

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για την ολοκλήρωση της μεταπτυχιακής μου εργασίας θα ήθελά να ευχαριστήσω τον αξιότιμο κ. Ν. Μαμάση, Λέκτορας στο Ε.Μ.Π. για την επιλογή του θέματος, τις πολύτιμες συμβουλές του και την βέλτιστη συνεργασία που είχαμε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσης.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές μου και φίλους του ίδιου μεταπτυχιακού προγράμματος για τη βοήθεια και της στήριξή τους στην επιτυχή ολοκλήρωση της μεταπτυχιακής μου εργασίας.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εκπονήθηκε και ολοκληρώθηκε από την Πέππα Μαρία-Βαλασία, διπλωματούχο αγρονόμο και τοπογράφο μηχανικό Ε.Μ.Π.. Η μεταπτυχιακή εργασία σχετίζεται με την εφαρμογή χωρικών μεθόδων παρεμβολής για τη μελέτη της ταχύτητας ροής σε μία διατομή. Θα μπορούσε κανείς να θέσει την ταχύτητα ροής ως ένα απτό φαινόμενο και περισσότερο αφηρημένο σε σχέση με τα επιφανειακά φαινόμενα, όπου η τιμή της ταχύτητας ροής αλλάζει από θέση σε θέση κατά μήκος της διατομής, ενώ θεωρητικά στα όρια προσεγγίζεται ίση με το μηδέν. Άρα η προσέγγιση της χρήσης των μεθόδων παρεμβολής από μετρημένα σημεία με γνωστές τιμές ταχύτητας είναι δυνατόν να βοηθήσει τον μελετητή ώστε το φαινόμενο να γίνει περισσότερο κατανοητό.

Ουσιαστικά με την εργασία αυτή προτείνεται η συχνότερη χρήση των *GIS* για την απεικόνιση χωρικών δεδομένων όπως είναι η ταχύτητα ροής ποταμού, από την στιγμή που σε πολλά Πανεπιστήμια του εξωτερικού πλέον η έρευνα και η χρήση των εργαλείων που τα *GIS* προσφέρουν στις μεθόδους παρεμβολής έχει γίνει ήδη πιο συστηματική, σε σχέση με τη χώρα μας.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	viii
ABSTRACT.....	x
Κεφάλαιο 1: Γενική τοποθέτηση του προβλήματος.....	1
1.1. Αντικειμενικός στόχος και διάθρωση της εργασίας.....	1
1.2. Περιγραφή της θέσης και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της διατομής.....	3
1.3. Μέτρηση του πεδίου ταχυτήτων με τη χρήση μυλίσκου.....	6
1.3.1. Μετρήσεις ΕΥΔΑΠ.....	8
1.3.2. Εφαρμογή της θεωρητικής μεθόδου γραφικά.....	11
1.4. Βιβλιογραφική επισκόπηση.....	13
Κεφάλαιο 2: Μοντέλα χωρικής παρεμβολής (Interpolation Methods).....	19
2.1. Εισαγωγή.....	19
2.2. Γενική περιγραφή των μεθόδων παρεμβολής που θα χρησιμοποιηθούν στην εφαρμογή της εργασίας.....	20
2.2.1. Inverse Distance Weighting - IDW.....	21
2.2.2. Local & Global Polynomial Interpolation.....	23
2.2.3. Radial Basis Functions.....	24
2.2.4. Μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής - Kriging.....	24
2.2.5. Triangulated Irregular Network – TIN.....	31
Κεφάλαιο 3: Εφαρμογή των μεθόδων παρεμβολής, στο ArcGIS – Desktop.....	32
3.1. Δημιουργία δεδομένων στο ArcGIS – Desktop.....	33
3.2. Εφαρμογή της μεθόδου IDW.....	35
3.2.1. Εισαγωγή παραμέτρων.....	35
3.2.2. Προϊόντα της εφαρμογής της μεθόδου IDW – Παρατηρήσεις.....	38
3.3. Εφαρμογή των γενικευμένων και τοπικών μεθόδων εκτίμησης – Global & Local Polynomial Interpolation.....	47
3.3.1. Παράμετροι και προϊόντα της εφαρμογής Global & Local Polynomial Interpolation – Παρατηρήσεις.....	47
3.4. Εφαρμογή των μεθόδων Radial Basis Functions.....	49
3.4.1. Παράμετροι και προϊόντα της εφαρμογής Radial Basis Functions – Παρατηρήσεις.....	49
3.5. Εφαρμογή της μεθόδου Kriging.....	52
3.5.1. Εισαγωγή παραμέτρων.....	52
3.5.2. Προϊόντα της εφαρμογής Kriging – Παρατηρήσεις.....	53
3.6. Εφαρμογή της μεθόδου TIN.....	58
3.6.1. Παράμετροι και προϊόντα της εφαρμογής TIN – Παρατηρήσεις.....	58

3.7. Εφαρμογή της μεθόδου Topo to Raster	59
3.7.1. Παράμετροι και προϊόντα της εφαρμογής – Παρατηρήσεις.....	59
Κεφάλαιο 4: Συμπεράσματα – Προτάσεις	61
4.1. Περαιτέρω ανάλυση και σύγκριση των μεθόδων μεταξύ τους	61
4.1.1. Προσδιορισμός του συντελεστή τραχύτητας της διατομής.....	61
4.1.2. Επιλογή βέλτιστου αποτελέσματος	63
4.1.3. Δοκιμαστική εφαρμογή παρεμβολής με λιγότερες μετρήσεις.....	66
4.1.4. Συμπεράσματα από την ανάλυση των μεθόδων παρεμβολής.....	72
4.2. Μελλοντική εργασία	74
Βιβλιογραφικές αναφορές.....	75

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1 Θέση υδρομετρήσεων,(πηγή:[10], Google Earth).....	3
Εικόνα 1.2 Γέφυρα επαρχιακής οδού πάνω από τη διώρυγα της Καρδίτσας (πηγή:[10])	4
Εικόνα 1.3 Τυπική διάταξη μολίσκου,(πηγή:[2])	7
Εικόνα 1.4 Εφαρμογή μεθόδου Kriging για την περιβαλλοντική παρακολούθηση υδάτων (πηγή:[7])	14
Εικόνα 1.5 Εφαρμογή μεθόδου Spline για τη δημιουργία ψηφιακού αναγλύφου του πυθμένα (πηγή: [6]).....	15
Εικόνα 1.6 Εφαρμογή μεθόδου Spline για τη δημιουργία του προφίλ ταχυτήτων στις τρεις διατομές (πηγή:[6]).....	16
Εικόνα 1.7 Εφαρμογή μεθόδου IDW για τη δημιουργία του ψηφιακού αναγλύφου του βυθού και του πεδίου ταχυτήτων ροής κατά μήκος του αγωγού (πηγή: [5])	17
Εικόνα 1.8 Απεικόνιση της παροχής στο τμήμα του ρέματος σε μορφή αρχείου raster (πηγή: [5])	17
Εικόνα 3.1 Περιβάλλον εργασίας ArcMap	33

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1 Υπολογιστικό φύλλο εκτίμησης της παροχής και τον συντελεστή τραχύτητας K από ΕΥΔΑΠ (πηγή:[10])	9
Πίνακας 1.2 Υπολογιστικό φύλλο εκτίμησης της παροχής και τον συντελεστή τραχύτητας K από ΕΥΔΑΠ συνέχεια του Πίνακα 1.1 (πηγή:[10])	9
Πίνακας 1.3 Υπολογιστικό φύλλο εκτίμησης της παροχής και τον συντελεστή τραχύτητας K από ΕΥΔΑΠ συνέχεια του Πίνακα 1.2 (πηγή:[10]) ...	10
Πίνακας 1.4 Εφαρμογή της θεωρητικής μεθόδου μέτρησης ταχύτητας και εκτίμηση της παροχής.....	12
Πίνακας 3.1 Συντεταγμένες των σημείων του πολυγώνου της διατομής	33
Πίνακας 3.2 Συντεταγμένες των σημείων της δειγματοληψίας.....	34
Πίνακας 3.3 Πίνακας παραμέτρων για κάθε παραλλαγή της μεθόδου IDW	37
Πίνακας 3.4 Πίνακας παραμέτρων για κάθε παραλλαγή της μεθόδου Kriging	52
Πίνακας 4.1 Πίνακας προσδιορισμού συντελεστή τραχύτητας από κάθε παραγόμενη επιφάνεια παρεμβολής.....	62

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1	Τυπική διατομή της διώρυγας της Καρδίτσας (πηγή: [10])	5
Σχήμα 1.2	Θεωρητική μέθοδος μέτρησης πεδίου ταχυτήτων για την εκτίμηση της παροχής (πηγή: [2]).....	6
Σχήμα 1.3	Γραφική απεικόνιση της διατομής – σκαρίφημα όπου απεικονίζονται και τα επιμέρους τμήματα με κόκκινη διακεκομμένη γραμμή , με την τελεία συμβολίζεται η εκάστοτε σημειακή μέτρηση.	11
Σχήμα 2.1	Διάγραμμα βάρους – απόστασης μεθόδου IDW (πηγή: [11]).....	22
Σχήμα 2.2	Πειραματικό ημιμεταβλητόγραμμα (πηγή: [11])	28
Σχήμα 2.3	Δειγματικό και πειραματικό ημιμεταβλητόγραμμα	29
Σχήμα 3.1	Περιβάλλον εισαγωγής παραμέτρων για την μέθοδο παρεμβολής IDW	35
Σχήμα 3.2	Διάγραμμα RMSPE – παράμετρος p	38
Σχήμα 3.3	Ταξινόμηση της επιφάνειας παρεμβολής σε 10 ισομερείς κλάσεις.....	39
Σχήμα 3.4	Υπόμνημα συμβόλων με τα οποία απεικονίζεται η επιφάνεια παρεμβολής – IDW	40
Σχήμα 3.5	Προϊόντα της IDW-1a	40
Σχήμα 3.6	Προϊόντα της IDW-1b.....	41
Σχήμα 3.7	Προϊόντα της IDW-1c	41
Σχήμα 3.8	Προϊόντα της IDW-1d.....	42
Σχήμα 3.9	Προϊόντα της IDW-2a.....	42
Σχήμα 3.10	Προϊόντα της IDW-2b	43
Σχήμα 3.11	Προϊόντα της IDW-2c	44
Σχήμα 3.12	Προϊόντα της IDW-2d.....	44
Σχήμα 3.13	Προϊόντα της IDW-3a	45
Σχήμα 3.14	Προϊόντα της IDW-3b.....	45
Σχήμα 3.15	Προϊόντα της IDW-3c	46
Σχήμα 3.16	Προϊόντα της IDW-3d.....	46
Σχήμα 3.17	Παραμετροποίηση για τη local interpolation	47
Σχήμα 3.18	Επιφάνεια παρεμβολής global interpolation.....	48
Σχήμα 3.19	Επιφάνεια παρεμβολής local interpolation.....	49
Σχήμα 3.20	Παράθυρο εισαγωγής παραμέτρων – τύπος Regularize Spline.....	50
Σχήμα 3.21	Επιφάνεια παρεμβολής Regularize Spline	51
Σχήμα 3.22	Επιφάνεια παρεμβολής multiquadric function	51
Σχήμα 3.23	Επιφάνεια παρεμβολής Ordinary Kriging α περίπτωση	54
Σχήμα 3.24	Επιφάνεια παρεμβολής Ordinary Kriging β περίπτωση.....	54
Σχήμα 3.25	Διαγράμματα ημιμεταβλητότητας αριστερά Ordinary Kriging α περίπτωση, δεξιά Ordinary Kriging β περίπτωση.....	55
Σχήμα 3.26	Επιφάνεια παρεμβολής Simple Kriging α περίπτωση	56
Σχήμα 3.27	Επιφάνεια παρεμβολής Simple Kriging β περίπτωση	57
Σχήμα 3.28	Επιφάνεια παρεμβολής Simple Kriging γ περίπτωση	57

Σχήμα 3.29 Επιφάνεια παρεμβολής TIN.	58
Σχήμα 3.30 Επιφάνεια παρεμβολής topo to raster.	59
Σχήμα 4.1 Σύγκριση μοντέλων παρεμβολής μέσω Cross Validation Comparison.	64
Σχήμα 4.2 Αφαίρεση επιφανειών παρεμβολή – Raster Calculation	66
Σχήμα 4.3 Πολλαπλή εφαρμογή της μεθόδου IDW για σημειακό δείγμα 10, 12, 15 και 17 μετρήσεων.....	68
Σχήμα 4.4 Πολλαπλή εφαρμογή της μεθόδου IDW για σημειακό δείγμα 20, 22, 25 και 27 μετρήσεων.....	69
Σχήμα 4.5 Διαγραμματική απεικόνιση της τιμής της μέσης ταχύτητας του πεδίου ροής ως προς τον αριθμό των σημείων που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία της επιφάνειας παρεμβολής	70
Σχήμα 4.6 Διαγραμματική απεικόνιση του υπολοίπου της μέσης ταχύτητας που προκύπτει από την εκάστοτε επιφάνεια από τη μέση ταχύτητα της επιφάνειας παρεμβολής των 30 σημειακών μετρήσεων	71

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΓΕΩΣΤΑΤΙΣΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΣΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΜΕΣΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΡΟΗΣ ΣΕ ΤΡΑΠΕΖΟΕΙΔΗ ΔΙΑΤΟΜΗ

Μαρία – Βαλασία Πέππα

Αγρονόμος Τοπογράφος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία έχει αντικειμενικό στόχο την εκτίμηση της μέσης τιμής της ταχύτητας ροής στην τραπεζοειδή διατομή της διώρυγας της Καρδίτσας του Βοιωτικού Κηφισού. Για την εκτίμηση της μέσης τιμής της ταχύτητας ροής εφαρμόζονται οι χωρικές μέθοδοι παρεμβολής που τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (*GIS*) προσφέρουν. Συνολικά εφαρμόζονται 23 διαφορετικές προσεγγίσεις των 11 διαφορετικών χωρικών μεθόδων του λογισμικού *ArcGIS Desktop*.

Αρχικά μελετάται η θεωρητική μέθοδος που υπάρχει στη βιβλιογραφία, σύμφωνα με την οποία η διατομή χωρίζεται σε τμήματα για τον προσδιορισμό της συνολικής παροχής που εισέρχεται από την συγκεκριμένη διατομή. Για τον προσδιορισμό της τιμής αυτής γίνεται η χρήση των μετρημένων σημείων της διατομής, υδρομετρήσεις με μυλίσκο που είχαν εκπονηθεί το 2003 από ομάδα του Ε.Μ.Π. σε συνεργασία με ομάδα της ΕΥΔΑΠ. Η ΕΥΔΑΠ εφαρμόζοντας τη θεωρητική μέθοδο οδηγήθηκε σε συγκεκριμένα αποτελέσματα για την μέση ταχύτητα ροής, την συνολική παροχή και τον συντελεστή τραχύτητα στη διατομή. Τα αποτελέσματα αυτά θα αποτελέσουν μέτρο σύγκρισης για τη μελέτη των αποτελεσμάτων που θα προκύψουν από την εφαρμογή των χωρικών μεθόδων παρεμβολής.

Εφαρμόζοντας τις εκάστοτε μεθόδους παρεμβολής προκύπτουν συνεχείς επιφάνειες με μέγεθος κελιού 0.01m όπως ορίζεται από την συγγραφέα, κάθε κελί αντιστοιχεί σε μία διαφορετική τιμή της ταχύτητας. Τα χαρακτηριστικά των *GIS* μας επιτρέπουν να προσδιοριστεί για κάθε μία επιφάνεια παρεμβολής η μέση τιμή των ταχυτήτων για όλα τα κελιά. Με τις εξισώσεις του *Manning* εκτιμάται και η συνολική παροχή και ο συντελεστής τραχύτητας.

Οι περισσότερες μέθοδοι παρεμβολής ακολουθούν την τεχνική του πλησιέστερου γείτονα με βάρος για την απεικόνιση των τοπικών χωρικών συσχετίσεων στο προφίλ της ταχύτητας όπου και είναι και η κυρίως τεχνική που η *IDW* μέθοδος χρησιμοποιεί. Κάποιες προσαρμόζουν πάνω σε αυτήν την τεχνική της τάσης που τα σημειακά δεδομένα εμφανίζουν (*Global interpolation*) και κάποιες άλλες τον προσανατολισμό (*Kriging*) ως βασικό κριτήριο χωρικής συσχέτισης μεταξύ των τιμών του δείγματος.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα αυτά με εκείνα που η ΕΥΔΑΠ εκτίμησε διαπιστώνεται ότι οι διαφορές στις τιμές είναι μικρές. Υπάρχουν μέθοδοι περισσότερες από μία που προσεγγίζουν τον συντελεστή τραχύτητας με διαφορά καλύτερη και από 1%.

σε σχέση με την τιμή της ΕΥΔΑΠ. Θεωρώντας ότι η ακρίβεια της μεθόδου που η ΕΥΔΑΠ ακολούθησε είναι δεδομένη και στηρίζεται στους μαθηματικούς υπολογισμούς, οι γεωστατιστικές μεθόδους διευκολύνουν το χρήστη στο ζήτημα χρόνου, στο οπτικό αποτέλεσμα της παραγόμενης επιφάνειας και του υπολογισμού της μέσης ταχύτητας ροής. Επιπλέον παρατηρείται ότι η χρήση *GIS* βελτιώνει τη διαδικασία εκτίμησης γιατί η δουλειά πεδίου είναι δυνατόν να μειωθεί χρονικά μιας που και με δέκα σημεία υδρομέτρησης αντί των τριάντα που είναι η αρχική δειγματοληψία της συγκεκριμένης εφαρμογής, τα αποτελέσματα της χωρικής παρεμβολής στον υπολογισμό της μέσης ταχύτητας ροής είναι εξίσου ικανοποιητικά. Σίγουρα για μελλοντική εργασία απαιτείται να ερευνηθεί περαιτέρω πως πρέπει να κατανέμονται τα σημεία της δειγματοληψίας ανάλογα με τη διατομή του υδατορέματος και κυρίως πως συμπεριφέρεται η ταχύτητα ροής στα όρια της εκάστοτε διατομής. Παρά ταύτα καταλήγοντας, οι γεωστατιστικές μέθοδοι προσφέρουν γρήγορα οπτικά αποτελέσματα για μία πρώτη προσέγγιση της μέσης τιμής της ταχύτητας ροής σε μία διατομή υδατορέματος.

ABSTRACT

APPLICATION OF THE GEOSTATISTICAL INTERPOLATION METHODS FOR ESTIMATING THE MEAN FLOW VELOCITY VALUE IN A TRAPEZOIDAL CROSS-SECTION

Maria – Valassia Peppas Rural and Survey Engineer, N.T.U.A.

Introduction

The spatial distribution of flow velocity is a fundamental characteristic of a river channel. Predicting the velocity profile by exploiting the progress of the Geographical Information System – GIS will be a useful tool for the engineers who work on hydrological, hydraulic, environmental and other similar issues. The main objective of this project is to estimate the mean value of the flow velocity in a specific trapezoidal cross-section of a river, using geostatistical spatial interpolation methods. Exploiting the spatial interpolation features of GIS a velocity vertical profile at the specified cross-section will be produced, by interpolating collected current velocity data. This optical representation of the velocity vertical profile will be used to calculate the mean value of the flow velocity, the total amount of discharge (volume of water passing through a cross section in the river in a unit of time) and the coefficient of roughness of the river, by using the Manning's formula.

Description of Data – Study area

A team of the National University of Athens of the section of the postgraduate program "Science and Technology of Water resources" held in Civil Engineer School and a team of EYDAP take 30 measurements of flow velocity in the Karditsa's river canal at 29-01-2003. The river canal of Karditsa is about 1,5km away from the Karditsa's tunnel that leads to the Yliki basin. These velocity measurements were used from EYDAP's team during a research project, which is correlated with the management of the water resource network in Athens, in order to estimate the value of the coefficient of roughness of the Karditsa's trapezoidal canal. The measurements were taken in three different depth levels, about 21%, 63% and 84% of the whole river current depth, which was 2.55m at the specific period of time. Knowing the geometrical characteristics of the typical cross-section of this canal (water level – m , slope of gradient of the stream bed – J , hydraulic radius – $R[m]$, wetted perimeter – $P[m]$, cross-sectional area – $A[m^2]$), following the procedure for calculating the overall discharge ($Q[m^3sec^{-1}]$) and using the Manning's formula, the EYDAP's team estimated the roughness coefficient (K or n) of the canal.

Procedure for measuring discharge by dividing the cross section into vertical parts

The method for discharge measurement which is globally used according to the bibliography requires special equipment to travel a fixed distance along the stream and at fixed depth levels. It is known that velocity varies approximately as a parabola from zero at the channel bottom to a maximum near the surface. It has been determined empirically that for most channels the velocity at six-tenths of the total depth below the surface is a close approximation to the mean velocity at the vertical line. However, the average of the velocities at two-tenths and eight – tenths depth below the surface on the same vertical line provides a more accurate value of the mean velocity at that vertical line.

Velocity also varies across a channel and measurements must, therefore, be made at several points across the channel. The depth of the river varies across its width, so the usual practice is to divide the cross-section of the stream into a numbers of vertical parts and measure velocity at each of these. No section should include more 10% of the total discharge. The formula for discharge is bases on the assumption that the average velocity measured at a vertical line in each part is valid for a rectangle that extends half of the distance to the verticals on each side of it, as well as throughout the depth at the vertical.

Applying these formulas for each vertical part, EYDAP's team estimate the below results:

1. the mean velocity of this cross-section equals with $U=2.097\text{m/sec}$
2. the total discharge in this cross-section equals with $Q=61.59\text{m}^3/\text{sec}$
3. the roughness coefficient of the canal in this cross-section equals with $n=0.0171$ or $K=1/n=58.57$

The first application that is described in the current project is the application of the above method for the discharge estimation in a graphic environment. In particular, it is used the AutoCAD software so as the cross-section to be drawn. The drawing commands help to divide the cross-section into vertical parts easily without using mathematical formulas. The start point of the x and y axis is the place where the bottom of the cross-section trims the left side of the cross-section of the river. The x-axis values represent the distances starting from the above point (0, 0) and the y-axis values represent the depth from the bottom to the surface of the cross-section. Thus, the mean velocity of each vertical part is calculated graphically and the results, that are different from the results of the team of EYDAP, are shown below:

1. the mean velocity of this cross-section equals with $U=2.198\text{m/sec}$
2. the total discharge in this cross-section equals with $Q=60.76\text{m}^3/\text{sec}$

3. the roughness coefficient of the canal in this cross-section equals with $n=0.0172$ or $K=1/n=58.21$

This 60% divergence between the two mean values results from the different method and the experience of the current user. So, the scope is to diminish this divergence by using a GIS spatial interpolation method for estimating the mean flow velocity.

Description of the spatial interpolation features that the ArcGIS Desktop contains

The process of developing raster data sets from sample data points is called interpolation. ArcGIS Desktop contains a toolbar called Geostatistical Analyst, which is used in this project so as all the interpolation methods that the toolbar contains to be applied. There are three groups of interpolation methods:

1. the local methods (Triangulated Irregular Network – TIN, Splines formulas – Radial Basis Functions, Inverse Distance Weighting, IDW, Local Polynomial Interpolation)
2. the global methods (Global Polynomial Interpolation, Fourier analysis)
3. the geostatistical methods (Kriging, Inverse Distance Weighting, IDW)

In general global methods use all control points to predict the values at unknown points. Local methods on the other hand use only a sample of the control points to determine the unknown values. The most common local methods are inverse distance weighted IDW and splining. Geostatistical methods include a measure of uncertainty in predicting unknown values. Kriging is the most common geostatistical method; the advantage is that the analyst can also derive a raster showing the certainty of the predicted values. IDW interpolation assumes that the value at any unknown point is directly proportional to the distance from known sample points. The greater the distance from a sample point, the less influence that point has on the predicted value. One disadvantage of IDW is that it will not predict any values outside the bounds of the known sample points. In other words, the maxima and the minima predicted by IDW will be the maxima and the minima of the Known sample points. Spline interpolation uses the sample points to determine a mathematical equation that fits the surface through all known sample points with a minimum of curvature. A major disadvantage is that the tendency for there to be overshoots in data poor areas. Overshoots occur when the interpolation predicts values that are unreasonably beyond the limits do the data. Kriging begins with a spatially correlated portion of a surface, combines it with any trend in the data, and then adds a random error term. An advantage to Kriging is that a raster containing the certainty of the predicted values can be generated. It should probably be avoided for the data sets exhibiting random behavior, because it will attempt to fit trend that simply are not present.

Applying all spatial interpolation methods to the trapezoidal cross-section

The main analysis of the project involved using the Geostatistical Analyst toolbar to create different velocity rasters. The 0.01m cell – size is a good compromise in that it provided good resolution while smaller cell sizes did not produce an appreciable visual change in the results by comparison.

During the application of each method, it is necessary to analyze the different parameters that each one includes. Concerning the IDW method there are seven parameters to use in order to make the velocity surface; the number of the neighbors to be include, the least numbers of the neighbors, the shape type (circle/ellipse or divided circle/ellipse in four/eight sections), the major/minor axis of the cycle/ellipse and the optimize power value. The last parameter influences the weighting of the measured location's value on the prediction location's value; that is, as the distance increases between the measured sample locations and the prediction location, the weight that the measured point will have on the prediction will decrease exponentially. The optimal value is determined by minimizing the root-mean-square prediction error (RMSPE), which is a summary statistic quantifying the error of the prediction surface. Changing the above values of these parameters the resulting surface is quite different. Thus, the IDW method was applied 12 times and 12 different surfaces were derived. The most appreciable visual difference is resulting from the different shape that is used; circle or ellipse.

The same parameters are used when applying the local or global interpolation methods, their values that were used were the same that the geostatistical analyst toolbar suggested. It is seemed from the results that the global interpolation generates a trend to the whole cross-section and the values of the velocity are higher than the values at sample points. In the local interpolation this phenomenon is not so extended, but on the other hand the prediction error is closed to zero in both methods.

Applying the RBF methods, two different types were used; the regularize Spline and the multiquadric function. The parameters for both types follow the values the geostatistical toolbar suggests and are the same to the above parameters of IDW method. From the results it is seemed that the regularize Spline derived a different surface comparing with the other applied methods but the multiquadric function derives a wrong surface due to the negative velocities values that predicts inside the cross-section.

Concerning the Kriging application, there are two types which are used in the project; the ordinary and the simple Kriging, the first one assumes that the mean value of the surface is an unknown constant, but the simple Kriging uses a known mean value. The mean value that was used in the simple kriging interpolation was the mean value of the measured data of the sample points that equals with 2.2957m/sec. Except for the above parameters (IDW interpolation method), kriging use either semivariograms, transformations and remove trends and it can allow measurement error. The semivariograms depicts the spatial autocorrelation of the measured sample points. Once

each pair of locations is plotted a model is fits through them and there are certain characteristics that are commonly used to describe these models. Semivariogram functions quantify the assumption that things nearby tend to be more similar than things that are farther apart, also measure the strength of the statistical correlation as a function of distance. Changing the transformations between the five applied types of kriging the semivariograms become different, therefore the resulting surfaces have completely different velocity distribution.

Afterwards the TIN method is applied and it seems that in the boundary of the cross-section the values approach zero, this is because TIN does not have the capability to derive a surface a surface outside of the sample points. TIN is usually applied for interpolating elevation data, for the same interpolation ArcGIS suggests another method called topo to raster. This method, according the bibliography, is optimized to have computational efficiency of local interpolation methods such as IDW, without losing the surface continuity of Kriging and Spline interpolation methods. For that reason this method is also applies in the project and as a result the velocity distribution surface suits with the surfaces that IDW (circle), Ordinary Kriging and regularized Spline derives.

Calculation the mean value of the velocity - comparison with the results of EYDAP

The main scope of the project is to estimate the mean velocity value, that's why the mean value is calculated for each one of the derived surfaces using helpful tools of ArcGIS and then the total discharge (Q , equation-2) and the roughness coefficient (K , equation-1) are estimated using the below equations:

$$K = \frac{1}{n} = \frac{Q}{\sqrt{J}AR^{2/3}} \quad (1) \qquad Q = \frac{\sqrt{J}}{n} AR^{2/3} \quad (2)$$

Between the twenty three different types of different methods that have been applied, 23 different mean velocity values have been estimated. For that reason it is required to choose some of the surfaces so as to lead in a unique mean velocity value. Thus, three criteria are determined:

1. The difference between the mean value of K of EYDAP estimation and the mean value of each derived surface should be less than 1%
2. The chosen derived surface should have the minimum prediction errors
3. The predicted values of the chosen derived surface should not be overestimated or underestimated comparing with the sample points.

An additional way to choose the best results is to use a technique called Cross Validation Comparison that Geostatistical Analyst toolbar suggests. Cross validation uses all of the data to estimate the autocorrelation model, then removes each data location, one

at a time, and predicts the associated data value using the remaining points. Geostatistical Analyst gives several graphs of the measurement values versus the predicted values such as a scatter plot of predicted versus measurement values. Comparing these graphs between the different surfaces helps to make an informed decision as to which model provides better predictions.

Another way to compare two surfaces is to make raster calculation between them abstracting the values of the first to the values of the second surface and as a result a new raster is created which depicts the differences in values visually.

Analyzing the results

After making all the above comparison we find that Simple Kriging, IDW (circle) and Topo to raster interpolation methods derive relative results either in velocity distribution or the mean velocity value and the K value. In this step further analyzing can be taken in order to determine how many should the sample data points be so as to derive satisfactory results. The geostatistical Analyst toolbar can apply each interpolation method using at least 10 measured points. Taking into account this statement one of the chosen interpolation methods – IDW - is applied repeatedly for 10, 12, 15, 17, 20, 22, 25 and 27 measured points in order to survey the differences. As a result of this analysis it is noticed that using 10 measured points the difference between the mean velocity value and the mean value derived from the surface of 30 sample data leads to about 7%, using 20 measurements this difference reaches 1%. This means that the field work can be faster and cheaper when measuring the least number of sample points without losing the reliability, because the percentage of 7% gives a value of roughness coefficient $K_{10}=65.91$ while $K_{20}=58.57$. For example a preliminary hydrology study that does not demand great precision the least number of 10 sample points could lead to relative results for the total discharge of this cross-section.

Conclusions

Overall, it is recommended to use the spatial interpolation methods in order to estimate the mean flow velocity value because it seems that these methods can derive equally reliable results as the theoretical method for measuring the total discharge dividing to parts. Furthermore using the GIS interpolation methods it is gained time from the field work and the procedure becomes cheaper. Who can assure that the experience of the user who calculates the total discharge using the theoretical method gives satisfactory results while the variety of spatial features of the geostatistical analyst gives lot information about the predicted points, their prediction error and depict the distribution of the phenomenon of the river flow velocity. It is obviously that which of the above methods is the suitable one for estimating river velocity, needs further research.

Κεφάλαιο 1: ***Γενική τοποθέτηση του προβλήματος***

1.1. Αντικειμενικός στόχος και διάθρωση της εργασίας

Ο αντικειμενικός στόχος της παρούσης μεταπτυχιακής εργασίας είναι ο προσδιορισμός της μέσης ταχύτητας ροής σε τραπεζοειδή διατομή ενός υδατορέματος με τη χρήση γεωστατιστικών μεθόδων χωρικής παρεμβολής. Με τις γεωστατιστικές μεθόδους χωρικής παρεμβολής προσδιορίζεται το προφίλ της ταχύτητας στη διατομή και εκτιμάται η μέση τιμή της.

Οι μέθοδοι χωρικής παρεμβολής βασίζονται σε μαθηματικές συναρτήσεις και στατιστικές αναλύσεις μιας δειγματοληψίας σημείων και δημιουργούν μία συνεχή χωρική επιφάνεια όπου σε κάθε θέση της προσδιορίζεται η τιμή της ταχύτητας ροής του υδατορέματος. Τα όρια της επιφάνειας αποτελούν τα γεωμετρικά όρια της διατομής του υδατορέματος και η δειγματοληψία σημείων είναι πρωτογενή δεδομένα σημειακών υδρομετρήσεων που έχουν εκπονηθεί από ομάδα του Ε.Μ.Π. για λογαριασμό της ΕΥΔΑΠ. Οι τεχνικές παρεμβολής ενσωματώνονται στα περισσότερα λογισμικά πακέτα των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών – *G.I.S* που κυκλοφορούν στην αγορά, στην παρούσα εργασία θα χρησιμοποιηθεί το *ArcGIS Desktop*, το οποίο διατίθεται στο εργαστήριο του μεταπτυχιακού προγράμματος. Εφαρμόζονται όλες οι τεχνικές παρεμβολής που το συγκεκριμένο λογισμικό προσφέρει και στην συνέχεια μελετώνται και συγκρίνονται τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει. Ουσιαστικά με την εξέλιξη των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών αποδεικνύεται ότι πλέον είναι δυνατόν να αποφεύγονται οι πολύωροι μαθηματικοί υπολογισμοί και οι εμπειρικές μέθοδοι προσδιορισμού της μέσης ταχύτητας ροής, συνεπώς αποφεύγονται και τα σφάλματα που τα προηγούμενα συνήθως προκαλούν. Αξιοποιώντας τα εργαλεία χωρικής παρεμβολής που τα *G.I.S* προσφέρουν είναι δυνατόν να εκτιμηθεί η μέση ταχύτητα ροής της συγκεκριμένης διατομής.

Ο αντικειμενικός στόχος της εργασίας ικανοποιεί και περαιτέρω στόχους στην συνέχεια, οπότε στην παρούσα εργασία, συγκεντρωτικά θα εκτιμηθούν, για το συγκεκριμένο υδατόρεμα στην συγκεκριμένη διατομή, τα παρακάτω μεγέθη:

1. η μέση ταχύτητα ροής
2. η συνολική παροχή που εισέρχεται από την διατομή
3. ο συντελεστής τραχύτητας με την σχέση του Manning

Τελικά τα αποτελέσματα θα συγκριθούν με τα αποτελέσματα που ομάδα της ΕΥΔΑΠ/Ε.Μ.Π. έχει εκτιμήσει για την συγκεκριμένη διατομή, θα προκύψουν μικρές αποκλίσεις στις τιμές των παραπάνω μεγεθών και έτσι με τον τρόπο αυτό προτείνεται

στην παρούσα εργασία η χρήση γεωστατιστικών εργαλείων του G.I.S στον προσδιορισμό του πεδίου ταχυτήτων ροής υδατορέματος.

Στο πρώτο κεφάλαιο της παρούσης περιγράφεται η θέση και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής για την οποία εφαρμόστηκε η εργασία. Επιπλέον περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο εκπονήθηκαν οι μετρήσεις της ταχύτητας από ομάδα του Ε.Μ.Π., ο τρόπος προσδιορισμού της μέσης τιμής, όπου ομάδα της ΕΥΔΑΠ εκτίμησε και εφαρμόζεται η ίδια τεχνική σε γραφικό περιβάλλον από την συγγραφέα της παρούσης. Στην τελευταία ενότητα του πρώτου κεφαλαίου παρουσιάζονται συνοπτικά οι εφαρμογές που ομάδες ξένων Πανεπιστημίων έχουν εκπονήσει και τα αποτελέσματα στα οποία καταλήγουν.

Στο δεύτερο κεφάλαιο της παρούσης περιγράφονται οι τεχνικές παρεμβολής χωρικών δεδομένων που χρησιμοποιούνται στο λογισμικό πακέτο *ArcGIS Desktop*, ο τρόπος που λειτουργεί η κάθε μία και ο τρόπος που εφαρμόζεται η κάθε μία. Θεωρήθηκε σκόπιμο να συμπεριληφθεί το θεωρητικό υπόβαθρο στο οποίο βασίζονται οι παραπάνω τεχνικές παρεμβολής στο παρόν κεφάλαιο ώστε τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από την εφαρμογή της εκάστοτε μεθόδου, να γίνουν κατανοητά και εύκολα συγκρίσιμα μεταξύ τους.

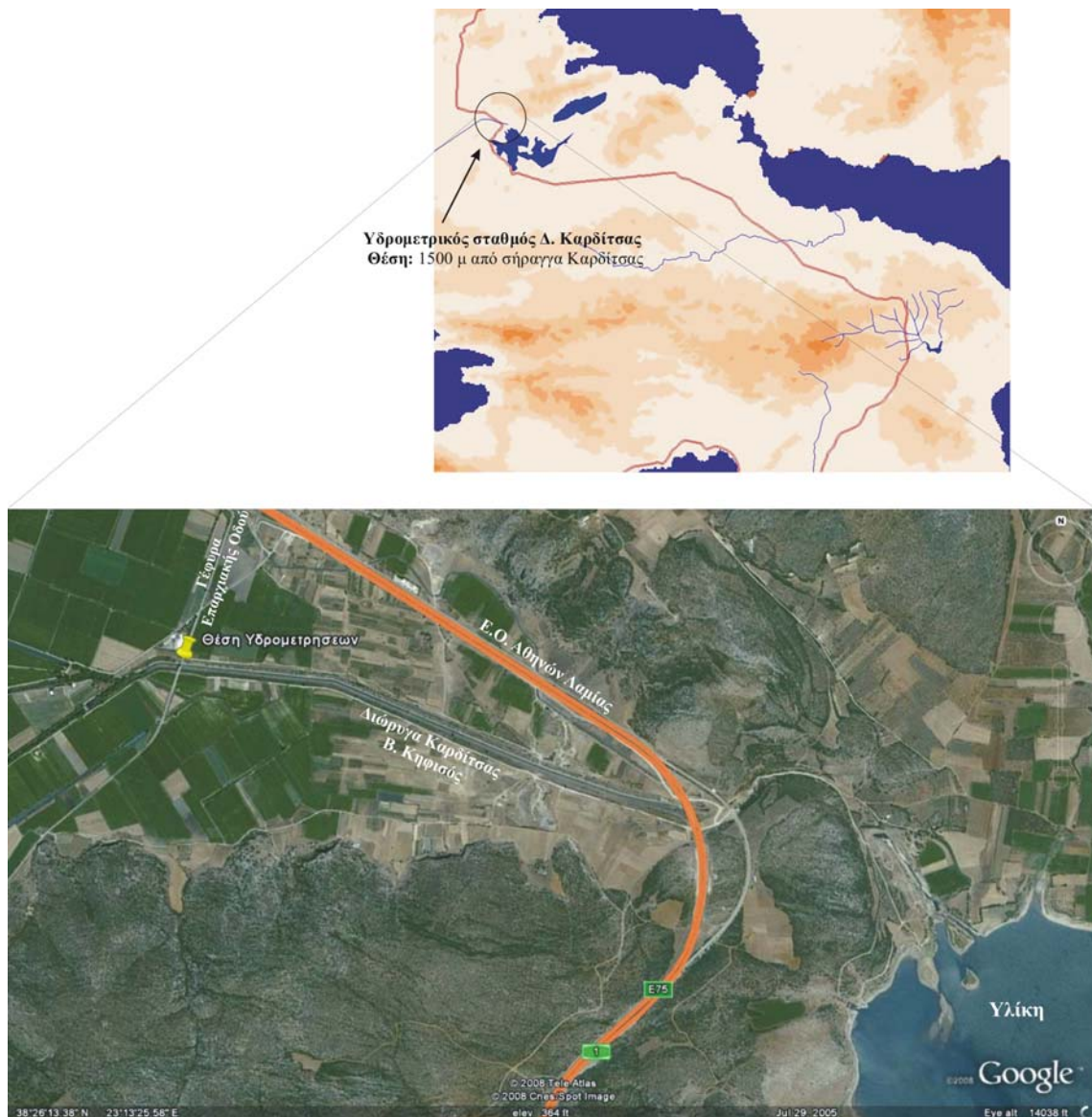
Στο τρίτο κεφάλαιο εφαρμόζεται ξεχωριστά η κάθε μία μέθοδος παρεμβολής του λογισμικού *ArcGIS Desktop* που έχει περιγραφεί στο δεύτερο κεφάλαιο, παράγονται οι αντίστοιχες επιφάνειες του πεδίου ταχυτήτων της διατομής και μελετώνται τα αποτελέσματα που προκύπτουν.

Στο τέταρτο τελευταίο κεφάλαιο προσδιορίζεται η μέση τιμή της ταχύτητας της ροής όπως προκύπτει από την κάθε μία μέθοδο παρεμβολής και συγκρίνεται με την τιμή που η ομάδα ΕΥΔΑΠ προσδιόρισε. Επιπλέον υπολογίζεται και ο εκάστοτε συντελεστής τραχύτητας που προκύπτει και επιλέγονται βάσει ορισμένων κριτηρίων οι βέλτιστες επιφάνειες που πιθανόν παρεμβάλλουν τις τιμές της ταχύτητας με τον καλύτερο τρόπο. Στην συνέχεια επαναλαμβάνεται η ίδια εφαρμογή με λιγότερα σημειακά δεδομένα και προκύπτουν τελικά συμπεράσματα. Στην τελευταία υποενότητα παρουσιάζονται οι στόχοι της εφαρμογής και η μελλοντική εργασία που είναι δυνατόν να γίνει για να βελτιωθεί η παρούσα εργασία και να προκύψει μία ολοκληρωμένη μέθοδος προσδιορισμού του πεδίου ταχύτητας ροής διατομής με χρήση γεωστατιστικών μεθόδων χωρικής παρεμβολής.

1.2. Περιγραφή της θέσης και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της διατομής

Στην ενότητα αυτή θα περιγραφεί σε ποια θέση έγιναν οι υδρομετρήσεις και για πιο λόγο και θα παρουσιασθεί μία σύντομη ιστορική αναδρομή για τις μετρήσεις που έχουν εκπονηθεί από την ΕΥΔΑΠ στη θέση αυτή.

Οι υδρομετρήσεις που θα χρησιμοποιηθούν ως πρωτογενή δεδομένα για την εφαρμογή των μεθόδων παρεμβολής, εκπονήθηκαν από την ομάδα Ε.Μ.Π. του Τομέα Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων έργων, στα πλαίσια του ερευνητικού έργου Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας που ανατέθηκε από την ΕΥΔΑΠ στο Ε.Μ.Π, και έχει στόχο την ανάπτυξη ενός συστήματος μέτρησης των υδρομετεωρολογικών μεταβλητών στις λεκάνες απορροής που συνδέονται με το υδροδοτικό σύστημα της Αθήνας (Ευήνου, Μόρνου, Βοιωτικού Κηφισού-Υλίκης και Μαραθώνα).^[10]



Εικόνα 1.1 Θέση υδρομετρήσεων, (πηγή: [10], Google Earth)

Οι υδρομετρήσεις έγιναν από τη γέφυρα της επαρχιακής οδού που οδηγεί στο Ακράϊφνιο σε απόσταση περίπου 1.500m. μακριά από την λίμνη Υλίκη, όπως απεικονίζεται στις εικόνες 1.1 και 1.2. Στο σημείο αυτό διέρχεται η διώρυγα της Καρδίτσας όπου η ΕΥΔΑΠ έχει εγκαταστήσει από το 1977 ένα συμβατικό σταθμηγράφο, η επιλογή της θέσης αυτής βασίστηκε στο γεγονός ότι εκεί ελέγχεται το σύνολο των απορροών του Βοιωτικού Κηφισού που εισρέουν στη λίμνη Υλίκη, όπου και αποτελούν πάνω από το 90% των συνολικών εισροών στη λίμνη. Το 1978 πραγματοποιήθηκε μία υδρομέτρηση με στόχο τον προσδιορισμό του συντελεστή τραχύτητας της διώρυγας. Με τη χρήση της σχέσης του Manning και γνωρίζοντας τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διώρυγας (διατομή, κλίση) ο συντελεστής τραχύτητας προσδιορίστηκε σε 55. Ο οριζοντιογραφικός προσδιορισμός του σταθμημέτρου και η διατομή τη διώρυγας στη θέση αυτή, επιβεβαιώθηκαν το 1989 με στοιχειώδεις τοπογραφικές εργασίες που έγιναν από ομάδα του ΕΜΠ. [10]

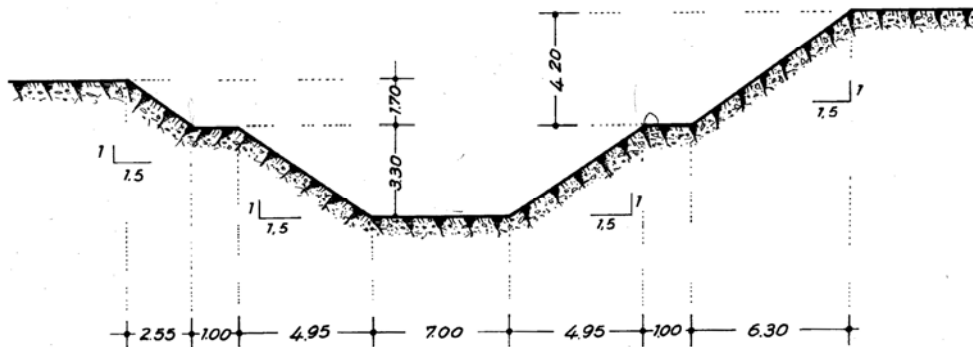


Εικόνα 1.2 Γέφυρα επαρχιακής οδού πάνω από τη διώρυγα της Καρδίτσας (πηγή:[10])

Στις 29-01-2003 εκπονήθηκαν μετρήσεις ταχύτητας από ομάδα της ΕΥΔΑΠ και του Ε.Μ.Π. με τη βοήθεια μυλίσκου που είχαν στόχο την εξοικείωση του προσωπικού της ΕΥΔΑΠ με τον εξοπλισμό και την τυποποίηση των διαδικασιών που απαιτούνται και τη μέτρηση της παροχής σε διάφορες στάθμες των υδατορέματος.^[10] Η διώρυγα της Καρδίτσας έχει τυποποιημένη διατομή όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 1.1., και γι αυτό συνήθως οι υδρομετρήσεις όταν διεξάγονται έχουν σαν κύριο στόχο την εκτίμηση του συντελεστή τραχύτητας.

Παρατηρώντας το σχήμα 1.1. γίνεται κατανοητό ότι πάνω από το βάθος των 3.30m. η γεωμετρία της διατομής παύει να είναι τραπεζοειδής και γίνεται σύνθετη, που ενδεχομένως να δυσχεραίνει τον προσδιορισμό του συντελεστή τραχύτητας. Βέβαια στις 29-01-2003 οι υδρομετρήσεις έγιναν μέχρι το βάθος των 3.30m. οπότε μόνο μέχρι αυτό το βάθος θα εκτιμηθεί και από την παρούσα εργασία το προφίλ ταχυτήτων της ροής στη διατομή.

Τυπική Διατομή Διώρυγας Καρδίτσας



Σχήμα 1.1 Τυπική διατομή της διώρυγας της Καρδίτσας (πηγή: [10])

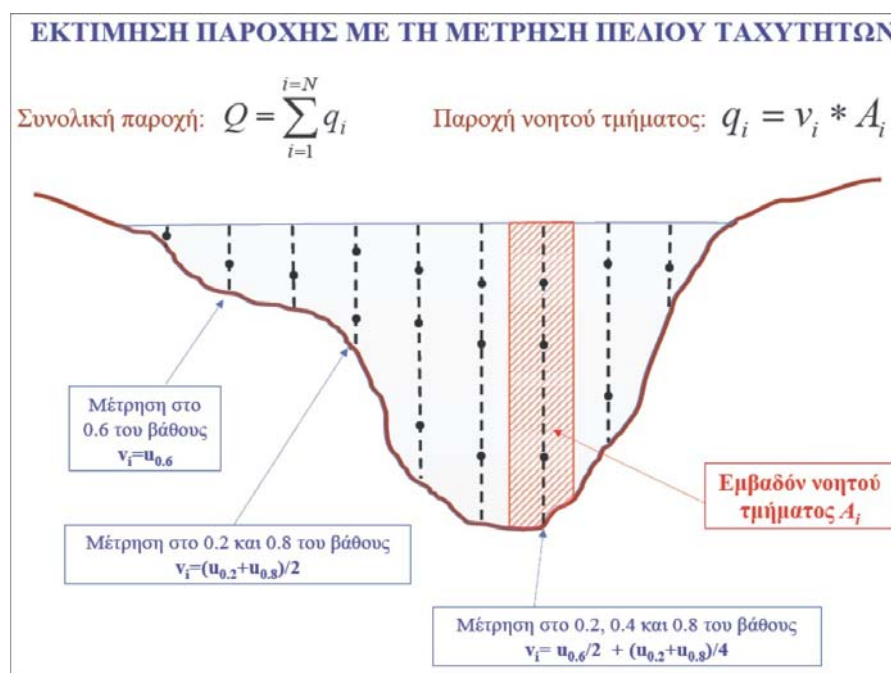
Συγκεκριμένα παραθέτουμε παρακάτω τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής κάτω από τη γέφυρα, στη θέση όπου διεξήχθησαν οι παρατηρήσεις, όπως δίδονται από την ΕΥΔΑΠ, τα οποία αποτελούν και τα δεδομένα της εφαρμογής που πρόκειται να ακολουθήσει στην παρούσα εργασία.

1. Στάθμη τραπεζοειδούς διατομής = 2.55m.
2. Κλίση πυθμένα (J_0) = 0.00070
3. Υδραυλική ακτίνα (R) = 1.709m.
4. Βρεχόμενη περίμετρος (Π) = 16.27m.
5. Εμβαδόν τραπεζοειδούς διατομής (A) = 27.81m²

1.3. Μέτρηση του πεδίου ταχυτήτων με τη χρήση μυλίσκου

Η μέθοδος του πεδίου ταχυτήτων με τη χρήση μυλίσκου είναι η πλέον γνωστή μέθοδος που χρησιμοποιείται στην Ελλάδα για τη μέτρηση της παροχής ενός υδατορέματος. Είναι γνωστό ότι η κατανομή της ταχύτητας σε ένα υδατόρεμα είναι μη ομοιόμορφη, με τη μεγαλύτερη τιμή της να εμφανίζεται στο μέγιστο βάθος και τη μηδενική της στα όρια. Η μεγαλύτερη ταχύτητα σημειώνεται λίγο κάτω από την επιφάνεια του νερού. Για τον υπολογισμό της παροχής σε μία συγκεκριμένη θέση του ποταμού με τη μέθοδο του πεδίου ταχυτήτων, απαραίτητη προϋπόθεση είναι η γνώση της γεωμετρίας της υγρής διατομής. Αυτή προσδιορίζεται χωρίζοντας νοητά τη διατομή σε N τμήματα, συνήθως ανά 1 έως 2m., ανάλογα με το πλάτος του υδατορέματος και την επιθυμητή ακρίβεια, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 1.2. Ένας εμπειρικός κανόνας διαχωρισμού της διατομής, είναι το πλήθος των τμημάτων να είναι τέτοιο ώστε να μη διέρχεται παροχή μεγαλύτερη από το 10% της συνολικής σε καθένα από αυτά. [3]

Για να οριστεί πλήρως η γεωμετρία κάθε τμήματος i , μετράται το ύψος των δύο κατακόρυφων πλευρών του και η μεταξύ τους απόσταση, που προκύπτει ως η διαφορά των οριζόντιων αποστάσεων των κατακόρυφων από ένα σταθερό σημείο της εκτίμησης των μετρήσεων στην όχθη. Με τη βοήθεια του μυλίσκου εκτιμάται η μέση ταχύτητα του υδατορέματος για το κάθε τμήμα κατακόρυφα, στο μέσο του διαστήματος των δυο κατακορύφων. [3]



Σχήμα 1.2 Θεωρητική μέθοδος μέτρησης πεδίου ταχυτήτων για την εκτίμηση της παροχής (πηγή: [2])

Ο μυλίσκος είναι μία έλικα που εμβαπτίζεται στη διατομή του υδατορέματος σε ένα συγκεκριμένο σημείο και περιστρέφεται υπό την επίδραση της ροής. (εικόνα 1.3) Η προσπέλαση και η μέτρηση μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους ανάλογα με τις συνθήκες ροής. Σε αβαθή ρέματα με μικρή ταχύτητα ροής η όλη διαδικασία γίνεται με

υδροβασία και η ανόρθωση του μολίσκου γίνεται με το χέρι, ενώ σε βαθιά πλωτά ρέματα μπορεί να χρησιμοποιηθεί βάρκα κατάλληλη εξοπλισμένη. ^[3]

Σε περιπτώσεις όπου αναπτύσσονται μεγάλες ταχύτητες ροής επιβάλλεται η μόνιμη εγκατάσταση εναέριας καλωδίωσης η οποία προσφέρει τη δυνατότητα προσπέλασης σε οποιοδήποτε σημείο της διατομής. Αναγκαία προϋπόθεση για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων είναι ο σωστός προσανατολισμός, οριζόντιος και παράλληλος με τη διεύθυνση ροής του άξονα περιστροφής του μολίσκου. ^[3]



Εικόνα 1.3 Τυπική διάταξη μολίσκου, (πηγή: [2])

Η ταχύτητα σε κάθε σημείο της κατακόρυφου προκύπτει ως γραμμική συνάρτηση της συχνότητας περιστροφής της έλικας στο σημείο αυτό. Ένα θέμα που προκύπτει είναι σε ποιο βάθος πρέπει να βυθιστεί ο μολίσκος έτσι ώστε η σημειακή ταχύτητα που θα μετρηθεί, να είναι αντιπροσωπευτική για την συγκεκριμένη κατακόρυφο και άρα για το αντίστοιχο τμήμα και διατομή, αφού είναι γνωστό ότι η τιμή της ταχύτητας αυξάνεται με την απόσταση από το οριακό στρώμα. Σύμφωνα με το λογαριθμικό νόμο προκύπτει ότι η μετρούμενη σημειακή ταχύτητα, είναι πιο αντιπροσωπευτική της μέσης, σε απόσταση από την επιφάνεια ίση με το 60% του βάθους. Συνεπώς αν λαμβάνεται μόνο μία μέτρηση σε κάθε κατακόρυφο, ο μολίσκος βυθίζεται σε βάθος ίσο με το 60% του συνολικού. ^[3]

Στην πράξη για μεγάλα βάθη υδατορέματος, είναι επιθυμητό να παίρνονται περισσότερες της μιας μετρήσεις σε κάθε κατακόρυφο, συνήθως δύο. Αυτές λαμβάνονται σε απόσταση από την επιφάνεια ίση με το 20% και 80% του βάθους αντίστοιχα. Η δε μέση ταχύτητα σε κάθε κατακόρυφο και άρα σε κάθε τμήμα, προσεγγίζεται ικανοποιητικά από το μέσο όρο αυτών των δύο τιμών και δίνεται από την εξίσωση όπως φαίνεται στο σχήμα 1.2. Στην περίπτωση που το βάθος του ρέματος είναι αρκετά μεγάλο και στην ίδια κατακόρυφο γίνονται τρεις σημειακές μετρήσεις, σε απόσταση από την

επιφάνεια ίση με το 20%, 60% και 80% και η μέση ταχύτητα δίνεται από την εξίσωση: (σχήμα 1.2) ^[3]

$$U_i = U_{0,6}/2 + (U_{0,2} + U_{0,8})/4$$

Συνεπώς η μέση παροχή κάθε νοητού τμήματος προκύπτει από την εξίσωση της συνέχειας ως γινόμενο της μέσης ταχύτητας U_i κάθε τμήματος και της διατομής του, ενώ η συνολική παροχή στη θέση της διατομής προσδιορίζεται ως το άθροισμα των επί μέρους παροχών. (σχήμα 1.2)

1.3.1. Μετρήσεις ΕΥΔΑΠ

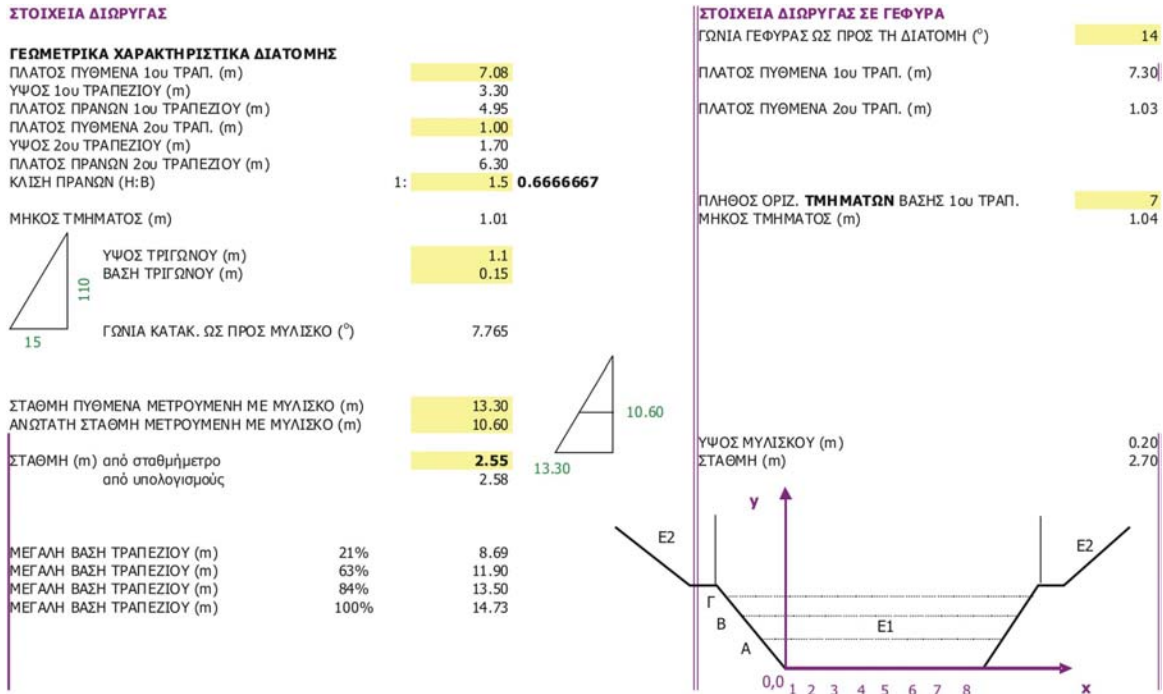
Η ομάδα της ΕΥΔΑΠ για την εκτίμηση της τιμής ακολουθεί μία σειρά από μαθηματικές συναρτήσεις, που περιγράφηκαν στο προηγούμενο εδάφιο, σε υπολογιστικό φύλλο του *Microsoft Excel*. Στην παρούσα ενότητα θα περιγραφεί εν συντομία η διεξαγωγή των υπολογισμών που εκπονήθηκαν από την ΕΥΔΑΠ, γιατί η περαιτέρω ανάλυση δεν απασχολεί τους στόχους της παρούσης, περισσότερο ενδιαφέρον έχει το αποτέλεσμα των υπολογισμών. Αρχικά χωρίζεται η διατομή σε τρία τραπέζια, εμβαδών Ε1, Ε2 και Ε3 αντίστοιχα, για το πρώτο τραπέζιο Ε1 προσδιορίζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του, μεγάλη, μικρή βάση και ύψος τραπέζιου, όπως φαίνονται στον Πίνακα 1.1. Στην συνέχεια προσδιορίζονται οι τιμές των συντεταγμένων των σημειακών μετρήσεων σε καθένα από τα τρία βάθη με αρχή το σημείο 0,0 όπως ορίζεται στο σχήμα του Πίνακα 1.1. Έτσι έχουμε:

- Α=21% του συνολικού βάθους δηλαδή Α=0.54m.
- Β=63% του συνολικού βάθους δηλαδή Β=1.61m.
- Γ=84% του συνολικού βάθους δηλαδή Γ=2.14m.

Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η γνωστή διαδικασία που περιγράφηκε στην παραπάνω ενότητα με το χωρισμό της διατομής σε κατακόρυφα τμήματα. Τα τμήματα που προκύπτουν από τους υπολογισμούς φαίνονται στον Πίνακα 1.2, όπου για κάθε τμήμα υπολογίζεται η απόσταση και η μέση ταχύτητα έχοντας ως δεδομένα τις στροφές της έλικας του μιλίσκου στο χρόνο. Στον Πίνακα 1.3. παρουσιάζονται τα αποτελέσματα, για κάθε κατακόρυφο τμήμα και συνολικά σε ολόκληρη τη διατομή οπότε και με τη βοήθεια της σχέσης *Manning* προσδιορίζεται ο συντελεστής τραχύτητας. Συνοψίζοντας έχουμε:

- Η μέση ταχύτητα της διατομής ισούται με $U=2.097\text{m/sec}$
- Η συνολική παροχή στη διατομή είναι ίση με $Q=61.59\text{m}^3/\text{sec}$

- Ο συντελεστής τραχύτητας της διατομής στη διάρρυγα ισούται με $n=0.0171$ ή $K=1/n=58.57$



Πίνακας 1.1 Υπολογιστικό φύλλο εκτίμησης της παροχής και τον συντελεστή τραχύτητας K από ΕΥΔΑΠ (πηγή:[10])

		ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΕ ΔΙΩΡΥΓΑ - ΑΝΗΓΜΕΝΕΣ ΤΙΜΕΣ						ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ		
ΠΡΩΤΟ ΤΡΑΠΕΖΙΟ		ΣΗΜΕΙΟ	ΒΑΘΟΣ	A/A	X	Ψ	v (m/sec)	ΜΕΤΑΞΥ ΔΙΑΤΟΜΩΝ	ΑΠΟΣΤΑΣΗ	ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΑ
20%	ΠΛΗΘΟΣ 8 ΣΗΜΕΙΩΝ:	A1	21%	1	0	0.54	1.90	0-1.2	1.80	1.80
		A2	21%	2	1.01	0.54	2.03	1.2-1.1	1.01	2.81
		A3	21%	3	2.02	0.54	2.12	1.1-1	1.01	3.83
		A4	21%	4	3.03	0.54	2.17	1-2	1.01	4.84
		A5	21%	5	4.05	0.54	2.26	2-3	1.01	5.85
		A6	21%	6	5.06	0.54	2.30	3-4	1.01	6.86
		A7	21%	7	6.07	0.54	2.34	4-5	1.01	7.87
		A8	21%	8	7.08	0.54	2.02	5-6	1.01	8.88
60%	ΠΛΗΘΟΣ 10 ΣΗΜΕΙΩΝ:	B1.1	63%	1	-1.01	1.61	1.89	6-7	1.01	9.89
		B1	63%	1	0	1.61	2.14	7-8	1.01	10.91
		B2	63%	2	1.01	1.61	2.24	8-8.1	1.01	11.92
		B3	63%	3	2.02	1.61	2.37	8.1-8.2	1.01	12.93
		B4	63%	4	3.03	1.61	2.41	8.2-0	1.80	14.73
		B5	63%	5	4.05	1.61	2.53			
		B6	63%	6	5.06	1.61	2.58			
		B7	63%	7	6.07	1.61	2.65			
80%	ΠΛΗΘΟΣ 12 ΣΗΜΕΙΩΝ:	B8	63%	8	7.08	1.61	2.66			
		B8.1	63%	8	8.09	1.61	2.47			
		Γ1.2	84%	2	-2.02	2.14	1.72			
		Γ1.1	84%	2	-1.01	2.14	1.91			
		Γ1	84%	1	0	2.14	2.09			
		Γ2	84%	2	1.01	2.14	2.23			
		Γ3	84%	3	2.02	2.14	2.33			
		Γ4	84%	4	3.03	2.14	2.37			
		Γ5	84%	5	4.05	2.14	2.49			
		Γ6	84%	6	5.06	2.14	2.52			
Γ7	84%	7	6.07	2.14	2.64					
Γ8	84%	8	7.08	2.14	2.67					
Γ8.1	84%	9	8.09	2.14	2.64					
Γ8.2	84%	9	9.10	2.14	2.18					

Πίνακας 1.2 Υπολογιστικό φύλλο εκτίμησης της παροχής και τον συντελεστή τραχύτητας K από ΕΥΔΑΠ συνέχεια του Πίνακα 1.1 (πηγή:[10])

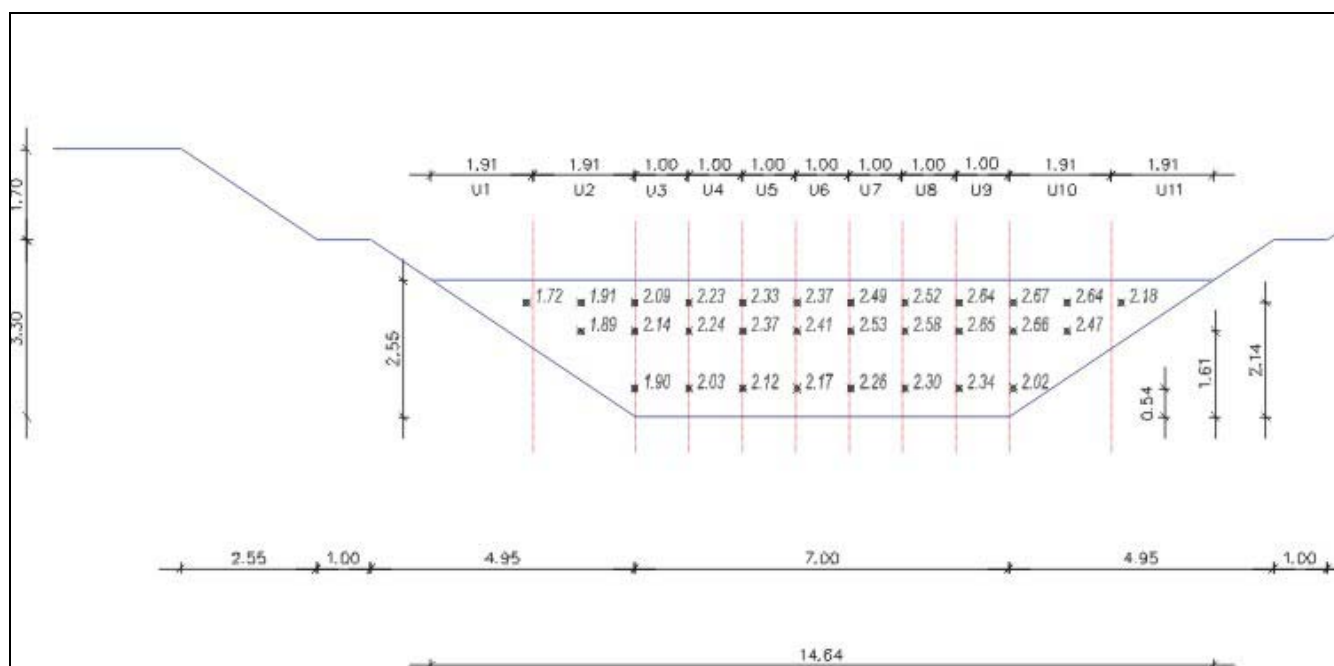
A/A	ΔΙΑΤΟΜΕΣ	ΒΑΘΟΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ %	ΣΤΡΟΦΕΣ ΜΥΛΙΣΚΟΥ 1	ΧΡΟΝΟΣ 1 (sec)	ΣΤΡΟΦΕΣ ΜΥΛΙΣΚΟΥ 2	ΧΡΟΝΟΣ 2 (sec)	Μ.Ο. ΣΤΡΟΦΩΝ	Μ.Ο. ΧΡΟΝΟΥ (sec)	ΣΤΡΟΦΕΣ / SEC	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΣΗΜΕΙΟΥ V (m/sec)	ΜΕΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ V _c (m/sec)	ΜΕΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΤΜΗΜΑΤΟΣ (V _c +V ₀)/2 (m/sec)	ΟΛΙΚΟ ΒΑΘΟΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ d (m)	(d ₁ +d ₂)/2 (m)	ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΔΙΑΤΟΜΩΝ ΣΤΗΝ Α.Σ.Υ. Β (m)	ΕΜΒΛΟ ΤΜΗΜΑΤΟΣ Σ Ε (m ²)	ΠΑΡΟΧΗ Q (m ³ /sec)
ΑΡΧΗ		84%								0.00	0.00						
Γ1.2	0-1.2	84%	334	50	320	50	327.0	50	6.54	1.72	1.72	0.86	1.20	0.60	1.80	1.08	0.93
Γ1.1		84%	365	50	360	50	362.5	50	7.25	1.91							
Β1.1	1.2-1.1	63%	362	50	357	50	359.5	50	7.19	1.89	1.90	1.81	1.88	1.54	1.01	1.56	2.82
Γ1		84%	399	50	395	50	397.0	50	7.94	2.09							
Β1		63%	404	50	409	50	406.5	50	8.13	2.14							
Α1	1.1-1	21%	364	50	356	50	360.0	50	7.20	1.90	2.07	1.98	2.55	2.21	1.01	2.24	4.44
Γ2		84%	424	50	422	50	423.0	50	8.46	2.23							
Β2		63%	423	50	427	50	425.0	50	8.50	2.24							
Α2	1-2	21%	386	50	387	50	386.5	50	7.73	2.03	2.19	2.13	2.55	2.55	1.01	2.58	5.48
Γ3		84%	442	50	442	50	442.0	50	8.84	2.33							
Β3		63%	450	50	452	50	451.0	50	9.02	2.37							
Α3	2-3	21%	402	50	405	50	403.5	50	8.07	2.12	2.30	2.24	2.55	2.55	1.01	2.58	5.78
Γ4		84%	451	50	448	50	449.5	50	8.99	2.37							
Β4		63%	460	50	457	50	458.5	50	9.17	2.41							
Α4	3-4	21%	410	50	413	50	411.5	50	8.23	2.17	2.34	2.32	2.55	2.55	1.01	2.58	5.98
Γ5		84%	471	50	475	50	473.0	50	9.46	2.49							
Β5		63%	481	50	480	50	480.5	50	9.61	2.53							
Α5	4-5	21%	428	50	430	50	429.0	50	8.58	2.26	2.45	2.40	2.55	2.55	1.01	2.58	6.18
Γ6		84%	477	50	482	50	479.5	50	9.59	2.52							
Β6		63%	490	50	490	50	490.0	50	9.80	2.58							
Α6	5-6	21%	435	50	438	50	436.5	50	8.73	2.30	2.50	2.47	2.55	2.55	1.01	2.58	6.38
Γ7		84%	506	50	497	50	501.5	50	10.03	2.64							
Β7		63%	502	50	504	50	503.0	50	10.06	2.65							
Α7	6-7	21%	442	50	448	50	445.0	50	8.90	2.34	2.57	2.53	2.55	2.55	1.01	2.58	6.53
Γ8		84%	505	50	511	50	508.0	50	10.16	2.67							
Β8		63%	507	50	504	50	505.5	50	10.11	2.66							
Α8	7-8	21%	382	50	385	50	383.5	50	7.67	2.02	2.50	2.54	2.55	2.55	1.01	2.58	6.54
Γ8.1		84%	504	50	498	50	501.0	50	10.02	2.64							
Β8.1	8-8.1	63%	469	50	470	50	469.5	50	9.39	2.47	2.56	2.53	1.88	2.21	1.01	2.24	5.66
Γ8.2	8.1-8.2	84%	412	50	417	50	414.5	50	8.29	2.18	2.18	2.37	1.20	1.54	1.01	1.56	3.68
ΤΕΛΟΣ	8.2-0	84%								0.00	0.00	1.09	0.00	0.60	1.80	1.08	1.18
			Propeler L-169477 σε 50 kgf										ΑΒΡΟΙΣΜΑ	m ³ /sec			61.59
			n<	k	a								ΑΒΡΟΙΣΜΑ	m ³ /h			221723.08
			0.83	0.251	0.011								E (m ²)		27.81	27.81	
			9.5	0.2631	0.001								Π (m)		16.27		
													R (m)		1.709		
													Jo		0.0007		
													n (sec*m ^{-1/3})		0.0171		
													K		58.57		

Πίνακας 1.3 Υπολογιστικό φύλλο εκτίμησης της παροχής και τον συντελεστή τραχύτητας K από ΕΥΔΑΠ συνέχεια του Πίνακα 1.2 (πηγή:[10])

1.3.2. Εφαρμογή της θεωρητικής μεθόδου γραφικά

Στην συνέχεια εφαρμόζεται η μέθοδος των πεδίων ταχυτήτων σε γραφικό περιβάλλον (*AutoCAD*) με βάση τα δεδομένα της 29-01-2003 τα οποία μετρήθηκαν από ομάδα του Ε.Μ.Π. και της ΕΥΔΑΠ.

Για τον προσδιορισμό της γεωμετρίας της διατομής και των επιμέρους τμημάτων της σχεδιάστηκε η διατομή στο γραφικό περιβάλλον *AutoCAD*. Στο γραφικό περιβάλλον είναι απλό, γρήγορο και εύκολο να απεικονιστούν οι αντίστοιχες αποστάσεις των οριζόντιων και κατακόρυφων τμημάτων i και να υπολογιστούν τα αντίστοιχα εμβαδά των επιμέρους τμημάτων. (Σχήμα 1.3)



Σχήμα 1.3 Γραφική απεικόνιση της διατομής – σκαρίφημα όπου απεικονίζονται και τα επιμέρους τμήματα με κόκκινη διακεκομμένη γραμμή, με την τελεία συμβολίζεται η εκάστοτε σημειακή μέτρηση.

Η αρχή των αξόνων ορίζεται η κάτω αριστερή γωνία του βάθους της τραπεζοειδούς διατομής. Όπως φαίνονται στο παραπάνω σχήμα 1.3 απεικονίζονται και τα σημειακά δεδομένα με βάση την αρχή των αξόνων και τις συντεταγμένες x , y , για κάθε ένα φαίνεται η μέτρηση της ταχύτητας με μορφή κειμένου, δίπλα στο εκάστοτε σημείο. Επομένως δημιουργούνται έντεκα (11) επιμέρους τμήματα και προσδιορίζεται για το καθένα η γεωμετρία τους γραφικά. Όλες οι μετρήσεις και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των τμημάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.4 στον οποίο υπολογίζεται με βάση τις παραπάνω εξισώσεις (εδάφιο 1.3, σχήμα 1.2) η μέση ταχύτητα των επιμέρους τμημάτων και η συνολική παροχή της διατομής.

Πίνακας 1.4 Εφαρμογή της θεωρητικής μεθόδου μέτρησης ταχύτητας και εκτίμηση της παροχής

ΑΡΙΘΜΟΣ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ	ΑΠΟΣΤΑΣΗ	ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΑ	ΒΑΘΟΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΣΤΟ ΣΗΜΕΙΟ ΜΕΤΡΗΣΗΣ (m)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΣΗΜΕΙΟΥ (m/sec)	ΜΕΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ (m/sec) ΑΝΑ ΒΑΘΟΣ	ΜΕΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΤΜΗΜΑΤΟΣ (m/sec)	ΕΜΒΑΔΟΝ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΑΙ (m ²)	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΟΧΗ ΤΜΗΜΑΤΟΣ q _i (m ³ /sec)
1	1.91	1.91	2.14	1.72	1.72	1.72	1.22	2.10
2	1.91	3.82	1.61 2.14	1.89 1.91	1.89 1.91	1.42	3.66	5.20
3	1.00	4.82	0.54 1.61 2.14	1.9 2.14 2.09	1.9 2.14 2.09	2.07	2.55	5.27
4	1.00	5.82	0.54 1.61 2.14	2.03 2.24 2.23	2.03 2.24 2.23	2.19	2.55	5.57
5	1.00	6.82	0.54 1.61 2.14	2.12 2.37 2.33	2.12 2.37 2.33	2.30	2.55	5.86
6	1.00	7.82	0.54 1.61 2.14	2.17 2.41 2.37	2.17 2.41 2.37	2.34	2.55	5.97
7	1.00	8.82	0.54 1.61 2.14	2.26 2.53 2.49	2.26 2.53 2.49	2.45	2.55	6.25
8	1.00	9.82	0.54 1.61	2.3 2.58	2.3 2.58	2.50	2.55	6.36
9	1.00	10.82	0.54 1.61 2.14	2.34 2.65 2.64	2.34 2.65 2.64	2.57	2.55	6.55
10	1.91	12.73	0.54 1.61 2.14	2.02 2.66 2.47 2.67 2.64	2.02 2.565 2.655	2.45	3.66	8.97
11	1.91	14.64	2.14	2.18	2.18	2.18	1.22	2.66
ΑΘΡΟΙΣΜΑ							m³/sec	60.76

Έπειτα από την εφαρμογή της μεθόδου προσδιορισμού της ταχύτητας που περιγράφεται στην παραπάνω ενότητα συγκρίνονται τα αποτελέσματα με αυτά που η ΕΥΔΑΠ προσδιόρισε.

Παρατηρούμε ότι ο κάθε χρήστης δημιουργεί τα επιμέρους τμήματα σύμφωνα με την κρίση του, επομένως η μέθοδος αυτή δεν οδηγεί στα ίδια αποτελέσματα. Βέβαια η απόκλιση της συνολικής παροχής που προσδιορίστηκε γραφικά (Πίνακας 1.4, $Q=60.76\text{m}^3/\text{sec}$) από την τιμή που η ΕΥΔΑΠ προσδιόρισε ($Q=61.59\text{m}^3/\text{sec}$ Πίνακας 1.3) δεν είναι μεγάλη. Συγκεκριμένα η απόκλιση είναι της τάξης του 0.6% λιγότερο δηλαδή και από 1%.

Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι απαιτείται να δημιουργηθεί μία μέθοδος που δεν θα υποχρεούται ο χρήστης να εκτελεί κάποια υπολογιστική μαθηματική διαδικασία

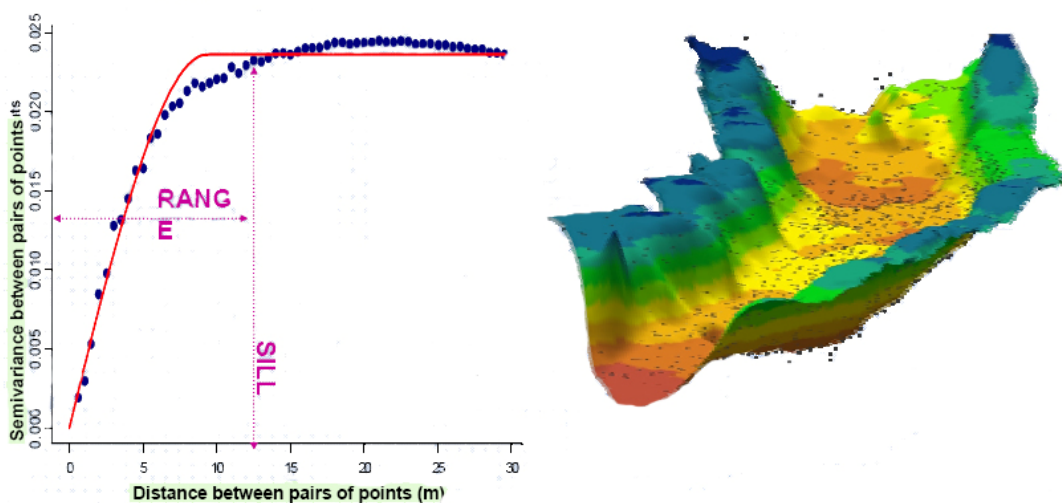
οπότε οι αποκλίσεις που θα προκύπτουν από τον εκάστοτε χρήστη θα είναι μικρότερες, άρα θα ελαχιστοποιείται το σφάλμα που υπεισέρχεται. Μία τέτοια μέθοδος είναι δυνατόν να θεωρηθεί η μέθοδος χωρικής παρεμβολής όπου το αποτέλεσμα που παράγει είναι μία επιφάνεια σε κάθε σημείο της οποίας αντιστοιχίζεται μία τιμή της ταχύτητας ροής, επομένως πολύ γρήγορα είναι εφικτό να προσδιοριστεί η συνολική παροχή της διατομής, αξιοποιώντας τις δυνατότητες που τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών– GIS παρέχουν, όπως θα περιγραφεί στις ενότητες που θα ακολουθήσουν.

1.4. Βιβλιογραφική επισκόπηση

Στην ενότητα αυτή κρίθηκε σκόπιμο να παρουσιαστούν συνοπτικά διάφορες μελέτες που εφαρμόζουν τις χωρικές μεθόδους παρεμβολής, συγκρινόμενες με την εφαρμογή της παρούσης εργασίας. Με τον τρόπο αυτό θα γίνουν αντιληπτές και οι λειτουργίες της κάθε μεθόδου παρεμβολής. Οι μελέτες προέρχονται από ερευνητικά κέντρα Πανεπιστημίων και έχουν συλλεχθεί από το διαδίκτυο. Ο λόγος που ξεκίνησε η αναζήτηση των συγκεκριμένων μελετών στα πλαίσια της μεταπτυχιακής εργασίας είναι η ενημέρωση για τον αν έχει χρησιμοποιηθεί κάποια από τις μεθόδους παρεμβολής για την κατανομή του πεδίου ταχύτητας ροής σε ένα ρέμα και πως το αποτέλεσμα της επιφάνειας που θα δημιουργηθεί αξιοποιείται και για ποιους σκοπούς. Οι μελέτες αυτές σχετίζονται κυρίως με την περιβαλλοντική παρακολούθηση της ποιότητας των υδάτων των ρεμάτων, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι με χρήση μεθόδων παρεμβολής ο μελετητής έχει τη δυνατότητα να γνωρίζει κάθε χαρακτηριστική μεταβλητή του ποταμού σε οποιοδήποτε σημείο κατά μήκος του αλλά και ως προς το βάθος του σε συγκεκριμένες διατομές, με αποτέλεσμα να διευκολύνεται η εκπόνηση των περιβαλλοντικών μελετών.

Στα πλαίσια της συνάντησης που διεξήχθη στη Βιέννη της Αυστρίας και διοργανώθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση Γεωφυσικών (*European Geosciences Union General Assembly 2008 Vienna, Austria, 13 – 18 April 2008*) μία ομάδα ερευνητών από Πανεπιστήμια της Αγγλίας και των Ηνωμένων Πολιτειών εφαρμόζει το μοντέλο παρεμβολής *Kriging* σε δειγματοληψία υδρομορφολογικών μεταβλητών ρέματος και αξιοποιεί τα αποτελέσματα που η μέθοδος προσφέρει για την παρεμβολή των μεταβλητών σε ένα μήκος ενός ποταμού και σε όλο του το βάθος. Στην εργασία τους θέτουν τα θεμέλια για να δημιουργηθεί ένα πλαίσιο διαδικασιών που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε προγράμματα περιβαλλοντικής παρακολούθησης ποιότητας ύδατος των ρεμάτων (*river restoration projects – monitoring environmental programs*)^[7], έχοντας όμως ως βάση ότι η δουλειά στο πεδίο πρέπει να είναι όσο το δυνατόν λιγότερο χρονοβόρα και περισσότερο οικονομική. Στην παρουσίαση της εργασίας τους οι συγγραφείς περιγράφουν τις τεχνικές για την συλλογή υδρομορφολογικών στοιχείων από ένα ρέμα (βάθος ρέματος, ταχύτητα ροής και μορφή υπεδάφους) εξετάζοντας τρία βασικά κριτήρια α) από πόσα σημεία δειγματοληψίας πρέπει να συλλεχθεί η πληροφορία, β) ποιο μήκος του ρέματος είναι αρκετό για την περιβαλλοντική παρακολούθηση και γ) πόσο συχνά πρέπει να επαναλαμβάνεται η διαδικασία

δειγματοληψίας στο πεδίο.^[7] Τα βήματα αυτά που περιγράφονται στην εργασία διευκολύνουν τη μελέτη των ειδικών που θα επεξεργασθούν στην συνέχεια τις παραπάνω μεταβλητές, γνωρίζοντας τα μορφολογικά χαρακτηριστικά ενός ρέματος σε όλο το μήκος του που τους ενδιαφέρει, με την επιφάνεια παρεμβολής που προκύπτει από τη μέθοδο *Kriging*, επομένως έχουν τη δυνατότητα να παρατηρήσουν την ποιότητα των υδάτων και να ολοκληρώσουν την περιβαλλοντική τους μελέτη.^[7] Στην παρακάτω εικόνα (εικόνα 1.4) παρουσιάζεται ένα παράδειγμα που περιγράφουν οι συγγραφείς στην εργασία τους. Συγκεκριμένα στα αριστερά της εικόνας φαίνεται το ημιμεταβλητόγραμμα που προκύπτει με την εφαρμογή της μεθόδου *Kriging* όπου συσχετίζεται η απόσταση των ζευγαριών των σημειακών μετρήσεων και η μεταβλητότητα μεταξύ τους και στο δεξί τμήμα απεικονίζεται η επιφάνεια παρεμβολής και τα σημεία δειγματοληψίας.

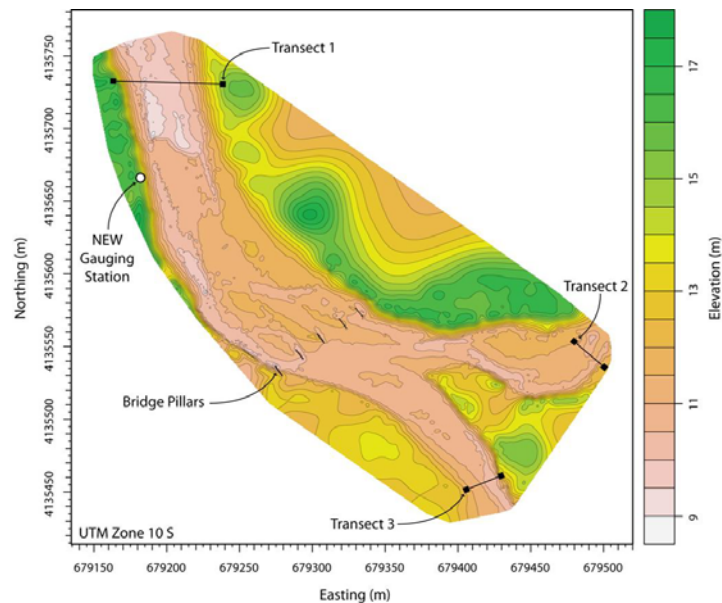


Εικόνα 1.4 Εφαρμογή μεθόδου *Kriging* για την περιβαλλοντική παρακολούθηση υδάτων (πηγή:[7])

Μία άλλη ομάδα ερευνητών του ερευνητικού κέντρου *Center of Embedded Network Sensing* που ανήκουν στην σχολή μηχανικών του Πανεπιστημίου της Καλιφόρνιας *UC Merced*, στα πλαίσια προγράμματος περιβαλλοντικής παρακολούθησης του ποταμού *San Joaquin* της ίδιας περιοχής, χρησιμοποιεί τη μέθοδο παρεμβολής τύπου *Splines* για τη δημιουργία ψηφιακού μοντέλου του πυθμένα του ποταμού από δειγματοληπτικές μετρήσεις που διεξάγονται με ηχοβολιστικά (*sonar*) και τοπογραφικά όργανα (*Valeport Midas EchoSounder and Leica Total Station measurements*).^[6] Στην εικόνα 1.5 απεικονίζεται το ρέμα που χωρίζεται σε δύο τμήματα και το ανάγλυφο του πυθμένα που προκύπτει από την εφαρμογή της μεθόδου παρεμβολής. Καθώς επίσης κατά μήκος του ποταμού σχεδιάζονται τρεις διατομές (*transects*) στις οποίες διεξάγονται μετρήσεις ταχύτητας σε δειγματοληπτικά σημεία της εκάστοτε τομής σε διάφορα βάθη. Οι μετρήσεις ταχύτητας ροής γίνονται μέσω οργάνων που βασίζονται στο σύστημα *Doppler (Sontek acoustic Doppler velocimetry)*.^[6]

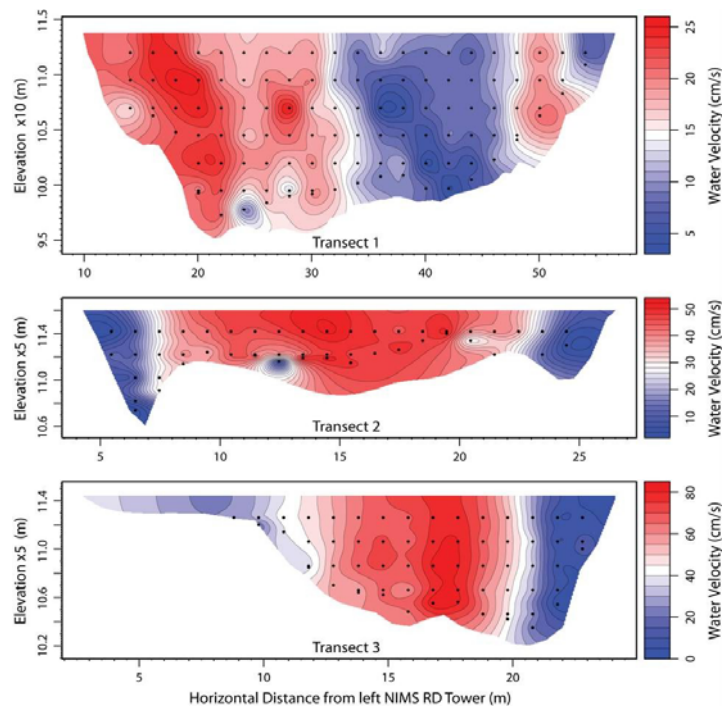
Στην συνέχεια εφαρμόζεται για κάθε μία διατομή του ρέματος η μέθοδος παρεμβολής τύπου *Splines* και προσδιορίζεται η ταχύτητα ροής σε κάθε σημείο της εκάστοτε διατομής. (Εικόνα 1.6) Με τον τρόπο αυτό οι ερευνητές επιτυγχάνουν να προσδιορίσουν

την παροχή του ποταμού πριν διαχωριστεί σε δύο τμήματα και τις παροχές των δύο ρεμάτων που δημιουργούνται κατόπιν.



Εικόνα 1.5 Εφαρμογή μεθόδου Spline για τη δημιουργία ψηφιακού αναγλύφου του πυθμένα (πηγή: [6])

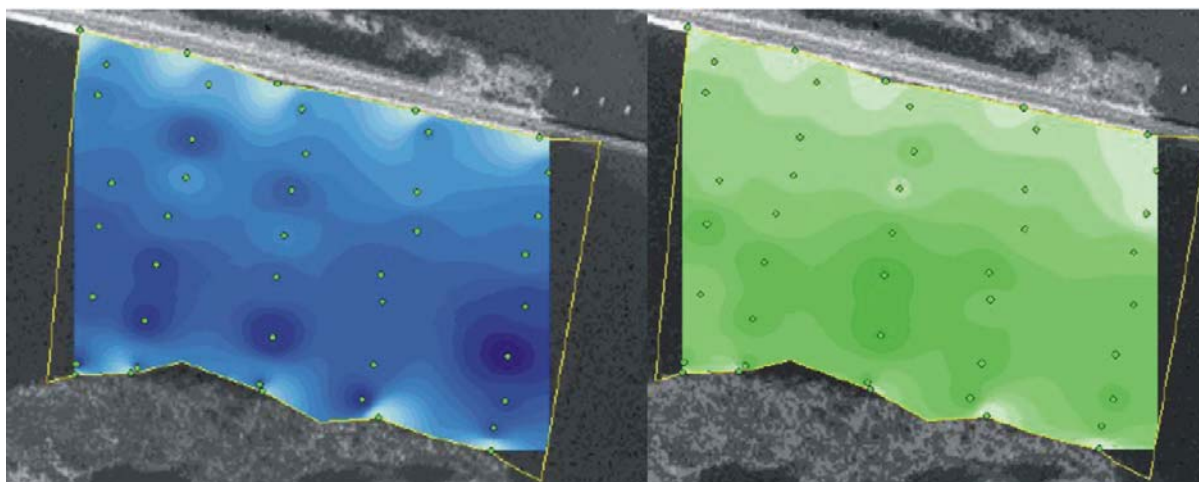
Επιπλέον οι ερευνητές προσδιορίζουν την μετακίνηση της ποσότητας της ύλης που υπάρχει κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια του νερού μεταξύ των τριών διατομών και έχοντας αυτές τις πληροφορίες κατά μήκος του ποταμού εκπονούν περιβαλλοντικές αναλύσεις για την ποιότητα του ύδατος.^[6] Στην εικόνα 1.6 παρατηρείται ότι οι σημειακές μετρήσεις γίνονται σε συγκεκριμένα βάθη και ανά τακτά διαστήματα μήκους της διατομής. Είναι εύλογο να ισχυριστεί κανείς ότι η συγκεκριμένη μελέτη ταιριάζει με την εφαρμογή της παρούσης εργασίας όχι τόσο στον αντικειμενικό σκοπό αλλά στον τρόπο οργάνωσης των σημειακών μετρήσεων στο πεδίο και στο τελικό αποτέλεσμα της επιφάνειας παρεμβολής.



Εικόνα 1.6 Εφαρμογή μεθόδου Spline για τη δημιουργία του προφίλ ταχυτήτων στις τρεις διατομές (πηγή:[6])

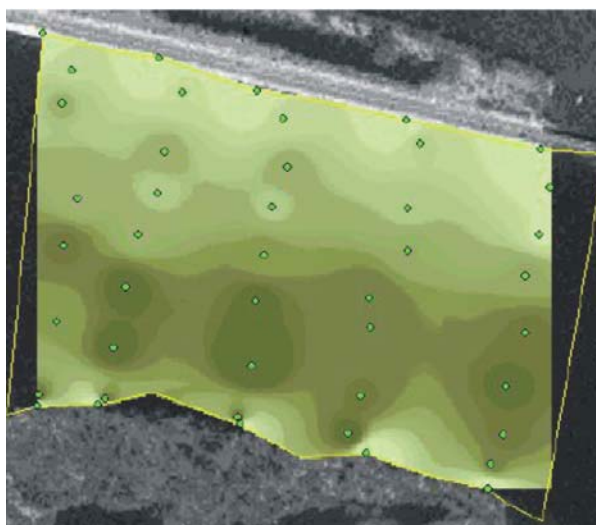
Σε ένα άλλο άρθρο επιτυγχάνεται η εκτίμηση της συνολικής παροχής ενός αγωγού ρέματος προσδιορίζοντας την ταχύτητα ροής με τη μέθοδο παρεμβολής *IDW* εξάγοντας αρχεία κανονικοποιημένης μορφής - *raster* και χρησιμοποιώντας τις λειτουργίες που παρέχουν τα Συστήματα Γεωγραφικής Πληροφορίας - *GIS*. Ο συγγραφέας αυτού του άρθρου είναι επιστημονικός συνεργάτης του εργαστηρίου του τμήματος *Resource Analysis* του Πανεπιστημίου της Μινεσότας, *Saint Mary's University of Minnesota* και ονομάζεται *Chad Richtman*. Αρχικά ο συγγραφέας συγκρίνοντας τις διαφορετικές γεωστατιστικές μεθόδους που παρέχει το λογισμικό *ArcGIS* καταλήγει στο συμπέρασμα ότι ενώ η μέθοδος *Kriging* παρέχει στο χρήστη τη γνώση της απόκλισης των εκτιμώμενων τιμών, πρέπει να αποφεύγεται για δείγματα που παρουσιάζουν τυχαία συμπεριφορά γιατί η ίδια η μέθοδος προσπαθεί να προσδώσει μία τάση στα δεδομένα ενώ αυτή μπορεί να μην υπάρχει.^[5]

Για την συλλογή των θέσεων των μετρήσεων χρησιμοποίησε έναν δέκτη *GPS* χειρός και με βάρκα διεξήχθησαν οι βυθομετρήσεις και οι μετρήσεις της ταχύτητας σε βάθος περίπου το 60% του συνολικού βάθους σε πέντε διατομές κατά μήκος του ποταμού *Upper Mississippi River*. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή των *Kriging* και *Splining* και με βάση την εμπειρία που απέκτησε ο συγγραφέας από το πεδίο για τα μορφολογικά χαρακτηριστικά του ποταμού, το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι η μέθοδος *IDW* παράγαγε τις βέλτιστες επιφάνειες. Στην εικόνα 1.7 στο αριστερό τμήμα παρουσιάζεται το ψηφιακό μοντέλο του πυθμένα και στο δεξί τμήμα απεικονίζεται η επιφάνεια της ταχύτητας ροής στο 60% του βάθους του αγωγού, και οι δύο επιφάνειες είναι αρχεία τύπου *raster* με μέγεθος κελιού που επέλεξε ο συγγραφέας. Επιπλέον απεικονίζονται και οι θέσεις των σημειακών μετρήσεων πάνω σε έναν ορθοφωτοχάρτη της περιοχής μελέτης για καλύτερο οπτικό αποτέλεσμα.^[5]



Εικόνα 1.7 Εφαρμογή μεθόδου IDW για τη δημιουργία του ψηφιακού αναγλύφου του βυθού και του πεδίου ταχυτήτων ροής κατά μήκος του αγωγού (πηγή: [5])

Συνθέτοντας τα απεικονιζόμενα αρχεία με βάση τον παρακάτω τύπο και τη λειτουργία *Raster Calculation*, που προσφέρει το *ArcGIS* όπως θα αναλυθεί και σε επόμενη ενότητα (ενότητα 4.1.2) προκύπτει μία τελική επιφάνεια της παροχής για την οποία σε κάθε κελί αντιστοιχίζεται μία τιμή παροχής. Το άθροισμα των τιμών της παροχής κάθε κελιού αποτελεί την συνολική παροχή του αγωγού.^[5] Το τελικό αποτέλεσμα απεικονίζεται στην εικόνα 1.8, παρακάτω:



Εικόνα 1.8 Απεικόνιση της παροχής στο τμήμα του ρέματος σε μορφή αρχείου raster (πηγή: [5])

Η μελέτη που περιγράφηκε έχει παρόμοιους αντικειμενικούς σκοπούς με την εφαρμογή της παρούσης μεταπτυχιακής εργασίας με τη μοναδική διαφορά ότι στην παρούσα εργασία οι δειγματοληπτικές μετρήσεις διεξάχθηκαν σε μία διατομή του αγωγού. Έτσι η πρόταση του *Chad Richtman* μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ιδέα για μελλοντική έρευνα για τον τρόπο προσδιορισμού της συνολικής παροχής ενός ποταμού μέσω *GIS*, όπως θα αναλυθεί και θα σχολιασθεί στην τελευταία ενότητα της παρούσης.

Στις παραπάνω μελέτες χρησιμοποιούνται κυρίως οι γεωστατιστικές μέθοδοι για την παρεμβολή είτε μετρήσεων του βάθους είτε της ταχύτητας ροής με απώτερο στόχο τον

υπολογισμό της παροχής του ρέματος. Στο άρθρο όμως *Hydraulic signatures for ecological modeling at different scales* ^[9] εφαρμόζεται η μέθοδος TIN για την παρεμβολή βάθους-ταχύτητας σε θέσεις που δεν υπάρχουν μετρήσεις κατά μήκος συγκεκριμένων διατομών του ποταμού *Durance River* της Γαλλίας. Το δίκτυο των τριγώνων που προκύπτει όπου κάθε τρίγωνο περιλαμβάνει στοιχεία ταχύτητας και βάθους, συσχετίζεται με τα είδη οικοτόπων που ευδοκούν στον ποταμό ώστε να προσδιορισθεί περαιτέρω ένα υδροδυναμικό μοντέλο για την περιοχή μελέτης. ^[9] Επιπλέον ο καθηγητής *Venkatesh Merwade* ^[8] του Πανεπιστημίου του Τέξας, στην διδακτορική του διατριβή, περιγράφει πόσο σημασία έχουν τα εργαλεία που προσφέρουν τα GIS για την εφαρμογή μεθόδων παρεμβολής ώστε να επιτυγχάνεται αποτελεσματικά και γρήγορα η παραγωγή χωρικών επιφανειών για την εκτίμηση του βάθους, της ταχύτητας ροής, της παροχής και ακόμα της ελεύθερης επιφάνειας του ρέματος, μεταβλητές ενός ευρύτερου υδροδυναμικού μοντέλου που χρησιμεύει στην περιβαλλοντική και οικολογική παρακολούθηση του υδάτινου περιβάλλοντος και των οικοσυστημάτων που ζουν σε αυτό. ^[8]

Κεφάλαιο 2: ***Μοντέλα χωρικής παρεμβολής (Interpolation Methods)***

2.1. Εισαγωγή

Τα μοντέλα χωρικής παρεμβολής είναι μέθοδοι διαχείρισης δεδομένων που θεωρούνται ότι αναπαριστούν ένα πεδίο, που περιλαμβάνει τιμές ενός φαινομένου. Στις γεωγραφικές επιστήμες υπάρχει ένας διαχωρισμός μεταξύ δύο τύπων επιφανειακών μοντέλων, που διαφοροποιούνται ανάλογα με τα φαινόμενα που αναπαριστούν. Ο ένας έχει σκοπό τη μοντελοποίηση φυσικών επιφανειών όπως π.χ. του υψομετρικού ανάγλυφου και των χρήσεων γης. Ο δεύτερος έχει σκοπό τη μοντελοποίηση αφηρημένων επιφανειών που αναπαριστούν την κατανομή λιγότερο απτών, χωρικά μεταβαλλόμενων στατιστικών, όπως συμβαίνει και στην παρούσα περίπτωση, η εκτίμηση της καθ' ύψους μεταβαλλόμενης ταχύτητας της ροής του ποταμού στη συγκεκριμένη διατομή.^[4]

Γενικά η έννοια της μοντελοποίησης του χώρου αναφέρεται σε στατιστικά μοντέλα, που με την σειρά τους αφορούν φαινόμενα που υπόκεινται σε αβεβαιότητα ή αλλιώς ρυθμίζονται από τους νόμους των πιθανοτήτων και εκφράζονται μέσα από τις γνωστές έννοιες της τυχαίας μεταβλητής και της κατανομής πιθανοτήτων.^[1]

Γενικά οι μέθοδοι χωρικής παρεμβολής, μπορούν να διαφοροποιηθούν σε δύο κατηγορίες, για κάθε μία από αυτές παρουσιάζονται μερικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται από τα διάφορα λογισμικά πακέτα *GIS* της αγοράς:^{[1], [4], [5]}

1. τις μεθόδους τοπικών εκτιμήσεων - *local methods*
 - Μέθοδος δικτύου τριγώνων – *Triangulated Irregular Network – TIN*
 - Συναρτήσεις τύπου *Splines – Radial Basis Functions*
 - Παρεμβολή με απόδοση βαρών σε σημειακά δεδομένα στον πλησιέστερο γείτονα – *Inverse Distance Weighting, IDW*
 - Πολυωνυμικές συναρτήσεις - *Local Polynomial Interpolation*
2. τις μεθόδους γενικευμένων προσεγγίσεων – *Global methods*
 - Πολυωνυμικές συναρτήσεις - *Global Polynomial Interpolation*
 - Ανάλυση *Fourier*
3. τις γεωστατιστικές μεθόδους - *Geostatistical methods*
 - Μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής – *Kriging*

- Παρεμβολή με απόδοση βαρών σε σημειακά δεδομένα στον πλησιέστερο γείτονα – *Inverse Distance Weighting, IDW*

Οι γενικευμένες μέθοδοι σε αντίθεση με τις τοπικές μεθόδους χρησιμοποιούν όλα τα υπάρχοντα στοιχεία από ολόκληρη την περιοχή μελέτης επιτυγχάνοντας εκτίμηση του φαινομένου για το σύνολο της περιοχής ενδιαφέροντος. Οι γενικές πολυωνυμικές συναρτήσεις και οι ακολουθίες *Fourier* ενδιαφέρουν μόνο για την αναπαράσταση των γενικών τάσεων και για την ανάλυση περιοδικότητας σε μία επιφάνεια. Με τις τοπικές μεθόδους εξετάζονται οι χωρικές διαφοροποιήσεις που δημιουργούνται κοντά στο υπό εκτίμηση σημείο – γειτονία, και γι' αυτό οι τοπικές μέθοδοι εφαρμόζονται συχνότερα από τις γενικευμένες.

Οι δύο αυτές μέθοδοι (*local - global methods*) χρησιμοποιούν μαθηματικές συναρτήσεις και λειτουργίες για να παραχθεί η χωρική επιφάνεια. Οι γεωστατιστικές μέθοδοι - *geostatistical methods* χρησιμοποιούν και μαθηματικές και στατιστικές τεχνικές για οποιαδήποτε εκτίμηση απορρέει από τις σημειακές μετρήσεις. Το σημαντικό πλεονέκτημα των γεωστατιστικών μεθόδων σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους είναι ότι ποσοτικοποιούν και ελαχιστοποιούν το σφάλμα εκτίμησης σε άγνωστα σημεία εκτός του δείγματος των σημειακών μετρήσεων .^[2]

2.2. Γενική περιγραφή των μεθόδων παρεμβολής που θα χρησιμοποιηθούν στην εφαρμογή της εργασίας

Στο λογισμικό πακέτο *ArcGIS – Desktop*, το οποίο χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία, εφαρμόζονται οι εξής μέθοδοι παρεμβολής:

- *Inverse Distance Weighting, IDW*
- *Triangulated Irregular Network – TIN*
- *Local Polynomial Interpolation*
- *Global Polynomial Interpolation*
- *Radial Basis Functions*
- *Kriging*

Στην συνέχεια του κεφαλαίου αυτού θα περιγραφούν όσο γίνεται πιο συνοπτικά με τη βοήθεια της βιβλιογραφίας, η λειτουργία της εκάστοτε μεθόδου και οι αντίστοιχες μαθηματικές συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται.

2.2.1. Inverse Distance Weighting - IDW

Η μέθοδος αυτή ονομάζεται και μέθοδος κινητού μέσο όρου των παρατηρήσεων με βάρη (*Spatial Moving Average*) και αποτελεί μία συνήθης προσέγγιση χωρικής παρεμβολής στην οποία αποδίδεται βάρος στα γειτονικά σημεία του δείγματος των μετρήσεων. Τα επιλεγμένα σημεία του δείγματος θα είναι τα πλησιέστερα n σημεία ή όλα τα σημεία μέσα σε μία δεδομένη ακτίνα. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του n τόσο μεγαλύτερο θα είναι το αποτέλεσμα εξομάλυνσης του μέσου όρου. Η εξομάλυνση μπορεί να εξισορροπηθεί με τη χρήση ενός μέσου όρου με βάρη, κατά την οποία το βάρος που αποδίδεται σε σημείο είναι αντιστρόφως ανάλογο της απόστασής του από το σημείο παρεμβολής. Η αντίστροφη αναλογία μπορεί να είναι γραμμική ή εκθετική (δύναμη του δύο) ώστε να παρέχει μία αντίστροφη τετραγωνική σχέση. Ουσιαστικά η μέθοδος *IDW* ακολουθεί το συμπέρασμα ότι κάθε εκτιμώμενο σημείο παρεμβολής έχει μία τοπική επιρροή που μικραίνει με την αύξηση της απόστασης από τα μετρημένα σημεία του δείγματος. ^{[4], [9]}

Η διαδικασία της εφαρμογής της μεθόδου απαιτεί επομένως τα εξής βήματα: ^[1]

1. τον ορισμό της τοπικής περιοχής εκτίμησης – περιοχής πλησιέστερου γείτονα
2. την εύρεση του αριθμού των σημείων που οι τιμές τους θα πρέπει να ληφθούν υπόψη για την εκτίμηση
3. την επιλογή των σημείων αυτών από το σύνολο των σημείων της περιοχής μελέτης και
4. την επιλογή της μαθηματικής συνάρτησης που αντιπροσωπεύει τη διαφοροποίηση της τιμής του χαρακτηριστικού δηλαδή την διαδικασία εκτίμησης

Η απάντηση στα δύο πρώτα βήματα γίνεται ταυτόχρονα αφού ο αριθμός των σημείων καθορίζει και την περιοχή εκτίμησης. Γενικά αν τα σημεία του δείγματος είναι πάρα πολλά σε ολόκληρη την περιοχή μελέτης η κατανομή της τιμής είναι σχετικά ομοιογενής, τότε δεν υπάρχει ανάγκη να επιλεγεί ένας μεγάλος αριθμός σημείων για την εκτίμηση. Αντίθετα αν η πυκνότητα των μετρημένων σημείων είναι μικρή τότε ο αριθμός των σημείων που πρέπει να επιλεγεί είναι μεγαλύτερος.

Μία γενική μαθηματική έκφραση περιγραφής της μεθόδου *IDW* είναι ^{[1], [11]}:

$$\hat{Z}(s_o) = \sum_{i=1}^n w_i Z(s_i) \text{ όπου:}$$

$\hat{Z}(s_o)$ είναι η τιμή του σημείου παρεμβολής που εκτιμάται από τη μέθοδο,
 n είναι ο αριθμός των μετρημένων σημείων του δείγματος που χρησιμοποιούνται ως πλησιέστεροι γείτονες για την παρεμβολή

w_i είναι το βάρος που πρέπει να αποδοθεί σε κάθε σημείο του δείγματος που χρησιμοποιείται, τυπικά το βάρος είναι αντιστρόφως ανάλογο προς την απόσταση από το σημείο του δείγματος στο σημείο προς εκτίμηση.

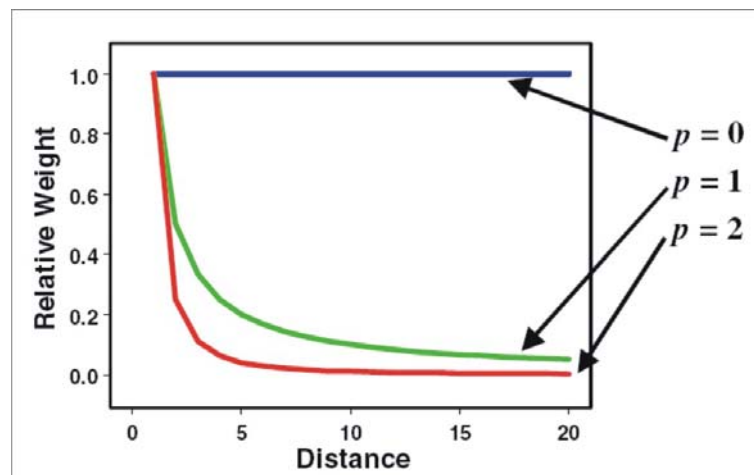
$Z(s_i)$ είναι το μετρούμενο σημείο του δείγματος από όπου υπολογίζεται η απόσταση από το σημείο παρεμβολής s_i

Η μαθηματική συνάρτηση που προσδιορίζει τα βάρη είναι η παρακάτω:

$$w_i = d_{i0}^{-p} / \sum_{i=1}^n d_{i0}^{-p}, \quad \sum_{i=1}^n w_i = 1$$

Όσο η απόσταση μεγαλώνει το βάρος μειώνεται με μία παράμετρο p . Η παράμετρος αυτή παίρνει τιμές, ώστε η εκτιμηθείσα επιφάνεια να είναι όσο δυνατό πιο ομαλή. Η ποσότητα d_{i0} είναι η απόσταση μεταξύ του υπό εκτίμηση σημείου s_0 και του μετρημένου σημείου s_i .^[1]

Με άλλα λόγια πόσο γρήγορα το βάρος μειώνεται εξαρτάται από την παράμετρο p . Εάν $p=0$ δεν υπάρχει μείωση με την απόσταση αφού κάθε βάρος είναι το ίδιο οπότε η πρόβλεψη είναι η μέση τιμή των μετρημένων σημείων. Εάν η παράμετρος p αυξάνεται τότε το βάρος για τα απομακρυσμένα σημεία μειώνεται γρήγορα όπως φαίνεται από το διάγραμμα στην συνέχεια (σχήμα 2.1) Εάν η παράμετρος p είναι πάρα πολύ υψηλή μόνο οι άμεσοι λίγοι πλησιέστεροι γείτονες επηρεάζουν την εκτίμηση της μεταβλητής.^[11]



Σχήμα 2.1 Διάγραμμα βάρους – απόστασης μεθόδου IDW (πηγή: [11])

Γενικά η μέθοδος *IDW* θεωρείται μία παλαιά τεχνική με ένα σημαντικό μειονέκτημα ότι δεν εκτιμάει τιμές εκτός των ορίων του σημειακού δείγματος. Με άλλα λόγια οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές της παραγόμενης επιφάνειας που προκύπτει με την εφαρμογή της *IDW* είναι ίδιες με τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές του αρχικού σημειακού δείγματος της εκτιμώμενης μεταβλητής.^[5]

2.2.2. Local & Global Polynomial Interpolation

Οι γενικευμένες και τοπικές πολυωνυμικές μέθοδοι εκτίμησης χρησιμοποιούν μαθηματικές και πολυωνυμικές συναρτήσεις πρώτου αλλά και μεγαλύτερου βαθμού. Με την προσέγγιση μιας ολόκληρης επιφάνειας μέσω μιας απλής πολυωνυμικής συνάρτησης, μπορούν να μελετηθούν τα βασικά χαρακτηριστικά της και να αναγνωρισθούν οι αποκλίσεις εξετάζοντας τον πίνακα των υπολοίπων που προκύπτει από τη διαφορά της αρχικής επιφάνειας και της προσαρμοζόμενης επιφάνειας τάσης – *trend*. Ο βαθμός στον οποίο μία επιφάνεια τάσης ταιριάζει με την πραγματική επιφάνεια, εξαρτάται από το βαθμό μεταβολής των αρχικών δεδομένων και το βαθμό του πολυωνύμου. Οι επιφάνειες με μεγάλη μεταβλητότητα χρειάζονται υψηλού βαθμού πολυώνυμα για τη μοντελοποίησή τους.^[4]

Ο μαθηματικός τύπος για μια επιφάνεια πρώτου βαθμού είναι:

$z=ax+by+c$, Αυτή είναι μία συνάρτηση που περιγράφει ένα επίπεδο.

Η αντίστοιχη για μια επιφάνεια δευτέρου βαθμού είναι:

$$z= a+bx+cy+dx^2+exy+fy^2$$

Ο τύπος για μια επιφάνεια τρίτου βαθμού δίνεται προσθέτοντας τους όρους για το $x^i y^j$, όπου το άθροισμα του i και του j είναι 3, δηλαδή $x^3, y^3, x^2 y, xy^2$:

$$z= a+bx+cy+dx^2+exy+fy^2+g x^3+h x^2 y+k xy^2+l y^3$$

Οι παραπάνω πολυωνυμικές συναρτήσεις ισχύουν και για τις γενικευμένες και για τις τοπικές μεθόδους εκτίμησης. Όμως στις τοπικές μεθόδους εκτίμησης *local methods* χρησιμοποιούνται πολλές πολυωνυμικές συναρτήσεις μέσα σε πολλές, πλησιέστερες γειτονιές που καλύπτουν όλη την περιοχή μελέτης. Οι γειτονιές επικαλύπτονται μεταξύ τους και κάθε τιμή που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των σημείων παρεμβολής είναι η τιμή που προκύπτει από την πολυωνυμική συνάρτηση και βρίσκεται στο μέσον της εκάστοτε γειτονιάς. Η επιλογή της περιοχής του πλησιέστερου γείτονα προσδιορίζεται με τον ίδιο τρόπο και τεχνική που ακολουθείται και στην *IDW* μέθοδο παρεμβολής.^[11]

Οι γενικευμένες μέθοδοι εκτίμησης *global methods* χρησιμοποιούνται για:

1. να εκτιμήσουν μία επιφάνεια από μία δεδομένη σημειακή δειγματοληψία όταν είναι γνωστό ότι η επιφάνεια είναι εξομαλυμένη χωρίς απότομες εξάρσεις ή βυθίσματα, όπως για παράδειγμα οι εκπομπές αέριων ρύπων πάνω από μία βιομηχανική ζώνη, και η διεύθυνση του ανέμου.
2. να εξετάσουν τις επιδράσεις μιας γενικευμένης τάσης που επικρατεί στην περιοχή μελέτης.

Οι μαθηματικές – πολωνυμικές συναρτήσεις ως μέσο για την ακριβή αναπαράσταση μιας επιφάνειας, δεν είναι συνήθως πρακτικές εξαιτίας των δυσκολιών στον υπολογισμό υψηλού βαθμού πολωνύμων και στο γεγονός ότι τα πολώνυμα τείνουν να εμφανίζουν μη αποδεκτά σφάλματα στα άκρα της επιφάνειας.^[4]

2.2.3. Radial Basis Functions

Οι μέθοδοι τύπου *Splines* διαφέρουν από τις τοπικές και γενικευμένες τεχνικές παρεμβολής γιατί η επιφάνεια παρεμβολής που παράγεται περνάει ακριβώς ανάμεσα από τα σημεία της δειγματοληψίας. Σε σχέση με την μέθοδο του πλησιέστερου γείτονα *IDW* οι τεχνικές *RBF* έχουν τη δυνατότητα να προβλέψουν τιμές μεγαλύτερες από τη μέγιστη τιμή μεταβλητής και μικρότερες από την ελάχιστη τιμή μεταβλητής δειγματοληψίας. Επί προσθέτως οι τεχνικές *RBF* χρησιμοποιούνται ευρέως στον σχεδιασμό, με σκοπό την παροχή μιας εξομαλυμένης ή τουλάχιστον καλά ελεγχόμενης αναπαράστασης επιφανειών. Κυρίως αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα παράγονται για τις ήπια ποικίλες επιφάνειες όπως η θερμοκρασία, όμως οι τεχνικές *RBF* θεωρούνται ακατάλληλες όταν υπάρχουν μεγάλες αλλαγές στις τιμές της επιφάνειας μέσα σε μια σύντομη οριζόντια απόσταση ή / και όταν η μεταβλητή της δειγματοληψίας είναι επιρρεπής σε λάθος ή σε αβεβαιότητα.^[11]

Υπάρχουν πέντε διαφορετικές παραλλαγές: α) *thin-plate spline*, β) *spline with tension*, γ) *completely regularized spline*, δ) *multiquadric function* και ε) *inverse multiquadric function*. Κάθε μία παραλλαγή οδηγεί σε μια ελαφρώς διαφορετική επιφάνεια παρεμβολής. Σε όλες τις παραλλαγές υπάρχει μία παράμετρος που ρυθμίζει την εξομάλυνση των επιφανειών παρεμβολής στις οποίες όσο αυξάνεται η παράμετρος αυτή η επιφάνεια παρεμβολής γίνεται πιο ομαλή, ενώ το αντίθετο συμβαίνει κατ' εξαίρεση στην πέμπτη παραλλαγή.^[11]

2.2.4. Μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής - Kriging

Η μέθοδος *Kriging* είναι η πιο διαδεδομένη γεωστατιστική μέθοδος που εφαρμόζεται στα περισσότερα λογισμικά πακέτα *GIS*. Με τον όρο γεωστατιστική ορίζεται ένα σύνολο στατιστικών τεχνικών που σχετίζονται με μεταβλητές που μεταβάλλονται στο χώρο. Οι τεχνικές αυτές βασίζονται στην υπόθεση ότι η χωρική διακύμανση της μεταβλητής είναι τυχαία. Γενικά οι γεωστατιστικές μέθοδοι είναι αρκετά πολύπλοκες στην εφαρμογή τους, η οποία προϋποθέτει τη χρήση κατάλληλων υπολογιστικών προγραμμάτων.^[2]

Οι γεωστατιστικές μέθοδοι σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους που περιγράφηκαν παραπάνω έχουν τα εξής πλεονεκτήματα^[1]:

- Έχουν τη δυνατότητα να δώσουν άμεσες εκτιμήσεις για την ποιότητα των προβλέψεων, δηλαδή μία εκτίμηση της διασποράς των προβλεπόμενων τιμών στα σημεία που δεν ανήκουν στο δείγμα.

- Εκτιμούν εκ των προτέρων τις βέλτιστες τιμές για τις διάφορες παραμέτρους που χρησιμοποιούν οι μέθοδοι.
- Παρέχουν τη δυνατότητα επιλογής του αριθμού των σημείων των αναγκαίων για την εφαρμογή των μεθόδων πλησιέστερου γείτονα.
- Γνωστοποιούν τα λάθη – αβεβαιότητες που σχετίζονται με τις εκτιμηθείσες τιμές της χωρικής παρεμβολής.

Στην συνέχεια θα αναπτύξουμε συνοπτικά τις μαθηματικές συναρτήσεις που πλαισιώνουν τις λειτουργίες των γεωστατιστικών μεθόδων και κυρίως έμφαση θα δοθεί στη μέθοδο *Kriging*.

Η γεωστατιστική ανάλυση περιλαμβάνει δύο κύριες φάσεις ^[2]:

1. την χωρική ανάλυση που περιλαμβάνει την επιλογή και προσαρμογή ενός μοντέλου που περιγράφει τη χωρική μεταβλητότητα των σημειακών μετρήσεων.
2. τη βέλτιστη γραμμική αμερόληπτη εκτίμηση (*best linear unbiased estimation – BLUE*) που σχετίζεται με τον υπολογισμό των εκτιμητριών των αγνώστων ως γραμμικών συναρτήσεων των μετρήσεων. Οι εκτιμητρίες είναι αμερόληπτες, έχουν την ελάχιστη μεταβλητότητα, ενώ για τον υπολογισμό τους χρησιμοποιείται η μοντελοποίηση της χωρικής μεταβλητότητας.

❖ Ορισμοί

Εξετάζεται μία χωρικά μεταβαλλόμενη συνάρτηση $z(\mathbf{x})$ όπου \mathbf{x} είναι η θέση στο χώρο (διάνυσμα 1,2, ή 3 διαστάσεων). Η συνάρτηση $z(\mathbf{x})$ δεν είναι γνωστή και πρέπει να προσδιοριστεί από μετρήσεις και ίσως από συμπληρωματικές πληροφορίες.^[2]

Η συνάρτηση της μέσης τιμής που δίνει την αναμενόμενη τιμή σε οποιοδήποτε σημείο \mathbf{x} δίδεται από την σχέση : $m(\mathbf{x})=E[z(\mathbf{x})]$

Η συνάρτηση της συνδιασποράς για κάθε ζεύγος \mathbf{x} και \mathbf{y} δίδεται από την σχέση:

$$R_{xy} = E \left\{ \frac{[z(x) - m(x)]}{[z(y) - m(y)]} \right\}$$

Ο δείκτης συνδιασποράς εκφράζει την κατεύθυνση της σχέσης μεταξύ δύο μεταβλητών \mathbf{x} και \mathbf{y} . Δηλαδή αν ο δείκτης συνδιασποράς είναι θετικός μεγάλες τιμές του \mathbf{x} τείνουν να σχετίζονται με μεγάλες τιμές του \mathbf{y} , ενώ αν είναι αρνητικός τότε μεγάλες τιμές του \mathbf{x} τείνουν να σχετίζονται με μικρές τιμές του \mathbf{y} και αντίστροφα. Επειδή όμως ο δείκτης αυτός επηρεάζεται από την συνδιασπορά καθεμίας από τις μεταβλητές \mathbf{x} και \mathbf{y} , δίνει ελάχιστες πληροφορίες για το μέγεθος της σχέσης μεταξύ αυτών των δύο μεταβλητών. Ένας δείκτης που δίνει πληροφορίες όχι μόνο για την κατεύθυνση αλλά και

για το μέγεθος της σχέσης μεταξύ των δύο μεταβλητών είναι ο συντελεστής συσχέτισης που δίδεται από την σχέση:^{[1],[2]}

$$\rho_{xy} = \frac{R_{xy}}{\sigma_x \sigma_y}$$

❖ Βέλτιστη γραμμική αμερόληπτη εκτίμηση (BLUE)

Η εκτίμηση της τιμής της συνάρτησης $z(x)$ σε μια θέση όπου δεν υπάρχει μέτρηση x_0 γίνεται χρησιμοποιώντας μια γραμμική εκτιμήτρια: ^[2]

$$\hat{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^n w_i Z(x_i) \text{ όπου: } w \text{ είναι τα βάρη}$$

Αυτή η εκτιμήτρια είναι η μαθηματική συνάρτηση που χρησιμοποιείται συχνά και στις μεθόδους τοπικών εκτιμήσεων (IDW) όπως περιγράφηκε σε προηγούμενο εδάφιο. Τα βάρη επιλέγονται έτσι ώστε :

1. Το σφάλμα εκτίμησης (εκτιμημένη τιμή μείον την αληθινή άγνωστη τιμή) πρέπει κατά μέσο όρο να είναι μηδέν (αμεροληψία)
2. Πρέπει να ελαχιστοποιείται το μέσο τετραγωνικό σφάλμα

Από το 2^ο κριτήριο με τον περιορισμό του πρώτου προκύπτει ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων (*kriging system*) από τη λύση του οποίου προκύπτουν τα βάρη. Με τη χρήση των γεωστατιστικών μεθόδων ο προσδιορισμός των βαρών βασίζεται στη δομή της χωρικής διακύμανσης της μεταβλητής, η οποία προσδιορίζεται και μοντελοποιείται με βάση το ημιμεταβλητόγραμμα.^[2]

❖ Μέσο τετραγωνικό σφάλμα πρόβλεψης $-(RMSE)$

Το σφάλμα εκτίμησης προσδιορίζεται με τη μέθοδο *Cross Validation*, στην οποία κάθε μετρημένη τιμή συγκρίνεται με την αντίστοιχη εκτιμώμενη τιμή. Συγκεκριμένα από όλο το δείγμα μία μετρημένη τιμή κάθε φορά αφαιρείται και η εκτίμηση της τιμής της προσδιορίζεται από τις εναπομένουσες μετρημένες τιμές. Η προσδιορισμένη τιμή αφαιρείται από την πραγματική και έτσι προκύπτει το υπόλοιπο το οποίο λέγεται και θεωρητικό σφάλμα εκτίμησης. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλες τις τιμές και έτσι λαμβάνονται τόσα υπόλοιπα όσες είναι και οι μετρήσεις. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί όλο το δείγμα των μετρήσεων και προσδιορίζει την αυτοσυσχέτιση που εμφανίζεται μεταξύ των μετρημένων τιμών του δείγματος. Το *RMSE* είναι ένα στατιστικό μέγεθος που ποσοτικοποιεί το θεωρητικό σφάλμα που παράγεται από τη διαδικασία παρεμβολής, ουσιαστικά πρόκειται για την τυπική απόκλιση των υπολοίπων που προκύπτουν. Η διαδικασία προσδιορισμού του σφάλματος εκτίμησης προηγείται της παραγωγής της τελικής επιφάνειας παρεμβολής γι αυτό και μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι ένα διαγνωστικό στάδιο όπου μελετάται αν οι σχετικές τιμές των παραμέτρων είναι λογικές

οπότε και η παραγόμενη επιφάνεια παρεμβολής είναι αντιπροσωπευτική του φαινομένου που ο χρήστης θέλει να απεικονίσει.^[11]

Εκτός από το μέσο τετραγωνικό σφάλμα *RMSE* η μέθοδος *Kriging* σε αντίθεση με τις άλλες μεθόδους, προσδιορίζει και άλλα τυπικά σφάλματα, όπως το μέσο σφάλμα εκτίμησης (*Mean Prediction Error*), το μέσο τυπικό σφάλμα (*Average Standard Error*), το μέσο σφάλμα που προκύπτει από την προσαρμογή των εκτιμώμενων σημείων στην κανονική κατανομή (*Average Standardized Error*), και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα από την προσαρμογή της κανονικής κατανομής (*Root Mean Square Standardized Error*). Για ένα μοντέλο που απεικονίζει ακριβείς μετρήσεις, θεωρητικά το *Mean Prediction Error* πρέπει να είναι κοντά στο μηδέν. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα *RMSE* πρέπει να είναι σχετικά μικρό αν οι εκτιμώμενες τιμές πλησιάζουν τις μετρημένες τιμές. Επιπλέον αν οι μετρήσεις είναι αμερόληπτες πρέπει το *Root Mean Square Standardized Error* να είναι κοντά στη μονάδα.^[11]

❖ Χωρική μεταβλητότητα

Η βασική αρχή των διαφόρων μεθόδων παρεμβολής είναι η παραδοχή ότι στις κοντινές αποστάσεις οι τιμές της μεταβλητής μοιάζουν περισσότερο από ότι στις μακρινές. Για να προσδιοριστεί η ισχύς αυτής της υπόθεσης και το πώς αυτή η «ομοιότητα» μεταβάλλεται συναρτήσει της απόστασης, πραγματοποιείται διερευνητική ανάλυση των χωρικών δεδομένων. Η χωρική συσχέτιση συνήθως εξετάζεται με τη μέθοδο της ημιδιασποράς που είναι ένα μέτρο του βαθμού της χωρικής συσχέτισης των σημειακών μετρήσεων και δίνεται από την σχέση^[2]:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^m [z(x_i) - z(x_i + h)]^2$$

όπου m ο αριθμός των ζευγών με απόσταση h

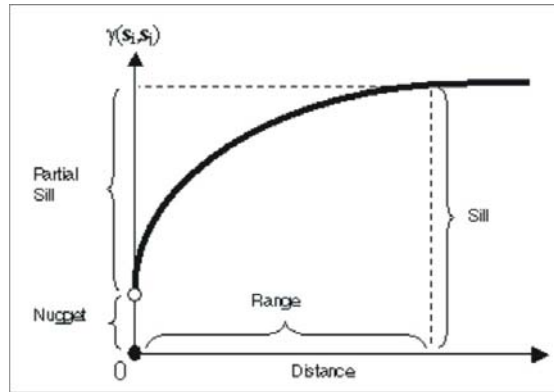
$z(x_i)$ η τιμή της μεταβλητής στη θέση i

$z(x_i + h)$ η τιμή της μεταβλητής σε απόσταση h από τη θέση i

❖ Χαρακτηριστικά ημιμεταβλητογράμματος

Το ημιμεταβλητόγραμμα (*semivariogram*) εκφράζει το μισό του μέσου των διαφορών των τετραγώνων μεταξύ των τιμών των δειγμάτων σαν συνάρτηση απόστασης μεταξύ τους. Για ένα σύνολο σημείων δείγματος x_i η ημιμεταβλητότητα υπολογίζεται από τον παραπάνω τύπο $\gamma(h)$.^[4] Ουσιαστικά για να δημιουργηθεί το ημιμεταβλητόγραμμα αρχικά υπολογίζονται ζεύγη αποστάσεων για όλα τα σημεία. Επειδή είναι δύσκολο να απεικονιστούν όλα αυτά τα ζεύγη των αποστάσεων σε ένα διάγραμμα, γίνεται ομαδοποίηση ανάλογα με την παρόμοια απόσταση και κατεύθυνση (h). Υπολογίζεται ένα εύρος τιμών απόστασης για κάθε εύρος και δημιουργείται μία κατηγορία όπου ανήκουν σε αυτή κάποια ζεύγη αποστάσεων. Η κάθε κατηγορία ονομάζεται *lag bin*, μέσα στην οποία για κάθε ζεύγος απόστασης που ανήκει σε αυτήν προσδιορίζεται η εξίσωση $\gamma(h)$.^[11]

Καθώς το h μεταβάλλεται μια σειρά από τιμές εκτιμώνται, δημιουργώντας το δειγματικό ή πειραματικό ημιμεταβλητόγραμμα.^[1] (σχήμα 2.2)



Σχήμα 2.2 Πειραματικό ημιμεταβλητόγραμμα (πηγή: [11])

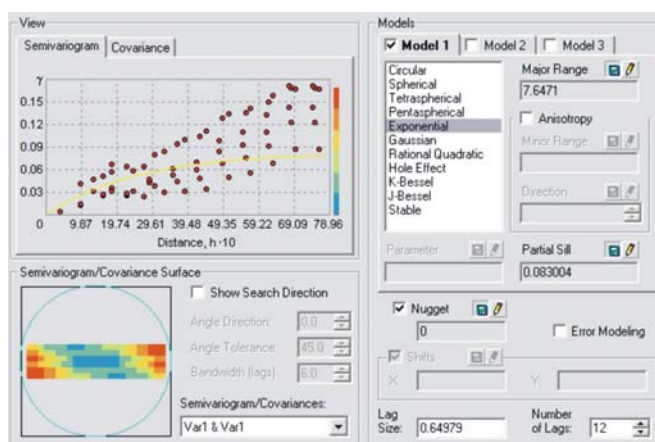
Γενικά μπορούμε να φανταστούμε ότι κάθε *lag bin* είναι ένα κελί - *pixel* μέσα στο οποίο παρόμοιες αποστάσεις προσδιορίζονται βάσει του τύπου $\gamma(h)$. Αυτό απεικονίζει η μέθοδος στην επιφάνεια του *semivariogram surface* που φαίνεται στο σχήμα 2.2. Το κέντρο του κύκλου είναι η αρχή μέτρησης της κάθε κατηγορίας που ομαδοποιούνται τα ζεύγη των αποστάσεων (*lag bin-h*) όσο απομακρυνόμαστε από το κέντρο του κύκλου το χρώμα γίνεται περισσότερο ζεστό (κόκκινο-πορτοκαλί) και αυξάνονται οι τιμές του ημιμεταβλητογράμματος, μειώνεται όμως η χωρική αυτοσυσχέτιση μεταξύ των σημείων του δείγματος.^[11]

Στην πραγματικότητα, όταν τα ζεύγη αποστάσεων στο διάγραμμα ημιμεταβλητότητας έχουν ακανόνιστη κατανομή, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 2.3, το οποίο έχει προκύψει κατά την εφαρμογή των μεθόδων παρεμβολής στην παρούσα εργασία και περιγράφεται στο επόμενο κεφάλαιο, είναι μικρή η χωρική αυτοσυσχέτιση των σημείων του δείγματος

Εξετάζοντας τα δύο σχήματα σχ. 2.2 και σχ. 2.3, παρατηρούνται τα εξής:^{[1], [2]}

- Καθώς οι τιμές του h αυξάνουν η τιμή $\gamma(h)$ αυξάνεται ασυμπτωτικά προς ένα ανώτερο όριο που ονομάζεται κατώφλι (*sill*). Αυτό σημαίνει ότι σε μεγάλες αποστάσεις δεν υπάρχει χωρική εξάρτηση μεταξύ των σημείων αφού η εκτίμηση της διαφοράς της διασποράς παραμένει σταθερή, καθώς η απόσταση των σημείων διαφοροποιείται.
- Η καμπύλη $\gamma(h)$ αυξάνεται μέχρι να φτάσει στο κατώφλι, οπότε λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της σε μία απόσταση που ορίζει τη ζώνη επιρροής. (*range*), η οποία με τη σειρά της καθορίζει το χώρο εντός του οποίου οι μεταξύ των σημείων διαφοροποιήσεις είναι εξαρτημένες χωρικά. Έτσι, εντός της ζώνης επιρροής όσο πιο κοντά είναι δύο σημεία, τόσο μεγαλύτερη είναι και η ομοιότητά τους. Επιπλέον, αν ένα σημείο εκτός δείγματος απέχει από ένα σημείο του δείγματος

απόσταση μεγαλύτερη από αυτήν που ορίζει η ζώνη επιρροής, η συνεισφορά του στη χωρική παρεμβολή είναι αμελητέα.



Σχήμα 2.3 Δειγματικό και πειραματικό ημιμεταβλητόγραμμα

- Η εκτιμηθείσα καμπύλη $\gamma(h)$ δεν περνά από την αρχή των αξόνων αλλά τέμνει τον κάθετο άξονα σε ένα σημείο με θετική τιμή. Ενώ θεωρητικά η ημιδιασπορά ισούται με μηδέν στη μηδενική απόσταση, δειγματικά σφάλματα και μικρής κλίμακας μεταβλητότητα συχνά οδηγούν σε θόρυβο, επομένως θετική τιμή $\gamma(h)$ για $h \rightarrow 0$ είναι μία εκτίμηση του μη χωρικού θορύβου ή υπολοίπου, που ονομάζεται *nugget effect*. Βέβαια στην περίπτωση που το ημιμεταβλητόγραμμα παρουσιάζει μόνο τις επιπτώσεις *nugget* δηλαδή έχει τη μορφή οριζόντιας γραμμής, τότε η εν λόγω περιοχή εξέτασης δεν παρουσιάζει χωρική συσχέτιση. Οπότε η καλύτερη εκτίμηση σε αυτήν την περίπτωση της μεταβλητής $z(\mathbf{x})$ είναι η συνολική μέση τιμή, υπολογιζόμενη από ολόκληρο το σημειακό δείγμα χωρίς να λαμβάνεται υπόψιν οιαδήποτε χωρική συσχέτιση.
- Στην περίπτωση που παρατηρείται ένα ημιμεταβλητόγραμμα όπου οι τιμές των διασπορών είναι ευρέως διασκορπισμένες αυτό δηλώνει ότι η εκτίμηση της $\gamma(h)$ έγινε με την χρήση μικρού σημειακού δείγματος.
- Σχετικά με τη μορφή του ημιμεταβλητογράμματος, υπάρχουν πολλά μοντέλα-συναρτήσεις που προσαρμόζονται σε αυτό, τέσσερα από τα οποία είναι τα βασικά α) το κανονικό - *Gaussian*, β) το γραμμικό, γ) το σφαιρικό - *Circular*, και το δ) εκθετικό - *Exponential*. (σχήμα 2.3) Η προσαρμογή κάθε μοντέλου στο ημιμεταβλητόγραμμα οδηγεί σε διαφορετικά αποτελέσματα ως προς τα χαρακτηριστικά του κάθε εμπειρικού ημιμεταβλητογράμματος που παράγεται. Η επιλογή της των διαφόρων μοντέλων καθορίζεται από τη γνώση, την εμπειρία και τα στατιστικά στοιχεία.

❖ Χαρακτηριστικά της μεθόδου *Kriging*

Η μέθοδος της βέλτιστης παρεμβολής είναι εξαιρετικά απλή στην σύλληψή της και απαιτεί ένα σύνολο δεδομένων για μία συνεχή μεταβλητή και ένα μοντέλο χωρικής διακύμανσης με τη μορφή ημιμεταβλητογράμματος. Η μέθοδος ονομάστηκε *Kriging* από τον *G. Matheron*, που χρησιμοποίησε το όνομα του Νοτιοαφρικανού μηχανικού μεταλλείων *D. G. Krige*, ο οποίος είχε αναπτύξει στη δεκαετία του '50 μεθόδους για την εκτίμηση της κατανομής μεταλλευμάτων, βασιζόμενος στις τιμές των δειγμάτων.^[1] Στην συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά οι διάφορες παραλλαγές της μεθόδου:^[2]

- *Ordinary – simple Kriging*. Η πλέον διαδεδομένη, έχει τις παρακάτω παραδοχές: α) η μεταβλητή ακολουθεί κανονική κατανομή, β) η εκτίμηση είναι αμερόληπτη, γ) μονιμότητα δευτέρου βαθμού, δ1) ο τοπικός μέσος όρος είναι γνωστός (*simple*), ή δ2) ο τοπικός μέσος είναι άγνωστος (*ordinary*)
- *Neighbourhood Kriging*. Αν και η τοπική μέση τιμή και διασπορά είναι σταθερές σε όλη την περιοχή, στις περισσότερες εφαρμογές τα δεδομένα περιέχουν τοπικές διακυμάνσεις. Για το λόγο αυτό στην εκτίμηση της άγνωστης τιμής συμμετέχουν τα κοντινότερα σημεία ή αυτά που περιλαμβάνονται στη γύρω περιοχή.
- *Block Kriging*. Αντιμετωπίζει την ολοκλήρωση των εκτιμημένων τιμών σε μεγαλύτερες περιοχές
- *Universal Kriging*. Εφαρμόζεται στην περίπτωση που τα δεδομένα περιέχουν τάση (*trend*)
- *Disjunctive Kriging* Υπολογίζει για κάθε εκτίμηση και την πιθανότητα η αληθινή τιμή να υπερβαίνει ένα συγκεκριμένο κατώφλι.
- *Cokriging*. Η εκτίμηση με το κανονικό *Kriging* βελτιώνεται σημαντικά όταν η μεταβλητή που εξετάζεται συνδέεται με κάποια άλλη μεταβλητή για την οποία υπάρχουν μετρήσεις
- *Space time Kriging* Σχετίζεται με την εισαγωγή της χρονικής διάστασης των δεδομένων.

2.2.5. Triangulated Irregular Network – TIN

Μία διαφορετική προσέγγιση για την αναπαράσταση των επιφανειών είναι να εφαρμοστεί ο τριγωνισμός στα σημειακά δείγματα, ώστε να παραχθεί ένα δίκτυο ακανόνιστων τριγώνων. Κάθε πλευρά τριγώνου θεωρείται ότι έχει ομοιόμορφες χωρικές ιδιότητες δηλαδή η τιμή του χαρακτηριστικού μεταξύ των δύο κορυφών της πλευράς μεταβάλλεται με έναν καθορισμένο και σταθερό τρόπο. Ένα σύνολο σημείων μπορεί να «τριγωνοποιηθεί» συνδέοντας κάθε σημείο με όλα τα γειτονικά που είναι πλησιέστερα σε αυτό, με ευθύγραμμα τμήματα που δεν τέμνονται μεταξύ τους. Η σύνδεση αυτή δημιουργεί μία πλειάδα πλευρών τριγώνου διαφορετικού μεγέθους. Οι τριγωνικές επιφάνειες που προκύπτουν θεωρούνται επίπεδες γι αυτό αποτελούν ένα πλήρως ορισμένο και συνεχές μοντέλο της επιφάνειας.^{[1], [4]}

Δύο σημαντικά πλεονεκτήματα των τριγωνικών αυτών δικτύων είναι πρώτον το γεγονός ότι μπορούν να συμπεριλάβουν τις πρωτογενείς παρατηρήσεις, και δεύτερον ότι η πυκνότητα της δειγματοληψίας προσαρμόζεται στην αρχική πηγή δεδομένων. Με τον τρόπο αυτό, εάν υπάρχουν αρκετά κοντινά σημεία που να σχηματίζουν μικρά τρίγωνα τότε η μεταβολή της επιφάνειας που δημιουργείται θα είναι μεγάλη, ενώ εάν τα σημεία είναι αραιωμένα μεταξύ τους σχηματίζοντας μεγάλα τρίγωνα, η επιφάνεια που θα δημιουργηθεί θα είναι επίπεδη ή με σταθερή κλίση. Κυρίως η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για τη δημιουργία ψηφιακού μοντέλου εδάφους. (*digital terrain models*) μιας και είναι χρήσιμη μέθοδος όταν οι θέσεις των μετρούμενων σημείων της δειγματοληψίας είναι τυχαίες και ακανόνιστες όπως συμβαίνει με τα σημεία υψομέτρων μιας επιφάνειας.^{[4], [9]}

Κεφάλαιο 3:

Εφαρμογή των μεθόδων παρεμβολής, στο ArcGIS – Desktop

Το λογισμικό πακέτο *ArcGIS – Desktop* παρέχει την εργαλειοθήκη *Geostatistical Analyst* στην οποία είναι δυνατόν να εκτελεσθούν οι παραπάνω μέθοδοι παρεμβολής που παρουσιάστηκαν συνοπτικά. Η εργαλειοθήκη αυτή προσφέρει στο χρήστη τη δυνατότητα να γνωρίζει άμεσα αρκετά στατιστικά μεγέθη που προκύπτουν κατά την εφαρμογή της εκάστοτε μεθόδου, όπως το σφάλμα εκτίμησης Η στατιστική αυτή ανάλυση προκύπτει για όλες τις προαναφερθέντες τεχνικές παρεμβολής εκτός από την μέθοδο δικτύου τριγώνων – *TIN*. Η εργαλειοθήκη *Geostatistical Analyst* ενσωματώνει όλες τις μαθηματικές συναρτήσεις των μεθόδων και τα στατιστικά αποτελέσματα προκύπτουν με αυτοματοποιημένο τρόπο, όπως θα περιγραφεί στο παρόν κεφάλαιο.

Τα στάδια που περιλαμβάνει η εφαρμογή στην συγκεκριμένη διατομή για κάθε μέθοδο είναι τα εξής:

1. Δημιουργία των δεδομένων της δειγματοληψίας σε μορφή επεξεργάσιμη για το λογισμικό *ArcGIS*
2. Εισαγωγή των παραμέτρων με βάση τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης διατομής
3. Εκτίμηση των τιμών στα σημεία της δειγματοληψίας βάσει των τεχνικών και των μαθηματικών συναρτήσεων που χρησιμοποιεί η εκάστοτε μέθοδος παρεμβολής
4. Εξαγωγή τυπικών σφαλμάτων που προσδιορίζονται από τη κάθε μέθοδο
5. Παραγωγή της επιφάνειας παρεμβολής και απεικόνισή της στο περιβάλλον εργασίας του *ArcMap*.

Στο σημείο αυτό θα ήταν σκόπιμο να επισημανθεί ότι οι παράμετροι που εισάγονται ακολουθούν τη λογική ότι οι τιμές τους σχετίζονται με τη γεωμετρία της διατομής. Για παράδειγμα οι τιμές των ημιαξόνων ή των ακτίνων των ελλείψεων ή κύκλων αντίστοιχα δεν είναι δυνατό να είναι πάρα πολύ μεγαλύτερες από το μήκος της μεγάλης βάσης της διατομής. Επίσης δεν επιλέγονται ως πλησιέστεροι γείτονες και τα τριάντα σημεία του δείγματος αλλά μικρότερος αριθμός γύρω από το σημείο εκτίμησης. Σε κάθε μέθοδο και σε κάθε παραλλαγή της αντίστοιχης μεθόδου αλλάζουν οι τιμές των παραμέτρων ώστε να υπάρχει ποικιλία και να εξετάζονται όσο είναι εφικτό περισσότερες διαφορετικές περιπτώσεις γιατί αρκετές μέθοδοι όπως θα περιγραφεί και στην συνέχεια παράγουν παρόμοια αποτελέσματα.

3.1. Δημιουργία δεδομένων στο ArcGIS – Desktop

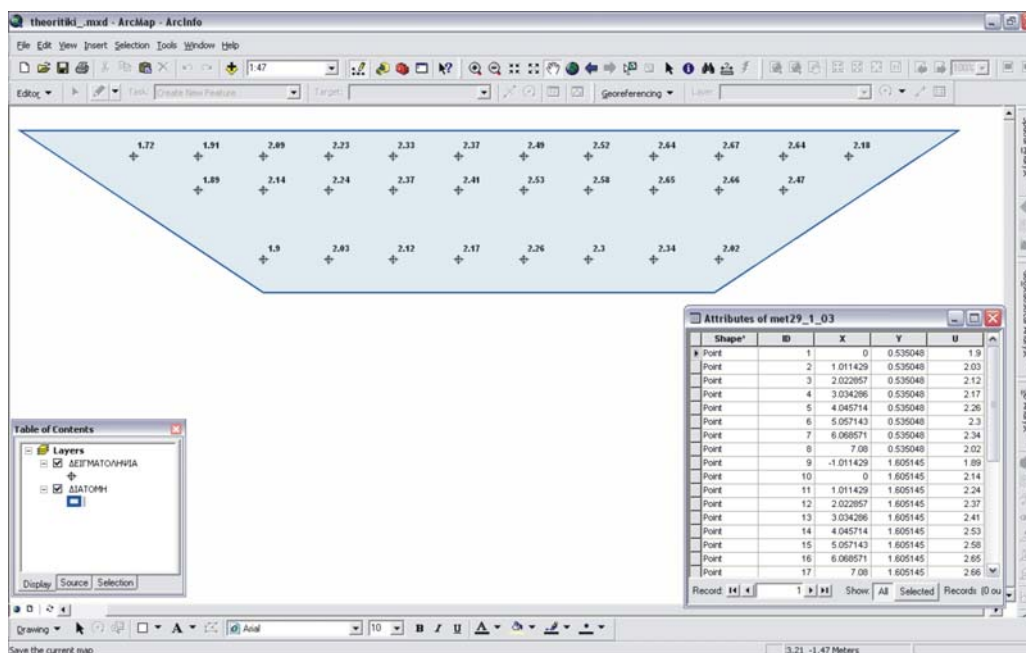
Το πρώτο στάδιο της εφαρμογής είναι το στάδιο προετοιμασίας του σημειακού δείγματος ταχυτήτων και του σχεδιασμού της διατομής στο λογισμικό πακέτο *ArcGIS – Desktop*. Ακολουθώντας το ίδιο σύστημα συντεταγμένων με το γραφικό περιβάλλον του *AutoCAD* που χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή της θεωρητικής μεθόδου μέτρησης του πεδίου ταχυτήτων και εκτίμησης της παροχής (ενότητα 1.2.), σχεδιάζεται η διατομή σε μορφή πολυγώνου (*shapefile*) στο περιβάλλον εργασίας του *ArcGIS – Desktop* το οποίο ονομάζεται *ArcMap*. Το πολυγωνικό αυτό αρχείο αποτελεί τα όρια μέσα στα οποία παράγεται η επιφάνεια παρεμβολής. Οι συντεταγμένες των τεσσάρων σημείων του πολυγώνου είναι οι εξής που περιγράφονται στον Πίνακα 3.1 :

Πίνακας 3.1 Συντεταγμένες των σημείων του πολυγώνου της διατομής

ID	X	Y
1	0	0
2	7	0
3	10.825	2.55
4	-3.825	2.55

Μέσα στο πολύγωνο σχεδιάζονται τα σημεία μέτρησης της ταχύτητας σε μορφή σημειακού αρχείου *shapefile*, το οποίο στον πίνακα των περιγραφικών χαρακτηριστικών του, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.1., περιλαμβάνει τα παρακάτω:

- ένα κωδικό αριθμό του σημείου μέτρησης στο πεδίο *id*
- τις συντεταγμένες *X* και *Y* κάθε σημείου στα αντίστοιχα πεδία
- και την τιμή της ταχύτητας στο πεδίο *U* για κάθε σημείο



Εικόνα 3.1 Περιβάλλον εργασίας ArcMap

Τα σημεία μέτρησης είναι συνολικά 30 και οι συντεταγμένες τους παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί Πίνακας 3.2. Όπως είναι αντιληπτό οι τεταγμένες Y περιγράφουν τρία (3) διαφορετικά βάθη στα οποία διεξήχθησαν οι μετρήσεις.

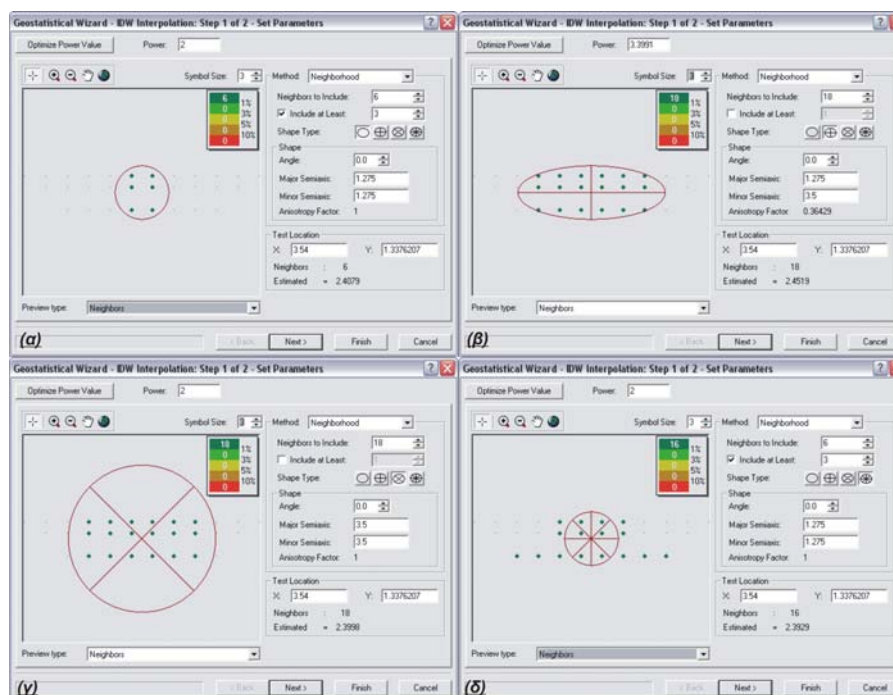
Πίνακας 3.2 Συντεταγμένες των σημείων της δειγματοληψίας

ID	X	Y	U	ID	X	Y	U
1	0.0000	0.5350	1.9	16	6.0686	1.6051	2.65
2	1.0114	0.5350	2.03	17	7.0800	1.6051	2.66
3	2.0229	0.5350	2.12	18	8.0914	1.6051	2.47
4	3.0343	0.5350	2.17	19	-2.0229	2.1402	1.72
5	4.0457	0.5350	2.26	20	-1.0114	2.1402	1.91
6	5.0571	0.5350	2.3	21	0.0000	2.1402	2.09
7	6.0686	0.5350	2.34	22	1.0114	2.1402	2.23
8	7.0800	0.5350	2.02	23	2.0229	2.1402	2.33
9	-1.0114	1.6051	1.89	24	3.0343	2.1402	2.37
10	0.0000	1.6051	2.14	25	4.0457	2.1402	2.49
11	1.0114	1.6051	2.24	26	5.0571	2.1402	2.52
12	2.0229	1.6051	2.37	27	6.0686	2.1402	2.64
13	3.0343	1.6051	2.41	28	7.0800	2.1402	2.67
14	4.0457	1.6051	2.53	29	8.0914	2.1402	2.64
15	5.0571	1.6051	2.58	30	9.1029	2.1402	2.18

3.2. Εφαρμογή της μεθόδου IDW

3.2.1. Εισαγωγή παραμέτρων

Η εργαλειοθήκη *Geostatistical Analyst* για την μέθοδο *IDW* προσφέρει τη δυνατότητα επιλογής των σημείων πλησιέστερου γείτονα με πολλές μορφές, όπως, φαίνεται στην εικόνα 3.1 παρακάτω:



Σχήμα 3.1 Περιβάλλον εισαγωγής παραμέτρων για την μέθοδο παρεμβολής *IDW*

Στο σχήμα 3.1 συγκεκριμένα παρουσιάζονται οι διαφορετικές παράμετροι και οι διαφορετικές μορφές που παρέχει η μέθοδος και οι οποίες εφαρμόστηκαν για την παραγωγή διαφορετικών επιφανειών παρεμβολής, όπως περιγράφεται παρακάτω.

Εξετάζοντας τις διάφορες μορφές που προσφέρονται από τη μέθοδο *IDW* κατά το στάδιο εφαρμογής, παρατηρούμε γενικά τα εξής: στην πρώτη περίπτωση (α) η επιλογή γίνεται με βάση την απόσταση, επιλέγονται σημεία που είναι πλησιέστερα στο υπό εκτίμηση σημείο εντός μιας ακτίνας που ορίζεται από τον χρήστη. Η μορφή αυτή της μεθόδου έχει το μειονέκτημα ότι εάν τα σημεία βρίσκονται σε μία συγκεκριμένη κατεύθυνση από το σημείο ενδιαφέροντος η εκτίμηση σίγουρα δεν μπορεί να θεωρηθεί αντιπροσωπευτική. Η δεύτερη περίπτωση η περιοχή μελέτης διαιρείται σε τέσσερα τεταρτημόρια με κέντρο το σημείο ενδιαφέροντος και ακτίνα κυκλική (β) ή ελλειπτική (γ) που ορίζεται από τον χρήστη. Από κάθε τεταρτημόριο επιλέγεται ένας ίσος αριθμός σημείων και τα οποία είναι τα πλησιέστερα προς το σημείο ενδιαφέροντος. Με τον τρόπο αυτό, τα σημεία που επιλέγονται προέρχονται από κάθε κατεύθυνση περιοχής μελέτης. Βέβαια με την προσέγγιση αυτή υπάρχει περίπτωση απομακρυσμένα σημεία να επιλεγούν έναντι άλλων που βρίσκονται πλησιέστερα στο σημείο ενδιαφέροντος. Για να ξεπεραστεί το εμπόδιο, μία τρίτη προσέγγιση είναι αυτή του διαχωρισμού της περιοχής

σε οκτώ τομείς και η επιλογή του πλησιέστερου γείτονα από κάθε τομέα, όπως φαίνεται και στην τέταρτη περίπτωση (δ).

Στο σχήμα 3.1 στο ίδιο παράθυρο εισαγωγής των παραμέτρων φαίνεται ότι το επιθυμητό σημείο παρεμβολής έχει αυτόματα επιλεγθεί από το σύστημα ως το κέντρο βάρους της διατομής (κ.β.), και παρουσιάζονται οι συντεταγμένες του σημείου αυτού x,y . Για αυτό το σημείο εκτιμάται σε κάθε παραλλαγή η αντίστοιχη τιμή της ταχύτητας και παρουσιάζεται στη θέση *estimated*. Επιπλέον παρουσιάζεται και ο αριθμός των πλησιέστερων γειτόνων που έχουν επιλεγθεί για τον προσδιορισμό της εκάστοτε τιμής της ταχύτητας στη θέση αυτή. Στην πρωτοβουλία του χρήστη δίνεται η δυνατότητα να επιλεγθεί οποιοδήποτε άλλο σημείο εκτίμησης της μεταβλητής απλά αλλάζοντας τις συντεταγμένες στο αντίστοιχο σημείο του παραθύρου εισαγωγής των παραμέτρων.













Η μέθοδος *IDW* εφαρμόζεται δώδεκα φορές καλύπτοντας έτσι τις περισσότερες παραμέτρους που προσφέρονται στο συγκεκριμένο λογισμικό πακέτο. Η κάθε φορά περιλαμβάνει είτε διαφορετικό τύπο επιλογής πλησιέστερου γείτονα, είτε διαφορετικό αριθμό επιλογής σημείων είτε διαφορετικούς κυκλικούς ή ελλειπτικούς άξονες. Στον πίνακα παρακάτω για κάθε μία φορά που εφαρμόζεται η μέθοδος περιγράφονται οι αντίστοιχες παραμέτρους που χρησιμοποιούνται. (Πίνακας 3.3)

Έχουν δημιουργηθεί τρεις ομάδες παραλλαγών ανάλογα με τις τιμές των ημιάξονων και για την κάθε μία ορίζονται τα εξής:

- Γνωρίζοντας ότι το βάθος της διατομής είναι 2.55μ. για την 1^η ομάδα επιλέγεται το μισό του βάθους ως ακτίνα του κύκλου μέσα στον οποίο θα επιλεγθούν οι πλησιέστεροι γείτονες, με κέντρο του κύκλου το κ.β. της διατομής. Το ίδιο το σύστημα επιλέγει αυτομάτως τους πλησιέστερους γείτονες που περικλείονται από τον κύκλο και είναι 6. Ως ελάχιστος αριθμός επιλεγμένων σημείων ορίζεται ο αριθμός 3. Οι τέσσερις διαφορετικές παραλλαγές της 1^{ης} ομάδας διαφέρουν στην μορφή του κύκλου της κατεύθυνσης των τμημάτων που χωρίζεται ο κύκλος, για την επιλογή των σημείων όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.3. (στήλη 9)
- Γνωρίζοντας ότι η μικρή βάση της τραπεζοειδούς διατομής του υδατορέματος είναι 7.00μ. στην 2^η ομάδα παραλλαγών επιλέγεται ως ακτίνα του κύκλου τα 3.5μ. έτσι αυτομάτως από το πρόγραμμα επιλέγονται περισσότεροι πλησιέστεροι γείτονες. Αφήνοντας ίδια την αυτόματη επιλογή των πλησιέστερων γειτόνων αλλάζοντας μόνο την κατεύθυνση των τεταρτημορίων του κύκλου δημιουργούνται οι τέσσερις παραλλαγές της 2^{ης} ομάδας.
- Στην 3^η ομάδα χρησιμοποιείται ή έλλειψη αντί για τον κύκλο, με μεγάλο ημιάξονα ίσο με 1.275μ. και μικρό ημιάξονα 3.5μ. Ο αριθμός των πλησιέστερων γειτόνων παραμένει ο ίδιος με αυτόν που αυτόματα προκύπτει από τα εργαλεία *Geostatistical Analyst*. Όπως και για τις άλλες δύο ομάδες

ανάλογα με τις κατευθύνσεις των τεταρτημορίων καθορίζονται οι τέσσερις παραλλαγές, a, b, c, d.

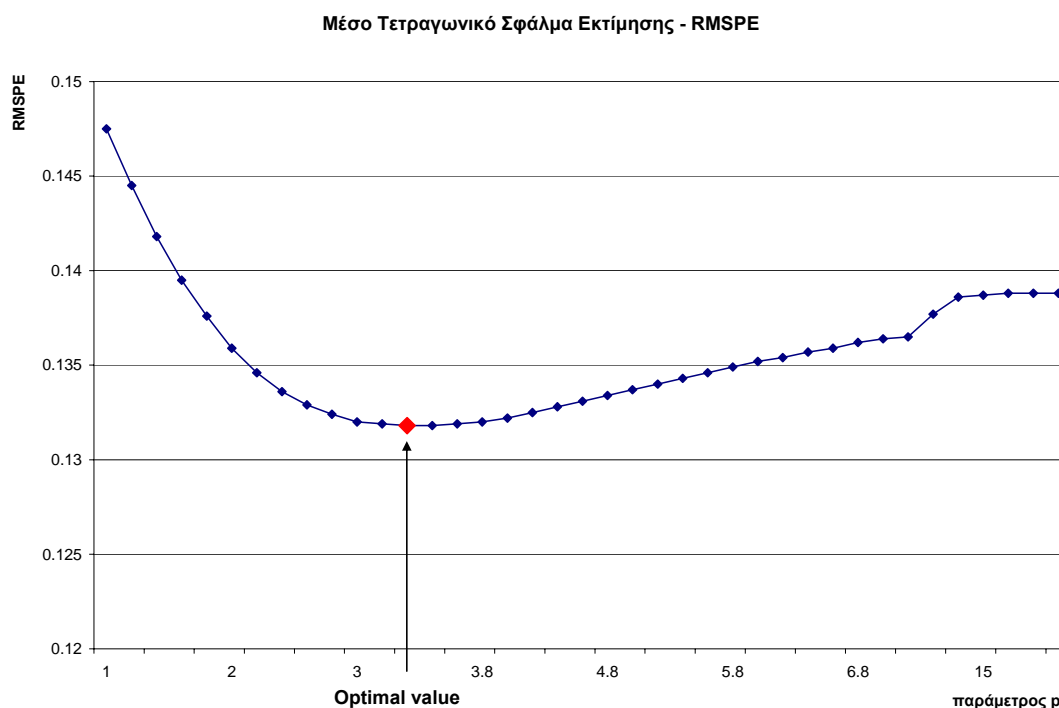
Πίνακας 3.3 Πίνακας παραμέτρων για κάθε παραλλαγή της μεθόδου IDW

Ομάδα (1)	a/a (2)	Παράμετρος p (3)	Αριθμός πλησιέστερων γειτόνων (4)	Ελάχιστος αριθμός πλησιέστερων γειτόνων (5)	Επιλογή σχήματος (6)	Μεγάλος ημιάξονας (7)	Μικρός ημιάξονας (8)	Μορφή τύπου (9)
1 ^η	a	2	6	3	κύκλος	1.275	1.275	
	b	2	6	3	κύκλος	1.275	1.275	
	c	2	6	3	κύκλος	1.275	1.275	
	d	2	6	3	κύκλος	1.275	1.275	
2 ^η	a	2	15	-	κύκλος	3.5	3.5	
	b	2	18	-	κύκλος	3.5	3.5	
	c	2	18	-	κύκλος	3.5	3.5	
	d	2	18	-	κύκλος	3.5	3.5	
3 ^η	a	3.3764	15	-	έλλειψη	1.275	3.5	
	b	3.3991	18	-	έλλειψη	1.275	3.5	
	c	3.3991	18	-	έλλειψη	1.275	3.5	
	d	3.3991	18	-	έλλειψη	1.275	3.5	

Σχετικά με την παράμετρο p που ρυθμίζει την εξομάλυνση της επιφάνειας παρεμβολής, η μέθοδος IDW της εργαλειοθήκης *Geostatistical Analyst* προσφέρει τη δυνατότητα εκτίμησης της καλύτερης τιμής της. Σαν προεπιλεγμένη τιμή η εργαλειοθήκη *Geostatistical Analyst* ορίζει για την παράμετρο p την τιμή 2, και χρησιμοποιεί τιμές p πάντα μεγαλύτερες από τη μονάδα. Για την 1^η και τη 2^η ομάδα που χρησιμοποιείται ο κύκλος για την επιλογή του πλησιέστερου γείτονα, θεωρήθηκε σκόπιμο να παραμείνει η τιμή για $p=2$. Στην 3^η ομάδα που η έλλειψη προκαλεί ανισοτροπία (*anisotropy factor*) όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1 περίπτωση β), προσδιορίζεται η καλύτερη τιμή p ανάλογα με τις παραμέτρους για την κάθε παραλλαγή.

Με βάση τις λειτουργίες του λογισμικού, συγκεκριμένα για να προσδιορίσει το πρόγραμμα τη βέλτιστη τιμή της παραμέτρου (*optimal p value*) ελαχιστοποιεί το μέσο τετραγωνικό σφάλμα πρόβλεψης (*Root-mean square prediction error – RMSPE*).^[11] Για να επιβεβαιωθεί η παραπάνω πρόταση δημιουργήθηκε ένα διάγραμμα όπου στον ένα άξονα έχει διάφορες τιμές της παραμέτρου p και στον άλλον άξονα το RMSPE όπως προκύπτει από το εφαρμογή της μεθόδου IDW για την ομάδα 3^η α παραλλαγή. (Πίνακας

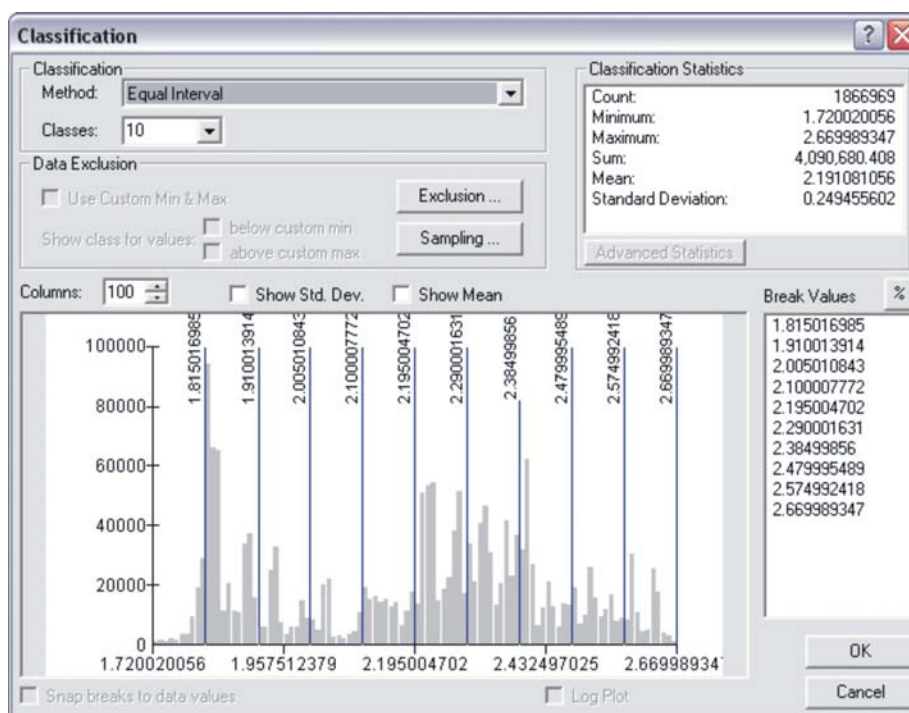
3.3) Αλλάζοντας τιμές για την παράμετρο p ξεκινώντας από τη μονάδα το $RMSPE$ παίρνει την παρακάτω μορφή που φαίνεται στο σχήμα. Όπως παρατηρείται μετά από μία συγκεκριμένη τιμή της παραμέτρου p το $RMSPE$ παραμένει σταθερό, αυτό σημαίνει ότι η επίδραση της παραμέτρου p παύει να είναι σημαντική για το αποτέλεσμα της επιφάνειας παρεμβολής.



Σχήμα 3.2 Διάγραμμα $RMSPE$ – παράμετρος p

3.2.2. Προϊόντα της εφαρμογής της μεθόδου IDW – Παρατηρήσεις

Τα αποτελέσματα που παράγονται από την εφαρμογή των παραλλαγών της μεθόδου IDW είναι α) η επιφάνεια παρεμβολής και β) το μέσο τετραγωνικό σφάλμα πρόβλεψης – $RMSPE$. Η επιφάνεια παρεμβολής απεικονίζεται σε δέκα κλάσεις – ζώνες με αυξανόμενη ένταση ίδιου χρώματος, η κάθε κλάση είναι περίπου του ίδιου εύρους (*equal interval*). Στο διάγραμμα παρακάτω (σχήμα 3.3) παρουσιάζεται ο τρόπος κατηγοριοποίησης της επιφάνειας σε κλάσεις, με μπάρες απεικονίζονται οι τιμές της μεταβλητής για την περίπτωση εφαρμογής 1^{ης} ομάδας b παραλλαγής. Επιπλέον παρουσιάζονται και στατιστικά μεγέθη για την επιφάνεια παρεμβολής στο πεδίο *Classification Statistics*. Όπως προαναφέρθηκε στο εδάφιο 2.2.1. οι ελάχιστες και μέγιστες τιμές είναι ίδιες με αυτές του δείγματος.



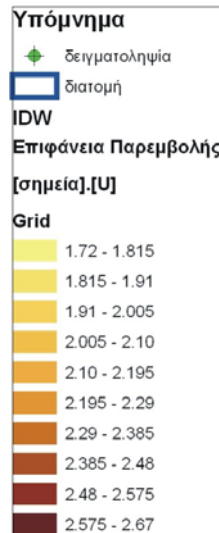
Σχήμα 3.3 Ταξινόμηση της επιφάνειας παρεμβολής σε 10 ισομερείς κλάσεις

Ξεκινώντας από τη μικρή κλάση που απεικονίζεται με ανοιχτόχρωμη ένταση και μικρές τιμές ταχύτητας καταλήγουμε σε μεγαλύτερες τιμές ταχύτητας άρα και σκουρόχρωμες εντάσεις. Για όλες τις παραλλαγές της μεθόδου *IDW* το υπόμνημα όπου φαίνονται οι κατηγορίες είναι το ίδιο και απεικονίζεται παρακάτω στο σχήμα 3.4.

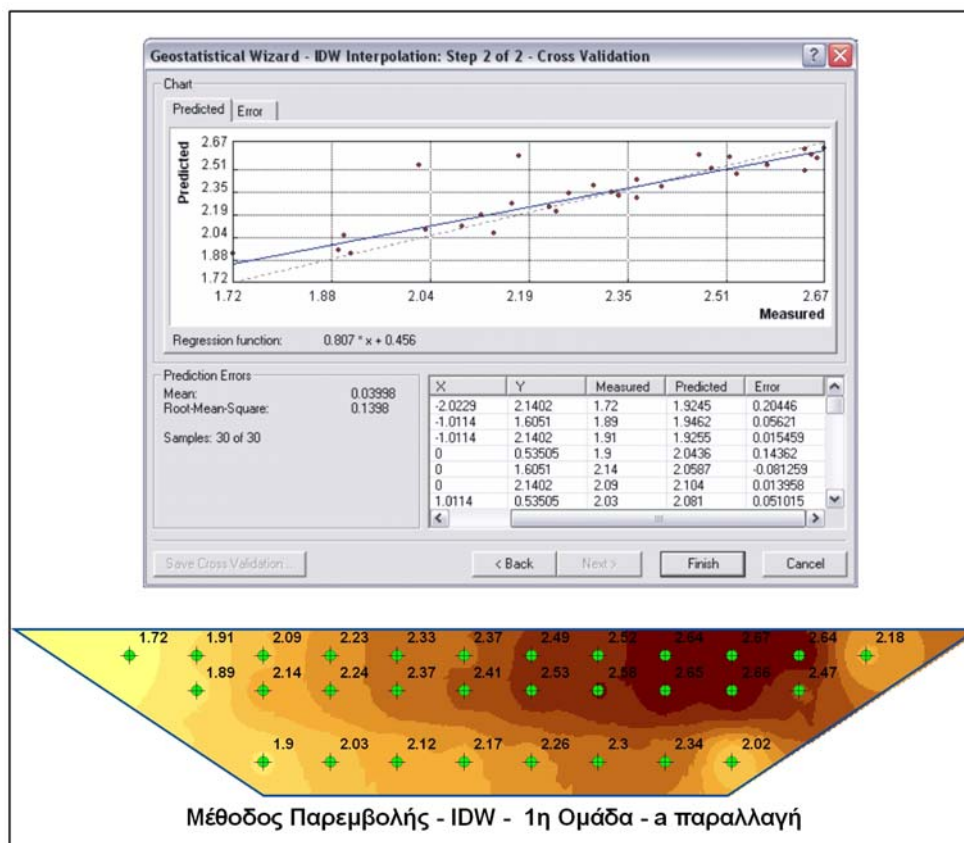
Όσον αφορά στο σφάλμα πρόβλεψης, η εργαλειοθήκη *Geostatistical Analyst* παρέχει αρκετά γραφήματα και διαγράμματα, ένα από αυτά συσχετίζει τις μετρημένες με τις εκτιμώμενες τιμές. Συγκεκριμένα οι μετρημένες τιμές φαίνονται στον οριζόντιο άξονα και οι εκτιμώμενες τιμές στον κατακόρυφο άξονα, ως σημειακό ζεύγος, προκύπτει λοιπόν ένα σύνολο σημείων για το οποίο προσαρμόζεται η καλύτερη ευθεία. Αυτόματα αναγράφεται από το σύστημα και η εξίσωση της ευθείας *regression function*. Ως γνωστών η εξίσωση της ευθείας έχει τη μορφή : $y=ax+b$. Όταν οι συντελεστές a , b είναι ίσοι με τη μονάδα η ευθεία είναι η διαγώνιος του κάθε διαγράμματος απεικονίζεται με τη διακεκομμένη γραμμή στα παρακάτω σχήματα. Στην συνέχεια παραθέτουμε για κάθε μία επιφάνεια παρεμβολής και το αντίστοιχο διάγραμμα *RMSPE*. Με τον ίδιο τρόπο απεικονίζονται και οι υπόλοιπες επιφάνειες παρεμβολής που εφαρμόζονται στις επόμενες ενότητες ώστε να υπάρχει δυνατότητα σύγκρισης για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Παρατηρούμε από τα σχήματα 3.5, 3.6, 3.7 και 3.8 ότι στην 1^η ομάδα οι παραγόμενες επιφάνειες δεν έχουν διαφορές είτε στην κατανομή του πεδίου ταχυτήτων είτε στα τυπικά σφάλματα που προσδιορίζονται. Ενδεχομένως μικρές διαφοροποιήσεις παρουσιάζονται στα όρια της διατομής μεταξύ των επιφανειών. Επιπλέον παρατηρείται ότι οι επιφάνειες των παραλλαγών b και d είναι σχεδόν πανομοιότυπες καθώς επίσης και τα *RMSPE* είναι ίδια. Εν των μεταξύ το μικρότερο *RMSPE* έχει η επιφάνεια παρεμβολής της b

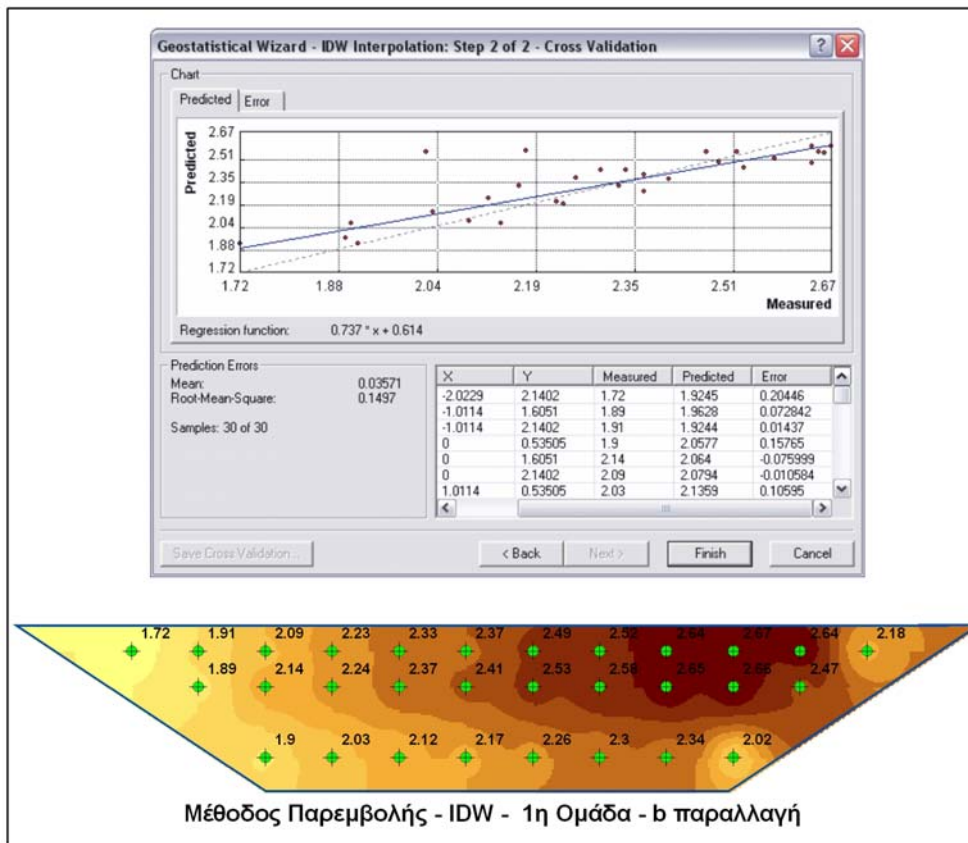
παραλλαγής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ότι αλλάζοντας μόνο τον προσανατολισμό δεν προκύπτουν διαφορές στην κατανομή του πεδίου ταχυτήτων.



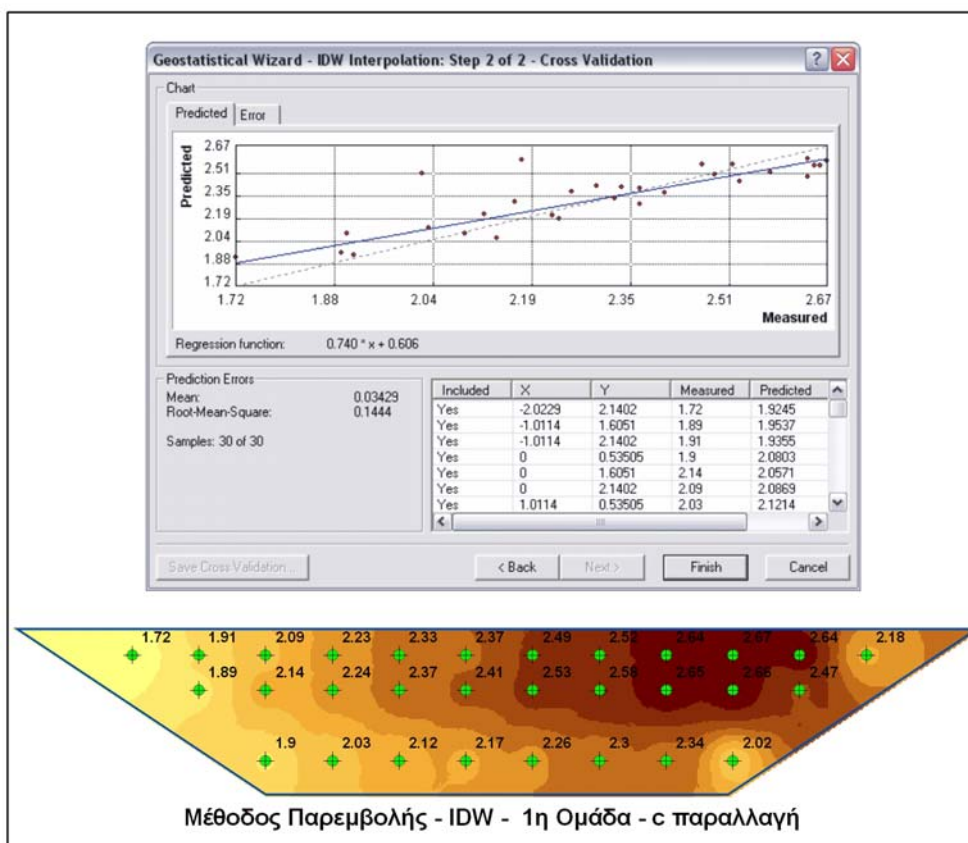
Σχήμα 3.4 Υπόμνημα συμβόλων με τα οποία απεικονίζεται η επιφάνεια παρεμβολής – IDW



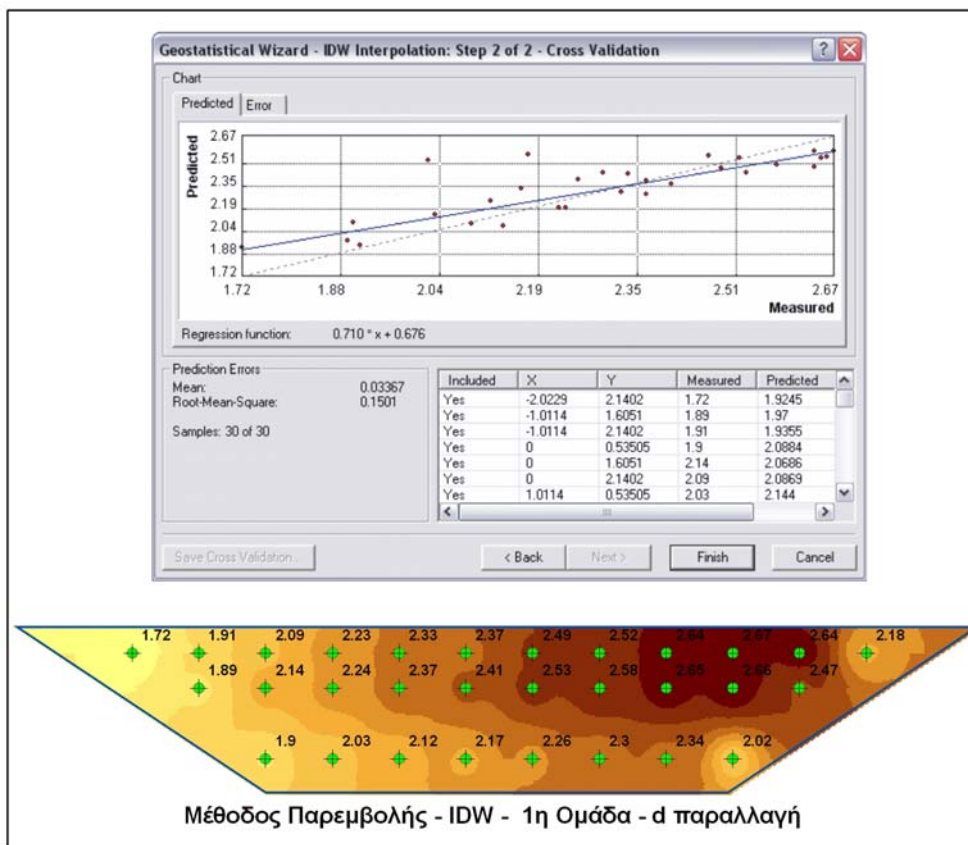
Σχήμα 3.5 Προϊόντα της IDW-1α



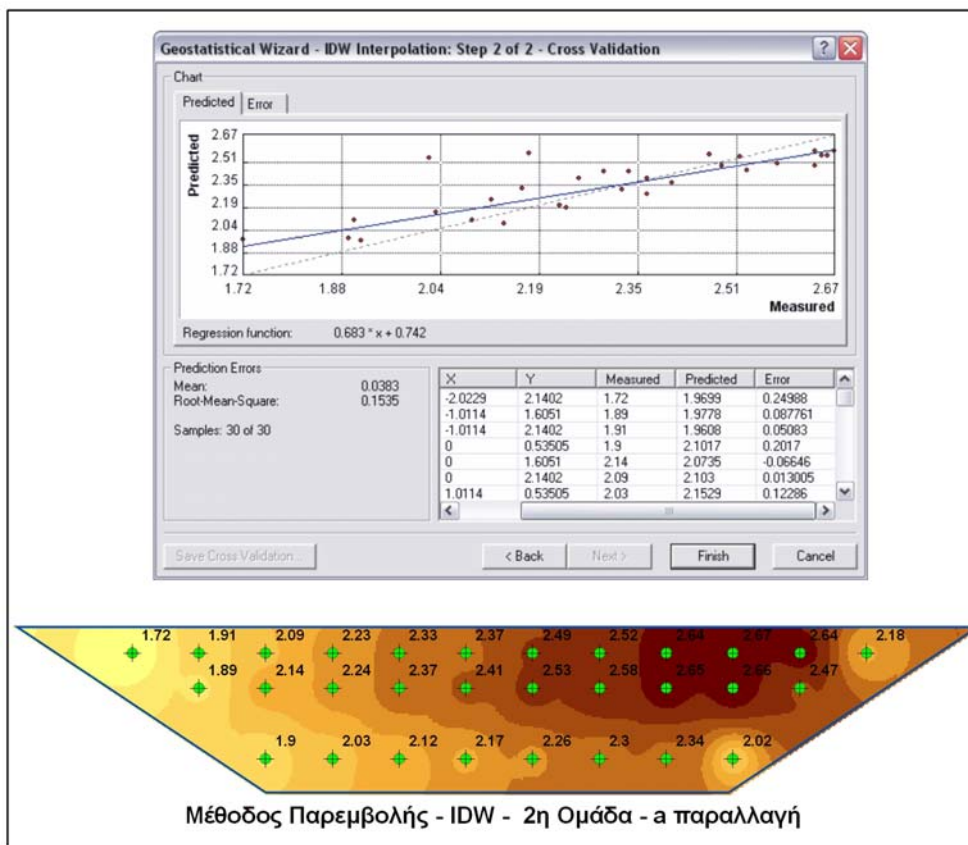
Σχήμα 3.6 Προϊόντα της IDW-1b



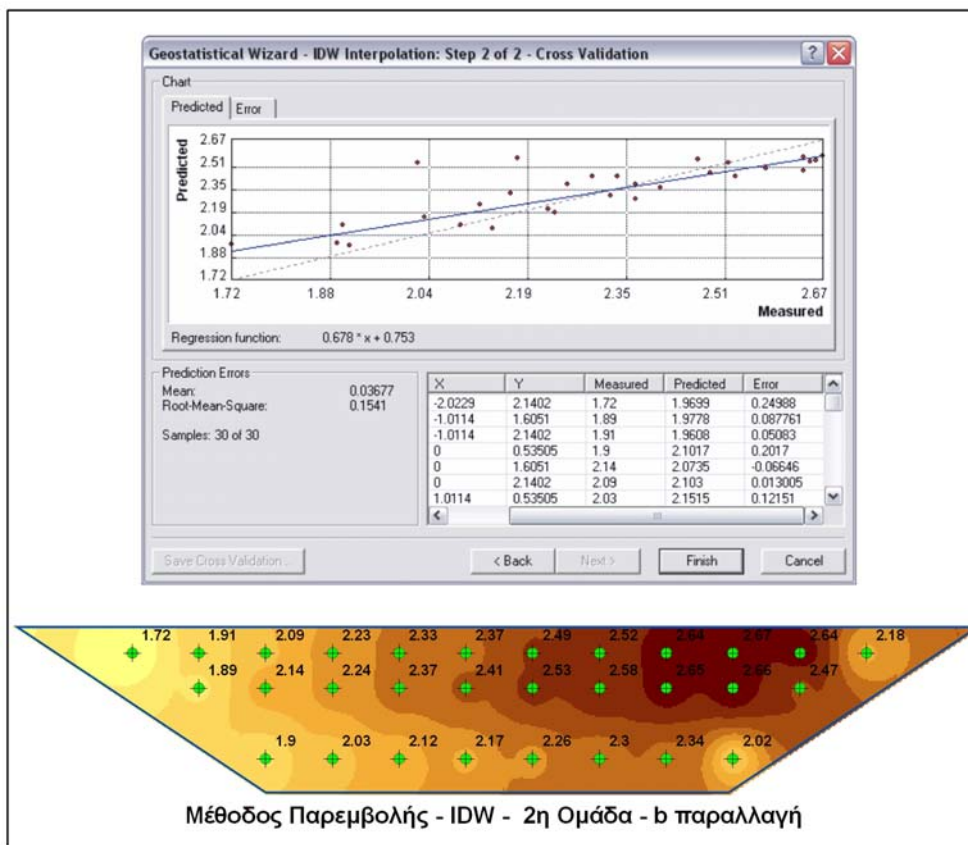
Σχήμα 3.7 Προϊόντα της IDW-1c



Σχήμα 3.8 Προϊόντα της IDW-1d



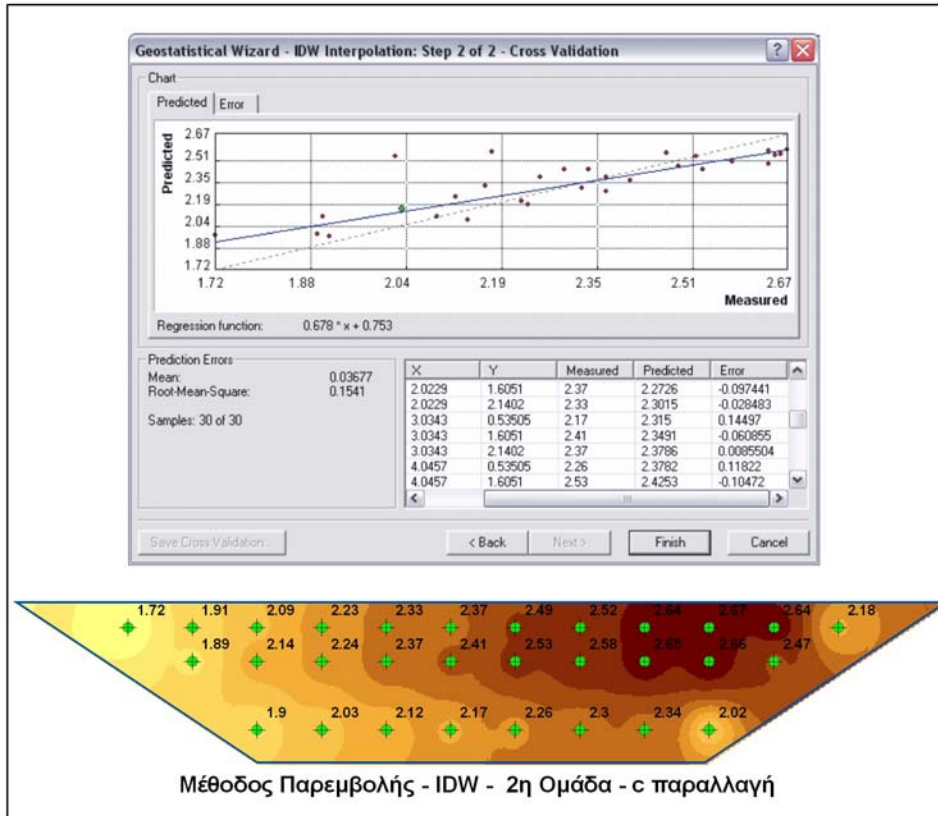
Σχήμα 3.9 Προϊόντα της IDW-2a



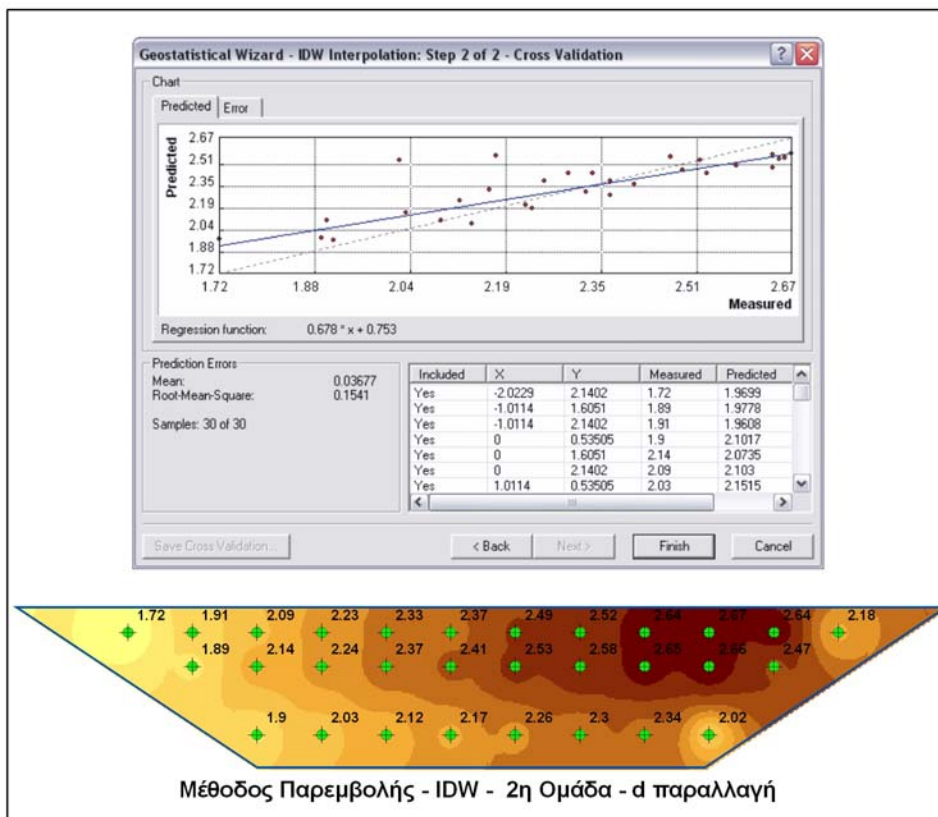
Σχήμα 3.10 Προϊόντα της IDW-2b

Για τη 2^η ομάδα (σχήματα 3.9, 3.10, 3.11 και 3.12) παρατηρούμε ότι αυξάνοντας τους ημιάξονες και τον αριθμό του πλησιέστερου γείτονα οι επιφάνειες που δημιουργούνται σε σχέση με αυτές τις 1^η ομάδας δεν παρουσιάζουν καθόλου μεγάλες διαφορές. Μόνο μικρές διαφοροποιήσεις στα όρια της διατομής. Ακριβώς τα ίδια αποτελέσματα προκύπτουν και για τα τυπικά σφάλματα *RMSPE*. Προφανώς γίνεται αντιληπτό ότι από την στιγμή που αυξάνεται η ακτίνα του κύκλου καλύπτοντας με τη διάμετρό της όλο το πλάτος της διατομής όσος και να είναι ο αριθμός των πλησιέστερων γειτόνων το μοντέλο *IDW* βγάζει την ίδια επιφάνεια παρεμβολής. Στην 3^η ομάδα (σχήματα 3.13, 3.14, 3.15 και 3.16) από την στιγμή που χρησιμοποιείται η έλλειψη και όχι ο κύκλος είναι αναμενόμενο να υπάρξουν διαφορές στις επιφάνειες σε σχέση με τις άλλες δύο ομάδες. Βέβαια μεταξύ των παραλλαγών της 3^η ομάδας δεν παρατηρούνται αισθητές διαφορές στην επιφάνεια ούτε στα τυπικά σφάλματα *RMSPE*. Τα μέσα σφάλματα εκτίμησης στις επιφάνειες της 3^η ομάδας είναι μικρότερα από ότι αυτά των άλλων δύο ομάδων. Επιπλέον παρατηρείται ότι το προφίλ της ταχύτητας διευρύνεται κατά πλάτος της διατομής και αυτό ίσως να οφείλεται στην έλλειψη ως σχήμα επιλογής των πλησιέστερων γειτόνων.

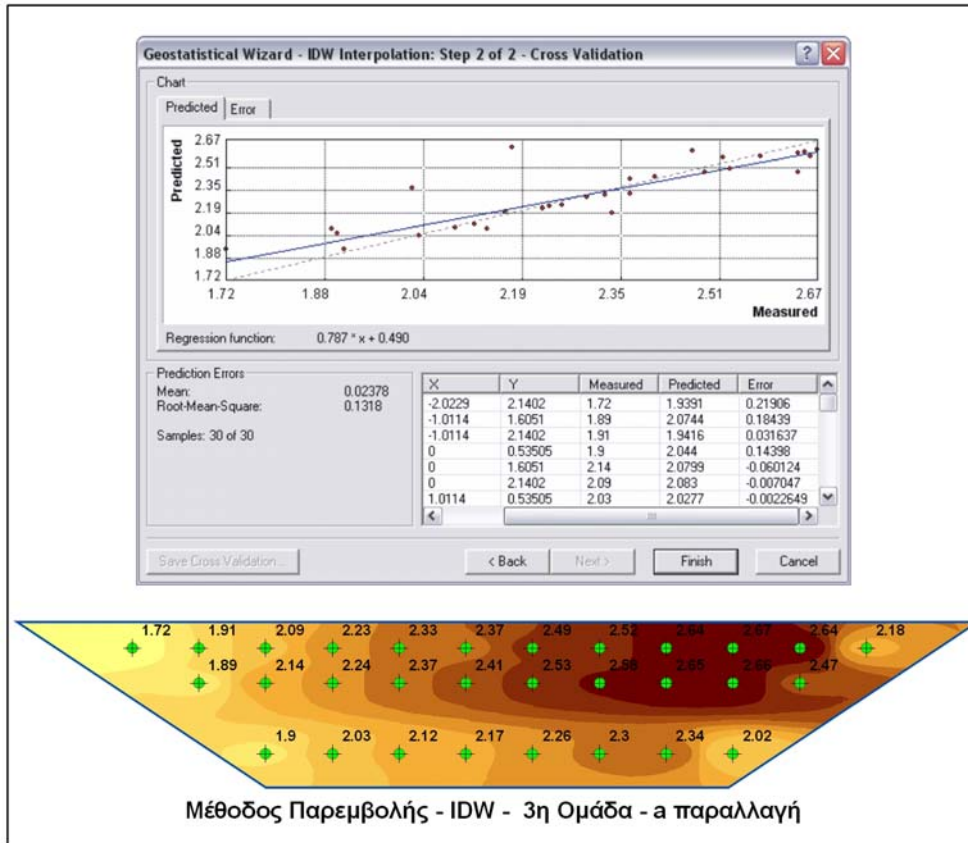
Σαν πρώτο συμπέρασμα που προέκυψε από τη εφαρμογή της *IDW* είναι ότι για οποιαδήποτε παραλλαγή που η μέθοδος προτείνει, ότι το αποτέλεσμα επηρεάζεται περισσότερο από το σχήμα και όχι από τον αριθμό των πλησιέστερων γειτόνων. Έτσι στις επόμενες μεθόδους που θα εφαρμοστούν δεν θα δοθεί μεγάλη σημασία στον αριθμό και στον προσανατολισμό για την επιλογή των πλησιέστερων γειτόνων.



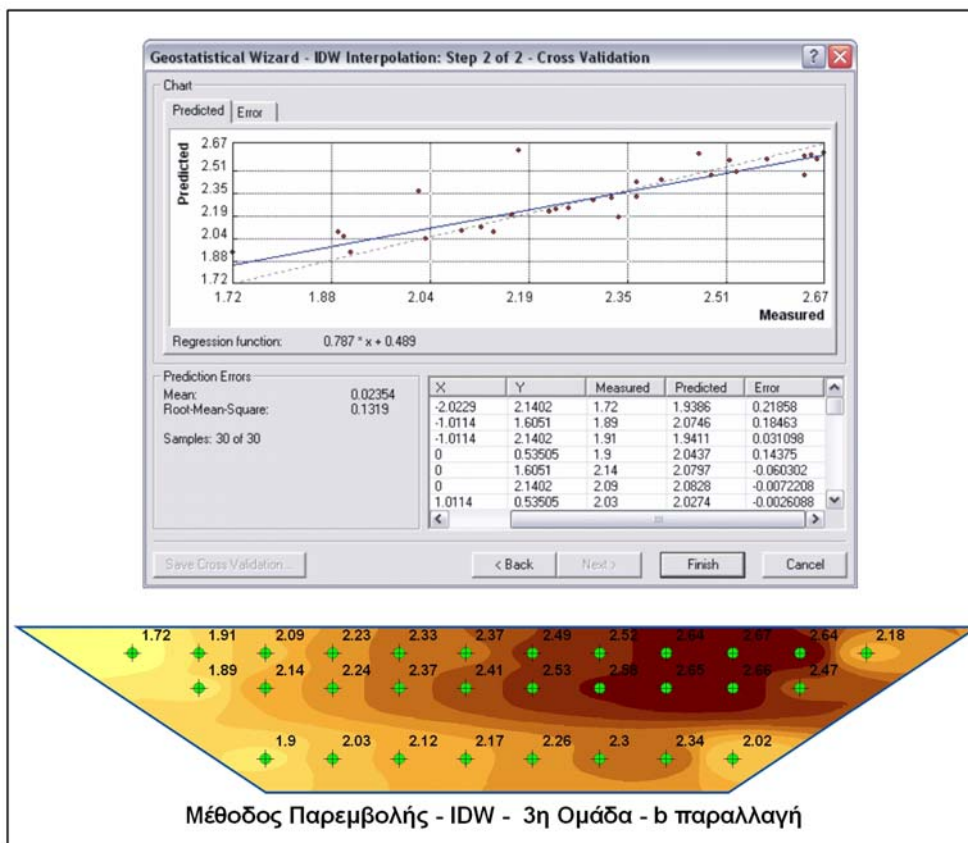
Σχήμα 3.11 Προϊόντα της IDW-2c



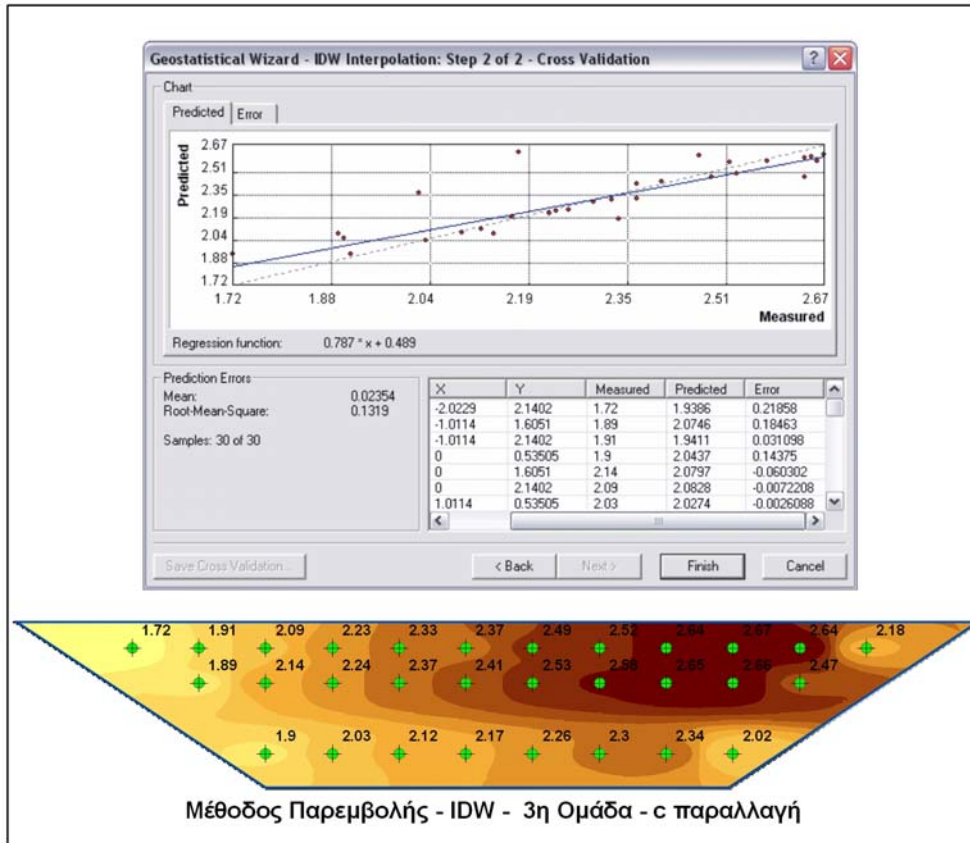
Σχήμα 3.12 Προϊόντα της IDW-2d



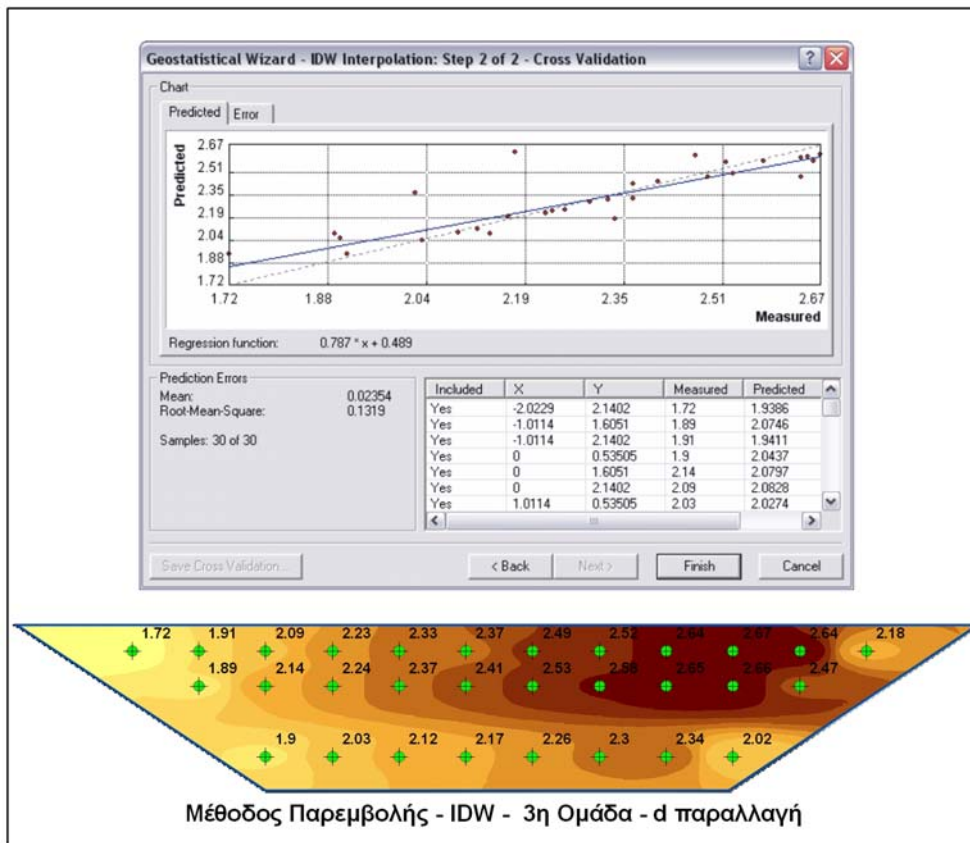
Σχήμα 3.13 Προϊόντα της IDW-3a



Σχήμα 3.14 Προϊόντα της IDW-3b



Σχήμα 3.15 Προϊόντα της IDW-3c



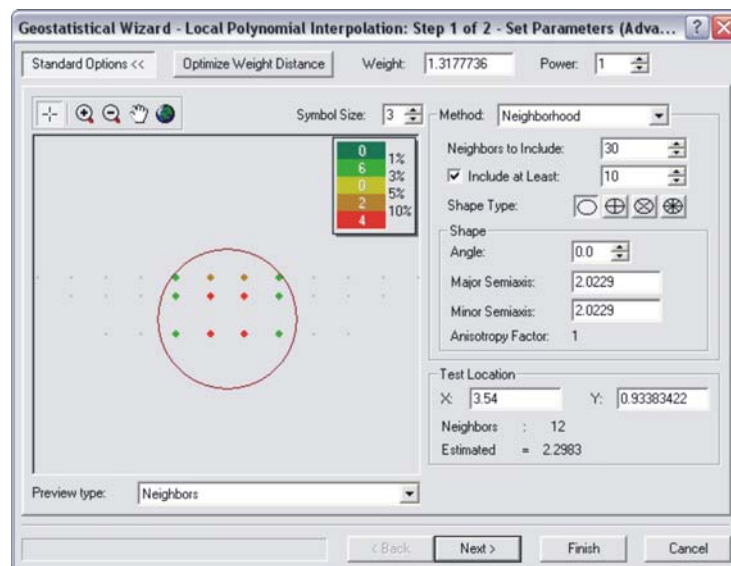
Σχήμα 3.16 Προϊόντα της IDW-3d

3.3. Εφαρμογή των γενικευμένων και τοπικών μεθόδων εκτίμησης – Global & Local Polynomial Interpolation

3.3.1. Παράμετροι και προϊόντα της εφαρμογής Global & Local Polynomial Interpolation – Παρατηρήσεις

Στην εργαλειοθήκη του *Geostatistical Analyst* για την γενικευμένη μέθοδο παρεμβολής δεν παρέχονται κάποιες ιδιαίτερες παράμετροι παρά μόνο η τιμή της δύναμης η οποία έχει τον ίδιο ρόλο με την παράμετρο p της μεθόδου *IDW*, ρυθμίζει δηλαδή την ομαλότητα των καμπυλών της επιφάνειας παρεμβολής. Για την εφαρμογή της παρούσης επιλέχθηκε η προεπιλεγμένη τιμή της δύναμης που το ίδιο το μοντέλο του λογισμικού προτείνει, η τιμή αυτή ισούται με δύο (2).

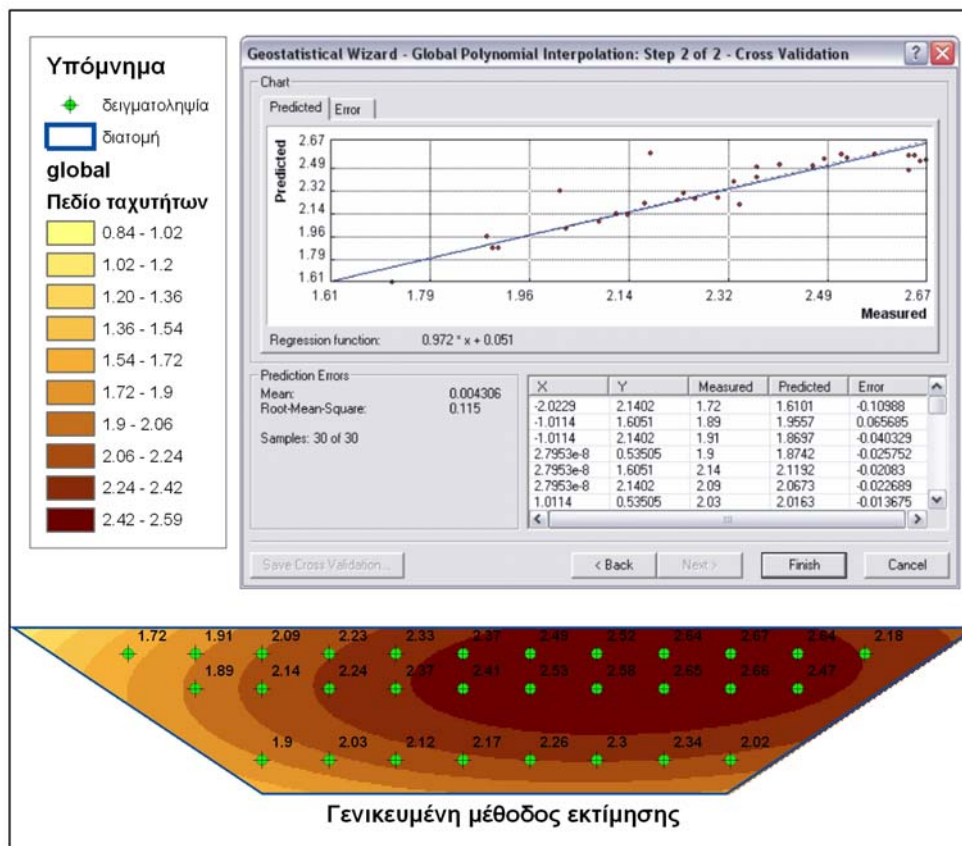
Στην τοπική μέθοδο παρεμβολής, επιλέχθηκε μονάδα για τη δύναμη, για να προκύψει επιφάνεια λιγότερη ομαλή. Όπως έχει αναλυθεί στην ενότητα 2.2.2 η *Local Polynomial Interpolation* εξετάζει εκτός της γενικότερης τάσης αλλά και τις τοπικές διαφοροποιήσεις, για το λόγο αυτό το μοντέλο του λογισμικού χρησιμοποιεί τη μέθοδο του πλησιέστερου γείτονα για την εκτίμηση της τοπικής τάσης. Στην εργαλειοθήκη του *Geostatistical Analyst* προσδιορίζεται και η καλύτερη τιμή του βάρους (*optimize weight distance*, σχήμα 3.17) βάσει των παραμέτρων και σε σχέση με την τιμή της δύναμης. Οι τιμές των παραμέτρων που επιλέγονται είναι οι ίδιες με τις προεπιλεγμένες τιμές που το λογισμικό προσδιορίζει με βάση τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής και με βάση τις θέσεις των σημείων στο δείγμα. Στο παρακάτω σχήμα περιγράφονται τα στοιχεία που εισάγονται για την παραγωγή της επιφάνειας παρεμβολής.



Σχήμα 3.17 Παραμετροποίηση για τη local interpolation

Παρατηρείται από το σχήμα 3.17, ότι από το δείγμα των τριάντα σημείων έχουν επιλεγεί τα οκτώ (8) καθένα από τα οποία έχουν διαφορετικό βάρος όπως απεικονίζονται με την αντίστοιχη χρωματική διαβάθμιση. Τα τέσσερα σημεία με το κόκκινο χρώμα επηρεάζουν περισσότερο την εκτίμηση στο κ.β. δηλαδή της διατομής, το

κέντρο του κύκλου ακτίνας 2.0μ. Οι παραγόμενες επιφάνειες παρεμβολής της *Global & Local Polynomial Interpolation* παρουσιάζονται στα σχήματα 3,18 και 3.19 αντίστοιχα.

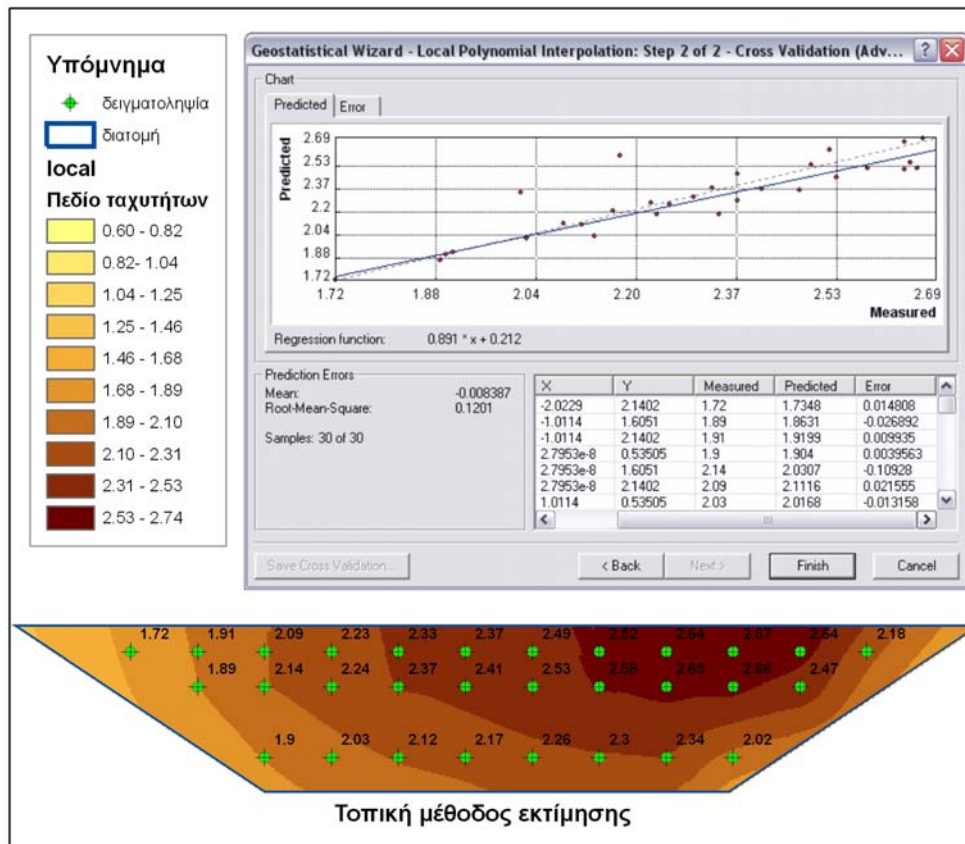


Σχήμα 3.18 Επιφάνεια παρεμβολής global interpolation

Παρατηρούμε ότι στη γενικευμένη μέθοδο (σχήμα 3.18) απεικονίζεται μία τάση του φαινομένου να εμφανίζονται μεγάλες ταχύτητες ροής σε ένα πλαίσιο της διατομής ξεκινώντας από την επιφάνειά της μέχρι και κάτω σχεδόν από το μέσο βάθος της. Ουσιαστικά τονίζει το πραγματικό γεγονός ότι στην περιοχή αυτή της διατομής εμφανίζονται σχετικά μεγάλες ταχύτητες ροής όπως και οι μετρήσεις του δείγματος αποδεικνύουν, όμως γενικεύει αυτήν την υπόθεση σε όλο σχεδόν το πλάτος της διατομής. Η γενικευμένη μέθοδος δίνει αρκετές μεγάλες τιμές ταχύτητας στο δεξί όριο της διατομής σε αντίθεση με την τοπική (σχήμα 3.19), και οι δύο όμως δίνουν για το αριστερό όριο τιμές ταχύτητας κοντά στα 0.80m/sec. Στη γενικευμένη μέθοδο δεν φαίνεται να υπάρχει αυτοσυσχέτιση μεταξύ των σημείων σε σχέση με την τοπική μέθοδο εκτίμησης. (σχήμα 3.19)

Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα εκτίμησης και στις δύο μεθόδους είναι πολύ πιο μικρό από ότι στις προηγούμενες μεθόδους. Επίσης το πεδίο ταχυτήτων που οι επιφάνειες παρεμβολής έχουν δημιουργήσει διαφέρει εντελώς από ότι συμβαίνει στις μεθόδους *IDW*. Οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές του πεδίου ταχυτήτων στις δύο αυτές επιφάνειες έχουν μεγαλύτερο εύρος από ότι στις επιφάνειες παρεμβολής *IDW* που διατηρούν τα

μέγιστα και ελάχιστα του αρχικού δείγματος, όπως φαίνεται από τα υπομνήματα των επιφανειών παρεμβολής.

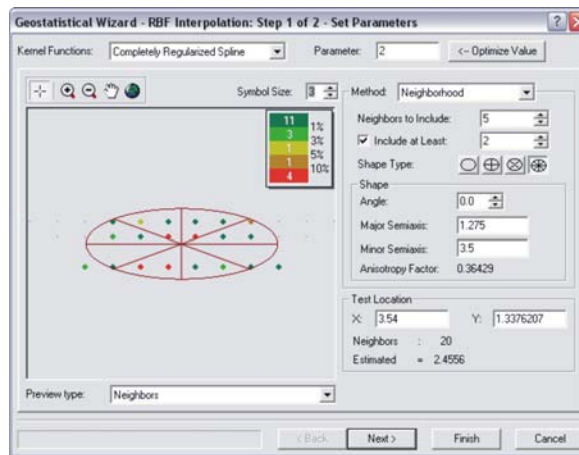


Σχήμα 3.19 Επιφάνεια παρεμβολής local interpolation

3.4. Εφαρμογή των μεθόδων Radial Basis Functions

3.4.1. Παράμετροι και προϊόντα της εφαρμογής Radial Basis Functions – Παρατηρήσεις

Οι τεχνικές *RBF* που εφαρμόζονται είναι δύο, συγκεκριμένα ο τύπος *Regularize Spline* και ο τύπος *multiquadric function*. Η παραμετροποίηση για τις δύο μεθόδους ακολουθεί την τεχνική του πλησιέστερου γείτονα με βάρος, όπως και στη μέθοδο τοπικής εκτίμησης και στην *IDW*.

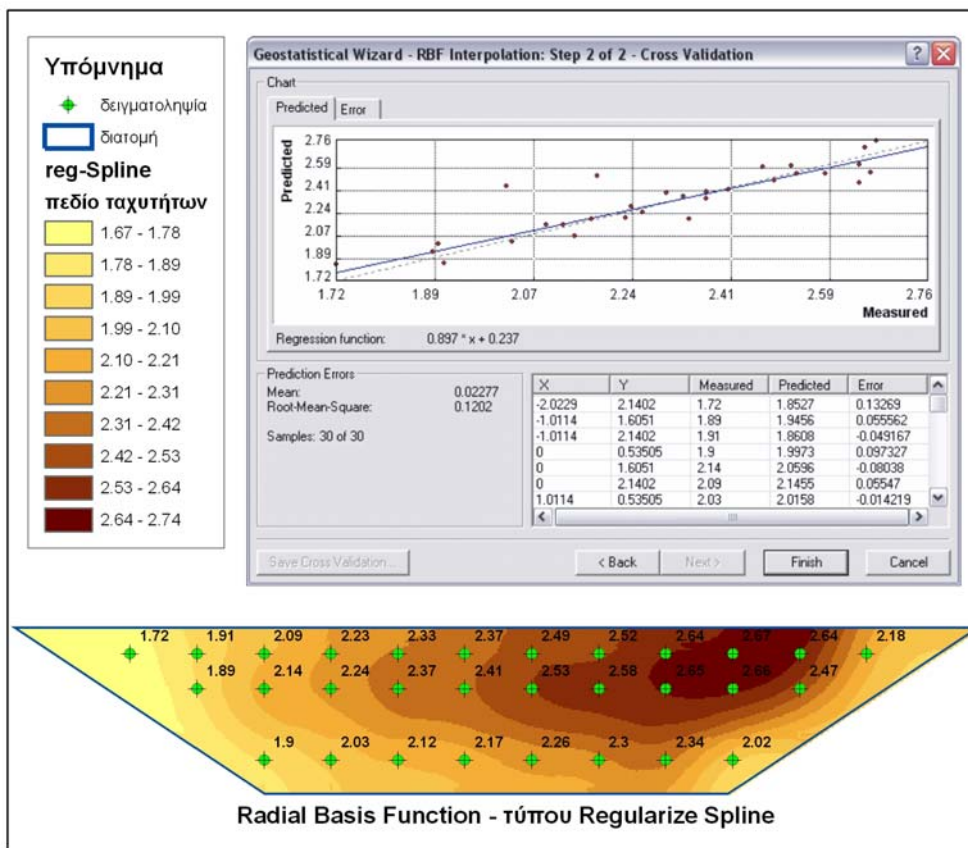


Σχήμα 3.20 Παράθυρο εισαγωγής παραμέτρων – τύπος Regularize Spline

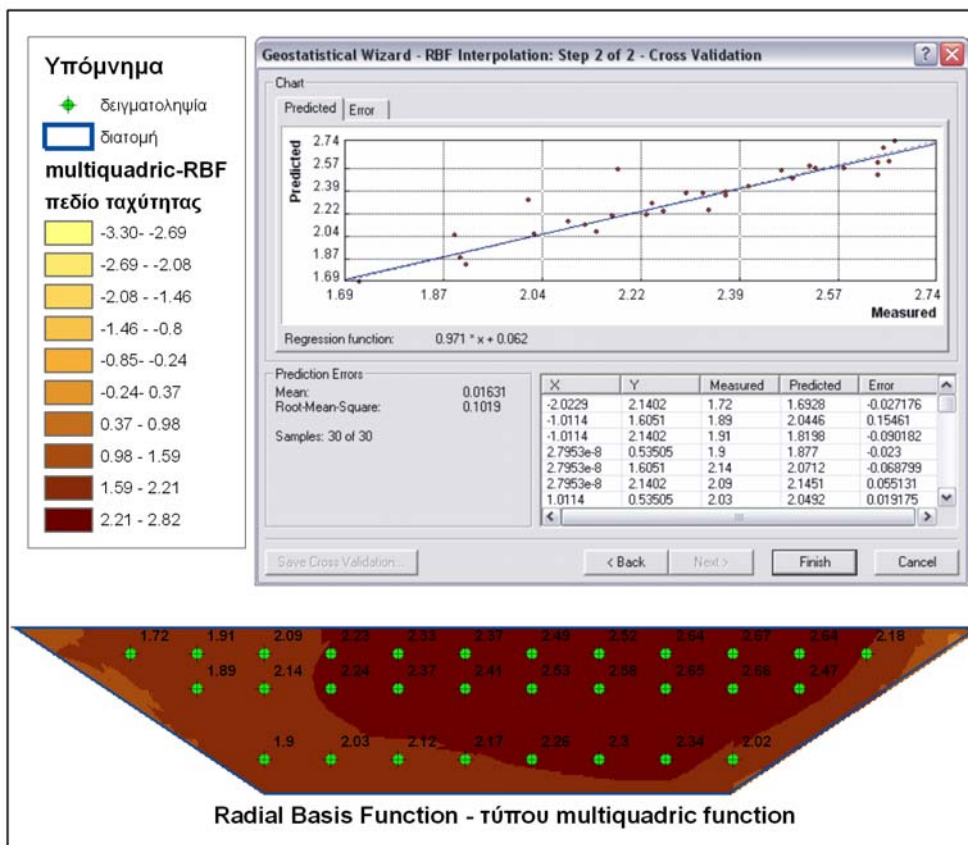
Από το σχήμα 3.20 παρατηρείται ότι εξαιτίας της έλλειψης, χωρισμένη σε οκτώ τεταρτημόρια, ως σχήμα για την επιλογή των πλησιέστερων γειτόνων με μέγιστο ημιάξονα το μισό του μήκους της μικρής βάσης της τραπεζοειδούς διατομής, έχουν επιλεγθεί είκοσι πλησιέστερα σημεία (20). Όμως για το λόγο ότι έχει εισαχθεί ως μέγιστος αριθμός σημείων (*Neighbors to include*) το πέντε (5), τα 11 από τα 20 σημεία δεν επηρεάζουν καθόλου την εκτίμηση της τιμής στο κ.β. της διατομής. Όσον αφορά στη δύναμη επιλέγεται η τιμή δύο (2) καθώς το ίδιο το λογισμικό προτείνει ότι είναι η συνηθέστερη.

Από το αποτέλεσμα παρατηρούμε ότι το εύρος των τιμών του πεδίου ταχυτήτων δεν είναι πολύ μεγάλο, δεν υπερεκτιμώνται οι μεγάλες τιμές της ταχύτητας ούτε και υποεκτιμώνται οι μικρές. Η ευθεία που προσαρμόζεται στις εκτιμώμενες τιμές είναι αρκετά συμμετρική με τη διαγώνιο και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα είναι αρκετά μικρό. Βέβαια η κατανομή του πεδίου / προφίλ ταχυτήτων διαφέρει πάρα πολύ από ότι προέκυπτε στις προηγούμενες μεθόδους.

Κατά την εφαρμογή του τύπου *multiquadric function*, παρατηρήθηκε ότι μεταβάλλοντας τις διάφορες παραμέτρους, τον αριθμό πλησιέστερων γειτόνων, το σχήμα και τον προσανατολισμό επιλογής τους, η επιφάνεια παρεμβολής που παράγεται είναι ουσιαστικά η ίδια. Όπως φαίνεται από το σχήμα 3.22, στην επιφάνεια παρεμβολής υπάρχουν και αρνητικές τιμές ταχύτητας παρά το γεγονός ότι το σφάλμα εκτίμησης είναι μικρό και η γραμμή προσαρμόζεται πάρα πολύ καλά στις εκτιμώμενες τιμές. Όπως φαίνεται από το σχήμα οι αρνητικές τιμές ενδεχομένως να βρίσκονται στα όρια της διατομής γι αυτό και δεν φαίνονται ή ίσως να είναι λάθος του μοντέλου για το λόγω ότι δεν υπάρχουν μετρήσεις στα όρια της διατομής και αυτό οδηγεί τη μέθοδο σε λανθασμένα αποτελέσματα.



Σχήμα 3.21 Επιφάνεια παρεμβολής Regularize Spline



Σχήμα 3.22 Επιφάνεια παρεμβολής multiquadric function

3.5. Εφαρμογή της μεθόδου Kriging






3.5.1. Εισαγωγή παραμέτρων

Οι παράμετροι των διαφόρων παραλλαγών της μεθόδου *Kriging* είναι αρκετές και περισσότερο πολύπλοκες σε σχέση με τις μεθόδους που εφαρμόστηκαν μέχρι στιγμής. Για πολλές παραμέτρους θα χρησιμοποιείται η τιμή που το ίδιο το πρόγραμμα προτείνει, διαφορετικά απαιτείται διεξοδική ανάλυση μόνο για τη μέθοδο *Kriging*.

Οι μέθοδοι που θα εφαρμοστούν είναι οι συνηθέστερες, *Ordinary* και *Simple Kriging* οι οποίες ταιριάζουν και στην περίπτωση της εργασίας. Στον πίνακα που ακολουθεί για κάθε μία παραλλαγή παρουσιάζονται οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται.

Η εργαλειοθήκη *Geostatistical Analyst* παρέχει τη δυνατότητα, μέσω μετασχηματισμών (*Box-Cox*, *Log transformations* ή *normal score transformation (NST)*) να προσαρμόζει τα δεδομένα ώστε να προκύπτουν σταθερές μεταβλητότητες και οι παρατηρήσεις να ανήκουν στην κανονική κατανομή, σύμφωνα με τη λειτουργία των μεθόδων *Ordinary*, *Simple Kriging*. Ο μετασχηματισμός διενεργείται σε αρχικό στάδιο πριν προκύψουν τα διαγράμματα ημιμεταβλητότητας.

Πίνακας 3.4 Πίνακας παραμέτρων για κάθε παραλλαγή της μεθόδου *Kriging*

Όνομασία	a/a	Μετασχηματισμός	Μέση τιμή	Trend removal	Μοντέλο προσαρμογής ημιμ/τος	Αριθμός πλησιέστερων γειτόνων	Επιλογή σχήματος	Μεγάλος ημιάξονας	Μικρός ημιάξονας	Μορφή τύπου
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
Ordinary	a	-	-	-	Gaussian	30	κύκλος	10.752	10.752	
	b	Box-Cox	-	Const	Spherical	3	κύκλος	10.752	10.752	
Simple	a	-	2.2957	-	Gaussian	3	κύκλος	7.5388	7.5388	
	b	NST	-	-	Gaussian	3	έλλειψη	2.000	7.6251	
	c	-	2.2957		J-Bessel	5	κύκλος	7.6471	7.6471	

Σχετικά με τη μέση τιμή που εισάγεται μόνο στην περίπτωση της *Simple Kriging* (2,2957), είναι η μέση τιμή των μετρήσεων της δειγματοληψίας. Την τιμή αυτή η μέθοδος τη χρησιμοποιεί ως προσωρινή για τον προσδιορισμό της επιφάνειας παρεμβολής, στην οποία η τελική μέση τιμή είναι σαφώς διαφορετική.

Και οι δύο παραλλαγές παρέχουν τη δυνατότητα στο χρήστη να μην υπολογίσει τη γενική ή τοπική τάση που ενδεχομένως να παρουσιάζουν οι μετρήσεις του δείγματος ώστε η τελική επιφάνεια παρεμβολής να είναι ανεπηρέαστη από την τάση αυτή, η παράμετρος αυτή ονομάζεται *trend removal*. Στην συνέχεια παράγεται το διάγραμμα ημιμεταβλητογράμματος, στο οποίο προσαρμόζεται ένα μοντέλο όπως έχει περιγραφεί

στο εδάφιο 2.2.4. Το λογισμικό προτείνει το *Spherical* μοντέλο ως προεπιλογή, αλλά για δοκιμαστικούς σκοπούς επιλέχθηκαν και άλλα μοντέλα για να παρατηρηθούν τυχόν διαφορές.

Η τιμή των ημιαξόνων είναι η τιμή του εύρους του ημιμεταβλητογράμματος, που το ίδιο το λογισμικό προτείνει ως προεπιλεγμένη τιμή. Η προεπιλεγμένη τιμή διατηρείται η ίδια σε όλες τις περιπτώσεις εκτός της περίπτωσης *b* της *Simple Kriging* όπου έχει επιλεγθεί η έλλειψη και γι αυτό μειώθηκε ο μεγάλος ημιάξονας στα 2,00μ. ώστε να ταιριάζει με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής μιας που το μέγιστο βάθος της διατομής φτάνει τα 2.55μ.

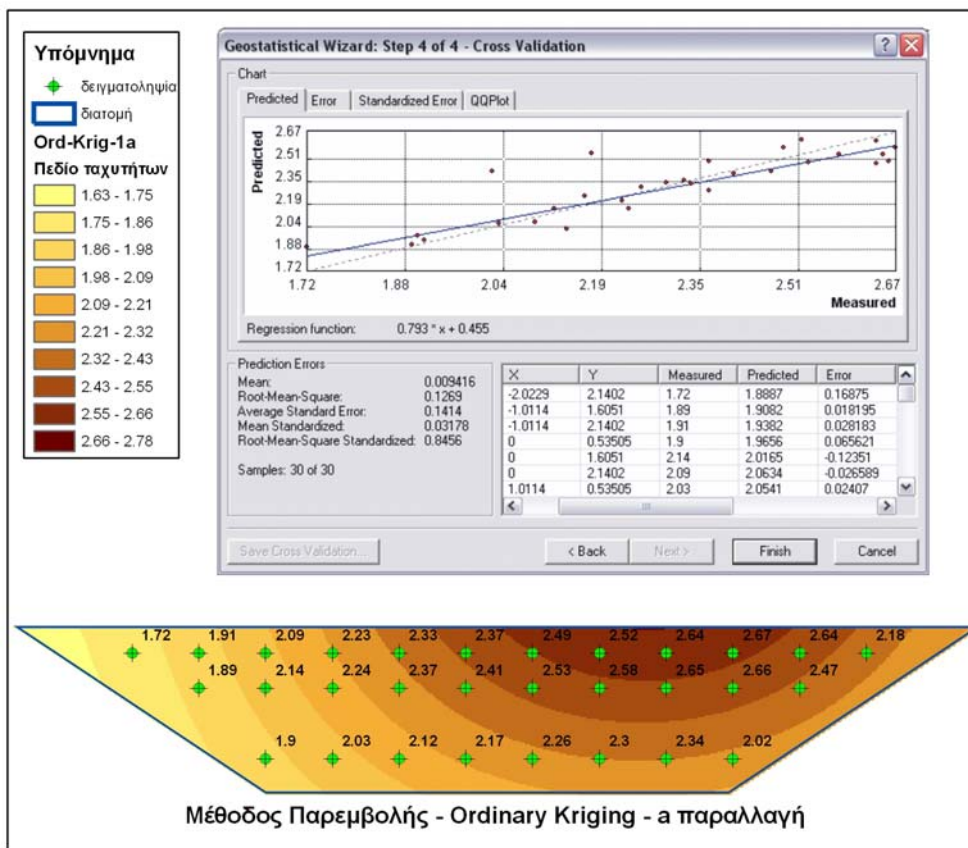
3.5.2. Προϊόντα της εφαρμογής Kriging – Παρατηρήσεις

Οι παρατηρήσεις και τα αποτελέσματα θα περιγραφούν αρχικά για την *Ordinary Kriging*, στην συνέχεια για την *Simple Kriging*.

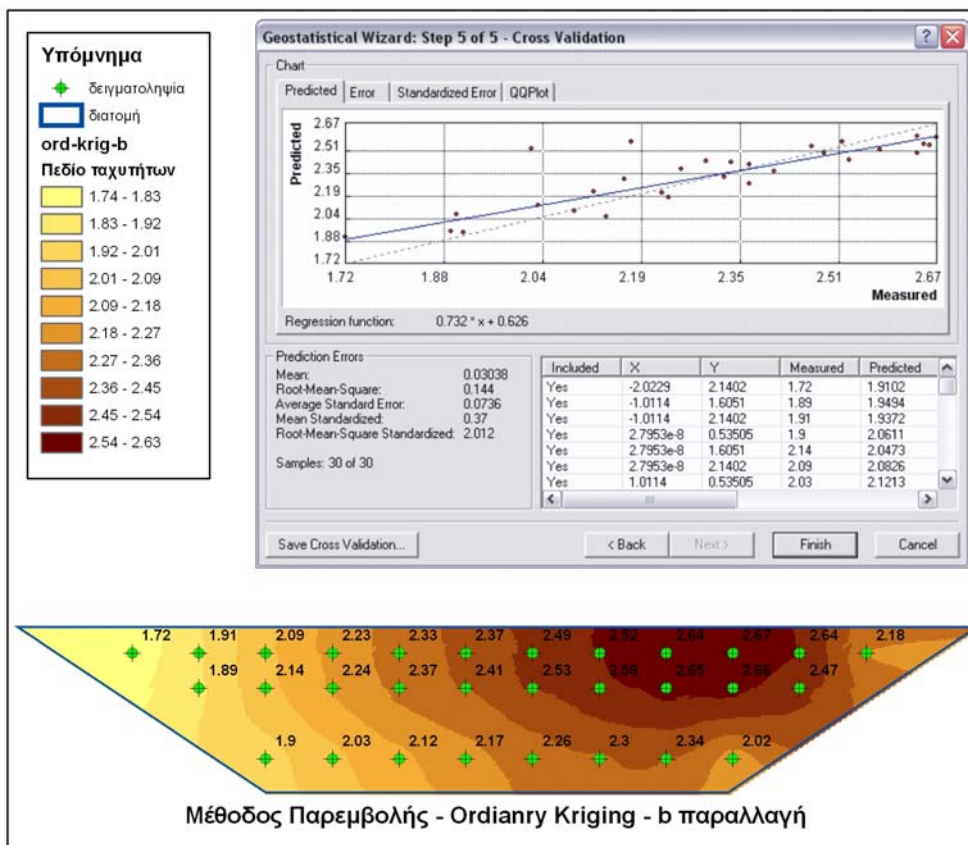
❖ *Ordinary Kriging*

Κατά τη διαδικασία της εφαρμογής παρατηρήθηκε ότι δεν έχουν έντονες διαφορές οι παραλλαγές κάθε περίπτωσης μεταξύ τους. Αλλάζοντας για την περίπτωση *a* της *Ordinary Kriging* είτε το μοντέλο προσαρμογής του ημιμεταβλητογράμματος (στήλη 6 – Πίνακας 3.4), είτε τον αριθμό των πλησιέστερων γειτόνων (στήλη 7 – Πίνακας 3.4), είτε το σχήμα και τον τρόπο προσανατολισμού επιλογής των γειτόνων (στήλη 8, 11 – Πίνακας 3.4), είτε τις τιμές των ημιαξόνων (στήλη 9, 10 – Πίνακας 3.4), η παραγόμενη επιφάνεια παρεμβολής βγάζει παρόμοιο αποτέλεσμα. Ακριβώς το ίδιο συμβαίνει και για την *b* περίπτωση της ίδιας παραλλαγής, για αυτό δεν δόθηκε σημασία στις τιμές αυτές τόσο όσο στις προηγούμενες παραμέτρους. Δηλαδή οι διαφορές μεταξύ των δύο επιφανειών οφείλονται κυρίως στο γεγονός ότι στην πρώτη δεν χρησιμοποιείται κάποιος αρχικός μετασχηματισμός και δεν αφαιρείται η τάση σε αντίθεση με τη δεύτερη. Στη δεύτερη περίπτωση της *Ordinary Kriging* αφαιρώντας την τάση η επιφάνεια προσεγγίζει τις επιφάνειες που έχουν παραχθεί από τη μέθοδο *IDW*. Επιπλέον στην πρώτη περίπτωση όπου δεν έχει αφαιρεθεί η τάση η επιφάνεια παρεμβολής προσεγγίζει και την τοπική και τη γενικευμένη μέθοδο παρεμβολής. (Σχήματα 3.23 και 3.24)

Παρατηρούμε επί προσθέτως ότι οι μέγιστες και ελάχιστες των δύο επιφανειών είναι διαφορετικές τόσο μεταξύ τους όσο και με τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές του αρχικού δείγματος. Σχετικά με τα τυπικά σφάλματα που προσδιορίζει η μέθοδος διαπιστώνεται ότι η *a* περίπτωση προσαρμόζεται καλύτερα στην κανονική κατανομή, αυτό φαίνεται γιατί το *Root Mean Square Standardized Error* είναι κοντά στη μονάδα ($RMSSE = 0,84$) ενώ στην *b* περίπτωση είναι μεγαλύτερο από τη μονάδα ($RMSSE = 2,01$). Επίσης παρατηρούμε ότι το μέσο σφάλμα εκτίμησης *Mean Prediction Error* στην *a* περίπτωση είναι πολύ μικρότερο από αυτό της *b* περίπτωσης, άρα οι εκτιμώμενες τιμές που το μοντέλο παρεμβολής προσδιόρισε στην *a* περίπτωση πλησιάζουν τις μετρημένες τιμές σε σχέση με τη *b* περίπτωση.

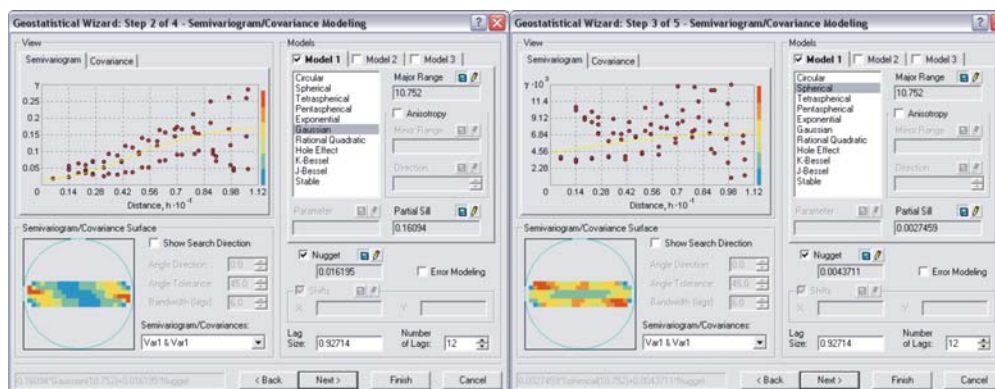


Σχήμα 3.23 Επιφάνεια παρεμβολής Ordinary Kriging a περίπτωση.



Σχήμα 3.24 Επιφάνεια παρεμβολής Ordinary Kriging b περίπτωση.

Συγκρίνοντας τα διαγράμματα που φαίνονται στα σχήματα 3.23 και 3.24 μεταξύ τους παρατηρούμε ότι η καλύτερη ευθεία των εκτιμώμενων τιμών της b περίπτωσης είναι περισσότερο συμμετρική ως προς τη διαγώνιο του διαγράμματος σε αντίθεση με την a περίπτωση.

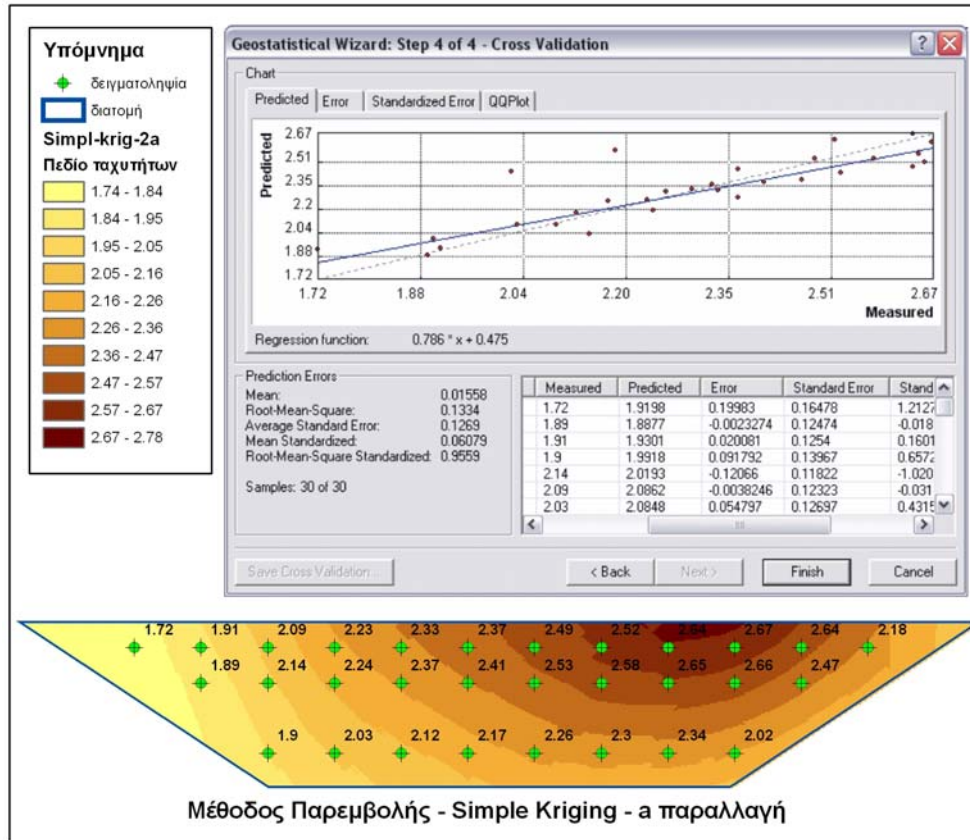


Σχήμα 3.25 Διαγράμματα ημιμεταβλητότητας
αριστερά Ordinary Kriging a περίπτωση, δεξιά Ordinary Kriging b περίπτωση.

Συγκρίνοντας τα ημιμεταβλητογράμματα της κάθε περίπτωσης (σχήμα 3.25) παρατηρούμε ότι παρουσιάζεται μεγαλύτερη αυτοσυσχέτιση μεταξύ του δείγματος στην a περίπτωση από ότι στη b . Στην b περίπτωση ο χωρικός θόρυβος (*nugget effect*) είναι πολύ μεγαλύτερος η μορφή της καμπύλης πλησιάζει να γίνει σταθερή και αυτό εξηγεί ότι δεν λαμβάνεται υπόψιν καμία χωρική εξάρτηση.

❖ Simple Kriging

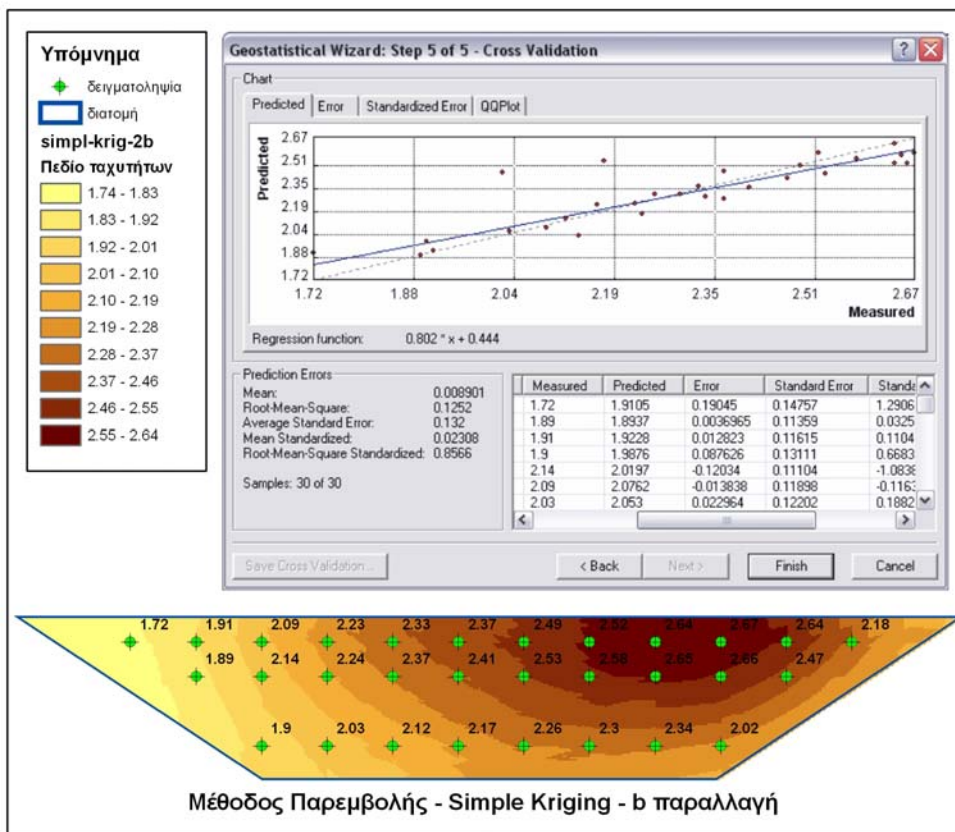
Σε πρώτη προσέγγιση και οι τρεις παραλλαγές της ίδιας μεθόδου παράγουν παρόμοιες επιφάνειες παρεμβολής. (σχήματα 3.26, 3.27 και 3.28) Όμως αξιοσημείωτη διαφορά είναι ότι στην c περίπτωση περιλαμβάνονται μετρήσεις αρκετά μεγαλύτερες από τη μέγιστη τιμή των μετρημένων σημείων του δείγματος. Προφανώς δεν είναι λογικό να υπάρχουν τιμές ταχύτητας στη διατομή που φτάνουν και στα 5.00m/sec από την στιγμή που η μεγαλύτερη ταχύτητα που έχει μετρηθεί στη διατομή είναι 2.67 m/sec. Παρόλο ότι στην c περίπτωση (σχήμα 3.28) τα τυπικά σφάλματα που προσδιορίζονται είναι μικρά η επιφάνεια παρεμβολής δεν θεωρείται σωστή για τους παραπάνω λόγους. Ενδεχομένως το μοντέλο προσαρμογής ημιμεταβλητογράμματος που επιλέχθηκε να μην ανταποκρίνεται στο δείγμα.



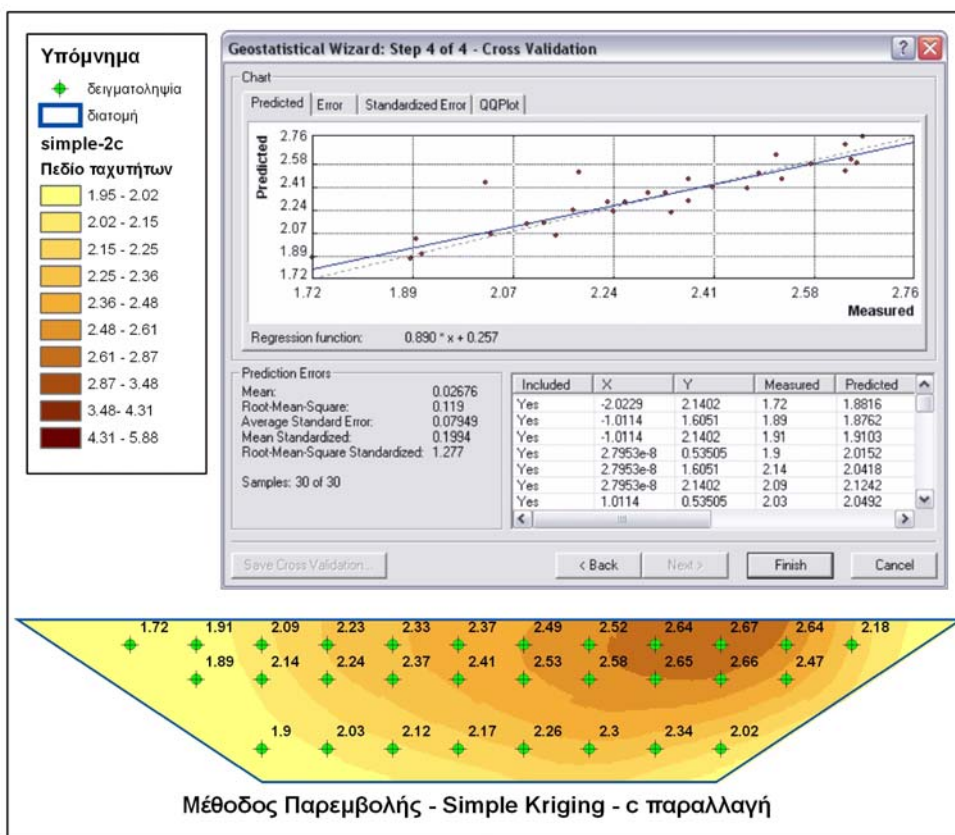
Σχήμα 3.26 Επιφάνεια παρεμβολής Simple Kriging a περίπτωση.

Μεταξύ των δύο επιφανειών που δεν παρουσιάζουν τέτοιο λάθος, στην περίπτωση b (σχήμα 3.27) είναι λίγο μικρότερα τα τυπικά σφάλματα από ότι στην a (σχήμα 3.26). Στην περίπτωση a ίσως να υπερεκτιμούνται οι μικρές τιμές της ταχύτητας όπως προσδιορίζεται από το διάγραμμα και να υποεκτιμούνται οι μεγαλύτερες τιμές της ταχύτητας. Αυτό φαίνεται και από την επιφάνεια παρεμβολής όπου οι μεγάλες τιμές της ταχύτητας καταλαμβάνουν μικρότερη έκταση στη διατομή σε σχέση με τη b περίπτωση.

Στην περίπτωση b της *Simple Kriging* που επιλέγεται η έλλειψη ως σχήμα παρουσιάζονται στην επιφάνεια παρεμβολής μικρές διαφοροποιήσεις στις κατηγορίες του πεδίου των ταχυτήτων, με άλλα λόγια δεν φαίνεται εξομαλυμένη η επιφάνεια όπως στις υπόλοιπες που έχει χρησιμοποιηθεί ο κύκλος.



Σχήμα 3.27 Επιφάνεια παρεμβολής Simple Kriging β περίπτωση.

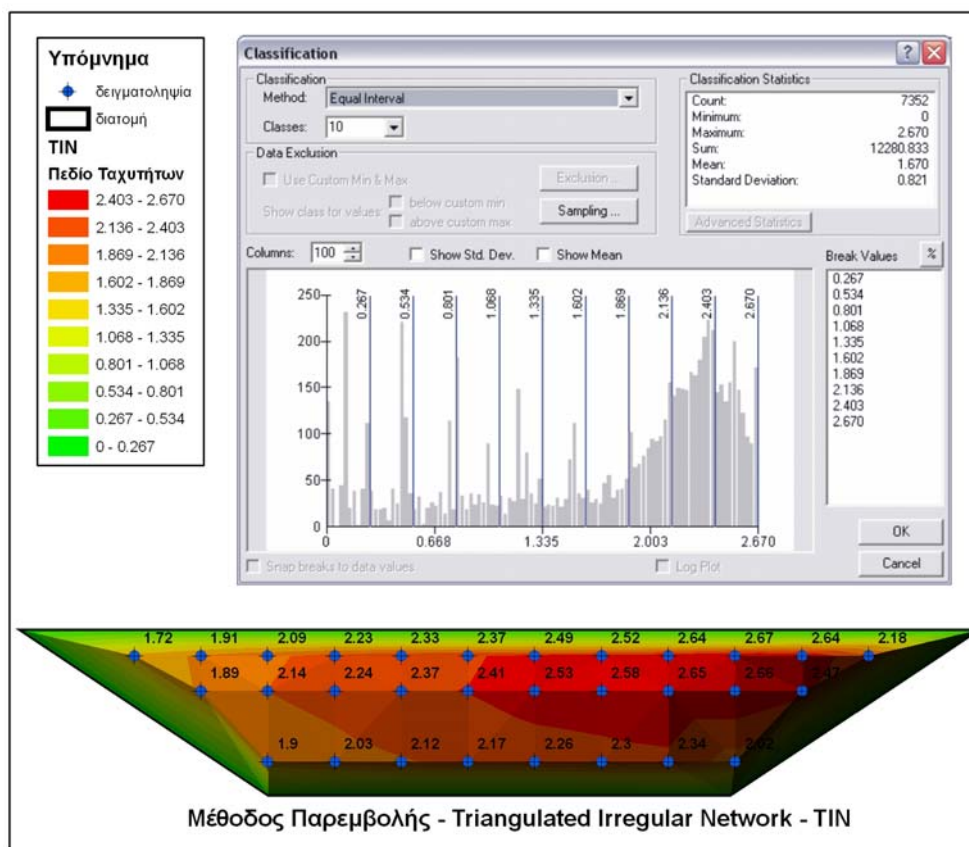


Σχήμα 3.28 Επιφάνεια παρεμβολής Simple Kriging c περίπτωση.

3.6. Εφαρμογή της μεθόδου TIN

3.6.1. Παράμετροι και προϊόντα της εφαρμογής TIN – Παρατηρήσεις

Η εφαρμογή της μεθόδου *TIN* (δίκτυο ακανόνιστων τριγώνων) δεν απαιτεί την εισαγωγή παραμέτρων όπως οι προηγούμενες μέθοδοι. Δεν χρησιμοποιεί την τεχνική του πλησιέστερου γείτονα με βάρος και δεν ανήκει στην εργαλειοθήκη *Geostatistical Analyst*, με αποτέλεσμα να μην προκύπτουν στατιστικά μεγέθη για την παραγόμενη επιφάνεια. Όμως εφαρμόζεται στην παρούσα εργασία μιας και αποτελεί μία μέθοδο παρεμβολής η οποία χρησιμοποιείται ευρέως για τη δημιουργία ψηφιακού μοντέλου εδάφους σε πάρα πολλά λογισμικά πακέτα. Το μοναδικό στοιχείο που χρειάζεται να εισαχθεί για την εφαρμογή εκτός του σημειακού δείγματος είναι το όριο της διατομής. Το αποτέλεσμα της εφαρμογής της μεθόδου παρουσιάζεται στο σχήμα 3.29.



Σχήμα 3.29 Επιφάνεια παρεμβολής TIN.

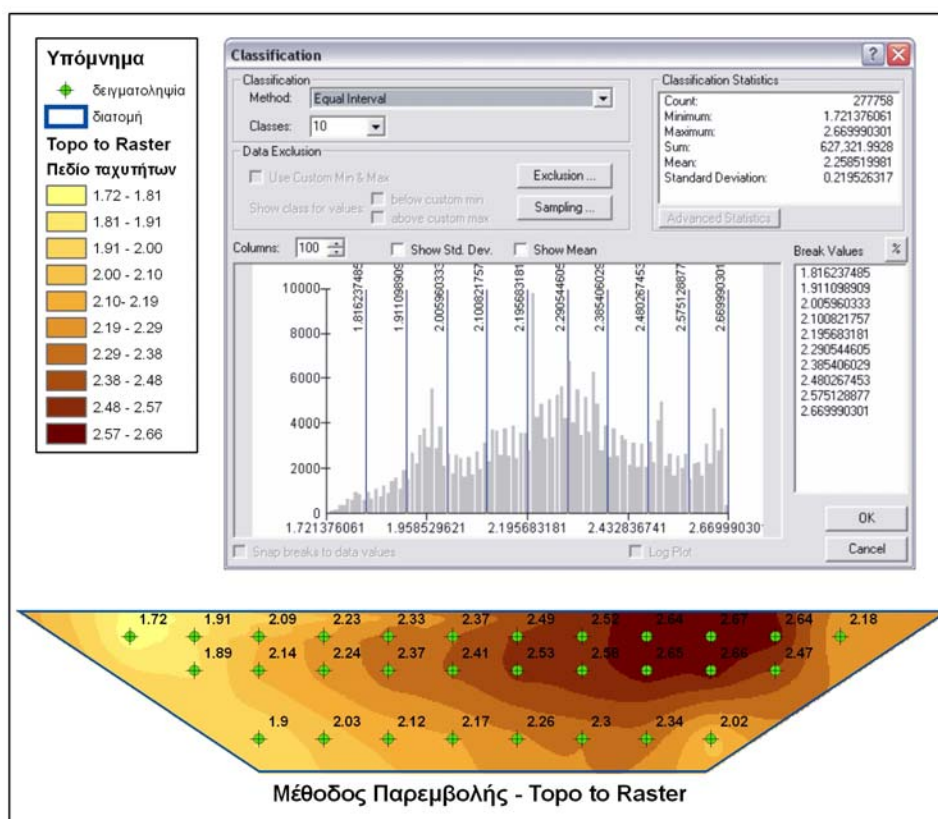
Παρατηρούμε ότι έχουν δημιουργηθεί τρίγωνα μεταξύ όλων των σημείων του δείγματος, καθώς επίσης έχουν δημιουργηθεί μεγάλα τρίγωνα μεταξύ σημείων μέτρησης και των γωνιών των ορίων της διατομής. Για τις γωνίες όπου δεν υπάρχουν μετρήσεις η μέθοδος της θεωρεί μηδενικές αυτομάτως και γι αυτό παρατηρείται ότι έξω από τα σημειακά δείγματα το χρώμα της επιφάνειας μεταβάλλεται απότομα από κόκκινο σε κίτρινο και τελικά πράσινο μέχρι τα όρια της διατομής. Το κόκκινο χρώμα και το πορτοκαλί όπως φαίνεται από το υπόμνημα στο σχήμα 3.29 απεικονίζει τις τιμές της ταχύτητας που πλησιάζουν τις μετρημένες, ενώ το κίτρινο και πράσινο χρώμα είναι οι

τιμές της ταχύτητας που πλησιάζουν το μηδέν. Θεωρητικά όπως έχει αναφερθεί στο εδάφιο 1.3 οι τιμές στα όρια της διατομής είναι μηδενικές οπότε η μέθοδος *TIN* υπακούει σε αυτήν την θεώρηση.

3.7. Εφαρμογή της μεθόδου *Topo to Raster*

3.7.1. Παράμετροι και προϊόντα της εφαρμογής – Παρατηρήσεις

Το λογισμικό του *ArcGIS Desktop* προσφέρει στο χρήστη τη δυνατότητα εφαρμογής μίας μεθόδου παρεμβολής που ονομάζεται *Topo to Raster* και αποτελεί έναν συνδυασμό όλων των παραπάνω μεθόδων. Συγκεκριμένα είναι μία μέθοδος που έχει σχεδιαστεί από το ίδιο το λογισμικό να βελτιστοποιείται ώστε να έχει την ίδια υπολογιστική αποδοτικότητα των τεχνικών όπως η *IDW* χωρίς να χάνεται η συνοχή στην επιφάνεια που παράγεται όπως συμβαίνει με τις τεχνικές *Kriging* και *Spline*. Η μέθοδος αυτή έχει σχεδιαστεί για να εκμεταλλεύεται όλους τους τύπους δεδομένων που είναι διαθέσιμοι (σημειακά, γραμμικά και πολυγωνικά δεδομένα) και κυρίως χρησιμοποιείται για την παρεμβολή της υψομετρικής επιφάνειας και τη δημιουργία ψηφιακού αναγλύφου.^[11] Η τεχνική έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να αντιλαμβάνεται τις απότομες αλλαγές της επιφάνειας του εδάφους και να μπορεί να αντιπροσωπεύσει τις κορυφογραμμές και τα ρέματα με τον καλύτερο δυνατό τρόπο.^[11]



Σχήμα 3.30 Επιφάνεια παρεμβολής *topo to raster*.

Βέβαια το ερώτημα που τίθεται είναι για ποιο λόγο να χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία αφού δεν πρόκειται για ψηφιακό μοντέλο εδάφους. Η απάντηση στο ερώτημα αυτό είναι ότι χρησιμοποιείται δοκιμαστικά μιας και το λογισμικό προσφέρει και αυτή τη μέθοδο. Εάν η διατομή του υδατορέματος δεν ήταν τραπεζοειδούς αλλά ήταν η διατομή ενός φυσικού ρέματος όπου ο πυθμένας της θα είχε εξογκώματα και εσοχές, ίσως η χρήση της συγκεκριμένης μεθόδου να ήταν πιο βάσιμη. Πιθανώς να ήταν περισσότερο ρεαλιστικό οπτικά το αποτέλεσμα της μεθόδου εάν χρησιμοποιούταν για την παρεμβολή της επιφάνειας του πυθμένα της διατομής.

Παρόλα αυτά παρατηρούμε από το αποτέλεσμα (σχήμα 3.30) ότι δεν διαφέρει και πολύ από όλες τις άλλες μεθόδους αντιθέτως μοιάζει από τις κοιλότητες που έχουν δημιουργηθεί για κάθε κατηγορία τιμών ότι είναι ένας συνδυασμός μεταξύ των εξής τριών μεθόδων παρεμβολής: 1^{ης} και 2^{ης} ομάδας *IDW*, της *Ordinary Kriging* b παραλλαγής και της *Radial Basis Function* τύπου *Regularized Spline*. Το μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι δεν ανήκει στην εργαλειοθήκη *Geostatistical Analyst* οπότε δεν παρέχει στατιστικά μεγέθη στα αποτελέσματά της. Στο σχήμα 3.30 στη θέση των στατιστικών αποτελεσμάτων των τυπικών σφαλμάτων φαίνεται το ιστόγραμμα των τιμών του πεδίου ταχυτήτων που είναι χωρισμένο σε ίσα διαστήματα.

Κεφάλαιο 4: **Συμπεράσματα – Προτάσεις**

4.1. Περαιτέρω ανάλυση και σύγκριση των μεθόδων μεταξύ τους

Στην ενότητα αυτή συγκρίνονται τα αποτελέσματα των μεθόδων που εφαρμόστηκαν παραπάνω με βάση τα στατιστικά τους στοιχεία που η εργαλειοθήκη *Geostatistical Analyst* έχει τη δυνατότητα να προσδιορίζει. Επίσης προσδιορίζεται η συνολική παροχή και ο συντελεστής τραχύτητας για κάθε μία επιφάνεια και περιγράφονται τα συμπεράσματα που εξάγονται από την εφαρμογή διαφορετικών μεθόδων παρεμβολής.

4.1.1. Προσδιορισμός του συντελεστή τραχύτητας της διατομής

Ένας τρόπος σύγκρισης των επιφανειών κάθε μοντέλου με το αποτέλεσμα των υπολογισμών που η ΕΥΔΑΠ εκτίμησε, είναι ο προσδιορισμός όλων των μεγεθών εκείνων που χρειάζονται για την εκτίμηση της τιμής του συντελεστή τραχύτητας της διατομής. Ο προσδιορισμός του συντελεστή τραχύτητας απαιτεί αρχικώς να υπολογιστεί η μέση ταχύτητα ροής της διατομής για κάθε μία επιφάνεια και στην συνέχεια ο προσδιορισμός της συνολικής παροχής που περνάει από την συγκεκριμένη διατομή την χρονική περίοδο που διεξάχθηκαν οι μετρήσεις.

Αρχικά για να υπολογισθεί η μέση ταχύτητα ροής πρέπει για κάθε κελί μίας επιφάνειας να αντιστοιχίζεται μία μοναδική τιμή ταχύτητας, έτσι όπως έχει εκτιμηθεί από το εκάστοτε μοντέλο παρεμβολής. Επομένως κάθε μία επιφάνεια που προκύπτει μετατρέπεται σε αρχείο ψηφιδωτό - κανονικοποιημένο (*raster*), με ένα συγκεκριμένο μέγεθος κελιού – (*pixel*). Επιλέγεται ως μέγεθος κελιού το 0,01m x 0,01m, με το οποίο το αποτέλεσμα του *raster* αρχείου κάθε επιφάνειας έχει πολύ καλή ακρίβεια, ενώ με μικρότερα μεγέθη κελιού που δοκιμάστηκαν δεν παρουσιάζονται σημαντικές οπτικές διαφοροποιήσεις στα αποτελέσματα του παραγόμενου *raster* αρχείου. Εξάλλου και οι μετρήσεις της ταχύτητας στο πεδίο διενεργήθηκαν με ακρίβεια μέχρι τα δύο δεκαδικά.

Επιπλέον έχοντας ως δεδομένα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής (βλ. Κεφάλαιο 1. εδάφιο 1.2) υπολογίζεται η συνολική παροχή, όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.1, με βάση των παρακάτω τύπο: $Q=U \times A$ [m^3/sec] όπου A : είναι το εμβαδόν της διατομής και U η τιμή της μέσης ταχύτητας. Στην συνέχεια προσδιορίζεται ο συντελεστής τραχύτητας με βάση τον τύπο (1), ο οποίος προκύπτει από την εξίσωση του *Manning* και για την παροχή ισχύει ο τύπος (2):

$$K = \frac{1}{n} = \frac{Q}{\sqrt{J} AR^{2/3}} \quad (1) \qquad Q = \frac{\sqrt{J}}{n} AR^{2/3} \quad (2)$$

όπου n ο συντελεστής τραχύτητας κατά *Manning*, R η υδραυλική ακτίνα και J η κλίση των τριβών.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 4.1. που ακολουθεί.

Πίνακας 4.1 Πίνακας προσδιορισμού συντελεστή τραχύτητας από κάθε παραγόμενη επιφάνεια παρεμβολής

μέθοδος	α/α	μέση ταχύτητα [m/sec]	εκτιμώμενη παροχή [m ³ /sec]	εκτιμώμενος συντελεστής τραχύτητας n	εκτιμώμενος συντελεστής τραχύτητας K=1/n	διαφορά του K από την τιμή του όπως η ΕΥΔΑΠ προσδιόρισε
ΕΥΔΑΠ Θεωρητική Μέθοδος σε γραφικό περιβάλλον		2.097	61.590	0.0171	58.57	
		2.198	60.760	0.0172	58.21	0.61%
IDW-1	a	2.195	61.053	0.0172	58.05	0.89%
	b	2.193	60.989	0.0172	57.99	0.99%
	c	2.219	61.708	0.0170	58.67	-0.17%
	d	2.213	61.554	0.0171	58.53	0.08%
IDW-2	a	2.208	61.403	0.0171	58.38	0.32%
	b	2.208	61.396	0.0171	58.37	0.33%
	c	2.208	61.396	0.0171	58.37	0.33%
	d	2.208	61.396	0.0171	58.37	0.33%
IDW-3	a	2.193	60.987	0.0172	57.99	1.00%
	b	2.193	60.987	0.0172	57.99	1.00%
	c	2.193	60.987	0.0172	57.99	1.00%
	d	2.193	60.987	0.0172	57.99	1.00%
Global Interpolation		2.099	58.373	0.0180	55.50	5.24%
Local Interpolation		2.024	56.287	0.0187	53.52	8.63%
RBF – Regulated Spline		2.157	59.986	0.0175	57.03	2.62%
RBF – Multiquadric function		1.723	47.917	0.0219	45.56	22.21%
Ordinary Kriging	a	2.104	58.512	0.0180	55.63	5.01%
	b	2.214	61.571	0.0171	58.54	0.05%
Simple Kriging	a	2.132	59.300	0.0177	56.38	3.74%
	b	2.222	61.794	0.0170	58.75	-0.31%
	c	2.181	60.654	0.0173	57.67	1.54%
TIN		1.670	46.443	0.0226	44.16	24.61%
Topo to Raster		2.260	62.861	0.0167	59.77	-2.05%

4.1.2. Επιλογή βέλτιστου αποτελέσματος

Όλες οι παραπάνω επιφάνειες παρεμβολής δίνουν διαφορετικά αποτελέσματα στο πεδίο ροής της ταχύτητας της διατομής γιατί προέρχονται από διαφορετικές τεχνικές εκτίμησης που το GIS προσφέρει. Είναι εύλογο λοιπόν σαν κατάληξη της εφαρμογής να προταθούν οι ικανοποιητικότερες επιφάνειες που ταιριάζουν περισσότερο στο στόχο της εργασίας. Για να επιτύχουμε αυτό απαιτείται η χρήση αντικειμενικών κριτηρίων με βάση τα οποία θα είναι εφικτή η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ τους και τελικά η επιλογή των βέλτιστων. Βέβαια η επιλογή κάποιων επιφανειών παρεμβολής ως οι ικανοποιητικότερες για την συγγραφέα της παρούσης, δεν σημαίνει ότι το ίδιο θα συνέβαινε σε άλλο χρήστη του ίδιου λογισμικού. Επειδή υπάρχει μέτρο σύγκρισης το αποτέλεσμα που η ΕΥΔΑΠ προσδιόρισε, καθώς και τα εργαλεία που το λογισμικό προσφέρει για την σύγκριση των μοντέλων μεταξύ τους, μπορεί να καταστεί δυνατόν ο καθορισμός κριτηρίων επιλογής.

Επομένως καθορίζονται τα παρακάτω κριτήρια επιλογής βέλτιστης επιφάνειας παρεμβολής γεωστατιστικής μεθόδου:

1. Η διαφορά του συντελεστή τραχύτητας που προκύπτει από την επιφάνεια παρεμβολής σε σχέση με τον συντελεστή τραχύτητας που προκύπτει από τον προσδιορισμό του πεδίου ταχυτήτων από την ΕΥΔΑΠ να είναι μικρότερη από 1% .
2. Η επιλεγθείσα επιφάνεια παρεμβολής να έχει τα μικρότερα τυπικά σφάλματα σε σχέση με τις υπόλοιπες.
3. Η επιλεγθείσα επιφάνεια παρεμβολής να μην έχει αρνητικές τιμές ταχύτητας ούτε πολύ μεγαλύτερες τιμές ταχύτητας από τις μετρημένες, γιατί δεν αντιπροσωπεύεται έτσι η πραγματικότητα.

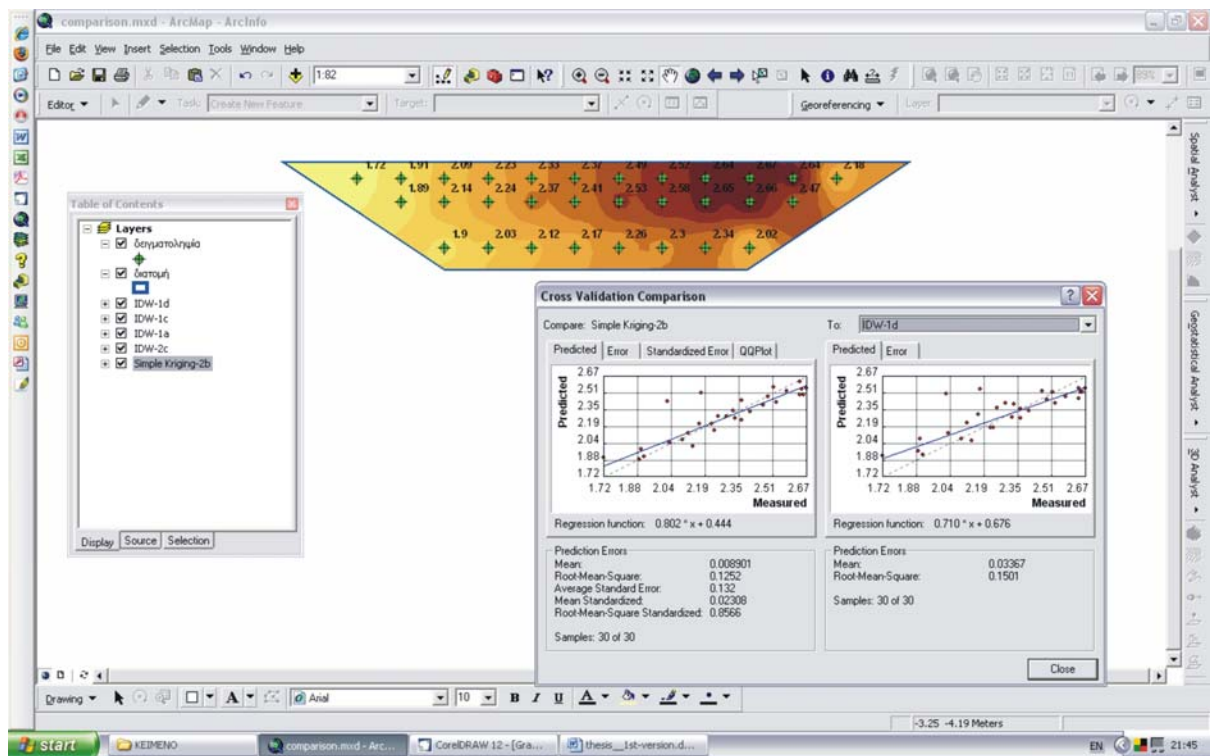
Γίνεται αντιληπτό ότι όσο πιο κοντά είναι τα αποτελέσματα των επιφανειών παρεμβολής που προέκυψαν με τις τιμές που η ΕΥΔΑΠ εκτίμησε, τόσο καλύτερα αποτελέσματα προέκυψαν από την εφαρμογή της παρούσης. Στο σημείο αυτό θα μπορούσε να πει κανείς ότι καμία από τις επιφάνειες παρεμβολής που παρουσιάζονται στο προηγούμενο κεφάλαιο (κεφ. 3^ο) είναι λανθασμένες, εκτός λιγοστών περιπτώσεων, απλά δεν αντιπροσωπεύουν με ικανοποιητικό τρόπο την συγκεκριμένη περίπτωση της εφαρμογής, ίσως να είναι περισσότερες αντιπροσωπευτικές για την αναπαράσταση άλλων φαινομένων. Επίσης το κατώφλι του ποσοστού 1% είναι μία αρκετά μικρή απόκλιση και αποτελεί ένα αρχικό κριτήριο ώστε να γίνει πιο εύκολη η επιλογή του βέλτιστου αποτελέσματος.

Εφαρμόζοντας λοιπόν, τα παραπάνω κριτήρια επιλογής απορρίπτονται μερικές από τις επιφάνειες παρεμβολής του Πίνακα 4.1 και απομένουν κατά σειρά μικρότερης διαφοράς συντελεστού τραχύτητας βάσει κριτηρίου 1, οι εξής:

1. *IDW 1d*
2. *IDW 1c*
3. *Simple Kriging b*
4. *IDW 2*
5. *IDW 1a*
6. *IDW 1b*

Η επιφάνεια παρεμβολής που προέκυψε από την *Ordinary Kriging b* παρά το γεγονός ότι έχει μικρότερη από 1 διαφορά στον προσδιορισμό του συντελεστού τραχύτητας από της ΕΥΔΑΠ, όπως αναφέρεται στο εδάφιο 3.5.2 και φαίνεται στο σχήμα 3.25 το δείγμα δεν παρουσιάζει χωρική αυτοσυσχέτιση, επομένως αποφασίζεται να απορριφθεί. Για την 2^η ομάδα της μεθόδου *IDW* τα αποτελέσματα είναι σχεδόν ίδια για όλες τις παραλλαγές οπότε επιλέγεται μία τυχαία για την περαιτέρω σύγκριση των μεθόδων μεταξύ τους.

Η εργαλειοθήκη *Geostatistical Analyst* προσφέρει τη δυνατότητα σύγκρισης των μεθόδων μεταξύ τους σε σχέση με το μέσο τετραγωνικό σφάλμα που η κάθε μία μέθοδος προσδιόρισε. Η τεχνική για την σύγκριση ονομάζεται *Cross Validation Comparison* όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.1, με την οποία προκύπτει ότι από τις επιφάνειες της μεθόδου *IDW* μικρή διαφορά (της τάξεως του 1cm) υπάρχει μεταξύ των σφαλμάτων εκτίμησης. Οπότε επιλέγεται η επιφάνεια *IDW 1d* η οποία από το πρώτο κριτήριο εκτιμάει τον συντελεστή τραχύτητας με μικρότερη διαφορά από τις υπόλοιπες επιφάνειες παρεμβολής, όπως παρουσιάζεται και στον Πίνακα 4.1.

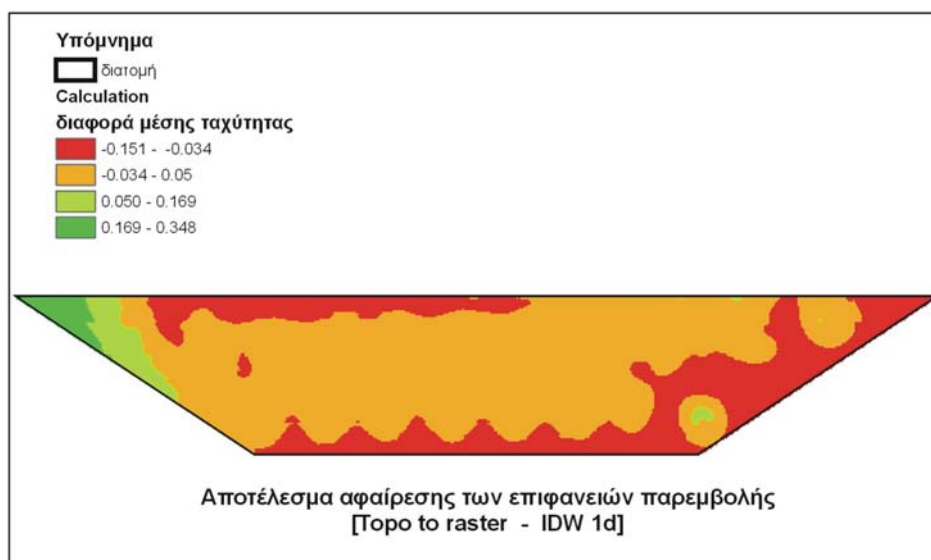


Σχήμα 4.1 Σύγκριση μοντέλων παρεμβολής μέσω *Cross Validation Comparison*.

Βέβαια μεταξύ της *IDW 1d* και της *Simple Kriging b* διαφέρει το σφάλμα εκτίμησης, η *Simple Kriging b* προσδιορίζει το σφάλμα εκτίμησης κατά 2,5cm λιγότερο όμως και οι δύο επιφάνειες παρεμβολής εκτιμούν τη μέση ταχύτητα του πεδίου ροής με λιγότερο από 1cm διαφορά, 2,219m/sec για την πρώτη και 2,222m/sec για τη δεύτερη. Και οι δύο επιφάνειες παρεμβολής δίνουν τα πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα για την εκτίμηση του πεδίου ροής. Επί προσθέτως και η μέθοδος που το ίδιο το λογισμικό προσφέρει η λεγόμενη *Topo to raster* βγάζει ικανοποιητικά αποτελέσματα και συγκεκριμένα όσον αφορά στη μέση τιμή (Πίνακας 4.1, 2.26m/sec) το αποτέλεσμα είναι πολύ κοντά με τις άλλες δύο μεθόδους και σχετικά με την κατανομή του πεδίου ταχυτήτων φαίνεται ότι προκύπτει μία ενδιάμεση λύση των δύο μεθόδων μεταξύ τους. Παρά το γεγονός ότι η *Topo to raster* παρουσιάζει διαφορά μεγαλύτερη από 1% επομένως θα έπρεπε να απορριφθεί σύμφωνα με το πρώτο κριτήριο, θεωρείται σκόπιμο να χρησιμοποιηθεί και αυτή στην σύγκριση γιατί ουσιαστικά όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο εδάφιο η μέθοδος αυτή ενσωματώνει τεχνικές που η *Kriging* και η *IDW* χρησιμοποιούν, γι αυτό και η ομοιότητα που προκύπτει στην κατανομή της ταχύτητας μεταξύ των επιφανειών που δημιουργούνται.

Στο σημείο αυτό πρέπει να υπογραμμισθεί ότι η κατανομή του πεδίου ταχυτήτων σε κάθε μία επιφάνεια μεταβάλλεται γιατί ακολουθεί διαφορετική τεχνική για την εκτίμηση της επιφάνειας, ανάλογα με τη μέθοδο, όπως περιγράφεται στο προηγούμενο κεφάλαιο. Βέβαια η διαφορετική κατανομή της ταχύτητας δεν επηρεάζει την τιμή της μέσης ταχύτητας τόσο σημαντικά ώστε να επηρεάσει και τον αντικειμενικό στόχο της εργασίας. Εάν μας ενδιέφερε να γνωρίζουμε λεπτομερέστερα τη μορφή του προφίλ της ταχύτητας δηλαδή πως κατανέμεται η ταχύτητα ως προς το βάθος και το πλάτος της διατομής όχι για να προσδιοριστεί η παροχή αλλά για άλλους σκοπούς τότε θα ήταν υποχρεωτικό να καταλήξουμε σε μία αντιπροσωπευτική επιφάνεια παρεμβολής, οπότε θα έπρεπε να καθορισθούν και άλλα διαφορετικά κριτήρια για την επιλογή μεταξύ αυτών των τριών επιφανειών.

Οι διαφορές μεταξύ των μεθόδων είναι δυνατόν να αναπαρασταθούν και οπτικά με τη βοήθεια εργαλείων που παρέχει το λογισμικό πακέτο *ArcGIS*. Η εντολή *Raster calculation* παρέχει τη δυνατότητα μαθηματικών πράξεων μεταξύ επιφανειών κανονικοποιημένου κανάβου με ίδιο μέγεθος κελιού. Ένα παράδειγμα δίδεται παρακάτω στο σχήμα όπου απεικονίζονται οι διαφορές των ταχυτήτων μεταξύ των επιφανειών *Topo to raster* και *IDW-1d*.



Σχήμα 4.2 Αφαίρεση επιφανειών παρεμβολής – Raster Calculation

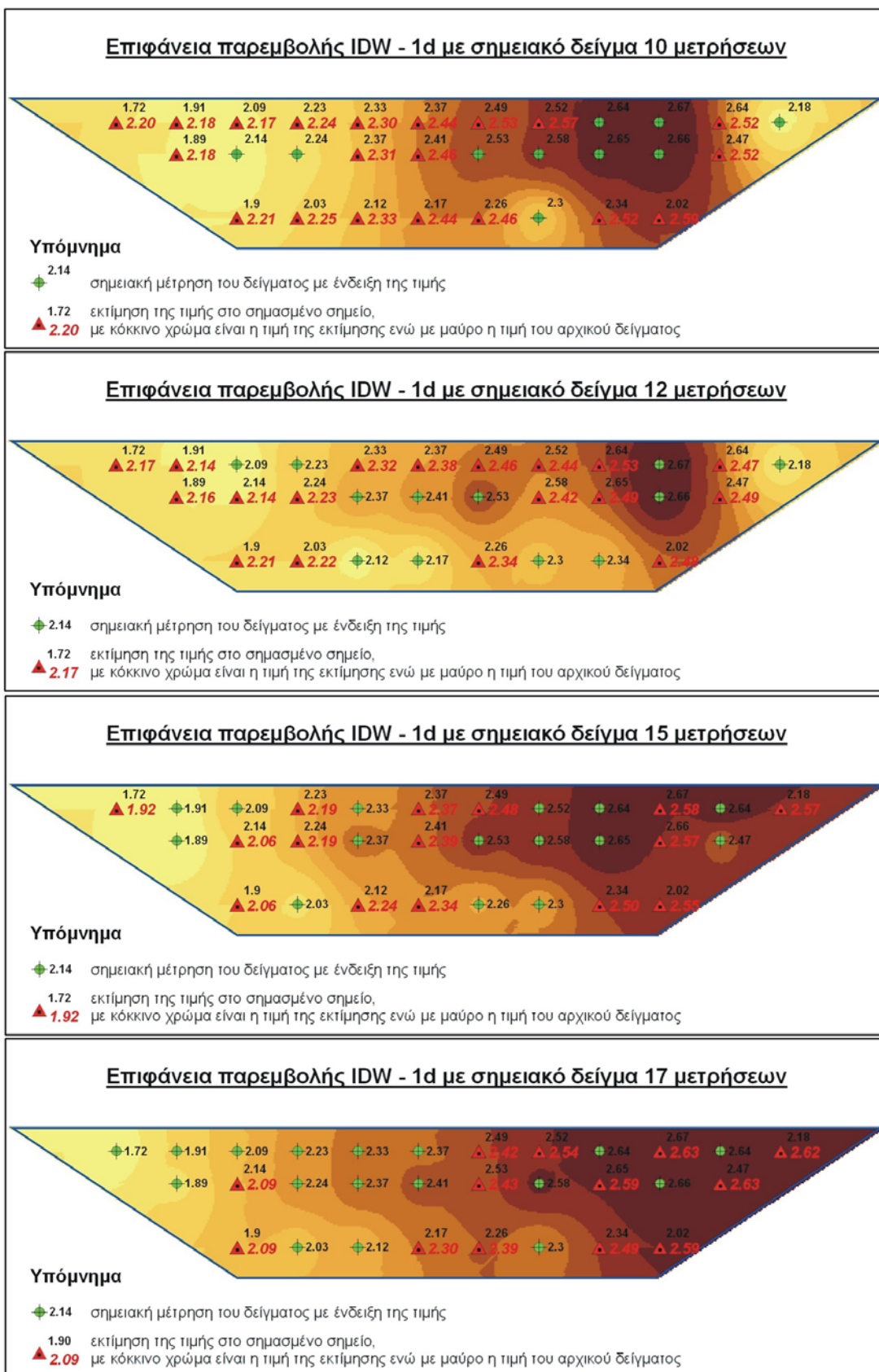
Με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι περιοχές της διατομής στις οποίες η μέθοδος *IDW-1d* εκτιμάει την ταχύτητα από 0.034m/sec μέχρι και 0.15 m/sec περισσότερο από ότι η μέθοδος *Topo to raster*. Επιπλέον με ανοιχτό πράσινο και λίγο πιο σκούρο πράσινο χρώμα απεικονίζεται η μεγαλύτερη διαφορά που παρουσιάζει η μέθοδος *Topo to raster* στην εκτίμηση της τιμής της ταχύτητας από ότι η μέθοδος *IDW-1d*. Παρατηρούμε λοιπόν ότι στο αριστερό όριο που οι τιμές των ταχυτήτων του δείγματος μικραίνουν η μέθοδος *Topo to raster* δίνει μεγαλύτερα αποτελέσματα ενώ στο πυθμένα της διατομής και στο δεξί όριο της διατομής η μέθοδος *IDW-1d* δίνει μεγαλύτερες τιμές ταχύτητας. Βέβαια με το κίτρινο – όχρα χρώμα οι διαφορές μεταξύ των τιμών είναι πάρα πολύ μικρές της τάξεως του 0,05 m/sec. Η αφαίρεση των επιφανειών παρεμβολής μεταξύ τους μπορεί να αποτελέσει ένα διαφορετικό τρόπο σύγκρισης των αποτελεσμάτων. Γενικά παρατηρούμε ότι οι διαφορές των επιφανειών παρουσιάζονται κυρίως στα όρια της διατομής στα οποία δεν υπάρχουν επαρκείς μετρήσεις.

4.1.3. Δοκιμαστική εφαρμογή παρεμβολής με λιγότερες μετρήσεις

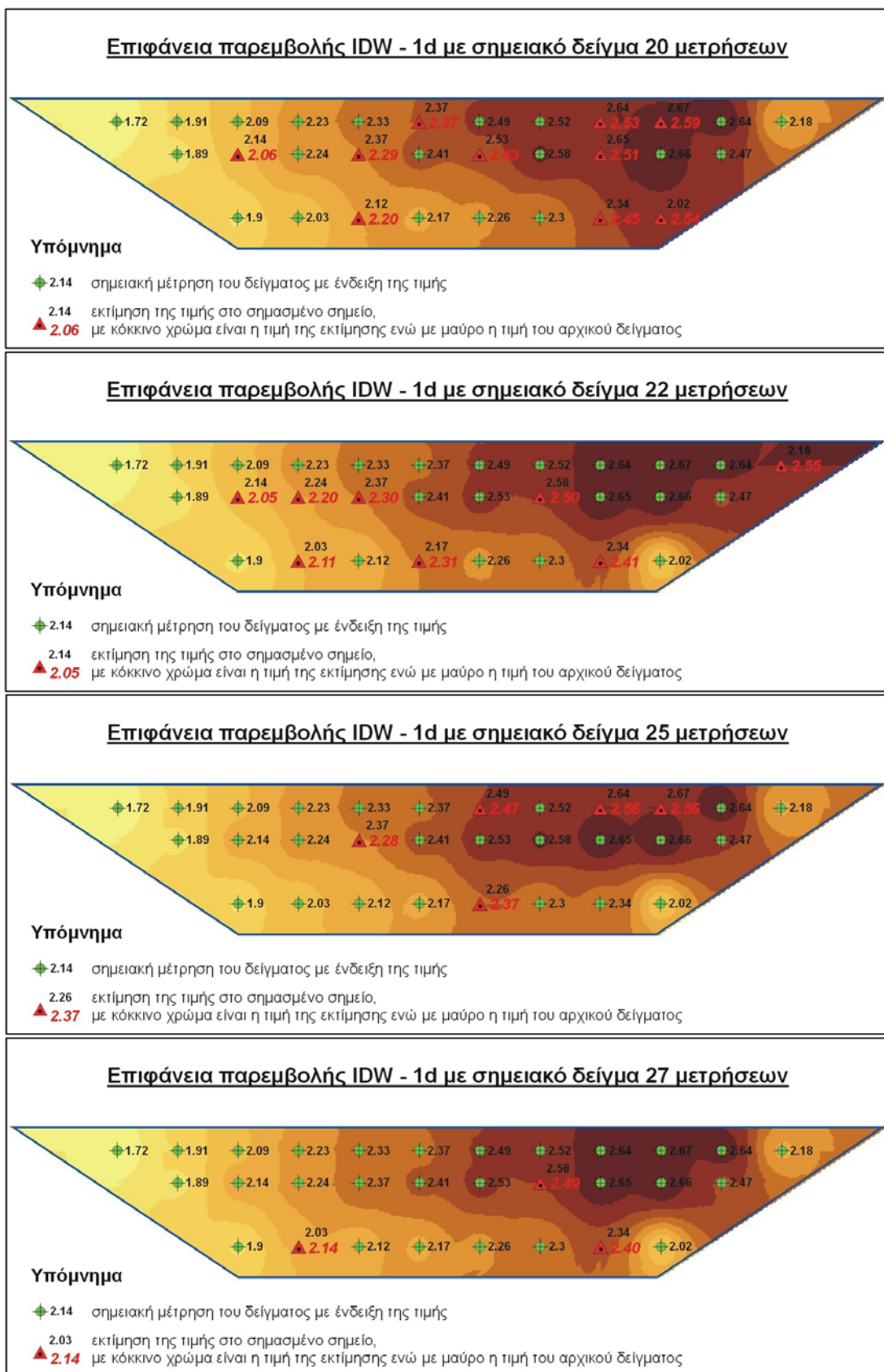
Στην ενότητα αυτή υλοποιείται μία επιπρόσθετη εφαρμογή για την προσδιορισμό της μέσης ταχύτητας αφαιρώντας κάθε φορά μερικές σημειακές μετρήσεις από το δείγμα. Ο στόχος της εφαρμογής αυτής είναι να αποδειχθεί ότι κα με λιγότερα σημεία μέτρησης οι αλγόριθμοι του *GIS* εκτιμούν την μέση τιμή της ταχύτητας με ικανοποιητική ακρίβεια.

Αρχικά επιλέγεται τυχαία μία από τις τρεις παραπάνω μεθόδους, έστω η μέθοδος *IDW-1d*. Εφαρμόζεται η διαδικασία παρεμβολής με τις ίδιες παραμέτρους κάθε φορά όπως εφαρμόστηκε στην αρχική επιφάνεια (εδάφιο 3.2.2 - Πίνακας 3.3) με δεδομένα εισόδου 27 σημειακές μετρήσεις, 25, 22, 20, 17, 15, 12 και 10 σημειακές μετρήσεις. Για κάθε δείγμα προκύπτει μία επιφάνεια παρεμβολής και για κάθε μία επιφάνεια παρεμβολής υπολογίζεται η μέση ταχύτητα.

Η εργαλειοθήκη *Geostatistical Analyst* προσφέρει τη δυνατότητα από ολόκληρο το δείγμα των τριάντα (30) σημειακών μετρήσεων να δημιουργούνται δύο αρχεία, ένα αρχείο μετρήσεων *training* και ένα αρχείο *test*. Το πρώτο είναι το αρχείο όπου χρησιμοποιείται για την παραγωγή της επιφάνειας παρεμβολής και το δεύτερο είναι το αρχείο για το οποίο εκτιμώνται οι τιμές της ταχύτητας με βάση την εκάστοτε επιφάνεια που παράγεται. Ουσιαστικά με τον τρόπο αυτό από τα τριάντα σημεία επιλέγονται όσα σημεία ο χρήστης ορίζει για παράδειγμα για την συγκεκριμένη εφαρμογή έχουν επιλεγθεί οι 10, 12, 15, 17, 20, 22, 25 και 27 σημειακές μετρήσεις και αποτελούν ένα αρχείο *training* κάθε φορά, ενώ τα υπολειπόμενα σημεία από τα τριάντα δηλαδή τα 20, 19, 15, 13, 10, 8, 5 και 3, αντίστοιχα αποτελούν το αρχείο *test*. Ο τρόπος που το λογισμικό επιλέγει τα σημεία από το σύνολο είναι τυχαίος όπως θα αποδειχθεί και στην συνέχεια. Το λογισμικό για την εφαρμογή της μεθόδου *IDW* και γενικά για την εφαρμογή οποιασδήποτε γεωστατιστικής μεθόδου απαιτεί τουλάχιστον τη χρήση 10 σημειακών μετρήσεων. Με βάση το δεδομένο αυτό υλοποιήθηκε η διαδικασία όπως περιγράφεται παραπάνω και έτσι προέκυψαν 9 διαφορετικές επιφάνειες παρεμβολής που απεικονίζουν το πεδίο ταχύτητας ροής. (σχήμα 4.3, 4.4) Τα υπόλοιπα σημεία (αρχείο *test*) χρησιμοποιούνται κάθε φορά για έλεγχο και για μελέτη των επιφανειών παρεμβολής που έχουν παραχθεί.



Σχήμα 4.3 Πολλαπλή εφαρμογή της μεθόδου IDW για σημειακό δείγμα 10, 12, 15 και 17 μετρήσεων



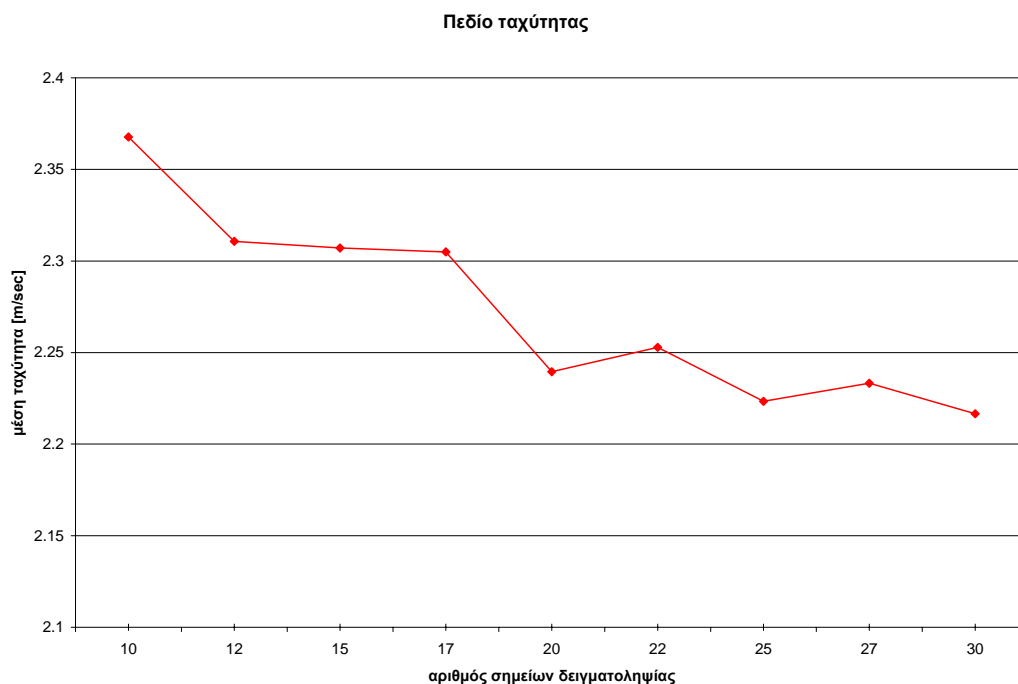
Σχήμα 4.4 Πολλαπλή εφαρμογή της μεθόδου IDW για σημειακό δείγμα 20, 22, 25 και 27 μετρήσεων

Για κάθε ένα πεδίο ταχύτητας προσδιορίζεται η μέση τιμή της ταχύτητας και δημιουργείται το σχήμα 4.5, όπου παρατηρείται σε γενικό πλαίσιο ότι η μείωση του αριθμού των σημειακών μετρήσεων έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της τιμής της μέσης ταχύτητας, ή διαφορετικά όσο λιγοστεύουν τα σημεία μέτρησης υπερεκτιμάται η τιμή της ταχύτητας.

Στο σχήμα 4.3 και 4.4 απεικονίζονται οι επιφάνειες παρεμβολής όπου για κάθε σημείο εκτίμησης του αρχείου *test* περιγράφεται η ένδειξη της τιμής της εκτίμησης με κόκκινο χρώμα και πλάγια έντονα γράμματα και της τιμής της αρχικής σημειακής μέτρησης με μαύρο χρώμα με έντονα γράμματα. Για παράδειγμα στο σημείο στο αριστερό όριο της διατομής όπου εκεί στην πραγματικότητα έχει μετρηθεί με το μυλίσκο η ταχύτητα της ροής ίση με 1.72m/sec,

- στην επιφάνεια παρεμβολής 10 σημειακών μετρήσεων η ταχύτητα είναι 2.20 m/sec
- στην επιφάνεια με τις 12 σημειακές μετρήσεις η ταχύτητα είναι 2.17 m/sec,
- στην επιφάνεια με τις 15 σημειακές μετρήσεις η ταχύτητα είναι 1.92 m/sec.

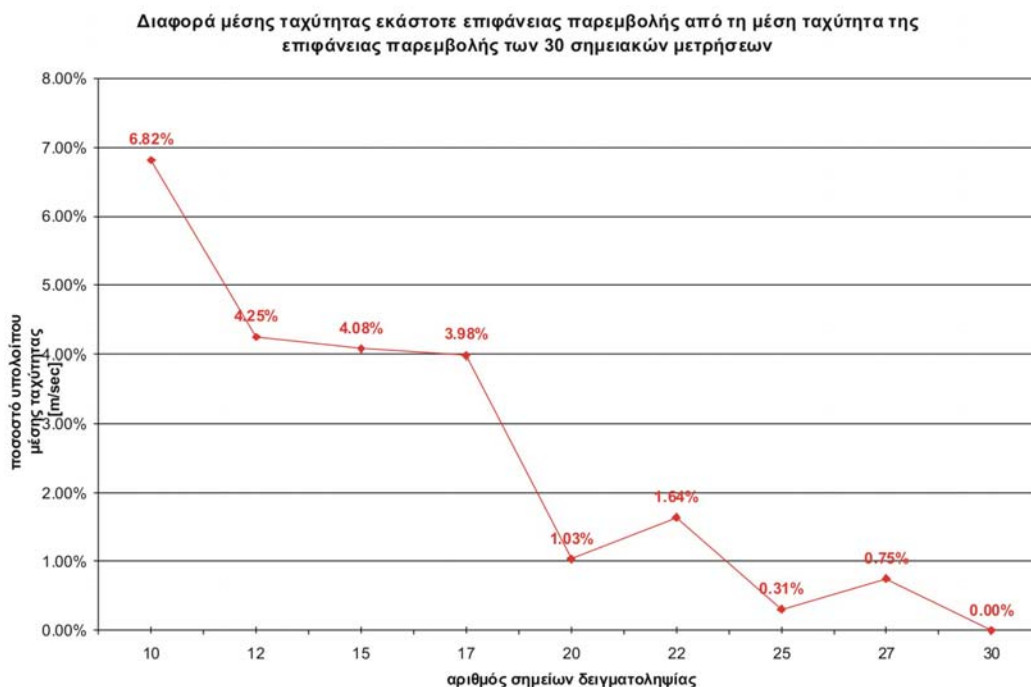
Το γεγονός αυτό, ότι δηλαδή μειώνεται η ταχύτητα με την αύξηση των σημειακών μετρήσεων, οφείλεται στον τυχαίο τρόπο επιλογής των σημείων του δείγματος για τη δημιουργία των αρχείων *training - test*. Στη πρώτη περίπτωση (σχήμα 4.3) από το λογισμικό έχουν επιλεγεί τυχαία δέκα (10) σημεία όπου τα έξι (6) από αυτά βρίσκονται στην περιοχή της διατομής όπου παρατηρούνται από τις αρχικές μετρήσεις με το μυλίσκο, μεγαλύτερες ταχύτητες ροής σε σχέση με τις υπόλοιπες περιοχές της διατομής.



Σχήμα 4.5 Διαγραμματική απεικόνιση της τιμής της μέσης ταχύτητας του πεδίου ροής ως προς τον αριθμό των σημείων που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία της επιφάνειας παρεμβολής

Επομένως, με βάση την τεχνική της μεθόδου *IDW* όπως έχει περιγραφεί σε προηγούμενη ενότητα, τα σημεία στις άκρες της διατομής επηρεάζονται από τις πλησιέστερες λιγοστές μετρήσεις όπου τυχαίνει να έχουν υψηλές τιμές ταχύτητας. Καθώς όμως αυξάνεται ο αριθμός των μετρήσεων συμπεριλαμβάνονται στο δείγμα και μετρήσεις με μικρότερες τιμές ή μετρήσεις που βρίσκονται κοντά στα όρια της διατομής με αποτέλεσμα να μικραίνουν οι τιμές της εκτίμησης στο εκάστοτε σημείο. Συνεπώς μικραίνει και η μέση τιμή της ταχύτητας όπως φαίνεται και στο διάγραμμα (σχήμα 4.5), βέβαια για τις επιφάνειες παρεμβολής που δημιουργήθηκαν με 17, 22 και 27 σημειακές μετρήσεις παρατηρείται μικρή αύξηση της μέσης ταχύτητας γεγονός που οφείλεται στον παραπάνω λόγο της τυχαιότητας στην επιλογή των σημείων του δείγματος για τη δημιουργία των αρχείων *training – test*.

Όπως γίνεται αντιληπτό σε κάθε επιφάνεια παρεμβολής που παράγεται, το πεδίο της ταχύτητας ροής μεταβάλλεται σημαντικά, όπως απεικονίζεται στα σχήματα 4.3. και 4.4., όμως η μέση τιμή της ταχύτητας μικραίνει με μικρό εύρος μεταβολής. Στο διάγραμμα του σχήματος 4.6 παρουσιάζεται πως μεταβάλλεται το υπόλοιπο μεταξύ των μέσων τιμών της ταχύτητας σε σχέση με τη μέση ταχύτητα της επιφάνειας παρεμβολής *IDW-Id* όπως προέκυψε με τα 30 γνωστά σημεία. Η μεγαλύτερη διαφορά παρουσιάζεται στην επιφάνεια παρεμβολής που παράχθηκε με τα 10 σημεία και φτάνει στα 0.15 m/sec ή διαφορετικά παρουσιάζει απόκλιση της τάξης του 7% περίπου. Η μέση ταχύτητα της επιφάνειας παρεμβολής είναι 2.37 m/sec, η τιμή αυτή δίνει παροχή ίση με 65.91 m³/sec και κατ' επέκταση ο συντελεστής τραχύτητας που προκύπτει είναι ίσος με $n=0.0160$ ή $K=62.67$, δηλαδή 3.67 μονάδες μεγαλύτερος από τον συντελεστή που έχει προσδιορίσει η ΕΥΔΑΠ. (Πίνακας 4.1)



Σχήμα 4.6 Διαγραμματική απεικόνιση του υπολοίπου της μέσης ταχύτητας που προκύπτει από την εκάστοτε επιφάνεια από τη μέση ταχύτητα της επιφάνειας παρεμβολής των 30 σημειακών μετρήσεων

Σαν συμπέρασμα προκύπτει ότι και τα δέκα σημεία μέτρησης είναι επαρκή για να εκτιμηθεί ικανοποιητικά η μέση ταχύτητα ροής της διατομής ακόμα και με μία απόκλιση 7%. Σίγουρα η επιφάνεια παρεμβολής μπορεί να βελτιωθεί αν τα δέκα σημεία μέτρησης δεν συγκεντρώνονται σε μία περιοχή αλλά διασκορπίζονται τυχαία καλύπτοντας όλη την έκταση της διατομής, με αποτέλεσμα να εκτιμηθεί ικανοποιητικά και η παροχή και ο συντελεστής τραχύτητας. Βέβαια εδώ τίθεται το ερώτημα ότι το πόσο ικανοποιητικότερα είναι το αποτέλεσμα και απαντάται ότι εξαρτάται από την περαιτέρω χρήση αυτών των μεγεθών, για ποιο σκοπό δηλαδή θα χρησιμοποιηθεί η παροχή και ο συντελεστής τραχύτητας ακόμα και η μέση ταχύτητα ροής. Για παράδειγμα ο ελάχιστος αριθμός των δέκα μετρήσεων στο πεδίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν πρόκειται για μία προκαταρκτική υδρολογική μελέτη όπου δεν απαιτείται υψηλή ακρίβεια. Σίγουρα με τις περισσότερες μετρήσεις το αποτέλεσμα της εκτίμησης των παραπάνω μεγεθών είναι καλύτερο και πιο κοντά στην πραγματικότητα όμως η παραπάνω εφαρμογή αποδεικνύει ότι με λιγότερες μετρήσεις άρα και λιγότερο χρόνο η εκτίμηση του πεδίου ροής γίνεται αρκετά ικανοποιητικά σαν μια πρώτη προσέγγιση της μελέτης του πεδίου ροής για την συγκεκριμένη διατομή.

4.1.4. Συμπεράσματα από την ανάλυση των μεθόδων παρεμβολής

Στην συνέχεια παρατίθενται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την ανωτέρω ανάλυση:

- Στις εφαρμογές των διαφόρων μεθόδων τόσο στην παρούσα εργασία όσο και στις μελέτες της βιβλιογραφικής επισκόπησης, στα όρια των διατομών των ρεμάτων, δεν παρατηρούνται μηδενικές τιμές της ταχύτητας, όπως θεωρητικά ισχύει. (εδάφιο 1.3.) Οι τεχνικές του πλησιέστερου γείτονα που εφαρμόζονται αποδεικνύει ότι υπάρχει ταχύτητα στα όρια της διατομής, με τιμή πολύ μικρότερη από αυτήν της ταχύτητας στο κέντρο της διατομής. Στο ίδιο συμπέρασμα καταλήγουμε μελετώντας μόνο τις σημειακές μετρήσεις που διεξήχθησαν στη διατομή.
- Οι περισσότερες μέθοδοι ακολουθούν την τεχνική του πλησιέστερου γείτονα με βάρος για την απεικόνιση των τοπικών χωρικών συσχετίσεων στο προφίλ της ταχύτητας όπου και είναι και η κυρίως τεχνική που η *IDW* μέθοδος χρησιμοποιεί. Κάποιες προσαρμόζουν πάνω σε αυτήν την τεχνική της τάσης που τα σημειακά δεδομένα εμφανίζουν (*Global interpolation*) και κάποιες άλλες τον προσανατολισμό (*Kriging*) ως βασικό κριτήριο χωρικής συσχέτισης μεταξύ των τιμών του δείγματος.
- Όλες οι μέθοδοι παρεμβολής παράγουν το αποτέλεσμα του προφίλ της ταχύτητας ανάλογα κυρίως με το σχήμα (έλλειψη ή κύκλος) που θα χρησιμοποιηθεί ως παράμετρος για την επιλογή των πλησιέστερων γειτόνων, και ανάλογα με το σχήμα το προφίλ της ταχύτητας προσαρμόζεται στις

επιφάνειες που δημιουργούνται. Όπως για παράδειγμα όταν χρησιμοποιείται έλλειψη η επιφάνεια του πεδίου ταχύτητας ροής εξαπλώνεται ως προς το μήκος της διατομής.

- Οι επιφάνειες παρεμβολής που παρουσίασαν σφάλματα κατά την εφαρμογή τους απορρίφθηκαν, ακόμα και αν τα τυπικά σφάλματα που προέκυπταν ήταν μικρά, ώστε να διευκολυνθεί το στάδιο της επιλογής της βέλτιστης επιφάνειας παρεμβολής. Αυτές οι επιφάνειες παρουσίασαν και τις μεγαλύτερες αποκλίσεις της μέσης τιμής της ταχύτητας από αυτήν όπως εκτιμήθηκε από τη ΕΥΔΑΠ.
- Το γεγονός ότι με τις περισσότερες επιφάνειες παρεμβολής του προφίλ της ταχύτητας ροής η μέση τιμή της όπως προσδιορίστηκε για την εκάστοτε επιφάνεια κινείται στην ίδια τάξη μεγέθους, και ως εκ τούτου το ίδιο ισχύει και για τον εκάστοτε συντελεστή τραχύτητας K ο οποίος κινείται σε τάξη μεγέθους μικρότερη από 1% περίπου από την τιμή που εκτίμησε η ΕΥΔΑΠ, συμπεραίνεται ότι οι μέθοδοι χωρικής παρεμβολής είναι δυνατόν να αντικαταστήσουν τη μέθοδο προσδιορισμού της παροχής με τμήματα (θεωρητική μέθοδος).
- Επομένως λοιπόν για ποιο λόγο θα πρέπει να βασιζόμαστε στην εμπειρία του κάθε χρήστη που θα ακολουθήσει τη θεωρητική μέθοδο εκτίμησης της συνολικής παροχής και απλά να μην προσαρμόσουμε τις σημειακές υδρομετρήσεις σε μία επιφάνεια παρεμβολής που προσφέρουν τα αντίστοιχα εργαλεία των *GIS*. Σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι με τα *GIS* δίνεται η δυνατότητα εξοικονόμησης χρόνου στο γραφείο αλλά και στο πεδίο αφού κατ'ελάχιστον απαιτούνται δέκα (10) μόνο σημειακές μετρήσεις για να επιτευχθεί οποιαδήποτε χωρική παρεμβολή.
- Συνοψίζοντας λοιπόν συμπεραίνεται ότι οι γεωστατιστικές μέθοδοι χωρικής παρεμβολής είναι το ίδιο αξιόπιστες όσο αξιόπιστη μπορεί να είναι και η θεωρητική μέθοδος προσδιορισμού μέσης ταχύτητας που χωρίζει τη διατομή σε τμήματα, αφού οι τιμές που προκύπτουν από τις δύο τεχνικές είναι πάρα πολύ κοντινές.

4.2. Μελλοντική εργασία

Με την παρούσα μεταπτυχιακή εργασία προτείνεται η χρήση των γεωστατιστικών μεθόδων που παρέχουν τα *GIS* για τη εκτίμηση της μέσης ταχύτητας ροής της διατομής, της συνολικής παροχής της διατομής και τον συντελεστή τραχύτητας *K* στη διάωρυγα στη συγκεκριμένη διατομή. Στο σημείο αυτό πρέπει να υπογραμμισθεί ότι το γεγονός ότι η διατομή είναι ομοιόμορφου υλικού (σκυρόδεμα) και ομοιόμορφου σχήματος (τραπεζοειδούς διατομής) διευκόλυνε τη διεξαγωγή συμπερασμάτων. Στην περίπτωση που η διατομή είχε ανώμαλο πυθμένα πιθανώς να ήταν πιο δύσκολη η σύγκριση των αποτελεσμάτων που η κάθε επιφάνεια παρεμβολής θα παρήγαγε, από την στιγμή που δεν υπάρχουν και αρκετές μετρήσεις στα όρια της διατομής, θα γινόταν ακόμα πιο δύσκολη η ανάλυση.

Σαν μελλοντική εργασία μπορεί να θεωρηθεί η μελέτη χρήσης των ίδιων μεθόδων σε φυσικό υδατόρεμα με ανώμαλο πυθμένα και όχθη ώστε να αναλυθούν περαιτέρω τα αποτελέσματα που η εκάστοτε μέθοδος παράγει με τις τυχόν διαφορές που μπορεί να παρουσιάζουν μεταξύ τους στα όρια. Το σίγουρο είναι ότι για τα πλαίσια της παρούσης δεν απαιτείται η μελέτη κατανομής του πεδίου ταχύτητας αλλά μόνο η εκτίμηση της μέσης τιμής της μέσω χρήσης μεθόδων χωρικής παρεμβολής, μιας και για τους υδρολόγους η τιμή της μέσης ταχύτητας είναι αρκετή για τον προσδιορισμό της συνολικής παροχής που εισέρχεται από μία διατομή και στην συνέχεια για την εκπόνηση υδρολογικών μελετών. Επομένως παραθέτω τα συμπεράσματα από μία δημοσιευμένη μελέτη που έγινε στην Πολυτεχνική σχολή του *Hong Kong* το 2005 *Application of GIS for Retrieval and Display of Hydrodynamic and Water Quality Data for the Pearl River Estuary*, σαν χρήσιμο εργαλείο για την επιλογή της βέλτιστης μεθόδου παρεμβολής για τον προσδιορισμό του προφίλ της ταχύτητας ροής υδατορέματος. Συγκεκριμένα στην εργασία αυτή οι συγγραφείς αναλύουν για ποιο σκοπό η κάθε μέθοδος χωρικής παρεμβολής εφαρμόζονται ικανοποιητικότερα. Για παράδειγμα συμπεραίνουν ότι η μέθοδος *IDW* ταιριάζει καλύτερα για παράγει μεταβλητές που επηρεάζονται από την απόσταση ενώ η μέθοδος *Spline* ταιριάζει για την παρεμβολή της επιφάνειας υγρού στοιχείου αφού λειτουργεί αποτελεσματικά για την εξομάλυνση επιφανειών. Η μέθοδος *Kriging* προτείνεται από τους συγγραφείς για παρεμβολή χωρικών δεδομένων που επηρεάζονται τόσο από την απόσταση όσο και από τον προσανατολισμό / κατεύθυνση των δεδομένων, όπως για παράδειγμα για τη μελέτη διασποράς από σημειακή πηγή όπως τον αγωγό εκβολής λυμάτων σε υδάτινο αποδέκτη. Σχετικά με τις πολυωνμικές συναρτήσεις που χρησιμοποιούν οι μέθοδοι παρεμβολής προτείνεται από τους συγγραφείς η χρήση τριγωνομετρικών συναρτήσεων για την παρεμβολή παλίρροιας μιας υγρής επιφάνειας και λογαριθμικών συναρτήσεων για την παρεμβολή της ταχύτητας ως προς το βάθος αφού είναι γνωστό ότι το προφίλ της ταχύτητας ακολουθεί το λογαριθμικό κανόνα.

Βιβλιογραφικές αναφορές

- Κουτσόπουλος Κ., Καθηγητής Ε.Μ.Π., *Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών και Ανάλυση Χώρου*, Αθήνα 2002 [1]
- Μαμάσης Ν. – Λέκτορας Ε.Μ.Π., *Σημειώσεις μαθήματος Προχωρημένης Υδρολογίας*, ΔΔΠΜΣ Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, Αθήνα - 2007 [2]
- Μιμίκου Μ.Α. - Καθηγήτρια Ε.Μ.Π., Μπαλτάς Ε.Α. Δρ. Πολ. Μηχ., *Τεχνική Υδρολογία-β' έκδοση*, Αθήνα.- 2002 [3]
- Τσούλος Λύσανδρος – Καθηγητής Ε.Μ.Π., *Ψηφιακή Χαρτογραφία*, ΔΔΠΜΣ Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, Αθήνα - 2007 [4]
- Chad Richtman, *A GIS Method for Determining Volumetric Flow in a Riverine Channel*, Volume 8, Papers in Resource Analysis, 8 pp. Saint Mary's University of Minnesota, Winona, MN – 2006, www.gis.smumn.edu/GradProjects/RichtmanC.pdf [5]
- Henry Pai, Jason C. Fisher, Sandra R. Vilamizar, Christopher Butler, Alexander A. Rat'ko, Thomas C. Harmon, *Assesing Ground Water – Surface Water Exchanges in a Complex River Regime*, School of Engineering, UC Merced, https://eng.ucmerced.edu/snsjho/files/San_Joaquin/Temporary/CENS_Site_Visit_2008_Poster_s/
[/CON_AssessingGroundWaterSurfaceWaterExchanges_hp.ppt](http://CON_AssessingGroundWaterSurfaceWaterExchanges_hp.ppt) [6]
- Monica Rivas Casado, Sue White, Pat Bellamy, Douglas Booker, Mike Dunbar, Ian Maddock and Venkatesh Merwade, *Guidelines for depth data collection in rivers when applying interpolation techniques (kriging) for river restoration*, Centre for Ecology & Hydrology, Cranfield University, http://meetings.copernicus.org/egu2008/download/poster_rivas.pdf. [7]
- Venkatesh Merwade, M.Sc. Dissertation Proposal, *Development of a methodology for accurate representation of rivers in two and tree dimensions*, University of Texas at Austin – April 2002, www.twdb.state.tx.us/InstreamFlows/pdfs/Bathymetry_interpolation_Merwade.pdf [8]
- Yan Le Coarer, *Hydraulic signatures for ecological modeling at different scales*, Hydrobiology Research Unit, Cemagref Aix en Provence, France-June 2005 άρθρο επιστημονικού περιοδικού Aquatic Ecology, [9]

www.springerlink.com/index/Y2248457X7G6X811.pdf

Μαμάσης Ν. – Λέκτορας Ε.Μ.Π. *Τεχνική Αναφορά* στα πλαίσια του ερευνητικού έργου [10]
Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας που ανατέθηκε από την ΕΥΔΑΠ στον Τομέα Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων έργων του ΕΜΠ.

ESRI-ArcGIS Βοηθητικές Σημειώσεις του λογισμικού ArcDesktop v.9, *Using ArcGIS* [11]
Geostatistical Analyst

S.M.Y. Ng, O.W.H. Wai¹, Z.H. Xu, Y.S. Li¹, Y.W. Jiang, *Application of GIS for Retrieval and Display of Hydrodynamic and Water Quality Data for the Pearl River Estuary*, Department of Civil and Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China, Key Lab. for Marine Environmental Science of Ministry of Education, Xiamen University, Xiamen, China, Environmental Informatics Archives, Volume 3 (2005), 372 – 378, EIA05-048, ISEIS Publication series Number P002, © 2005 ISEIS - International Society for Environmental Information Sciences, www.iseis.org/EIA/pdfstart.asp?no=05048