών απορροών σε μεταλλευτική περιοχή.

Η μεταλλευτική δραστηριότητα συχνά παρεμβαίνει στον υδρολογικό κύκλο, επηρεάζοντας την ποσότητα και την ποιότητα των υδάτινων πόρων. Η αλληλεπίδραση αυτή μεταξύ της μεταλλευτικής δραστηριότητας και του υδρογεωλογικού περιβάλλοντος συνήθως οδηγεί σε σημαντικές αλλαγές στην ισορροπία των υδάτινων πόρων προκαλώντας ελλείψεις σε γειτονικές περιοχές, αλλαγές στη ροή των ποταμών καθώς και μεταβολές στην ποσότητα διαθέσιμου νερού για άλλες χρήσεις, όπως η γεωργία και η ύδρευση. Παράλληλα, δύναται να προκαλέσει ρύπανση που προέρχεται από βαρέα μέταλλα και άλλες τοξικές ουσίες στα υπόγεια και επιφανειακά ύδατα. Συνεπώς, η μοντελοποίηση του υδατικού ισοζυγίου αποτελεί βασικό εργαλείο για την κατανόηση αυτών των αλληλεπιδράσεων και την εκτίμηση των επιπτώσεών τους στο περιβάλλον.

Το Wetbud είναι ένα νέο εργαλείο υδρολογικού σχεδιασμού υδροβιότοπων που μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε τοποθεσία ενδιαφέροντος με τις κατάλληλες προσαρμογές, χρησιμοποιώντας τα διαθέσιμα μετεωρολογικά, τοπογραφικά, εδαφολογικά και γεω-υδρολογικά δεδομένα. Το Wetbud μπορεί είτε να λειτουργήσει στη βασική του μορφή όπου η τοπογραφία του υδροτόπου, οι εδαφικοί παράμετροι και η ροή των υπόγειων υδάτων λαμβάνουν προκαθορισμένες τιμές, είτε σε προηγμένη μορφή, όπου αυτές οι παράμετροι περιλαμβάνονται σε μια πιο σύνθετη προσέγγιση μέσω της ενσωμάτωσης του πακέτου MODFLOW. Το λογισμικό Wetbud χρησιμοποιεί μετεωρολογικά δεδομένα από τον πλησιέστερο σταθμό και έχει ως επιλογή τον καθορισμό υγρού-κανονικού-ξηρού (W-N-D) έτους. Έχει ακόμα τη δυνατότητα να χρησιμοποιεί δεδομένα στάθμης υπογείων υδάτων από σταθμούς παρατήρησης, για τα επιλεγμένα έτη W-N-D.

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, χρησιμοποιήσαμε το λογισμικό Wetbud για την εξέταση δύο σεναρίων που περιλαμβάνουν του υδρολογικό σχεδιασμό δύο υδροβιότοπων διαφορετικών διαστάσεων στη μεταλλευτική περιοχή της Ολυμπιάδας στην Χαλκιδική. Με βάση αυτό το μοντέλο, εξετάσαμε τα υδρολογικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής και εξετάσαμε τους παράγοντες που επηρεάζουν το υδατικό ισοζύγιο του υδροβιότοπου. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων μας κατέδειξε την καταλληλότητα του λογισμικού Wetbud για τον υδρολογικό σχεδιασμό υδροβιότοπων στον Ελλαδικό χώρο κατόπιν κατάλληλων προσαρμογών. Το υδρολογικό ισοζύγιο εκτιμήθηκε με επιτυχία και στα δύο σενάρια χρησιμοποιώντας ιστορικά υδρολογικά δεδομένα και διαθέσιμες μετρήσεις, υποδεικνύοντας την υδρολογική συμπεριφορά του υδροβιότοπου σε μηνιαίο βήμα στους διαφορετικούς τύπους υδρολογικών ετών που εξετάστηκαν.

The contemporary mining activity constitutes a diverse field significantly impacting water resources, as mining and ore processing are closely linked to the hydrogeological environment. A wetland plays an important role in the environment and maintaining it in an ecological function with the necessary water is essential. In this context, this thesis focuses on the modeling of the water balance of a wetland using an application, Wetbud, for the first time in Greece, under the influence of surface runoff in a mining area.

The hydrological cycle in mining areas is often shaped by the interaction between water deposits and mining activity, which brings about significant changes in the hydrogeological balance. This interaction between mining activity and the hydrogeological environment usually leads to significant changes in the balance of water resources, causing drought in neighboring areas or changes in river flow, and affects the amount of water available for other uses, such as agriculture and water supply.

Modeling the water balance is a crucial tool for understanding these interactions and predicting their environmental impacts.

Wetbud is a new tool for estimating wetland water budgets using available weather data and site-specific topographic, soil and geohydrologic data, coupled with mass balance mathematics. Wetbud is primarily intended as a planning tool for use in the design of created wetlands, but it can also be applied to native wetlands or wetland restoration sites where the required input parameters can be specified. Wetbud can be run in its basic form where wetland topography, soil parameters and groundwater flux are simplified, or in the advanced form, where these parameters are included in a more complex approach via integration of the MODFLOW package, a free 3D program that was developed by the United States Geological Survey. Both versions can also include overbank flow hydrology sources and the advanced form can also model sloping and irregular topography. The program downloads weather data from the nearest applicable station and selects appropriate wet-normal-dry (W-N-D) years following a modest user data clean-up step. Wetbud also has the ability to utilize existing short-term (e.g. 6 to 9 months) groundwater data from an up-gradient well to simulate longer-term groundwater level inputs for the selected W-N-D years.

For this purpose, we used Wetbud and analyzed the results from two wetlands of different dimensions in a mining area in Halkidiki and specifically in the area of Olympiada. Based on this model, we examined the various factors affecting the water balance of the wetland and analyzed the results of the program.

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες προς τον κ. Εμμανουήλ Βαρουχάκη, ο οποίος υπήρξε ο επιβλέπων καθηγητής της διπλωματικής μου εργασίας. Η συνεργασία μας ήταν εξαιρετική και εκτιμώ ιδιαίτερος, την μεγάλη ευκαιρία που μου δόθηκε ώστε να αναπτύξω αυτή την εργασία υπό την καθοδήγησή του.

Παράλληλα, θα επιθυμούσα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Αγιουτάντη για την πολύτιμη συνεισφορά του στην εκπόνηση της εργασίας μου, καθώς και τον καθηγητή κ. Γαλετάκη για την στήριξη του κατά την διάρκεια της φοίτησης μου.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την εταιρία <<Ελληνικός Χρυσός>> , καθώς χωρίς τα δεδομένα που έχουν μοιραστεί στην ιστοσελίδα τους δεν θα ήταν δυνατή η εκπλήρωση της εργασίας αυτής.

Τέλος, θέλω να εκφράσω ένα τεράστιο ευχαριστώ στην οικογένεια μου και τους φίλους που όλα αυτά τα χρόνια, με στήριξαν ηθικά και υλικά την προσπάθεια μου, όλη τη διάρκεια των σπουδών μου στο τμήμα του Πολυτεχνείου Κρήτης.

1.Εισαγωγή

1.1 Η έννοια του Υγροβιότοπου

Η επεξεργασία των λυμάτων είναι ένα ζήτημα που απασχόλησε την ανθρωπότητα από τότε που συνειδητοποίησε ότι η εκροή των λυμάτων από την μεταλλευτική δραστηριότητα σε επιφανειακά ύδατα όπως υδατορεύματα ή λίμνες οδηγεί στη δημιουργία πολλών προβλημάτων για το περιβάλλον, τα οικοσυστήματα και τον άνθρωπο. Η λύση αυτών των προβλημάτων οδηγείται στην δημιουργία ενός υγροβιότοπου.

Οι υγροβιότοποι αποτελούν τόπους που καλύπτονται εποχικά ή μόνιμα από ρηχά νερά, ή που δεν καλύπτονται ποτέ από νερά, αλλά έχουν στο υπόστρωμα (έδαφος, άμμο, χαλίκια κ.λπ.) υγρό για μεγάλο διάστημα του έτους. Η βλάστηση είναι ένα από τα ιδιαίτερα γνωρίσματα των υγροβιότοπων. Ένας υγροβιότοπος παρέχει τόπο διαμονής, τροφή και ενέργεια στους οργανισμούς. Πολλά είδη πουλιών, θηλαστικών, ψαριών, αμφιβίων, ερπετών και εντόμων, αφθονούν στους υγροβιότοπους. Αρκετά από αυτά είναι σπάνια, ενδημικά ή απειλούμενα με εξαφάνιση. (Μπονάζουντας, Μ., Καλλιδρομίτου, Δ., & Ζαχαρίας, Ι., 1995). Οι υγροβιότοποι είναι γνωστό ότι διαθέτουν γόνιμα εδάφη, υψηλή βιοποικιλότητα και έχουν πολλές περιβαλλοντικές λειτουργίες. (Hiza, 2017).

Οι υγροβιότοποι χρησιμεύουν για τη συγκράτηση των υδάτων κατά τις πλημμύρες, των ιζημάτων και των θρεπτικών συστατικών. Λειτουργούν επίσης, ως χημικά προστατευτικά μεταξύ των ορεινών και των βαθύτερων υδάτινων συστημάτων, καθαρίζοντας το νερό. (Mitsch, W. J., M. Straskraba, and S. E. Jorgensen, 1988)

Η υδρολογία των υγροβιότοπων αποτελεί κύριο στοιχείο για τον καθορισμό των άλλων βιολογικών, χημικών και φυσικών χαρακτηριστικών των υγροβιότοπων, όπως και των ορίων τους. Το υπάρχον νερό δημιουργεί συνθήκες αναερόβιες και αναγωγικές, στις οποίες αναπτύσσεται μια ορισμένη βλάστηση και γονιμότητα. Η υδρολογία των υγροβιότοπων προσδιορίζεται από διαφορετικά χαρακτηριστικά όπως η βροχόπτωση, η εξατμισοδιαπνοή, η απορροή, οι εισροές από τα υπόγεια νερά, η εγγύτητα σε ποτάμια, η τοπογραφική θέση, η εδαφική διαπερατότητα και η κάλυψη από φυτά.

Για να αναγνωριστεί μια περιοχή ως υδροβιότοπος θα πρέπει να εκπληρώνει χαρακτηριστικά ως προς το νερό με την παρουσία είτε γλυκού νερού , είτε αλμυρού νερού και με την ροή να είτε συνεχόμενη , είτε στάσιμη. Τα εδάφη των υδροβιότοπων πρέπει να είναι συνήθως κορεσμένα με νερό, αναερόβια, και να περιέχουν μεγάλη ποσότητα οργανικής ύλης. Επιπρόσθετα, τα φυτά στους υδροβιότοπους να είναι προσαρμοσμένα να ζουν σε υγρές συνθήκες, όπως καλαμιές, βούρλα και νερόφυτα.

Δυστυχώς, μια εξόρυξη επηρεάζει το νερό λόγω της μεγάλης χρήσης του στην επεξεργασία του μεταλλεύματος. Μέσω της διαδικασίας αυτής, τα ύδατα ρυπαίνονται από τα λύματα των ορυχείων που απορρίπτονται, τους σωρούς του εξορυγμένου μεταλλεύματος και τις αποθέσεις αποβλήτων. Η ρύπανση αυτή καταλήγει στα υπόγεια νερά, με αποτέλεσμα όλο και περισσότερο να απειλούνται οι πηγές νερού που εξαρτάται το πόσιμο νερό.

Η ρύπανση των υδάτινων πόρων δημιουργείται με διάφορους τρόπους, όπως με τη απελευθέρωση ουσιών στο υδάτινο περιβάλλον, από μεταλλευτική δραστηριότητα. Αυτές είτε διαλύονται, είτε κατακάθονται στον πυθμένα και επιφέρουν αλλαγές, επηρεάζοντας τους με ποικίλους τρόπους. Γενικότερα, η ρύπανση των υδάτινων πόρων επηρεάζει αρνητικά την ποιότητα ζωής και γενικότερα την υγεία όλων των οργανισμών που κατοικούν στον πλανήτη.

Οι εξορυκτικές δραστηριότητες έχουν σημαντικές συνέπειες στις πηγές καθαρού νερού και καθορίζουν την ποιότητα του. Επιδεινώνουν την διάβρωση του εδάφους και μπορούν να προκαλέσουν την καθίζηση σε αυτό επικίνδυνων ουσιών. Οι υδροβιότοποι παίζουν σημαντικούς και διαφορετικούς ρόλους στο περιβάλλον, όπως το να φιλτράρουν το νερό και αποτελούν δεξαμενές άνθρακα.

Συχνά χρησιμοποιούνται καινούριες τεχνολογίες όπως αυτή της Ξηράς Απόθεσης των αποβλήτων. Με αυτή την τεχνολογία μειώνεται το Περιβαλλοντικό αποτύπωμα στην περιοχή όπου αντί να αποθέτονται τα μεταλλευτικά κατάλοιπα της διεργασίας σε δύο χώρους, αποτίθενται σε ένα με σκοπό την μείωση του Περιβαλλοντικού αποτυπώματος στην περιοχή. Έχουν ήδη εφαρμοστεί έργα αποκατάστασης τέτοιας τεχνολογίας στην περιοχή της Ολυμπιάδας. (Δημητριάδης, 2021)

Όπως αναφέρεται στο άρθρο με θέμα <US Fish and Wildlife Service 1979 wetland classification> οι ταξινομήσεις υγροβιότοπων αν γίνουν, διευκολύνουν τη χαρτογράφηση και τη συλλογή πλήθους δεδομένων, τα οποία μπορούν να έχουν οικολογική βάση. Το πιο σημαντικό πρόβλημα αποτελεί η έλλειψη δεδομένων από διαφορετικούς τύπους υγροβιότοπων. Η εμπειρία που αποκτήθηκε από την χρησιμότητα του προγράμματος στις Ηνωμένες Πολιτείες μπορεί να χρησιμοποιηθεί, ώστε να καθοδηγήσει και να ενισχύσει τη χρησιμότητά της στον ελληνικό χώρο. (Cowardin, 1979).

Τα φυτά που καλλιεργούνται στη Β.Α. Χαλκιδική (όπως ελιές, άμπελος, σιτηρά κλπ) εμφανίζουν συμπτώματα τοξικότητας όταν στο περιβάλλον τους παρατηρούνται αυξημένες συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων. Η μείωση του pH του εδάφους και η αυξημένη περιεκτικότητα του σε βαρέα μέταλλα καθιστούν το έδαφος ακατάλληλο να χρησιμοποιηθεί ως ενδαίτημα από οργανισμούς και μικροοργανισμούς καθώς επίσης, και ως υπόστρωμα για την ανάπτυξη φυτών. (Χιώτη, 2012)

Η εφαρμογή του Wetbud σε μια μεταλλευτική περιοχή του ελληνικού χώρου για τον σχεδιασμό υγροβιότοπου μπορεί να διευκολύνει στην επεξεργασία των λυμάτων που προκύπτουν από τις μονάδες επεξεργασίας ορυκτών. Τα έλη (τέλματα) ανακατεύονται και μολύνουν το καθαρό νερό με συνέπεια την ρύπανση του υγροβιότοπου.

Μπορούν να μολύνουν τους υδάτινους πόρους του υγροβιοτόπου αλλά και να μειώσουν τη διαθέσιμη ποσότητα νερού σε αυτόν, οδηγώντας έτσι σε ξηρασία που επηρεάζει την πανίδα και τη χλωρίδα της περιοχής. Παράλληλα, μπορούν να αλλάξουν τη φυσική ροή του νερού, και κατ'έκταση τη φυσική λειτουργία του υγροβιοτόπου. Όλα τα παραπάνω μπορεί να οδηγήσουν στην απώλεια της βιοποικιλότητας του υγροβιότοπου, επηρεάζοντας έτσι τα οικοσυστήματα και τις φυσικές διεργασίες του.

1.2 Ο υδρολογικός κύκλος

Ο υδρολογικός κύκλος ξεκινά με την εξάτμιση του νερού από την επιφάνεια του ωκεανού προς την ατμόσφαιρα, το οποίο στη συνέχεια συμπυκνώνεται και πέφτει στη γη είτε ως βροχή είτε ως χιόνι. Η υγρασία μεταφέρεται σε όλο τον πλανήτη ως υετός και στη συνέχεια επιστρέφει στην επιφάνεια ως υγρασία. Μόλις το νερό φτάσει στο έδαφος, μπορεί να συμβεί μία από τις δύο διεργασίες: 1) Ένα μέρος του νερού μπορεί να εξατμιστεί στην ατμόσφαιρα ή 2) το νερό μπορεί να διαρρεύσει υπόγεια στο έδαφος. Η εξάτμιση είναι η μετατροπή του νερού από υγρή σε αέρια κατάσταση, μέσω της κατανάλωσης ηλιακής ενέργειας. Τα υπόγεια ύδατα μπορεί να απελευθερωθούν στην ατμόσφαιρα μέσω της διαπνοής ή μπορεί να καταλήξουν σε ωκεανούς, ποτάμια και ρυάκια (Κουτσογιάννης, 1997), (Στραβόλαιμος, 2017, Σεπτέμβριος). Το υπόλοιπο του νερού που πέφτει στην επιφάνεια της γης ονομάζεται απορροή, αυτό το νερό ρέει σε λίμνες, ποτάμια και ρυάκια και τελικά επιστρέφει στους ωκεανούς, όπου η διαδικασία αρχίζει ξανά.

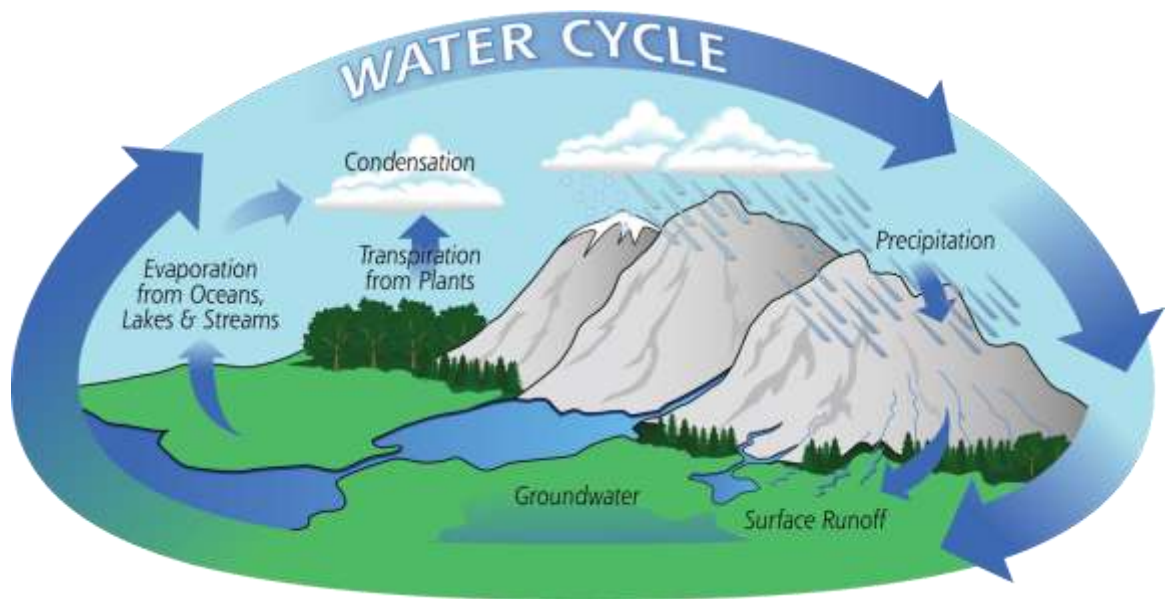
Τα κύρια συστατικά της επιφανειακής απορροής επηρεάζονται από τους ακόλουθους παράγοντες:

- Κλιματολογικούς (ένταση βροχοπτώσεων, υγρασία αέρα, άνεμοι, και εξάτμιση).
- Γεωμορφολογικούς (κλίση λεκάνης απορροής, αριθμός υδρογραφημάτων).
- Γεωλογικούς (τύποι πετρωμάτων, το πορώδες τους).
- Το είδος της φυτικής κάλυψης.

Η διείσδυση είναι η πιο σημαντική διαδικασία για τον προσδιορισμό της υδατικής οικονομίας μιας περιοχής, γιατί προωθεί την αποκατάσταση των υπόγειων ταμιευτήρων. Είναι αντιπροσωπευτικό του τμήματος της βροχόπτωσης που φτάνει στο έδαφος. Η ικανότητα διείσδυσης βασίζεται κυρίως στα ακόλουθα στοιχεία:

- Περιεκτικότητα σε υγρασία του εδάφους.
- Λιθολογία.
- Η κλίση του εδάφους.
- Ο τύπος του εδάφους.
- Βλάστηση.
- Ο όγκος και η κατανομή της έντασης της βροχόπτωσης.

Συντελεστής διείσδυσης θεωρείται η μέτρηση της διείσδυσης και είναι το ποσοστό του νερού που διεισδύει σε σχέση με τη συνολική βροχόπτωση. Το ποσοστό του συνολικού όγκου που διεισδύει κυμαίνεται από 3% (φλύσχη, φυλλίτες, σχιστόλιθοι, γνεύσιοι, ηφαιστειακά πετρώματα) έως 60% (ανθρακικά πετρώματα).

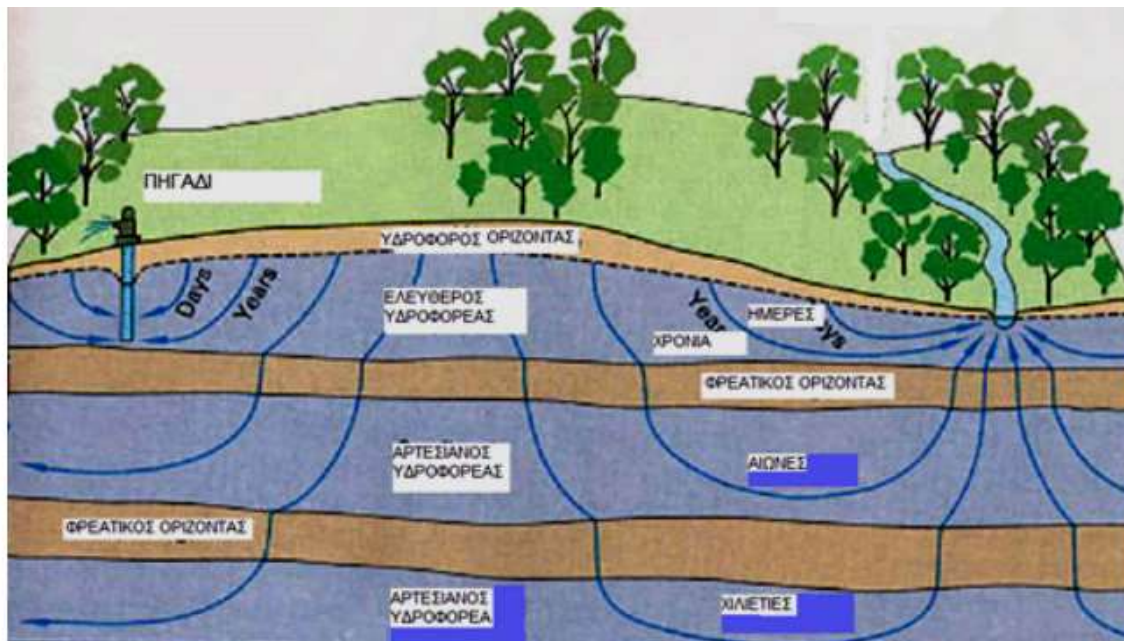


Εικόνα 1. Εικονική απεικόνιση του Υδρολογικού Κύκλου (NASA, 2024)

1.3 Υπόγεια ύδατα

Οι λεκάνες, που συλλέγουν ή αποστραγγίζουν το νερό από την επιφάνεια, συνοδεύονται με ένα δίκτυο υπόγειων πηγών νερού. Αυτή η πηγή νερού δεν ακολουθεί πάντα την ίδια διαδρομή με τα επιφανειακά νερά, με αποτέλεσμα, τα υπόγεια ύδατα να εκτρέπονται συχνά σε διαφορετική αποστράγγιση από τα επιφανειακά. Ωστόσο, τα υπόγεια ύδατα δεν μπορούν να διακριθούν από τα επιφανειακά. Και οι δύο αυτές πηγές νερού επηρεάζουν και επηρεάζονται από την ποιότητα και την ποσότητα τους. Τα υπόγεια νερά είναι η δεξαμενή γλυκού νερού που βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Αυτό το νερό είναι τυπικά χερσαίο, αλλά μπορεί επίσης να βρίσκεται κάτω από τον βυθό της θάλασσας, κοντά στις ακτές. Σε αρκετά σπήλαια, εντοπίζουμε μεγάλα ποτάμια και λίμνες κάτω από το έδαφος (π.χ. σπήλαιο Δέρου, σπήλαιο Λιμού). Τα υπόγεια ύδατα κατοικούν συνήθως στον κενό χώρο μεταξύ μεγαλύτερων βράχων. Η υπόγεια περιοχή στην οποία αποθηκεύεται το νερό ονομάζεται υδροφορέας. Το νερό ρέει στους υδροφορείς μέσω διαπερατού, κυρίως αμμώδους, εδάφους. Μεταξύ των μικρότερων σωματιδίων που αποτελούν το πορώδες έδαφος είναι χώροι που επιτρέπουν τη ροή του νερού. Από την άλλη, τα αργιλώδη εδάφη είναι αδιαπέραστα από το νερό, με αποτέλεσμα να μην αφήνουν το νερό να περάσει. Έτσι, για να δημιουργηθεί ένας υδροφόρος ορίζοντας, η επιφάνεια του εδάφους πρέπει να καλύπτεται από αμμώδη πετρώματα και κάτω από αυτά να υπάρχουν αργιλώδη πετρώματα (Υπόγεια ύδατα, 2020)

Υπάρχουν τρεις κατηγορίες υπόγειων υδροφορέων: ελεύθερος, αρτεσιανός και ο μεσαίος τύπος ημιαρτεσιανών. Οι ελεύθεροι ή υπόγειοι υδροφόροι ορίζοντες βρίσκονται συνήθως στην επιφάνεια του εδάφους. Δεν υπάρχει στρώμα πέτρας που να εμποδίζει την άμεση επικοινωνία των υπόγειων υδάτων με την επιφάνεια του εδάφους. Αυτοί οι υδροφορείς τροφοδοτούνται απευθείας με νερό από την επιφάνεια του εδάφους είτε μέσω βροχοπτώσεων είτε μέσω ποταμού ή λίμνης. Αντίθετα, οι αρτεσιανοί υδροφορείς καλύπτονται από ένα στρώμα βράχου που περιορίζεται στο πλάι. Αυτό συχνά βρίσκεται κάτω από έναν ξεχωριστό υδροφορέα που είναι απαλλαγμένος από πέτρες. (Υπόγεια ύδατα, 2020)



Εικόνα 2. Εικονική απεικόνιση υπόγειων υδροφόρων (Υπόγεια ύδατα, 2020).

Η αναπλήρωση των υδροφόρων επιτυγχάνεται φυσικά μέσω της βροχόπτωσης και άλλων πηγών νερού, αλλά χρησιμοποιούνται και ανθρωπογενείς μέθοδοι. Το νερό μπορεί να παραμείνει σε υπόγειους ταμιευτήρες για αιώνες, ακόμη και χιλιετίες. Όταν βγαίνει στην επιφάνεια, έχει πολύ καιρό ακόμα. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο οι ταμιευτήρες θεωρούνται μακροπρόθεσμα περιουσιακά στοιχεία. Αντίθετα, τα επιφανειακά ύδατα είναι προσωρινές δεξαμενές νερού που είναι βραχύβια. Το νερό από τις υπόγειες δεξαμενές ρέει στην επιφάνεια του εδάφους σε φυσικές πηγές ή γεωτρήσεις. Αυτοί οι φυσικοί πόροι μπορούν να δημιουργήσουν υδροβιότοπους (λίμνες, ποτάμια, έλη) ή οάσεις στην έρημο. Η συχνότητα εμπλουτισμού των υπόγειων ταμιευτήρων επηρεάζει τη διαχείριση των υπόγειων υδάτων, ενώ η υπερβολική άντληση νερού μπορεί να οδηγήσει σε εξάντληση του νερού του υδροφόρου ορίζοντα.

1.3 Μεταλλευτική εκμετάλλευση και ύπαρξη νερού

Στις εργασίες εξόρυξης ανοιχτού λάκκου, παράλληλα με τη συσσώρευση όμβριων υδάτων στη βάση τους, συναντώνται επιπρόσθετα προβλήματα συχνά από την παρουσία υπόγειων υδάτων στις περιοχές εξόρυξης και στη γειτονιά τους. Η κατανόηση των υδρογεωλογικών συνθηκών στην περιοχή εκμετάλλευσης τους, επιτρέπει τον υπολογισμό των αποθεμάτων νερού και των ρυθμών ροής του. Οι χρονικές μεταβολές τους διευκολύνουν την κατανόηση των θεμάτων που προκύπτουν κατά την εξόρυξη του κοιτάσματος, καθώς αυτά συνδέονται εγγενώς με την εντατική άντληση του κοιτάσματος. Είναι και η βέλτιστη λύση. (Δημητρακόπουλος, 2002), (Koumantakis, I., Dimitrakopoulos, D., & Vasileiou, E., 2005).

Λόγω των εισροών των βροχοπτώσεων, τα ύδατα και άλλοι πόροι εισέρχονται στις περιοχές εκμετάλλευσης, με αποτέλεσμα έναν απαράδεκτο αριθμό φαινομένων και τεχνικών δυσλειτουργιών, να συμβαίνει τόσο στην επιφανειακή όσο και στην υπόγεια εξόρυξη. Τα φαινόμενα αυτά μπορεί να κάνουν το κοιτάσμα αρκετά ακριβό ως την προς εκμετάλλευση του, λόγω τεχνικών και οικονομικών θεμάτων. Η παρουσία υδροφόρων στην περιοχή της εξόρυξης είναι σημαντική στην υδρογεωλογική γνώση της περιοχής. Η επιρροή τους είναι σημαντική στην εξεύρεση της κατάλληλης λύσης στο πρόβλημα, με την εύρεση του ασφαλέστερου και αποτελεσματικότερου τρόπου εξόρυξης υπόγειων πόρων, ώστε να αξιοποιήσουν παράλληλα τους υδάτινους πόρους της περιοχής. Έτσι με την συμμετοχή με την ορθολογική διαχείρισή τους, θα μειώσουν τις αρνητικές επιπτώσεις της εξόρυξης στην ποιότητα του νερού και στη διαθεσιμότητά του. (Younger, P. L., & Wolkersdorfer, C., 2004)

Η παρουσία νερού στην πλειονότητα της επικράτειας του αγροκτήματος θέτει σημαντικά προβλήματα. Η πιο συνηθισμένη πρόταση είναι ένα ενισχυμένο καθεστώς άντλησης που έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία νέων ζητημάτων σχετικά με το υδατικό ισοζύγιο της ευρύτερης περιοχής και τις σημαντικές και πολλαπλές επιπτώσεις της διατάραξής του. (Koumantakis, I., Dimitrakopoulos, D., & Vasileiou, E., 2005)

Οι μέθοδοι αξιοποίησης των αποθέσεων σε ανοιχτά δοχεία επιλέγονται με προσοχή επειδή έχουν άμεση σχέση με τις αρνητικές επιπτώσεις του νερού στις εργασίες εξόρυξης, συμπεριλαμβανομένης της σταθερότητας της κλίσης του ορυχείου (σταθερή κατάσταση του σκάφους, αποφυγή εισροών νερού και πλημμύρες, και η διασφάλιση της χωρητικότητας των ορόφων λειτουργίας είναι επαρκής). Οι μεγαλύτερες ανησυχίες που προκαλούνται από την παρουσία νερού στην πορεία ή την επίδοση του επαγγέλματος εξόρυξης είναι οι εξής : (Δημητρακόπουλος, 2002)

1. Στα βαθιά ορυχεία, το τελικό δάπεδο που χρησιμοποιείται είναι συχνά κάτω από την υδροστατική πίεση ή τον υδροφόρο ορίζοντα. Η τυπική προσέγγιση σε αυτό το ζήτημα είναι η δημιουργία ενός αποχετευτικού δικτύου για τη μείωση της στάθμης του νερού.

2. Η περιεκτικότητα σε νερό των υπερκείμενων μη συνεκτικών πετρωμάτων που πρέπει να αφαιρεθούν για να εκτεθεί η απόθεση υφίσταται συχνά ειδική επεξεργασία προκειμένου να διασφαλιστεί η σταθερότητα της κλίσης τους. Επιπλέον, η υπερβολική αφθονία μεταλλεύματος στο νερό μπορεί να οδηγήσει σε προβλήματα με τη φόρτωση, τη μεταφορά και την αποθήκευσή του.

3. Μεγάλες ποσότητες νερού σε υπαίθριες εργασίες μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντικά ζητήματα στην ασφαλή λειτουργία του ορυχείου και στο κόστος του κοιτάσματος.

4. Η συνοχή των υψηλών τεχνητών υψομέτρων και η πυροδότηση κατολισθήσεων σε αυτά εξαρτάται από την παρουσία υπόγειων υδάτων.

Η συνεχής άντληση που είναι απαραίτητη για την εκσκαφή των μίνας που αναφέρεται σε μεταλλευτικές εκσκαφές δηλαδή σε εξορύξεις ορυκτών και μεταλλευμάτων από την γη, και ο κίνδυνος ταπείνωσης που δημιουργείται από τη μείωση του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, έχει επίδραση στο υδάτινο οικοσύστημα της ευρύτερης περιοχής εξόρυξης. Η αποστράγγιση των δεξαμενών χωρίς προγραμματισμό ή η ορθολογική προσέγγιση προκαλεί διαταραχή του υδατικού ισοζυγίου της περιοχής. Με αποτέλεσμα να επηρεάζεται σημαντικά το οικολογικό σύστημα και η οικονομία της περιοχής.

Τα κυριότερα φαινόμενα που παρατηρούνται ή αναμένεται να συμβούν ως αποτέλεσμα της ανάπτυξης της μεταλλευτικής δραστηριότητας και της αποστράγγισης παρατίθενται παρακάτω : (Younger, P. L., & Wolkersdorfer, C., 2004).

1. Μείωση της τροφοδοσίας ή και ξήρανση φυσικών πηγών και φιλοσοφικών έργων (ή υδροηλεκτρικών σταθμών και φρεατίων), που βρίσκονται εντός των ορίων του δημιουργημένου κώνου μείωσης του υψομέτρου.

2. Πιο αποτελεσματική διέλευση του νερού μέσα από κοιλάδες ποταμών και λίμνες, αυτό προκαλεί μείωση του υψομέτρου τους και μπορεί να οδηγήσει στην εποχική αποξήρανση τους. Ως εκ τούτου, μια γιγάντια επίδραση στις παρακείμενες περιοχές των υδάτινων ρευμάτων.

3. Μείωση της υγρασίας του εδάφους δίπλα στον κώνο στην περιοχή του κώνου, μείωση της στάθμης του νερού στις περιοχές με ρηχά υπόγεια νερά.

4. Η εναπόθεση ιζηματογενών μορφών που είναι ευαίσθητες σε συμπύκνωση λόγω της επαγόμενης τάσης τους λόγω της αύξησης του ενεργού στρώματος που συμβαίνει με μεγάλες μειώσεις στο υδροστατικό επίπεδο. Το αποτέλεσμα είναι η παρουσία ζητημάτων επιφανειακής καθίζησης που σχετίζονται με ρωγμές και παραμορφώσεις στο οδικό δίκτυο και άλλα έργα υποδομής καθώς και σε οικιστικά και εμπορικά κτίρια της περιοχής.

Άλλα πιθανά περιβαλλοντικά ζητήματα που σχετίζονται με την ποιότητα του νερού είναι τα ακόλουθα:

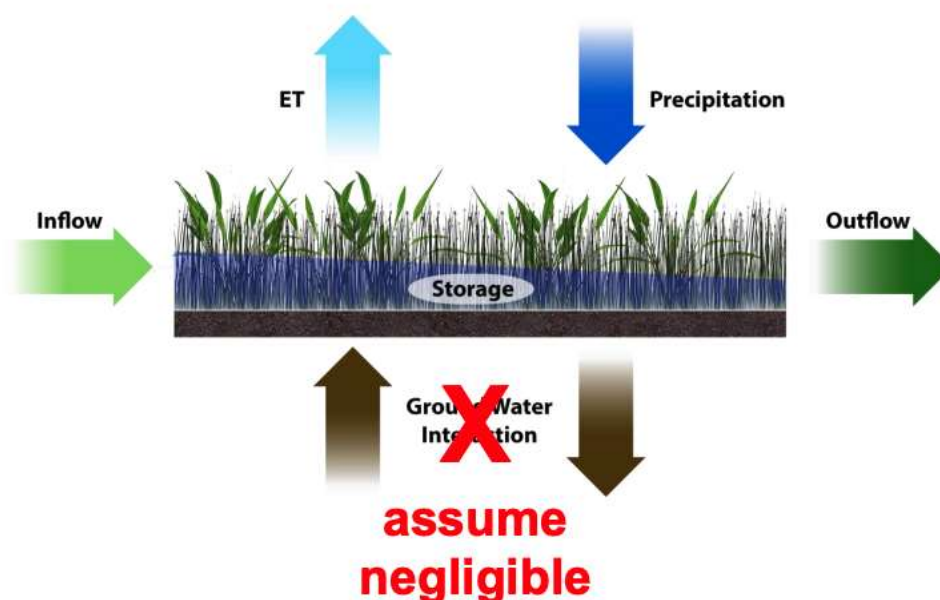
1. Η υποβάθμιση της ποιότητας των επιφανειακών υδάτων προκαλείται από την απελευθέρωση νερού από τον πυθμένα του σταθμού και τα επίπεδα αποθήκευσης, επιπλέον, παρατηρείται αύξηση των υποπροϊόντων αποθείωσης, (στάχτη), καυσίμων και λιπαντικών, καθώς και ως νερό από τις ίδιες πηγές του σταθμού.

2. Η υποβάθμιση της ποιότητας της υπόγειας πηγής νερού, ως αποτέλεσμα της διήθησης των μολυσμένων επιφανειακών υδάτων των ορυχείων.

Η δραστηριότητα της εξόρυξης και της μεταλλουργίας συνδέεται με το συνδυασμό θειούχων κατά τις βιομηχανικές διεργασίες και παράγει μεγάλες ποσότητες στερεών αποβλήτων και υγρών στραγγισμάτων που έχουν άμεση επίδραση στην ποιότητα του εδάφους, του νερού και της γης. Η όξινη αποστράγγιση είναι κοινή σε περιοχές που έχουν μεταλλευτική δραστηριότητα. Το όξινο χαρακτηριστικό προκαλείται από μια σειρά χημικών αντιδράσεων που σχετίζονται με την οξείδωση των θειούχων ορυκτών, η προέλευση των οποίων είναι οι άγονες ουσίες και οι συνδυασμένες επιδράσεις νερού και οξυγόνου.

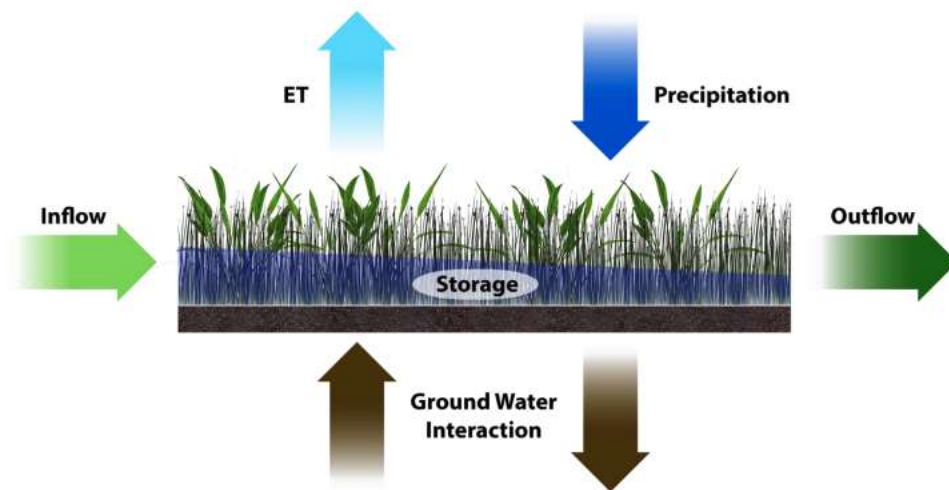
Κατά την εξέλιξη της ανασκαφής καθώς και μετά την ολοκλήρωσή της, έχουμε την προέλευση του νερού. Η προέλευση του νερού είναι το μολυσμένο νερό από αποικοδομήσιμη ποιότητα (που αποτελείται από προϊόντα εξόρυξης, αποστειρωμένα υλικά και διήθηση) που προέρχεται από τις περιοχές εξόρυξης και ρέει στις καθορισμένες περιοχές, που ζουν κοντά σε αυτό και σε άλλες πηγές νερού όπως λίμνες, υγρότοποι, ρυάκια και υδροφορείς. Αυτό το νερό πρέπει να θεωρείται μέρος του υδρολογικού κύκλου.

Οι υγροβιότοποι βελτιώνουν την ποιότητα του νερού. Από το 1780, περίπου το 53 % από όλους τους υγροβιότοπους της Αμερικής έχουν χαθεί. (Thompson, T. M., Daniels, W. L., Whittecar, G. R., & Agioutantis, Z., 2016)



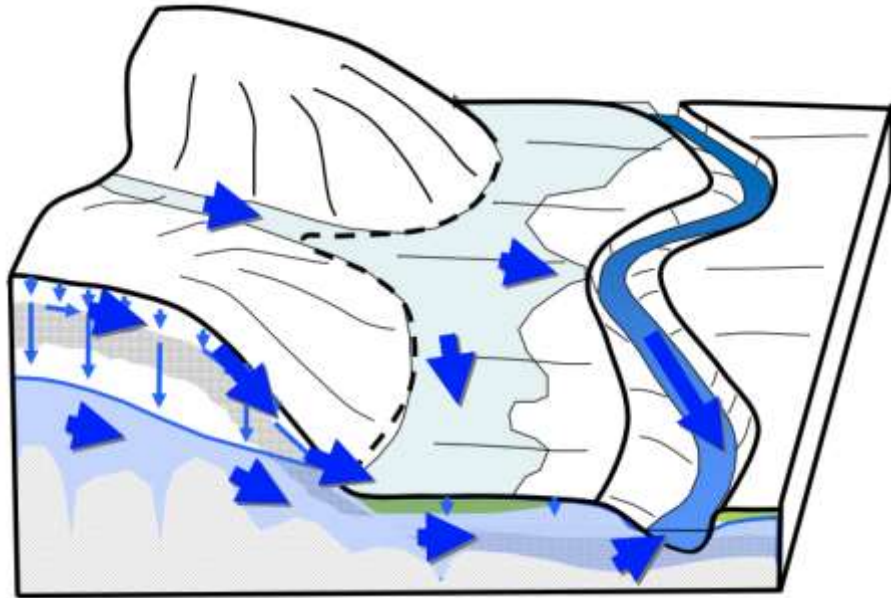
Εικόνα 3 Ανυπαρξία διαπερατότητας του εδάφους (Thompson, T. M., Daniels, W. L., Whittecar, G. R., & Agioutantis, Z., 2016)

Όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα, λύση αποτελεί η μη ύπαρξη επικοινωνίας με το υπέδαφος. Ένας απλός τρόπος για να υλοποιηθεί αυτή είναι στο έδαφος να υπάρχει συμπιεσμένο χώμα και έτσι, το νερό να μην απορροφάτε. Οι ρύποι και τα ιζήματα καθιζάνουν και παγιδεύονται στον πυθμένα και το νερό απομακρύνεται. Εάν αγνοηθεί το νερό που φεύγει στο υπέδαφος, θα παραμείνει υγρός ο υγροβιότοπος. Το κλίμα επίσης επηρεάζει την εξάτμιση του νερού.



Εικόνα 4 Ύπαρξη επικοινωνίας του νερού με το υπέδαφος (Thompson, T. M., Daniels, W. L., Whittecar, G. R., & Agioutantis, Z., 2016)

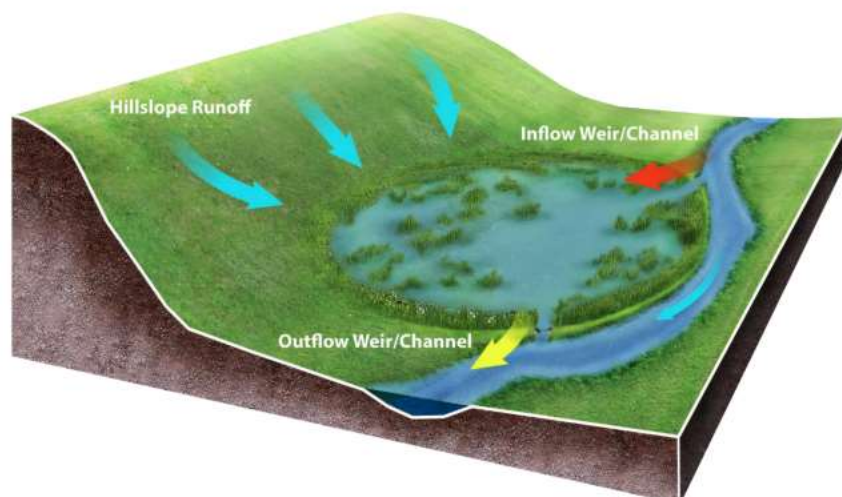
Οι περισσότεροι υδροβιότοποι είναι πολύ υγροί για να λειτουργήσουν ικανοποιητικά. Όταν υπάρχει επικοινωνία με το έδαφος υπάρχει και αρκετή ανταλλαγή.



Εικόνα 5 Η ροή του νερού (Thompson, T. M., Daniels, W. L., Whittecar, G. R., & Agioutantis, Z., 2016)

Τα κλιματικά ιστορικά δεδομένα μπορείς να τα ξαναχρησιμοποιήσεις μετά από την εφαρμογή και αυτά τα δεδομένα που λαμβάνονται από την εφαρμογή μπορούν να ξανά χρησιμοποιηθούν. Το πιο δύσκολο αποτελεί να λάβει κανείς ένα καλό σύνολο δεδομένων.

Το νερό όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα μπορεί να υπερπηδήσει και να οδηγηθεί στο κανάλι.



Εικόνα 6 Υπερχείλιση του υγροβιότοπου (Thompson, T. M., Daniels, W. L., Whittecar, G. R., & Agioutantis, Z., 2016)

Όπως αναφέρεται στο άρθρο του 2024, η πρωτογενής παραγωγή και η αναπνοή του οικοσυστήματος καθοδηγούνται από βιομάζα φυκών και επηρέαζαν και εκεί ένα υγροβιότοπο. (Agioutanti, R., Ford, W. I., Sama, M. P., & McGill, T., 2024)

2.Υδατικό Ισοζύγιο

2.1 Έννοια του Υδατικού ισοζυγίου

Το υδατικό ισοζύγιο υδροβιότοπου υπό την επίδραση επιφανειακών απορροών σε μεταλλευτική περιοχή, αφορά τη μελέτη της ροής του νερού σε έναν υδροβιότοπο στο πλαίσιο μιας περιοχής που χρησιμοποιείται για μεταλλευτικούς σκοπούς. Αυτό περιλαμβάνει την ανάλυση των υδρολογικών διεργασιών που συμβαίνουν στο έδαφος, την επιφάνεια, και το υπόγειο νερό, καθώς και την αξιολόγηση των επιπτώσεων της μεταλλευτικής δραστηριότητας στο υδάτινο περιβάλλον.

Η οικολογική λειτουργία ενός υδροβιότοπου εξαρτάται από την υδρολογία του υδροβιότοπου. Οπότε, αν υφίσταται σωστός προσδιορισμός της ποσότητας του νερού που υπάρχει, αυτό είναι το απαραίτητο στοιχείο για την επιτυχή δημιουργία υδροβιότοπων. (Neuhaus, 2013)

Η επίδραση των επιφανειακών απορροών αναφέρεται στην ροή των νερών στην επιφάνεια του εδάφους, που μπορεί να προκαλέσει αλλαγές στο υδατικό ισοζύγιο του υδροβιότοπου. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αλλαγές στην ποσότητα και την ποιότητα του νερού, επηρεάζοντας την οικολογική ισορροπία του υδροβιότοπου και την ποικιλότητα των ειδών.

Η αυξημένη ένταση των βροχοπτώσεων στις μεταλλευτικές περιοχές τα τελευταία χρόνια έχει σημαντικές επιπτώσεις όπως ο μεγαλύτερος όγκος επιφανειακών απορροών. Όταν η ποσότητα των βροχοπτώσεων υπερβαίνει την ικανότητα διοχέτευσης του εδάφους, το νερό συγκεντρώνεται στην επιφάνεια και ρέει προς τη χαμηλότερη κλίση του εδάφους, με πιθανές επιπτώσεις σε διάφορες πτυχές της μεταλλευτικής δραστηριότητας. Αυτή η αυξημένη επιφανειακή απορροή μπορεί να προκαλέσει διαβρώσεις, άνευ θετές κατασκευές και πλημμύρες, δυσχεραίνοντας τη λειτουργία των υδρολογικών δομών και των συστημάτων απορροής.

Επιπλέον, η ποιότητα της επιφανειακής απορροής μπορεί να επηρεαστεί από την αυξημένη ένταση των βροχοπτώσεων. Η απορροή από μεταλλευτικές περιοχές μπορεί να μεταφέρει ρυπαντικές ουσίες, όπως ιζήματα, βαρέα μέταλλα και χημικά που χρησιμοποιούνται στις επιχειρήσεις εξόρυξης. Η συνδυασμένη αύξηση του όγκου της απορροής και της μεταφοράς ρυπαντικών ουσιών μπορεί να επιδεινώσει τα θέματα ποιότητας του νερού, με επιπτώσεις στη βιοποικιλότητα, την ανθρώπινη υγεία και τις υπηρεσίες του οικοσυστήματος.

Επιπροσθέτως, οι αλλαγές στα πρότυπα της επιφανειακής απορροής μπορεί να επηρεάσουν την υδρολογική ισορροπία των μεταλλευτικών περιοχών. Οι έντονες βροχοπτώσεις μπορεί να οδηγήσουν σε μεγάλη απορροή, μειώνοντας τις ποσότητες της εισροής νερού και της επαναφόρτισης του υπόγειου υδροφόρου. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε διακυμάνσεις στη διαθεσιμότητα του νερού, επηρεάζοντας τη βιωσιμότητα των υδατικών πόρων για τις εξορύξεις, τις τοπικές κοινότητες και τα οικοσυστήματα. Ακόμη, οι αλλαγές στα πρότυπα της απορροής μπορεί να διαταράξουν τα φυσικά δίκτυα αποστράγγισης και τις διαδρομές ροής, δυσκολεύοντας περαιτέρω τις προσπάθειες διαχείρισης του νερού.

2.2 Σημασία του υδατικού ισοζυγίου στην περιοχή μελέτης

Το υδατικό ισοζύγιο είναι ένας κρίσιμος παράγοντας για τη διαχείριση υδάτινων πόρων, ιδιαίτερα σε μεταλλευτικές περιοχές όπως η Ολυμπιάδα Χαλκιδικής. Η Χαλκιδική είναι γνωστή για τα μεταλλεία της, και η Ολυμπιάδα φιλοξενεί σημαντικές εξορυκτικές δραστηριότητες. Η μεταλλευτική βιομηχανία απαιτεί μεγάλες ποσότητες νερού για τις διαδικασίες εξόρυξης και επεξεργασίας μεταλλευμάτων. Ένα ισορροπημένο υδατικό ισοζύγιο εξασφαλίζει την απρόσκοπτη λειτουργία αυτών των βιομηχανιών και μειώνει τον κίνδυνο περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την υπεράντληση ή τη μόλυνση των υδάτινων πόρων.

Η Ολυμπιάδα βρίσκεται σε περιοχή με σημαντικές υδατικές απαιτήσεις λόγω της μεταλλευτικής δραστηριότητας και της γεωργίας. Ένα καλά διαχειριζόμενο υδατικό ισοζύγιο διασφαλίζει ότι υπάρχουν επαρκείς πόροι, τόσο για τις βιομηχανικές όσο και για τις αγροτικές ανάγκες, χωρίς να διακινδυνεύετέ η βιωσιμότητα των αποθεμάτων νερού.

Η μεταλλευτική δραστηριότητα μπορεί να προκαλέσει ρύπανση σε υδάτινα συστήματα μέσω των αποβλήτων και των μεταλλικών διαρροών. Ένα σταθερό υδατικό ισοζύγιο βοηθά στη διαχείριση των αποβλήτων και στη μείωση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης, διατηρώντας έτσι τη χημική ισορροπία των υδάτων.

Η διατήρηση ενός υγιούς υδατικού ισοζυγίου είναι ζωτικής σημασίας για την τοπική κοινωνία εξαρτάται από τους υδάτινους πόρους για άρδευση και άλλες καθημερινές ανάγκες. Αυτό συμβάλλει στην κοινωνική σταθερότητα και την ευημερία των κατοίκων.

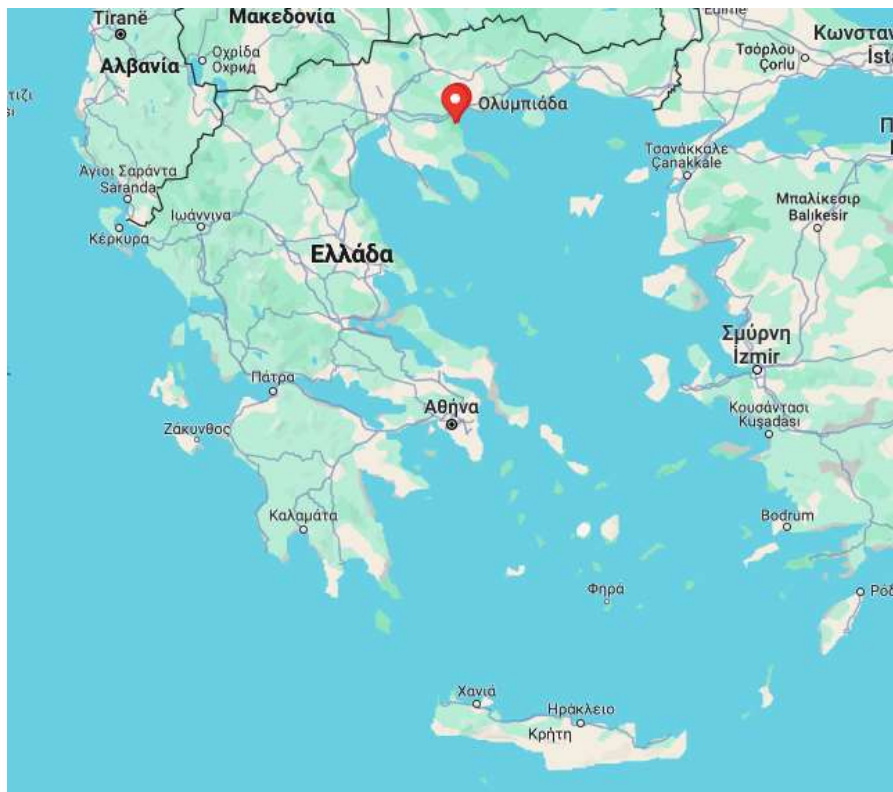
Η κλιματική αλλαγή επηρεάζει τον κύκλο του νερού, καθιστώντας την αειφόρο διαχείριση του νερού ακόμη πιο σημαντική. Η παρακολούθηση και η διατήρηση του υδατικού ισοζυγίου βοηθά στην προσαρμογή των μεταβαλλόμενων κλιματικών συνθηκών και στην εξασφάλιση της μακροχρόνιας διαθεσιμότητας νερού.

Συνοψίζοντας, το υδατικό ισοζύγιο στην μεταλλευτική περιοχή της Ολυμπιάδας Χαλκιδικής είναι ζωτικής σημασίας για την προστασία των φυσικών πόρων, την περιβαλλοντική βιωσιμότητα, την κοινωνική ευημερία και την οικονομική ανάπτυξη της περιοχής.

3.Περιοχή Μελέτης-Ολυμπιάδα

3.1 Ιστορικά στοιχεία και χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης

Η Ολυμπιάδα είναι ένα παραθαλάσσιο χωριό του δήμου Αριστοτέλη, που βρίσκεται βορειοανατολικά του νομού Χαλκιδικής στις εκβολές του κόλπου της Ιερισσού, με πληθυσμό 741 κατοίκων (από την απογραφή του 2011). Το χωριό ιδρύθηκε περί το 1923, από τους πρόσφυγες της Μικράς Ασίας και συγκεκριμένα από την Αγία Κυριακή του Αιγιαλού.



Εικόνα 7. Θέση της Ολυμπιάδας σε σχέση με την υπόλοιπη Ελλάδα. (Google Maps, 2024)

Τα πλούσια αποθέματα μικτών θειούχων μεταλλευμάτων, που έχουν τεκμηριωθεί από την αρχαιότητα, ήταν η κύρια πηγή πλούτου για το χωριό αυτό. Έκτοτε, άνθρωποι από τις γύρω περιοχές, αλλά και από άλλα μέρη της Ελλάδας, άρχισαν να συγκεντρώνονται στη περιοχή προκειμένου να συμμετάσχουν στη διαδικασία εξόρυξης. Ο πληθυσμός αυξήθηκε τρομερά λόγω των προσφύγων που κατέφυγαν εδώ λόγω της μικρασιατικής τραγωδίας. Το 1932 το χωριό σημαδεύτηκε από τον σεισμό που επικεντρώθηκε στον κόλπο της Ιερισσού. Τα επόμενα χρόνια ανακατασκευάστηκε σχεδόν εξ ολοκλήρου (Ολυμπιάδα, 2024)

Η εξόρυξη θεωρούνταν απαραίτητη για την αρχαία Ελλάδα. Τα ορυκτά από το ορυχείο Λαυρίου στήριζαν την οικονομική ευημερία της Αθήνας κατά την κλασική εποχή και θωράκισαν την πόλη από την περσική εισβολή.

Οι κοινότητες των χρυσωρυχείων του Παγγαίου συνέβαλαν στην ευημερία της Μακεδονικής δυναστείας υπό τον Φίλιππο Β' και χρηματοδότησαν τις στρατιωτικές εκστρατείες του Μεγάλου Αλεξάνδρου. Ο Ηρόδοτος τεκμηρίωσε την ύπαρξη μεταλλείων της μακεδονικής εποχής, επισημαίνοντας ότι επί Φιλίππου Β' οι σκλάβοι θα συμμετείχαν στην εξόρυξη μεταλλευμάτων που ήταν θειούχα.

Η πρακτική της εξόρυξης συνεχίστηκε μέχρι τη ρωμαϊκή περίοδο. Ωστόσο, η κατάληψη των ισπανικών πόρων χρυσού και αργύρου από τους Ρωμαίους είχε ως αποτέλεσμα τον μαρασμό των μινάδων της Χαλκιδικής για μεγάλο χρονικό διάστημα. Η εξάντλησή τους ξανάρχισε κατά τη βυζαντινή περίοδο.

Με την εξόρυξη και τη τήξη θειούχων μεταλλευμάτων, η περιοχή απέδωσε χρυσό και ασήμι στην Υψηλή Πύλη. Το όνομα Metallia Kassandra αναγράφεται το έτος 1893, έτος κατά το οποίο χορηγήθηκε η άδεια σε εταιρεία με έδρα το Παρίσι της Οθωμανικής Αυτοκρατορίας. Ο 19ος αιώνας έγινε μάρτυρας της μετάβασης από την αυτόνομη κυβέρνηση στην εξαρτημένη εργασία, υπό τον έλεγχο ενός εταιρικού διευθυντή με σκοπό την εκμετάλλευση των ορυχείων. Μέχρι το 1900, 72.000 τόνοι μεταλλεύματος είχαν καεί στους φούρνους της εταιρείας. Η εταιρεία εκμεταλλεύτηκε τα δευτερογενή μεταλλεύματα μαγγανίου, τα συστατικά σιδήρου της Μαύρης Πέτρας, της Πιαβίτσας, του Μπασδέκη και της Ολυμπιάδας. Το 1901 ξεκίνησε η εξόρυξη επιφανειακής εξόρυξης σιδηροπυρίτη στο Μαντέμ Λάκκο και συνεχίστηκε μέχρι το 1974, κυρίως με υπόγεια μέθοδο.

Στα τέλη της δεκαετίας του '70, στην είσοδο του οικισμού, ο Οργανισμός Εργατικής Κατοικίας κατασκεύασε τα δημοφιλή συγκροτήματα εργατικών κατοικιών της εποχής. Ήδη από το 1960, η εταιρεία είχε παραχωρήσει στον Άγγλο Julian Hunter την εξουσία να εξερευνήσει τους πόρους μαγγανίου στην Πιάβιτσα. Η πρακτική της εξόρυξης μαγγανίου έγινε λιγότερο κοινή και τελικά σταμάτησε στη δεκαετία του 1980. Απομεινάρια του ορυχείου του Hunter's Piavitsa (το εργοστάσιο εμπλουτισμού και ο βόθρος, καθώς και η υπαίθρια εξόρυξη μεταλλευμάτων μαγγανίου), βρίσκονται στη διαδρομή μεταξύ Στάγειρων και Νεοχωρίου, σε άμεση αντιστοιχία με το όνομα του ιδιοκτήτη ως τοπωνύμιο.

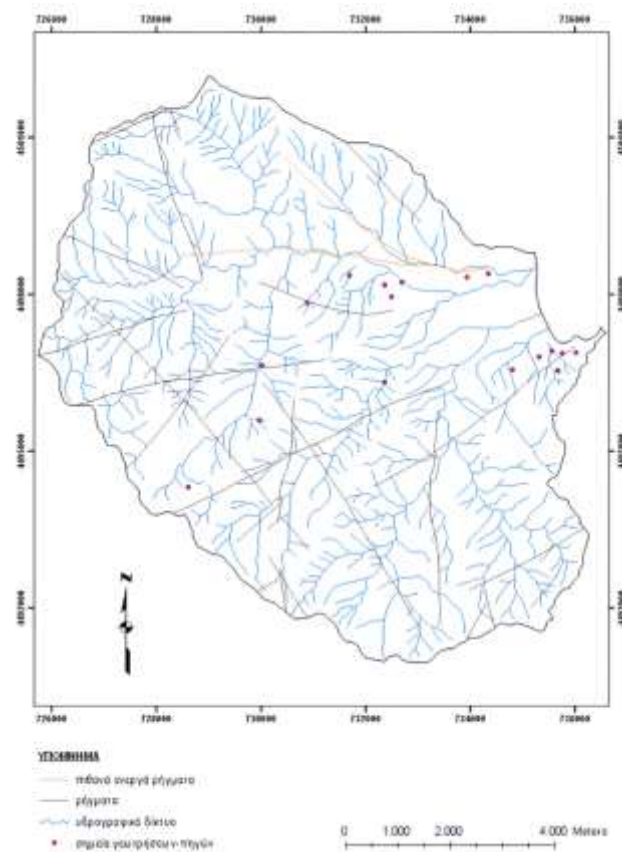
Το κοίτασμα μολύβδου, ψευδαργύρου και χρυσού-αργύρου της Ολυμπιάδας εντοπίστηκε κατά τα τέλη της δεκαετίας του 1960 από την ΑΕΕΧΠ & Λιπασμάτων, η παραγωγή στο μεταλλείο άρχισε το 1972 και συνεχίστηκε μέχρι το 1995. Το 1976 κατασκευάστηκε στην Ολυμπιάδα το νέο εργοστάσιο εμπλουτισμού, οπότε τα προϊόντα της εκεί μεταλλευτικής δραστηριότητας έρχονταν έτοιμα προς φόρτωση στην σκάλα του Στρατωνίου. Σήμερα τα Μεταλλεία Κασσάνδρας, αφού πέρασαν διαδοχικά από την ιδιοκτησία των εταιρειών TVX Hellas A.E. και Kinross Gold Corporation έχουν περιέλθει στα χέρια της Ελληνική Χρυσός Α.Ε., θυγατρική της καναδικής εταιρείας εξορύξεων European Goldfields (Διαμαντοπούλου, 2023)

3.2 Υδρογεωλογία περιοχής Ολυμπιάδας

Η υδρολογική λεκάνη της Ολυμπιάδας βρίσκεται στο βορειοανατολικό τμήμα της Χαλκιδικής και στις βόρειες πλαγιές του οροπεδίου του Στρατονικού. Στην επίπεδη περιοχή της λεκάνης βρίσκεται η περιοχή δημοτικής διαμέρισης της Ολυμπιάδας, η οποία απέχει 2,0 χιλιόμετρα από τις ανοικτές εξορύξεις μεταλλευμάτων που υπάρχουν στην περιοχή. Σημειώνεται επίσης ότι κατά μήκος της παλαιάς εθνικής οδού, στην παράκτια περιοχή, υπάρχουν κατοικίες και τουριστικές εγκαταστάσεις.

Γεωγραφικά, η ευρύτερη περιοχή της Ολυμπιάδας αποτελείται από τα τρία βασικά τμήματα. Το πρώτο είναι το λοφώδες έως ημιορεινό τοπίο με υψόμετρο που κυμαίνεται από 30 μέχρι 900 μέτρα και αποτελείται από τις υπολεκάνες, του Μαυρόλακκα-Ξηρόλακκα οι οποίες έχουν έκταση 5,26 και 35,63 τετραγωνικά χιλιόμετρα αντίστοιχα. Το δεύτερο ρέμα είναι το "Ολυμπιάδα", με κάλυψη λεκάνης 29,22 τετραγωνικά χιλιόμετρα. Τέλος, έχουμε την υπολεκάνη του Μπασδέκη Λάκκου και του Μπαξίνα Λάκκος, που εκτείνεται από το βορρά προς το νότο, μια αλλούβια λεκάνη με υψόμετρο που φτάνει μέχρι τα 30 μέτρα με ένα λοφώδες τοπίο στον Πετρόλακκο.

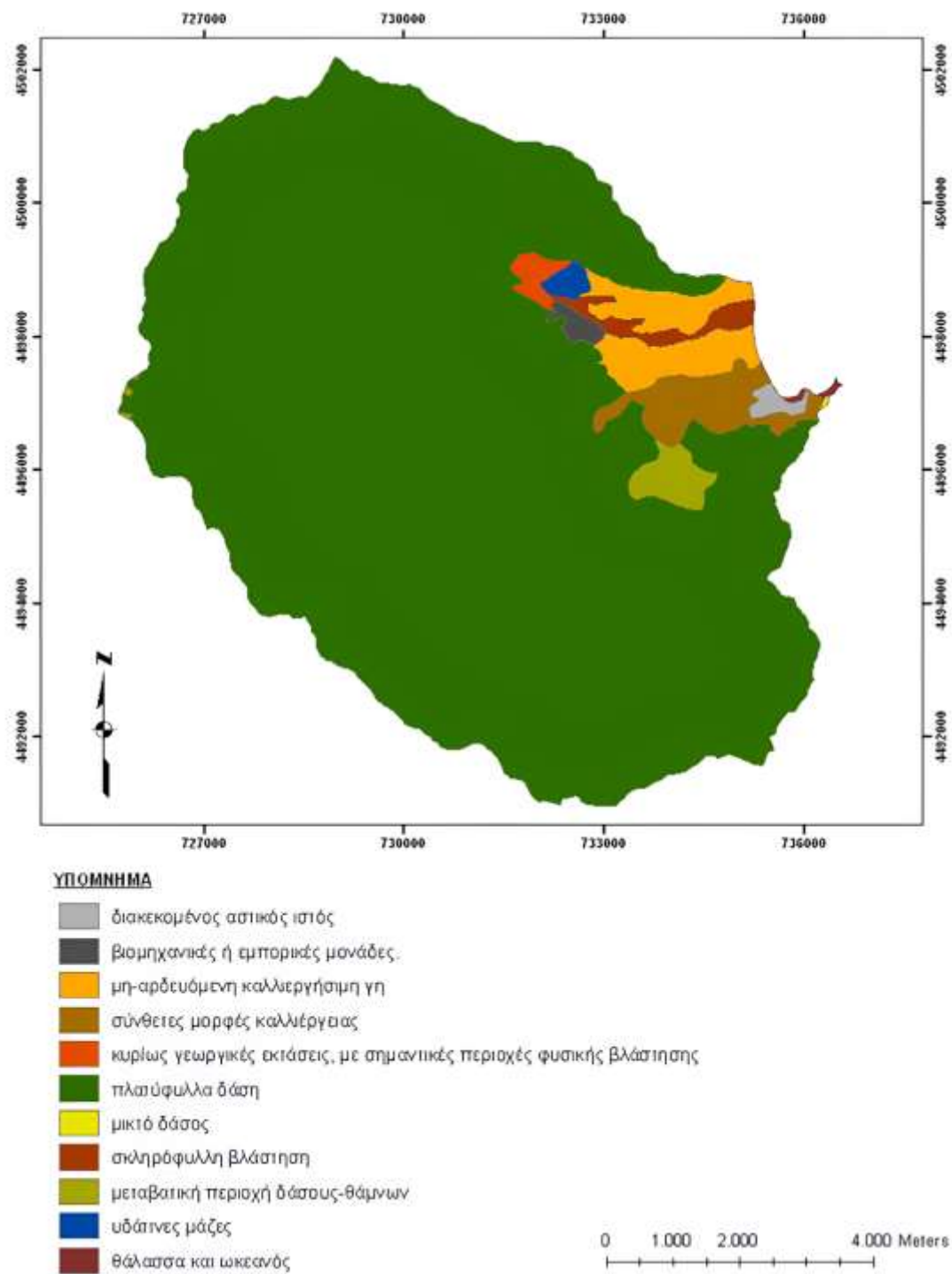
Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι πορείες των ρεμάτων διασταυρώνονται με ρωγμές που προέρχονται από γεωτεκτονικές κινήσεις. Όπως φαίνεται στον χάρτη 1, οι πορείες δύο κύριων ρεμάτων, στο βόρειο τμήμα της περιοχής μελέτης, συμπίπτουν με δύο πιθανόν ενεργές ρωγμές (ρέματα Μαυρόλακκας και Ξηρόλακκας), καθώς επίσης και με τις πορείες κλαδιών πρώτης τάξης στο νότιο τμήμα.



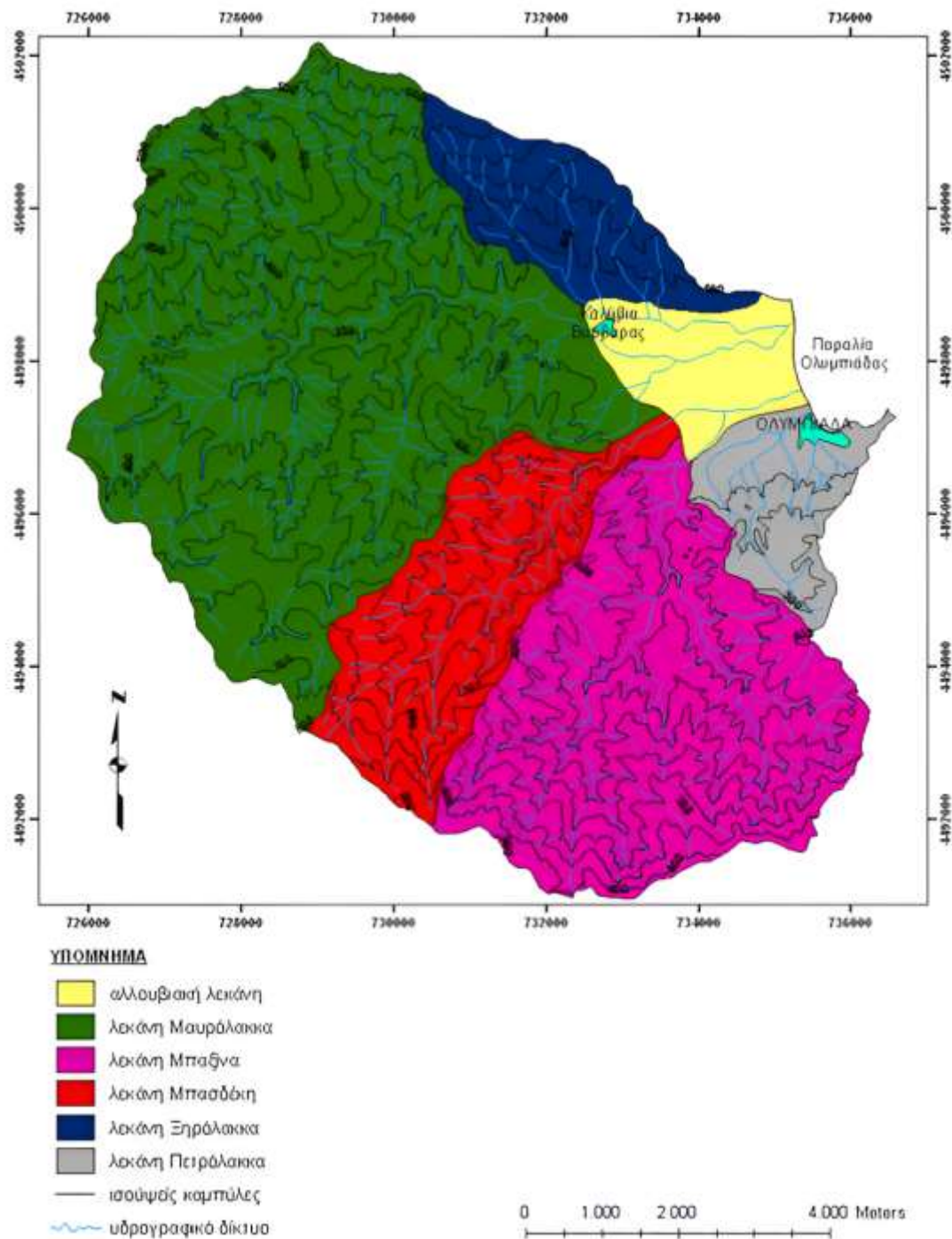
Εικόνα 8. Ανάπτυξη του υδρογραφικού δικτύου της περιοχής σε συνδυασμό με την τεκτονική της (Λαμπίρη, 2009)

Λόγω της μεγάλης κλίσης, οι κοίτες των ρεμάτων στη λοφώδη έως ημιορεινή ζώνη είναι απαλλαγμένες από αλλουβιακές καταθέσεις, και τα αποτελέσματα της μηχανικής διάβρωσης των πετρωμάτων μεταφέρονται στις πεδινές περιοχές και στη θάλασσα. Επιπλέον, σε σποραδικές περιπτώσεις κατά μήκος των κοιτών των ρεμάτων στη λοφώδη έως ημιορεινή περιοχή παρατηρούνται μεγάλα κομμάτια βράχου και άλλα πετρώματα μεγέθους 0,3-1,0 μέτρων. (Λαμπίρη, 2009)

Η περιοχή απορροής του Μαυρόλακκου έχει ένα πεπλατυσμένο, χοανοειδές σχήμα με μήκος 6,6 χιλιόμετρα μέχρι την είσοδο του ρέματος στην πεδινή περιοχή, και το τμήμα του ρέματος Μαυρόλακκα που διασχίζει τα αλλουβιακά ιζήματα εκτείνεται σε 2,7 χιλιόμετρα. Το μέσο πλάτος της περιοχής απορροής είναι 4,5 χιλιόμετρα, με την έκταση της λεκάνης να φτάνει τα 32,5 τετραγωνικά χιλιόμετρα, συμπεριλαμβανομένης και της λεκάνης του Ξηρόλακκου, με μέσο υψόμετρο 395 μέτρα. Δεν συμπεριλαμβάνεται το πεδινό τμήμα (0-30 μέτρα) στην έκταση της λεκάνης. Η μέση κλίση του κύριου ρέματος του Μαυρόλακκα είναι 7%. Άνωθεν της λίμνης απόθεσης τέλματος, ο Μαυρόλακκας τροφοδοτείται από ρέματα, εκ των οποίων τα πιο σημαντικά είναι ο Κηπουρίστας, το Τσέρνοβο-Καλαμούδι και το Σκοτεινό ρέμα. Στην περιοχή της υπάρχουσας λίμνης τέλματος, τα επιφανειακά νερά του Ξηρόλακκου παροχετεύονται στον Μαυρόλακκα μέσω τεχνητής αύλακας, αντιστοιχούμενα σε έκταση λεκάνης 3,17 τετραγωνικών χιλιομέτρων. Το υπόλοιπο τμήμα της κοίτης του Ξηρόλακκου λειτουργεί ως χείμαρρος που αντιστοιχεί σε λεκάνη απορροής με έκταση 1,7 τετραγωνικών χιλιομέτρων στη λοφώδη περιοχή με μέσο υψόμετρο 113 μέτρων. (Λαμπίρη, 2009)



Εικόνα 9. Κάλυψη γης της περιοχής μελέτης (cover, 2000)



Εικόνα 10. Ανάπτυξη του υδρογραφικού δικτύου στις έξι υπολεκάνες της περιοχής μελέτης (Λαμπίρη, 2009)

Σε υψόμετρο 340 μέτρων στον άνω τμήμα του Κηπουρίστα βρίσκεται μια πηγή με παροχή που κυμαίνεται μεταξύ 10 έως 50 κυβικών μέτρων ανά ώρα. Η πηγή εκρήγνυται το αποσθαρωμένο βιοτιτικό γνεύσιο και οριζόντια μάρμαρου. Το νερό συλλέγεται σε ένα υδραγωγείο και μεταφέρεται μέσω σωληνώσεων στην περιοχή Πέντε Βρύσες. (Λαμπίρη, 2009)

3.3 Κοιτασματολογία της περιοχής Ολυμπιάδα

Το πολυμεταλλικό κοίτασμα της Ολυμπιάδας βρίσκεται περίπου ένα χιλιόμετρο δυτικά του οικισμού της Ολυμπιάδας και περίπου έξι χιλιόμετρα βόρεια από το ρήγμα του Στρατωνίου. Αποτελεί ένα σύγχρονο παραγωγικό μεταλλείο χρυσού, αργύρου, μολύβδου και ψευδαργύρου στην Ολυμπιάδα, (Ελληνικός Χρυσός, 2024) Το κοίτασμα αυτό παρουσιάζει διάφορους τύπους μεταλλοφορίας, συμπεριλαμβανομένης της παραγωγής σουλφιδίων, όπου επικρατούν οι γαληνίτες-σφαλερίτες, καθώς και της μεταλλοφορίας με υψηλή περιεκτικότητα σε σιδηροπυρίτη, αρσеноπυρίτη και ίχνη χαλκοπυρίτη. Σύμφωνα με έρευνα των Hann και άλλων (2012), η μεταλλοφορία της Ολυμπιάδας χρονολογείται στο Ολιγόκαινο-Μειόκαινο, με βάση χρονολόγηση Re-Os σε αρσеноπυρίτη που έδωσε ηλικία $26,1 \pm 5,3$ εκατομμύρια χρόνια. Η μεταλλοφορία αυτή φαίνεται να συμφωνεί με τη δημιουργία μαζών σουλφιδίων μετά την Αλπική παραμόρφωση, ίσως συνδεδεμένη με το μεταλλογενετικό γεγονός του Ολιγοκαινού-Μειοκαινού. (Παπαδοπούλου, 2020)

Η μεταλλευτική εταιρία που δραστηριοποιείται στην περιοχή Χαλκιδικής, είναι ο Ελληνικός Χρυσός που παράγει χρυσό (Au), ασήμι (Ag), χαλκό (Cu), μόλυβδο (Pb), και ψευδάργυρο (Zn) τα οποία και εξάγει. Είναι ιδιοκτήτης των μεταλλείων Κασσάνδρας που εκτείνονται στην βόρειο-ανατολική Χαλκιδική. Η εταιρία Ελληνικός Χρυσός διαθέτει από τα καλύτερα προγράμματα περιβαλλοντικής παρακολούθησης και διαχείρισης στην Ελλάδα. Ένα από τα προτερήματα αυτών των προγραμμάτων είναι ότι ελέγχονται οι περιβαλλοντικές επιδόσεις όλο το εικοσιτετράωρο και ενημερώνεται η ηλεκτρονική πλατφόρμα του διαδικτύου ώστε να είναι διαθέσιμη σε όλους. Με αυτή την παρακολούθηση κυρίως ελέγχει την ρύπανση της ατμόσφαιρας, του εδάφους, των υδάτων όπως ακόμα και την ύπαρξη και επικινδυνότητα της σκόνης, του θορύβου και των δονήσεων που προέρχονται από την εκμετάλλευση. (Ελληνικός Χρυσός, 2024) (Διαμαντοπούλου, 2023)

Τοπικά, η μεταλλοφορία Ag-Zn-Pb εμφανίζεται σαν μαζώδης που σταδιακά μεταβαίνει σε μεταλλοφορία με αρσеноπυρίτη. Είναι πλούσια σε Au και πυριτιομένα τεκτονικά λατυποπαγή, με σημαντικές περιεκτικότητες σε αρσеноπυρίτη και βουλανζερίτη. Συνδυάζονται με διάχυτες ζώνες σιδηροπυρίτη και αρσеноπυρίτη, οι οποίες συνδέονται με εξαλλοίωση χαλαζίας-ροδοχρωσίτης \pm ροδονίτη.

Σε ορισμένα σημεία του ανατολικού τμήματος του κοιτάσματος εμφανίζονται φλέβες χαλαζίας-ροδοχρωσίτης με περιεκτικότητες αρσеноπυρίτη-βουλανζερίτη, ενώ στα βορειότερα τμήματα παρατηρούνται φακοί αρσеноπυρίτη πλούσιοι σε Au και πυριτιομένα λατυποπαγή που περιέχουν ροδοχρωσίτη-ροδονίτη.

Τα σουλφίδια φαίνεται να έχουν αδρόκοκη μορφή φακών, διακόπτοντας και αντικαθιστώντας τα μάρμαρα όπου είναι ενσωματωμένα. Παρόλο που αυτές οι υφές είναι κυρίως ασύμφωνες με τη σχιστότητα και τα μάρμαρα, σε τοπικό επίπεδο συχνά εμφανίζονται σύμφωνες και μιμούνται την πτύχωση των μαρμάρων. Επιπλέον, η παρουσία τους ερμηνεύεται ως αποτέλεσμα ενός προ-παραμορφωτικού γεγονότος, ενώ οι υφές αντικατάστασης που διακόπτουν τα μάρμαρα είναι πολύ πιο συνηθισμένες. Τα ορυκτά της μεταλλοφορίας δεν δείχνουν ενδείξεις παραμόρφωσης, υποδεικνύοντας ότι έχουν δημιουργηθεί από τη ψευδομορφική αντικατάσταση της προϋπάρχουσας πτυχής. Η γεωμετρία του μεταλλοφόρου σώματος επηρεάζεται σημαντικά από τη μορφολογία της ακολουθίας μαρμάρων-γενεσίων, όπου είναι ενσωματωμένο. Ορισμένοι φακοί σουλφιδίων λαμβάνουν επιμήκη μορφή, με την επιμηκυσμένη τους πλευρά να είναι προσανατολισμένη προς τα νοτιοανατολικά (Παπαδοπούλου, 2020).

Οι εργασίες εξόρυξης χρυσού δημιουργούν μια ποικιλία αποβλήτων. Πολλές φορές θα πρέπει οι υδροβιότοποι να συμβάλλουν για την απομάκρυνση των υπολειμματικών συγκεντρώσεων κυανίου από στραγγίσματα που προέρχονται από κλειστές εγκαταστάσεις απόρριψης ορυχείων χρυσού. (Álvarez, R., Ordóñez, A., Loredó, J., & Younger, P. L., 2013)

4.Λογισμικό WETBUD

4.1 Λειτουργία του WETBUD

Η παρούσα διπλωματική πραγματεύεται τη μελέτη και την ανάλυση των στοιχείων του ισοζυγίου ενός υδροβιότοπου σε μια μεταλλευτική περιοχή της Ελλάδας, την Ολυμπιάδα. Αυτή η μελέτη είχε ως στόχο την εφαρμογή του λογισμικού Wetbud πρώτη φορά στον Ελλαδικό χώρο και την βελτίωση κάποιων στοιχείων του, έτσι ώστε να δημιουργούνται σχεδιαστικά λειτουργικοί υδροβιότοποι. Για να υφίσταται ένας λειτουργικός οικολογικός υδροβιότοπος θα πρέπει να διαθέτει την κατάλληλη ποσότητα νερού.

Η ακριβής εκτίμηση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα αποτελεί σημαντικό παράγοντα για ένα ολοκληρωμένο σχέδιο διαχείρισης των υδατικών πόρων μιας υδρολογικής λεκάνης. (Varouchakis E. , 2012)

Το Wetbud είναι ένα εργαλείο που σχεδιάστηκε για την εκτίμηση των υδρολογικών προϋπολογισμών υδροτόπων χρησιμοποιώντας τα διαθέσιμα μετεωρολογικά δεδομένα και συγκεκριμένες πληροφορίες τοπογραφίας, εδάφους και γεωϋδρολογίας του τόπου. Ο κύριος σκοπός του είναι η σχεδίαση τεχνητών υδροβιότοπων, αλλά μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για φυσικούς υδροβιότοπους με καθορισμένες παραμέτρους εισόδου. Το Wetbud προσφέρει δύο καταστάσεις λειτουργίας, τη βασική, που απλοποιεί την τοπογραφία του υδροτόπου, τις παραμέτρους του εδάφους και την ροή του υπόγειου νερού, και τη σύνθετη, που ενσωματώνει αυτούς τους παράγοντες με μια πιο περίπλοκη προσέγγιση (Wetbud, October 2022).

Το Wetbud είναι ένα εύκολο εργαλείο προσομοίωσης και μοντελοποίησης, που κάνει ανάλυση για κάθε σενάριο σε διαφορετικές περιοχές και μπορεί κάποιος να λάβει πληροφορίες. Έχει την βασική έκδοση και προχωρημένη έκδοση. Στο βασικό χρησιμοποιείται για μηνιαία και καθημερινής βάσης δεδομένα και το προχωρημένο μπορείς για οποιαδήποτε χρονική στιγμή. Για δύσκολες περιπτώσεις, ενδείκνυται το προχωρημένο για μεταβλητή τοπογραφία και με έδαφος με κλίση, όπου υπάρχουν ποικιλίες στα χωρικά και χρονικά δεδομένα.

Η υδρολογική και υδρογεωλογική ρύθμιση μιας λεκάνης απορροής, μαζί με τη χωρική κατανομή των υπόγειων υδάτων, είναι πολύ σημαντική για σκοπούς διαχείρισης των υδάτινων πόρων. Επιπλέον, αυτοί οι παράγοντες αποτελούν τη βάση για εφαρμογές μοντελοποίησης. (Varouchakis E. A., 2016)

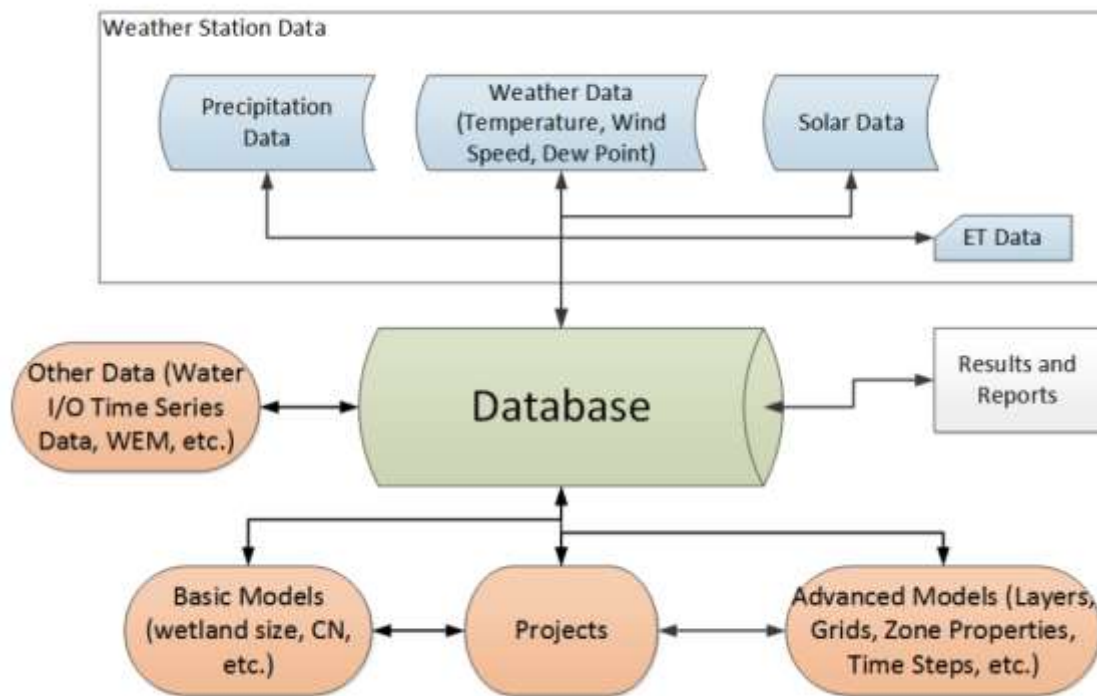
Η βασική εξίσωση λειτουργίας του προγράμματος Wetbud είναι η εξής:

$$P + S_I + G_I + OB - ET - S_o - G_o = S_t$$

Στην παραπάνω εξίσωση ουσιαστικά προστίθενται οι κατακρημνίσεις (P), οι εισροές επιφανειακών υδάτων (S_I), οι εισροές υπόγειων υδάτων (G_I), οι υπέροχθες ροές (OB) και αφαιρούνται οι εκροές επιφανειακών και υπόγειων υδάτων (S_o , G_o) με αποτέλεσμα να υπολογιστεί το καθαρό δυναμικό αποθήκευσης νερού στην λεκάνη απορροής(S_t). (Wetbud, October 2022)

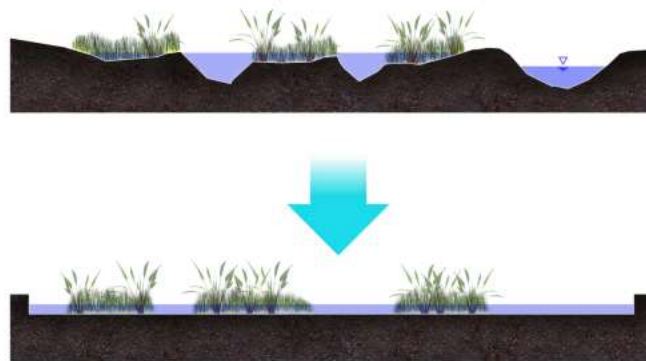
Στο Wetbud, το Project καθορίζει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά μιας τοποθεσίας που καθορίζονται από τη θέση της και παραμένουν σταθερά κατά τις διαφορετικές εκδόσεις σχεδιασμού (π.χ., όνομα τοποθεσίας, γεωγραφικό πλάτος και μήκος, υψόμετρο, αναφορά σταθμού μετεωρολογικών παρατηρήσεων, χαρακτηριστικά λεκάνης υγροβιοτόπου κ.λπ.). Αυτές οι εκδόσεις σχεδιασμού, είτε για τα Βασικά είτε για τα Προηγμένα μοντέλα, ονομάζονται Σενάρια στο Wetbud. Μετά τη δημιουργία ενός Project, οι χρήστες μπορούν να δημιουργήσουν ένα ή περισσότερα Βασικά Σενάρια και/ή Προηγμένα Σενάρια για αυτό το έργο. Τα Βασικά Μοντέλα στο Wetbud, συμπεριλαμβανομένων αυτών που δημιουργούνται με το Project Wizard, είναι αναλυτικά μοντέλα που συνοψίζουν τις εισροές και εκροές για να υπολογίσουν τους υδρολογικούς προϋπολογισμούς για συγκεκριμένες τοποθεσίες μηνιαία.

Η μεμονωμένη εφαρμογή των Βασικών Μοντέλων εντός ενός δεδομένου Έργου αναφέρεται ως Βασικά Σενάρια.



Εικόνα 11 Καιρικά Δεδομένα (Thompson, T. M., Daniels, W. L., Whittecar, G. R., & Agioutantis, Z., 2016)

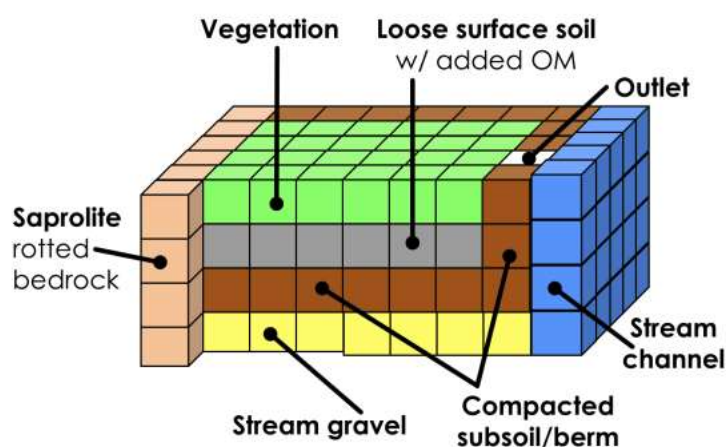
Το βασικό μοντέλο υπολογίζει μηνιαίες μετρήσεις και έτσι, έχουμε το μέσο όρο.



Εικόνα 12 Υπολογισμός μηνιαίων μετρήσεων (Thompson, T. M., Daniels, W. L., Whittecar, G. R., & Agioutantis, Z., 2016)

4.2 Μοντέλα προγράμματος

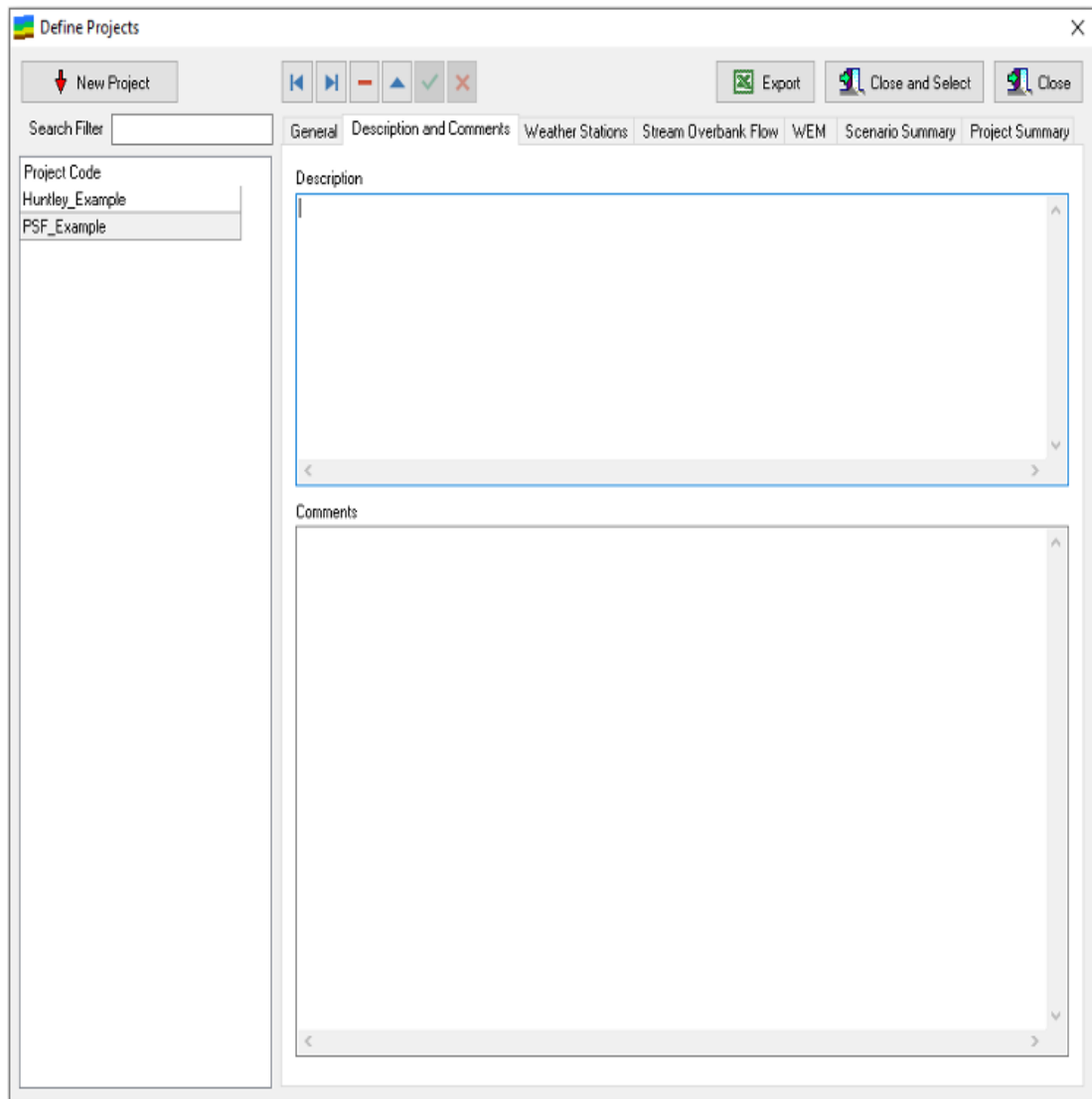
Τα Προηγμένα Μοντέλα στο Wetbud είναι αριθμητικά μοντέλα που επεξεργάζονται χρησιμοποιώντας το λογισμικό USGS MODFLOW για μοντέλα ροής υπόγειου νερού. Η μεμονωμένη εφαρμογή των Προηγμένων Μοντέλων εντός ενός δεδομένου Project αναφέρεται ως Προηγμένα Σενάρια. Η δημιουργία πολλαπλών Σεναρίων αποβαίνει χρήσιμη για τη μοντελοποίηση μεμονωμένων τμημάτων μεγάλων τοποθεσιών που αλλιώς θα ήταν δύσκολο να μοντελοποιηθούν, για χρήστες που μοντελοποιούν ξεχωριστές τοποθεσίες κοντά στον ίδιο μετεωρολογικό σταθμό, ή για χρήστες που δοκιμάζουν πολλαπλές επιλογές σχεδιασμού για την ίδια τοποθεσία. Ο πίνακας Project σας επιτρέπει να δημιουργήσετε ένα νέο έργο ή να επιλέξετε ένα υπάρχον. Κάνοντας κλικ στο στοιχείο μενού Project επιτρέπει τη δημιουργία νέου έργου. Η πρώτη επιλογή είναι ισοδύναμη με το κουμπί Project Wizard στο κύριο μενού, ενώ η δεύτερη επιλογή επιτρέπει στον χρήστη να επεξεργαστεί τις παραμέτρους του Project. Η τρίτη επιλογή επιτρέπει την επιλογή ενός έργου ως το τρέχον ή την αλλαγή της επιλογής του τρέχοντος έργου (Wetbud, October 2022). Το μοντέλο advanced υπολογίζει με καθημερινές μετρήσεις.



Εικόνα 13 Το προηγμένο μοντέλο του Wetbud (Thompson, T. M., Daniels, W. L., Whittecar, G. R., & Agioutantis, Z., 2016)

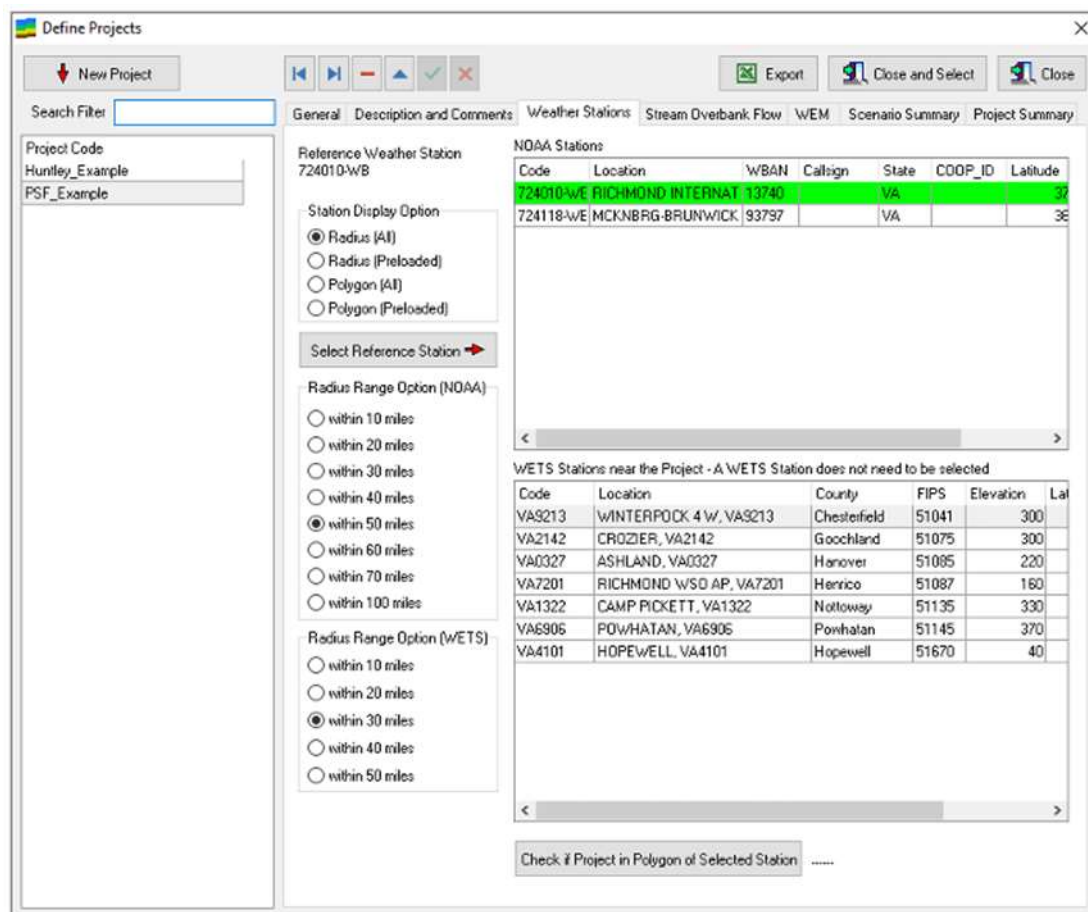
4.3 Καρτέλες προγράμματος

Η καρτέλα Περιγραφή και Σχόλια (Εικόνα 14) χρησιμοποιείται για την εισαγωγή επιπλέον λεπτομερειών που ο χρήστης επιθυμεί να συμπεριλάβει σχετικά με ένα συγκεκριμένο έργο. Επιλέγοντας την καρτέλα «Περιγραφή» εισάγεται μια λεπτομερή περιγραφή του έργου και οποιαδήποτε πρόσθετα σχόλια ή σημειώσεις που αφορούν το έργο και κάνοντας κλικ αποθηκεύετε τις αλλαγές σας.



Εικόνα 14. Καρτέλα Περιγραφής και Σχολίων των Έργων (Wetbud, October 2022)

Η καρτέλα Μετεωρολογικών Σταθμών (Σχήμα 2.6) χρησιμοποιείται για να ορίσει έναν αναφερόμενο μετεωρολογικό σταθμό και να εντοπίσει τους πλησιέστερους σταθμούς WETS στις τοποθεσίες των σχετικών έργων.



Εικόνα 15. Καρτέλα Μετεωρολογικών Σταθμών των Έργων (Wetbud, October 2022)

4.4 Εξισώσεις υπολογισμού του προγράμματος

Το Wetbud μελετάει το τμήμα του εδάφους στο οποίο η απορροή απορροφάτε απευθείας από τον υδροβιότοπο. Η επιφανειακή εκροή υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο του καμπύλου αριθμού του NRCS για κάθε περίοδο 24 ωρών (NRCS, 2004). Η μέθοδος NRCS, γνωστή και ως Curve Number Method, είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος υδρολογικής μοντελοποίησης που αναπτύχθηκε από το Soil Conservation Service (Natural Resources Conservation Service - NRCS) των Ηνωμένων Πολιτειών. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της απορροής βροχοπτώσεων από μια λεκάνη απορροής. Οι βασικές αρχές της μεθόδου

αυτής είναι οι υπολογισμοί των λεγόμενων Curve Numbers οι οποίοι εξαρτώνται από τον τύπο του εδάφους, την χρήση της γης στην οποία γίνεται ερευνά καθώς και από την κατάσταση της επιφάνειας εάν υπάρχει βλάστηση. Η μέθοδος του Curve Number βασίζεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a + S)}$$

Όπου:

- Q είναι η επιφανειακή απορροή (mm).
- P είναι η συνολική βροχόπτωση (mm).
- I_a είναι οι αρχικές απώλειες πριν ξεκινήσει η απορροή, όπως η απορρόφηση και η διαπνοή (mm).
- S είναι η μέγιστη κατακράτηση μετά την έναρξη της απορροής (mm).

Το Wetbud υποθέτει ότι αυτή η εκροή εισέρχεται στον υδροβιότοπο ως φρύγανο ή επιφανειακή συγκεντρωμένη ροή ως πρόσκαιρο χαρακτηριστικό. Αυτή η εκροή προστίθεται απευθείας στον υδροβιότοπο και δεν υποβάλλεται σε καμία διαδικασία κατευθυντικής ροής.

Επιπλέον, μεγαλύτερα διακεκομμένα ή μόνιμα ρέματα δίπλα στον υδροβιότοπο που τον τροφοδοτούν με νερό μόνο κατά τη διάρκεια υψηλής ροής, μπορούν επίσης να μοντελοποιηθούν στο Wetbud. Το Wetbud υπολογίζει τον όγκο εκροής για το υδροβιότοπο χρησιμοποιώντας τη μέθοδο του καμπύλου αριθμού του NRCS. Αυτή καθορίζει το χρόνο συγκέντρωσης, ακολουθώντας τη μέθοδο της ταχύτητας του NRCS (NRCS, 2010) και δημιουργεί έναν υδρογράφο ρέματος χρησιμοποιώντας τον αδιάστατο υδρογράφο μονάδας του NRCS (NRCS, 2007). Αυτή η διαδικασία είναι παρόμοια με εκείνη που χρησιμοποιείται στο μοντέλο NRCS TR-55 (Wetbud, October 2022).

Οι χρήστες που επιθυμούν να συμπεριλάβουν εκτιμήσεις ιστορικών ροών υπόγειου νερού στην ανάλυση τους θα πρέπει να πραγματοποιήσουν υπολογισμούς WEM (Effective Monthly Recharge) που αναφέρονται σε μηνιαίο μοντέλο επαναφόρτισης των υπόγειων εισροών εισόδου και έτσι μπορούν να ενσωματώσουν τα δεδομένα WEM στους υδρολογικούς τους προϋπολογισμούς.

Οι αναλύσεις WEM χρησιμοποιούν ιστορικά μετεωρολογικά δεδομένα (όπως η βροχόπτωση και η εξάτμιση) για να υπολογίσουν τιμές μηνιαίας επαναφόρτισης, οι οποίες στη συνέχεια χρησιμοποιούνται για να προβλέψουν τις υψώσεις κεφαλών σε πηγάδια για τα έτη που λείπουν δεδομένα κεφαλής μέτρησης. Αυτές οι προβλεπόμενες υψώσεις κεφαλών χρησιμοποιούνται στην εφαρμογή του Νόμου του Darcy για τον υπολογισμό της εκπομπής υπόγειου νερού, που αποτελεί το πρώτο βήμα στους υπολογισμούς που χρησιμοποιεί το Wetbud στα προηγμένα μοντέλα κυρίως για τον προσδιορισμό της εισόδου υπόγειου νερού. Ο νόμος αυτός χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της διαπερατότητας και της κίνησης των υπόγειων υδάτων.

Η βασική μορφή του νόμου του Darcy για τη ροή του νερού σε κορεσμένα εδάφη είναι:

$$Q = -K \cdot A \cdot \frac{dh}{dl}$$

Όπου:

- Q είναι ο ρυθμός ροής του νερού (όγκος ανά μονάδα χρόνου, π.χ. m³/s).
- K είναι η υδραυλική αγωγιμότητα του εδάφους (π.χ. m/s).
- A είναι η διατομή της ροής (π.χ. m²).
- dl/dh είναι η υδραυλική κλίση (διαφορά υδραυλικών κεφαλών ανά μονάδα μήκους).

Η καρτέλα Σύνοψης Σεναρίων χρησιμοποιείται για να παρακολουθήσετε όλα τα σενάρια που σχετίζονται με ένα συγκεκριμένο έργο. Αυτή η καρτέλα περιλαμβάνει τέσσερις υπό-καρτέλες: Βασικά Σενάρια, Προηγμένα Σενάρια, Δεδομένα Ειδικά για το Έργο και Σημεία Παρακολούθησης Προηγμένων Σεναρίων. Αυτές οι καρτέλες εμφανίζουν μια λίστα με όλα τα Βασικά και Προηγμένα Σενάρια, τα Δεδομένα Ειδικά για το Έργο και τα Σημεία Παρακολούθησης Προηγμένων Σεναρίων που δημιουργήθηκαν εντός του επιλεγμένου έργου. Σε κάθε καρτέλα, το πλέγμα επιτρέπει την προβολή όλων των σεναρίων εντός ενός έργου μέσω μιας συνολικής επισκόπησης σε μία οθόνη (Wetbud, October 2022).

4.5 Βάση δεδομένων Wetbud

Η συλλογή δεδομένων στο Wetbud αποτελείται από κλιματικά δεδομένα (προέρχονται από μετεωρολογικούς σταθμούς και περιλαμβάνουν τη θερμοκρασία, την υγρασία, τις βροχοπτώσεις κ.λπ.) καθώς και υδρολογικά δεδομένα (στοιχεία για τα επίπεδα των υδάτων, τη ροή των ποταμών κ.λπ.) είναι μια διαδικασία με την οποία τα δεδομένα εισόδου και εξόδου οργανώνονται και διαμορφώνονται με έναν ομοιόμορφο τρόπο, ώστε να διευκολύνεται η ανάλυση και η σύγκριση των αποτελεσμάτων. Βασική προϋπόθεση στην εισαγωγή τους είναι τόσο η οργανοποίησή τους περί τυχόν λανθασμένων δεδομένων όσο και η μορφοποίηση τους σε ομοιόμορφες μονάδες μέτρησης. Όλη η συλλογή τους έγινε εξολοκλήρου από δεδομένα που παρέχει το Πρόγραμμα Περιβαλλοντικής Παρακολούθησης της Hellas Gold το οποίο είναι υπεύθυνο για την αξιολόγηση της υγείας του περιβάλλοντος του Ελληνικού Χρυσού.

Στο παρόν Project χρησιμοποιήθηκαν ευρωπαϊκές μονάδες μέτρησης όπως φαίνονται στις παρακάτω εικόνες. Συγκεκριμένα στις βρόχο-μετρικές καταγραφές η μονάδα μέτρησης είναι mm, στην εξάτμιση mm καθώς και στις μετρήσεις των γεωτρήσεων σε m.

5.Εισαγωγή δεδομένων

5.1 Μοντέλο Wetbud

Σε αυτό το κεφάλαιο, το μοντέλο υδατικού ισοζυγίου του λογισμικού Wetbud αναδεικνύεται ως ένα ανεκτίμητο εργαλείο για την προσομοίωση και την ανάλυση του υδατικού ισοζυγίου των υδροβιότοπων.

Το πρώτο βήμα αποτέλεσε ο καθορισμός του κώδικα αλλά και μία σύντομη περιγραφή. Έπειτα δόθηκαν το γεωγραφικό πλάτος και το γεωγραφικό μήκος της περιοχής που εξετάζεται, καθώς και το μέσο βάθος της λεκάνης απορροής σε μέτρα. Στο Project συμπεριλαμβάνονται υπολογισμοί WEM, ιστορικών ροών υπόγειου νερού καθώς και υπερόχθη ρέματα με αδιάστατη μονάδα υδρογράφου.

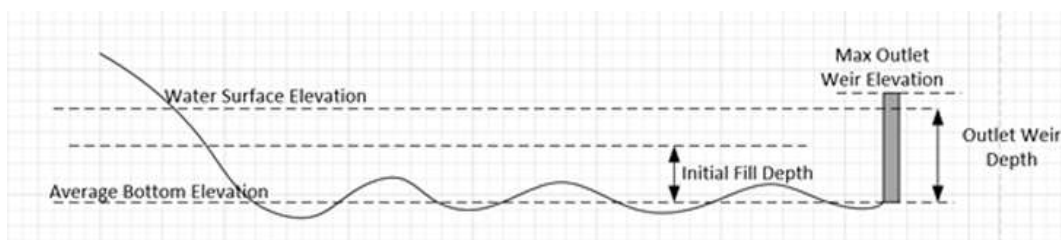
Η Μέσο Υψόμετρο Πυθμένα αντιπροσωπεύει το μέσο υψόμετρο της επιφάνειας του εδάφους σε μια λεκάνη υδροβιοτόπου. Μπορεί να υπολογιστεί με διάφορες μεθόδους που συχνά χρησιμοποιούν οι μηχανικοί έργων γης, βασισμένοι στο σχέδιο βαθμονόμησης του σχεδιασμού. Το Αρχικό Βάθος Πλήρωσης εκφράζεται ως ύψος πάνω από αυτήν το Μέσο Υψόμετρο Πυθμένα. Συχνά η τιμή αυτή ορίζεται έτσι ώστε να ξεκινά η υδροκίνηση στο Βάθος Εκβολής δηλαδή αναφέρεται στο βάθος των νερών στη θέση όπου ένα ποτάμι ή ρέμα εκβάλλει σε μια θάλασσα, λίμνη ή άλλο μεγαλύτερο υδάτινο σώμα, ή στο υψόμετρο ενός προσαρμοζόμενου φράγματος που προτείνεται για τον μήνα Ιανουάριο. Ο λόγος είναι ότι το Wetbud ξεκινά την ανάλυση της υδροπεριόδου του στη 1 Ιανουαρίου και, κατά την εμπειρία μας, οι περισσότεροι υδροβιότοποι στην περιοχή της Μεσοατλαντικής γεμίζουν με νερό το φθινόπωρο/αρχές χειμώνα. Το Μέγιστο Υψόμετρο Εκβολής είναι το υψηλότερο υψόμετρο που μπορεί να επιτευχθεί από ένα σύστημα προσαρμοζόμενου φράγματος.

Σε ένα σύστημα με σταθερή εκβολή φράγματος είναι το ίδιο με το Μέσο Υψόμετρο Πυθμένα συν το Βάθος Εκβολής. Τα προσαρμοζόμενα φράγματα χρησιμοποιούνται συνήθως σε υδροβιότοπους επεξεργασίας αποβλήτων και σε συστήματα υδροβιότοπων που διαχειρίζονται τη μέγιστη βιοτική ποικιλία και/ή την παραγωγή τροφής σε πάγκα παρατηρήσεων πουλιών και περιβαλλοντικά προστατευμένες περιοχές που διαχειρίζονται για αποδελτίωση πουλιών.

Η Υδροεπιφάνεια Επίπεδου, στην επίπεδη πορεία πλημμύρας που χρησιμοποιείται στο Βασικό Μοντέλο, υποθέτουμε ότι φτάνει σε μέγιστο ύψος ίσο με το ύψος του εκβολή φράγματος.

Μπορεί να υποχωρήσει σε χαμηλότερα επίπεδα λόγω εκτροπής μέσω του εδάφους κάτω από τους υδροβιότοπους και λόγω εν αποτροπής. Το Wetbud παρέχει αυτό το ύψος μηνιαία και χρησιμοποιεί τα δεδομένα από την καμπύλη αποθήκευσης σκηνης που εισήχθησαν για να προσαρμόσει την Υδροεπιφάνεια Επίπεδου με βάση τον όγκο νερού που χάνεται/αποκτάται κάθε περίοδος για να αντικατοπτρίζει την τοπογραφία από το σχεδιασμένο σχέδιο βαθμονόμησης της περιοχής των υδροβιότοπων κάτω από το Μέγιστο Υψόμετρο Εκβολής.

Στην παρακάτω εικόνα αναφέρεται στο υψόμετρο επιφάνειας νερού που είναι η κατακόρυφη απόσταση της επιφάνειας του νερού από ένα δεδομένο σημείο αναφοράς, συνήθως τη μέση στάθμη της θάλασσας.



Εικόνα 16. Υψόμετρο Επιφανείας Νερού (Wetbud, October 2022).

Στην καρτέλα Stream Overbank Flow και συγκεκριμένα στα δεδομένα της λεκάνης απορροής του υπερόχθιου ρέματος, αναγράφεται η επιφάνεια η οποία καλύπτει η συγκεκριμένη λεκάνη απορροής σε τετραγωνικά μέτρα και ο αριθμός καμπύλης NRCS ο οποίος σχετίζεται με τον τύπο του εδάφους της περιοχής, τη χρήση γης και το βάθος του εποχιακού υδροφόρου ορίζοντα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση ο αριθμός καμπύλης είναι 70, σύμφωνα με τα πρότυπα, αυτό σημαίνει ότι οι καλλιέργειες που συναντώνται στην περιοχή είναι καλλιέργειες σε σειρά και συγκεκριμένα σε ευθείες σειρές, κακή υδρολογική κατάσταση (Wetbud, October 2022).

Στην καρτέλα WEM, στην υποκαρτέλα WEM Setup 1, ορίζουμε ως φρεάτια βαθμονόμησης, τα πηγάδια πλαγιάς λόφου και πυθμένα της λεκάνης απορροής. Ως οριζόντια απόσταση μεταξύ της πλαγιάς του λόφου και της κλίσης του πυθμένα ορίζονται τα 500 m. Οι μετρήσεις φρέατος γίνονται ανά 12 μήνες. Η περίοδος δεδομένων είναι μεταξύ 01/01/2015 έως 12/01/2022. Η οριζόντια απόσταση μεταξύ της κλίσης του λόφου και της κλίσης της πλαγιάς ορίζεται στα 500 m. Οι μετρήσεις γίνονται κάθε 12 μήνες.

Επιπλέον ορίζεται ως ξηρό έτος το 2022, ως φυσιολογικό έτος το 2017 και ως υγρό έτος το 2020. Η περίοδος ανάλυσης προσαρμόζεται από τον Ιανουάριο του 2015 έως τον Μάιο του 2023.

5.2 Εισαγωγή δεδομένων στο πρόγραμμα

Όσον αφορά τα στοιχεία του υδροβιότοπου, η συνολική επιφάνεια λεκάνης απορροής για άμεση επιφανειακή απορροή είναι 49.000 m², (Εικόνα 18). Η κατασκευασμένη περιοχή του υδροβιότοπου είναι στα 1.500 m². Το πλάτος του κατασκευασμένου υδροβιότοπου στον πυθμένα της πλαγιάς, καθορίζεται στα 100 m και το πάχος στα 10 m, ενώ η υδραυλική αγωγιμότητα στα 0,05 m/s.

The screenshot shows the 'Wetland and Watershed Data' section of the WEM Setup 1 dialog box. The 'General' tab is selected. The data is as follows:

Parameter	Value
Total Watershed Area for Direct Surface Runoff (m ²)	49000.00
Constructed Wetland Area (m ²)	1500.00
Existing Wetland Area (m ²)	0.00
Total Wetland Area (m ²)	1500.00
Net Watershed Area for Direct Surface Runoff (m ²)	47500.00
Watershed NRCS Curve Number	70

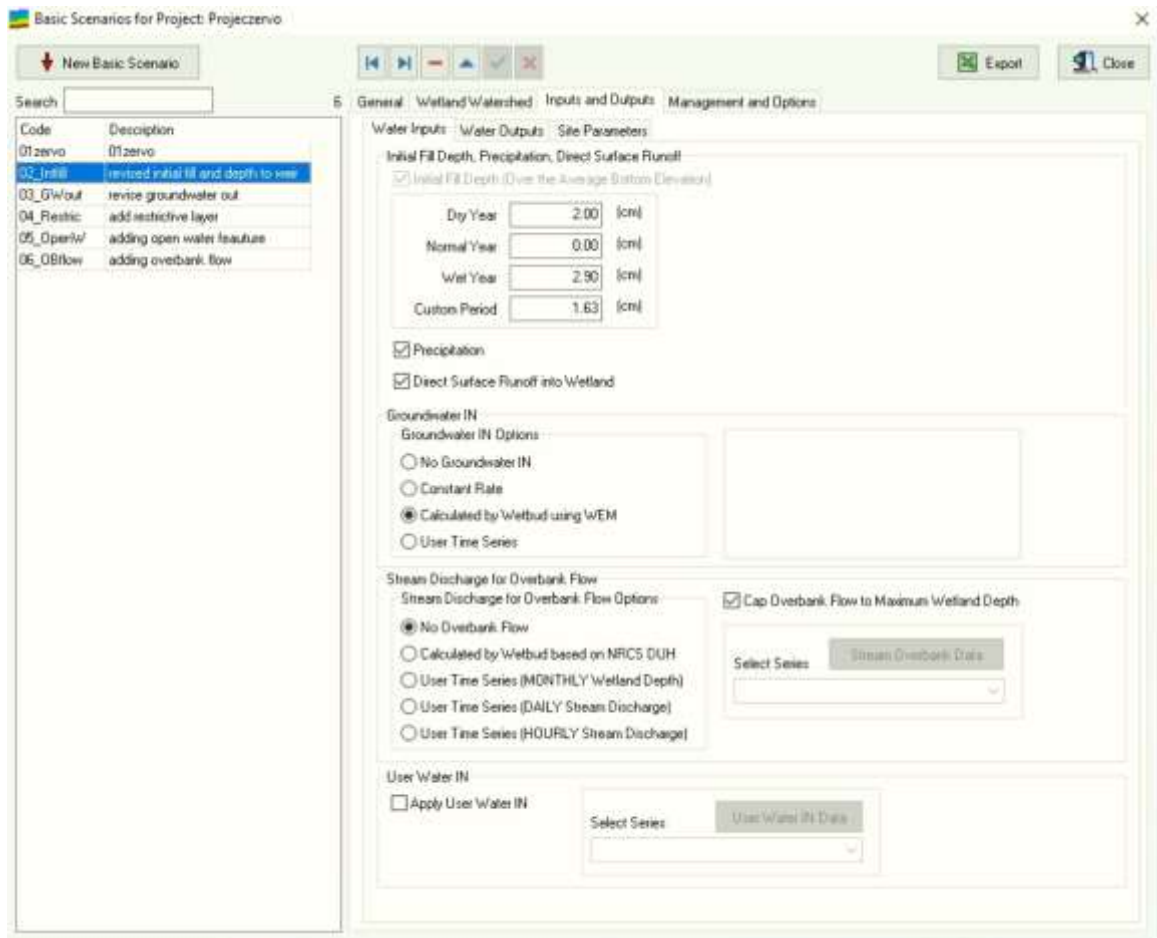
Below this, the 'Data for Groundwater Calculations Utilizing WEM' section is visible:

Parameter	Value
Width of Constructed Wetland at Adjacent Hillslope Bottom (m)	100.00
Thickness of Constructed Wetland at Adjacent Hillslope Bottom (m)	10.00
Hydraulic Conductivity of Hillslope (m/s)	0.05000000

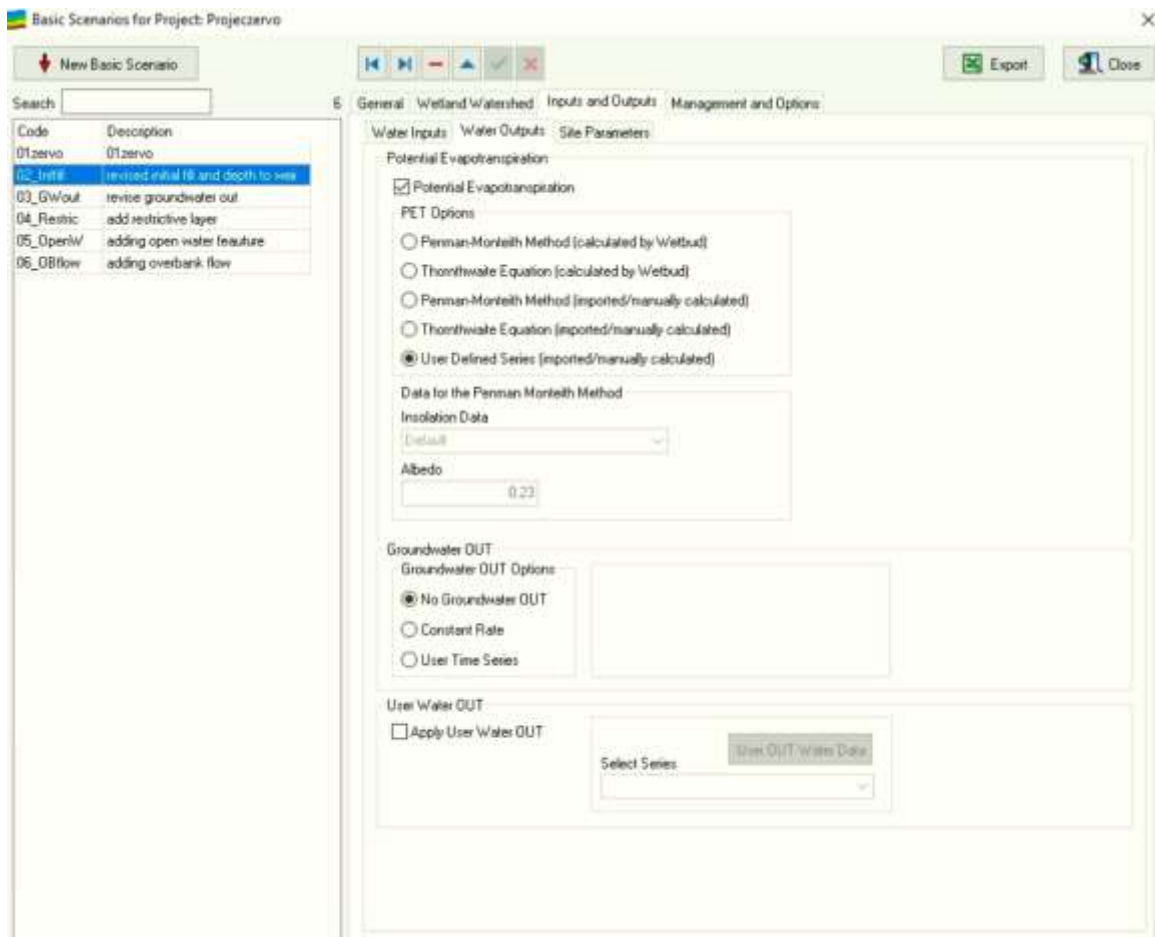
A 'View Ksat Table' button is located below the 'Thickness' parameter.

Εικόνα 17. Καρτέλα υποβολής μεταβαλλόμενων στοιχείων υδροβιότοπου.

Όσον αφορά τις εισροές νερού, το αρχικό βάθος πλήρωσης ορίζεται στα 2 cm για τον ξηρό χρόνο. Για τον κανονικό ορίζεται το 0.00 cm, ενώ για το υγρό χρόνο ορίζεται στα 2.90 cm. Ο μέσος όρος αυτών αποτελούν τα 1.63 cm. Τα υπόγεια ύδατα, υπολογίζονται από το Wetbud χρησιμοποιώντας το WEM. Στην εκφόρτωση ρέματος για τις επιλογές υπερόχθης ροής, επιλέγεται χωρίς υπερόχθη ροή, ενώ υπερτερεί η υπερόχθη ροή σε σχέση με το μέγιστο βάθος υδροβιότοπου. Στις εκροές νερού, επιλέγεται η πιθανή εξατμισοδιαπνοή και συγκεκριμένα, η μέθοδος User Defined Series, η οποία βασίζεται στην θερμοκρασία και υπολογίζεται χειροκίνητα.

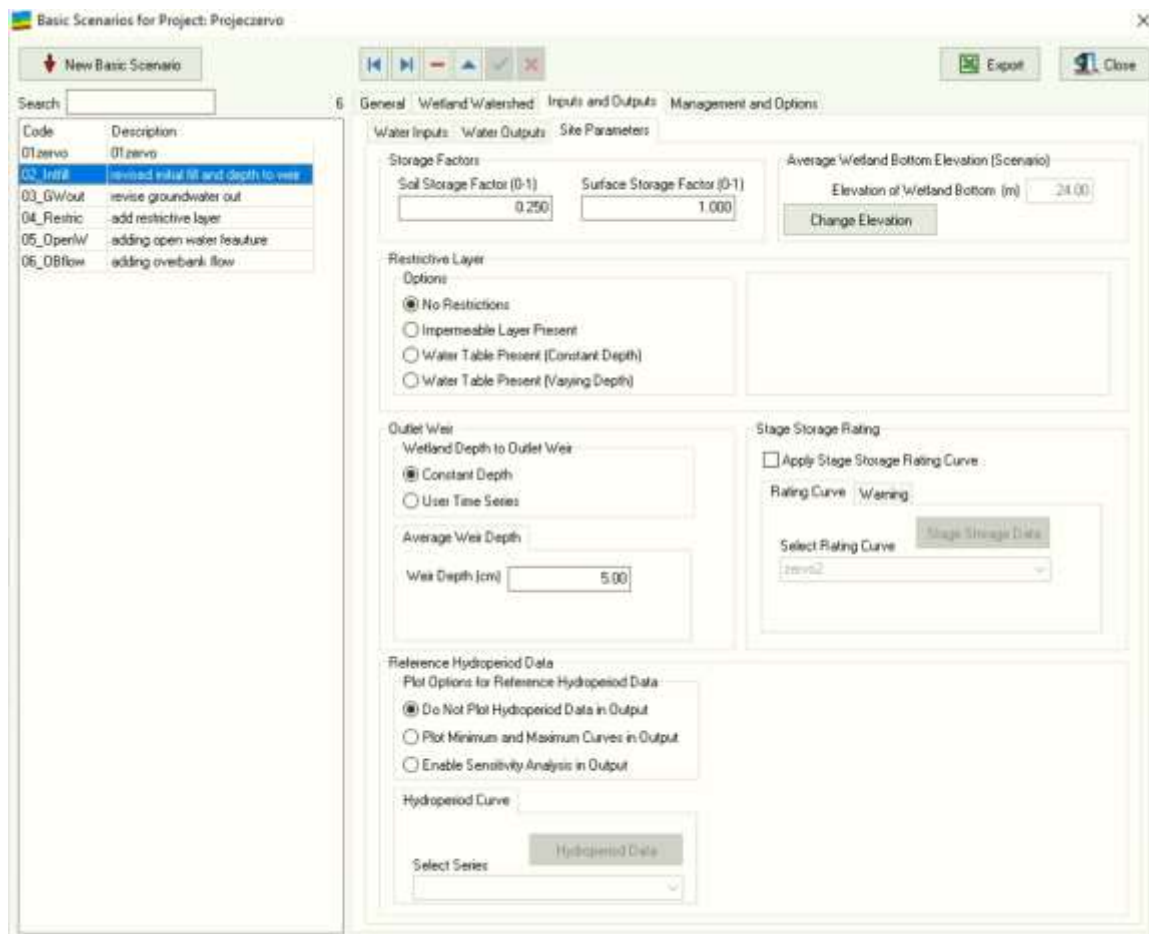


Εικόνα 18. Καρτέλα καθορισμού αρχικών εισροών και μέθοδος εισροής υπόγειων νερών



Εικόνα 19. Καρτέλα καθορισμού μεθόδου εκροών υπόγειων νερών

Στην καρτέλα παραμέτρων τοποθεσίας, ορίζονται οι παράγοντες αποθήκευσης για τον υδροβιότοπο. Ο συντελεστής αποθήκευσης εδάφους ορίζεται στο 0.250, ενώ ο συντελεστής αποθήκευσης επιφάνειας ορίζεται στο 1.00. Το μέσο υψόμετρο του βυθού του υδροτόπου είναι 24 m, χωρίς κανένα περιοριστικό στρώμα. Ορίζεται φράγμα εξόδου και σταθερό βάθος με μέσο όρο στα 5 cm. Επίσης, εφαρμόζεται η καμπύλη βαθμολογίας αποθήκευσης σταδίου. Σημειώνεται ότι δεν πρέπει να σχεδιαστούν δεδομένα υδροπεριόδου στην έξοδο.



Εικόνα 20. Καρτέλα παραμέτρων τοποθεσίας για του υγροβιότοπο, συμπεριλαμβανομένων των συντελεστών αποθήκευσης και του μέσου υψομέτρου του βυθού.

Οι προδιαγραφές του καναλιού του υγροβιότοπου περιλαμβάνουν ένα απλό τραπεζοειδές κανάλι και τα αντίστοιχα δεδομένα. Ο συντελεστής Manning, γνωστός και ως Manning's roughness coefficient ή Manning's n , είναι ένας εμπειρικός αριθμός, που χρησιμοποιείται στη υδραυλική, για τον υπολογισμό της ταχύτητας ροής του νερού σε ανοιχτά κανάλια, όπως ποτάμια, ρέματα και αγωγούς. Αυτός ο συντελεστής είναι σημαντικός για τον προσδιορισμό της τριβής του νερού με την επιφάνεια του καναλιού και την υπολογισμό του ποσοστού ροής με βάση τις συνθήκες του καναλιού.

Ο συντελεστής Manning ορίζεται από την εξίσωση Manning:

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2}$$

Όπου:

- V είναι η μέση ταχύτητα ροής του νερού (σε μέτρα ανά δευτερόλεπτο ή πόδια ανά δευτερόλεπτο),
- n είναι ο συντελεστής Manning (ή Manning's n),
- R είναι ο υδραυλικός ακτίνας (ή υδραυλική ακτίνα) του καναλιού (σε μέτρα ή πόδια), και
- S είναι η κλίση του καναλιού (η αναλογία αλλαγής ύψους προς αλλαγή μήκους).

Οι τιμές του συντελεστή Manning n κυμαίνονται από πολύ χαμηλές για λείες επιφάνειες (όπως τσιμεντένιοι αγωγοί) έως πολύ υψηλές για ανώμαλες επιφάνειες (όπως φυσικά ρέματα με βλάστηση και άλλα εμπόδια). Για παράδειγμα, οι τιμές του n μπορούν να κυμαίνονται από περίπου 0,01 για πολύ λείες επιφάνειες έως 0,1 ή περισσότερο για ανώμαλες επιφάνειες. Ο συντελεστής Manning είναι κρίσιμος στον σχεδιασμό και τη μοντελοποίηση υδραυλικών συστημάτων και υδρολογικών μελετών, καθώς επηρεάζει την ακρίβεια των υπολογισμών ροής και την αντιληψία των υδραυλικών συνθηκών στα ανοιχτά κανάλια.

Η επάνδρωση Manning's n ανέρχεται σε 0.050, ενώ το πλάτος της βάσης του καναλιού είναι 4 m. Η κλίση της πλευράς του καναλιού (x1) είναι 1.00 και η κλίση του καναλιού ανέρχεται σε 0.0010. Η ροή εισροής στο κανάλι είναι με ρυθμό 1.620 cms και με το υψόμετρο του καναλιού στη δομή εισροής να ανέρχεται στα 20.00 m.

- Το Cipoletti Weir έχει μήκος weir (φράγματος) στα 7.00 m.
- Η δομή εισροής (24.10 m), την ανύψωση της κορυφής του υγροτόπου (25.00 m), την ανύψωση του πυθμένα του υγροτόπου (24.00 m) και το μήκος της κορυφής του υγροτόπου (10.00 m).
- Η καμπύλη δείχνει μια άνοδο στην ανύψωση με την αύξηση της εκφόρτισης.

Basic Scenarios for Project: Projeczero

New Basic Scenario

Search

Code	Description
01.zervo	01.zervo
02_initil	revised initial fill and depth to weir
03_GW/out	revised groundwater out
04_Restrict	add restrictive layer
05_Openw/	adding open water feature
06_OB/low	adding overbank flow

General Wetland/Watershed Inputs and Outputs Management and Options

Water Inputs Water Outputs Site Parameters Stream Overbank Flow

Stream Channel Specification

☒ Simple Trapezoidal Channel

☐ Trapezoidal Channel with Simple Floodplain

☐ Irregular Channel

Calc Stage-Discharge Curve

Export Stage-Discharge Data

Simple Trapezoidal Channel Data Trapezoidal Channel Section Stage-Discharge Curve

Stream Channel Data

Manning's n

Manning's n

0.050

Channel Bottom Width (m)

4.00

Channel Side Slope (x1)

1.00

Channel Slope

0.0010

Stream Base Flow (cms)

1.62000

Elevation of Stream Bed at Inflow Structure (m)

20.00

The stream watershed parameters (watershed area and curve number) are managed at project level

Type of Inflow Structure

☒ Cipolletti Weir

☐ Trapezoidal Inflow Channel

☐ Broad-Crested Weir

Cipolletti Weir

Weir Length (m)

7.00

Structure Geometry

Elevation of Inflow Structure Invert (m)

24.10

Elevation of Wetland Berm (Top) (m)

25.00

Elevation of Wetland Bottom (m)

24.00

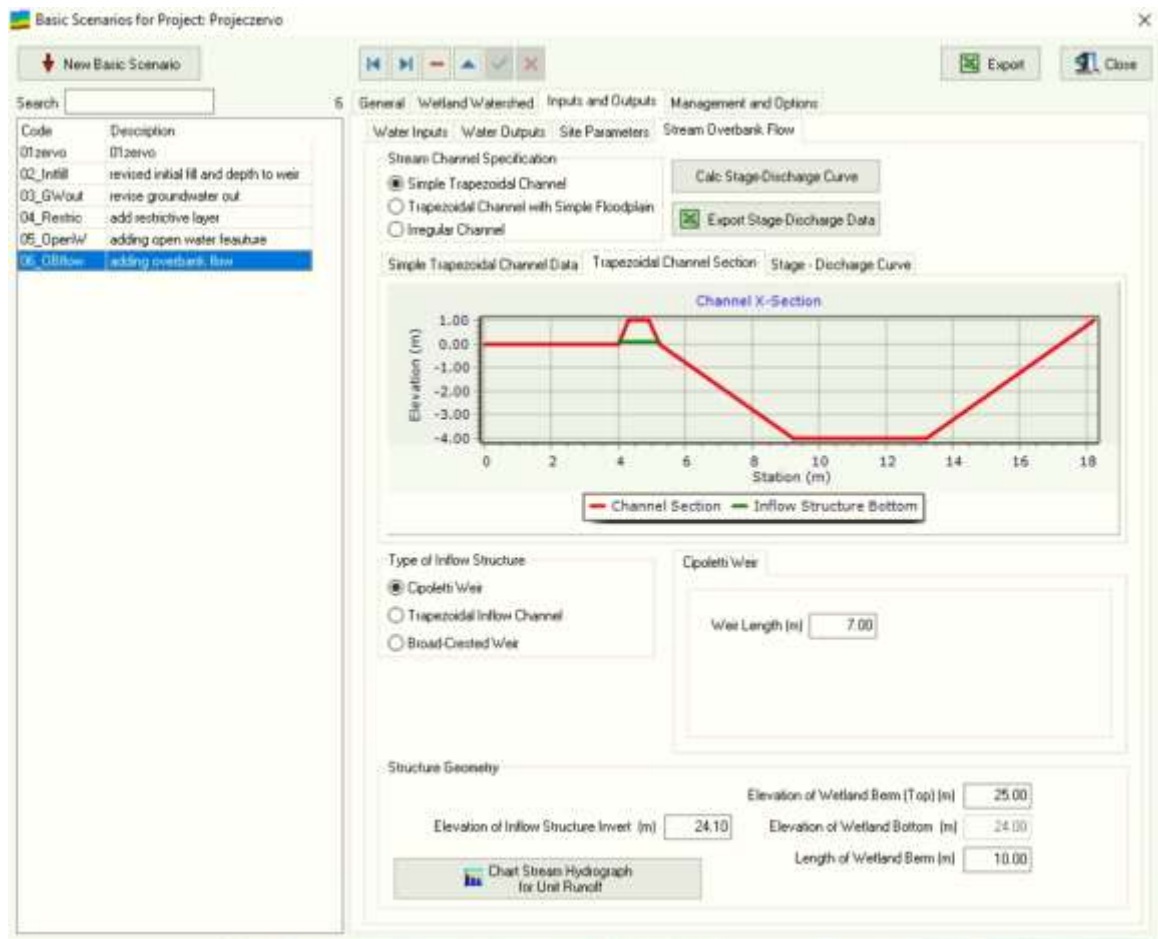
Length of Wetland Berm (m)

10.00

Chart Stream Hydrograph for Unit Runoff

Εικόνα 21. Καρτέλα παραμέτρων καναλιού και δεδομένα ροής.

Το διάγραμμα εμφανίζει το υψόμετρο (elevation) σε μέτρα σε σχέση με την απόσταση (station) σε m. Η κόκκινη γραμμή αντιπροσωπεύει τη διατομή του τεχνητού καναλιού (Channel Section) και η πράσινη γραμμή τον πυθμένα της δομής εισροής (Inflow Structure Bottom).



Εικόνα 22.Καρτέλα διαγράμματος κατασκευής τεχνητού καναλιού ροής.

6.Αποτελέσματα Wetbud

6.1 Δεδομένα

Το έργο προσδιορίζεται με τον κωδικό «Projectzervno» και έχει μια σύντομη περιγραφή με την ένδειξη «Project». Παρέχει τη δυνατότητα να υποδεικνύει την ενεργή κατάσταση του έργου, καθώς και με συντεταγμένες γεωγραφικού πλάτους και μήκους 40,4808 και 23,7073 αντίστοιχα. Το μέσο βάθος του υδροβιότοπου μετράτε στα 24,00 μέτρα. Εντός των ρυθμίσεων του έργου, υπάρχει μια επιλογή για την ενεργοποίηση με χρήσης του WEM, μαζί με την επιλογή ενσωμάτωσης υπερχειλίσσης πλημμύρας με χρήση μονάδας υδρογράφου χωρίς διάσταση. Αποτελεί μια εξειδικευμένη μέθοδο στην υδρολογική μοντελοποίηση. Το έργο λειτουργεί στο διεθνές σύστημα S.I., χρησιμοποιώντας συγκεκριμένα, τα μέτρα και τα εκατοστά ως μονάδες.

The screenshot shows the 'Define Projects' window with the following details:

- Project Code:** 2024
- Project Name:** Projectzervno
- Code:** Projectzervno
- Short Description:** Project06
- Latitude:** 40.4808
- Longitude:** 23.7073
- Average Wetland Bottom Elevation (Reference) (m):** 24.00
- Active:** ☒
- Use WEM:** ☒
- Use Stream Overbank with Dimensionless Unit Hydrograph:** ☒
- Project Dates:**
 - Date Created: 2023-05-08 13:54
 - Date Last Modified: 2024-07-15 09:32
- Project Units:** ☒ Metric (m, cm)
- Growing Season:**
 - From Month/Day: 1 / 15
 - To Month/Day: 11 / 15
- Selection of Growing Season Periods:**
 - ☒ Manual Selection
 - ☐ March 1 to Nov 1
 - ☐ Feb 1 to Dec 1
 - ☐ March 15 to Nov 15
 - ☐ Feb 19 to Nov 4
 - ☐ April 4 to Nov 4
- Project Management Utilities:**
 - Duplicate Current Project
 - Duplicate Current Project and All Project Specific Data
 - Duplicate Current Project and All Project Specific Data and Switch Units
 - Delete Current Project and All Project Specific Data

Εικόνα 23. Καρτέλα επιλογής Project και παραμέτρων του.

Επιλεγμένος σταθμός αναφοράς είναι ο OMS11, ο οποίος τοποθετήθηκε χειροκίνητα από εμάς διότι δεν αναφερόταν στη λίστα του διεθνούς συστήματος NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Για τους σταθμούς WETS, η απόσταση επιλογής κυμαίνεται από 10 έως 50 μίλια, με την επιλογή για 50 μίλια να είναι επιλεγμένη. Η λίστα των σταθμών WETS περιλαμβάνει σταθμούς κοντά στο έργο, με το «sms31» να βρίσκεται στην Ελλάδα. Αυτό βοηθά στη διαχείριση των δεδομένων για σταθμούς που είναι σημαντικοί για το έργο.

Στην ενότητα με τίτλο «Δεδομένα Υδατοροών», παρουσιάζεται μια ολοκληρωμένη συλλογή δεδομένων που αφορά για περιοχές λεκάνης απορροής και για υδροβιότοπους. Τα δεδομένα περιλαμβάνουν διάφορες τιμές, με την «Συνολική περιοχή λεκάνης απορροής για άμεση επιφανειακή απορροή», η οποία είναι 49.000 m^2 , την «Κατασκευασμένη περιοχή υδροβιότοπων», η οποία εκτείνεται σε 1.500 m^2 και την «Υπάρχουσα περιοχή υδροβιότοπου», η οποία επί του παρόντος βρίσκεται σε $0,00 \text{ m}^2$. Περαιτέρω, την «Συνολική Έκταση Υδροβιότοπων» τεκμηριώνεται ως 1.500 m^2 , ενώ την «Καθαρή Επιφάνεια Λεκάνης Απορροής Άμεσης Επιφανειακής Απορροής» υπολογίζεται σε 47.500 m^2 . Επιπρόσθετα, αξίζει να σημειωθεί ότι ο αριθμός καμπύλης NRCS που έχει αποδοθεί στη συγκεκριμένη λεκάνη απορροής έχει την αδιάστατη τιμή 70. Στην ενότητα αυτή περιλαμβάνονται και τα δεδομένα που αφορούν υπολογισμούς υπόγειων υδάτων με χρήση του WEM. Αυτές οι πληροφορίες περιλαμβάνουν το «Πλάτος του κατασκευασμένου υδροβιότοπου στον πυθμένα του παρακείμενου πρηνούς» που είναι $100,00 \text{ m}$, το «πάχος του κατασκευασμένου υδροβιότοπου στον πυθμένα του παρακείμενου πρηνούς» που είναι $10,00 \text{ m}$ και την «Υδραυλική αγωγιμότητα της πλαγιάς» $0,0500 \text{ m/s}$.

Basic Scenarios for Project: Projectzero

New Basic Scenario

Search

Code	Description
01zero	01zero
02_Init	revised initial fill and depth to weir
03_GW/out	revise groundwater out
04_Restrict	add restrictive layer
05_Openw/	adding open water leachate
06_DBflow	adding overbank flow

6 General Wetland/Watershed Inputs and Outputs Management and Options

Wetland and Watershed Data

Total Watershed Area for Direct Surface Runoff (m ²)	49000.00
Constructed Wetland Area (m ²)	1500.00
Existing Wetland Area (m ²)	0.00
Total Wetland Area (m ²)	1500.00
Net Watershed Area for Direct Surface Runoff (m ²)	47500.00
Watershed NRCS Curve Number	70

Data for Groundwater Calculations Utilizing WEM

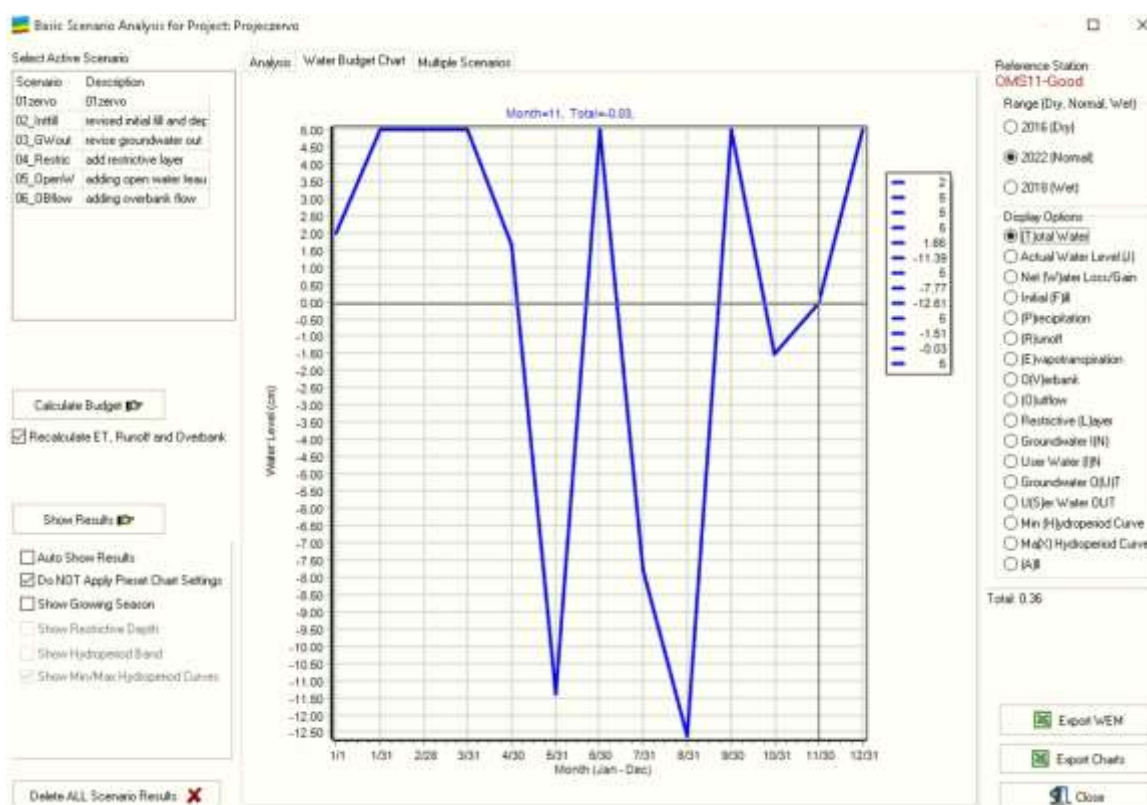
Width of Constructed Wetland at Adjacent Hillslope Bottom (m)	100.00
Thickness of Constructed Wetland at Adjacent Hillslope Bottom (m)	10.00
View Ksat Table	Hydraulic Conductivity of Hillslope (m/s)
	0.05000000

Εικόνα 24. Καρτέλα καθορισμού παραμέτρων του υδροβιότοπου της Ολυμπιάδας

6.2 Ανάλυση Δεδομένων

6.2.1 Υγροβιότοπος 1.500 m² της περιοχής της Ολυμπιάδας

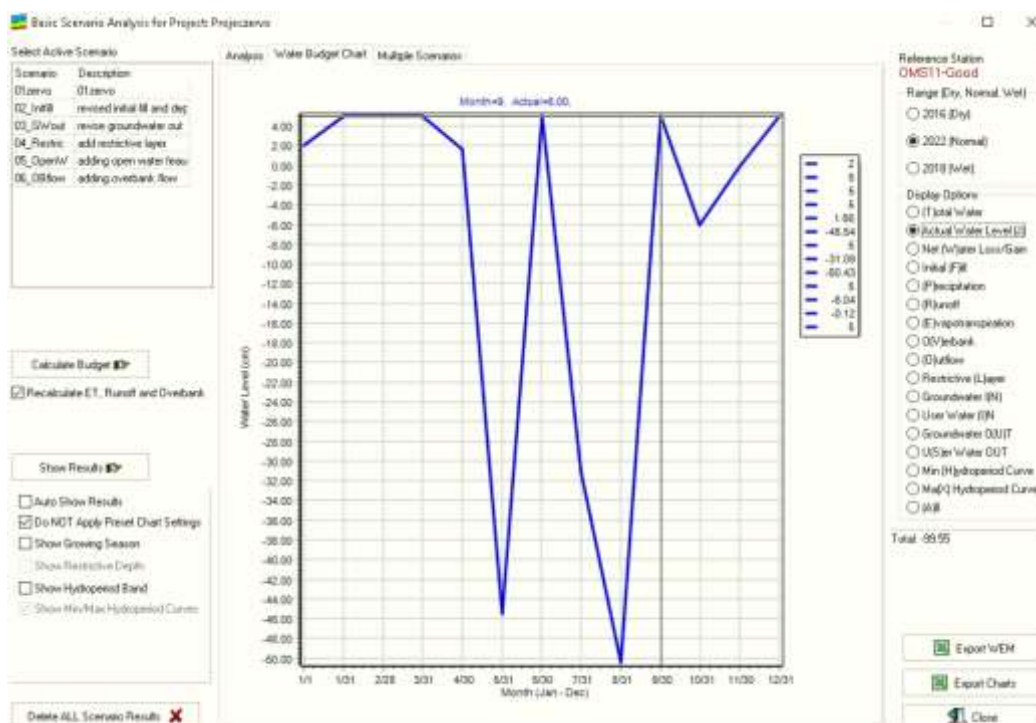
Αρχικά, μελετήθηκε ο υγροβιότοπος των 1.500 m². Με βάση των καθορισμών των τιμών επιλογής της περιοχής της Ολυμπιάδας στο πρόγραμμα, τα αποτελέσματα που εξάγαμε ήταν τα εξής: Το κύριο τμήμα της παρακάτω εικόνας, απεικονίζει ένα διάγραμμα υδρολογικής ισορροπίας που περιλαμβάνει τη στάθμη του νερού κατά τη διάρκεια κάθε έτους ανά μήνα με βάση τα δεδομένα που εισαχθήκανε για τον υγροβιότοπο των 1.500 m².



Εικόνα 25. Καρτέλα αποτελεσμάτων στάθμης νερού για τον υγροβιότοπο των 1.500 m² κανονικής περιόδου της περιοχής της Ολυμπιάδας.

Το παρακάτω διάγραμμα καταγράφει τη στάθμη του νερού σε εκατοστά κατά τη διάρκεια του έτους, εμφανίζοντας σημαντικές μεταβολές στη στάθμη για τον υδροβιότοπο των 1.500 m².

Τον Ιανουάριο, η στάθμη του νερού ξεκινά από περίπου 2 cm και αυξάνεται σταδιακά μέχρι περίπου 5 cm στο τέλος του μήνα. Τον Φεβρουάριο, η στάθμη παραμένει σταθερή κοντά στα 5 cm. Στα τέλη του Μαρτίου, παρατηρείται πτώση της στάθμης του νερού, η οποία συνεχίζεται μέχρι τον Απρίλιο φτάνοντας περίπου στα 1,66 cm. Επίσης, παρατηρούμε την στάθμη του νερού να κατεβαίνει απότομα στα -45,54 cm και ανεβαίνει ξανά σε 5 cm τον Ιούνιο. Τον Ιούλιο, η στάθμη του νερού πέφτει ξανά στα περίπου -31,09 cm και τον Αύγουστο φτάνει στα -50,43 cm όπου παίρνει και την μέγιστη αρνητική τιμή. Τον Σεπτέμβριο, η στάθμη εξισορροπείται ξανά σε 5 cm έπειτα από αυξημένη κατακρήμνιση της βροχής, ενώ τον Οκτώβριο μειώνεται ξανά κοντά στα -6,04 cm. Τον Νοέμβριο, υπάρχει άνοδος στη στάθμη του νερού φτάνοντας περίπου στα 0 cm και τον Δεκέμβριο η στάθμη του νερού αυξάνεται σταδιακά από περίπου 0 cm σε περίπου 5 cm. Το συνολικό ισοζύγιο νερού για το έτος δείχνει μια τελική τιμή -101.56 cm που αναφέρεται στο κάτω μέρος της δεξιάς στήλης επιλογών.

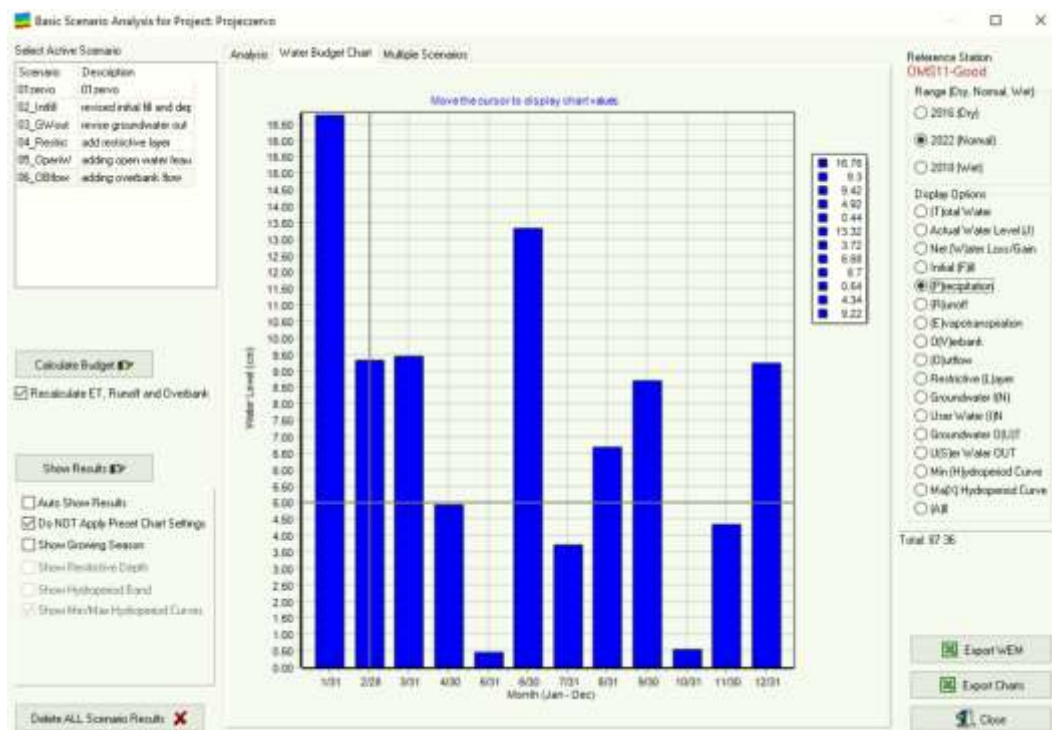


Εικόνα 26. Καρτέλα αποτελεσμάτων πραγματικού νερού κανονικής περιόδου με στάθμη νερού σε cm κατά την διάρκεια του έτους για τον υδροβιότοπο των 1.500 m² της περιοχής της Ολυμπιάδας.

Το παρακάτω διάγραμμα δείχνει τις μεταβολές στη στάθμη του νερού (κατακρήμνιση) ανά μήνα κατά τη διάρκεια του έτους, με τις ακόλουθες τιμές για τον υγροβιότοπο των 1.500 m²:

- **Ιανουάριος:** 16.76 cm
- **Φεβρουάριος:** 9.3 cm
- **Μάρτιος:** 9.42 cm
- **Απρίλιος:** 4.92 cm
- **Μάιος:** 0.44 cm
- **Ιούνιος:** 13.32 cm
- **Ιούλιος:** 3.72 cm
- **Αύγουστος:** 6.68 cm
- **Σεπτέμβριος:** 8.7 cm
- **Οκτώβριος:** 0.54 cm
- **Νοέμβριος:** 4.34 cm
- **Δεκέμβριος:** 9.22 cm

Η συνολική κατακρήμνιση για το έτος για τον υγροβιότοπο των 1.500 m² είναι 87.36 cm.

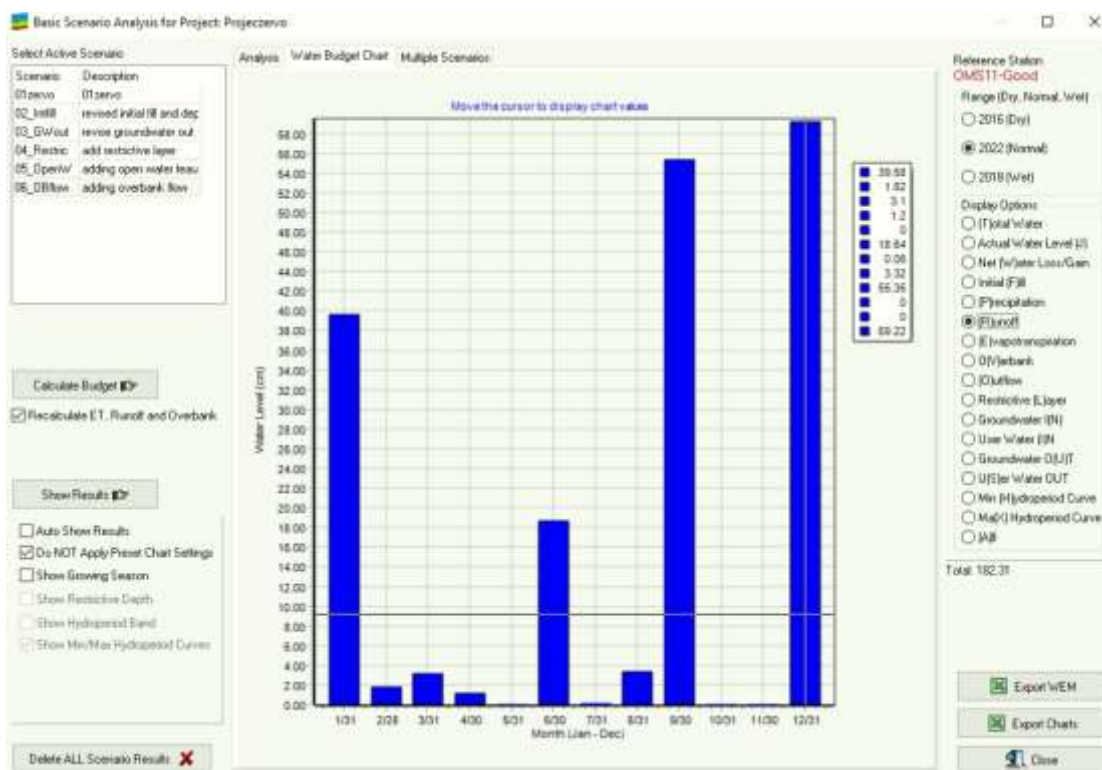


Εικόνα 27. Καρτέλα αποτελεσμάτων κατακρήμνισης κανονικής περιόδου ανά μήνα σε cm για τον υγροβιότοπο των 1.500 m² της περιοχής της Ολυμπιάδας.

Η εικόνα που ακολουθεί δείχνει το υδρολογικό ισοζύγιο για το ίδιο έργο, επικεντρωμένο στην απορροή για τον υγροβιότοπο των 1.500 m². Το διάγραμμα καταγράφει τις μεταβολές στη στάθμη του νερού ανά μήνα, με τις ακόλουθες τιμές:

- **Ιανουάριος:** 39.58 cm
- **Φεβρουάριος:** 1.82 cm
- **Μάρτιος:** 3.1 cm
- **Απρίλιος:** 1.2 cm
- **Μάιος:** 0 cm
- **Ιούνιος:** 18.64 cm
- **Ιούλιος:** 0.06 cm
- **Αύγουστος:** 3.32 cm
- **Σεπτέμβριος:** 55.35 cm
- **Οκτώβριος:** 0.0 cm
- **Νοέμβριος:** 0.0 cm
- **Δεκέμβριος:** 59.22 cm

Η συνολική ροή απορροή του υγροβιότοπου των 1.500 m² είναι 182.29 cm.

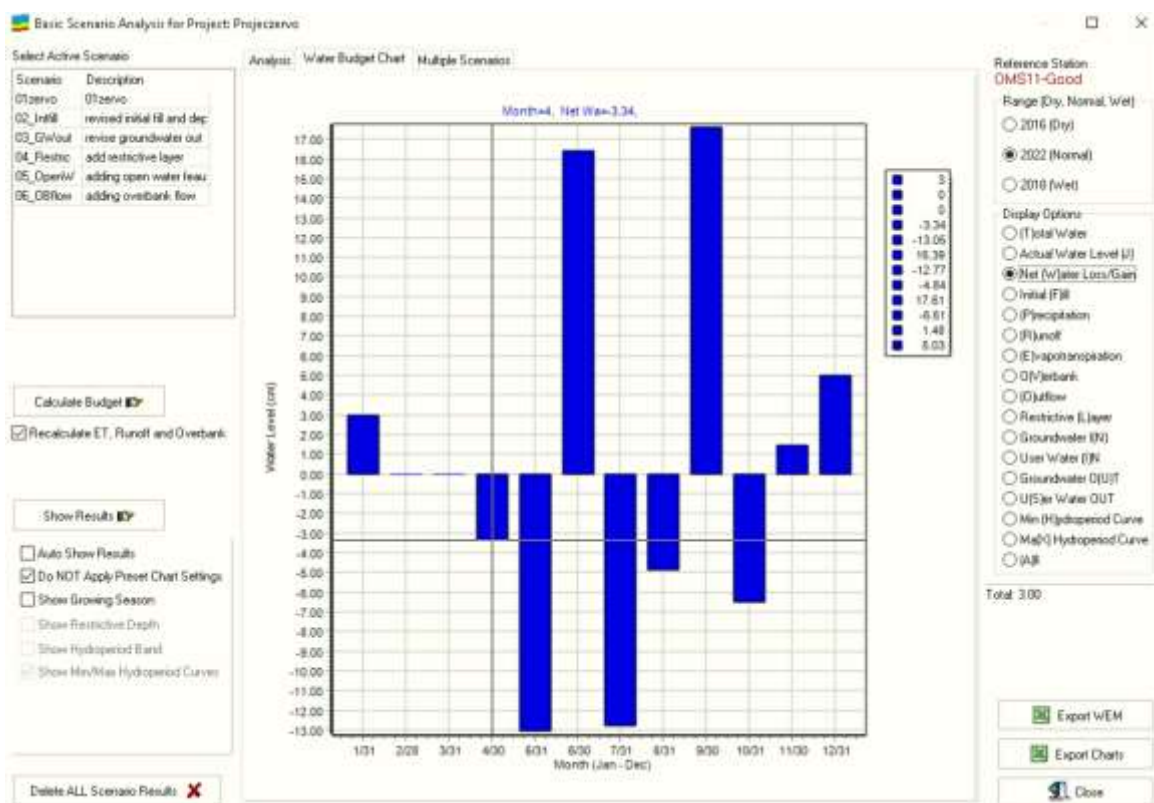


Εικόνα 28. Καρτέλα αποτελεσμάτων απορροής από το υγροβιότοπο σε κανονική περίοδο ανά μήνα σε cm για τον υγροβιότοπο των 1.500 m² της περιοχής της Ολυμπιάδας.

Η επόμενη εικόνα δείχνει την καθαρή απώλεια/κέρδος νερού (Net Water Loss/Gain) των 1.500 m² της περιοχής Ολυμπιάδας για το έτος:

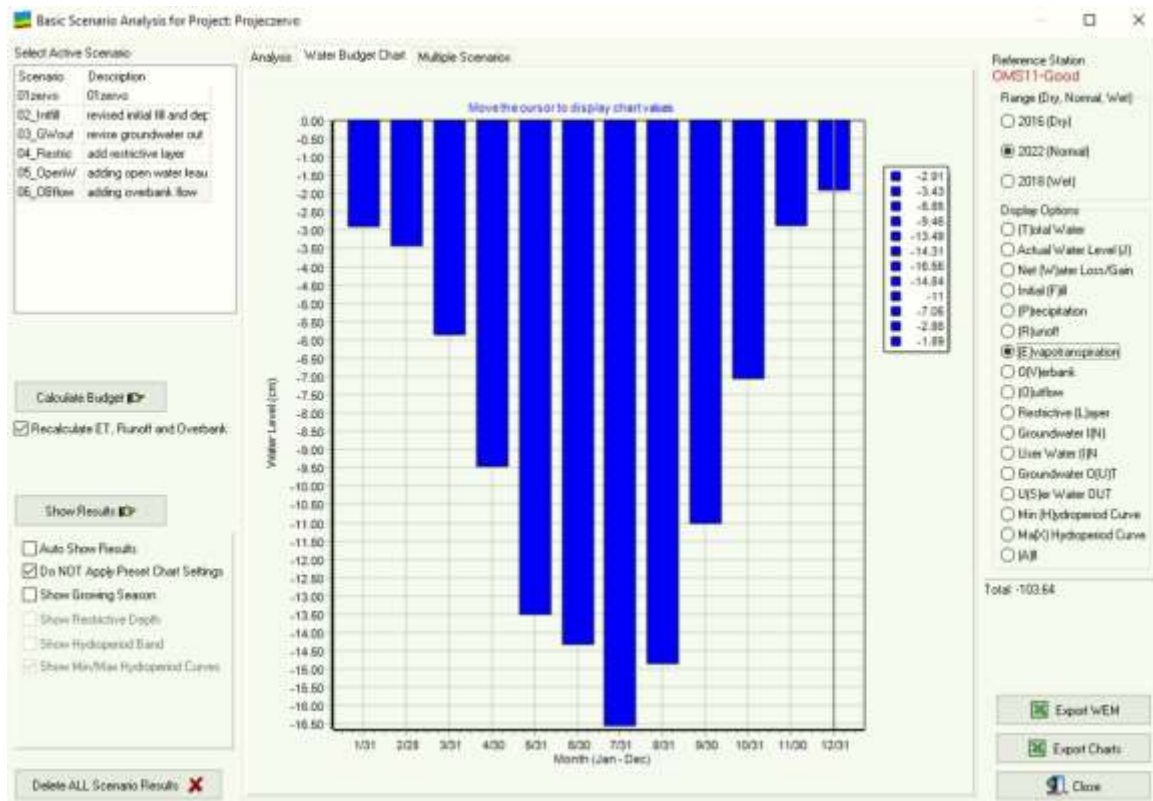
- Ιανουάριος: 3.00cm
- Απρίλιος: -3.34 cm
- Μάιος: -13.05
- Ιούνιος: 16.39 cm
- Ιούλιος: -12.77 cm
- Αύγουστος: -4.84 cm
- Σεπτέμβριος: 17.61 cm
- Οκτώβριος: -6.51 cm
- Νοέμβριος: 1.48cm
- Δεκέμβριος: 5.03 cm

Η συνολική καθαρή απώλεια/κέρδος νερού για το έτος για τον υγροβιότοπο των 1.500 m² της περιοχής Ολυμπιάδας είναι 3 cm.

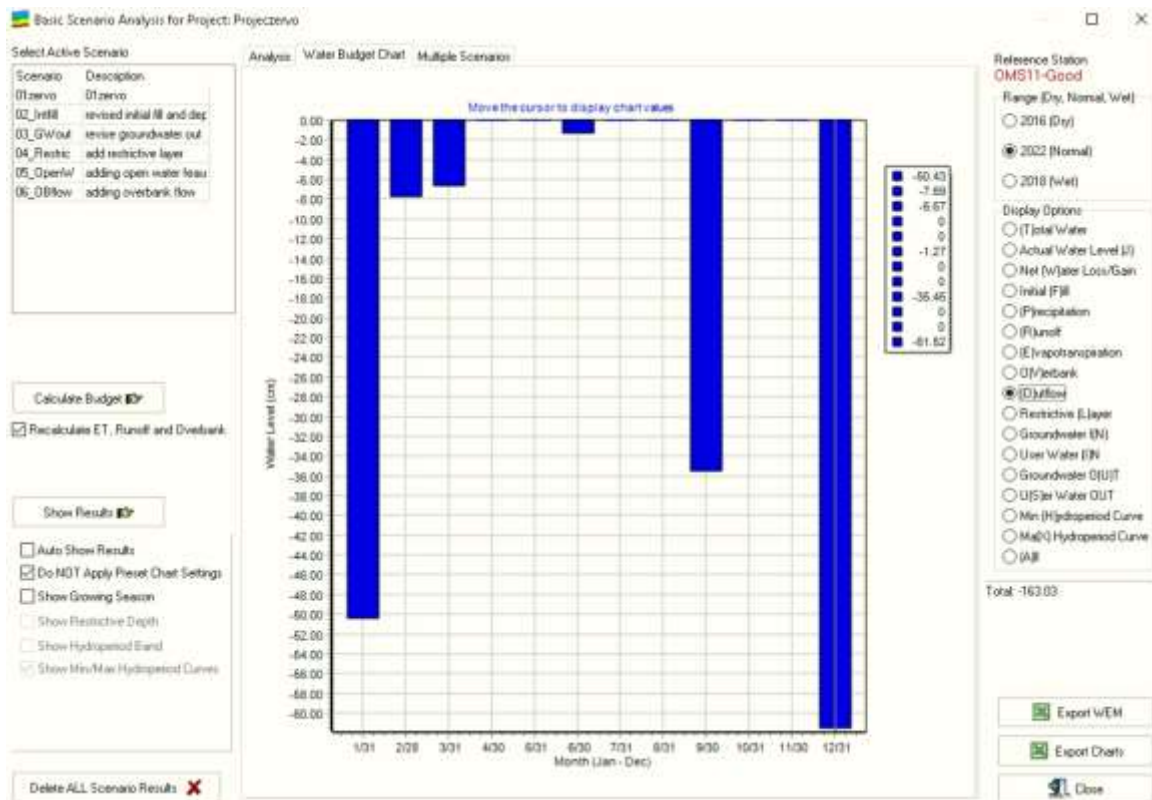


Εικόνα 29 Καρτέλα αποτελεσμάτων της καθαρής απώλειας/κέρδους νερού για τον υγροβιότοπο των 1500 m² της περιοχής Ολυμπιάδας ανά μήνα σε cm.

Στα επόμενα διαγράμματα, παρατηρούμε ότι η εξάτμιση και η εκροή παρουσιάζουν σημαντικές μηνιαίες διακυμάνσεις για τον υγροβιότοπο των 1.500 m². Η εξάτμιση κορυφώνεται τον Ιούλιο με -16.55 cm και είναι σχετικά υψηλή τους θερινούς μήνες, ενώ είναι χαμηλότερη τους χειμερινούς μήνες. Αντίθετα, η εκροή είναι ιδιαίτερα υψηλή τον Ιανουάριο και τον Δεκέμβριο, με τιμές -50.43 cm και -61.52 cm αντίστοιχα, ενώ τους καλοκαιρινούς μήνες η εκροή είναι πολύ χαμηλή ή μηδενική. Αυτό υποδεικνύει έντονη μεταβλητότητα στην υδρολογική συμπεριφορά του έργου, ανάλογα με την εποχή του χρόνου.



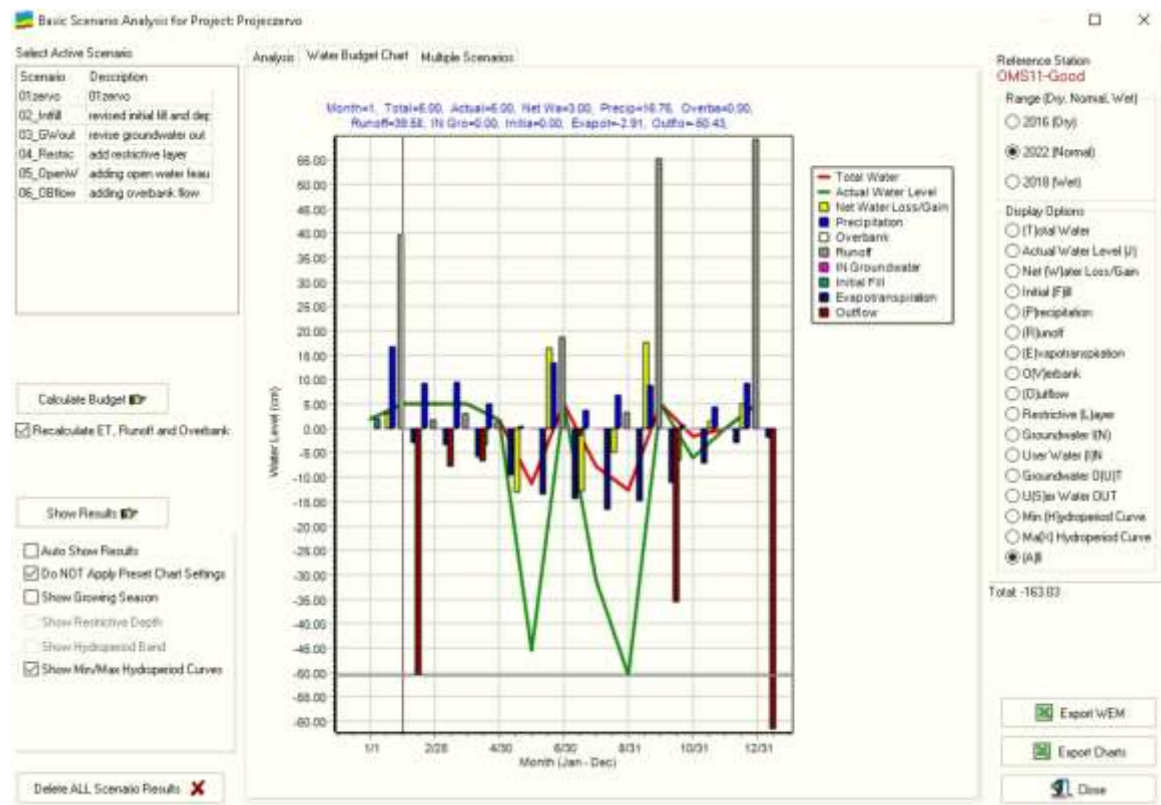
Εικόνα 31. Καρτέλα αποτελεσμάτων εξάτμισης υγροβιότοπου σε κανονική περίοδο ανά μήνα για τον υγροβιότοπο των 1.500 m² της περιοχής της Ολυμπιάδας



Εικόνα 30. Καρτέλα διακυμάνσεων εκροής σε κανονική περίοδο ανά μήνα για τον υδροβιότοπο των 1.500 m² της περιοχής της Ολυμπιάδας.

Η τελευταία εικόνα παρουσιάζει ένα σύνθετο διάγραμμα ανάλυσης υδρολογικού ισοζυγίου για το έργο "Projectzervno", όπου απεικονίζονται διάφορες παράμετροι υδρολογικής συμπεριφοράς κατά τη διάρκεια του έτους. Στο διάγραμμα εμφανίζονται τα ακόλουθα δεδομένα: η συνολική στάθμη νερού (Total Water), η πραγματική στάθμη νερού (Actual Water Level), η καθαρή απώλεια/κέρδος νερού (Net Water Loss/Gain), η κατακρήμνιση (Precipitation), η απορροή (Runoff), η εισροή σε υπόγεια νερά (IN Groundwater), η αρχική πλήρωση (Initial Fill), η εξάτμιση/διαπνοή (Evapotranspiration) και η εκροή (Outflow). Οι τιμές για τον Ιανουάριο είναι οι εξής: Total=5.00 cm, Actual=5.00 cm, Net=3.00 cm, Precipitation=16.76 cm, Runoff=39.58 cm, IN Groundwater=0.00 cm, Evaporation=-2.91 cm, και Outflow=-50.43 cm.

Το διάγραμμα δείχνει πως οι διάφοροι παράμετροι αλλάζουν κατά τη διάρκεια του έτους. Για παράδειγμα, παρατηρούμε ότι οι τιμές της εξάτμισης (μπλε γραμμή) είναι χαμηλότερες τους χειμερινούς μήνες και υψηλότερες τους καλοκαιρινούς μήνες, ενώ η εκροή (γκρι γραμμή) εμφανίζει κορυφές κυρίως τον Ιανουάριο και τον Δεκέμβριο. Η κατακρήμνιση (γαλάζιο γραμμή) παρουσιάζει διάφορες αυξομειώσεις καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, με υψηλότερες τιμές την άνοιξη και το φθινόπωρο. Η πραγματική στάθμη του νερού (πράσινη γραμμή) και η καθαρή απώλεια/κέρδους νερού (κίτρινη γραμμή) δείχνουν την υδρολογική επίδραση των παραμέτρων στο σύστημα.



Εικόνα 31. Καρτέλα σύνθετων αποτελεσμάτων υδρολογικού ισοζυγίου του υγροβιότοπου σε κανονική περίοδο για υγροβιότοπο των 1.500 m² της περιοχής Ολυμπιάδας.

6.2.2 Υγροβιότοπος 4.500 m² της περιοχής Ολυμπιάδας

Στην συνέχεια μελετήθηκε ο υγροβιότοπος των 4.500 m² της περιοχής Ολυμπιάδας. Η παρακάτω εικόνα δείχνει το υδρολογικό ισοζύγιο για το έργο "Projectzervon" εστιάζοντας στην "Total Water". Το διάγραμμα παρουσιάζει τις μεταβολές στη στάθμη του νερού κατά τη διάρκεια του έτους για τον υγροβιότοπο των 4.500 m² της περιοχής Ολυμπιάδας. Οι βασικές διακυμάνσεις της στάθμης του νερού του υγροβιότοπου αποτελούν οι εξής:

- Ιανουάριος: 5.00 cm
- Φεβρουάριος: 5.00 cm
- Μάρτιος: 5.00 cm
- Απρίλιος: 0.86 cm
- Μάιος: -12.19 cm
- Ιούνιος: -6.96 cm
- Ιούλιος: -19.77 cm
- Αύγουστος: -26.83 cm
- Σεπτέμβριος: -10.68 cm
- Οκτώβριος: -17.19 cm
- Νοέμβριος: -15.71 cm
- Δεκέμβριος: 5.00 cm

Η συνολική διακύμανση της στάθμης του νερού του υγροβιότοπου για το έτος καταλήγει σε -88.47 cm, όπως φαίνεται στο κάτω μέρος της δεξιάς στήλης επιλογών.



Εικόνα 32. Καρτέλα υδρολογικού ισοζυγίου για τον υγροβιότοπο των 4.500 m² της περιοχής Ολυμπιάδας.

Το ακόλουθο διάγραμμα καταγράφει σημαντικές μηνιαίες μεταβολές για τον υγροβιότοπο των 4.500 m² της περιοχής Ολυμπιάδας σε πραγματικό νερό έως κάτω από την επιφάνεια του.

- Ιανουάριος: 5.00 cm
- Φεβρουάριος: 5.00 cm
- Μάρτιος: 5.00 cm
- Απρίλιος: 0.86 cm
- Μάιος: -48.75 cm
- Ιούνιος: -27.86 cm
- Ιούλιος: -79.10 cm
- Αύγουστος: -107.31 cm
- Σεπτέμβριος: -42.70 cm
- Οκτώβριος: -88.74 cm
- Νοέμβριος: -62.82 cm
- Δεκέμβριος: 5.00 cm

Η συνολική πραγματική στάθμη του νερού για το έτος είναι -436.42 cm.

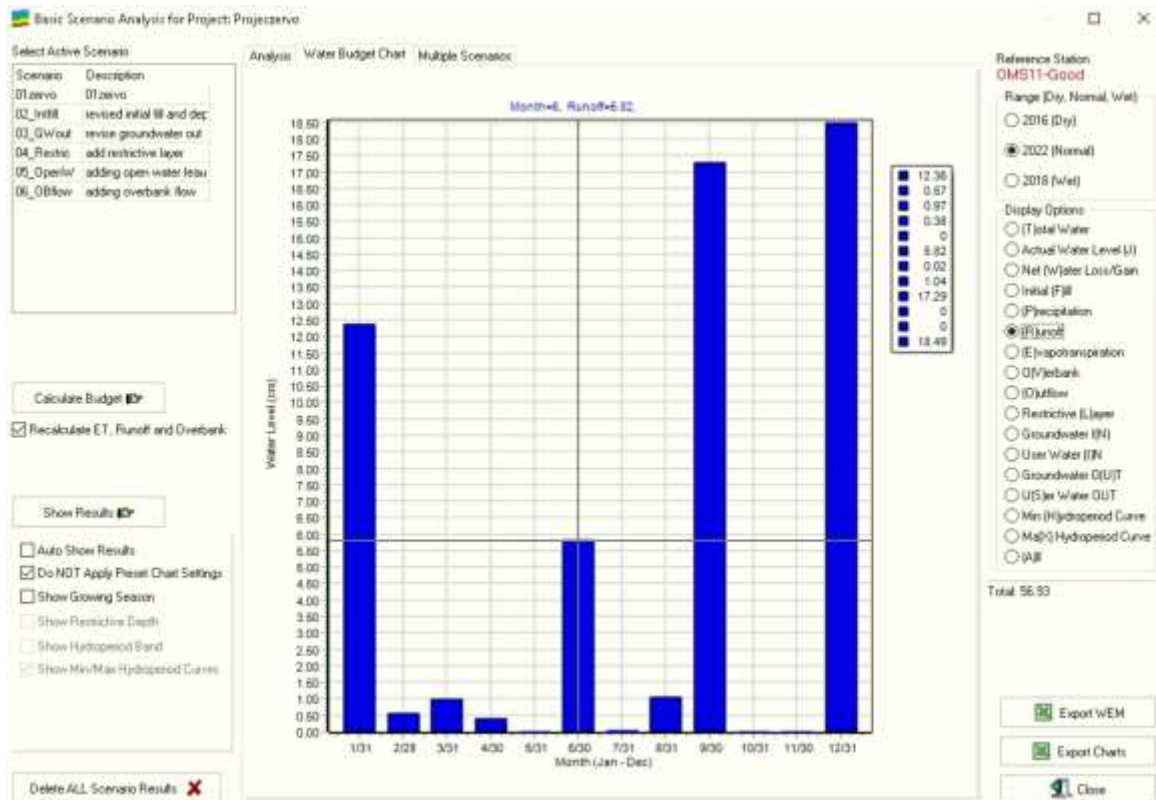


Εικόνα 33. Καρτέλα υδρολογικού ισοζυγίου του υγροβιότοπου για πραγματικό νερό στην περιοχή της Ολυμπιάδας των 4.500 m² της περιοχής Ολυμπιάδας ανά μήνα σε cm.

Η παρακάτω εικόνα δείχνει την απορροή (Runoff) για το έτος. Οι μηνιαίες τιμές των 4.500 m² της περιοχής Ολυμπιάδας είναι οι εξής:

- Ιανουάριος: 12.36 cm
- Φεβρουάριος: 0.57 cm
- Μάρτιος: 0.97 cm
- Απρίλιος: 0.38 cm
- Ιούνιος: 5.82 cm
- Ιούλιος: 0.02 cm
- Αύγουστος: 1.04 cm
- Σεπτέμβριος: 17.29 cm
- Δεκέμβριος: 18.49 cm

Η συνολική απορροή για το έτος είναι 56.94 cm.

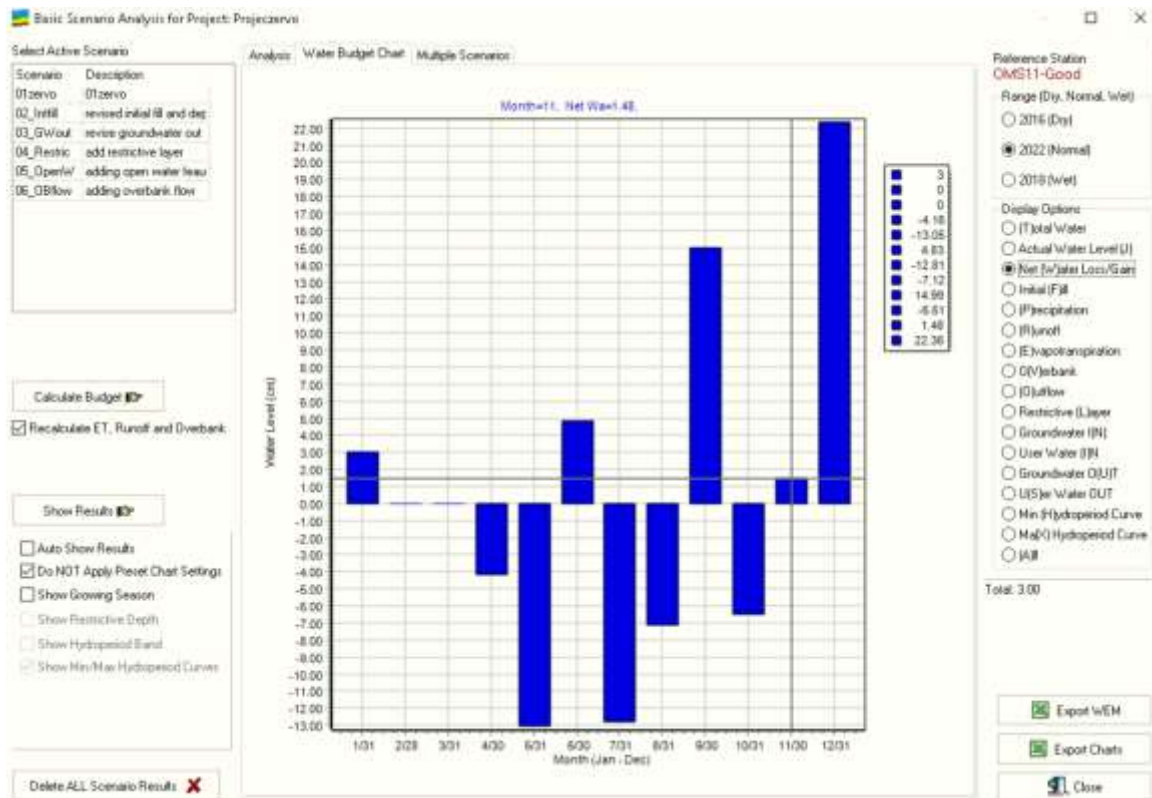


Εικόνα 34. Καρτέλα αποτελεσμάτων συνολικής απορροής ανά μήνα σε cm του υγροβιότοπου των 4.500 m² της περιοχής Ολυμπιάδας.

Η επόμενη εικόνα δείχνει την καθαρή απώλεια/κέρδος νερού (Net Water Loss/Gain) των 4.500 m² της περιοχής Ολυμπιάδας για το έτος:

- Ιανουάριος: 3.00cm
- Απρίλιος: -4.16 cm
- Μάιος: -13.05 cm
- Ιούνιος: 4.83 cm
- Ιούλιος: -12.81 cm
- Αύγουστος: -7.12 cm
- Σεπτέμβριος: 14.99 cm
- Οκτώβριος: -6.51 cm
- Νοέμβριος: 1.48 cm
- Δεκέμβριος: 22.36 cm

Η συνολική καθαρή απώλεια/κέρδος νερού για το έτος για τον υγροβιότοπο των 4.500 m² της περιοχής Ολυμπιάδας είναι 3 cm.

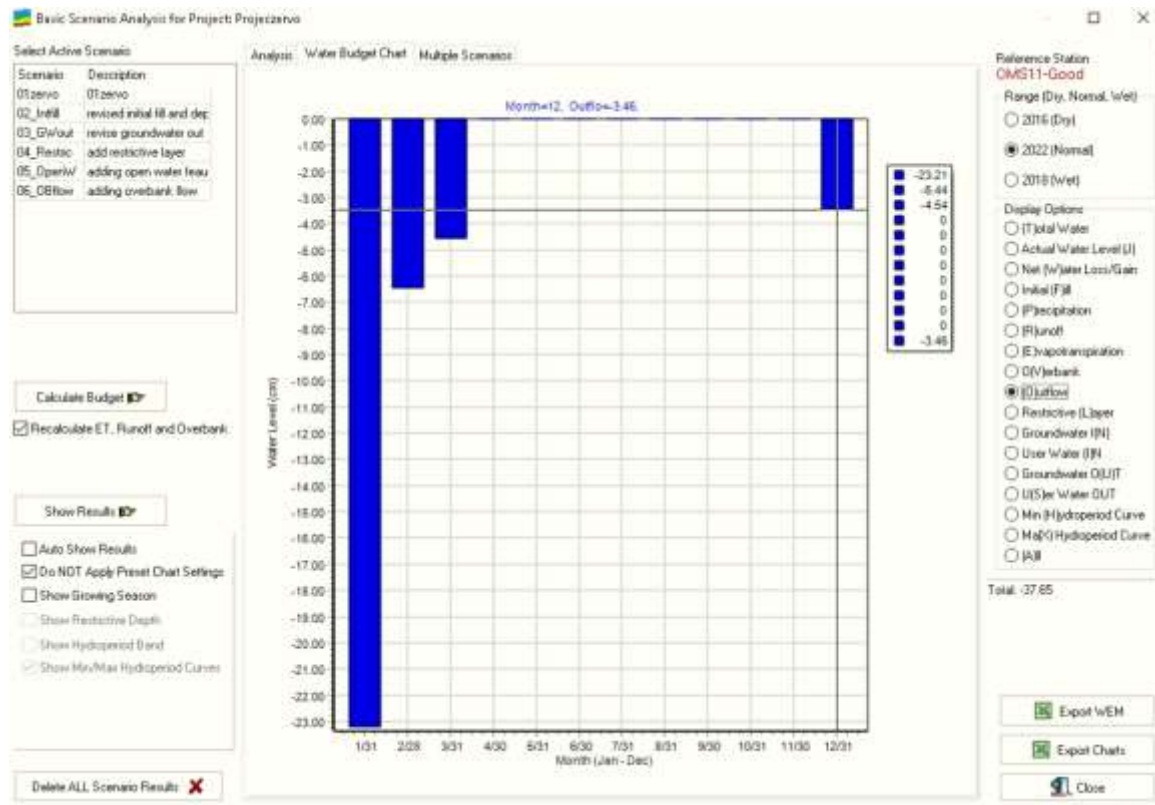


Εικόνα 35. Καρτέλα αποτελεσμάτων καθαρή απώλεια/κέρδους νερού για τον υγροβιότοπο των 4.500 m² της περιοχής Ολυμπιάδας ανά μήνα σε cm.

Στην πιο κάτω εικόνα απεικονίζεται η εκροή (Outflow) για το έτος για τον υγροβιότοπο των 4.500 m² της περιοχής Ολυμπιάδας. Οι τιμές είναι οι εξής:

- Ιανουάριος: -23.21 cm
- Φεβρουάριος: -6.44 cm
- Μάρτιος: -4.54 cm
- Δεκέμβριος: -3.46 cm

Η συνολική εκροή για το έτος για τον υγροβιότοπο των 4.500 m² της περιοχής Ολυμπιάδας είναι -37.65 cm.



Εικόνα 36. Καρτέλα αποτελεσμάτων εκροής για τον υδροβιότοπο των 4.500 m² της περιοχής Ολυμπιάδας ανά μήνα σε cm.

Συνοψίζοντας, παρουσιάζεται ένα σύνθετο διάγραμμα που απεικονίζει τις διάφορες παραμέτρους του υδρολογικού ισοζυγίου για το έργο Projectzervno. Οι βασικές τιμές που καταγράφονται για τον Ιανουάριο για τον υγροβιότοπο των 4.500 m² της περιοχής Ολυμπιάδας, είναι οι εξής: Total=5.00 cm, Actual=-5.00 cm, Net=3 cm, Precipitation=16.76 cm, Runoff=12.36 cm, IN Groundwater=0.00 cm, Evaporation=-2.91 cm, Outflow=-23.21 cm. Το διάγραμμα παρέχει μια ολοκληρωμένη εικόνα των υδρολογικών μεταβολών κατά τη διάρκεια του έτους για τον υγροβιότοπο των 4.500 m² της περιοχής Ολυμπιάδας.



Εικόνα 37 Καρτέλα υδρολογικού ισοζυγίου για τον υγροβιότοπο των 4.500 m² της περιοχής Ολυμπιάδας ανά μήνα.

6.2.3 Σύγκριση των 1.500m² και των 4.500m²

Η ανάλυση των διαγραμμάτων παρουσιάζει τις ακόλουθες παρατηρήσεις:

Υγροβιότοπος 1500m²

Στην περίπτωση του υγροβιότοπου με επιφάνεια 1500 m², οι τιμές για τις διάφορες παραμέτρους του υδρολογικού ισοζυγίου είναι οι εξής:

- **Total Water:** Παρατηρείται μια διακύμανση στη συνολική στάθμη του νερού, με τιμές που κυμαίνονται από 5 cm έως -12.81 cm κατά τη διάρκεια του έτους.
- **Actual Water Level:** Η πραγματική στάθμη νερού παρουσιάζει σημαντικές μεταβολές, με κορυφές -45.54 cm τον Μάιο και -50.43 cm τον Αύγουστο.
- **Runoff:** Η απορροή φτάνει μέχρι και 55.35 cm τον Σεπτέμβρη και 59.22 cm τον Δεκέμβριο.
- **Net Water Loss/Gain:** Η καθαρή απώλεια/κέρδος νερού δείχνει ποικίλες τιμές, με σημαντική αύξηση 16.39 cm τον Ιούνιο και 17.81 cm τον Σεπτέμβριο.
- **Outflow:** Η εκροή κυμαίνεται από -40.43 cm τον Ιανουάριο έως -61.52 cm τον Δεκέμβριο.

Υγροβιότοπος 4500 m²

Στην περίπτωση του υγροβιότοπου με επιφάνεια 4500 m², οι τιμές για τις διάφορες παραμέτρους του υδρολογικού ισοζυγίου παρουσιάζουν διαφορετικά πρότυπα:

- **Total Water:** Η συνολική στάθμη του νερού δείχνει μεγαλύτερες διακυμάνσεις, αλλά με υψηλότερες συνολικές τιμές, υποδεικνύοντας αυξημένη ικανότητα αποθήκευσης.
- **Actual Water Level:** Η πραγματική στάθμη του νερού παρουσιάζει επίσης αυξημένες τιμές, αλλά η διακύμανση μπορεί να είναι μικρότερη λόγω της μεγαλύτερης επιφάνειας.
- **Runoff:** Η απορροή είναι πιθανόν να έχει μικρότερες κορυφές ανά μήνα, λόγω της μεγαλύτερης δυνατότητας απορρόφησης της επιφάνειας.
- **Net Water Loss/Gain:** Η καθαρή απώλεια/κέρδος νερού έδειξε σταθερή τιμή, υποδεικνύοντας βελτιωμένη υδρολογική ισορροπία.

- **Outflow:** Η εκροή ενδέχεται να είναι μικρότερη σε σύγκριση με τον μικρότερο υγρότοπο, λόγω της μεγαλύτερης επιφάνειας που μπορεί να συγκρατήσει περισσότερο νερό.

Η αύξηση της επιφάνειας του υγροβιότοπου από 1500 m² στα 4500 m² βελτιώνει σημαντικά την υδρολογική συμπεριφορά του συστήματος, μειώνοντας τις ακραίες τιμές της απορροής και της εκροής, ενώ αυξάνει την ικανότητα αποθήκευσης νερού. Η μεγαλύτερη επιφάνεια βοηθά στη διατήρηση της υδρολογικής ισορροπίας και μειώνει τις αρνητικές επιπτώσεις των κλιματικών μεταβολών κατά τη διάρκεια του έτους.

Η αντοχή του υγροβιότοπου της Ολυμπιάδας μελετήθηκε σε σχέση με το ύψος του νερού και βρέθηκε ότι η μεγαλύτερη επιφάνεια υγροβιότοπου (τα 4500 m²) παρουσίασε καλύτερη αντοχή στις κλιματικές μεταβολές και υψηλότερη ικανότητα αποθήκευσης νερού σε σύγκριση με τον μικρότερο υγροβιότοπο (των 1500 m²).

Συμπεράσματα

Οι υγροβιότοποι έχουν έναν εξαιρετικά σημαντικό ρόλο ιδιαίτερα σε μεταλλευτικές περιοχές, τόσο για το περιβάλλον όσο και για την τοπική κοινωνία. Για την ορθή λειτουργία ενός υγροβιότοπου είναι σημαντική η διατήρηση του υδατικού ισοζυγίου, δηλαδή της ισορροπίας μεταξύ του νερού που εισέρχεται και εξέρχεται από αυτόν. Για το λόγο αυτό, στην παρούσα διπλωματική εργασία επιλέχθηκε μία περιοχή της Χαλκιδικής, η Ολυμπιάδα καθώς με βάση τη μελέτη των χαρακτηριστικών του εδάφους της, πληρεί αρκετές από τις απαραίτητες προϋποθέσεις για την δημιουργία ενός υγροβιότοπου. Για την επίτευξη του παραπάνω χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στον Ελλαδικό χώρο το λογισμικό Wetbud. Η εφαρμογή του λογισμικού αναδεικνύει τη σημασία της διαχείρισης του υδατικού ισοζυγίου σε περιοχές με έντονη μεταλλευτική δραστηριότητα. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα συγκεντρώνει όλα τα υδρολογικά δεδομένα που εισέρχονται και εξέρχονται στην περιοχή. Το βασικό μοντέλο ήταν σχετικά εύκολο στην τοποθέτηση και λειτουργία και είναι πολύ χρήσιμο στον προϋπολογισμό των υδάτινων αποθεμάτων της περιοχής. Υπήρχε βέβαια, ο περιορισμός του μηνιαίου μέσου όρου του επιπέδου του νερού. Η περιοχή μελέτης μας αποτελείται κυρίως από κρυσταλλοσχιστώδη μεταφορτωμένα πετρώματα τοπικά μικρής ως μέτριας διαπερατότητας γεγονός που περιορίζει την υδραυλική επικοινωνία των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων. (Enveco A.E., 2010). Η κίνηση του νερού στα υπόγεια ύδατα γίνεται μέσω των ρηγματώσεων μικρής ως μέτριας υδροπερατότητας. (Pavlidis A., Varouchakis E. A. & Hristopoulos D. T., 2023)

Το λογισμικό εφαρμόστηκε για δύο διαφορετικές επιφάνειες του υγροβιότοπου, των 1500 m² και των 4500 m² αντίστοιχα. Με βάση τα διαγράμματα εξάγαμε το συμπέρασμα, ότι στην περιοχή της Ολυμπιάδας με την μεγαλύτερη επιφάνεια των 4500m² φαίνεται ότι η συνολική στάθμη του νερού δείχνει μικρότερες διακυμάνσεις και χαμηλότερες τιμές εκροής νερού. Με αποτέλεσμα να μην επηρεάζεται ο υγροβιότοπος και να λειτουργήσει ορθά στην διαχείριση των υγρών αποβλήτων, που με τα κατάλληλα φυτά θα απορροφήσει τους ρύπους από την μεταλλευτική δραστηριότητα της περιοχής.

Φαίνεται η καθαρή απώλεια/κέρδος νερού να έχει σταθερή τιμή και στις δύο διαφορετικές επιφάνειες, συμπεραίνοντας ότι έχουμε μία σωστή υδρολογική ισορροπία. Επιπλέον, η εξάτμιση της περιοχής δείχνει να έχει μία σταθερή αύξηση και μείωση κατά την διάρκεια του έτους και μας οδηγεί σε αποδεκτά δεδομένα. Όμως παρατηρήθηκε ότι η απορροή στην επιφάνεια των 4500m² είναι μικρότερη σε σχέση με την επιφάνεια των 1500m², καθώς μπορεί να συγκρατήσει περισσότερο νερό, λόγω της μεγαλύτερης έκτασης της και αντοχής στις ακραίες καιρικές μεταβολές.

Το πρόγραμμα αυτό είναι πολύ ευαίσθητο και επηρεάζεται από παράγοντες του εδάφους που μπορεί να προσθέσει ο χρήστης. Βέβαια, μπορεί εύκολα κάποιος να οδηγηθεί σε λανθασμένη εξαγωγή συμπερασμάτων αν κάνει το λάθος να αυξήσει ή να μειώσει τις εισροές του νερού στο σύστημα.

Η λειτουργία του λογισμικού στην παρούσα διπλωματική εργασία, συντέλεσε στην πραγματοποίηση αρκετών διορθώσεων και βελτιώσεων της εφαρμογής του Wetbud. Η ανάλυση της λειτουργίας της εφαρμογής Wetbud έδειξε ότι το λογισμικό μπορεί να μοντελοποιήσει το υδατικό ισοζύγιο του υγροβιότοπου της Ολυμπιάδας λαμβάνοντας υπόψη τους διάφορους παράγοντες που ανάδειξε η μελέτη των υγροβιότοπων σε δύο διαφορετικές επιφάνειες της.

Μελέτη για περαιτέρω έρευνα

Περισσότερες έρευνες θα βελτιώσουν την διόρθωση και βελτίωση της εφαρμογής, καθώς η υδρολογία αποτελεί από μόνη της τον πιο δύσκολο παράγοντα στον να τον μοντελοποιήσεις. Εφαρμογή της και σε άλλες περιοχές στον Ελλαδικό χώρο, θα παρέχει καλύτερη εικόνα και θα μπορούν να προστεθούν περισσότεροι παράγοντες. Εφαρμόζοντας το Wetbud σε δύο διαφορετικές περιπτώσεις, μπορείς να συγκρίνεις τα αποτελέσματα. Οι χρήστες θα πρέπει να δίνουν ιδιαίτερη προσοχή στο βάθος του πυθμένα καθώς είναι από τους πιο σημαντικούς παράγοντες όσον αφορά την ακρίβεια στο σχεδιασμό λειτουργικών μοντέλων.

Το Wetbud αποτελεί μία από τις πιο λειτουργικές και ευέλικτες εφαρμογές διαθέσιμες για τον σχεδιασμό προϋπολογισμών νερού υγροβιότοπων. Αυτή η εφαρμογή έχει να προσφέρει πολλά στο να διευκολύνει κατόπιν την στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων που θα οδηγήσουν σε καλύτερη πρόβλεψη των υδάτινων αποθεμάτων σε μια περιοχή. Στόχος μας αποτελεί η αρχή για την ολοκληρωμένη διαχείριση υδατικών πόρων και την προστασία κάθε υγροβιότοπου.

Από μια καλή χαρτογράφηση των περιοχών μπορούμε να συλλέξουμε χρήσιμες πληροφορίες και να τις χρησιμοποιήσουμε ώστε να έχουμε μια διαρκής παρακολούθηση των επιπέδων και της ποιότητας των υπόγειων υδάτων. Με την κατάλληλη χρήση των αποτελεσμάτων του μοντέλου, είναι δυνατή η ανάπτυξη στρατηγικών για την προστασία και την αειφόρο διαχείριση των υδατικών πόρων, διασφαλίζοντας την περιβαλλοντική ισορροπία και την υγεία της τοπικής κοινότητας.

Επίσης, θα προτείναμε συνεχής παρακολούθηση και προσαρμογή των υδατικών ροών και την προσαρμογή των διαχειριστικών πρακτικών με βάση τα αποτελέσματα της μελέτης. Η εγκατάσταση αυτοματοποιημένων συστημάτων καταγραφής μπορεί να βελτιώσει την ακρίβεια των δεδομένων.

Η συνδυασμένη χρήση των μοντέλων Wetbud και Modflow μπορεί να προσφέρει μια ολοκληρωμένη προσέγγιση για τη διαχείριση των υδατικών πόρων και την αποκατάσταση υδροβιότοπων όπως στην περιοχή της Ολυμπιάδας Χαλκιδικής, όπου η μεταλλευτική δραστηριότητα έχει σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Με βάση τα συμπεράσματα που προέκυψαν, παρουσιάστηκαν οι παραπάνω προτάσεις για περαιτέρω έρευνα που μπορούν να ενισχύσουν την κατανόηση του προβλήματος και να οδηγήσουν σε βελτιωμένες πρακτικές. Επίσης περαιτέρω έρευνα μπορεί να επικεντρωθεί στη συλλογή δεδομένων για την ολοκληρωμένη υδρολογική κατάσταση των μεταλλευτικών περιοχών στον Ελλαδικό χώρο, συμπεριλαμβανομένης της αξιολόγησης της ποσότητας και της ποιότητας του υδάτινου περιβάλλοντος της Ελλάδας.

Μοντέλα όπως το Wetbud στον Ελλαδικό χώρο μπορούν να αποτελέσουν τα εργαλεία που δεν ανέναν στην ανάπτυξη προληπτικών μέτρων για την αποφυγή μελλοντικής ρύπανσης και στην διατήρηση της περιβαλλοντικής ισορροπίας.

Βιβλιογραφία

- Ολυμπιάδα. (2024, 06 15). Ανάκτηση από Δήμος Αριστοτέλη Χαλκιδικής: <http://www.dimosaristoteli.gr/gr/villages/olympiada>
- Ελληνικός Χρυσός. (2024, 05 15). Ανάκτηση από <https://www.hellas-gold.com/>
- Κουτσογιάννης. (1997). Στατιστική Υδρολογία: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Álvarez, R., Ordóñez, A., Loredó, J., & Younger, P. L. (2013). Wetland-based passive treatment systems for gold ore processing effluents containing residual cyanide, metals and nitrogen species. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 15(11), 2115-212.
- Υπόγεια ύδατα. (2020). Ανάκτηση από Κέντρο Εκπαιδευτικής Έρευνας: http://www.kee.gr/perivallontiki/teacher4_5.html.
- Στραβόλαιμος, Κ. (2017, Σεπτέμβριος). *Μοντελοποίηση ροής υπογείων υδάτων και μεταφορά ρύπου σε προσχωματικό παράκτιο υδροφορέα της περιφέρειας Αττικής*. Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος.
- Ελληνικός Χρυσός. (2024). *Μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων*. https://environmental.hellas-gold.com/FEK/FEK_B_3322-pdf.
- Agioutanti, R., Ford, W. I., Sama, M. P., & McGill, T. (2024). Impacts of Aquatic Vegetation Dynamics on Nitrate Removal in Karst Agricultural Streams: Insights from Unmanned Aircraft Systems and In Situ Sensing. *Journal of the ASABE*. 67, 2, pp. 89-104 .
- Barbosa, I. A., Amorim, R. S. S., & de Carvalho Dóres, E. F. G. (2015). *A comparison of predicted and measured pesticides concentrations in runoff of cotton farms in Brazil*. *African Journal of Agricultural Research*, 10(3), 108-118.
- cover, c. 1. (2000). *corine land cover* . Ανάκτηση από <http://www.eea.europa.eu/el>.
- Cowardin, L. M. (1979). Fish and Wildlife Service wetland classification: A review. *Classification and inventory of the world's wetlands*. 139-152.

- Enveco A.E. (2010). *Μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων μεταλλευτικών - μεταλλουργικών εγκαταστάσεων της εταιρίας Ελληνικός Χρυσός στη Χαλκιδική*. Ανάκτηση από https://files.hellas-gold.com/mpe/Mi_Texniki_Perilipsi.pdf
- Google Maps. (2024, 07 20). Ανάκτηση από <https://www.google.com/maps/@39.9923747,24.3646831,6z?entry=ttu>.
- Hiza, B. S. (2017). Groundwater and tidal controls on wetland hydrology, Julie J. Metz wetland mitigation bank, Woodbridge, Virginia. . *MS Thesis, Old Dominion University*.
- Koumantakis, I., Dimitrakopoulos, D., & Vasileiou, E. (2005). Impacts on water resources due to lignite mining in plateau of Greece. Headwater Control VI: International Conference on Hydrology, Ecology and Water Resources in Headwaters, Bergen.
- Mitsch, W. J., M. Straskraba, and S. E. Jorgensen. (1988). Wetland Modelling. New York, NY: Elsevier.
- NASA. (2024, 06 20). *NASA-The water cycle*. Ανάκτηση 06 20, 2024, από <https://gpm.nasa.gov/education/water-cycle>
- Neuhaus, E. (2013). Evaluation of a water budget model for use in wetland design, MS Thesis, Virginia Tech.
- Pavlidis A., Varouchakis E. A. & Hristopulos D. T. (2023). <https://link.springer.com/article/10.1007/s10040-023-02676-9>. *Geostatistical analysis of groundwater levels in a mining area with three active mines. Hydrogeology Journal*.
- Thompson, T. M., Daniels, W. L., Whittecar, G. R., & Agioutantis, Z. (2016). Wetbud: A model for mitigation wetland design. *Ecosummit*. <http://hdl.handle.net/10919/74304>.
- Varouchakis, E. (2012). Geostatistical analysis and space-time models of aquifer levels: application to Mires hydrological basin in the prefecture of Crete. *Doctoral dissertation, Πολυτεχνείο Κρήτης*.

- Varouchakis, E. A. (2016). Integrated water resources analysis at basin scale: a case study in Greece. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 142(3), 05015012.
- Wetbud. (October 2022). Manual Edition. Πρόσβαση στις: 02/03/2024.
- Younger, P. L., & Wolkersdorfer, C. (2004). Mining Impacts on the Fresh water Environment: Technical and Managerial Guidelines for catchment Scale Management. *Mine Water and the Environment*. <https://doi.org/10.1007/s10230-004-0028-0>.
- Παπαδοπούλου, Γ. Α. (2020). *Ορυκτολογική σύσταση των ιζημάτων στη λεκάνη απορροής του χειμάρρου Μπασδέκη, Ολυμπιάδος Χαλκιδικής. Μεταπτυχιακή Διατριβή. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.*
- Χιώτη, Χ. (2012). Περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τη λειτουργία εγκαταστάσεων εξόρυξης και επεξεργασίες χρυσού και κοινωνικές αντιδράσεις στη Β. Χαλκιδική.
- Δημητρακόπουλος, Δ. (2002). *Υδρογεωλογικές συνθήκες ορυχείου Αμυνταίου. Προβλήματα κατά την εκμετάλλευση και αντιμετώπιση τους. Διδακτορική Διατριβή. Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο.*
- Δημητριάδης, Δ. Σ. (2021). VIII ΣΕΒΕ Export Summit, Awareness: A Key Factor to Success". In: HellasGoldSA.
- Διαμαντοπούλου, Ε. (2023). *Γεωστατική ανάλυση δεδομένων υπόγειων υδάτων σε περιοχή μεταλλευτικής δραστηριότητας. Διπλωματική Εργασία. Πολυτεχνείο Κρήτης.*
- Λαμπίρη, Μ. Γ. (2009). Συμβολή των γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών και της τηλεπισκόπησης στην υδρογεωλογία της ΒΑ Χαλκιδικής (Doctoral dissertation, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης).
- Μπονάζούντας, Μ., Καλλιδρομίτου, Δ., & Ζαχαρίας, Ι. (1995). Ο υδροβιότοπος του δέλτα Σπερχιού. Αξίες και απειλές για τον μοναδικό υδροβιότοπο της Στερεάς Ελλάδας. Πανελλήνια και Διεθνή Γεωγραφικά Συνέδρια, Συλλογή Πρακτικών, 176-185.