



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Σταδιακή βαθμονόμηση με βελτίωση των οριακών
συνθηκών ενός τρισδιάστατου μοντέλου υπογείων υδάτων
(FEFLOW) για τον υπόγειο υδροφορέα Τυμπακίου, Κρήτης

Διπλωματική Εργασία
Σπυρόπουλος Φώτιος

Τριμελής Επιτροπή:

Καθηγητής Καρατζάς Γεώργιος (Επιβλέπων)

Καθηγητής Νικολαΐδης Νικόλαος

Δρ. Τριχάκης Ιωάννης

Χανιά, 2021

"Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για μη κερδοσκοπικό σκοπό, εκπαιδευτικού ή ερευνητικού χαρακτήρα, με την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για άλλη χρήση θα πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης".

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως κύριο αντικείμενο μελέτης την βελτίωση ενός μοντέλου ροής υπογείων υδάτων στην περιοχή του Τυμπακίου στην Κρήτη. Σκοπός είναι η μείωση 3 παραμέτρων σφάλματος (Bias, RMSE, MAE) σε σύγκριση με τα αρχικά αποτελέσματα του μοντέλου, έτσι ώστε να αυξηθεί η περιγραφική ικανότητα του μοντέλου. Αυτό επιτυγχάνεται με την προσαρμογή γενικών τάσεων στις οριακές συνθήκες συνημιτονοειδούς μορφής, όπως είχαν τεθεί στην αρχική φάση του μοντέλου, χρησιμοποιώντας δυο διαφορετικές προσεγγίσεις για τον προσδιορισμό τους (Μέσου Όρου, Πλησιέστερου Πηγαδιού). Σε δεύτερη φάση έγιναν χρονικές μετατοπίσεις της φάσης έναρξης της προσομοίωσης και διορθώσεις στο πλάτος μιας οριακής συνθήκης. Ταυτόχρονα έγιναν έλεγχοι συσχέτισης της βροχόπτωσης με τα υδραυλικά ύψη πηγαδιών ώστε να προσδιοριστούν οι χρόνοι αντίδρασης του συστήματος. Η βέλτιστη προσέγγιση αναδείχθηκε αυτή του πλησιέστερου πηγαδιού με βελτίωση του Bias 22,83%, του RMSE 14,88% και του MEA 16,08%. Ενώ εξετάζοντας τις καμπύλες προσομοιωμένων τιμών υδραυλικού ύψους πριν την βαθμονόμηση σχέση με τις παρατηρούμενες τιμές, παρατηρείται μια ασυμφωνία μεταξύ τους. Αυτή η ασυμφωνία μετά το πέρας της βαθμονόμησης φαίνεται να έχει μειωθεί σημαντικά. Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση έτσι ώστε να εξακριβωθούν τυχόν αβλεψίες στην αρχική θεώρηση του μοντέλου αλλά και γενικές ιδέες για την κατεύθυνση που θα ακολουθήσει η μεθοδολογία της βαθμονόμησης και εν τέλει γενικές προτάσεις για την εξέλιξη του μοντέλου μετά το τέλος της ανάλυσης. Οι πιο αξιοσημείωτες προτάσεις είναι η χρήση νευρωνικών δικτύων για την παραγωγή μεταμοντέλων ώστε να προσδιορίζονται οι τιμές των οριακών συνθηκών και η προσαρμογή πιο περίπλοκων αναλυτικών εξισώσεων στις οριακές συνθήκες.

Abstract

The following thesis deals with the improvement of an existing model of groundwater flow in the region of Tympaki, Crete. The main goal is the reduction of the three error parameters: Bias, RMSE and MAE in comparison to the initial results of the model, in order to increase the descriptive capacity of the model. This is achieved by implementing trends in the boundary conditions which are described by harmonic equations, as they were formed in the initial phase of the model, by two different approaches (Mean Average, Nearest Well). Thereafter the harmonic equations were temporally dislocated in regard of the phase at the point of the start of the simulation and the width of one boundary condition was corrected. In the meantime, tests regarding the correlation of precipitation with hydraulic heads were conducted so as to define the reaction time of the system. Evidentially, the most fitting approach was the Nearest Well by improving the Bias by 22,38%, the RMSE 14,88% and MAE 16,08% compared to the initial approach. Whereas by examining the curves of the simulated hydraulic heads before the calibration in comparison with the observed hydraulic head values, a dissonance is apparent. After the presented calibration said dissonance is significantly diminished. A literature review is also presented with the goal of uncovering possible oversights in the initial construction of the model and gaining a general idea for the direction the methodology of the calibration will follow and eventually present proposals for further improvement after the end of the present analysis. The most significant proposals are the use of neural networks in order to produce a metamodel that simulates the boundary conditions and the implementation of complex analytical equations describing boundary conditions.

Στο Θανάση

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την υποστήριξη που μου έχει προσφέρει σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου. Έπειτα θα ήθελα να ευχαριστήσω των Δρ. Γεώργιο Καρατζά για την καθοδήγηση και τα σχόλιά του κατά την συγγραφή της διπλωματικής μου. Τον Δρ. Νικόλα Νικολαΐδη που δέχτηκε να είναι μέλος της τριμελούς επιτροπής. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Ιωάννη Τριχάκη για την βοήθεια που μου πρόσφερε καθώς και τον χρόνο που διέθεσε ώστε να ολοκληρωθεί η συγκεκριμένη εργασία.

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη	2
Abstract	2
Ευχαριστίες.....	4
Πίνακας Περιεχομένων	5
Κατάλογος Εικόνων	6
Κατάλογος Πινάκων	8
1 Εισαγωγή.....	9
1.1 Περιγραφή Περιοχή Μελέτης.....	9
1.1.1 Γενικά Στοιχεία.....	9
1.1.2 Γεωλογικά Χαρακτηριστικά	9
1.1.3 Υδρογεωλογικά Χαρακτηριστικά	12
1.1.4 Κατανάλωση Αρδευτικού Νερού και Υδρολογικά Στοιχεία.....	15
1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	16
1.2.1 Στοιχεία για το FEFLOW	16
1.2.2 Ανασκόπηση Σχετικών Άρθρων.....	17
2 Μεθοδολογία.....	20
2.1 Μεθοδολογία Αρχικής Μορφής του Μοντέλου.....	21
2.1.1 Υδραυλική Αγωγιμότητα	21
2.1.2 Οριακές Συνθήκες.....	22
2.2 Μεθοδολογία Αρθρωτής Βαθμονόμησης	23
2.2.1 Τάσεις Πηγαδιών	23
2.2.2 Δοκιμή 0	28
2.2.3 Δοκιμή 1	28
2.2.4 Δοκιμή 2	28
2.2.5 Δοκιμή 3	29
2.2.6 Δοκιμή 4	29
2.3 Μεθοδολογία Ανεξάρτητων Δοκιμών Συσχέτισης Βροχόπτωσης-Υδραυλικού Ύψους.....	29
2.4 Κριτήρια Βελτίωσης Μοντέλου	30
3 Αποτελέσματα	31
3.1 Προσομοιωμένες Οριακές Συνθήκες.....	31
3.1.1 Προσέγγιση Μέσου Όρου	31
3.1.2 Προσέγγιση Πλησιέστερου Πηγαδιού.....	32
3.1.3 Τρίτη Οριακή Συνθήκη	33
3.2 Δοκιμές.....	33
3.2.1 Δοκιμή 0	33

3.2.2	Δοκιμή 1	35
3.2.3	Δοκιμή 2	37
3.2.4	Δοκιμή 3	39
3.2.5	Δοκιμή 4	41
3.3	Προσομοιωμένα Υδραυλικά Έγφη	43
3.3.1	Προσέγγιση Μέσου Όρου	43
3.3.2	Προσέγγιση Πλησιέστερου Πηγαδιού.....	46
3.4	Ανεξάρτητες Δοκιμές Βροχόπτωσης Υδραυλικού Έγφους.....	48
3.4.1	Μετεωρολογικός Σταθμός Γεργερή	48
3.4.2	Μετεωρολογικός Σταθμός Μορώνι.....	51
3.4.3	Μετεωρολογικός Σταθμός Βιζάρι	53
3.4.4	Μετεωρολογικός Σταθμός Βόριζια.....	56
3.4.5	Μετεωρολογικός Σταθμός Ζαρού	59
3.4.6	Μετεωρολογικός Σταθμός Λαγολιό	61
4	Συζήτηση	64
4.1	Αποτελέσματα Ανεξάρτητων Δοκιμών	64
4.2	Αποτελέσματα Δοκιμών	64
4.2.1	Δοκιμή 0	64
4.2.2	Δοκιμή 1	65
4.2.3	Δοκιμή 2	65
4.2.4	Δοκιμή 3	65
4.2.5	Δοκιμή 4	66
4.2.6	Φυσικό Νόημα Βαθμονόμησης Δοκιμών.....	66
4.2.7	Σχολιασμός Προσομοιωμένων Υδραυλικών Έγφων Πηγαδιών.....	67
4.2.8	Περιγραφή και Πρόβλεψη	68
5	Συμπεράσματα	69
6	Βιβλιογραφία.....	71
	Παραρτήματα	73
	Παράρτημα 1: Αλγόριθμος Συσχέτιση Υδραυλικού Έγφους - Αθροιστικής Βροχόπτωσης 73	
	Παράρτημα 2: Αλγόριθμος Υπολογισμού Σφαλμάτων	73
	Παράρτημα 3: Μετρήσεις Υδραυλικού Έγφους	75

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1:Γεωλογικός Χάρτης του Τυμπακίου, η διακεκομμένη γραμμή δείχνει τα όρια του υβώματος της Φαιστού (Panagoroulos et al., 2017).....	10
--	----

Εικόνα 1.2:Χάρτης Ισοβαθών της ανώτερης επιφάνειας των Νεογενών αποθέσεων στην λεκάνη του Τυμπακίου. Το υπόμνημα δείχνει το απόλυτο υψόμετρο σε μέτρα (Panagopoulos et al., 2017)	11
Εικόνα 1.3:Γεωλογική τομή Φαιστός- Χάρακας (Ανατολή – Δύση) (Κριτσωτάκης, 2009).....	11
Εικόνα 1.4:Γεωλογική τομή λεκάνης Μοιρών (Ανατολή – Δύση) (Κριτσωτάκης, 2009).....	12
Εικόνα 1.5:Φαινόμενο Υφαλμύρησης στο παραλιακό μέτωπο του Τυμπακίου, με τρεις ενδεικτικές τομές κατανομής του υφάλμυρου νερού (Kourgialas et al., 2016).....	13
Εικόνα 1.6:Αποτελέσματα Γεωφυσικών Μεθόδων στην περιοχή του Τυμπακίου κοντά στην τομή 3 του παραπάνω σχήματος 1.5 (Vafidis et al., 2016)	13
Εικόνα 1.7:Αποτελέσματα Γεωφυσικών Μεθόδων στην περιοχή του Τυμπακίου κοντά στην τομή 2 του παραπάνω σχήματος 1.5 (Vafidis et al., 2016)	14
Εικόνα 1.8:Αποτελέσματα Γεωφυσικών Μεθόδων στην περιοχή του Τυμπακίου κοντά στην τομή 1 του παραπάνω σχήματος 1.5 (Vafidis et al., 2016)	14
Εικόνα 1.9:Αποτελέσματα μεταφοράς μάζας (ισοσυγκεντρωτικές γραμμές χλωριδίων σε mg/L) (Lollino et al., 2015)	14
Εικόνα 1.10:Ετήσια Αθροιστική Βροχόπτωση για την Λεκάνη Απορροής του Γεροποτάμου για τα έτη 1981-2000 (Paparrizos et al., 2016).....	15
Εικόνα 2.1:Γεωλογικός χάρτης της περιοχής με ορισμένη την περιοχή μελέτης	20
Εικόνα 2.2:Περιοχή μελέτης όπως παρουσιάζεται στο FEFLOW	21
Εικόνα 2.3:Γραμμική Σχέση για το Πηγάδι 1	23
Εικόνα 2.4:Γραμμική Σχέση για το Πηγάδι 2	24
Εικόνα 2.5:Γραμμική Σχέση για το Πηγάδι 3	24
Εικόνα 2.6:Γραμμική Σχέση για το Πηγάδι 4	25
Εικόνα 2.7:Γραμμική Σχέση για το Πηγάδι 5	25
Εικόνα 2.8:Απεικόνιση των τάσεων με τους μέσους όρους και τις αρμονικές συναρτήσεις των οριακών συνθηκών.....	27
Εικόνα 3.1:Απεικόνιση Οριακής Συνθήκης BC 1 για την Προσέγγιση Μέσου Όρου.....	31
Εικόνα 3.2:Απεικόνιση Οριακής Συνθήκης BC 2 για την Προσέγγιση Μέσου Όρου.....	31
Εικόνα 3.3:Απεικόνιση Οριακής Συνθήκης BC 1 για την Προσέγγιση Πλησιέστερου Πηγαδιού.....	32
Εικόνα 3.4:Απεικόνιση Οριακής Συνθήκης BC 1 για την Προσέγγιση Πλησιέστερου Πηγαδιού.....	32
Εικόνα 3.5:Απεικόνιση Οριακής Συνθήκης BC3 και για τις δύο Προσεγγίσεις.....	33
Εικόνα 3.6:RMSE για Δοκιμή 0	33
Εικόνα 3.7:Βias για Δοκιμή 0.....	34
Εικόνα 3.8:Mean Absolute Error για Δοκιμή 0.....	34
Εικόνα 3.9:RMSE για Δοκιμή 1	35
Εικόνα 3.10:Βias για Δοκιμή 1.....	36
Εικόνα 3.11:Mean Absolute Error για Δοκιμή 1.....	36
Εικόνα 3.12:RMSE για Δοκιμή 2	37
Εικόνα 3.13:Βias για Δοκιμή 2.....	38
Εικόνα 3.14:Mean Absolute Error για Δοκιμή 2.....	38
Εικόνα 3.15:RMSE για Δοκιμή 3:	39
Εικόνα 3.16:Βias για Δοκιμή 3.....	40
Εικόνα 3.17:Mean Absolute Error για Δοκιμή 3.....	40
Εικόνα 3.18:RMSE για Δοκιμή 4	41
Εικόνα 3.19:Βias για Δοκιμή 4.....	42
Εικόνα 3.20:Mean Absolute Error για Δοκιμή 4.....	42
Εικόνα 3.21:Προσομοίωση Υδραυλικού Ύψους για το Πηγάδι 1 για την Προσέγγιση Μέσου Όρου.....	43
Εικόνα 3.22:Προσομοίωση Υδραυλικού Ύψους για το Πηγάδι 2 για την Προσέγγιση Μέσου Όρου.....	44
Εικόνα 3.23:Προσομοίωση Υδραυλικού Ύψους για το Πηγάδι 3 για την Προσέγγιση Μέσου Όρου.....	44
Εικόνα 3.24:Προσομοίωση Υδραυλικού Ύψους για το Πηγάδι 4 για την Προσέγγιση Μέσου Όρου.....	45
Εικόνα 3.25:Προσομοίωση Υδραυλικού Ύψους για το Πηγάδι 5 για την Προσέγγιση Μέσου Όρου.....	45
Εικόνα 3.26:Προσομοίωση Υδραυλικού Ύψους για το Πηγάδι 1 για την Προσέγγιση Πλησιέστερου Πηγαδιού	46
Εικόνα 3.27:Προσομοίωση Υδραυλικού Ύψους για το Πηγάδι 2 για την Προσέγγιση Πλησιέστερου Πηγαδιού	46

Εικόνα 3.28:Προσομοίωση Υδραυλικού Ύψους για το Πηγάδι 3 για την Προσέγγιση Πλησιέστερου Πηγαδιού	47
Εικόνα 3.29:Προσομοίωση Υδραυλικού Ύψους για το Πηγάδι 4 για την Προσέγγιση Πλησιέστερου Πηγαδιού	47
Εικόνα 3.30:Προσομοίωση Υδραυλικού Ύψους για το Πηγάδι 5 για την Προσέγγιση Πλησιέστερου Πηγαδιού	48
Εικόνα 3.31:Συσχέτιση Βροχόπτωσης για Σταθμό Γέργερη με Πηγάδι 1	48
Εικόνα 3.32:Συσχέτιση Βροχόπτωσης για Σταθμό Γέργερη με Πηγάδι 2	49
Εικόνα 3.33:Συσχέτιση Βροχόπτωσης για Σταθμό Γέργερη με Πηγάδι 3	49
Εικόνα 3.34:Συσχέτιση Βροχόπτωσης για Σταθμό Γέργερη με Πηγάδι 4	50
Εικόνα 3.35:Συσχέτιση Βροχόπτωσης για Σταθμό Γέργερη με Πηγάδι 5	50
Εικόνα 3.36:Συσχέτιση Βροχόπτωσης για Σταθμό Μορώνι με Πηγάδι 1	51
Εικόνα 3.37:Συσχέτιση Βροχόπτωσης για Σταθμό Μορώνι με Πηγάδι 2	51
Εικόνα 3.38:Συσχέτιση Βροχόπτωσης για Σταθμό Μορώνι με Πηγάδι 3	52
Εικόνα 3.39:Συσχέτιση Βροχόπτωσης για Σταθμό Μορώνι με Πηγάδι 4	52
Εικόνα 3.40:Συσχέτιση Βροχόπτωσης για Σταθμό Μορώνι με Πηγάδι 5	53
Εικόνα 3.41:Συσχέτιση Βροχόπτωσης για Σταθμό Βιζάρι με Πηγάδι 1	53
Εικόνα 3.42:Συσχέτιση Βροχόπτωσης για Σταθμό Βιζάρι με Πηγάδι 2	54
Εικόνα 3.43:Συσχέτιση Βροχόπτωσης για Σταθμό Βιζάρι με Πηγάδι 3	55
Εικόνα 3.44:Συσχέτιση Βροχόπτωσης για Σταθμό Βιζάρι με Πηγάδι 4	55
Εικόνα 3.45:Συσχέτιση Βροχόπτωσης για Σταθμό Βιζάρι με Πηγάδι 5	56
Εικόνα 3.46:Συσχέτιση Βροχόπτωσης για Σταθμό Βορίζια με Πηγάδι 1	56
Εικόνα 3.47:Συσχέτιση Βροχόπτωσης για Σταθμό Βορίζια με Πηγάδι 2	57
Εικόνα 3.48:Συσχέτιση Βροχόπτωσης για Σταθμό Βορίζια με Πηγάδι 3	57
Εικόνα 3.49:Συσχέτιση Βροχόπτωσης για Σταθμό Βορίζια με Πηγάδι 4	58
Εικόνα 3.50:Συσχέτιση Βροχόπτωσης για Σταθμό Βορίζια με Πηγάδι 5	58
Εικόνα 3.51:Συσχέτιση Βροχόπτωσης για Σταθμό Ζαρού με Πηγάδι 1	59
Εικόνα 3.52:Συσχέτιση Βροχόπτωσης για Σταθμό Ζαρού με Πηγάδι 2	59
Εικόνα 3.53:Συσχέτιση Βροχόπτωσης για Σταθμό Ζαρού με Πηγάδι 3	60
Εικόνα 3.54:Συσχέτιση Βροχόπτωσης για Σταθμό Ζαρού με Πηγάδι 4	60
Εικόνα 3.55:Συσχέτιση Βροχόπτωσης για Σταθμό Ζαρού με Πηγάδι 5	61
Εικόνα 3.56:Συσχέτιση Βροχόπτωσης για Σταθμό Λαγολιό με Πηγάδι 1	61
Εικόνα 3.57:Συσχέτιση Βροχόπτωσης για Σταθμό Λαγολιό με Πηγάδι 2	62
Εικόνα 3.58:Συσχέτιση Βροχόπτωσης για Σταθμό Λαγολιό με Πηγάδι 3	62
Εικόνα 3.59:Συσχέτιση Βροχόπτωσης για Σταθμό Λαγολιό με Πηγάδι 4	63
Εικόνα 3.60:Συσχέτιση Βροχόπτωσης για Σταθμό Λαγολιό με Πηγάδι 5	63

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1:Σύμβαση Ονομασίας Πηγαδιών	21
Πίνακας 2.2:Τάσεις για κάθε οριακή συνθήκη από το εκάστοτε πηγάδι	26
Πίνακας 2.3:Παράμετροι προσέγγισης μέσου όρου	27
Πίνακας 2.4:Παράμετροι προσέγγισης μέσου όρου	27
Πίνακας 3.1:Σφάλματα για Δοκιμή 0	35
Πίνακας 3.2:Βελτίωση μοντέλου για Δοκιμή 0	35
Πίνακας 3.3:Σφάλματα για Δοκιμή 1	37
Πίνακας 3.4:Βελτίωση μοντέλου για Δοκιμή 1	37
Πίνακας 3.5:Σφάλματα για Δοκιμή 2	39
Πίνακας 3.6:Βελτίωση μοντέλου για Δοκιμή 2	39
Πίνακας 3.7:Σφάλματα για Δοκιμή 3	41
Πίνακας 3.8:Βελτίωση μοντέλου για Δοκιμή 3	41
Πίνακας 3.9:Σφάλματα για Δοκιμή 4	43
Πίνακας 3.10:Βελτίωση μοντέλου για Δοκιμή 4	43

1 Εισαγωγή

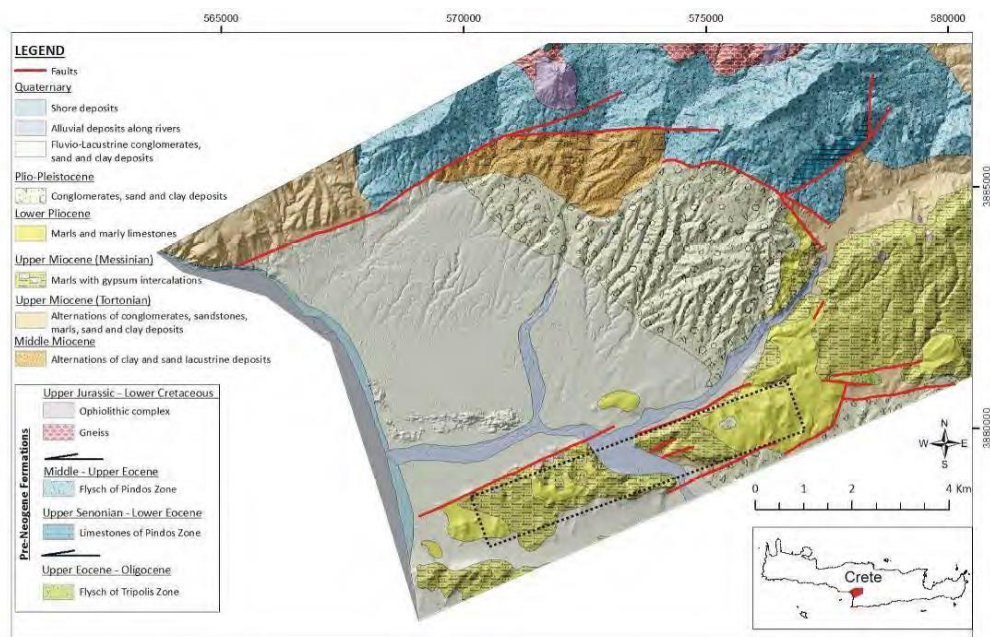
1.1 Περιγραφή Περιοχή Μελέτης

1.1.1 Γενικά Στοιχεία

Η περιοχή μελέτης αποτελεί την ευρύτερη περιοχή του Τυμπακίου που υπάγεται στον νομό Ηρακλείου και την περιφέρεια Κρήτης. Σε μεγάλο βαθμό τα όρια της περιοχής μελέτης ταυτίζονται με την δημοτική ενότητα του Τυμπακίου η οποία σύμφωνα με την απογραφή του 2011 σημείωσε μόνιμο πληθυσμό 10.079 κατοίκους σύμφωνα με τα στοιχεία της Elstat (“Αναζήτηση αποτελεσμάτων - Κεντρική Σελίδα ΕΛΣΤΑΤ - ELSTAT,” 2011). Η περιοχή μελέτης συνορεύει με την πεδιάδα της Μεσσαράς, η οποία είναι η μεγαλύτερη πεδιάδα στην Κρήτη στην οποία υπάρχει έντονη γεωργική δραστηριότητα όπως αντίστοιχα και στην περιοχή μελέτης, όπου μεγάλο πλέον μέρος της ζήτησης σε αρδευτικό νερό καλύπτεται από το φράγμα της Φανερωμένης που κατασκευάστηκε το 2005. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι η περίοδος προσομοίωση του μοντέλου ροής υπογείων υδάτων ξεκινά 22/4/2004 και τελειώνει στις 30/6/2008 και ενδεχομένως η δημιουργία του φράγματος να επηρεάσει το σύστημα αυτό, αλλά σε αυτή την εργασία δεν είναι δυνατή η περαιτέρω εξέταση του συγκεκριμένου θέματος. Η περιοχή βρέχεται από την δυτική πλευρά από το Λιβυκό Πέλαγος, ενώ στα ανατολικά εκτείνονται οι παρυφές του όρους Δίκτυ και βόρεια συνορεύει με την οροσειρά του Ψηλορείτη και νότια με την οροσειρά των Αστερουσίων. Τέλος την πεδιάδα της Μεσσαράς διασχίζει ο Γεροπόταμος που εκβάλλει στον κόλπο της Μεσσαράς και δύο παραπόταμοι του είναι ο Κουτσουλίτης και ο Μάγερας.

1.1.2 Γεωλογικά Χαρακτηριστικά

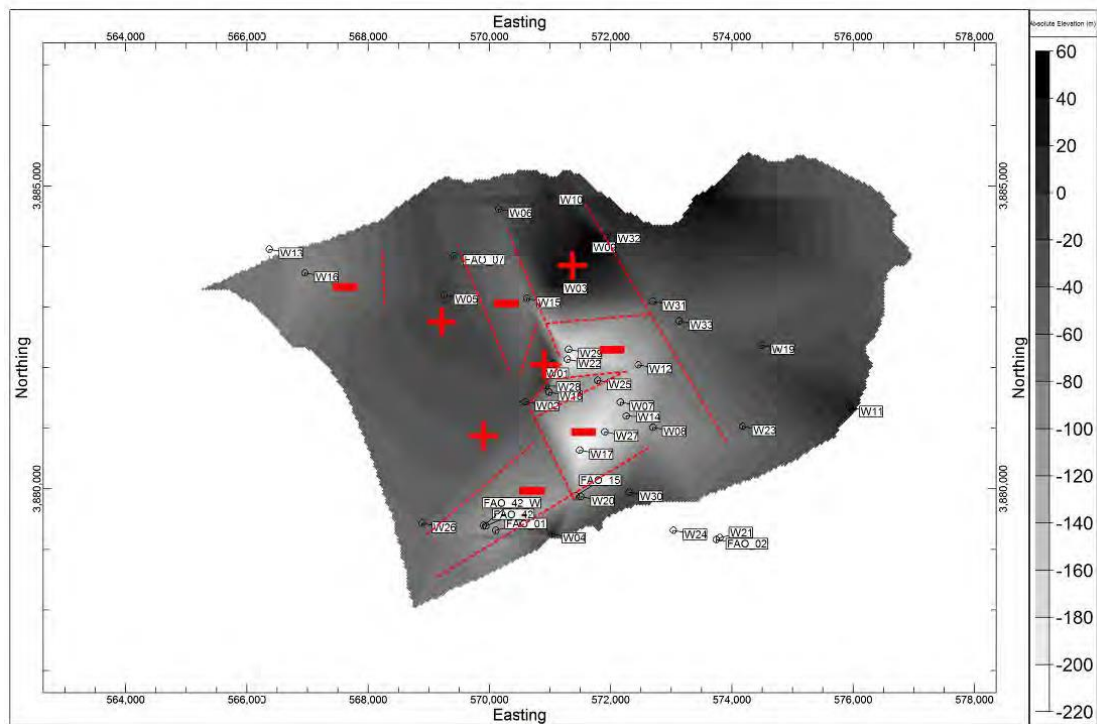
Η Κρήτη χαρακτηρίζεται γεωλογικά από την λεπτοειδή ανάπτυξη αλληπάλληλων τεκτονικών ενοτήτων οι οποίες είναι αποτέλεσμα τεκτονικών διεργασιών που κορυφώθηκαν στο Τριτογενές με την υποβύθιση της αφρικανικής πλάκας κάτω από την ευρασιατική. Η κατώτερη γεωλογική ενότητα αποτελείται από ένα αυτόχθονο σύστημα πετρωμάτων που περιλαμβάνει ημιμεταμορφωμένες πλάκες ασβεστόλιθων, υποκείμενους ασβεστόλιθους, δολομίτες και παρεμβολές σχιστόλιθων. Ακολουθεί ένα αλλόχθονο σύστημα επωθημένο πάνω στο αυτόχθονο και από τα νεότερα ιζήματα του Νεογενούς και του Τεταρτογενούς. (Κριτσωτάκης, 2009)



Εικόνα 1.1: Γεωλογικός Χάρτης του Τυμπακίου, η διακεκομμένη γραμμή δείχνει τα όρια του υβώματος της Φαιστού (Panagoroulos et al., 2017)

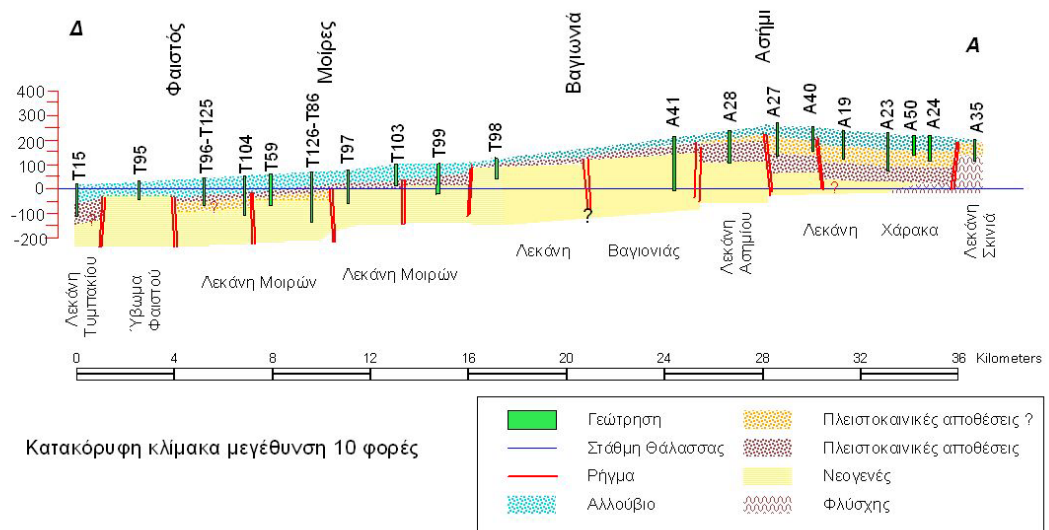
Η ευρύτερη περιοχή της πεδιάδας της Μεσσαράς χαρακτηρίζεται λιθοστρωματικά κυρίως από αλλουβιακούς σχηματισμούς υψηλής ανομοιογένειας με εναλλαγές σε οριζόντια και κάθετη κατεύθυνση ιλυωδών και αμμωδών κροκαλοπαγών. Ωστόσο στην περιοχή ενδιαφέροντος η αλλουβιακή σχηματισμοί είναι αρκετά περιορισμένοι χωρικά κατά μήκος της ροής του Γεροποτάμου. Στα πεδινά της περιοχής επικρατεί ένα πλειστοκαινικός σχηματισμός με κυμαινόμενη υδροπερατότητα. Το επίπεδο της στάθμης της θάλασσας μετά την εναπόθεση των πλειοστοκαινικών σχηματισμών ήταν σε κατώτερο επίπεδο από ότι σήμερα έτσι δημιουργήθηκαν νέες τάφροι από την διάβρωση του υδρορεύματος του Γεροποτάμου. Το μέγιστο βάθος των τάφρων αυτών καταγράφηκε στα 75 μέτρα κάτω από τη σημερινή στάθμη της θάλασσας στην περιοχή των Μοιρών και το μέγιστο που έχει καταγραφεί στην ευρύτερη περιοχή είναι 80 μ στην περιοχή του Πλατύ (όμορη λεκάνη δυτικότερα του Τυμπακίου). Στη έξοδο του Γεροποτάμου στη θάλασσα (Τυμπάκι) το βάθος της τάφρου είναι της τάξης των 100 μέτρων από την επιφάνεια του εδάφους που ελαττώνεται προς τα ανάντη και στο ύψωμα της Φαιστού είναι 60 μέτρα από την επιφάνεια του εδάφους (Κριτσωτάκης, 2009). Υπό του συγκεκριμένου στρώματος υπάρχει μια σειρά από ρήγματα τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω αλλά στα πλαίσια της εργασίας δεν έχουν συνυπολογιστεί στο μοντέλο καθώς η εισαγωγή τους είναι αρκετά δύσκολη (Panagoroulos et al., 2017). Στην ανατολική υπάρχει ένα τεταρτογενές στρώμα από πλειοκαινικές αποθέσεις κυρίως μάργες μαζί με εμφανίσεις άμμων και κροκαλοπαγών, το οποίο παρουσιάζει υψηλή υδροπερατότητα. Στο βόρειο μέρος της περιοχής παρουσιάζεται ένα στρώμα μειοκαινικών αποθέσεων με κύρια επικράτεια σε αυτό να είναι οι μάργες κάνοντας υδροπερατό αλλά με χαμηλή υδραυλική αγωγιμότητα. Στα εξωτερικά της περιοχής στον βόρειο ανατολικό μέρος υπ άρχει ένας φλύσχης που είναι πρακτικά αδιαπέραστος και ανήκει στο τεκτονικό κάλυμμά της ζώνης της Πίνδου και σε αυτό το σημείο οριοθετεί την περιοχή ενδιαφέροντος. Στα βόρειο ανατολικά εξωτερικά εμφανίζονται μειοκαινικές αποθέσεις κροκαλοπαγών ενώ στη νοτιά εξωτερικά εμφανίζονται μειοκαινικές αποθέσεις μαργών. Οι σχηματισμοί που εμφανίζονται στο εξωτερικά της περιοχής μελέτης την απομονώνουν αρκετά υδρογεωλογικά καθώς σε μεγάλο βαθμός οι ίδιοι δεν είναι υδροπερατοί, οπότε η τροφοδοσία των υδροφορέων γίνεται εντός της περιοχής μέσω των

επιφανειακών κατεισχύσεων εντός της, με εξαίρεση της συνθήκες στο στένεμα της Φαιστού που εξηγείται παρακάτω.



Εικόνα 1.2:Χάρτης Ισοβαθών της ανώτερης επιφάνειας των Νεογενών αποθέσεων στην λεκάνη του Τυμπακίου. Το υπόμνημα δείχνει το απόλυτο υψόμετρο σε μέτρα (Panagoroulou et al., 2017)

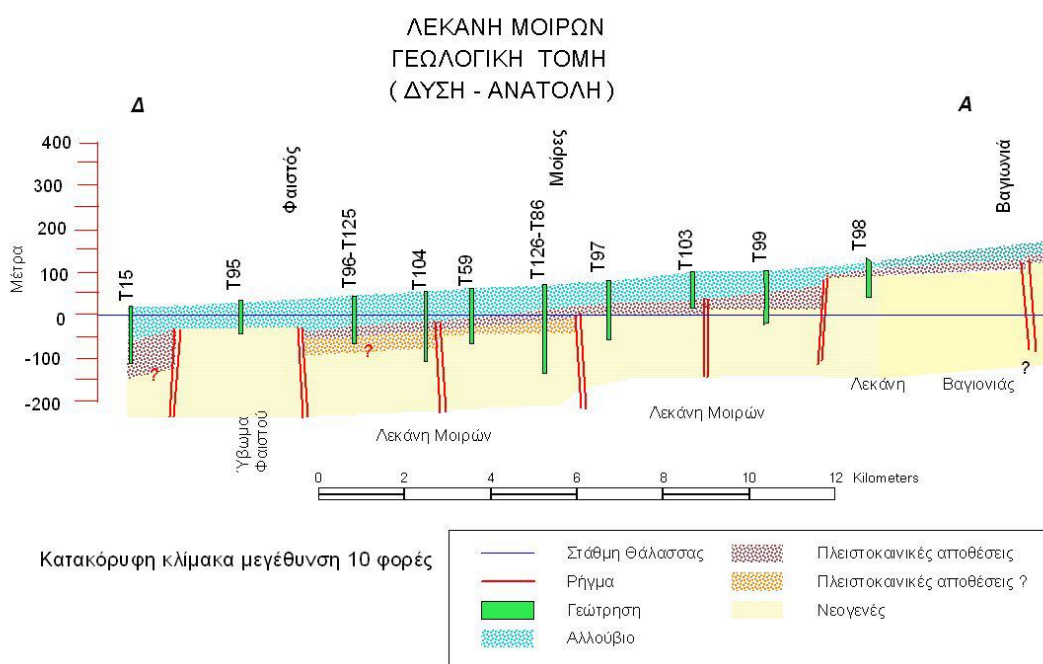
ΛΕΚΑΝΗ ΜΕΣΑΡΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΤΟΜΗ (ΔΥΣΗ - ΑΝΑΤΟΛΗ)



Εικόνα 1.3:Γεωλογική τομή Φαιστός- Χάρακας (Ανατολή – Δύση) (Κριτσωτάκης, 2009)

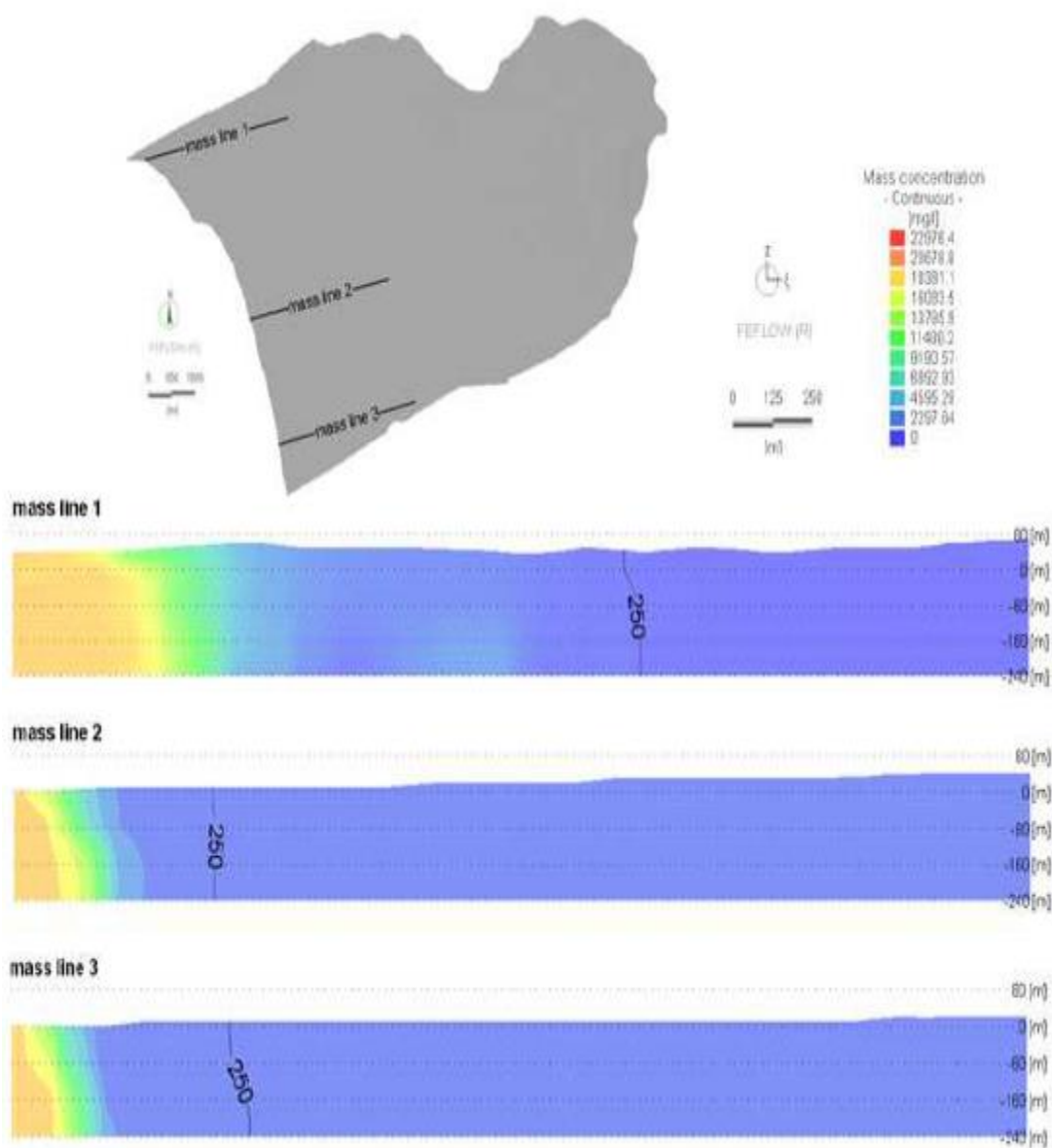
1.1.3 Υδρογεωλογικά Χαρακτηριστικά

Γενικά στην ευρύτερη περιοχή της Μεσσαράς από τα υδρολογικά έτη 1973 έως 2005 παρατηρήθηκε μεταβολή στην κατανάλωση υδατικών πόρων, η οποία οφείλεται σε ανθρώπινες επεμβάσεις. Σε μεγάλο βαθμό η ζήτηση σε νερό στα νότια της περιοχής καλύπτεται από τις γεωτρήσεις κατά μήκος του υδατορεύματος το οποίο διασχίζει τον αλλουβιακό υδροφορέα του δυτικού τμήματος της πεδιάδας της Μεσσαράς. Στα νοτιοδυτικά της περιοχής απαντάται ο υδροφορέας των Μοιρών, ο οποίος τροφοδοτείται από τον Γεροπόταμο και τα κατάντη του τροφοδοτούν τον πλειστοκαινικό υδροφορέα εντός της περιοχής μελέτης μέσω του στενέματος της Φαιστού. Κατά τα άλλα η αλλουβιακή λεκάνη της Μεσσαράς δεν επικοινωνεί με την λεκάνη του Τυμπακίου υδρογεωλογικά με κάποιον άλλο τρόπο (Κριτσωτάκης, 2009).

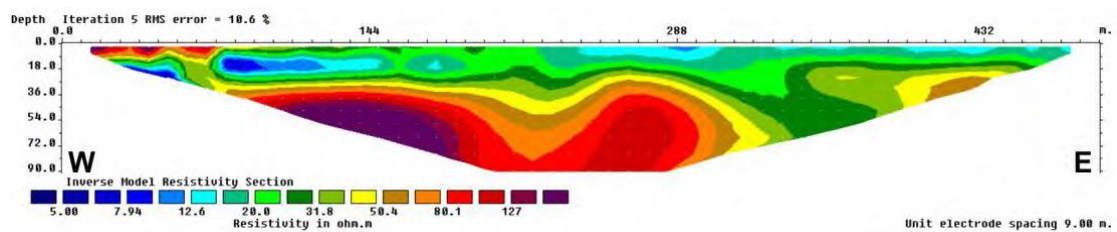


Εικόνα 1.4:Γεωλογική τομή Λεκάνης Μοιρών (Ανατολή – Δύση) (Κριτσωτάκης, 2009)

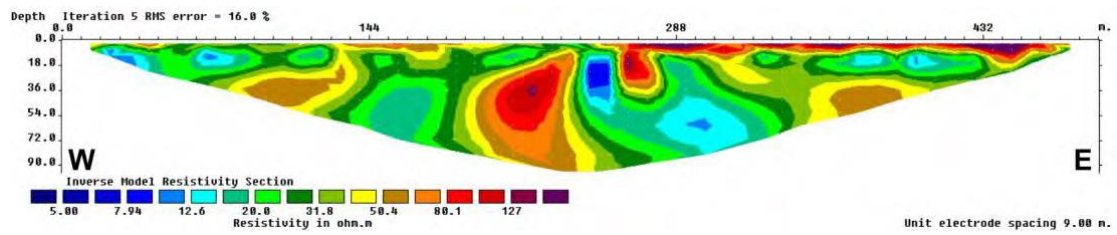
Εδώ αξίζει να αναφερθεί πως λόγω της έντονης γεωργικής δραστηριότητας στην παραθαλάσσια περιοχή παρατηρήθηκαν φαινόμενα υφαλμύρισης τα οποία όμως εκτείνονται σχετικά κοντά στην παραλιακή ζώνη και αφορούν τον πλειοκαινικό υδροφορέα (Kourgialas et al., 2016). Αυτό αξίζει να σημειωθεί καθώς στην συγκεκριμένη εργασία η υφαλμύριση δεν έχει συνυπολογιστεί αλλά είναι μια ασφαλής παραδοχή που μπορεί να γίνει χωρίς να επηρεάσει σημαντικά τα αποτελέσματα. Σε μια αντίστοιχη γεωφυσική μελέτη, εξετάστηκε επίσης το φαινόμενο με αντίστοιχη συμπεριφορά (Vafidis et al., 2016). Σε μια τρίτη μελέτη το φαινόμενο φαίνεται να έχει μεγαλύτερη έκταση, με τα δεδομένα να είναι εντός της περιόδου προσομοίωσης. Στην συγκεκριμένη μελέτη, το μέτωπο του υφάλμυρου νερού φαίνεται να έχει διεισδύσει αρκετά στο βόρειο μέρος, ενώ στο νότιο φαίνεται να έχει κρατηθεί αρκετά κοντά στην ακτή λόγω της τροφοδοσίας από το αλλουβιακό στρώμα στο στένεμα της Φαιστού (Lollino et al., 2015).



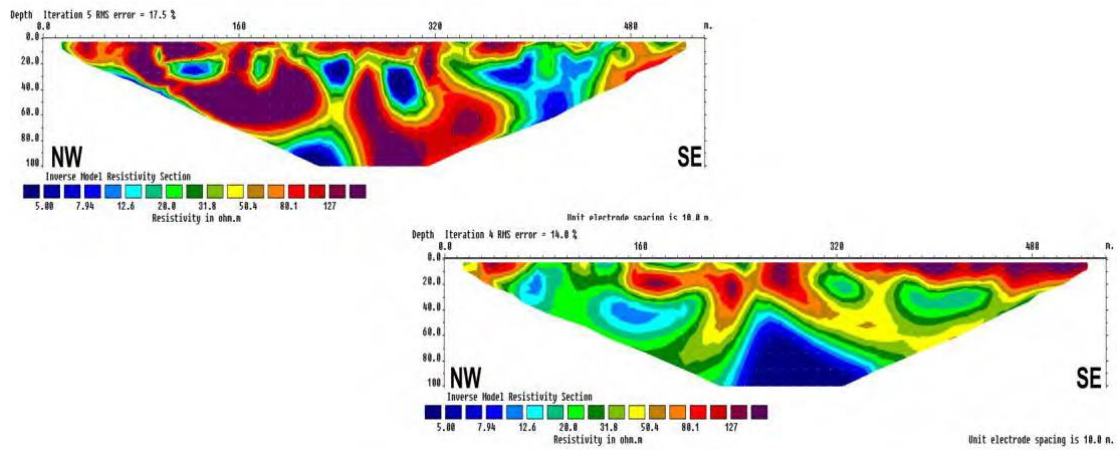
Εικόνα 1.5:Φαινόμενο Υφαλμύρισης στο παραλιακό μέτωπο του Τυμπακίου, με τρεις ενδεικτικές τομές κατανομής του υφάλμυρου νερού (Kourgialas et al., 2016)



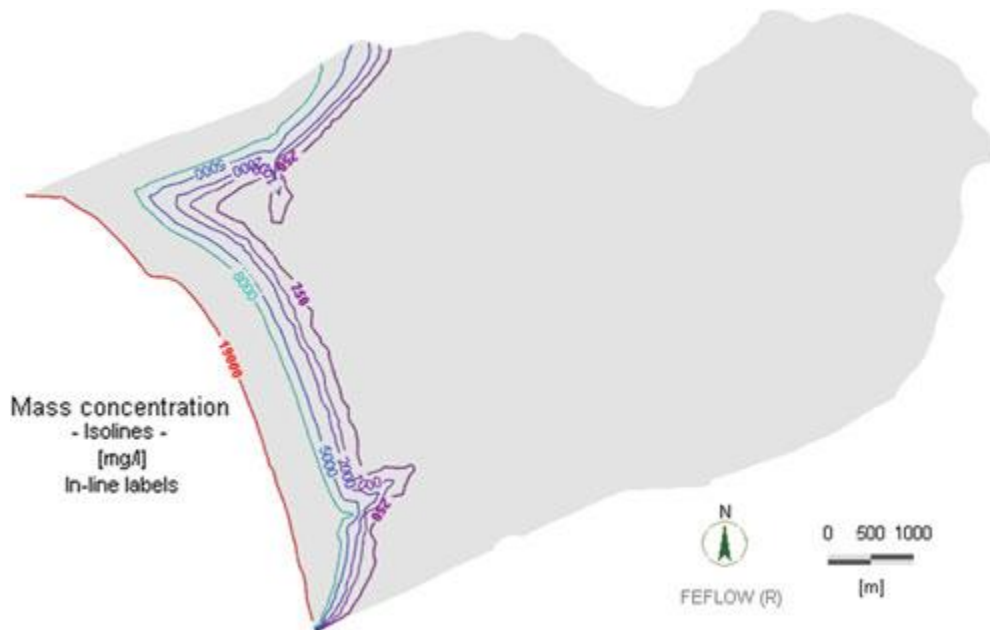
Εικόνα 1.6:Αποτελέσματα Γεωφυσικών Μεθόδων στην περιοχή του Τυμπακίου κοντά στην τομή 3 του παραπάνω σχήματος 1.5 (Vafidis et al., 2016)



Εικόνα 1.7:Αποτελέσματα Γεωφυσικών Μεθόδων στην περιοχή του Τυμπακίου κοντά στην τομή 2 του παραπάνω σχήματος 1.5 (Vafidis et al., 2016)



Εικόνα 1.8:Αποτελέσματα Γεωφυσικών Μεθόδων στην περιοχή του Τυμπακίου κοντά στην τομή 1 του παραπάνω σχήματος 1.5 (Vafidis et al., 2016)

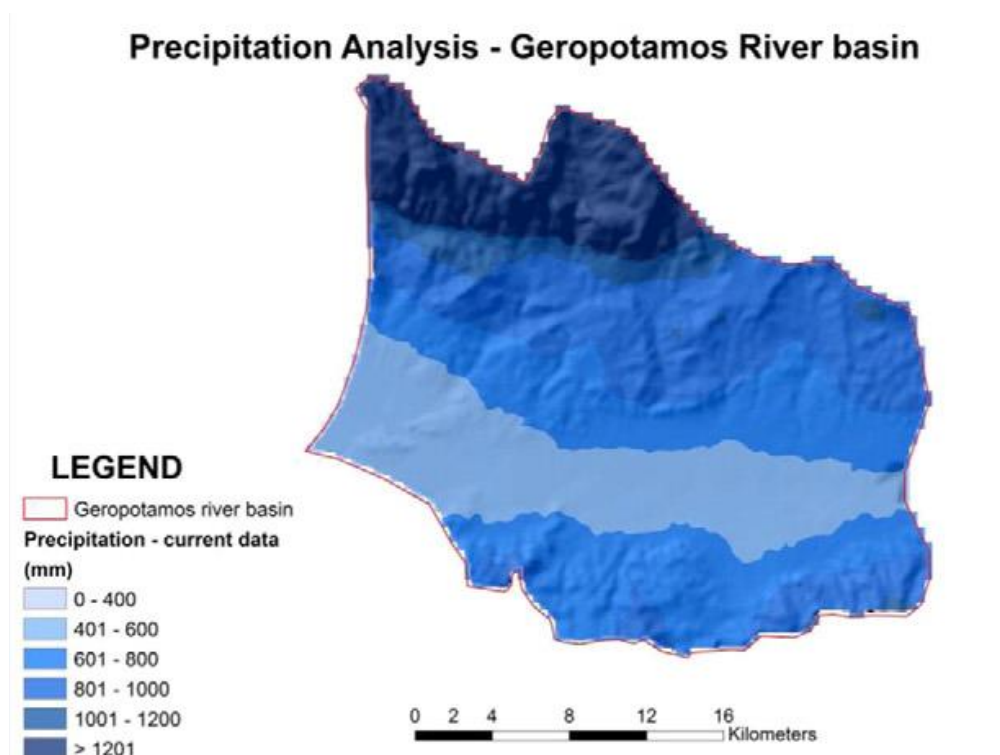


Εικόνα 1.9:Αποτελέσματα μεταφοράς μάζας (ισοσυγκεντρωτικές γραμμές χλωριδίων σε mg/L) (Lollino et al., 2015)

1.1.4 Κατανάλωση Αρδευτικού Νερού και Υδρολογικά Στοιχεία

Η περιοχή ενδιαφέροντος έχει σαν βασική παραγωγική διαδικασία τη γεωργία, έτσι είναι αναμενόμενο η ζήτηση σε αρδευόμενο νερό είναι αρκετά αυξημένη όταν ανάγεται στον αντίστοιχο πληθυσμό. Λόγω της γεωγραφικής θέσης της περιοχής η παραγωγή είναι ενδεικτική για την καλλιέργεια ελιών, σιτηρών, σπρωροκηπευτικών και εσπεριδοειδών με την έκταση της εν λόγω καλλιεργούμενη γης να κυμαίνεται γύρω στα 4800 στρέμματα για την περιοχή του Τυμπακίου. Η μεγαλύτερη καλλιέργεια από άποψη έκτασης είναι οι ξηρές ελαιοκαλλιέργειες, δηλαδή καλλιέργειες οι οποίες δεν καταναλώνουν υδατικούς πόρους προκειμένου να αρδευτούν και βασίζονται καθαρά στα κατακρημνίσματα. Οι βλαστικές περίοδοι των καλλιεργειών ξεκινούν περίπου των Φεβρουάριο και τελειώνουν κατά κύριο λόγο μέσα στο φθινόπωρο. Έτσι είναι αναμενόμενο να υπάρχει υψηλή ζήτηση σε νερό κατά την περίοδο του καλοκαιριού. Αυτή η ζήτηση καλύπτεται από γεωτρήσεις σε σημαντικό βαθμό.(Σταθάτου, 2011)

Παρόλα αυτά οι γεωργικές δραστηριότητες σε όλη την ανατολική Μεσόγειο απαιτούν γνώση των διακυμάνσεων της βροχόπτωσης σε ετήσια βάση καθώς και των τάσεων που τείνουν να τις μεταβάλουν. Στην περιοχή μελέτης παρουσιάζεται σημαντική διακύμανση της βροχόπτωσης χωρικά λόγω της έντονης μορφολογίας που παρουσιάζει η περιοχή μελέτης, καθώς η λεκάνη απορροής του Γεροποτάμου έχει σαν υδροκρίτη τον Ψηλορείτη στα βόρεια και το ύβωμα της Φαιστού στα νότια. (Paparrizos et al., 2016)



Εικόνα 1.10:Ετήσια Αθροιστική Βροχόπτωση για την Λεκάνη Απορροής του Γεροποτάμου για τα έτη 1981-2000 (Paparrizos et al., 2016)

1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

1.2.1 Στοιχεία για το FEFLOW

Το FEFLOW είναι ένα λογισμικό ικανό να προσομοιώνει την ροή νερού σε κορεσμένα και ακόρεστα μέσα σε δύο ή τρεις διαστάσεις. Η γενική εξίσωση διατήρησης μάζας ενός ρευστού εντός ενός μέσου διάφορου κορεσμού ορίζεται ως:

$$S_0 \cdot s(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial \tau} + \varepsilon \frac{\partial s(\psi)}{\partial t} + \nabla \cdot q = Q$$

Η κίνηση του ρευστού περιγράφεται από την εξίσωση Darcy με την μορφή:

$$q = -K_r(s)K(\nabla h + \chi e) = -K_r(s)K[\nabla \psi + (1 + \chi)e]$$

Όπου:

$h = \psi + z$: Υδραυλικό ύψος

ψ : Πιεζομετρικό ύψος, ($\psi > 0$ κορεσμένο ύψος, $\psi < 0$ ακόρεστο μέσο)

$s(\psi)$: Κορεσμός, ($0 < s < 1$, $s = 1$ αν το μέσο είναι κορεσμένο)

q : Διάνυσμα ροής Darcy

z : Υψόμετρο από σημείο αναφοράς

t : Χρόνος

$S_0 = \varepsilon\gamma + (1 - \varepsilon)Y$: Ειδική αποθηκευτικότητα λόγω συμπιεστότητας του ρευστού και του μέσου

ε : Πορώδες

γ : Συντελεστής της συμπιεστότητας

Y : Συντελεστής της συμπιεστότητας του σκελετού

$K_r(s)$: Σχετική υδραυλική αγωγιμότητα ($0 < K_r \leq 1$, $K_r = 1$ αν το μέσο είναι κορεσμένο για $s = 1$)

K : Τανυστής υδραυλικής αγωγιμότητας για κορεσμένα μέσα (ανισοτροπικά)

χ : Συντελεστής άνωσης συμπεριλαμβάνοντας την πυκνότητα του ρευστού

e : Διάνυσμα βαρυτικής μονάδας

Q : Παροχή ειδική μάζας

Ακόμα το FEFLOW έχει την δυνατότητα να προσομοιώνει ροή ρευστών διαφορετικών πυκνοτήτων, με κύρια εφαρμογή να είναι η εξέταση του φαινομένου της υφαλμύρισης. Στην συγκεκριμένη εργασία δεν θεωρείται πως υπάρχει το εν λόγω φαινόμενο συμβαίνει καθώς τα στοιχεία απαραίτητα για την προσαρμογή στο μοντέλο δεν είχαν εισαχθεί στο αρχικό μοντέλο και η βαθμονόμηση σε αυτή την φάση αφορά της προσαρμογές τάσεων. Αξίζει ωστόσο να αναφερθεί πως είναι δυνατή και η μοντελοποίηση χημικών αντιδράσεων μέσα στα ρευστά αλλά και πάλι η εν λόγω εργασία δεν ασχολείται με θέματα υδατικής χημείας καθώς τα διαθέσιμα δεδομένα είναι λιγοστά.

Η βασική είσοδος που δέχεται σε μορφή χρονοσειράς το FEFLOW είναι οι οριακές συνθήκες, στην ουσία είναι μαθητικές εκφράσεις που περιορίζουν τις εξισώσεις ενός μαθηματικού μοντέλου στο χώρο. Οι οριακές συνθήκες στην εξίσωση ροής που υποστηρίζει το FEFLOW είναι η *Dirichlet*, *Neumann* και *Cauchy*. Η *Dirichlet* ή καθορισμένου φορτίου ορίζεται ως συνάρτηση της θέσης και του χρόνου κατά μήκος μιας οριακής επιφάνειας της περιοχής προσομοίωσης, στο όριο αυτό το υδραυλικό φορτίο μπορεί να μεταβάλλεται ή να μένει σταθερό. Η *Neumann* ή συνθήκη καθορισμένης ροής χρησιμοποιείται για οριακές επιφάνειες όπου η ροή είναι συνάρτηση του χρόνου και της θέσης και προσομοιώνεται κάποιο αδιαπέρατο υδραυλικό όριο. Η *Cauchy* ή συνθήκη μεταβλητού φορτίου και ροής χρησιμοποιείται σε περίπτωση όπου η ροή διαμέσου μια οριακής επιφάνειας εξαρτάται από

τις μεταβολές της ροής και τις μεταβολές του υδραυλικού φορτίου που επικρατούν στην εγκάρσια επιφάνεια. ("FEFLOW White Papers Vol.1", 2009; Stergiou, 2021)

1.2.2 Ανασκόπηση Σχετικών Άρθρων

Ένα από τα κύρια θέματα που παρουσιάζονται κατά τη μοντελοποίηση ροής υπογείων υδάτων είναι ο προσδιορισμός υδραυλικών παραμέτρων των υδροφορέων, μια πειραματική τεχνική για τον προσδιορισμό τους είναι η χρήση ιχνηθετών. Οι ιχνηθέτες είναι χημικές ενώσεις οι οποίες εισέρχονται στον υδροφόρα και παραμένουν μέσα στο νερό του χωρίς να χάνουν τις ιδιότητές τους ή να αντιδρούν, βέβαια οι ιχνηθέτες δεν περιορίζονται μόνο σε χημικά σκευάσματα. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα μη χημικού ιχνηθέτη είναι το τρίπιο που χρησιμοποιήθηκε στο Νέο Μεξικό το 1977. Τα δύο ερωτήματα που έθεσε η συγκεκριμένη μελέτη ήταν αν υπάρχει συσχέτιση των δεδομένων παρατήρησης του τριτίου με τα υδρολογικά δεδομένα της περιοχής και αν θα μπορούσαν να παραχθούν νέες πληροφορίες για την υδρολογία της περιοχής από την παραπάνω ανάλυση. Πρέπει να σημειωθεί ότι πριν την διεξαγωγή της μελέτης δεν υπήρχαν δεδομένα τριτίου στην ατμόσφαιρα καθώς η ύπαρξή του εκεί γίνεται μόνο με ανθρώπινη παρέμβαση από πυρηνικές δοκιμές. Η μελέτη αρχικά επαλήθευσε τις προηγούμενες θεωρήσεις για τη ροή του νερού μέσα σε διαφορετικά υδροφόρα στρώματα, ενώ βρέθηκαν και ακριβείς πληροφορίες για τις υδραυλικές παραμέτρους των υδροφόρων στρωμάτων της περιοχής όπως υδραυλικές αγωγιμότητες, χρόνοι παραμονής και ταχύτητες ροής ενώ έγινε εφικτή η μελέτη υδροφορέων μεγάλης έκτασης λόγω των χαρακτηριστικών του τριτίου. Οπότε μπορεί να θεωρηθεί μια πολύ καλή μέθοδος ανάλυσης, βέβαια οι προϋποθέσεις διεξαγωγής της είναι ιδιαίτερα απαιτητικές καθώς χρειάζονται δείγματα που περιέχουν τρίπιο και μια συστηματική επίβλεψη της περιοχής μελέτης και η ύπαρξη τριτίου στην ατμόσφαιρα προϋποθέτει πυρηνικές δοκιμές (Rabinowitz et al., 1977). Αν και το παράδειγμα που παρουσιάζεται είναι ακραίο, δείχνει την χρησιμότητα των ιχνηθετών αλλά ταυτόχρονα του περιορισμού που έχουν σαν εργαλεία εκμάτευσης πληροφοριών, βέβαια αναφορικά με τις πιο συμβατικές μεθόδους οι περιορισμοί έγκεινται σε κόστος και σε ζητήματα από την απελευθέρωσή τους στο πεδίο.

Σε αντίθεση με την παραπάνω περίπτωση όπου υπήρχαν ταυτόχρονα πλήθος μετρήσεων και η υποδομή για την ανάλυση, η μελέτη των Aghlmand και Abbasi παρουσιάζει την μεθοδολογία για το πως μπορεί να γίνει αντίστοιχη ανάλυση με περιορισμένα μέσα. Η περιοχή μελέτη βρίσκεται στην πόλη Birjand στο ανατολικό Ιράν και όπως αναφέρουν οι ερευνητές τα δεδομένα τόσο γεωλογικά όσο και υδρολογικά ήταν περιορισμένα. Έτσι ήταν απαραίτητη η χρήση βιβλιογραφικών δεδομένων αλλά και παραδοχών, το μοντέλο όπως δημιουργήθηκε ξεκίνησε από ένα αφηρημένο μοντέλο μέσα από το οποίο κατάφεραν να προσδιορίσουν κάποιες βασικές παραμέτρους και έπειτα μέσα από δοκιμές και σφάλμα κατέληξαν στην τελική μορφή της προσομοίωσής τους. Το αφηρημένο μοντέλο αποτελεί μια υπεραπλουστευμένη θεώρηση της περιοχής μελέτης μέσα από την οποία εξετάζουν μια γενική τάση της οποίας οι ερευνητές γνωρίζουν την ύπαρξή και από εκεί σταδιακά προσθέτουν στοιχεία. Συγκεκριμένα αναφέρουν ότι η μεγαλύτερη πρόκληση που είχαν να αντιμετωπίσουν ήταν η έλλειψη δεδομένων, λέγοντας ότι τα πηγάδια παρατήρησης ήταν περιορισμένα όπως και τα δεδομένα άντλησης ενώ υπήρχαν αρκετά λάθη στα πιεζομετρικά δεδομένα που κατείχαν, υπήρχαν ελάχιστοι βροχομετρικοί σταθμοί στην περιοχή και τα διαθέσιμα κλιματικά δεδομένα ήταν περιορισμένα και είχαν γνώση των επιφανειακών αλουβιακών στρωμάτων και παρατηρήσεις για υδραυλικές αγωγιμότητες. Παρόλα αυτά με απλές παραδοχές κατάφεραν να περιγράψουν ικανοποιητικά την περιοχή μελέτης τους χρησιμοποιώντας οριακές συνθήκες τύπου *Drichlet* και αντίστοιχα κριτήρια βελτίωση με την μελέτη κατασκευής και βαθμονόμησης του παρόντος μοντέλου (Aghlmand and Abbasi, 2019). Αυτό είναι αρκετά ενθαρρυντικό καθώς σε κάποιο βαθμό κατά την κατασκευή του

αρχικού μοντέλου, το οποίο αυτή η εργασία προσπαθεί να βελτιώσει, έγιναν παραδοχές με τις οποίες κατορθώθηκε να περιγραφεί ικανοποιητικά η υπάρχουσα κατάσταση και να γίνουν ασφαλείς προβολές προς το μέλλον.

Η παραπάνω εργασία θεωρούσε τις οριακές συνθήκες από υδρολογική πλευρά, δηλαδή σαν εισροές και εκροές μέσα στην περιοχή μελέτης ωστόσο αυτό αποδεικνύεται αρκετά δύσκολο σε περίπτωση που η περιοχή μελέτης είναι υδρολογικά απομονωμένη όπως στην περίπτωση ενός νησιού. Με μια αντίστοιχη περίπτωση ασχολήθηκαν οι Κοψιάφτης, Κουράκος και Μαντόγλου το 2009 και 2013 με περιοχή μελέτης το νησί της Σαντορίνης, όπου οι οριακές συνθήκες βασίζονται στην τιμή της συγκέντρωσης κατά μήκος της οριακής συνθήκης και όχι στην παροχή. Η πρώτη μελέτη είχε να κάνει με την ανάλυση του φαινομένου της υφαλμύρισης και πως περιγράφεται σε περίπτωση νησιού, η απάντηση δόθηκε μέσα από το FEFLOW και την δυνατότητα του να προσομοιώνει ροή ρευστών με εξισώσεις που βασίζονται στην πυκνότητα τους. Η ανάλυση έγινε βάση του υδρολογικού αποθέματος εντός της περιοχής μελέτης και τις οριακές συνθήκες κατά μήκος της παράκτιας γραμμής. Θεωρήθηκε ένα ομογενές μίγμα στο οποίο βρίσκονται φρέσκο και υφάλμυρο νερό στην ίδια φάση και στα όρια της περιοχής μελέτης τα φαινόμενα μεταφοράς, νερού από τον υδροφορέα στην θάλασσα, βρίσκονται σε ισορροπία. Η χρονική μεταβολή των τιμών των οριακών συνθηκών γίνεται βηματικά από την προηγούμενη τιμή οριακής συνθήκης στην επόμενη, με τις εξισώσεις μοντελοποίησης να είναι η εξίσωση συνέχειας, η εξίσωση Darcy, και η εξίσωση μεταφοράς και πυκνότητας ρευστών. Ο υδροφορέας χωρίστηκε σε 30 στρώματα με πάχος στρώματος 4 μέτρα προκειμένου να περιοριστεί η απαιτούμενη υπολογιστική ισχύς όπως αντίστοιχα έγινε και με την δημιουργία σεναρίων για των ορισμό των οριακών συνθηκών (Kopsiaftis et al., 2009). Η δεύτερη μελέτη ασχολείται με την βελτίωση της υπάρχουσας κατάστασης εξετάζοντας το σενάριο μείωσης του φαινομένου της υφαλμύρισης εμπλουτίζοντας τον υδροφορέα με επεξεργασμένο νερό. Η μέθοδος ανάλυσης αποτελεί μια βελτιστοποίηση μιας πολλαπλής εξίσωσης αντικειμενικής συνάρτησης με την μια παράμετρο να είναι η παροχή εμπλουτισμού από περιβαλλοντικής σκοπιάς και η άλλη η παροχή εμπλουτισμού από πλευράς οικονομικού κόστους (Kourakos and Mantoglou, 2013). Η δεύτερη μελέτη θα αποτελέσουν μελλοντικά σενάρια για την βελτίωση του μοντέλου περιγραφής της ροής υπογείων υδάτων. Έτσι είναι εμφανές πως τα μοντέλα που δημιουργούνται όχι απλά δεν μένουν στάσιμα στον χρόνο αλλά είναι μόνιμα σε μια κατάσταση που επιδέχονται διορθώσεις παρατηρήσεις και μετατροπές.

Αντίστοιχα με την χρήση του MODFLOW και πολλαπλές γραμμικές βελτιστοποιήσεις προσεγγίζεται το μέτωπο διείσδυσης του υφάλμυρου νερού σε διάφορους παραθαλάσσιους υδροφορείς στην Κρήτη. Η διείσδυση προσομοιάζεται με την σχέση *Ghyben-Herzberg* και η γραμμική βελτιστοποίηση γίνεται με τη μέθοδο Simplex, με την αντικειμενική συνάρτηση να είναι το άθροισμα όλων των ρυθμών άντλησης και τους περιορισμούς να σχετίζονται τον μέγιστο ρυθμό άντλησης και το ελάχιστο υδραυλικό ύψος που δεν επιτρέπει την περαιτέρω διείσδυση του υφάλμυρου νερού. (Dokou et al., 2017)

Στα περισσότερα μοντέλα ροής υπογείων υδάτων οι οριακές συνθήκες παραμένουν σταθερές μέσα στον χρόνο προσομοίωσης είτε αλλάζουν με μια βηματική μεταβολή σε αυθαίρετους χρόνους, στην δεύτερη περίπτωση δημιουργώντας μη συνεχείς συναρτήσεις. Μέσα σε αυτές τις προσεγγίσεις εννοείται μια σταθερή κατάσταση ή μια μέση τιμή μιας ελαφρώς μεταβαλλόμενης κατάστασης. Στη μελέτη τους οι Munusamy και Dhar προσπάθησαν να ορίσουν τις οριακές συνθήκες που επικρατούν στην παραλιακή ζώνη συνυπολογίζοντας την περιοδικότητα της παλίρροιας, χρησιμοποιώντας συνημιτοειδείς καμπύλες. Συγκεκριμένα αναφέρονται σε παράκτιους ελεύθερους υδροφορείς, με την κυρίαρχη εξίσωση περιγραφής του φαινομένου να είναι η εξίσωση του Boussinesq. Στο συγκεκριμένο άρθρο προτάθηκε μια αναλυτική λύση με αποτέλεσμα μια αρμονική

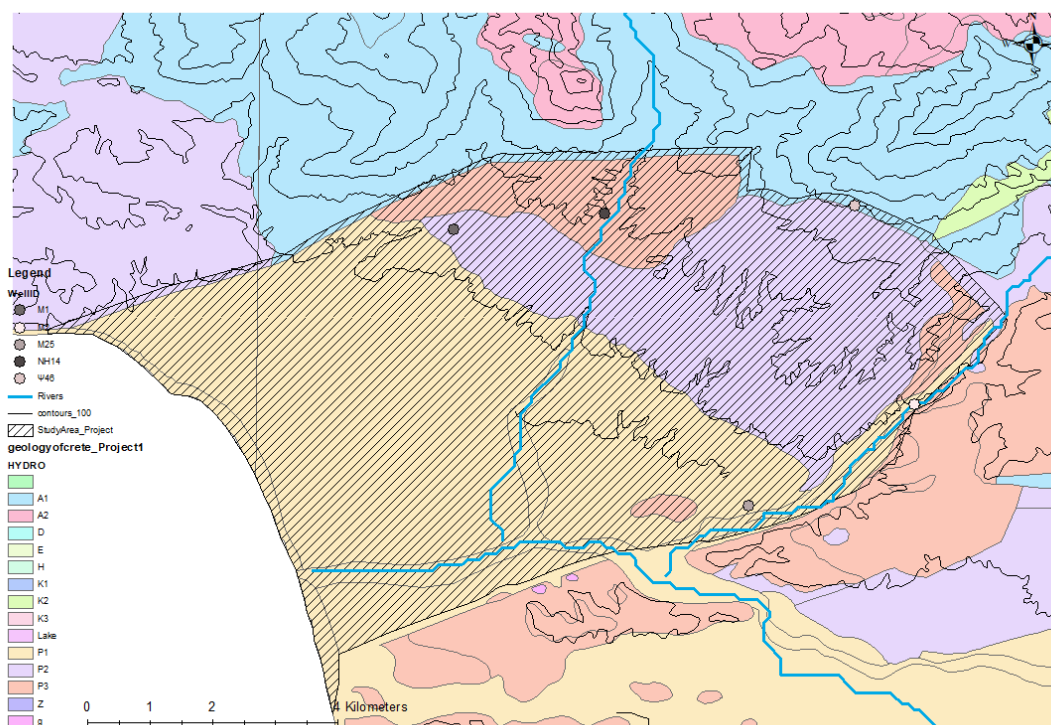
συνημιτονοειδής μη διαστατική εξίσωση Boyssinesq, η οποία προέκυψε από μια μέθοδο ομοιοτικής διαταραχής. Συμπεραίνουν εν τέλει ότι οι χρονικές παράμετροι μπορούν να αφαιρεθούν από την αναλυτική λύση, χρησιμοποιώντας επεκτάσεις από την οριακή συνθήκη (Munusamy and Dhar, 2016). Η παραπάνω μελέτη είναι ενθαρρυντική ως προς τη μεθοδολογία που εφαρμόζεται σε αυτή την εργασία καθώς από την βιβλιογραφία και τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν υπάρχει μια εμφανής περιοδικότητα στα βροχομετρικά δεδομένα και είναι εφικτή η έκφραση των οριακών συνθηκών σαν αρμονικές συναρτήσεις του χρόνου.

Τέλος ένας διαφορετικός τρόπος προσδιορισμού δυναμικών οριακών συνθηκών είναι με τη χρήση νευρωνικών δικτύων. Ο πιο απλοποιημένος τρόπος περιγραφής νευρωνικών δικτύων ως προς την λειτουργία τους είναι θεωρώντας δύο φάσεις λειτουργίας, στην πρώτη φάση γίνεται η εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου όπου εισάγονται δύο πίνακες *input* και *target* και στη δεύτερη φάση το νευρωνικό δίκτυο μπορεί να προβλέπει βάσει της εκπαίδευσής του. Το 2011 μια ερευνητική ομάδα δημιούργησε ένα υβριδικό μοντέλο που συνδυάζει ένα νευρωνικό δίκτυο με το FEFLOW, όπου το νευρωνικό μοντέλο έχει εκπαιδευτεί προκειμένου να παράγει τιμές για τις οριακές συνθήκες βάσει των εξής παραμέτρων: αρχική ποσότητα νερού στον υδροφορέα, μηνιαία κατακρημνίσματα, άρδευση και εξατμισοδιαπνοή σε επιφανειακά ύδατα. Η εκπαίδευση έγινε με 120 σετ μετρήσεων όπου τυχαία χωρίστηκαν σε δύο ομάδες, η πρώτη ομάδα είχε 80 σετ μετρήσεων και χρησιμοποιήθηκε για την εκπαίδευση (*training*) του νευρωνικού δικτύου ενώ η δεύτερη ομάδα είχε 40 και χρησιμοποιήθηκε για την επαλήθευση (*validation*) του νευρωνικού δικτύου (Huo et al., 2011). Ο βασικός κίνδυνος στη μοντελοποίηση με νευρωνικά δίκτυα είναι ο στραγγαλισμός του μοντέλου ο οποίος συμβαίνει αρκετά συχνά όταν δεν υπάρχει αρκετά μεγάλος όγκος δεδομένων ή οι παράμετροι που εισάγονται σε αυτό κατά την εκπαίδευση το οδηγούν σε παρόμοια αποτελέσματα χωρίς όμως να ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα.

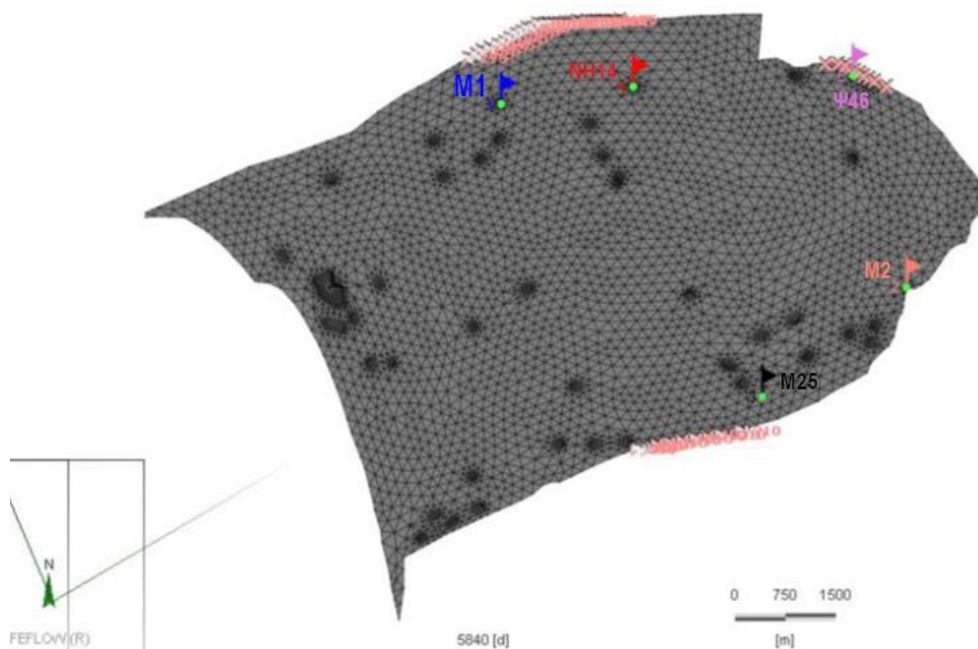
2 Μεθοδολογία

Αρχικά θα πρέπει να αναφερθεί είναι πως η παρούσα διπλωματική αποτελεί την συνέχεια ενός μοντέλου που αναπτύχθηκε παλαιότερα (Stergiou, 2021) στο οποίο έγιναν αλλαγές και βελτιώσεις ως προς τον τρόπο που θα γίνει η περιγραφή του φυσικού συστήματος ενός υδροφορέα. Επομένως πριν ξεκινήσει η ανάλυση της μεθοδολογίας που έχει ακολουθηθεί στην παρούσα εργασία πρέπει να γίνει μια παρουσίαση της αρχικής προσέγγισης την οποία η εργασία έχει σαν σκοπό να βελτιώσει. Ακόμα προκειμένου να υποστηριχθεί η παραδοχή ότι οι υδροφορείς έχουν μικρό χρόνο απόκρισης στο υδρολογικό φορτίο λόγω βροχόπτωσης, έχουν διεξαχθεί και κάποιες επιπλέον δοκιμές συσχέτισης αθροιστικής βροχόπτωσης με υδραυλικό ύψος. Σε αυτό το κεφάλαιο λοιπόν θα παρουσιαστούν η μεθοδολογία για την δημιουργία του μοντέλου, βελτίωσης και βαθμονόμησης και οι δοκιμές υποστήριξης της παραδοχής.

Από τεχνικής άποψης η δημιουργία και επεξεργασία του μοντέλου έγιναν χρησιμοποιώντας τα ίδια εργαλεία λογισμικού, καθώς το λογισμικό FEFLOW ήταν η πλατφόρμα που χρησιμοποιήθηκε κατά κύριο λόγο, ενώ τα ArcGIS, Matlab και Microsoft Excel έδρασαν επικουρικά στην επεξεργασία των δεδομένων και την εκμαίευση κάποιων αποτελεσμάτων. Το ArcGIS χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να δημιουργηθεί η κατάλληλη βάση όσο αναφορά τα γεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής σε μορφή shape file προκειμένου να εισαχθούν στο FEFLOW, καθώς και να γίνει δημιουργία κάποιων περιγραφικών χαρτών, οι οποίοι βοηθούν στη καλύτερη απεικόνιση και περιγραφή της περιοχής μελέτης. Έτσι οποιαδήποτε παραδοχή έχει γίνει σε επίπεδο παραμέτρων, τόσο για θέματα συνάφειας αλλά και λόγω έλλειψης περισσότερων μετρήσεων, παραμένουν ίδιες ενώ όταν πρόκειται να αλλάξει κάτι, θα αναλύεται.



Εικόνα 2.1:Γεωλογικός χάρτης της περιοχής με ορισμένη την περιοχή μελέτης



Εικόνα 2.2:Περιοχή μελέτης όπως παρουσιάζεται στο FEFLOW

Επίσημο Όνομα Πηγαδιού	Όνομα Πηγαδιού στο Μοντέλο
M1	1
M2	2
M25	3
N14	4
Ψ46	5

Πίνακας 2.1:Σύμβαση Ονομασίας Πηγαδιών

2.1 Μεθοδολογία Αρχικής Μορφής του Μοντέλου

2.1.1 Υδραυλική Αγωγιμότητα

Η υδραυλική αγωγιμότητα είναι μια από τις κύριες παραμέτρους που πρέπει να προσδιοριστούν ώστε το FEFLOW να λειτουργήσει σωστά. Στο αρχικό μοντέλο για τα τρία διαφορετικά υδροφόρα στρώματα επιλέχθηκαν διαφορετικές τιμές με βάση την μορφολογία του κάθε στρώματος από τη βάση δεδομένων Enviro-base. Για εδάφη που αποτελούνται από άμμο και χαλίκι με φακούς αργίλου χρησιμοποιείται τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας 9×10^{-4} m/d (K1), για ασβεστολιθικά εδάφη χρησιμοποιείται υδραυλική αγωγιμότητα τιμής $3,3 \times 10^{-4}$ m/d (K2) και για αργιλικά εδάφη χρησιμοποιείται η τιμή 10^{-7} m/d (K3) (Masch and Denny, 1966; Rabinowitz et al., 1977). Ωστόσο κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης του μοντέλου οι προσομοιωμένες τιμές του υδραυλικού ύψους παρουσίαζαν τεράστιες μεταβολές σε σχέση με τις παρατηρημένες επομένως οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας έπρεπε να αλλάξουν. Συγκριμένα η παράμετρος K1 πήρε τιμή 10 m/d η παράμετρος K2 3 m/d και η παράμετρος K3 70 m/d, οι παραπάνω τιμές προέκυψαν μετά από εφαρμογή της μεθόδου δοκιμή και σφάλμα παρόλα αυτά το φυσικό τους νόημα δεν αλλάζει καθώς μπορούν να αιτιολογηθούν γεωλογικά (Stergiou, 2021).

2.1.2 Οριακές Συνθήκες

Η επιλογή των θέσεων των οριακών συνθηκών έγινε βάσει της γεωλογίας της περιοχής και των παρατηρημένων υδραυλικών υψών που ήταν διαθέσιμα. Έτσι φαίνεται μια σημαντική εισροή να βρίσκεται στα βόρεια της περιοχής που συμπίπτει με τους πρόποδες του Ψηλορείτη. Η δεύτερη οριακή συνθήκη φαίνεται να βρίσκεται στον αλουβιακό σχηματισμό που ταυτίζεται σε μεγάλο βαθμό με την κοίτη του Γεροποτάμου και στο ανατολικό τμήμα όπως προέκυψε από την βαθμονόμηση υπάρχει μια μικρή εκροή, η οποία μπορεί να εξηγηθεί γεωλογικά.

Στην πρώτη φάση κατασκευής του μοντέλου οι τιμές των οριακών συνθηκών εισήχθησαν σαν σταθερές μεταβλητές ανεξάρτητα των μετεωρολογικών δεδομένων, έτσι ώστε να μπορεί να γίνει ο προσδιορισμός μιας «μέσης» κατάστασης πάνω στην οποία θα προσαρμοστεί η αρμονική συνάρτηση. Μετά από δοκιμές η οριακή συνθήκη στο βόρειο τμήμα (BC1) τέθηκε στα -0,35 m/d, ενώ στο νότιο τμήμα (BC2) στα -0,14 m/d και για την οριακή συνθήκη στην εκροή ανατολικά (BC3) τέθηκε η τιμή 0,05 m/d.

Στην επόμενη φάση της κατασκευής του μοντέλου παρατηρήθηκε ότι οι διακυμάνσεις στα υδραυτικά ύψη διέπονται από μια εποχική περιοδικότητα η οποία υποδηλώνει μια άμεση σχέση του υδραυλικού ύψους με την βροχόπτωση, άρα οι οριακές συνθήκες μπορούν να εκφραστούν σαν συνάρτηση της βροχόπτωσης. Επομένως οι δύο οριακές συνθήκες εισροής αποκτούν μια συνημιτονοειδή μορφή όπου η περίοδος της είναι 365 ημέρες, το πλάτος είναι συνάρτηση της βροχόπτωσης το οποίο μεταβάλλεται ανά εξάμηνο και η ταλάντωση της γίνεται γύρω από τις τιμές των οριακών συνθηκών που υπολογίστηκαν παραπάνω ($BC_{average}$). Λόγω της μικρής τιμής της οριακής συνθήκης στα ανατολικά αποφασίστηκε να παραμείνει σταθερή. Η συνημιτονοειδής συνάρτηση επιλέχθηκε έναντι της ημιτονοειδούς καθώς η πρώτη ημέρα μετρήσεων είναι η 22/4/2004, η οποία μπορεί να θεωρηθεί ότι βρίσκεται στο τέλος της χειμερινής περιόδου δηλαδή σχεδόν στην κορυφή της καμπύλης, επομένως οι συναρτήσεις θα ξεκινούν από το εποχικό τους μέγιστο και θα μειώνονται με την πάροδο του χρόνου μέχρι το σημείο καμπής που ταυτίζεται με την έλευση του φθινοπώρου και την αλλαγή του υδρολογικού έτους. Ο προσδιορισμός του πλάτους της συνάρτησης έγινε βάσει των βροχομετρικών μετρήσεων των μετεωρολογικών σταθμών του Τυμπακίου και των Μοιρών για την βόρεια οριακή συνθήκη και για την νότια αντίστοιχα. Οι διαθέσιμες μετρήσεις από το έτος 2004 έως το 2019 χωρίστηκαν σε τρίμηνα εκ των οποίων τα δύο με υψηλή βροχόπτωση θεωρούνται υγρά ενώ αυτά με χαμηλή βροχόπτωση θεωρούνται ξηρά και μετά από δοκιμές προκύπτει το πλάτος A που υπολογίζεται ως:

$$A_j = \left(\frac{x_{i,j}}{\sum x_{i,j}} - f_j \right) * \frac{BC_{initial}}{2}$$

Όπου:

i : η ημέρα του εξαμήνου

j : το εκάστοτε εξάμηνο

$x_{i,j}$: η ημερήσια μέτρηση βροχόπτωσης εντός του εξαμήνου

f_j : ο διορθωτικός παράγοντας του εξαμήνου j

$BC_{initial}$: τιμή της αρχικής οριακής συνθήκης

Και η τελική μορφή της εξίσωσης είναι:

$$BC_{new} = A * \cos\left(\frac{k * 2\pi}{365}\right) + BC_{average}$$

Όπου:

k : η ημέρα του χρόνου με τιμές [1,365]

$BC_{average}$: η μέση οριακή συνθήκη που προσδιορίστηκε στην προηγούμενη φάση κατασκευής

A : το πλάτος της συνιμητονοειδούς συνάρτησης για το εκάστοτε εξάμηνο σε χρονική σειρά για την εκάστοτε οριακή συνθήκη

BC_{new} : η νέα οριακή συνθήκη

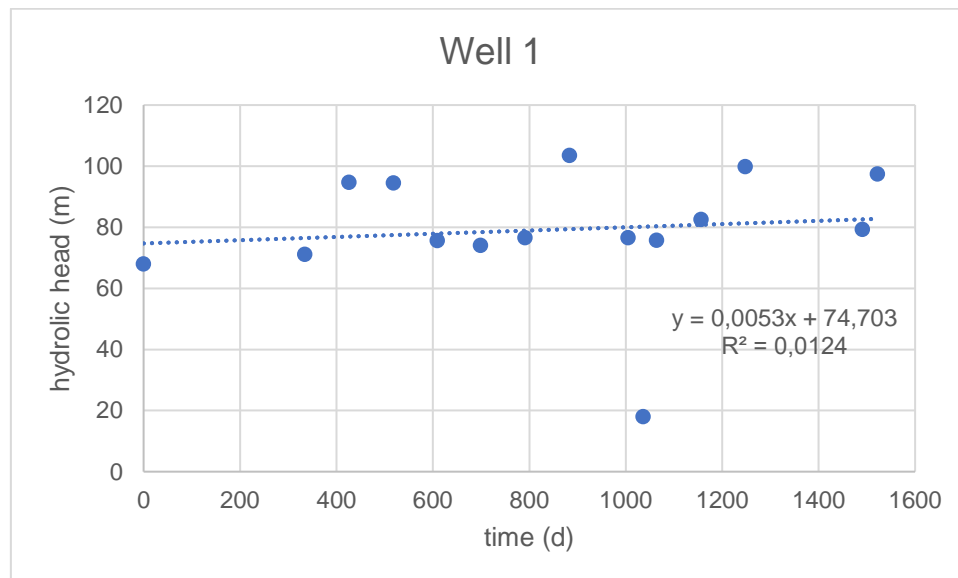
Τα αποτελέσματα των οριακών συνθηκών αποτελούν την αρχική κατάσταση στην οποία θα γίνουν περαιτέρω βαθμονομήσεις και τροποποιήσεις. Ακόμα πρέπει να σημειωθεί ότι η παρούσα εργασία ασχολείται αποκλειστικά με το χρονικό εύρος όπου υπάρχουν μετρήσεις υδραυλικού ύψους για 1522 ημέρες μετά την 22/4/2004 σε αντίθεση με την αρχική μορφή του μοντέλου που είχε πολύ μεγαλύτερο ορίζοντα δράσης.

2.2 Μεθοδολογία Αρθρωτής Βαθμονόμησης

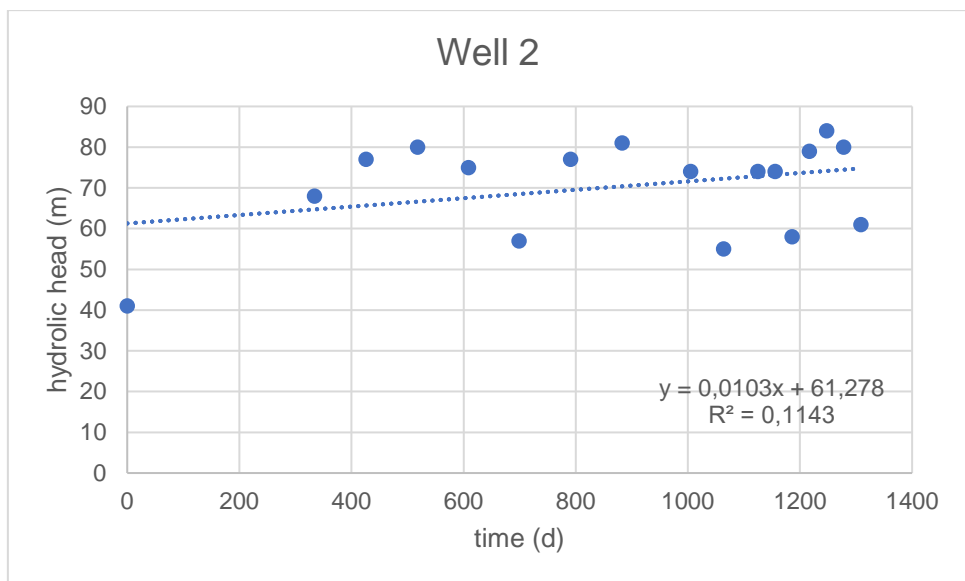
Σε αυτή τη φάση της βαθμονόμησης οι παραδοχές που έχουν γίνει για παραμέτρους όπως η υδραυλική αγωγιμότητα και οι αντλήσεις θα παραμείνουν ίδιες, όλες οι αλλαγές από αυτό το σημείο αναφέρονται στις τιμές που παίρνουν οι οριακές συνθήκες. Δηλαδή εισαγωγή τάσεων (trends) στις τιμές των οριακών συνθηκών και μετατόπιση της έναρξης των αρμονικών συνθηκών ώστε να ταιριάζουν καλύτερα οι προσομοιωμένες τιμές των υδραυλικών υψών σε αυτές που έχουν παρατηρηθεί.

2.2.1 Τάσεις Πηγαδιών

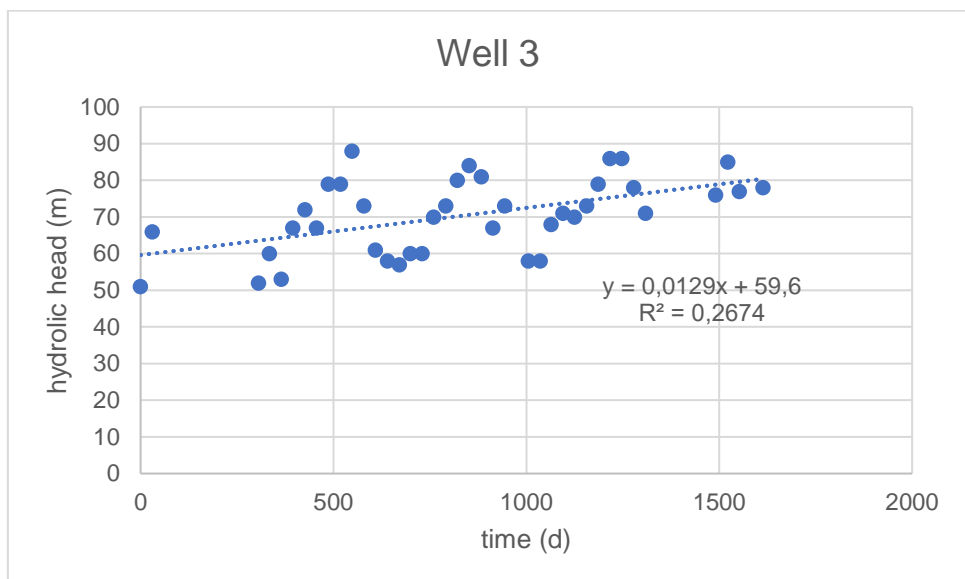
Χρησιμοποιώντας την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων στις χρονοσειρές υδραυλικών υψών για κάθε πηγάδι, προκύπτουν γραμμικές εξισώσεις ($y=ax+b$) των οποίων οι κλίσεις θα αποτελέσουν την βάση που θα δημιουργηθούν οι τάσεις που θα προστεθούν στις οριακές συνθήκες.



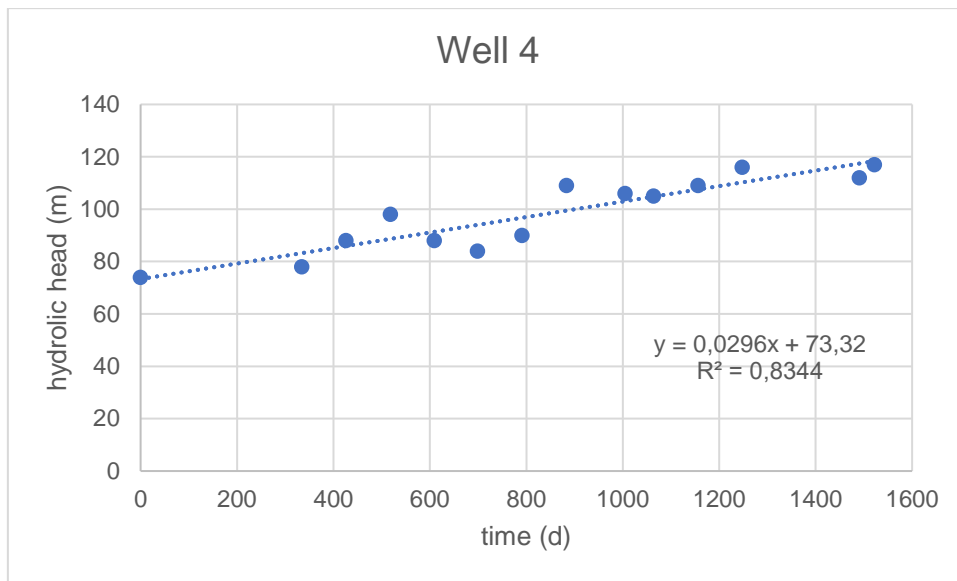
Εικόνα 2.3:Γραμμική Σχέση για το Πηγάδι 1



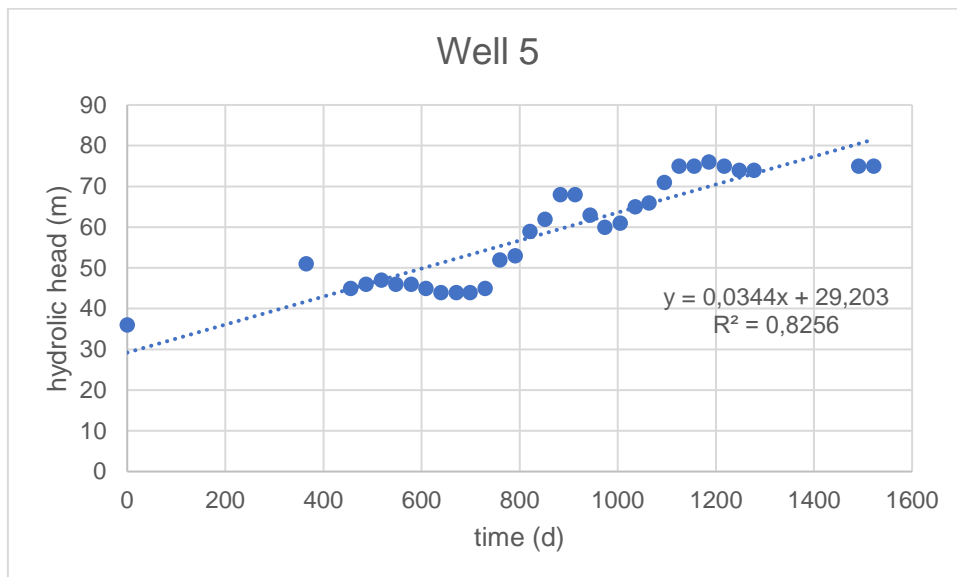
Εικόνα 2.4:Γραμμική Σχέση για το Πηγάδι 2



Εικόνα 2.5:Γραμμική Σχέση για το Πηγάδι 3



Εικόνα 2.6:Γραμμική Σχέση για το Πηγάδι 4



Εικόνα 2.7:Γραμμική Σχέση για το Πηγάδι 5

Η προσαρμογή των κλίσεων από τις γραμμικές σχέσεις στις οριακές συνθήκες θα γίνει με μια απλή κανονικοποίηση για κάθε κλίση στην αντίστοιχη οριακή συνθήκη (BC1 και BC2, στην προεπεξεργασία η BC3 θα παραμείνει ως έχει). Με τον τρόπο αυτό θα παράγεται μια τάση (trend) για κάθε πηγάδι για κάθε οριακή συνθήκη. Κάθε μεμονωμένη τάση υπολογίζεται ως:

$$trend_{i,j} = BC_{average,j} * \frac{a_i}{\widehat{h}h_i}$$

Όπου:

$trend$: η τάση του εκάστοτε πηγαδιού i για την οριακή συνθήκη j

$BC_{average,j}$: η μέση τιμή της οριακής συνθήκης

a_i : η κλίση του κάθε πηγαδιού

$\widehat{h}h_i$: το μέσο υδραυλικό ύψος του πηγαδιού

i ο αριθμός του κάθε πηγαδιού

j : ο αριθμός της κάθε οριακής συνθήκης

Well	BC1 trends	BC2 trends
1	-2,37158E-05	-9,72914E-06
2	-5,19332E-05	-2,1305E-05
3	-6,50426E-05	-2,6683E-05
4	-0,000106896	-4,38528E-05
5	-0,000206868	-8,48654E-05

Πίνακας 2.2: Τάσεις για κάθε οριακή συνθήκη από το εκάστοτε πηγάδι

2.2.1.1 Προσέγγιση Μέσου Όρου (Mean Average)

Σε αυτή την προσέγγιση θεωρείται πως η περιοχή είναι αρκετά ευαίσθητη στις μεταβολές οπότε υπάρχει σημαντική αλληλεπίδραση μεταξύ των οριακών συνθηκών και υδραυλικών υψών των πηγαδιών. Έτσι θεωρείται πως μια μέση τάση για κάθε οριακή συνθήκη είναι αυτή που περιγράφει το σύστημα και θα προσαρμοστεί στις τιμές των οριακών συνθηκών. Ακόμα αξίζει να σημειωθεί πως δοκιμάστηκε προσέγγιση με σταθμισμένο μέσο όρο ως προς την απόσταση του εκάστοτε πηγαδιού από τη θέση των οριακών συνθηκών αλλά τα αποτελέσματα ήταν πολύ κοντά σε αυτή τη θεώρηση οπότε απορρίφθηκε η συγκεκριμένη προσέγγιση. Πέρα από την μέση τάση σε αυτή την θεώρηση υπολογίζεται και η αρχική τιμή των οριακών συνθηκών, καθώς τάση των οριακών συνθηκών θα αντικαθιστά στην αρμονική συνάρτηση τον σταθερό όρο του $BC_{average}$ και υπολογίζεται ως:

$$BC_{start,j} = BC_{average,j} - trend_{average,j} * \frac{t_{total}}{2}$$

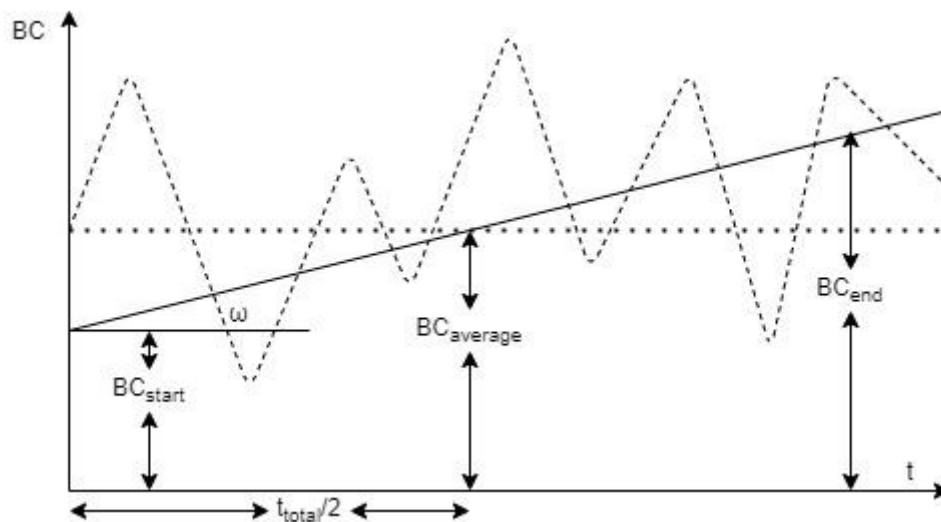
Όπου:

$BC_{average,j}$: η μέση τιμή της οριακής συνθήκης

$trend_{average,j}$: η μέση τάση της κάθε οριακής συνθήκης

$BC_{start,j}$: η αρχική τιμή της κάθε οριακής συνθήκης

t_{total} : ο ολικός χρόνος προσομοίωσης



Εικόνα 2.8:Απεικόνιση των τάσεων με τους μέσους όρους και τις αρμονικές συναρτήσεις των οριακών συνθηκών

	BC_{start}	Mean trend
BC1	-0,28526	-9,08911E-05
BC2	-0,11702	-3,72871E-05

Πίνακας 2.3:Παράμετροι προσέγγισης μέσου όρου

2.2.1.2 Προσέγγιση Πλησιέστερου Πηγαδιού (Nearest Well)

Η συγκεκριμένη προσέγγιση είναι πολύ πιο απλή στην θεώρηση της, καθώς εξετάζεται η περίπτωση που η αλληλεπίδραση του συστήματος είναι πολύ μικρή,

δηλαδή οι τάσεις των οριακών συνθηκών θα προκύπτουν από τις κλίσεις των πλησιέστερων πηγαδιών. Επομένως οι τιμές των τάσεων επιλέγονται κατευθείαν από τον πίνακα 1 βάσει της απόστασης της θέσης της οριακής συνθήκης από το πλησιέστερο πηγάδι σε αυτήν, ενώ η παράμετρος BC_{start} υπολογίζεται ομοίως με την παραπάνω προσέγγιση.

	BC_{start}	Trend
BC1	-0,33637955	-2,4E-05
BC2	-0,12919	-2,1E-05

Πίνακας 2.4:Παράμετροι προσέγγισης μέσου όρου

2.2.2 Δοκιμή 0

Πριν ξεκινήσει η σημαντική τροποποίηση της αρμονικής συνάρτησης πρέπει να γίνει η προσαρμογή της τάσης σε αυτήν, στην συγκεκριμένη δοκιμή περιγράφεται αυτό ακριβώς. Αρχικά πρέπει να αναφερθεί ότι όλες οι τροποποιήσεις γίνονται στο Microsoft Excel πάνω στις χρονοσειρές των οριακών συνθηκών. Η προσαρμογή ακολουθεί τον παρακάτω τύπο και για τις δύο προσεγγίσεις:

$$BC_{new} = BC_{initial} + trend * t + BC_{start} - BC_{average}$$

Όπου:

BC_{new} : οι τιμές των νέων οριακών συνθηκών και για τις δύο προσεγγίσεις

$BC_{initial}$: οι τιμές των οριακών συνθηκών όπως παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη μορφή του μοντέλου

$trend$: η τάση που αντιστοιχεί σε κάθε προσέγγιση και οριακή συνθήκη

t : ο χρόνος προσομοίωσης

2.2.3 Δοκιμή 1

Σε αυτή τη φάση η αλλαγή συμβαίνει στο BC1 και για τις δυο προσεγγίσεις, μετατοπίζοντας την κορυφή της συνημιτονειδούς καμπύλης 80 ημέρες πιο πίσω χρονικά από την αρχική θεώρηση. Στην ουσία η αλλαγή τιμών θα γίνει στο πρώτο εξάμηνο της χρονοσειράς με τον μετασχηματισμό που παρουσιάζεται παρακάτω ενώ από την 81^η μέρα και μετά η τιμές θα είναι αυτές που υπολογίστηκαν στην προηγούμενη δοκιμή ξεκινώντας από την ημέρα 1.

Για το BC1 ισχύει:

$$BC1 = \begin{cases} A' \cos\left(2\pi * \frac{t - 80}{365}\right) + trend * (t - 80) + BC_{start}, t \in [1, 80] \\ BC \text{ from module 0 starting from day 1, } t \in [81, 1522] \end{cases}$$

$$A' = BC_{average} - BC_{m0,(1)}$$

Όπου:

$BC_{m0,(1)}$: Η τιμή της οριακής συνθήκης την ημέρα 1 της προσομοίωσης από την δοκιμή 0.

2.2.4 Δοκιμή 2

Σε αυτή την δοκιμή το BC1 θα υποστεί την ίδια μετατροπή με την προηγούμενη δοκιμή με μετατόπιση στο παρελθόν 130 ημέρες από την έναρξη της προσομοίωσης. Ενώ στο BC2 εισάγεται ένα διογκωτικός παράγοντας προκειμένου να αυξηθεί το πλάτος της εξίσωσης.

Για το BC1 ισχύει:

$$BC1 = \begin{cases} A' \cos\left(2\pi * \frac{t - 130}{365}\right) + trend * (t - 130) + BC_{start}, t \in [1, 130] \\ BC \text{ from module 0 starting from day 1, } t \in [130, 1522] \end{cases}$$

$$A' = BC_{average} - BC_{(1)}$$

Για το BC2 ισχύει:

$$BC2 = (f + 1) * BC2_{m0} - f * BC_{average,m0}$$

Όπου:

f : ο διογκωτικός παράγοντας με τιμή 1 σε αυτή την δοκιμή

$BC2_{m0}$: οι τιμές της οριακής συνθήκης από την δοκιμή 0

$BC_{average,m0}$: η μέση τιμή της οριακής συνθήκης από την δοκιμή 0

2.2.5 Δοκιμή 3

Σε αυτή τη δοκιμή τα BC1 και BC2 παραμένουν ως έχουν, η δοκιμή 3 ασχολείται με το BC3. Η οριακή συνθήκη BC3 λόγω των μικρών τιμών της θα ακολουθήσει μονό την προσέγγιση του πλησιέστερου πηγαδιού και δεν θα ακολουθήσει κάποια αρμονική συνάρτηση αλλά θα πάρει τη μορφή μιας γραμμικής σχέσης, οι παράμετροι της οποία υπολογίζονται με την ίδια μέθοδο που αναλύθηκε παραπάνω.

$$BC3 = 2,17 * 10^{-5} * t + 0,069804$$

2.2.6 Δοκιμή 4

Σε αυτή την δοκιμή τα BC1 και BC3 παραμένουν όμοια με την προηγούμενη δοκιμή ενώ το BC2 μετατοπίζεται χρονικά στο παρελθόν 90 ημέρες.

Για το BC2 ισχύει:

$$BC2 = \begin{cases} A' \cos\left(2\pi * \frac{t-90}{365}\right) + trend * (t-90) + BC_{start}, t \in [1,90] \\ BC \text{ from module 2 starting from day 1, } t \in [90,1522] \end{cases}$$
$$A' = BC_{start} - BC2_{m2(1)}$$

2.3 Μεθοδολογία Ανεξάρτητων Δοκιμών Συσχέτισης Βροχόπτωσης-Υδραυλικού Ύψους

Οι ανεξάρτητες δοκιμές είχαν να κάνουν με τη συσχέτιση του υδραυλικού ύψους των πηγαδιών με διαφορετικά εύρη τιμών αθροιστικής βροχόπτωσης. Συγκεκριμένα για τις ημερομηνίες που υπάρχουν μετρήσεις βροχόπτωσης και υδραυλικού ύψους, υπολογίζονται πολλαπλά χρονικά «παράθυρα» διάρκειας 40 ημερών αθροιστικής βροχόπτωσης οι οποίες συσχετίζονται με το υδραυλικό ύψος κάθε πηγαδιού. Αυτή η διαδικασία παράγει διαγράμματα όπου στον άξονα x αναγράφονται οι ημέρες αθροιστικής βροχόπτωσης και στο άξονα y ο συντελεστής συσχέτισης (R). Ο αναλυτικός αλγόριθμος παρατίθεται στα παραρτήματα.

2.4 Κριτήρια Βελτίωσης Μοντέλου

Η βελτίωση του μοντέλου στη παρούσα εργασία θεωρείται ως η μείωση του σφάλματος των προσομοιωμένων τιμών από τις παρατηρούμενες, το σφάλμα προσεγγίζεται με τρεις διαφορετικούς τρόπους. Συγκεκριμένα γίνετε υπολογισμός του απλού σφάλματος, του απόλυτου σφάλματος και του τετραγωνικού σφάλματος.

$$error_{i,j} = simulated\ value_{i,j} - observed\ value_{i,j}$$

Έπειτα υπολογίζεται το απόλυτο σφάλμα με όμοιο τρόπο:

$$absolute\ error_{i,j} = |simulated\ value_{i,j} - observed\ value_{i,j}|$$

Και τέλος το τετραγωνικό σφάλμα αντίστοιχα:

$$squared\ error_{i,j} = (simulated\ value_{i,j} - observed\ value_{i,j})^2$$

Όπου:

i : Ο αριθμός του πηγαδιού

j : Η αρίθμηση των παρατηρημένων τιμών

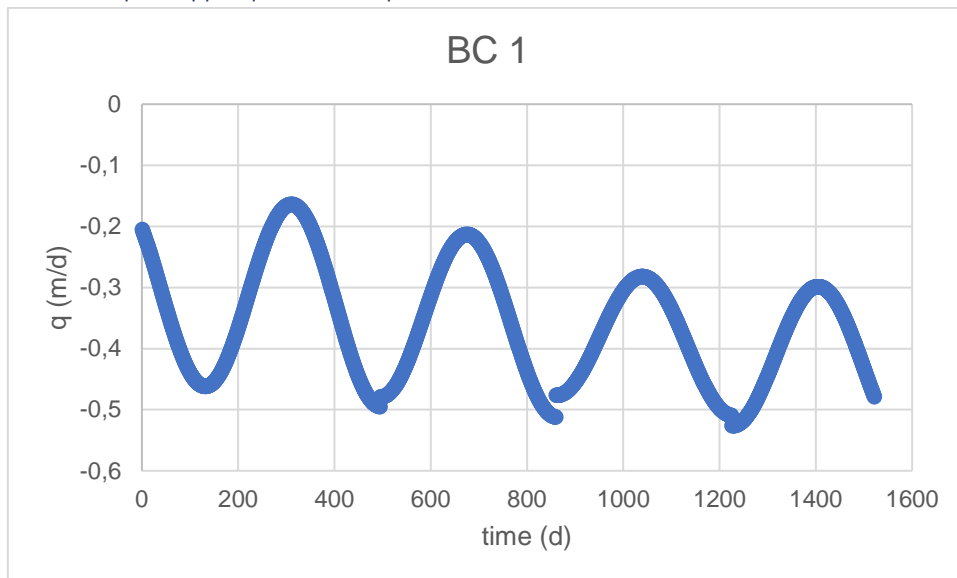
Προκειμένου όμως να υπάρχει ένας πιο ξεκάθαρος δείκτης βελτίωσης από το σφάλμα κάθε τιμής υπολογίζονται και τα μέσα σφάλματα κάθε προσέγγισης. Έτσι προκύπτει το μέσο απλό σφάλμα ή Bias, το μέσο απόλυτο σφάλμα και η ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος ή rmse. Τα σφάλματα αυτά συγκρίνονται με τις αντίστοιχες θεωρήσεις των σφαλμάτων των αποτελεσμάτων της αρχικής κατάστασης του μοντέλου πριν την δοκιμή 0 (ο κώδικας υπολογισμών των σφαλμάτων παρουσιάζεται στα παραρτήματα). Η βελτίωση ουσιαστικά είναι μια ποσοστιαία γενική απόκλιση της μορφής:

$$improvement = \frac{|mean\ initial\ error\ type| - |mean\ simulated\ error|}{|mean\ initial\ error\ type|}$$

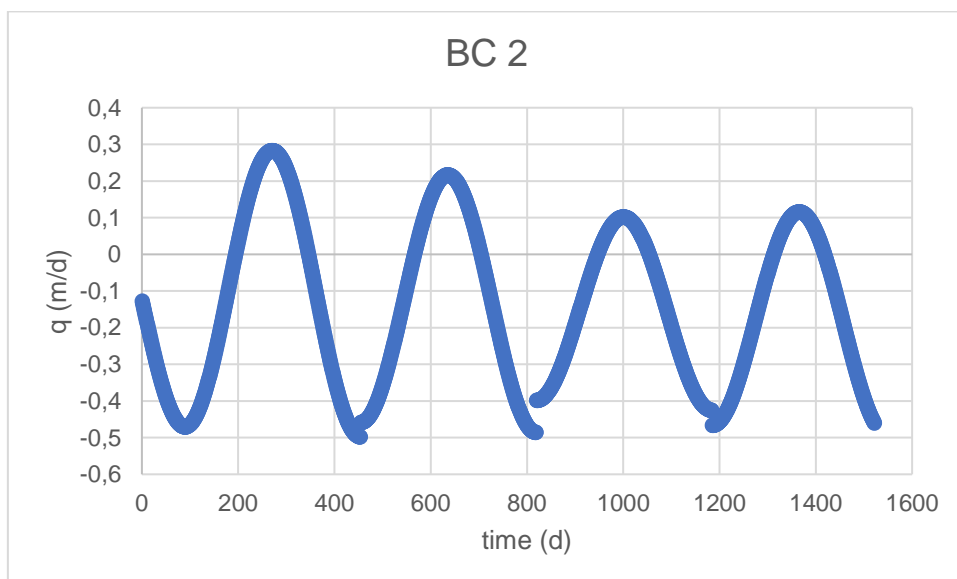
3 Αποτελέσματα

3.1 Προσομοιωμένες Οριακές Συνθήκες

3.1.1 Προσέγγιση Μέσου Όρου

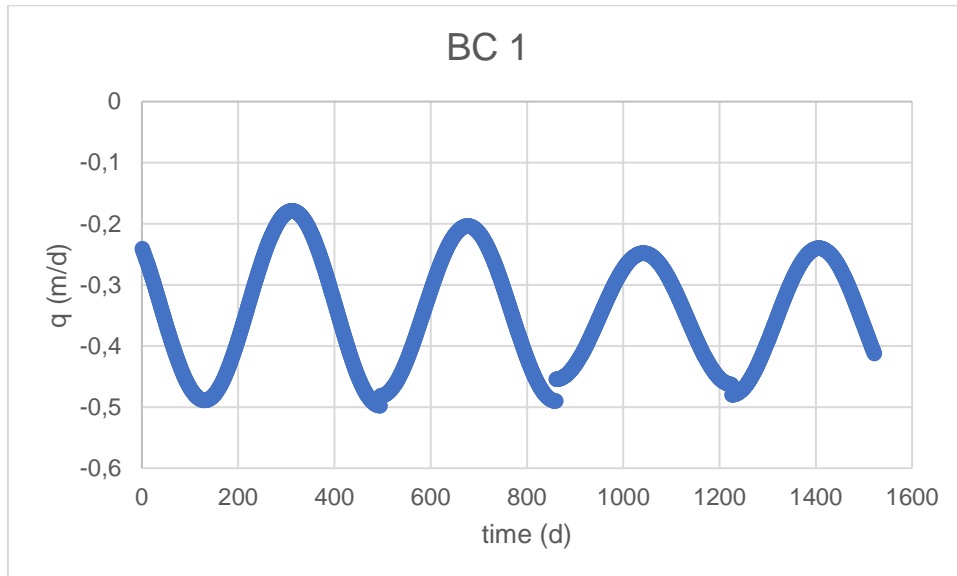


Εικόνα 3.1:Απεικόνιση Οριακής Συνθήκης BC 1 για την Προσέγγιση Μέσου Όρου

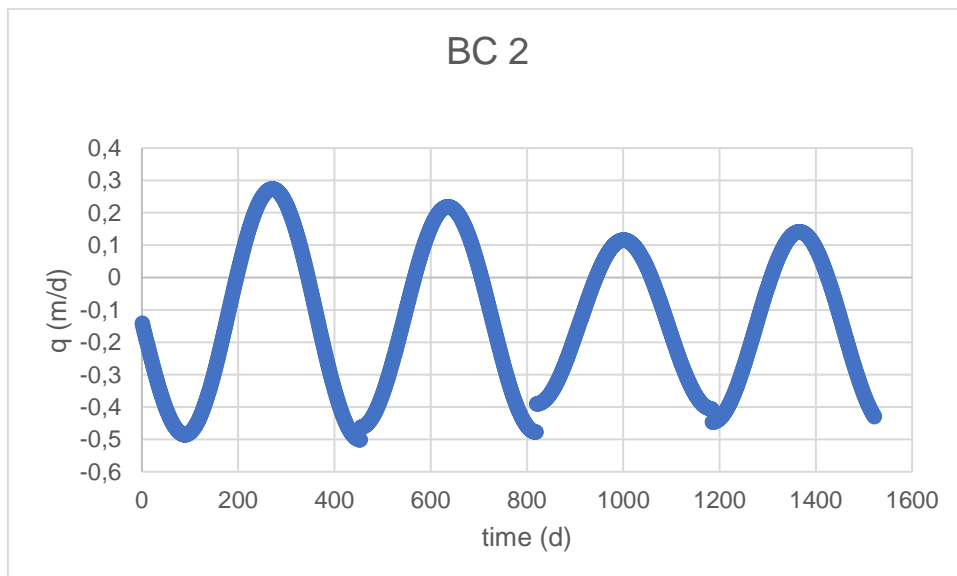


Εικόνα 3.2:Απεικόνιση Οριακής Συνθήκης BC 2 για την Προσέγγιση Μέσου Όρου

3.1.2 Προσέγγιση Πλησιέστερου Πηγαδιού

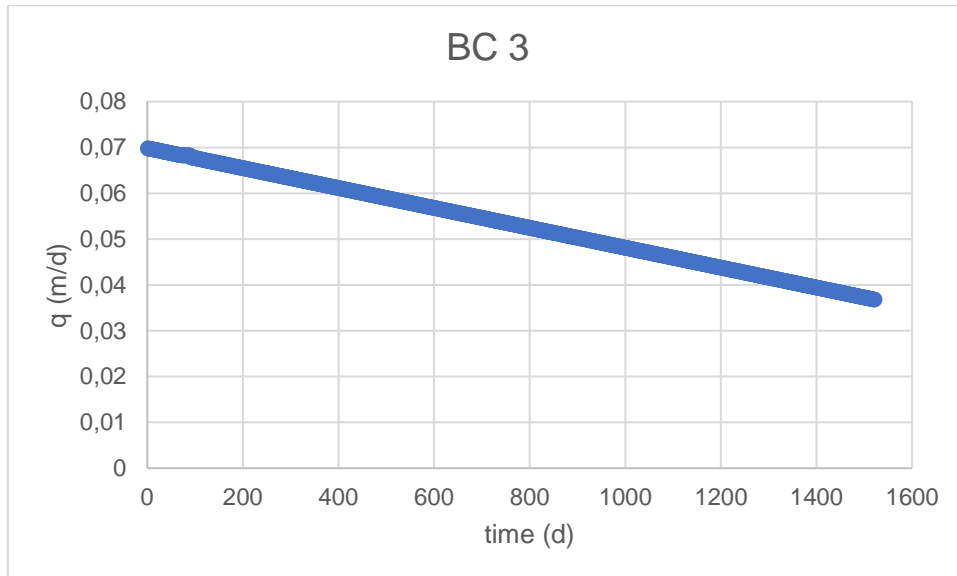


Εικόνα 3.3:Απεικόνιση Οριακής Συνθήκης BC 1 για την Προσέγγιση Πλησιέστερου Πηγαδιού



Εικόνα 3.4:Απεικόνιση Οριακής Συνθήκης BC 1 για την Προσέγγιση Πλησιέστερου Πηγαδιού

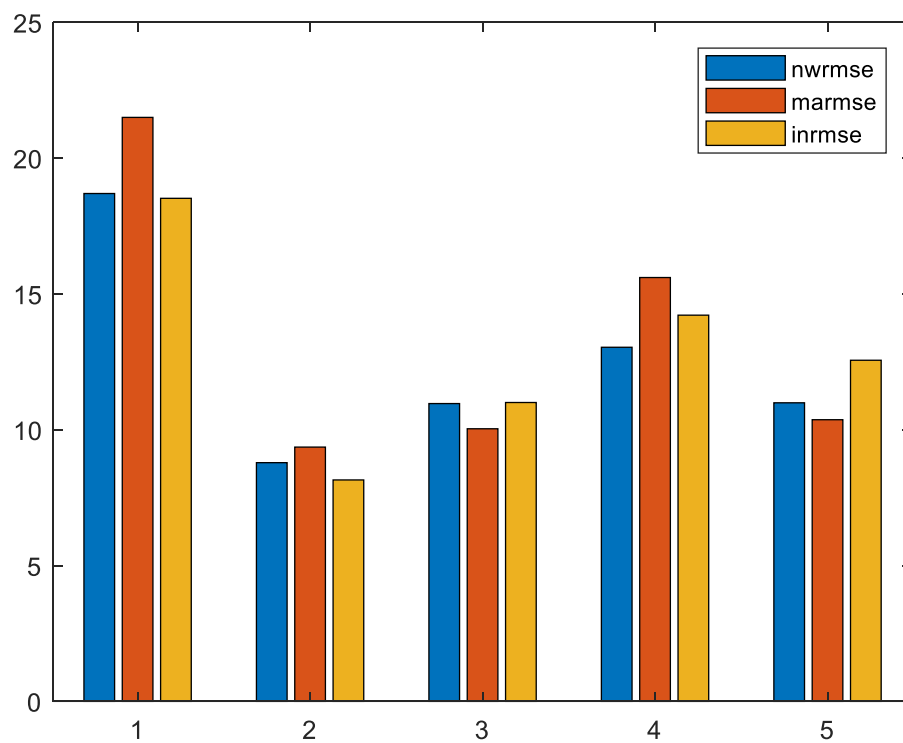
3.1.3 Τρίτη Οριακή Συνθήκη



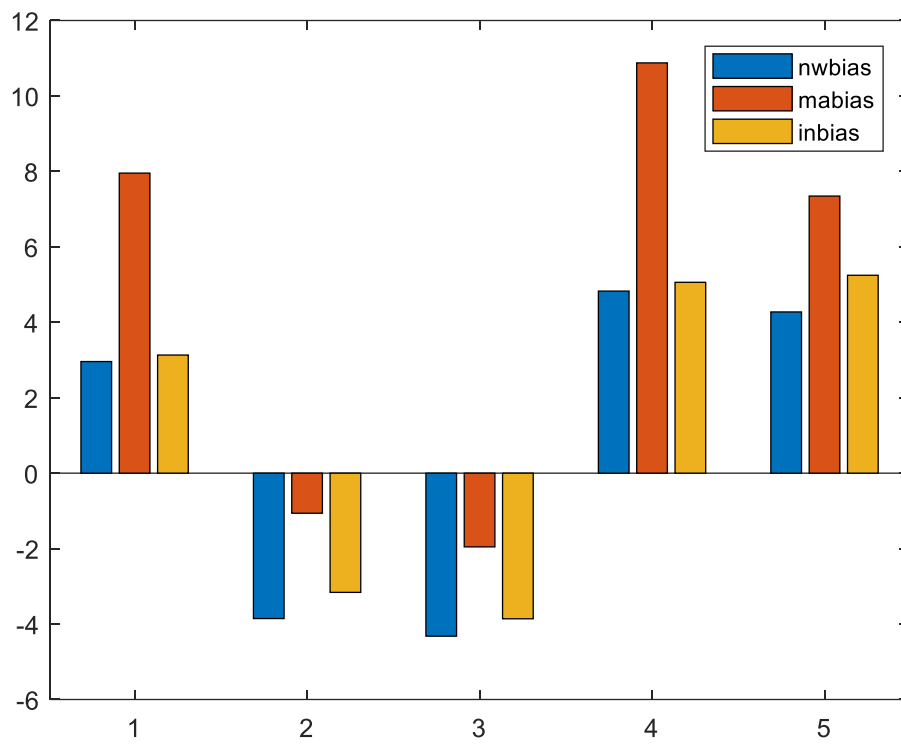
Εικόνα 3.5:Απεικόνιση Οριακής Συνθήκης BC3 και για τις δύο Προσεγγίσεις

3.2 Δοκιμές

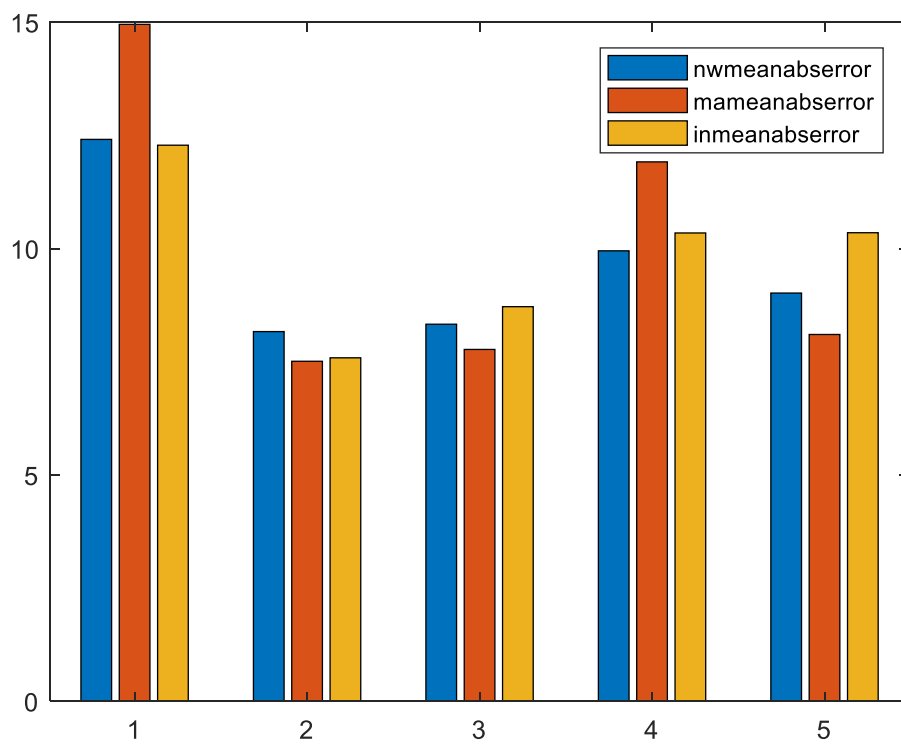
3.2.1 Δοκιμή 0



Εικόνα 3.6:RMSE για Δοκιμή 0



Εικόνα 3.7: Bias για Δοκιμή 0



Εικόνα 3.8: Mean Absolute Error για Δοκιμή 0

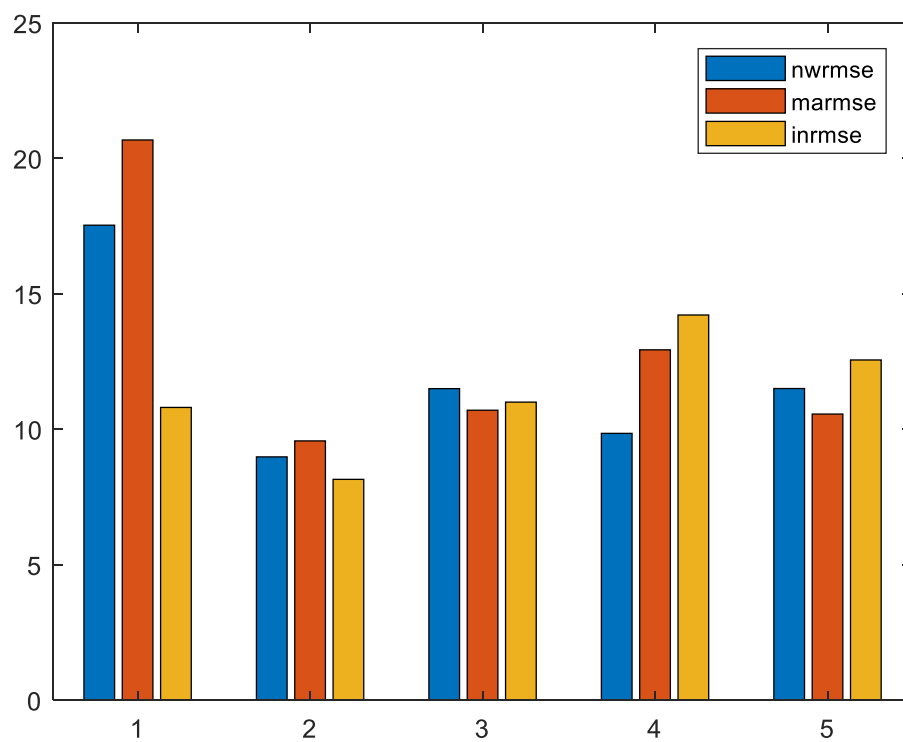
	Bias	Mean Absolute Error	RMSE
Initial	1,28	9,85	12,89
Mean Average	4,63	10,05	13,38
Nearest Well	0,78	9,57	12,50

Πίνακας 3.1: Σφάλματα για Δοκιμή 0

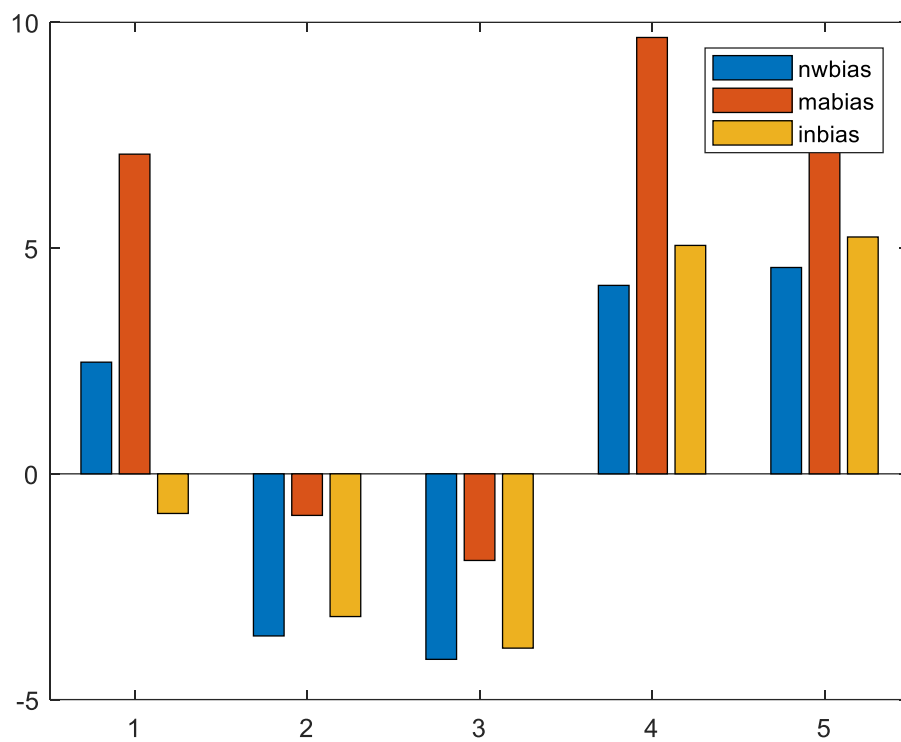
Improvement	Bias	Mean Absolute Error	RMSE
Mean Average	-261,00	-1,97	-3,75
Nearest Well	39,47	2,85	3,06

Πίνακας 3.2: Βελτίωση μοντέλου για Δοκιμή 0

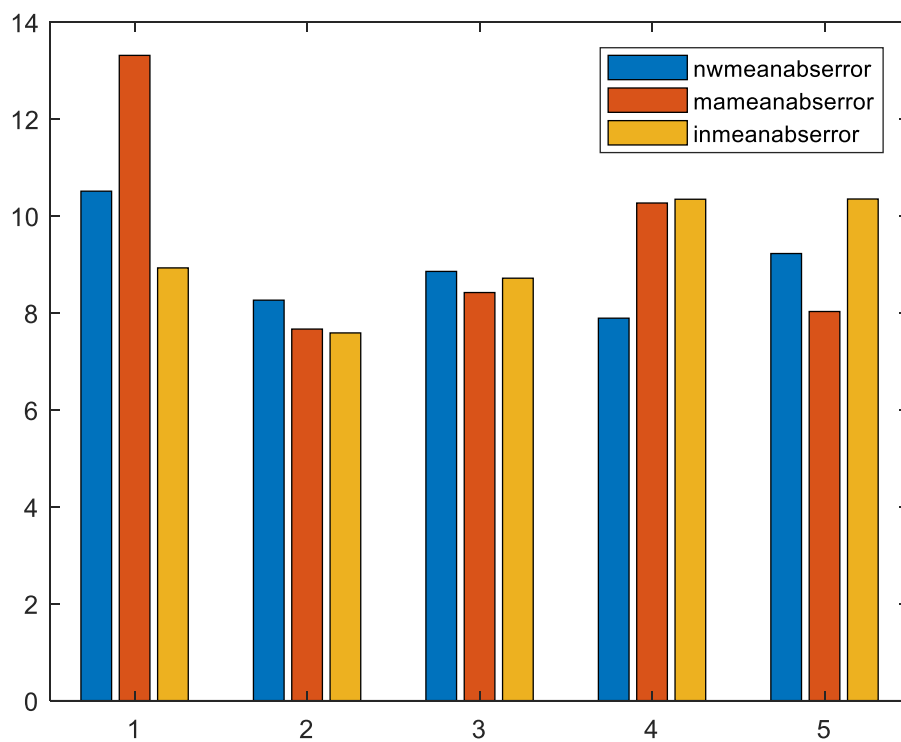
3.2.2 Δοκιμή 1



Εικόνα 3.9: RMSE για Δοκιμή 1



Εικόνα 3.10: Bias για Δοκιμή 1



Εικόνα 3.11: Mean Absolute Error για Δοκιμή 1

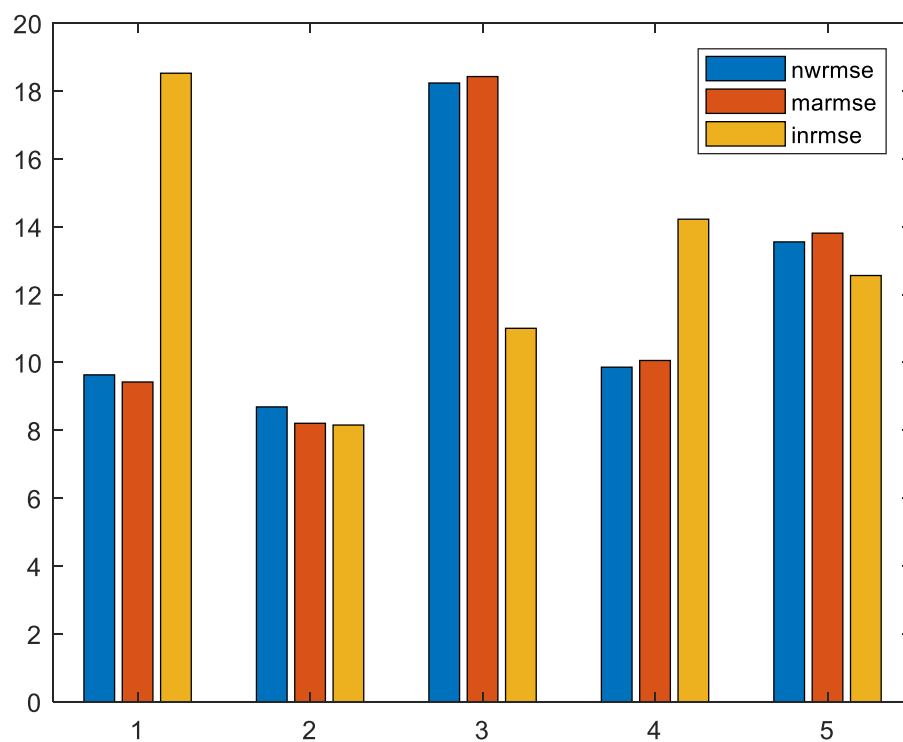
	Bias	Mean Absolute Error	RMSE
Initial	1,28	9,85	12,89
Mean Average	4,23	9,54	12,89
Nearest Well	0,70	8,95	11,87

Πίνακας 3.3: Σφάλματα για Δοκιμή 1

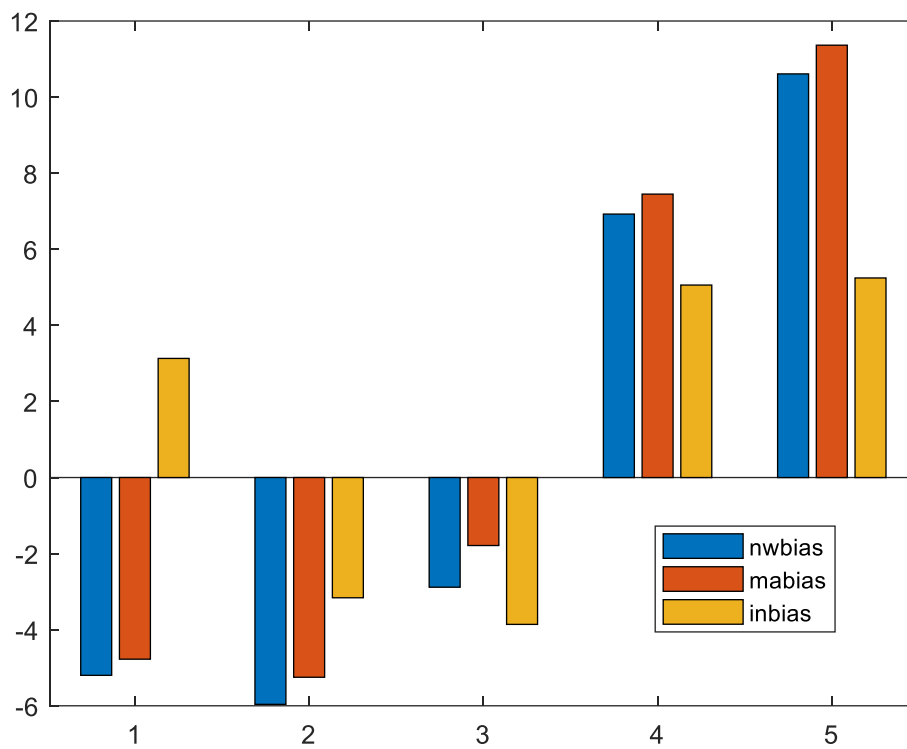
Improvement	Bias	Mean Absolute Error	RMSE
Mean Average	-779,95	-3,85	-13,59
Nearest Well	-46,20	2,57	-4,63

Πίνακας 3.4: Βελτίωση μοντέλου για Δοκιμή 1

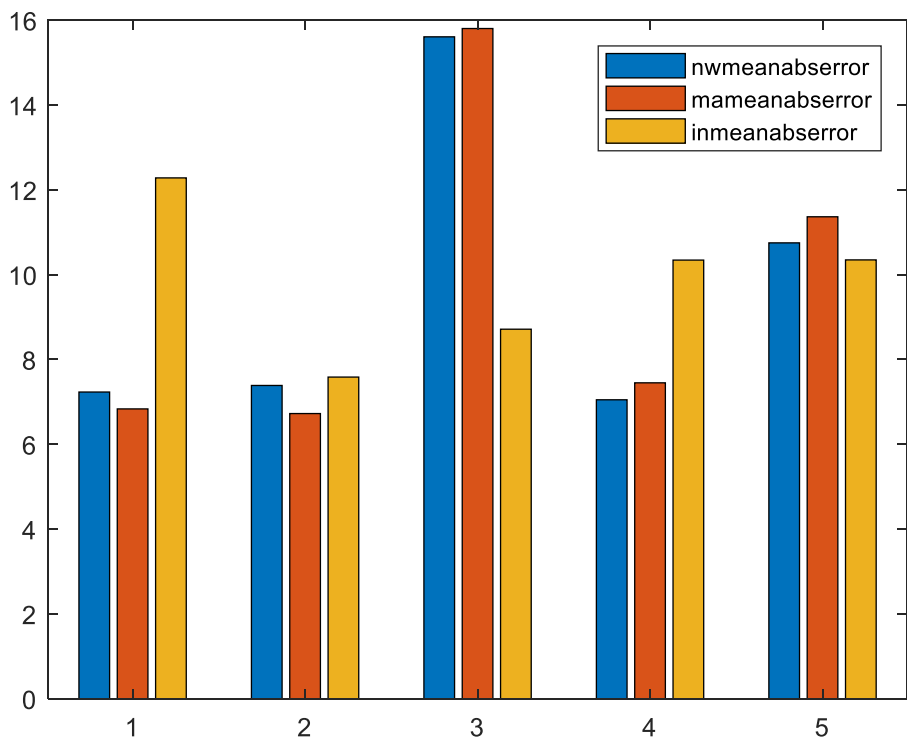
3.2.3 Δοκιμή 2



Εικόνα 3.12: RMSE για Δοκιμή 2



Εικόνα 3.13: Bias για Δοκιμή 2



Εικόνα 3.14: Mean Absolute Error για Δοκιμή 2

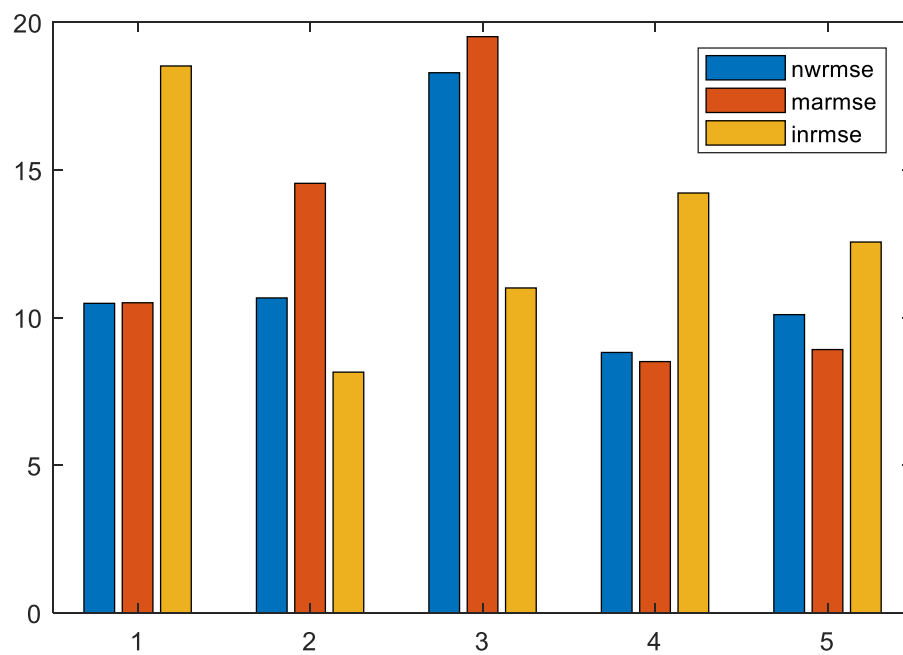
	Bias	Mean Absolute Error	RMSE
Initial	1,28	9,85	12,89
Mean Average	1,40	9,64	11,98
Nearest Well	0,70	9,61	12,00

Πίνακας 3.5: Σφάλματα για Δοκιμή 2

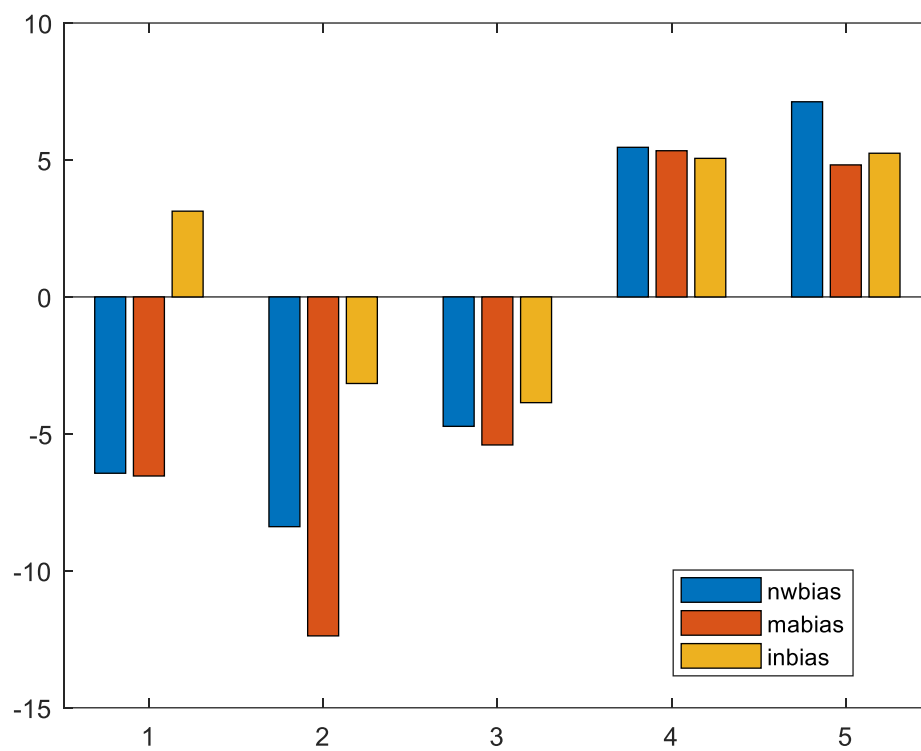
Improvement	Bias	Mean Absolute Error	RMSE
Mean Average	-9,15	2,22	7,05
Nearest Well	45,31	2,53	9,98

Πίνακας 3.6: Βελτίωση μοντέλου για Δοκιμή 2

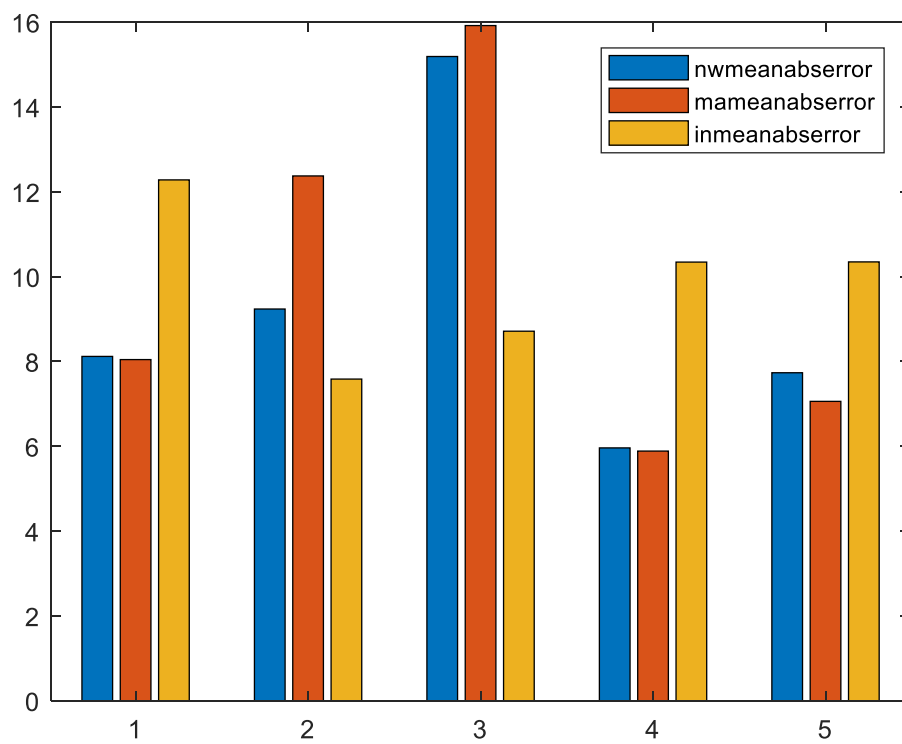
3.2.4 Δοκιμή 3



Εικόνα 3.15: RMSE για Δοκιμή 3:



Εικόνα 3.16: Bias για Δοκιμή 3



Εικόνα 3.17: Mean Absolute Error για Δοκιμή 3

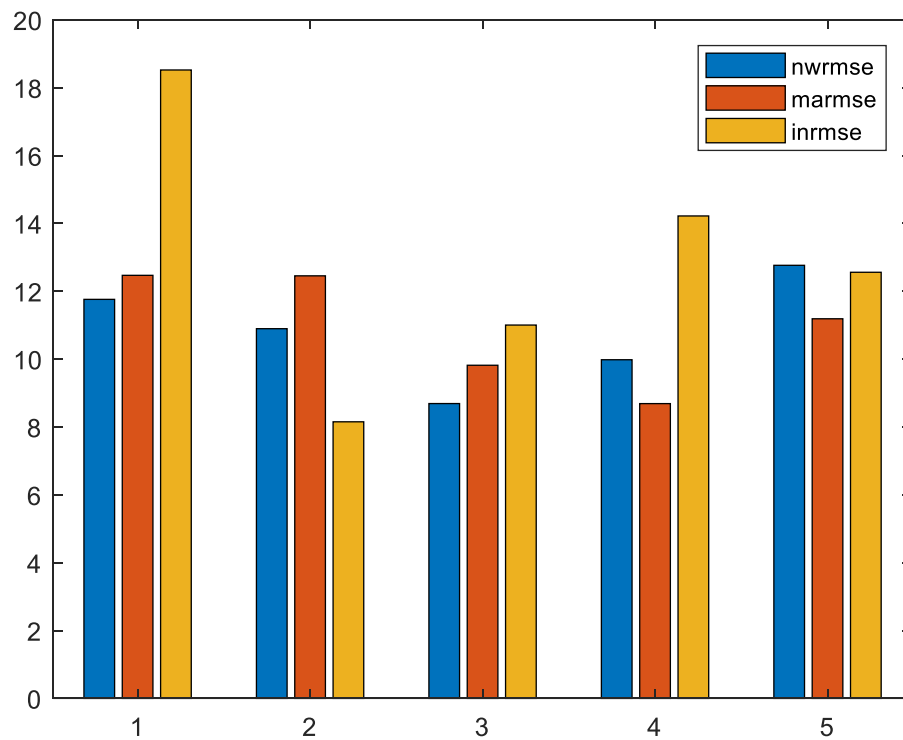
	Bias	Mean Absolute Error	RMSE
Initial	1,28	9,85	12,89
Mean Average	-2,83	9,86	12,40
Nearest Well	-1,39	9,25	11,67

Πίνακας 3.7: Σφάλματα για Δοκιμή 3

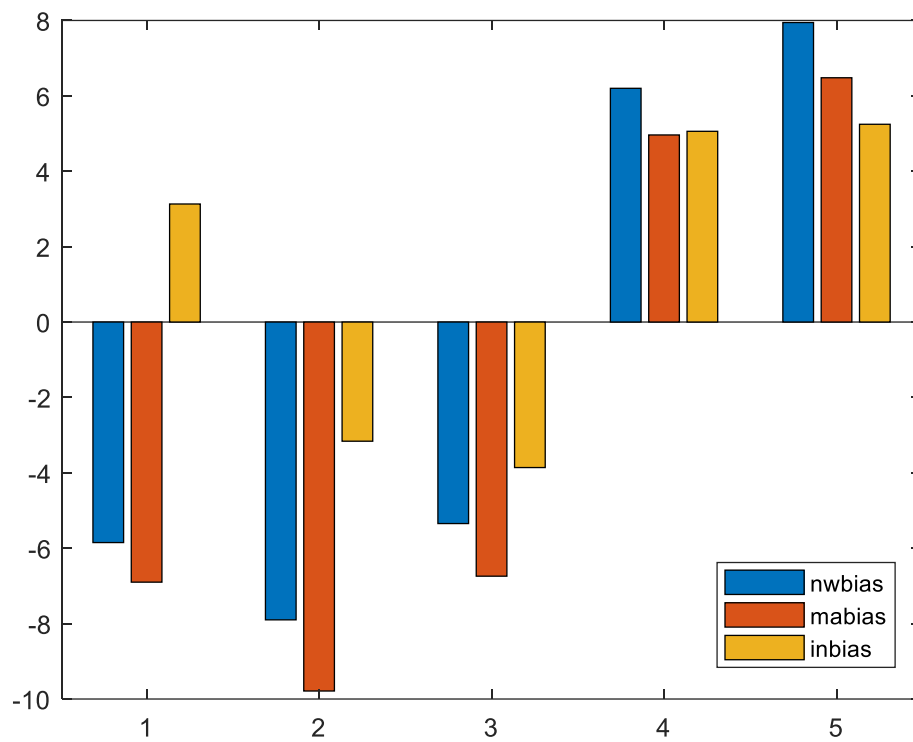
Improvement	Bias	Mean Absolute Error	RMSE
Mean Average	-120,71	-0,03	3,82
Nearest Well	-8,53	6,14	9,46

Πίνακας 3.8: Βελτίωση μοντέλου για Δοκιμή 3

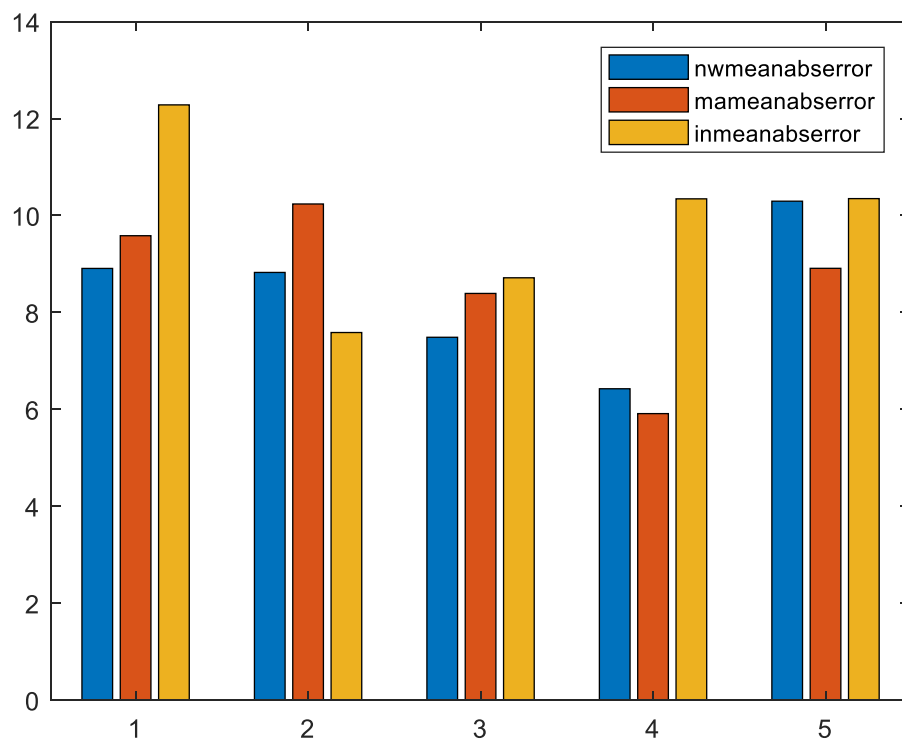
3.2.5 Δοκιμή 4



Εικόνα 3.18: RMSE για Δοκιμή 4



Εικόνα 3.19: Bias για Δοκιμή 4



Εικόνα 3.20: Mean Absolute Error για Δοκιμή 4

	Bias	Mean Absolute Error	RMSE
Initial	1,28	9,85	12,89
Mean Average	-2,39	8,61	10,92
Nearest Well	-0,99	8,39	10,82

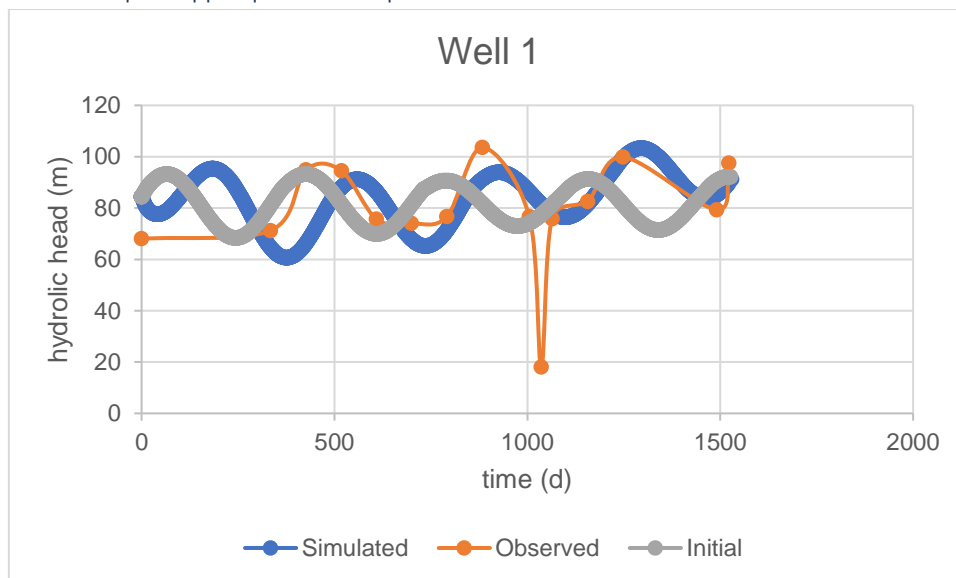
Πίνακας 3.9: Σφάλματα για Δοκιμή 4

Improvement	Bias	Mean Absolute Error	RMSE
Mean Average	-86,88	12,66	15,26
Nearest Well	22,83	14,88	16,08

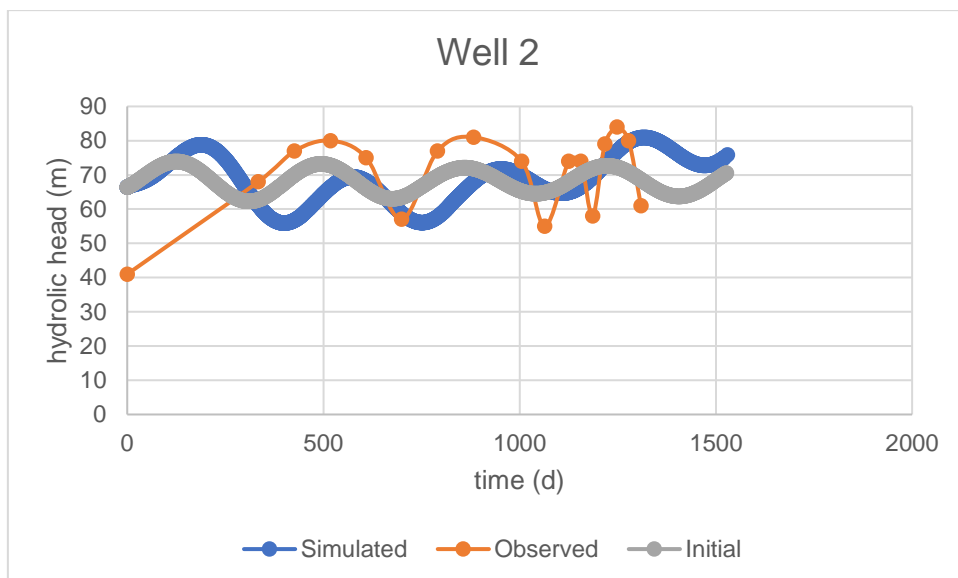
Πίνακας 3.10: Βελτίωση μοντέλου για Δοκιμή 4

3.3 Προσομοιωμένα Υδραυλικά Ύψη

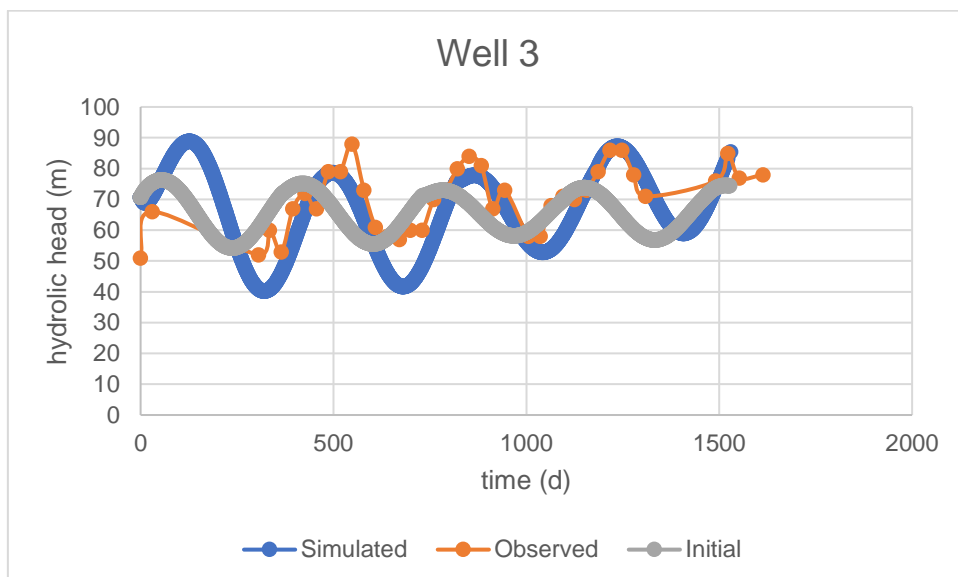
3.3.1 Προσέγγιση Μέσου Όρου



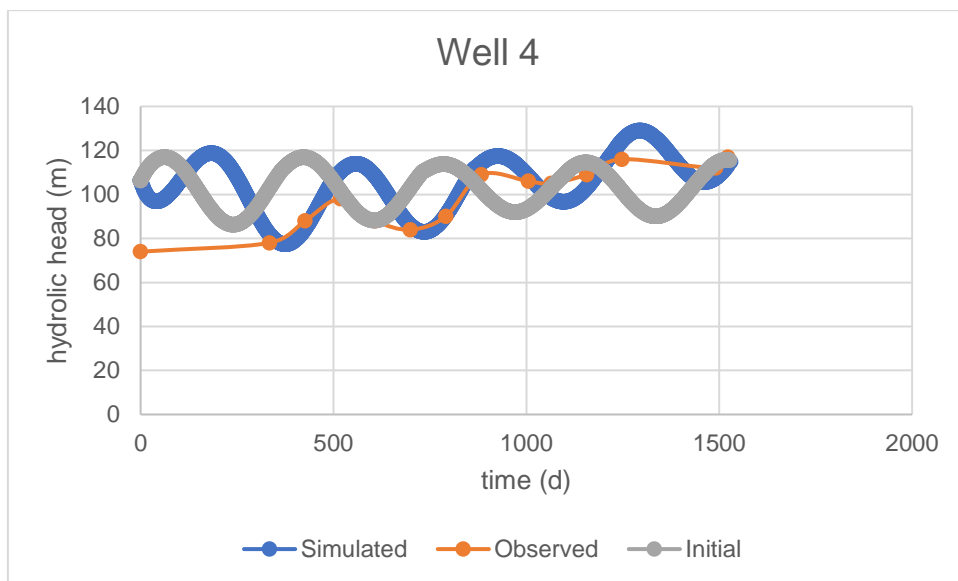
Εικόνα 3.21: Προσομοίωση Υδραυλικού Ύψους για το Πηγάδι 1 για την Προσέγγιση Μέσου Όρου



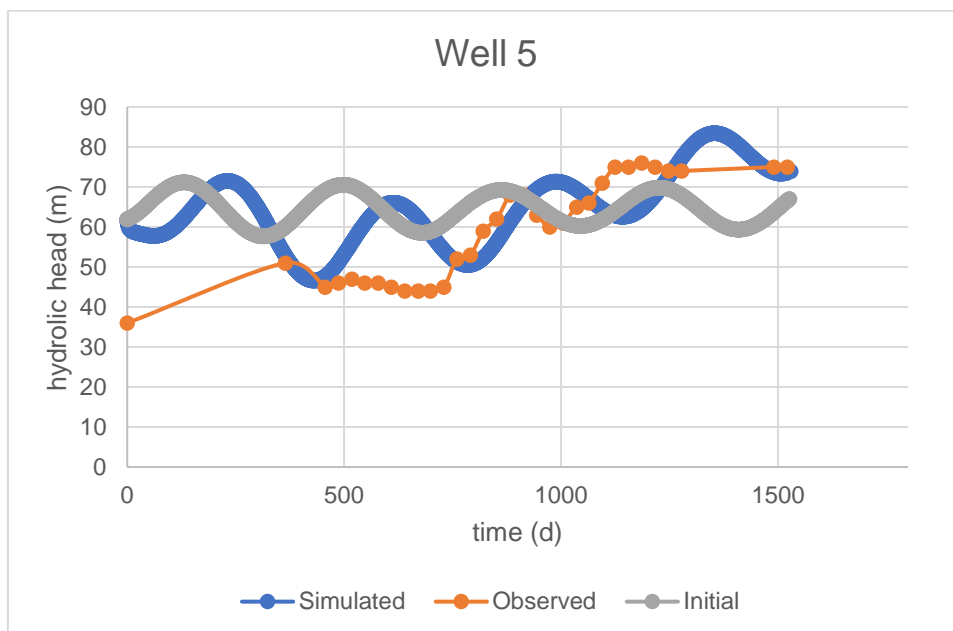
Εικόνα 3.22: Προσομοίωση Υδραυλικού Ύψους για το Πηγάδι 2 για την Προσέγγιση Μέσου Όρου



Εικόνα 3.23: Προσομοίωση Υδραυλικού Ύψους για το Πηγάδι 3 για την Προσέγγιση Μέσου Όρου

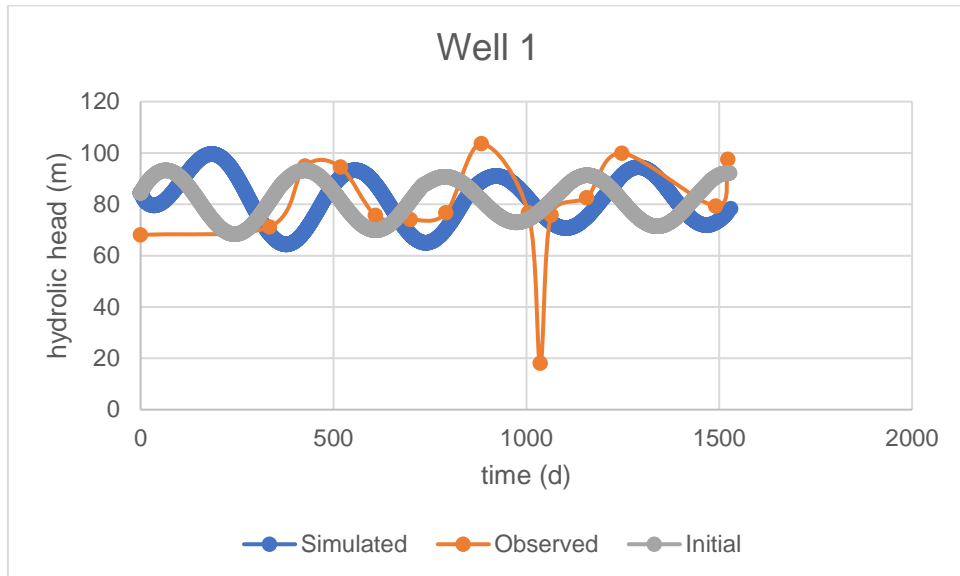


Εικόνα 3.24: Προσομοίωση Υδραυλικού Ύψους για το Πηγάδι 4 για την Προσέγγιση Μέσου Όρου

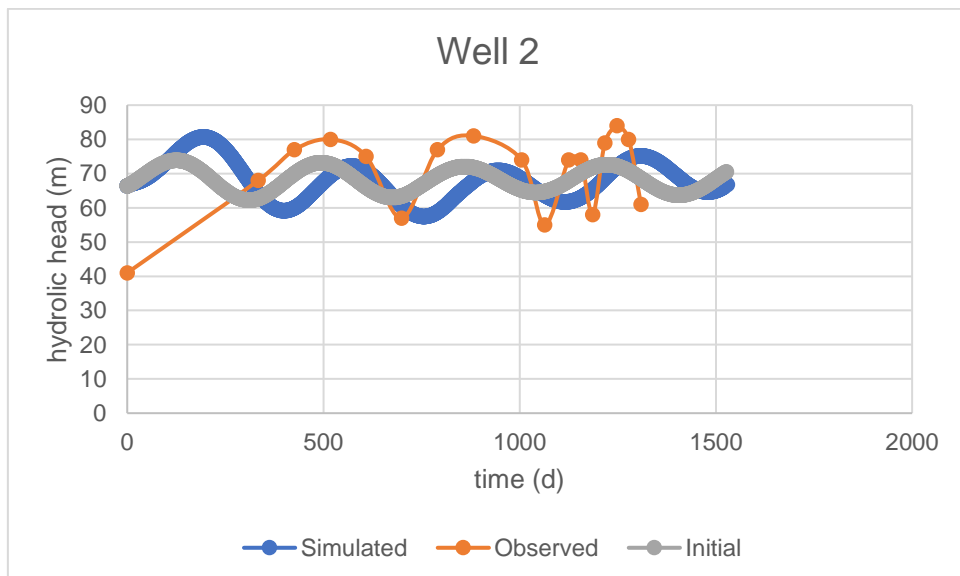


Εικόνα 3.25: Προσομοίωση Υδραυλικού Ύψους για το Πηγάδι 5 για την Προσέγγιση Μέσου Όρου

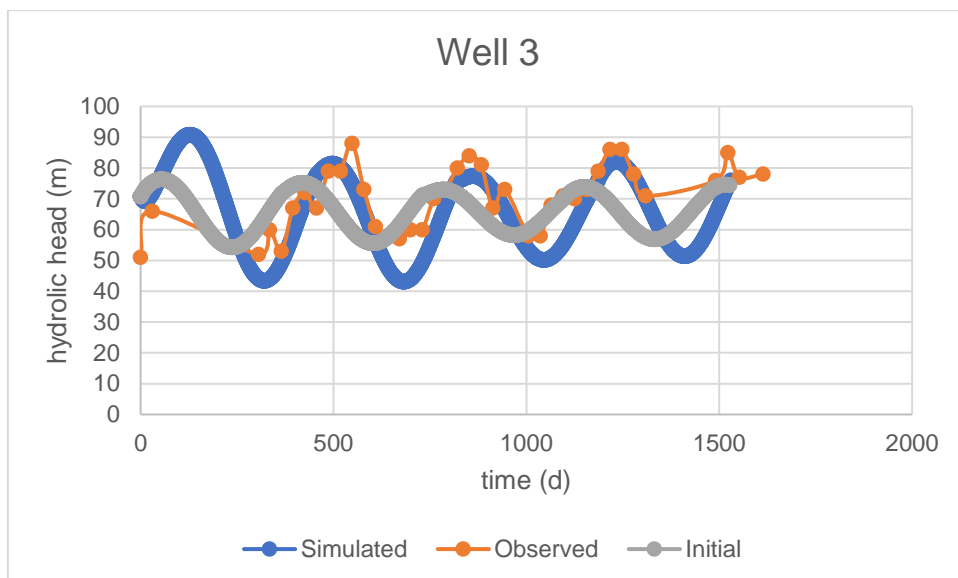
3.3.2 Προσέγγιση Πλησιέστερου Πηγαδιού



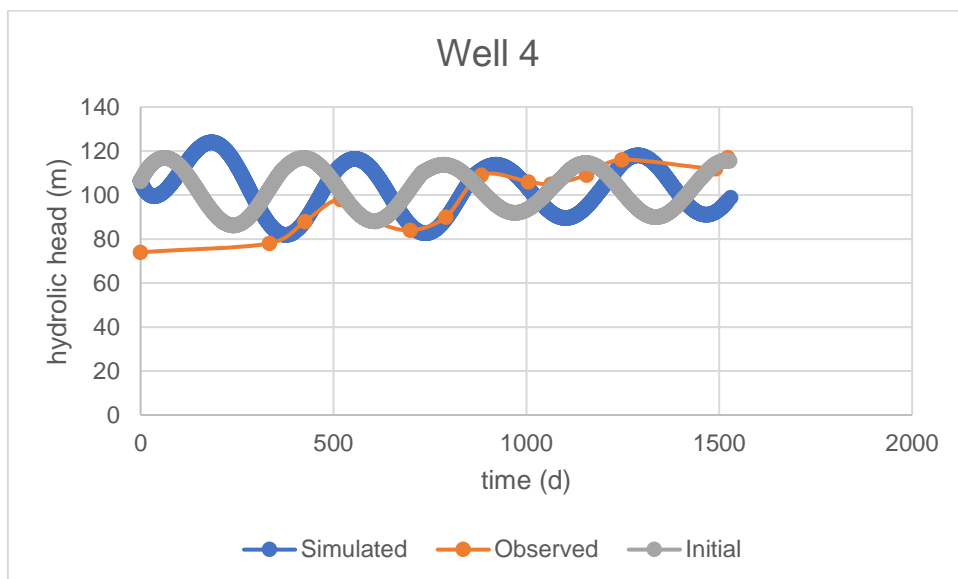
Εικόνα 3.26: Προσομοίωση Υδραυλικού Ύψους για το Πηγάδι 1 για την Προσέγγιση Πλησιέστερου Πηγαδιού



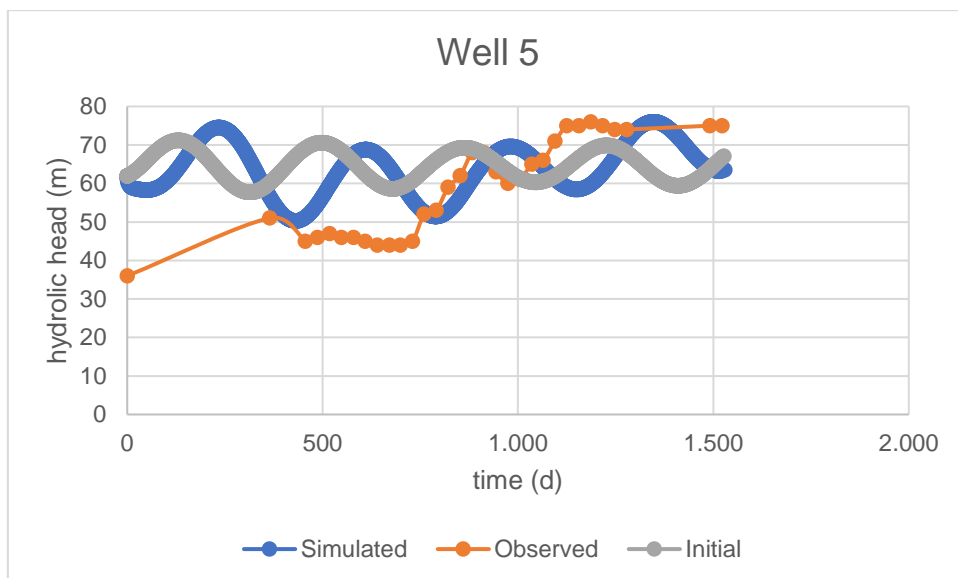
Εικόνα 3.27: Προσομοίωση Υδραυλικού Ύψους για το Πηγάδι 2 για την Προσέγγιση Πλησιέστερου Πηγαδιού



Εικόνα 3.28: Προσομοίωση Υδραυλικού Ύψους για το Πηγάδι 3 για την Προσέγγιση Πλησιέστερου Πηγαδιού



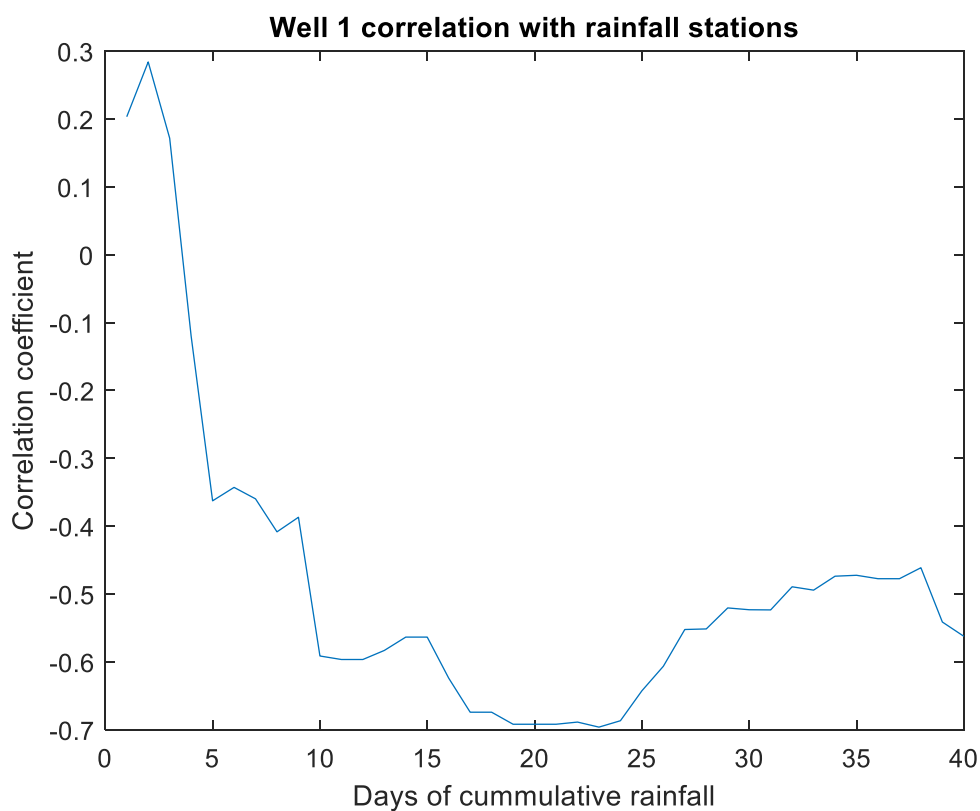
Εικόνα 3.29: Προσομοίωση Υδραυλικού Ύψους για το Πηγάδι 4 για την Προσέγγιση Πλησιέστερου Πηγαδιού



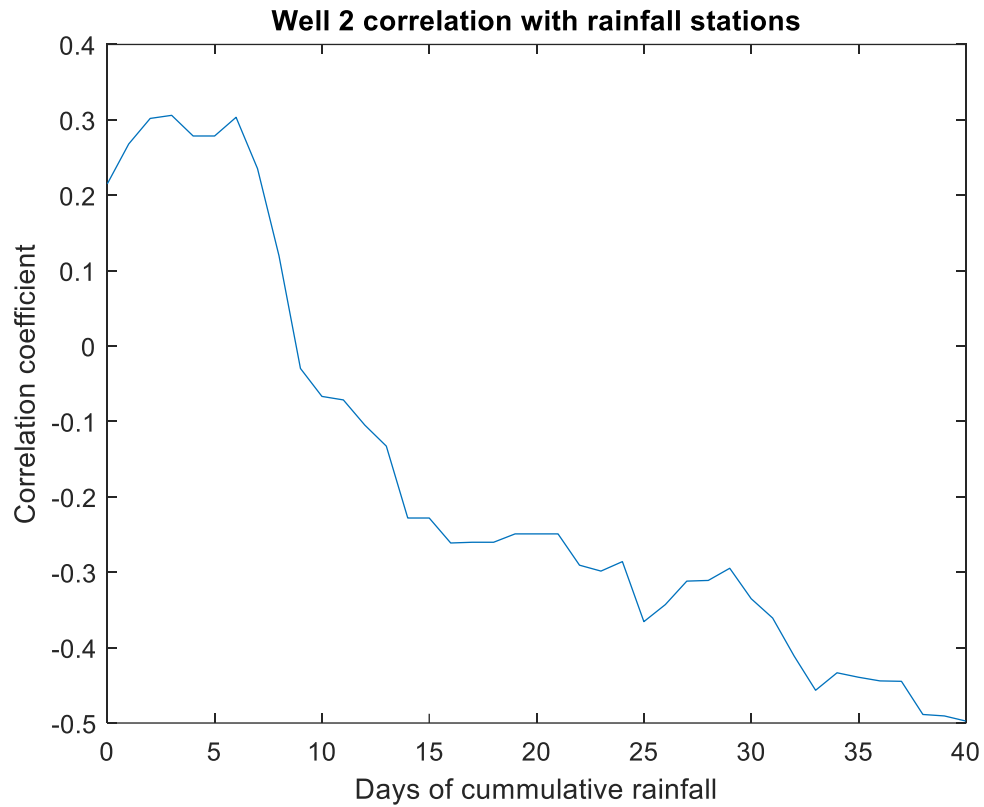
Εικόνα 3.30: Προσομοίωση Υδραυλικού Ύψους για το Πηγάδι 5 για την Προσέγγιση Πλησιέστερου Πηγαδιού

3.4 Ανεξάρτητες Δοκιμές Βροχόπτωσης Υδραυλικού Ύψους

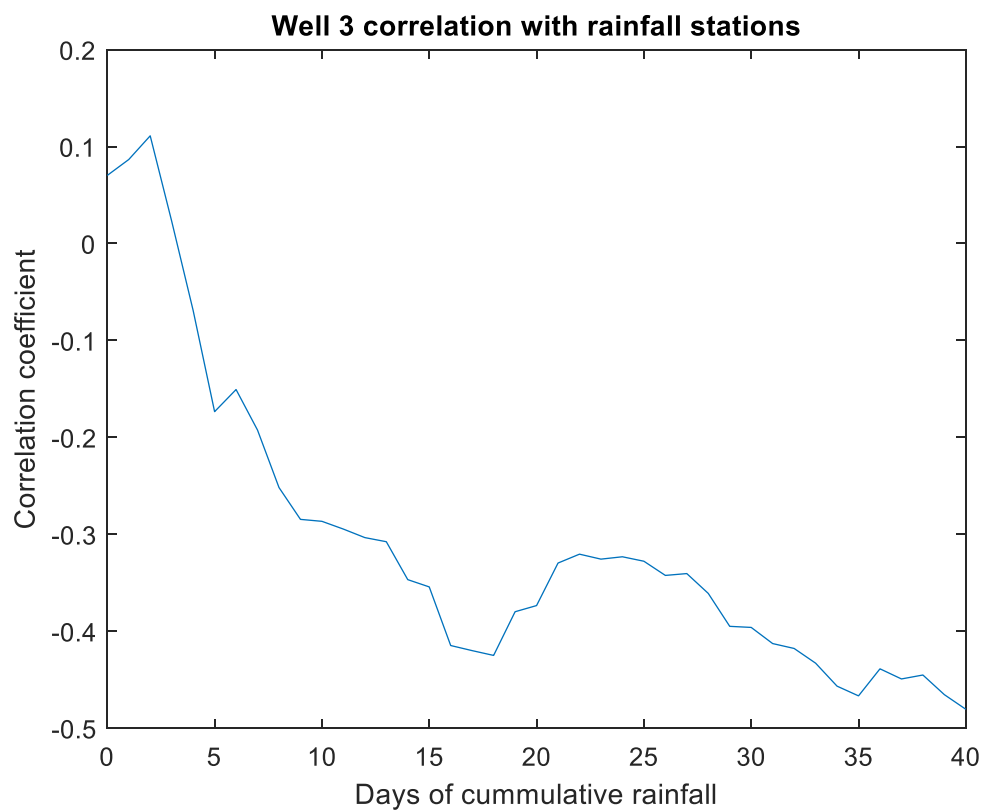
3.4.1 Μετεωρολογικός Σταθμός Γεργερή



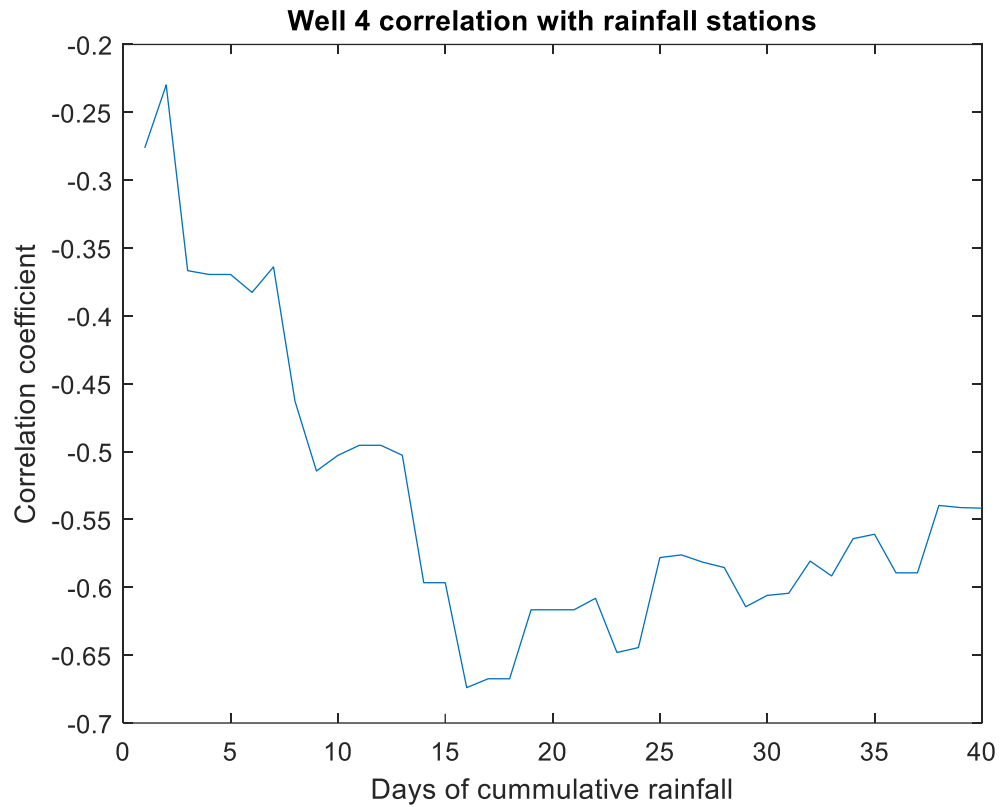
Εικόνα 3.31: Συσχέτιση Βροχόπτωσης για Σταθμό Γεργερή με Πηγάδι 1



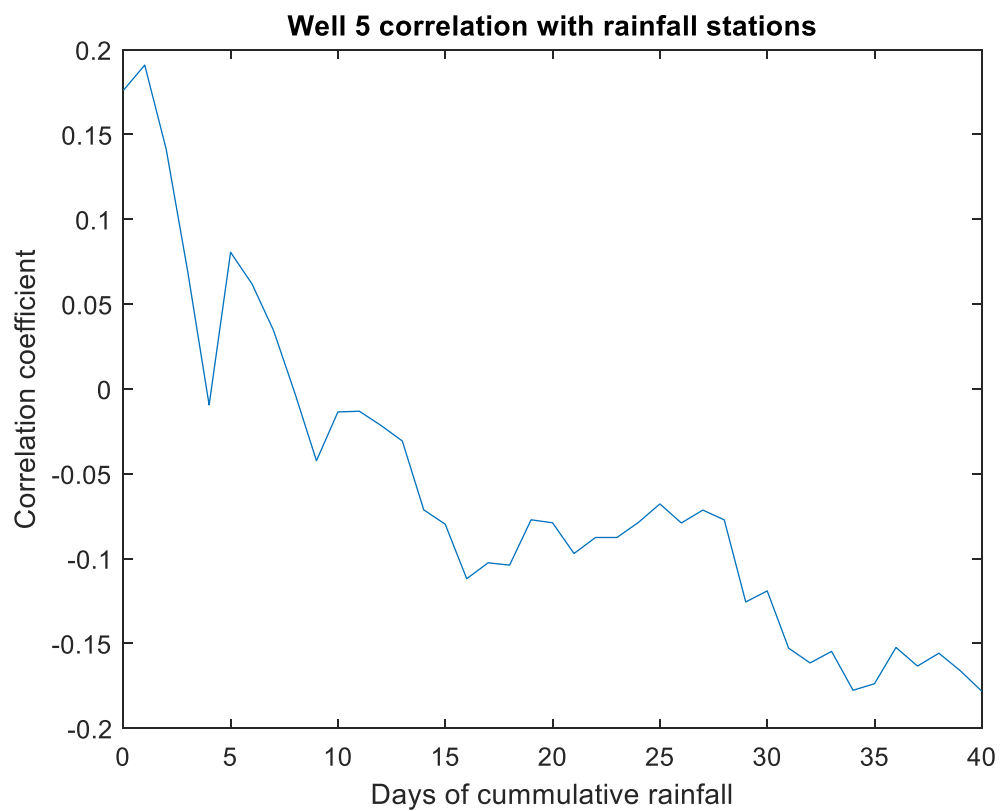
Εικόνα 3.32:Συσχέτιση Βροχόπτωσης για Σταθμό Γέργερη με Πηγάδι 2



Εικόνα 3.33:Συσχέτιση Βροχόπτωσης για Σταθμό Γέργερη με Πηγάδι 3

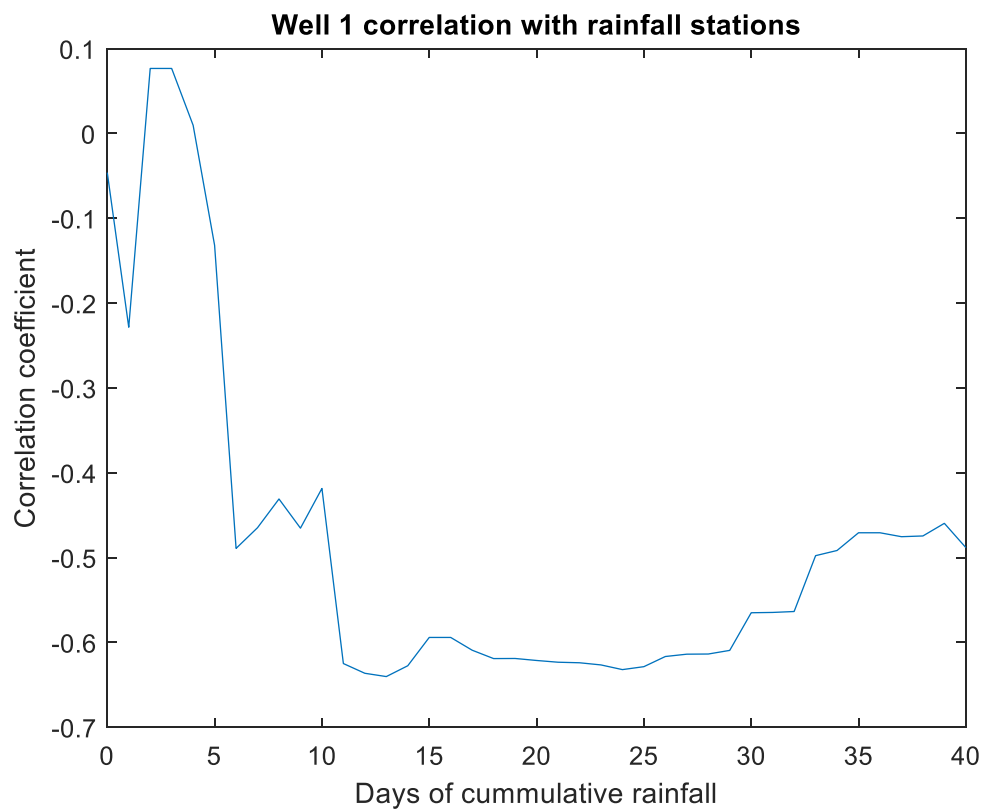


Εικόνα 3.34:Συσχέτιση Βροχόπτωσης για Σταθμό Γέργερη με Πηγάδι 4

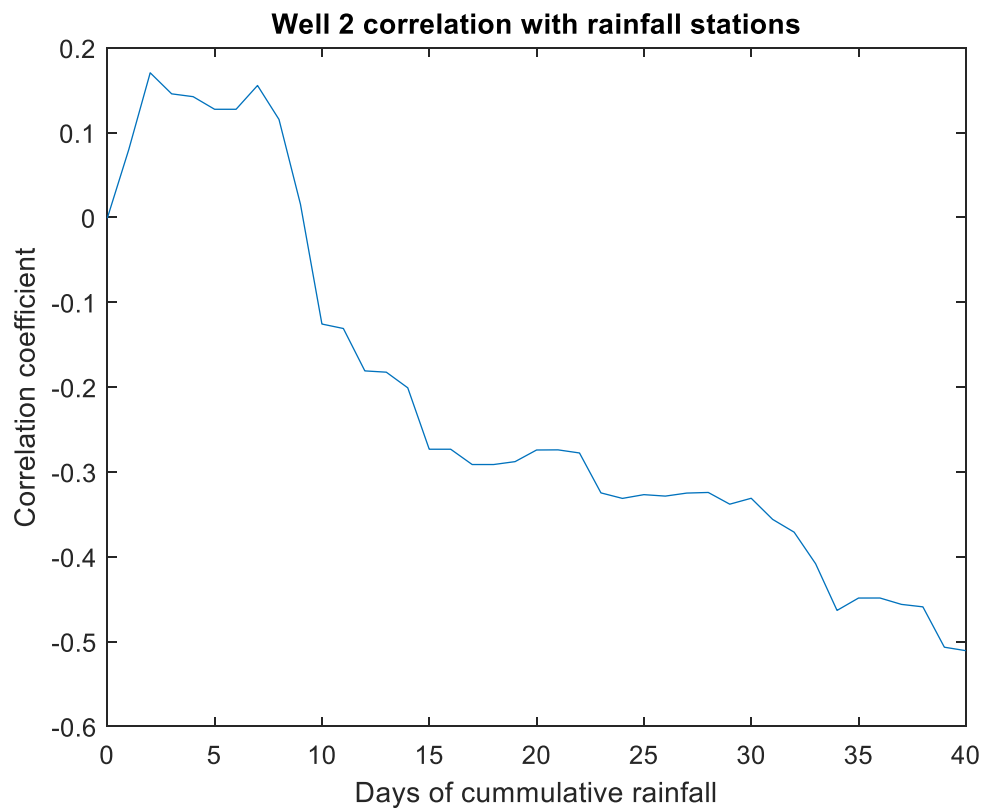


Εικόνα 3.35:Συσχέτιση Βροχόπτωσης για Σταθμό Γέργερη με Πηγάδι 5

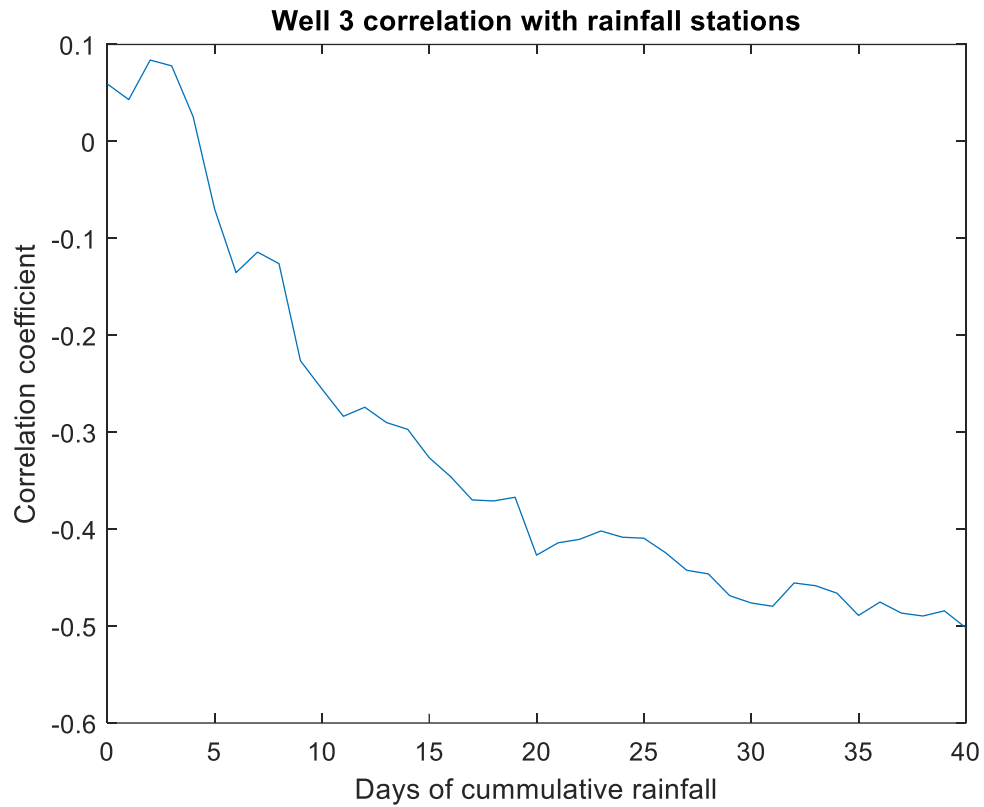
3.4.2 Μετεωρολογικός Σταθμός Μορώνι



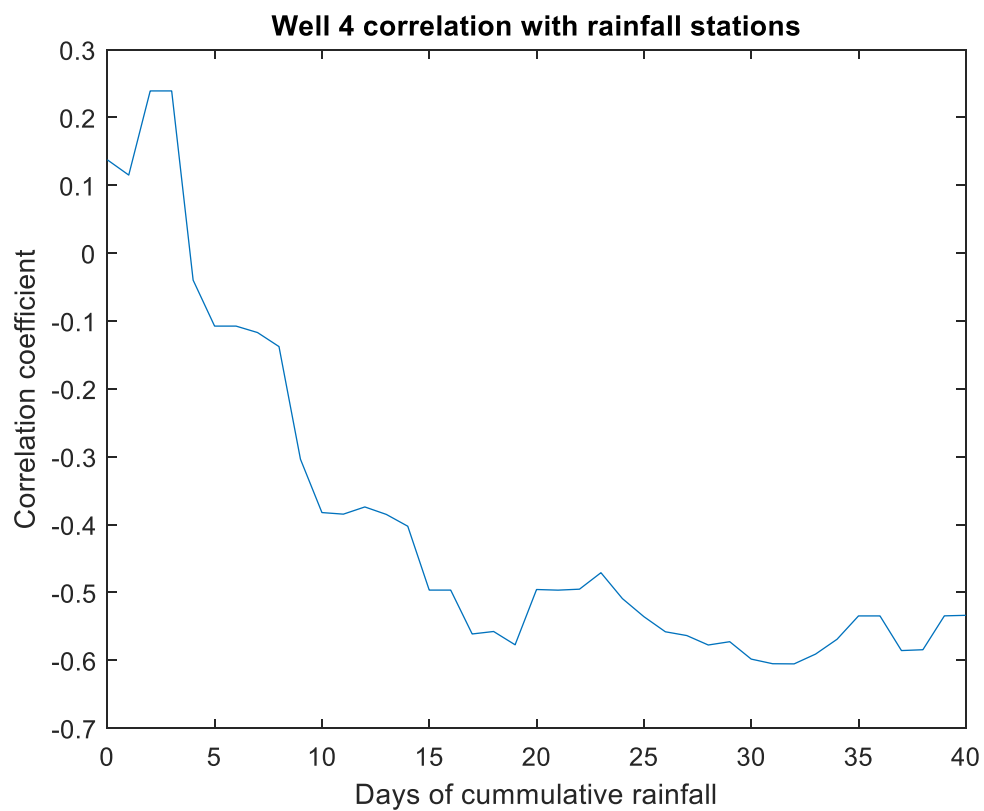
Εικόνα 3.36:Συσχέτιση Βροχόπτωσης για Σταθμό Μορώνι με Πηγάδι 1



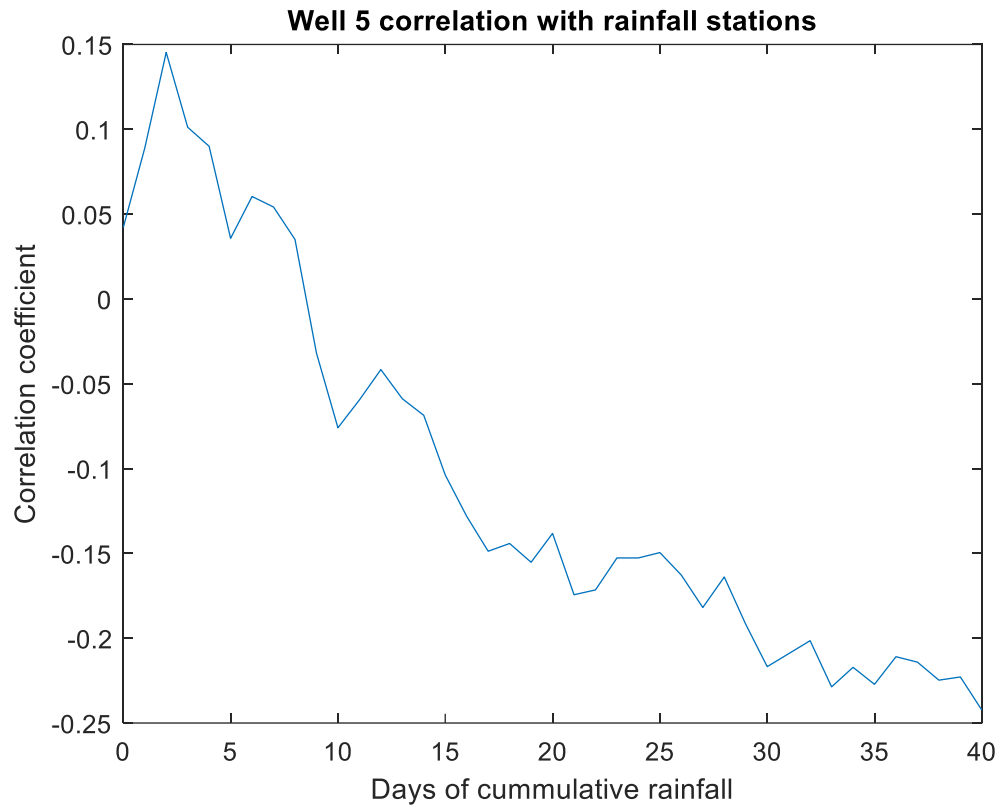
Εικόνα 3.37:Συσχέτιση Βροχόπτωσης για Σταθμό Μορώνι με Πηγάδι 2



Εικόνα 3.38:Συσχέτιση Βροχόπτωσης για Σταθμό Μορώνι με Πηγάδι 3

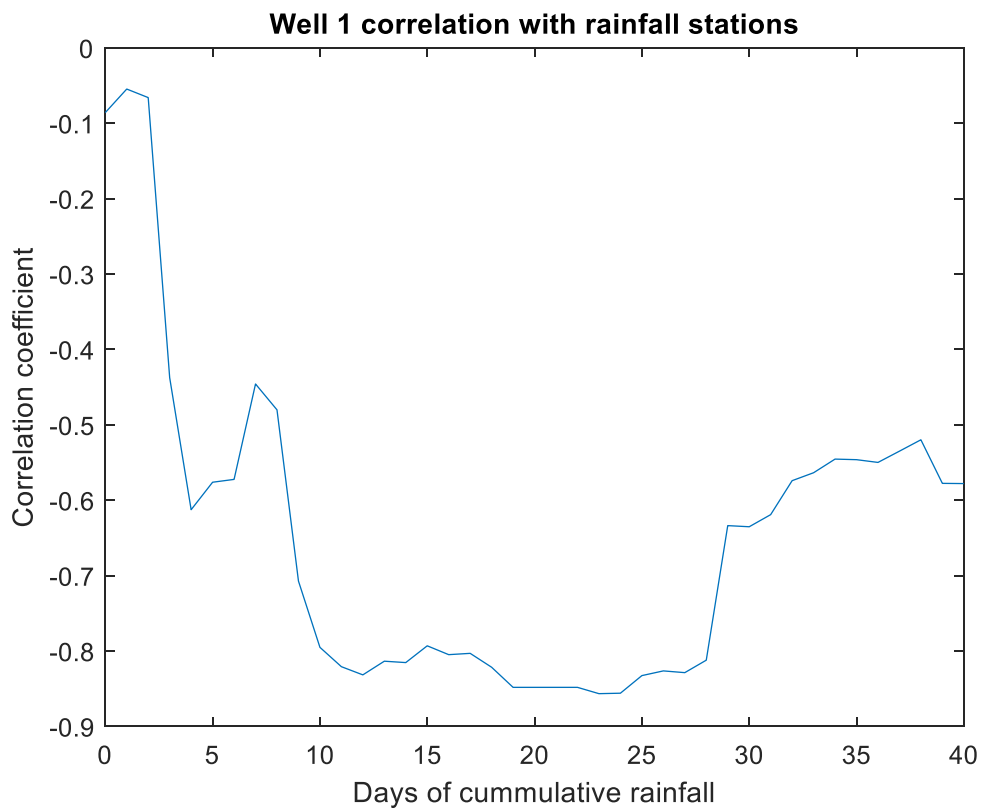


Εικόνα 3.39:Συσχέτιση Βροχόπτωσης για Σταθμό Μορώνι με Πηγάδι 4

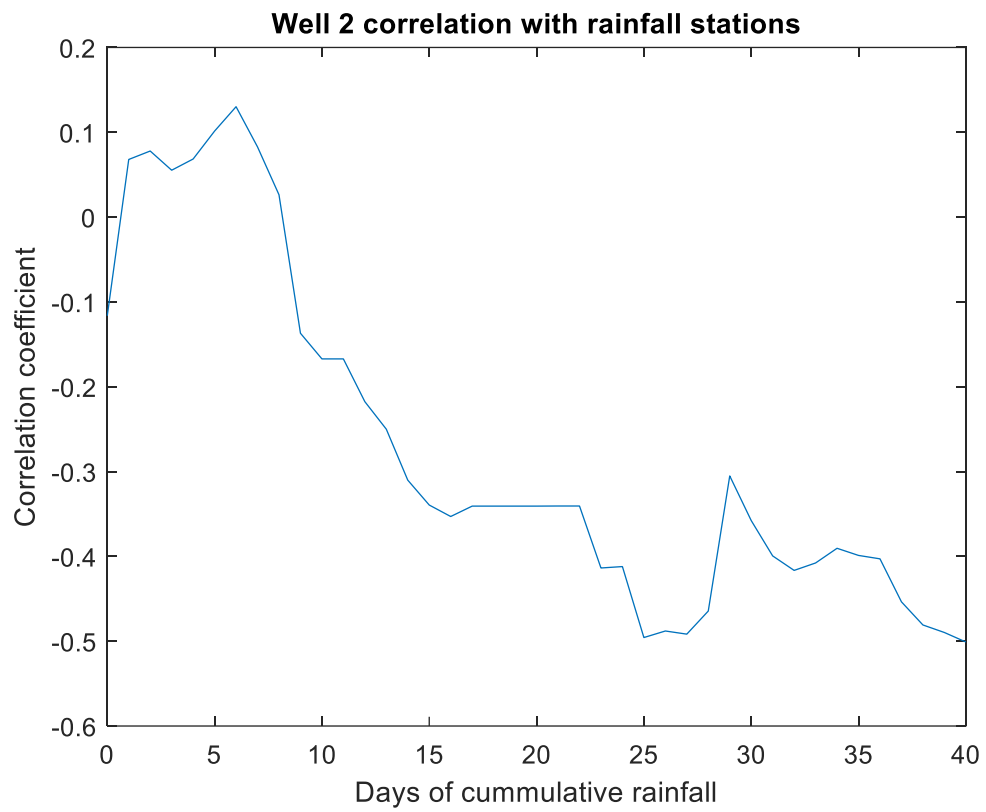


Εικόνα 3.40:Συσχέτιση Βροχόπτωσης για Σταθμό Μορώνι με Πηγάδι 5

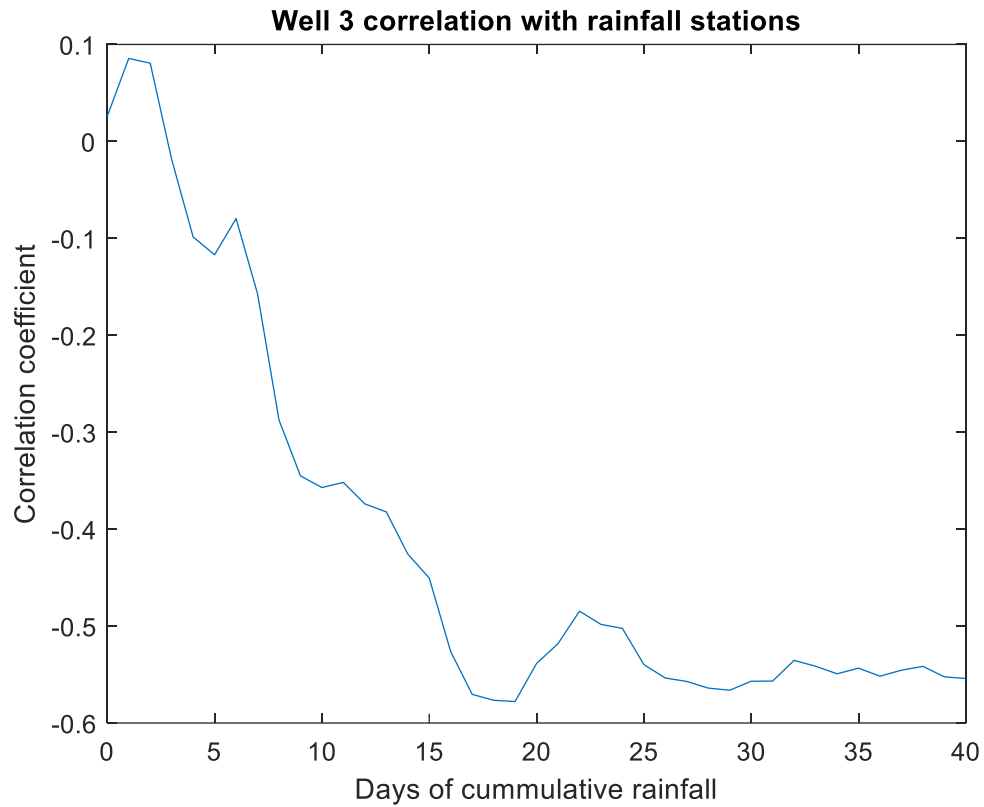
3.4.3 Μετεωρολογικός Σταθμός Βιζάρι



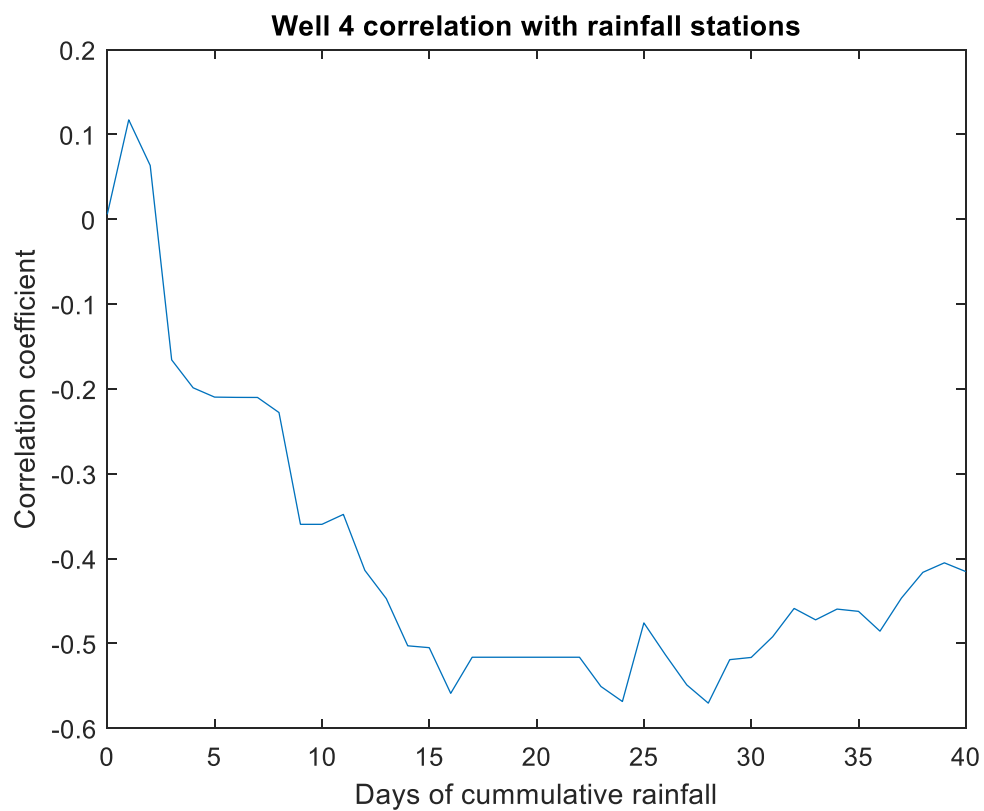
Εικόνα 3.41:Συσχέτιση Βροχόπτωσης για Σταθμό Βιζάρι με Πηγάδι 1



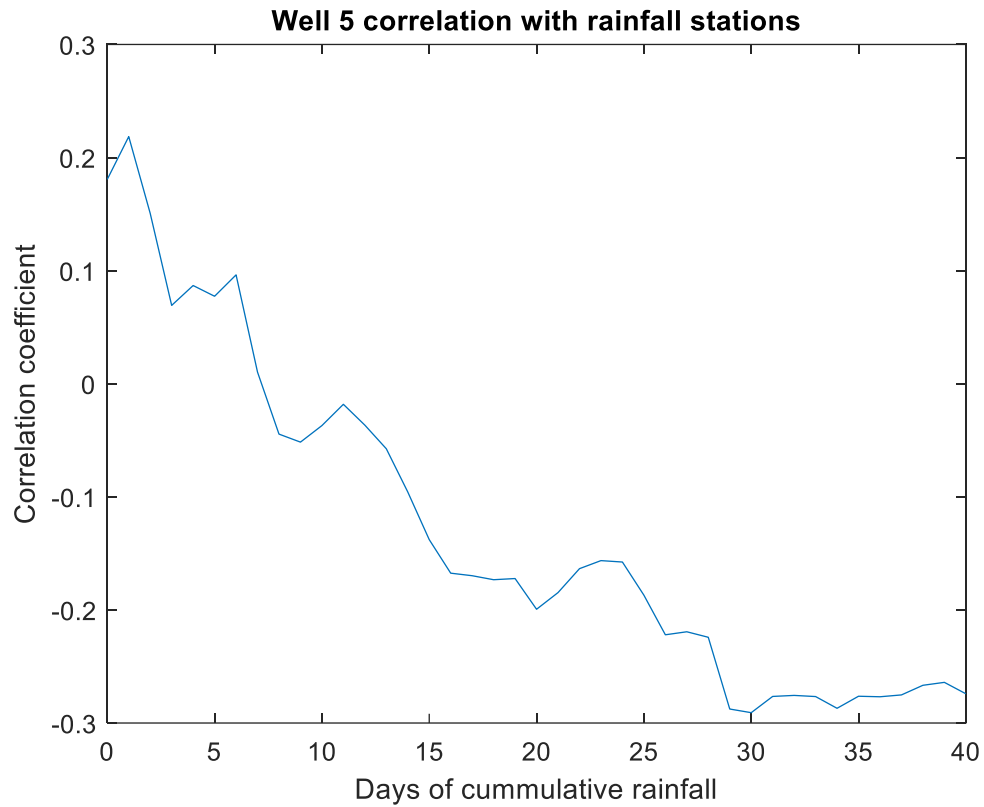
Εικόνα 3.42:Συσχέτιση Βροχόπτωσης για Σταθμό Βιζάρι με Πηγάδι 2



Εικόνα 3.43:Συσχέτιση Βροχόπτωσης για Σταθμό Βιζάρι με Πηγάδι 3

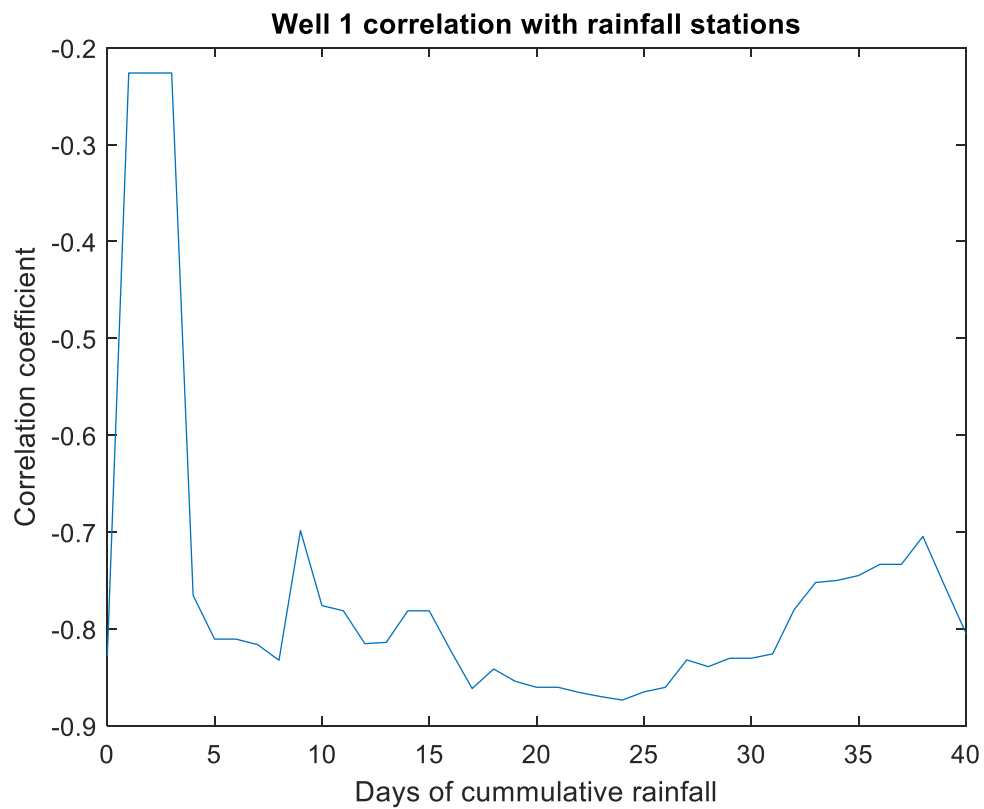


Εικόνα 3.44:Συσχέτιση Βροχόπτωσης για Σταθμό Βιζάρι με Πηγάδι 4

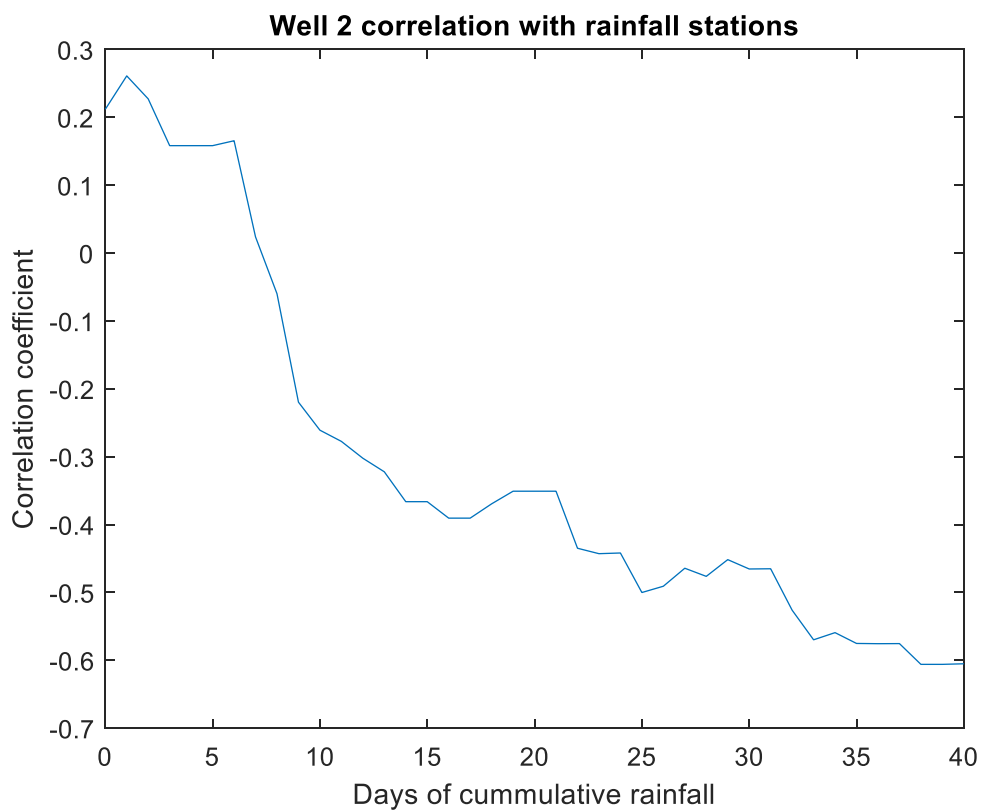


Εικόνα 3.45:Συσχέτιση Βροχόπτωσης για Σταθμό Βιζάρι με Πηγάδι 5

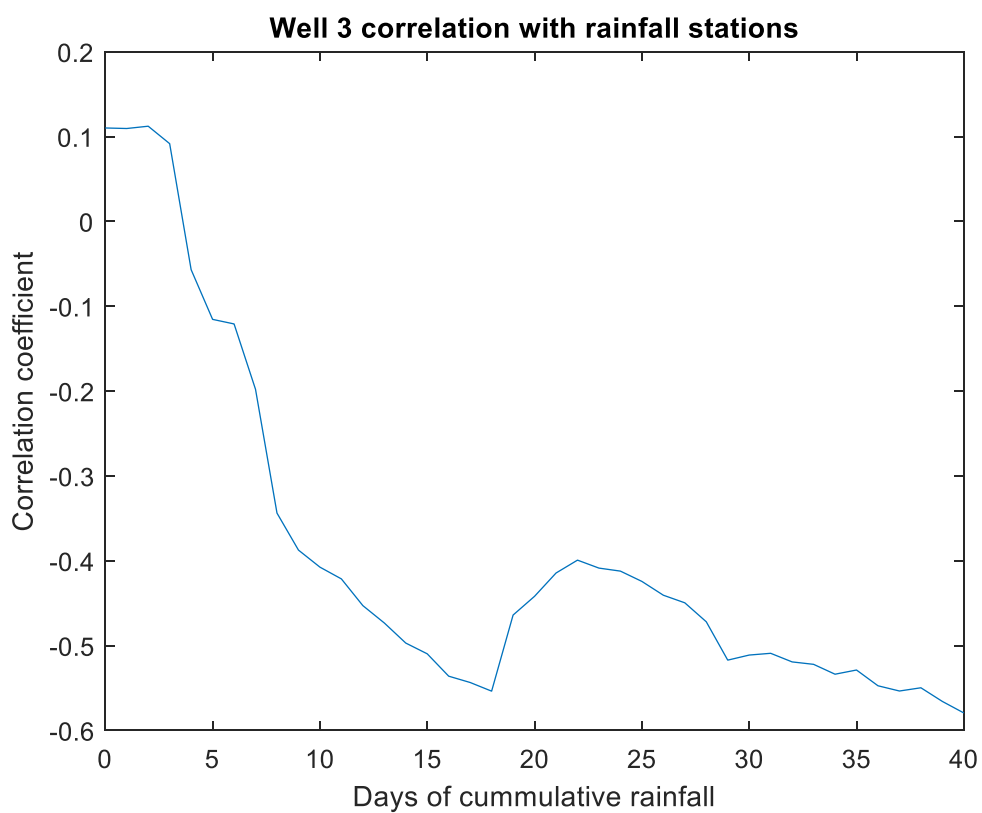
3.4.4 Μετεωρολογικός Σταθμός Βόριζια



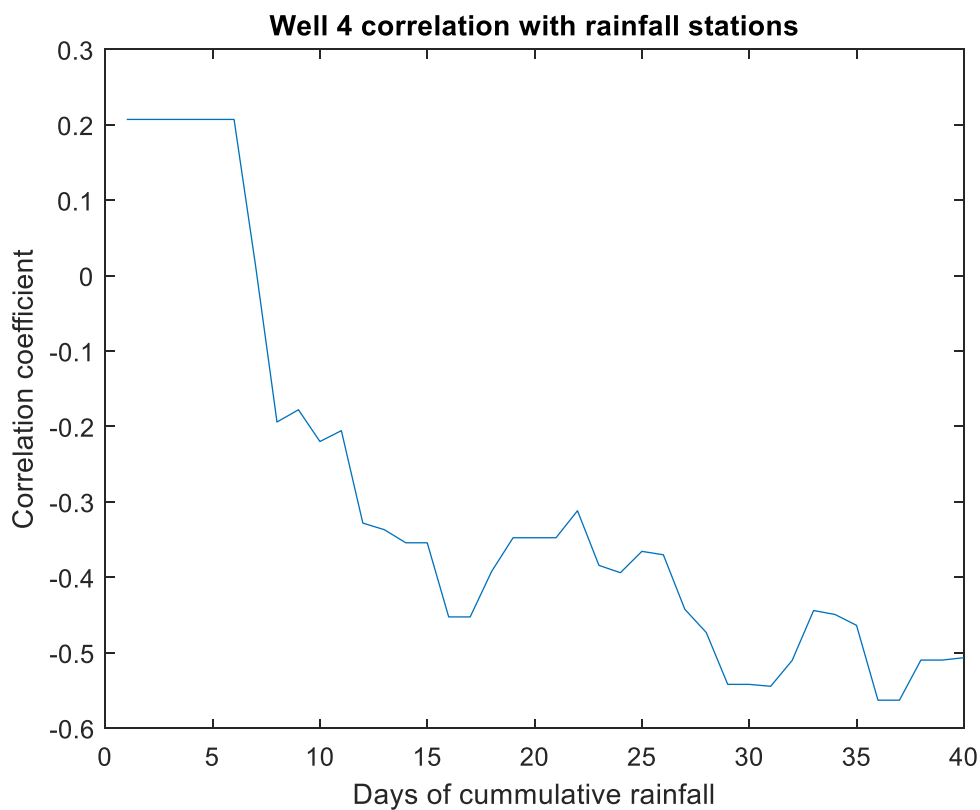
Εικόνα 3.46:Συσχέτιση Βροχόπτωσης για Σταθμό Βορίζια με Πηγάδι 1



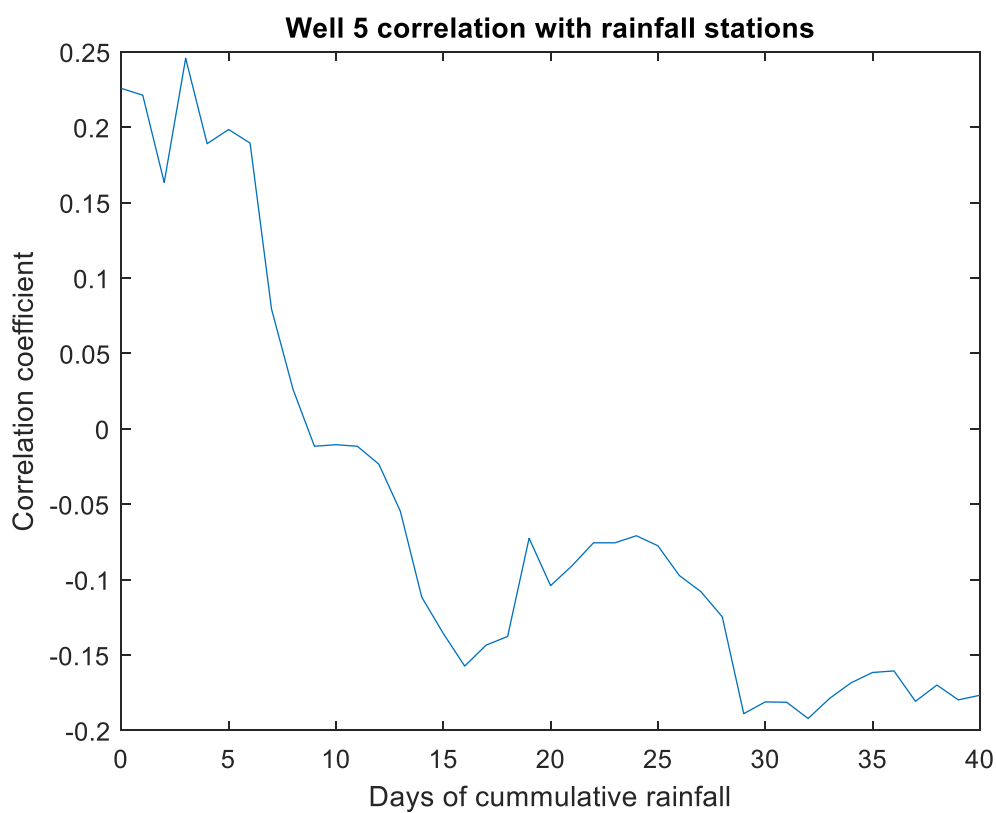
Εικόνα 3.47:Συσχέτιση Βροχόπτωσης για Σταθμό Βορίζα με Πηγάδι 2



Εικόνα 3.48:Συσχέτιση Βροχόπτωσης για Σταθμό Βορίζα με Πηγάδι 3

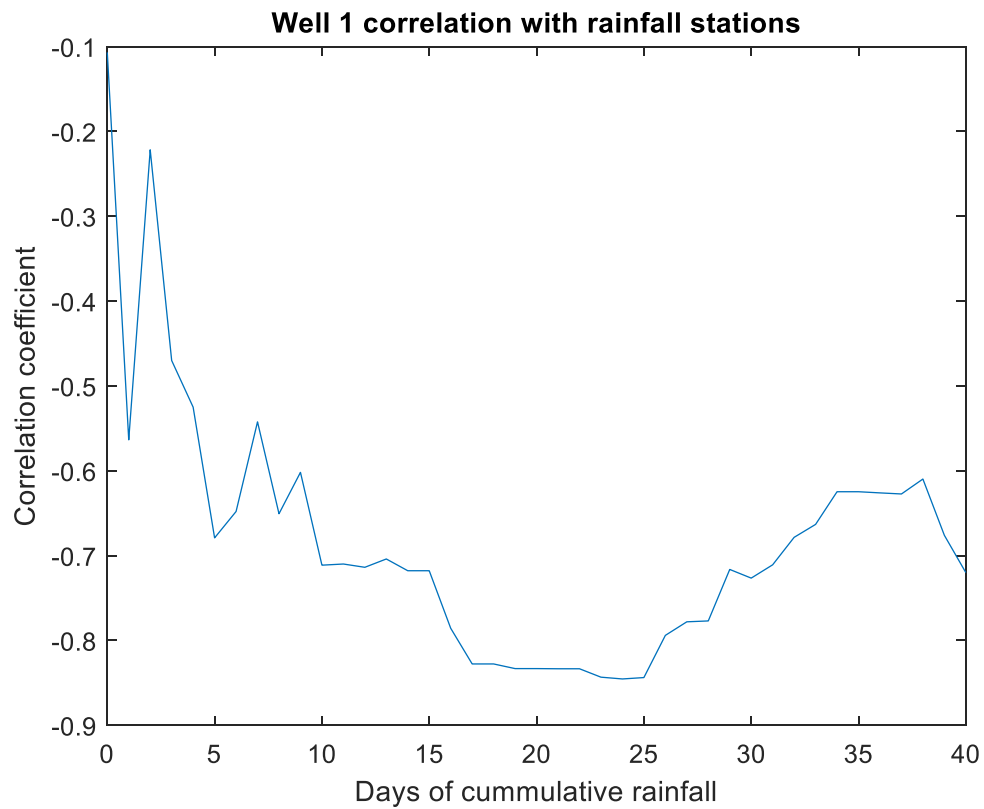


Εικόνα 3.49:Συσχέτιση Βροχόπτωσης για Σταθμό Βορίζα με Πηγάδι 4

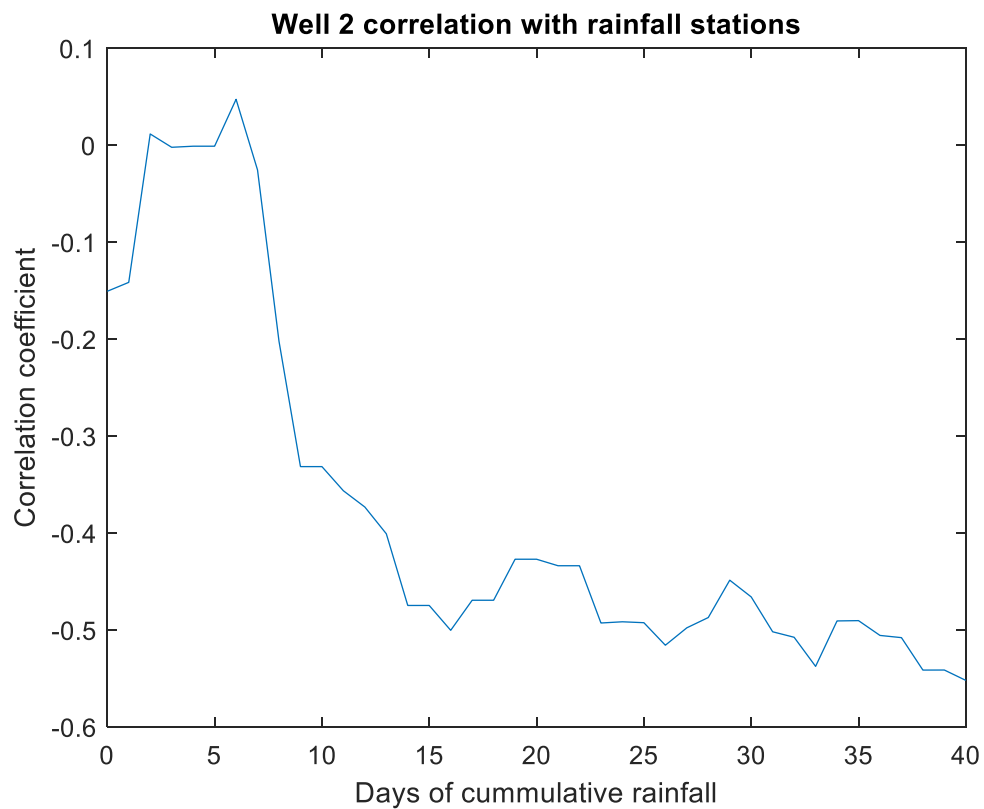


Εικόνα 3.50:Συσχέτιση Βροχόπτωσης για Σταθμό Βορίζα με Πηγάδι 5

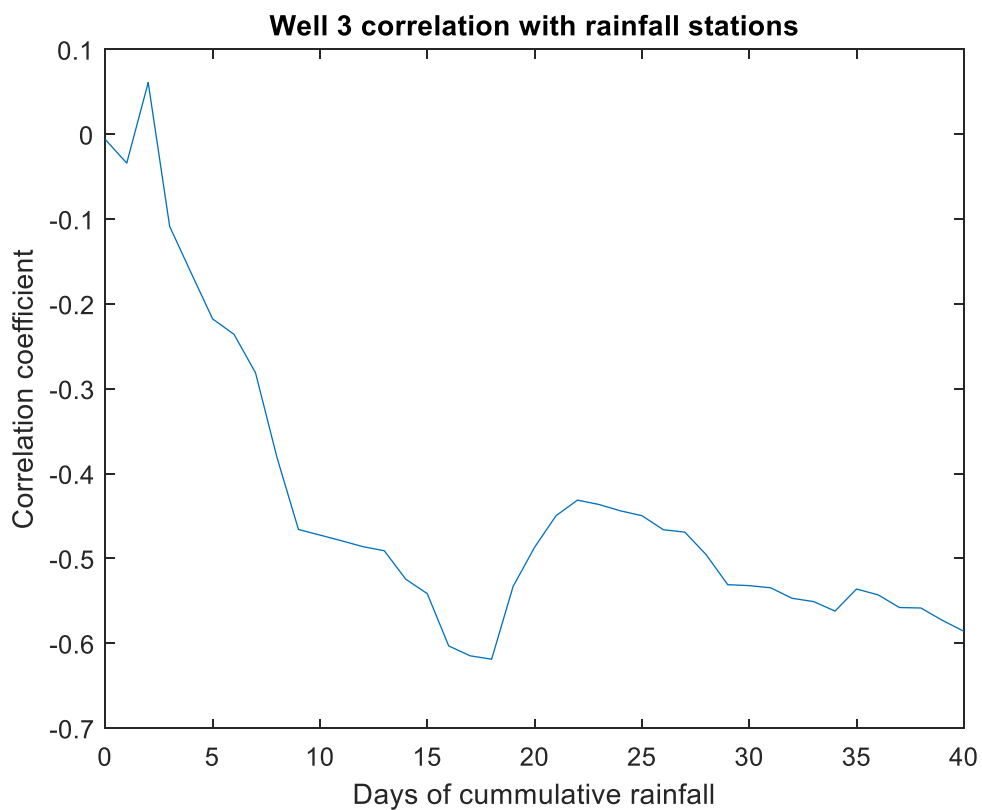
3.4.5 Μετεωρολογικός Σταθμός Ζαρού



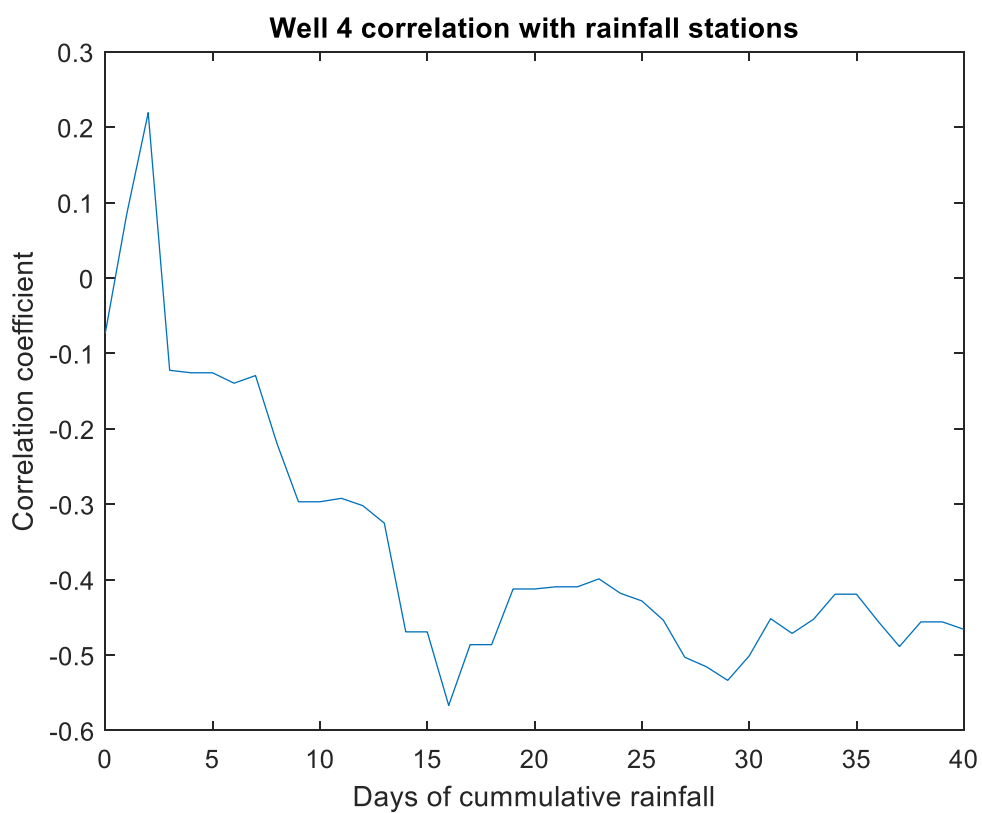
Εικόνα 3.51:Συσχέτιση Βροχόπτωσης για Σταθμό Ζαρού με Πηγάδι 1



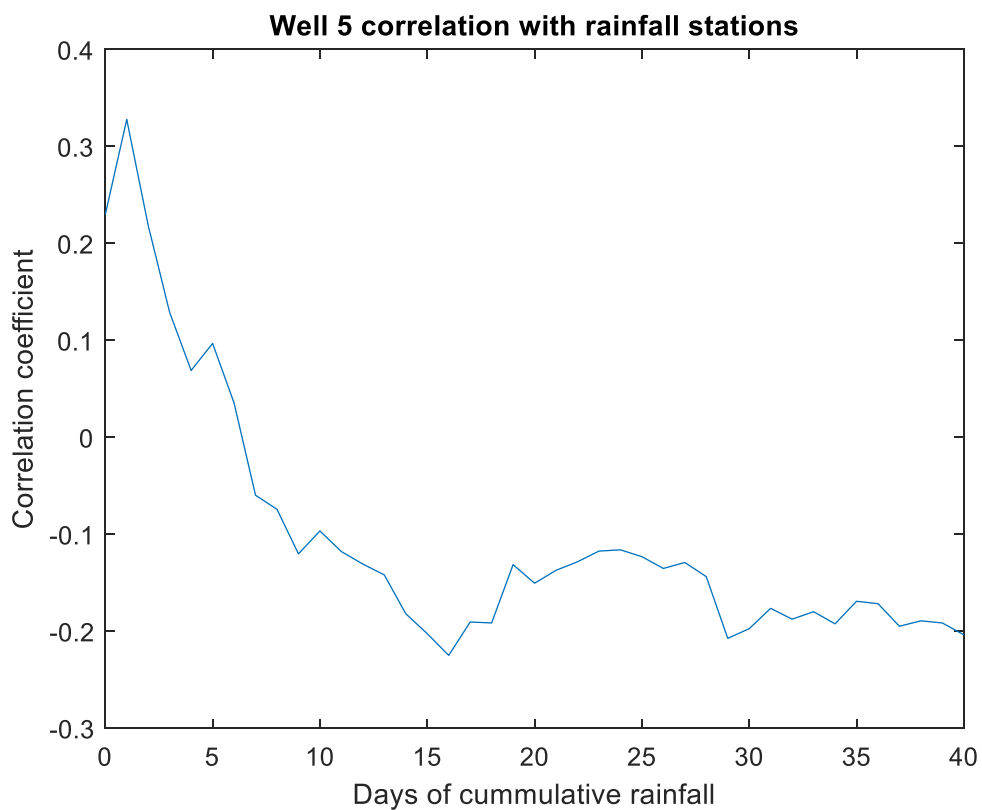
Εικόνα 3.52:Συσχέτιση Βροχόπτωσης για Σταθμό Ζαρού με Πηγάδι 2



Εικόνα 3.53:Συσχέτιση Βροχόπτωσης για Σταθμό Ζαρού με Πηγάδι 3

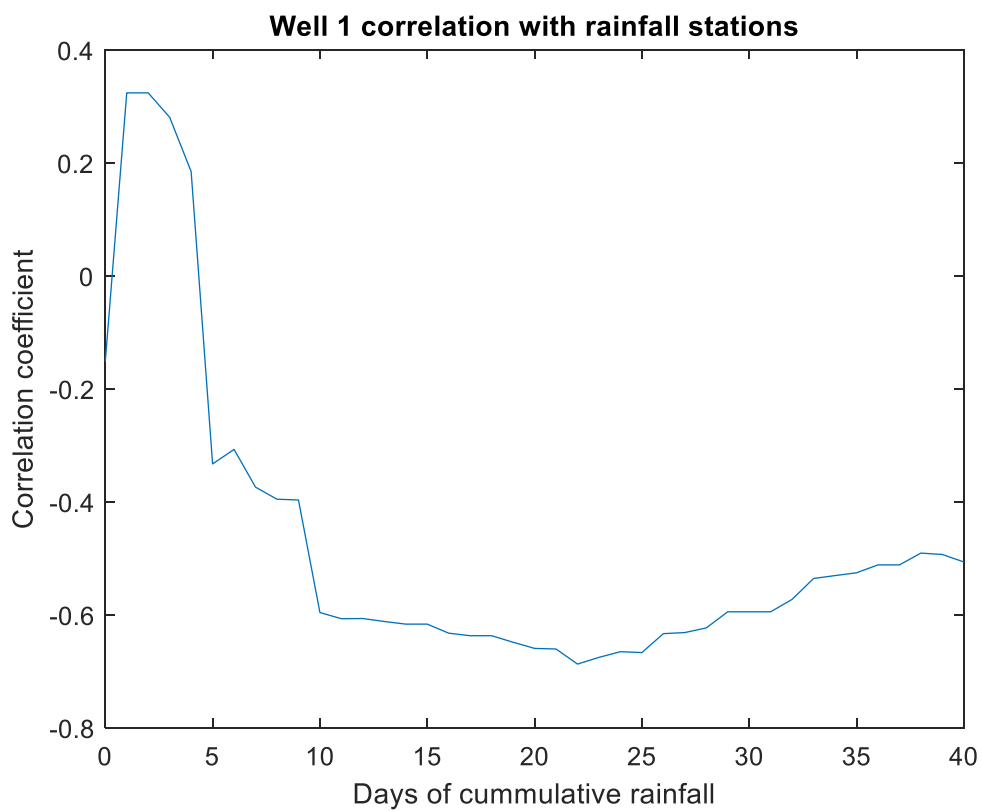


Εικόνα 3.54:Συσχέτιση Βροχόπτωσης για Σταθμό Ζαρού με Πηγάδι 4

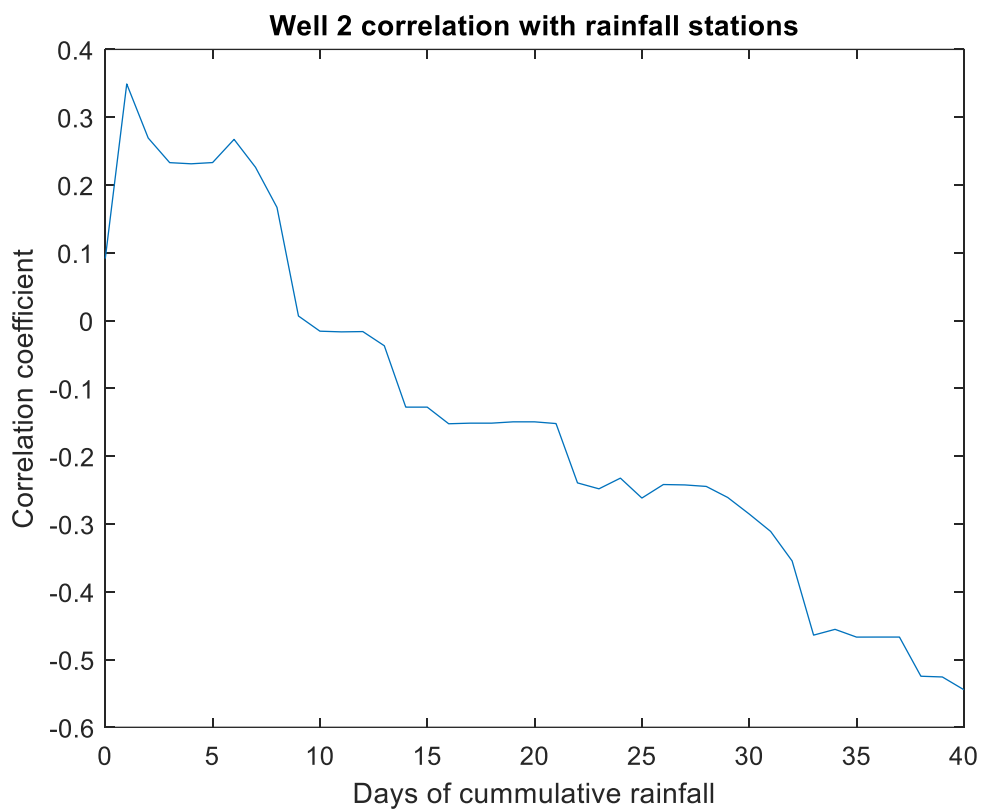


Εικόνα 3.55:Συσχέτιση Βροχόπτωσης για Σταθμό Ζαρού με Πηγάδι 5

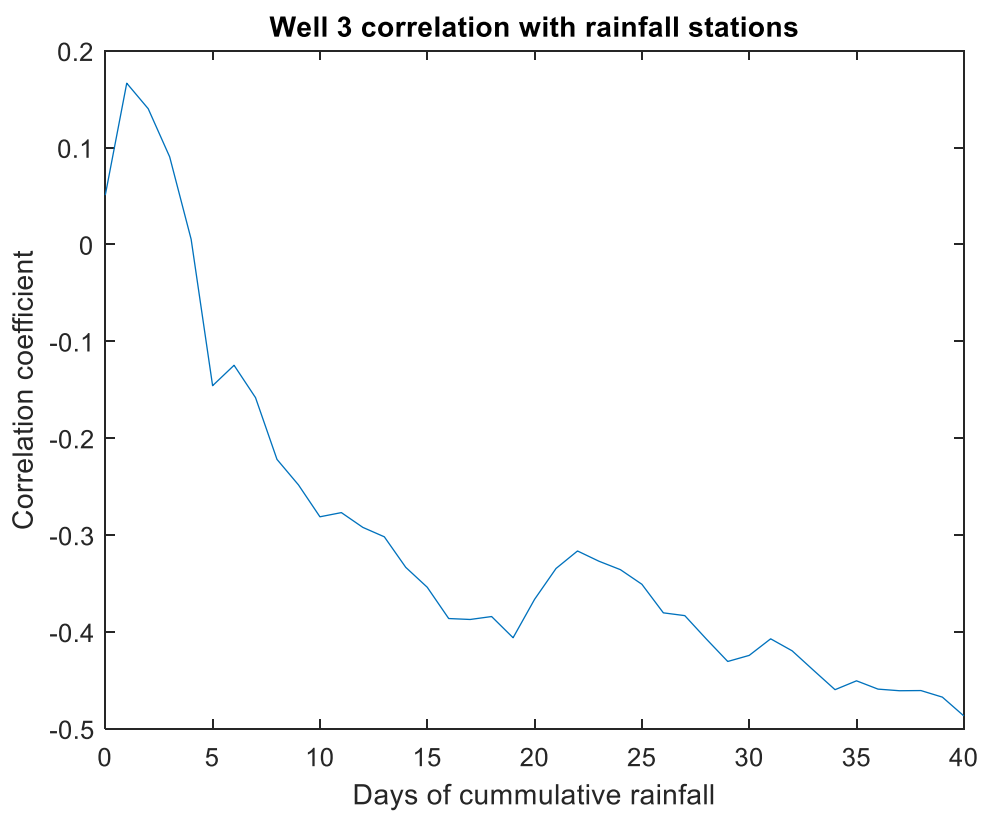
3.4.6 Μετεωρολογικός Σταθμός Λαγολιό



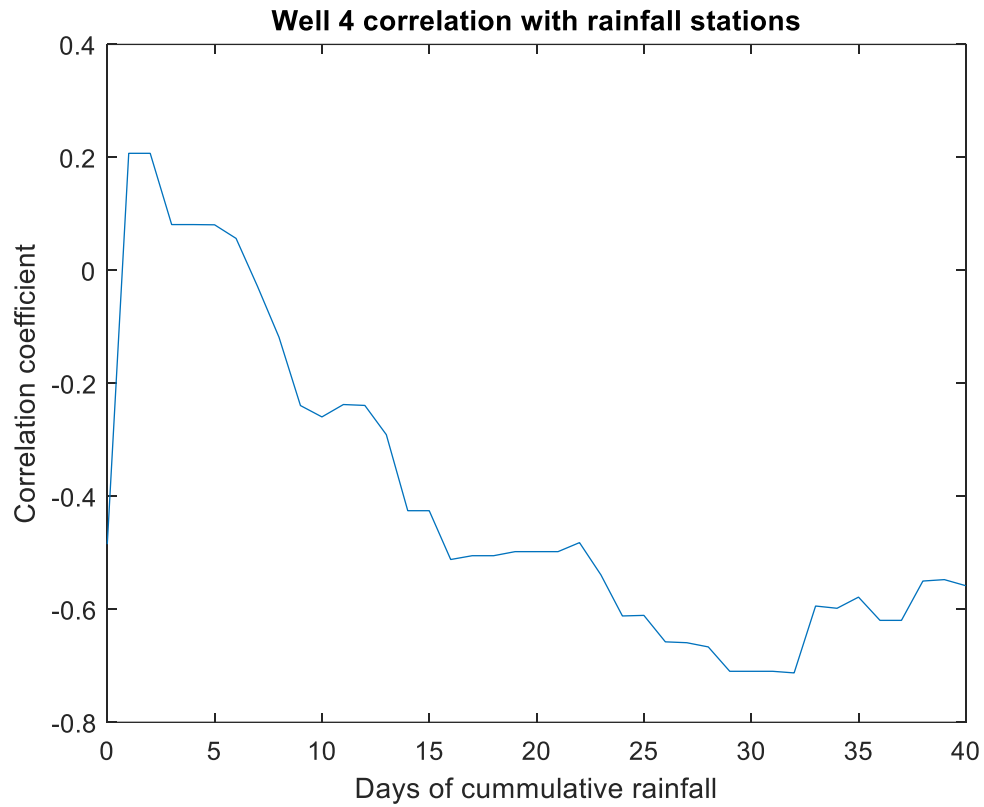
Εικόνα 3.56:Συσχέτιση Βροχόπτωσης για Σταθμό Λαγολιό με Πηγάδι 1



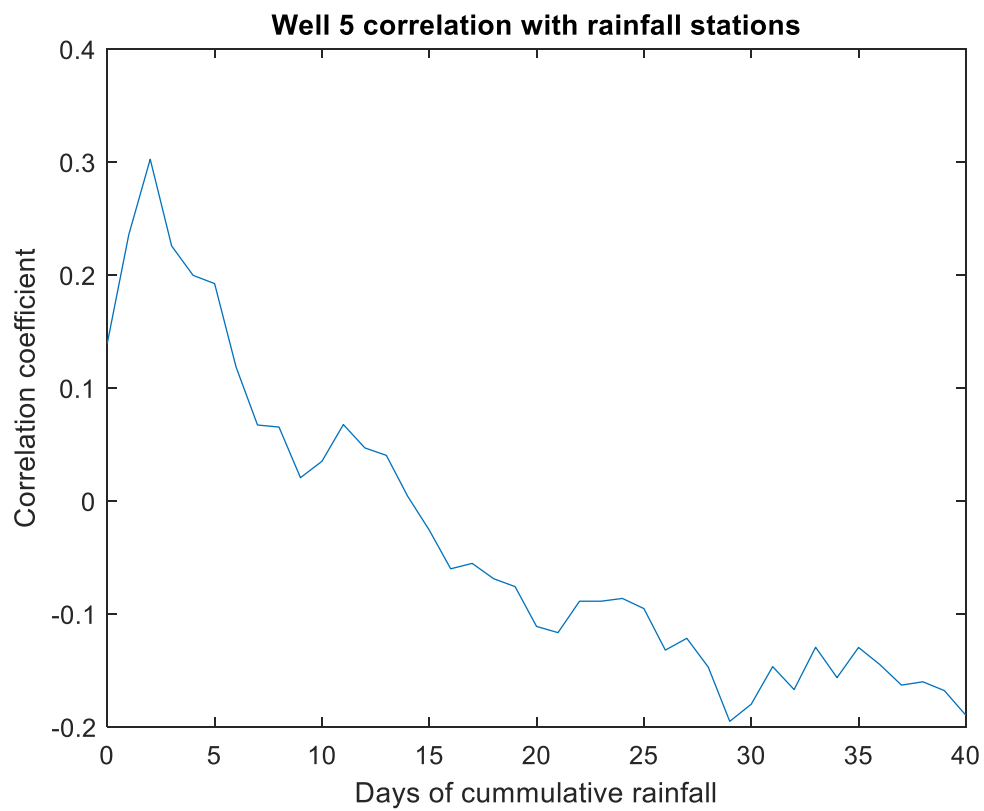
Εικόνα 3.57:Συσχέτιση Βροχόπτωσης για Σταθμό Λαγολιό με Πηγάδι 2



Εικόνα 3.58:Συσχέτιση Βροχόπτωσης για Σταθμό Λαγολιό με Πηγάδι 3



Εικόνα 3.59:Συσχέτιση Βροχόπτωσης για Σταθμό Λαγολιό με Πηγάδι 4



Εικόνα 3.60:Συσχέτιση Βροχόπτωσης για Σταθμό Λαγολιό με Πηγάδι 5

4 Συζήτηση

Σε αυτό το σημείο της εργασίας θα γίνει μια ανασκόπηση όλων των θεμάτων που αφορούν το όλο εγχείρημα, όπως σχολιασμός αποτελεσμάτων, προβληματισμών που αναδύθηκαν κατά την εκπόνησή της και γενικές παρατηρήσεις και σημειώσεις.

4.1 Αποτελέσματα Ανεξάρτητων Δοκιμών

Ξεκινώντας από τα αποτελέσματα, χρειάζεται να γίνει μια επιπλέον επεξήγηση για τη λειτουργία και το σκοπό ύπαρξης των τεστ συσχέτισης βροχόπτωσης-υδραυλικού ύψους για διαφορετικές ημέρες αθροιστικής βροχόπτωσης, από την ημερομηνία μέτρησης υδραυλικού ύψους στο κάθε πηγάδι. Με αυτά τα τεστ παράγονται τα διαγράμματα που παρουσιάζονται στα αποτελέσματα, τα οποία ξεκινούν με μια μικρή ανοδική πορεία φτάνουν σε μια κορυφή και έπειτα πέφτουν. Η θέση της κορυφής ως προς τον άξονα x αποτελεί ίσως μια ένδειξη για τον χρόνο που απαιτείται ώστε η επίδραση του υδρολογικού φορτίου της βροχόπτωσης να φανεί στα πηγάδια παρατήρησης. Αντίστοιχα η θέση της κορυφής ως προς τον άξονα y αποτελεί το ποσοστό γραμμικής συσχέτισης της κατάστασης που εξετάζεται, προφανώς υπάρχουν παραδείγματα όπου ο συντελεστής συσχέτισης είναι παντού αρνητικός όπως στην περίπτωση του σταθμού του Ζαρού με το πηγάδι 1. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί αρχικά από την μεγάλη απόσταση μεταξύ του σταθμού και του πηγαδιού. Έπειτα από το γεγονός ότι ο μετεωρολογικός σταθμός και το πηγάδι ανήκουν σε διαφορετικούς υδροφορείς (Κριτσωτάκης, 2009). Έτσι είναι αναμενόμενο να μην υπάρχει συσχέτιση μεταξύ τους. Το άλλο θέμα που θα πρέπει να θιχθεί, είναι πως ενώ οι τιμές του συντελεστή συσχέτισης, σε αρκετές περιπτώσεις στις κορυφές, είναι μικρές, αυτό δεν είναι απαραίτητα ανησυχητικό καθώς το συγκεκριμένο τεστ αφορά ασθενείς σχέσεις. Το εξεταζόμενο σύστημα δεν λειτουργεί γραμμικά έτσι δεν είναι αναμενόμενες υψηλές τιμές συντελεστή συσχέτισης. Σε αυτό το σημείο τίθεται το ερώτημα τι ακριβώς εξυπηρετούν οι συγκεκριμένοι έλεγχοι, ουσιαστικά αποτελούν μια υποστήριξη της αρχικής θέσης. Η αρμονική συνάρτηση που έχει δημιουργηθεί αποτελεί μια συνάρτηση της αθροιστικής εξαμηνιαίας βροχόπτωσης, επομένως μια λανθάνουσα παραδοχή που δεν είχε αναφερθεί προηγουμένως ήταν πως το σύστημα είναι αρκετά ευαίσθητο ώστε να μπορούν τα κατακρημνίσματα να το επηρεάσουν εντός του εξαμήνου ή ιδανικά άμεσα, πράγμα που αποδείχθηκε.

4.2 Αποτελέσματα Δοκιμών

4.2.1 Δοκιμή 0

Στη δοκιμή 0 έγινε μια απλή πρόσθεση των τάσεων, οπότε δεν αναμένεται κάποια ιδιαίτερη βελτίωση, αξίζει ωστόσο να παρατηρηθούν τα εξής:

1. Δεν υπάρχει σημαντική αλλαγή στο RMSE πέρα από μια μικρή αύξηση του στο πηγάδι 1 για την προσέγγιση μέσου όρου.
2. Το Bias για την προσέγγιση πλησιέστερου πηγαδιού φαίνεται να κινείται σε αυτή την δοκιμή κοντά στην αρχική θεώρηση ενώ, για την προσέγγιση μέσου όρου φαίνεται μια βελτίωση στα πηγάδια 2 και 3 που βρίσκονται κοντά στην οριακή συνθήκη που τροφοδοτείται από τον Γεροπόταμο.
3. Όσο αναφορά το Bias φαίνεται μια χωρική διαβάθμιση, άρα ίσως κάποια πηγάδια να επηρεάζονται περισσότερο από κάποιες οριακές συνθήκες σε σχέση με άλλα.
4. Το Μέσο Απόλυτο Σφάλμα (MAE) παρουσιάζει παρόμοια μορφή με το RMSE.

5. Σημαντική διαφορά ως προς την ολική βελτίωση του μοντέλου φαίνεται στο Bias όπου για την προσέγγιση πλησιέστερου πηγαδιού παρουσιάζεται μεγάλη βελτίωση η οποία μάλλον υποδηλώνει μια εξάλειψη ενός συστηματικού σφάλματος.
6. Αντίθετα για την προσέγγιση μέσου όρου φαίνεται μια τάση υπερεκτίμησης η οποία μπορεί να ευθύνεται σε χρονική ασυμφωνία μετρήσεων και παρατηρήσεων.
7. Η συμπεριφορά του πηγαδιού 1 ίσως αποτελεί μια ένδειξη ότι η προσέγγιση μέσου όρου υστερεί σε σχέση με την προσέγγιση πλησιέστερου πηγαδιού.

4.2.2 Δοκιμή 1

Στην Δοκιμή 1 έγινε μια προσπάθεια για τον προσδιορισμό της έναρξης της υγρής περιόδου η οποία δεν συνδέεται με την έναρξη της προσομοίωσης πράγμα που επιβεβαιώνουν οι παρατηρήσεις. Η χρονική μετατόπιση γίνεται με μια απλή αριθμητική μετατροπή καθώς στο συγκεκριμένο εξάμηνο 80 ημέρες στο παρελθόν υπάγονται στη ίδια περίοδο. Οπότε από τη Δοκιμή 1 αξίζουν να σημειωθούν τα εξής:

1. Το RMSE δεν μεταβλήθηκε σε σχέση με την προηγούμενη Δοκιμή.
2. Το Bias φαίνεται και στις δύο προσεγγίσεις να μεγαλώνει αλλά αυτό ενδεχομένως να οφείλεται στο ότι πλέον αναθεωρείται σε μεγάλο βαθμό η βαθμονόμηση που είχε γίνει στο μοντέλο αρχικά.
3. Υπάρχει μια σχετική ομοιομορφία στα αποτελέσματα του MAE εκτός από το πηγάδι 1 με την προσέγγιση μέσου όρου να υπερεκτιμά αρκετά τα υδραυλικά ύψη.
4. Δεν φαίνεται ουσιαστική βελτίωση με τις νέες προσεγγίσεις αλλά αυτό μπορεί να οφείλεται στο ότι χρειάζονται επιπλέον χρονικοί μετατοπισμοί καθώς και μια αύξηση του εύρους της αρμονικής συνάρτησης στην δεύτερη οριακή συνθήκη.

4.2.3 Δοκιμή 2

Στην Δοκιμή 2 γίνεται μια επιπλέον μετατόπιση της έναρξης της υγρής περιόδου στις 130 ημέρες από την έναρξη του χρόνου προσομοίωσης, ενώ γίνεται και μια διεύρυνση του πλάτους της αρμονικής συνάρτησης που περιγράφει την εισροή από τον Γεροπόταμο. Οπότε από τη Δοκιμή 2 αξίζουν να σημειωθούν τα εξής:

1. Τα RMSE και MEA φαίνεται να βελτιώνονται για όλα τα πηγάδια που μάλλον επηρεάζονται περισσότερο από την βόρεια οριακή συνθήκη, ενώ φαίνεται μια υπερεκτίμηση στο πηγάδι 3 η οποία υποδηλώνει πως χρειάζεται μια επιπλέον χρονική μετατόπιση στην οριακή συνθήκη του Γεροποτάμου.
2. Στο Bias φαίνεται όλα τα πηγάδια να υπερεκτιμούν τα υδραυλικά ύψη εκτός από το πηγάδι 3.
3. Το πιο ενθαρρυντικό για αυτή την δοκιμή ως προς τη βελτίωση του μοντέλου είναι η βελτίωση του Bias στην προσέγγιση πλησιέστερου πηγαδιού.

4.2.4 Δοκιμή 3

Στην Δοκιμή 3 γίνεται προσθήκη τάσης στην οριακή συνθήκη εξόδου στα ανατολικά, η οποία είχε θεωρηθεί σταθερή μέχρι στιγμής. Οπότε από τη Δοκιμή 3 αξίζουν να σημειωθούν τα εξής:

1. Το RMSE φαίνεται να βελτιώνεται στα πηγάδια 1, 4, 5 ενώ τα 2 και 3 φαίνεται να υπερεκτιμούνται καθώς κατά πάσα πιθανότητα επηρεάζονται περισσότερο από την οριακή συνθήκη του Γεροποτάμου στη οποία δεν έχει γίνει ακόμα η χρονική μετατόπιση.
2. Στο Bias φαίνεται να υποεκτιμάται το υδραυλικό ύψος στα πηγάδι 1, 2 και 3 ενώ τα 4 και 5 παραμένουν στα ίδια επίπεδα με την αρχική θεώρηση.
3. Το MEA φαίνεται να έχει βελτιωθεί για τα πηγάδια 1, 4 και 5 που μάλλον είναι καλός δείκτης για την ορθότητα της σημείωσης 1.
4. Σημαντική βελτίωση παρατηρείται στο RMSE για την προσέγγιση πλησιέστερου πηγαδιού ενώ το Bias δείχνει ότι η προσέγγιση μέσου όρου δεν είναι ικανοποιητική.

4.2.5 Δοκιμή 4

Στη Δοκιμή 4 γίνεται, επιπλέον, η χρονική μετατόπιση της νότιας οριακής συνθήκης 90 μέρες πριν την έναρξη της προσομοίωσης. Οπότε από τη Δοκιμή 4 αξίζουν να σημειωθούν τα εξής:

1. Το RMSE φαίνεται να βελτιώνεται σημαντικά σε όλα τα πηγάδια εκτός από το πηγάδι 2 (η συγκεκριμένη συμπεριφορά θα αναλυθεί παρακάτω).
2. Στο Bias φαίνεται να γίνεται υπερεκτίμηση και υποεκτίμηση των προσομοιωμένων τιμών σε σχέση με την αρχική θεώρηση, ωστόσο αυτό μπορεί να εξηγηθεί μαθηματικά.
3. Το MEA φαίνεται να ακολουθεί την μορφή του RMSE.
4. Η προσέγγιση μέσου όρου βελτιώνει το μοντέλο βάσει μόνο των MAE και RMSE
5. Η προσέγγιση πλησιέστερου πηγαδιού φαίνεται να βελτιώνει όλους τους δείκτες αξιολόγησης του μοντέλου (Bias, MAE, RMSE) επομένως αυτή θεωρείται η πλέον έγκυρη.

4.2.6 Φυσικό Νόημα Βαθμονόμησης Δοκιμών

Κατά τη διάρκεια των δοκιμών έγιναν κάποιες παραδοχές προκειμένου να μειωθούν τα σφάλματα, ωστόσο μετά από τέτοιες παραδοχές πρέπει να αναζητείται κάποιο φυσικό νόημα γιατί αλλιώς το μοντέλο περιγράφει κάτι αποκομμένο από την αναφορικότητά του. Έτσι ξεκινώντας από την πιο απλή παραδοχή για την ανατολική οριακή συνθήκη, το πηγάδι 5, που βρίσκεται πιο κοντά της, φαίνεται να ακολουθεί μια ξεκάθαρη τάση (βλ. Εικόνα 2.7). Έτσι είναι ασφαλές να θεωρηθεί αιτιοκρατικά πως και η οριακή συνθήκη θα έχει μια αντίστοιχη συμπεριφορά. Αναφορικά με τη βόρεια οριακή συνθήκη, η πρώτη χρονική μετατόπιση των 80 ημερών έγινε σε μια προσπάθεια προσέγγισης της αρχής της υγρής περιόδου· βέβαια αυτή η παραδοχή αποδείχθηκε μη ικανοποιητική καθώς υπήρχε μια ένδειξη πως η χρονική μετατόπιση πρέπει να γίνει πιο πίσω στον χρόνο. Η περαιτέρω μετατόπιση έχει νόημα αν αναλογιστούμε την γεωμορφολογία της περιοχής, η βόρεια οριακή συνθήκη βρίσκεται στους πρόποδες του Ψηλορείτη, μια οροσειρά η οποία καλύπτεται από χιόνι από τα τέλη του Φθινοπώρου έως και το μεγαλύτερο τμήμα της Άνοιξης. Δεν θεωρείται πως μέρος των κατακρημνισμάτων στον Ψηλορείτη καταλήγουν απευθείας στην περιοχή μελέτης αλλά πως υπάρχει ένα μηχανισμός τροφοδοσίας είτε υπόγειος είτε επιφανειακός ο οποίος φέρνει υδραυλικό φορτίο στην περιοχή μελέτης και είναι συσχετισμένος με τον χρόνο όπως άλλωστε και η αρμονική συνάρτηση της οριακής συνθήκης. Αντίστοιχα με την αρχική θεώρηση για την βόρεια οριακή συνθήκη έγινε και για την νότια του Γεροποτάμου, ωστόσο η διεύρυνση του πλάτους γίνεται αυτή την φορά ίσως

εξ αιτίας της υδρολογίας της ευρύτερης περιοχής. Ο Γεροπόταμος τροφοδοτεί το αλλουβιακό στρώμα το οποίο με την σειρά του τροφοδοτεί τον υδροφορέα στην περιοχή μελέτης. Για τον προσδιορισμό του πλάτους των αρμονικών συναρτήσεων χρησιμοποιήθηκαν υδρολογικά δεδομένα από 3 σταθμούς, το θέμα που παρουσιάζεται εδώ είναι πως αρχικά ο Γεροπόταμος έχει πολύ μεγαλύτερη έκταση από την περιοχή μελέτης και μπορεί να τροφοδοτείται η ροή του επιφανειακά από απορροές, ενώ οι πηγές του είναι σε υψηλότερο σημείο από ότι οι μετεωρολογικοί σταθμοί που χρησιμοποιήθηκαν, οπότε ενδεχομένως η βροχόπτωση που ουσιαστικά χρησιμοποιείται για την συνάρτηση της οριακής συνθήκης να είναι μειωμένη σε σχέση με τη βροχόπτωση που δέχεται ο Γεροπόταμος, αν ληφθεί υπόψη η βροχοβαθμίδα της περιοχής.

4.2.7 Σχολιασμός Προσομοιωμένων Υδραυλικών Ψψών Πηγαδιών

Στο πηγάδι 1 και για τις δύο προσεγγίσεις φαίνεται η βελτίωση μετά από την βαθμονόμηση. Η κύρια παρατήρηση που πρέπει να γίνει είναι πως οι προσομοιωμένες τιμές δεν προσομοιάζουν τις παρατηρούμενες τιμές στην δεύτερη κορυφή. Είναι αμφισβητήσιμο αν πρέπει να γίνουν περαιτέρω πράξεις ώστε να προσομοιωθούν οι συγκεκριμένες τιμές καθώς η θεώρηση για περίοδο 365 ημερών στην αρμονική συνάρτηση, προέρχεται από την ετήσια εποχικότητα των βροχοπτώσεων. Επειδή σε κάθε έτος η κατανομή των ημερών βροχόπτωσης μπορεί να διαφέρει ελαφρά από το προηγούμενο, το μέγιστο αντίστοιχα των παρατηρουμένων τιμών μπορεί να διαφέρει. Αυτή η διαφορά λοιπόν μάλλον οφείλεται σε έναν ασυνήθιστα υγρό μήνα μέσα στην υγρή περίοδο. Δεν ήταν μέσα στις προθέσεις κατά τη δημιουργία του μοντέλου, η πλήρης ταύτιση με τις κορυφές κάποιων συγκεκριμένων ετών, αλλά η καλύτερη δυνατή προσαρμογή του μοντέλου στο φυσικό σύστημα, ώστε να είναι αξιοποιήσιμο για προσομοίωση μελλοντικής κατάστασης. Ακόμα, εάν μια παρατηρουμένη τιμή υδραυλικού ύψους φαίνεται να είναι κατά πολύ εκτός των αναμενόμενων διακυμάνσεων, αυτό μπορεί να αποδοθεί σε κάποιο σφάλμα κατά τη μέτρηση ή την καταγραφή του υδραυλικού ύψους.

Στο πηγάδι 2 παρατηρείται μια μεγάλη απόσταση ανάμεσα στις προσομοιωμένες τιμές και τις παρατηρούμενες, βάσει και των αποτελεσμάτων φαίνεται πως η αρχική θεώρηση προσομοίαζε καλύτερα την κατάσταση αυτό όμως δεν ισχύει. Η αρχική θεώρηση έχει πολύ μικρό πλάτος που σημαίνει ότι μπορεί να λειτουργεί σαν μια ευθεία γραμμή με αυξομείωση μικρής περιοδικότητας μειώνοντας το μέσο σφάλμα ενώ δεν συμπεριλαμβάνει τις μακροπρόθεσμες τάσεις που παρουσιάζονται. Δεδομένης και της θέσης του πηγαδιού κοντά στο αλλουβιακό στρώμα και σε περιοχή έντονης γεωργικής δραστηριότητας, η απρόβλεπτη συμπεριφορά ίσως είναι δικαιολογημένη λόγω υψηλής αβεβαιότητας.

Στο πηγάδι 3 φαίνεται ίσως περισσότερο από κάθε άλλο η βελτίωση σε σχέση με την αρχική θεώρηση, καθώς οι προσομοιωμένες τιμές ακολουθούν τις παρατηρούμενες με μικρές αποκλίσεις.

Στο πηγάδι 4 φαίνεται επίσης σημαντική βελτίωση στην προσομοίωση. Το πρώτο στοιχείο που συνηγορεί σε αυτό είναι πως οι προσομοιωμένες τιμές από την αρχική θεώρηση και παρατηρούμενες τιμές παρουσιάζουν διαφορά φάσης, η οποία διορθώθηκε. Έπειτα φαίνεται πως η προσαρμογή της τάσης βοήθησε στην προσομοίωση αρχικών και τελικών τιμών οι οποίες παρουσιάζουν μεγάλα σφάλματα στην αρχική θεώρηση.

Στο πηγάδι 5 βάσει των δεικτών αξιολόγησης (Bias, MAE, RMSE) είναι αμφίβολη η βελτίωση της προσομοίωσης μετά την βαθμονόμηση, καθώς όλα τα σφάλματα κυμαίνονταν στο ίδιο επίπεδο. Το πηγάδι 5 είναι πολύ κοντά στην οριακή συνθήκη εκροής και σε αρκετά πηγάδια των οποίων οι ρυθμοί άντλησης είναι αβέβαιοι, έτσι είναι απαραίτητη περαιτέρω διερεύνηση για την επικρατούσα κατάσταση σε εκείνο το σημείο.

4.2.8 Περιγραφή και Πρόβλεψη

Τέλος πρέπει να συζητηθεί η ικανότητα του μοντέλου να περιγράφει και να προβλέπει μελλοντικές καταστάσεις στην περιοχή μελέτης. Σαν περιγραφικό μοντέλο, και με δεδομένους τους περιορισμούς που προέρχονται από τον μικρό αριθμό μετρήσεων για υδραυλικά ύψη και των λίγων ποσοτικών δεδομένων για τα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης όπως υδραυλικές αγωγιμότητες στρωμάτων και αναλυτικές χρονοσειρές αντλήσεων, παρόλα αυτά θεωρείται πως είναι αρκετά ικανό ώστε να αναδείξει αρκετούς λανθάνοντες μηχανισμούς οι οποίοι λειτουργούν εντός της περιοχής ενδιαφέροντος. Το πιο τρανταχτό παράδειγμα είναι πως η προσθήκη των τάσεων επηρέασε θετικά την απόκριση του μοντέλου στα σφάλματα, ενώ μέσα από την χρονική μετατόπιση, εγέρθηκαν επιπλέον θέματα αναφορικά με την υδρογεωλογία της περιοχής. Αυτό που υπολείπεται από την περιγραφή είναι το φαινόμενο της υφαλμύρισης το οποίο βέβαια μπορεί να εισαχθεί στο μοντέλο μέσα από το FEFLOW, και προτείνεται για μελλοντική έρευνα.

Αναφορικά με την προβλεπτική ικανότητα του μοντέλου, οι περιορισμοί οφείλονται στα μετεωρολογικά δεδομένα εισόδου καθώς και στις περιορισμένες μετρήσεις υδραυλικού ύψους σε μια χρονική περίοδο. Το μοντέλο δέχεται σαν αρχικά δεδομένα εισόδου εξαμηνιαίες βροχοπτώσεις επομένως θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σαν εργαλείο πρόβλεψης με δεδομένα εισόδου κάποιο κλιματικό μοντέλο. Ωστόσο το κλιματικό μοντέλο θα επηρεάσει τα πλάτη των οριακών συνθηκών χωρίς όμως να επηρεάσει τις τάσεις που έχουν παρατηρηθεί και έχουν βαθμονομήσει το μοντέλο μέχρι στιγμής. Καθώς η περίοδος του χρόνου προσομοίωσης ταυτίζεται χρονικά με σημαντικές αλλαγές στην κατάσταση της περιοχής μελέτης, δηλαδή τη δημιουργία του φράγματος της Φανερωμένης, γεγονός που θα αλλάξει την συμπεριφορά των γενικότερων τάσεων. Επομένως πριν οποιαδήποτε προσπάθεια πρόβλεψης απαιτείται μια επανεξέταση και επαναβαθμονόμηση τάσεων οι οποίες προϋποθέτουν πολλαπλά σετ μετρήσεων σε διαφορετικές χρονικές περιόδους αν όχι σε μια συνεχόμενη χρονική σειρά έτσι ώστε να γίνει μια γενικότερη ανάλυση των τάσεων όπως παρουσιάστηκαν στη μεθοδολογία.

5 Συμπεράσματα

Αρχικά πρέπει να σημειωθεί ότι η προσέγγιση Πλησιέστερου Πηγαδιού υπερτερεί αυτής του Μέσου όρου αναφορικά με τα κριτήρια αξιολόγησης όπως έχουν παρατεθεί παραπάνω. Αυτό είναι μια ένδειξη για τη φύση του συστήματος και το πως αλληλοεπιδρούν οι οριακές συνθήκες με τα υδραυλικά ύψη. Συγκεκριμένα φαίνεται πως η επίδραση των οριακών συνθηκών στα υδραυλικά ύψη συναρτάται της απόστασης. Αυτό μπορεί να φανεί στα διαφορετικά προφίλ υδραυλικών υψών που παρουσιάζονταν μέσα στις δοκιμές ή ακόμα και από τις μεταβολές στα ραβδοδιαγράμματα των σφαλμάτων. Αυτό ίσως έχει αξία για επιπλέον έρευνα στο πλαίσιο της ανάλυσης τάσεων οι οποίες συνυπολογίζουν και την παράμετρο της απόστασης από την οριακή συνθήκη, οι οποίες βέβαια δεν θα έχουν γραμμική μορφή ή θα λαμβάνουν υπόψη μέσους όρους καθώς στα πλαίσια διαφόρων δοκιμών διαπιστώθηκε ότι αυτή η ανάλυση συγκλίνει στην προσέγγιση μέσου όρου. Ίσως με την χρήση ενός νευρωνικού δικτύου μπορεί να επιτευχθεί κάτι ανάλογο αλλά δεν μπορούν να επιβεβαιωθούν ακόμα τέτοιες υποθέσεις.

Αναφορικά με την προσομοίωση των υδραυλικών υψών του κάθε πηγαδιού μεμονωμένα, η συμπεριφορά των πηγαδιών 1, 3 και 4 ήταν αρκετά ικανοποιητική. Έτσι σε μεγάλο βαθμό η περιγραφή της βόρειας οριακής συνθήκης θεωρείται ότι έχει φτάσει σε ένα εξαιρετικό επίπεδο ικανότητας να προσομοιώνει το φυσικό σύστημα. Αναφορικά με τη νότια οριακή συνθήκη, που επηρεάζει περισσότερο το πηγάδι 2, θεωρείται πως η προβληματική που παρουσιάζεται οφείλεται στον προσδιορισμό του πλάτους της αρμονικής συνάρτησης. Η πιο απλή λύση όσο αναφορά αυτό είναι η τοποθέτηση ενός μετεωρολογικού σταθμού στην οροσειρά των Αστερουσίων, αν και αυτό θα εξαλείψει την αβεβαιότητα ως προς την βροχόπτωση χωρίς να εξασφαλίζει πλήρως ότι θα βελτιωθεί το μοντέλο. Το πηγάδι 5 είναι ίσως το πιο απρόβλεπτο πηγάδι βάσει των παρατηρημένων τιμών του, ενώ η έλλειψη τόσο υδρογεωλογικών παραμέτρων όπως η υδραυλική αγωγιμότητα και ο ρυθμός άντλησης των γύρω πηγαδιών εισάγει τεράστια αβεβαιότητα, η οποία θα επηρεάσει την δημιουργία της εξίσωσης περιγραφής της οριακής συνθήκης εξόδου. Έτσι η μόνη βελτίωση που επιτεύχθηκε είναι η προσαρμογή της τάσης, και προτείνεται η εγκατάσταση τουλάχιστον ενός επιπλέον πηγαδιού ανατολικά, ώστε να ελεγχθεί και η περίπτωση η συγκεκριμένη οριακή συνθήκη κατά περιόδους να τροφοδοτεί και κατά περιόδους να αφαιρεί νερό από την περιοχή μελέτης.

Ένα ακόμα βασικό εμπόδιο που έπρεπε να αντιμετωπιστεί κατά την δημιουργία και την βαθμονόμηση του μοντέλου ήταν η έλλειψη ποσοτικών δεδομένων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα ήταν η βιβλιογραφική τιμή των υδραυλικών αγωγιμοτήτων, οι οποίες ήταν αρκετές τάξεις μεγέθους μικρότερες από τις τελικά βαθμονομημένες και προκειμένου να προσδιοριστούν έπρεπε να γίνουν πολλαπλές δοκιμές μέσα στο FEFLOW. Επομένως, πέρα από τη συστηματική μέτρηση των υδραυλικών υψών στα πηγάδια παρατήρησης, ένα πολύ χρήσιμο δεδομένο θα ήταν και η τοπική υδραυλική αγωγιμότητα, η οποία μπορεί να προσδιοριστεί με δοκιμές άντλησης.

Τέλος ίσως υπάρχει αξία στην επανεξέταση των πιο βασικών παραδοχών που έγιναν κατά την αρχή της κατασκευής του μοντέλου, δηλαδή ποιοι μετεωρολογικοί σταθμοί επηρεάζουν υδρολογικά την περιοχή μελέτης και πώς η διαθεσιμότητα των παρατηρήσεων κατεύθυνε την μαθηματική ανάλυση που έγινε. Εδώ πρέπει να σημειωθεί, πως δεν γίνεται αναφορά σε πλήρη επανεξέταση του μοντέλου καθώς είναι αρκετά περιγραφικό και ακριβές, αλλά σε μια πιο εκτενή βαθμονόμηση όσο αναφορά την υδρολογία και τα διαθέσιμα βροχομετρικά δεδομένα. Ουσιαστικά προτείνεται για μελλοντική έρευνα μια βαθμονόμηση με σκοπό την περαιτέρω αποσύνδεση του μοντέλου από σημειακές παρατηρήσεις βροχόπτωσης και την διεύρυνσή του σε κλίμακα πεδίου. Αυτό βέβαια απαιτεί πολλαπλούς

μετεωρολογικούς σταθμούς τόσο εντός όσο και εκτός της περιοχή μελέτης έτσι όπως έχει οριστεί. Στο πλαίσιο λοιπόν των μετρήσεων από το πεδίο, πέρα από τον μετεωρολογικό σταθμό στην οροσειρά των Αστερουσίων, ίσως υπάρχει αξία στην τοποθέτηση ενός σταθμού παρατήρησης του χιονιού, σχετικά με τον ρυθμό τήξης, στην Οροσειρά του Ψηλορείτη, έτσι ώστε να εξακριβωθεί αν όντως η βόρεια οριακή συνθήκη επηρεάζεται από την εποχική τήξη του χιονιού όπως έχουν δείξει τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης.

6 Βιβλιογραφία

- Aghlmand, Abbasi, 2019. Application of MODFLOW with Boundary Conditions Analyses Based on Limited Available Observations: A Case Study of Birjand Plain in East Iran. *Water* 11, 1904. <https://doi.org/10.3390/w11091904>
- Dokou, Z., Dettoraki, M., Karatzas, G.P., Varouchakis, E.A., Pappa, A., 2017. Utilizing Successive Linearization Optimization to Control the Saltwater Intrusion Phenomenon in Unconfined Coastal Aquifers in Crete, Greece. *Environ. Model. Assess.* 22, 115–128. <https://doi.org/10.1007/s10666-016-9529-z>
- FEFLOW White Papers Vol.1, 2009.
- Huo, Z., Feng, S., Kang, S., Mao, X., Wang, F., 2011. Numerically modelling groundwater in an arid area with ANN-generated dynamic boundary conditions. *Hydrol. Process.* 25, 705–713. <https://doi.org/10.1002/hyp.7858>
- Kopsiaftis, G., Mantoglou, A., Giannouloupoulos, P., 2009. Variable density coastal aquifer models with application to an aquifer on Thira Island. *Desalination* 237, 65–80. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.12.023>
- Kourakos, G., Mantoglou, A., 2013. Development of a multi-objective optimization algorithm using surrogate models for coastal aquifer management. *J. Hydrol.* 479, 13–23. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.10.050>
- Kourgialas, N.N., Dokou, Z., Karatzas, G.P., Panagopoulos, G., Soupios, P., Vafidis, A., Manoutsoglou, E., Schafmeister, M., 2016. Saltwater intrusion in an irrigated agricultural area: combining density-dependent modeling and geophysical methods. *Environ. Earth Sci.* 75, 15. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4856-y>
- Lollino, G., Arattano, M., Rinaldi, M., Giustolisi, O., Marechal, J.-C., Grant, G.E. (Eds.), 2015. *Engineering Geology for Society and Territory - Volume 3*. Springer International Publishing, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-09054-2>
- Masch, F.D., Denny, K.J., 1966. Grain size distribution and its effect on the permeability of unconsolidated sands. *Water Resour. Res.* 2, 665–677. <https://doi.org/10.1029/WR002i004p00665>
- Munusamy, S.B., Dhar, A., 2016. Can We Remove Secular Terms for Analytical Solution of Groundwater Response under Tidal Influence? *ArXiv160508145 Phys.*
- Panagopoulos, G., Giannakakos, E., Manoutsoglou, E., Steiakakis, E., Soupios, P., Vafidis, A., 2017. Definition of inferred faults using 3D geological modeling techniques: A case study in Tympaki Basin in Crete, Greece. *Bull. Geol. Soc. Greece* 47, 605. <https://doi.org/10.12681/bgsg.11087>
- Paparrizos, S., Maris, F., Matzarakis, A., 2016. Integrated analysis of present and future responses of precipitation over selected Greek areas with different climate conditions. *Atmospheric Res.* 169, 199–208. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.10.004>
- Rabinowitz, D.D., Gross, G.W., Holmes, C.R., 1977. Environmental tritium as a hydrometeorologic tool in the Roswell basin, New Mexico, II. Tritium patterns in groundwater. *J. Hydrol.* 32, 19–33. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(77\)90115-9](https://doi.org/10.1016/0022-1694(77)90115-9)

Stergiou, M., 2021. Προσομοίωση της υπόγειας ροής στην περιοχή Τυμπακίου Κρήτης, με χρήση του μοντέλου FEFLOW. Technical University of Crete.

Vafidis, A., Andronikidis, N., Hamdan, H., Kritikakis, G., Economou, N., Panagopoulos, G., Soupios, P., Steiakakis, E., Manoutsoglou, E., 2016. The CLEARWATER project: preliminary results from the geophysical survey in Tympaki, Crete, Greece. Bull. Geol. Soc. Greece 47, 1338.
<https://doi.org/10.12681/bgsg.10916>

Αναζήτηση αποτελεσμάτων - Κεντρική Σελίδα ΕΛΣΤΑΤ - ELSTAT [WWW Document], 2011. (accessed 7.14.21).

Κριτσωτάκης, Μ., 2009. Διαχείριση Υδατικών Πόρων Μεσαράς Κρήτης (Thesis). Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

Σταθάτου, Π.-Μ., 2011. Ανάπτυξη γεωργικής-αρδευτικής πολιτικής με τη χρήση του Υδατικού Αποτυπώματος. Εφαρμογή στην πεδιάδα Μεσσαρά Κρήτης. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Παραρτήματα

Παράρτημα 1: Αλγόριθμος Συσχέτιση Υδραυλικού Ύψους - Αθροιστικής Βροχόπτωσης

```
clear Rfull
for n=0:40
    clear c
    for i=1:size(wellsfull,1)
        for j=1:size(precipitation,1)
            if wellsfull(i,1)==precipitation(j,1)
                try
                    c(i,1)=sum(precipitation(j-n:j,2));
                catch
                    c(i,1)=NaN;
                end
            end
        end
    end
    for m=1:5
        % Gia olous tous vroxometrikous
        % Ypologismos syntelesti sisxetisis

R1=corrcoef(wellsfull(~isnan(wellsfull(:,m+1))&~isnan(c),m+1),c(~isnan(wellsfull(:,m+1))&~isnan(c),1));
        % Krata sintelesti se enan megalο pinaka
        Rfull(m,n+1)=R1(1,2);
    end
end
for i=1:5
    figure()
    plot(0:n,Rfull(i,:))
    savename=['Well ',num2str(i),'.fig'];
    titlestr=['Well ',num2str(i),' correlation with rainfall
stations'];
    title(titlestr)
    hold on
    xlabel('Days of cummulative rainfall')
    ylabel('Correlation coefficient')
    saveas(gcf,savename,'fig');
end
```

Παράρτημα 2: Αλγόριθμος Υπολογισμού Σφαλμάτων

```
load('errorcalcinputmod4.mat')
%subroutine for error calculation from mean average simulations
for i=1:5
    for k=1:size(wellsfull,1)
        for j=1:size(simulatedma,1)
            if simulatedma(j,1)~=0
                if simulatedma(j,1)==wellsfull(k,1)
                    masimperror(k,i)=simulatedma(j,i+1)-wellsfull(k,i+1);
                    maabserror(k,i)=abs(masimperror(k,i));
                    masqerror(k,i)=(simulatedma(j,i+1)-wellsfull(k,i+1))^2;
                end
            end
        end
    end
end
end
% calculations for mean simple error,mean absolute error and root mean
```

```

% square error respectively
mameansimperror=mean(masimperror,'omitnan');
mameanabseerror=mean(maabseerror,'omitnan');
marmse=sqrt(mean(masqerror,'omitnan'));
%subroutine for error calculation from near well simulations
for i=1:5
    for k=1:size(wellsfull,1)
        for j=1:size(simulatednw,1)
            if simulatednw(j,1)~=0
                if simulatednw(j,1)==wellsfull(k,1)
                    nwsimperror(k,i)=simulatednw(j,i+1)-wellsfull(k,i+1);
                    nwabseerror(k,i)=abs(nwsimperror(k,i));
                    nwsqerror(k,i)=(simulatednw(j,i+1)-
wellsfull(k,i+1))^2;
                end
            end
        end
    end
end
% calculations for mean simple error,mean absolute error and root mean
% square error respectively
nwmeansimperror=mean(nwsimperror,'omitnan');
nwmeanabseerror=mean(nwabseerror,'omitnan');
nwrmsse=sqrt(mean(nwsqerror,'omitnan'));
%subroutine for error calculation from initial simulations
for i=1:5
    for k=1:size(wellsfull,1)
        for j=1:size(initial,1)
            if initial(j,1)~=0
                if initial(j,1)==wellsfull(k,1)
                    insimperror(k,i)=initial(j,i+1)-wellsfull(k,i+1);
                    inabseerror(k,i)=abs(insimperror(k,i));
                    insqerror(k,i)=(initial(j,i+1)-wellsfull(k,i+1))^2;
                end
            end
        end
    end
end
% calculations for mean simple error,mean absolute error and root mean
% square error respectively
inmeansimperror=mean(insimperror,'omitnan');
inmeanabseerror=mean(inabseerror,'omitnan');
inrmse=sqrt(mean(insqerror,'omitnan'));
figure()
bar([nwrmsse',marmse',inrmse'])
legend('nwrmsse','marmse','inrmse')
figure()
bar([nwmeansimperror',mameansimperror',inmeansimperror'])
legend('nwbias','mabias','inbias')
figure()
bar([nwmeanabseerror',mameanabseerror',inmeanabseerror'])
legend('nwmeanabseerror','mameanabseerror','inmeanabseerror')
avers=[mean(inmeansimperror),mean(inmeanabseerror),mean(inrmse);mean(mamea
nsimperror),mean(mameanabseerror),mean(marmse);mean(nwmeansimperror),mean(
nwmeanabseerror),mean(nwrmsse)]
bell=[(abs(avers(1,:))-
abs(avers(2,:)))/abs(avers(1,:))*100;(abs(avers(1,:))-
abs(avers(3,:)))/abs(avers(1,:))*100]

```

Παράρτημα 3: Μετρήσεις Υδραυλικού Ύψους

Days	Well 1	Well 2	Well 3	Well 4	Well 5
0	68	41	51	74	36
30	NaN	NaN	66	NaN	NaN
306	NaN	NaN	52	NaN	NaN
334	71,2	68	60	78	NaN
365	NaN	NaN	53	NaN	51
395	NaN	NaN	67	NaN	NaN
426	94,8	77	72	88	NaN
456	NaN	NaN	67	NaN	45
487	NaN	NaN	79	NaN	46
518	94,5	80	79	98	47
548	NaN	NaN	88	NaN	46
579	NaN	NaN	73	NaN	46
609	75,67	75	61	88	45
640	NaN	NaN	58	NaN	44
671	NaN	NaN	57	NaN	44
699	74,07	57	60	84	44
730	NaN	NaN	60	NaN	45
760	NaN	NaN	70	NaN	52
791	76,59	77	73	90	53
821	NaN	NaN	80	NaN	59
852	NaN	NaN	84	NaN	62
883	103,57	81	81	109	68
913	NaN	NaN	67	NaN	68
944	NaN	NaN	73	NaN	63
974	NaN	NaN	NaN	NaN	60
1005	76,62	74	58	106	61
1036	18,08	NaN	58	NaN	65
1064	75,80	55	68	105	66
1095	NaN	NaN	71	NaN	71
1125	NaN	74	70	NaN	75

1156	82,55	74	73	109	75
1186	NaN	58	79	NaN	76
1217	NaN	79	86	NaN	75
1248	99,85	84	86	116	74
1278	NaN	80	78	NaN	74
1309	NaN	61	71	NaN	NaN
1491	79,30	NaN	76	112	75
1522	97,51	NaN	85	117	75
1552	NaN	NaN	77	NaN	NaN
1614	NaN	NaN	78	NaN	NaN