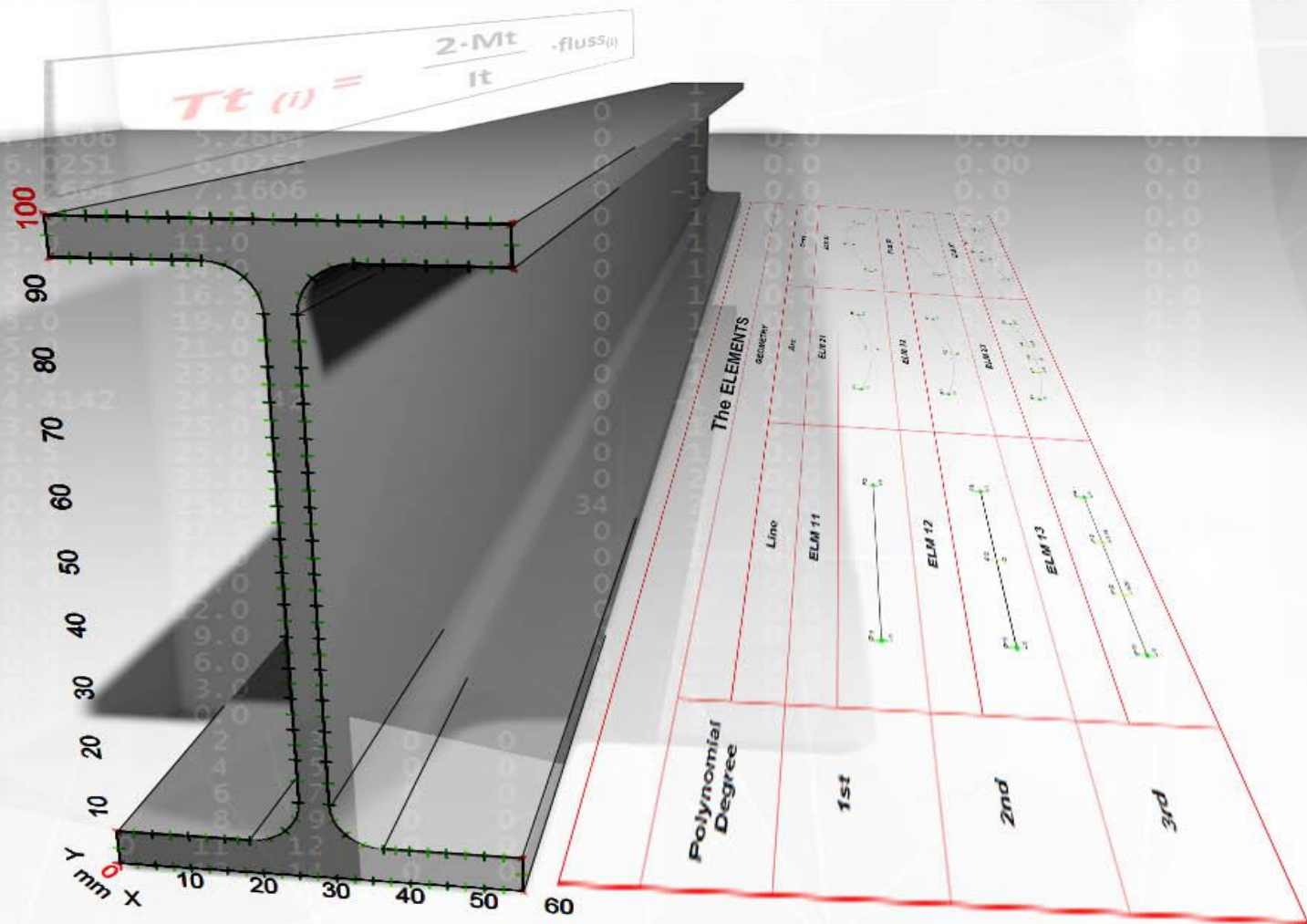


Μελέτη, ανάλυση και αξιολόγηση παραγόντων που επηρεάζουν τη δημιουργία και μεταβολή του υπολογιστικού μοντέλου της μεθόδου των Συνοριακών Στοιχείων (BEM) σε δύο και τρεις διαστάσεις



ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ:

ΓΙΑΜΑΙΟΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

ΔΡ.-ΜΗΧ. ΣΤΕΡΓΙΟΥ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ
ΣΑΓΙΑΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ





Study, analysis and evaluation of the factor that influence the creation of the 2D and 3D Boundary Element Method (BEM) mathematical model.



Ευχαριστίες:

Για τη διεκπεραίωση της παρούσας Πτυχιακής Εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους επιβλέποντες καθηγητές, Δρ.-Μηχ. Κωνσταντίνο Στεργίου και υποψήφιο Δρ.-Μηχ. Βασίλειο Σαγιά, για τη συνεργασία και την πολύτιμη συμβολή τους στην ολοκλήρωση της.

Ειδικές ευχαριστίες στον κ. Βασίλειο Σαγιά για την άμεση ανταπόκριση του σε οποιοδήποτε τυχόν πρόβλημα παρουσιάστηκε και για την μετάδοση των γνώσεων του για την εισαγωγή μου στην ΒΕΜ.



Preface:

The main goal of the current assignment is to analyze the process of BEM (Boundary Elements Method) on standard steel sections using 2nd Lagrange elements. The purpose of this analysis is to find the optimal mesh rate per section, in which the value of the maximum torsional stress is real.

In order to approach this ideal value of mesh, I made over 750 in total of trials. The results are shown in excel tables and charts for easy comparison and convenience. CAD system via programming environment and BEM program, enabling me to work and complete my assignment.



Πρόλογος:

Στην παρούσα εργασία γίνεται ανάλυση της μεθόδου των συνοριακών στοιχείων Μ.Σ.Σ. (BEM – Boundary Elements Method) πάνω σε τυποποιημένες μεταλλικές διατομές χρησιμοποιώντας 2^{ου} βαθμού στοιχεία Lagrange. Σκοπός της ανάλυσης αυτής είναι η εύρεση του ιδανικού ποσοστού πλεγματοποίησης ανά διατομή, στο οποίο η τιμή της μέγιστης στρεπτικής τάσης είναι η πραγματική.

Για την προσέγγιση αυτής της βέλτιστης τιμής του πλέγματος έγιναν πάνω από 750 συνολικά δοκιμές όπου τα αποτελέσματα των οποίων υπάρχουν συγκεντρωτικά σε πίνακες και απεικονίζονται σε διαγράμματα για την εύκολη σύγκριση τους. Η διαδικασία επιτυγχάνετε με την συνεργασία σύγχρονου συστήματος CAD μέσω του προγραμματιστικού περιβάλλοντος του και ενός BEM προγράμματος.



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ:

Ευχαριστίες:	3
Preface:	4
Πρόλογος:	5
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	8
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	9
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: Θεωρητική Αναφορά	12
1.1 CAD.....	12
1.1.1 Εισαγωγή.....	12
1.1.2 Περιγραφή	12
1.1.3 Ιστορικά στοιχεία	14
1.2 API	15
1.3 Lagrange	16
1.4 BEM.....	17
1.4.1 Εισαγωγή.....	17
1.4.2 Μειονεκτήματα FEM.....	18
1.4.3 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα BEM	19
1.4.4 Δομή BEM.....	20
1.4.5 Η BEM ως Αριθμητική Μέθοδος.....	20
1.4.6 Ιστορικά στοιχεία	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: Διαδικασία	24
2.1 Εισαγωγή.....	24
2.2 Περιγραφή	24
2.2.1 Κατανόηση λειτουργίας χρησιμοποιηθέντος BEM προγράμματος	24
2.2.2 Εφαρμογή σε Inventor και API.....	30
2.2.3 Συλλογή αποτελεσμάτων.....	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: Δοκιμές	36
3.1 Εισαγωγή.....	36
3.2 Διατομές.....	36
3.3 Ποσοστά Πλεγματοποίησης.....	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο: Αποτελέσματα – Σχόλια - Συμπεράσματα	39



ΑΝΩΤΑΤΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟΥ ΤΟΜΕΑ

4.1 Εισαγωγή.....	39
4.2 Γενικά Συμπεράσματα	39
4.2.1 Διατομές L	42
4.2.2 Διατομές I.....	42
4.2.3 Διατομές U	43
4.3 Ανάλυση επιπλέον πεδίων (διατομή L 125x75x6).....	43
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο: Αντιμετώπιση Προβλημάτων.....	50
5.1 Εισαγωγή.....	50
5.2 Περιγραφή	50
5.2.1 Virtual Machine.....	50
5.2.2 Λάθος έκδοση .dll	50
5.2.3 “Missing Libraries”	50
5.2.4 3D BEM.....	51
5.2.5 Εξαναγκασμένος τερματισμός	51
5.2.6 Έξοδος BEM σε 1000 κόμβους	51
5.2.7 22αρι element	51
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο: Προτάσεις για μελλοντική εξέλιξη.....	52
6.1 Δείγμα	52
6.2 3D	52
6.3 Κώδικας.....	52
Παράρτημα.....	53
Πίνακες.....	53
Διαγράμματα	65
Βιβλιογραφία	95



ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Υπολογισμός Tt_{max} από $Fluss$	29
Πίνακας 2: Διαστάσεις L, I, U	37
Πίνακας 3: Ιδανικά ποσοστά πλεγματοποίησης ανά διατομή	40
Πίνακας 4: Δεδομένα πλέγματος 39,9% για την γωνιά 125x75x6	46
Πίνακας 5: Συντεταγμένες θέσης Q Point για γωνιά 125x75x6	47
Πίνακας 6: Detailed TtP και TtQ για 125x75x6 (Auto It)	49
Πίνακας 7: 2D Lagrange elements	53
Πίνακας 8: 3D Lagrange elements	54
Πίνακας 9: Overall It, TtP και TtQ για L Section	55
Πίνακας 10: Overall It, TtP και TtQ για I Section	56
Πίνακας 11: Overall TtP και TtQ για U Section (Auto It)	57
Πίνακας 12: Overall It, TtP και TtQ για U Section (Manual It)	58
Πίνακας 13: Συντεταγμένες και Q τιμές L (Auto It)	59
Πίνακας 14: Συντεταγμένες και Q τιμές L (Manual It)	60
Πίνακας 15: Συντεταγμένες και Q τιμές I (Auto It)	61
Πίνακας 16: Συντεταγμένες και Q τιμές I (Manual It)	62
Πίνακας 17: Συντεταγμένες και Q τιμές U (Auto It)	63
Πίνακας 18: Συντεταγμένες και Q τιμές U (Manual It)	64



ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1: Το CAD ως κύτταρο	13
Σχήμα 2: Απεικόνιση λειτουργίας API (Απλοποιημένη Εκδοχή)	15
Σχήμα 3: (α) Πεδιακή (FEM) και (β) συνοριακή (BEM) διακριτοποίηση.....	18
Σχήμα 4: Διάφοροι τύποι συνοριακών στοιχείων.....	21
Σχήμα 5: Δομή .txt για BEM σε γωνιά 25x25x5	25
Σχήμα 6: Οπτικοποίηση σε CAD του .txt	27
Σχήμα 7: Στρεπτική Σταθερά για γωνιές ανισοσκελείς.....	28
Σχήμα 8: Στρεπτική Σταθερά για γωνιές ισοσκελείς.....	28
Σχήμα 9: Γεωμετρικά στοιχεία διατομής L.....	28
Σχήμα 10: Τύπος τάσης στρέψης.....	28
Σχήμα 11: Σημεία εμφάνισης Tt P και Tt Q για διατομή L	32
Σχήμα 12: Σημεία εμφάνισης Tt P και Tt Q για διατομή I.....	33
Σχήμα 13: Σημεία εμφάνισης Tt P και Tt Q για διατομή U	34
Σχήμα 14: Όλες οι εξεταζόμενες διατομές.....	36
Σχήμα 15: Σύμβολα διαστάσεων διατομών L,I,U.....	37
Σχήμα 16: Παράδειγμα διαχωρισμού σε στοιχεία Lagrange για πλέγμα 25% και 50%.....	39
Σχήμα 17: Απεικόνιση πλέγματος 39,9% για την γωνιά 125x75x6 (Προοπτικό)	44
Σχήμα 18: Απεικόνιση πλέγματος 39,9% για την γωνιά 125x75x6.....	45



ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1: $Tt=f(u)$	31
Διάγραμμα 2: $Sv=f(u)$	31
Διάγραμμα 3: $Sb=f(u)$	31
Διάγραμμα 4: TtP και TtQ για 125x75x6 (Auto It)	47
Διάγραμμα 5: TtP και TtQ για 125x75x6 (Manual It).....	48
Διάγραμμα 6: Detailed TtP και TtQ για 125x75x6 (Auto It).....	49
Διάγραμμα 7: TtP και TtQ για 45x25x4 (Auto It)	65
Διάγραμμα 8: TtP και TtQ για 45x25x4 (Manual It).....	65
Διάγραμμα 9: TtP και TtQ για 50x30x5 (Auto It)	66
Διάγραμμα 10: TtP και TtQ για 50x30x5 (Manual It).....	66
Διάγραμμα 11: TtP και TtQ για 60x40x5 (Auto It)	67
Διάγραμμα 12: TtP και TtQ για 60x40x5 (Manual It).....	67
Διάγραμμα 13: TtP και TtQ για 75x65x6 (Auto It)	68
Διάγραμμα 14: TtP και TtQ για 75x65x6 (Manual It).....	68
Διάγραμμα 15: TtP και TtQ για 90x65x6 (Auto It)	69
Διάγραμμα 16: TtP και TtQ για 90x65x6 (Manual It).....	69
Διάγραμμα 17: TtP και TtQ για 100x50x10 (Auto It)	70
Διάγραμμα 18: TtP και TtQ για 100x50x10 (Manual It).....	70
Διάγραμμα 19: TtP και TtQ για 150x75x9 (Auto It) ---Radius 12mm.....	71
Διάγραμμα 20: TtP και TtQ για 150x75x9 (Manual It) ---Radius 12mm.....	71
Διάγραμμα 21: TtP και TtQ για 150x75x9 (Auto It) ---Radius 2mm.....	72
Διάγραμμα 22: TtP και TtQ για 150x75x9 (Manual It) ---Radius 2mm.....	72
Διάγραμμα 23: TtP και TtQ για 150x90x10 (Auto It)	73
Διάγραμμα 24: TtP και TtQ για 150x90x10 (Manual It).....	73
Διάγραμμα 25: TtP και TtQ για 200x100x12 (Auto It)---Radius 15mm	74
Διάγραμμα 26: TtP και TtQ για 150x90x10 (Manual It)---Radius 15mm.....	74
Διάγραμμα 27: TtP και TtQ για 200x100x12 (Auto It)---Radius 2mm.....	75
Διάγραμμα 28: TtP και TtQ για 200x100x12 (Manual It)---Radius 2mm	75
Διάγραμμα 29: TtP και TtQ για IPE 80 (Auto It).....	76
Διάγραμμα 30: TtP και TtQ για IPE 80 (Manual It)	76
Διάγραμμα 31: TtP και TtQ για IPE 100 (Auto It).....	77
Διάγραμμα 32: TtP και TtQ για IPE 100 (Manual It)	77
Διάγραμμα 33: TtP και TtQ για IPE 120 (Auto It)	78
Διάγραμμα 34: TtP και TtQ για IPE 120 (Manual It)	78
Διάγραμμα 35: TtP και TtQ για IPE 140 (Auto It).....	79
Διάγραμμα 36: TtP και TtQ για IPE 140 (Manual It)	79
Διάγραμμα 37: TtP και TtQ για IPE 160 (Auto It).....	80
Διάγραμμα 38: TtP και TtQ για IPE 160 (Manual It)	80
Διάγραμμα 39: TtP και TtQ για IPE 180 (Auto It).....	81
Διάγραμμα 40: TtP και TtQ για IPE 180 (Manual It)	81
Διάγραμμα 41: TtP και TtQ για IPE 220 (Auto It).....	82
Διάγραμμα 42: TtP και TtQ για IPE 220 (Manual It)	82
Διάγραμμα 43: TtP και TtQ για IPE 270 (Auto It).....	83



Διάγραμμα 44: TtP και TtQ για IPE 270 (Manual It)	83
Διάγραμμα 45: TtP και TtQ για IPE 300 (Auto It)	84
Διάγραμμα 46: TtP και TtQ για IPE 300 (Manual It)	84
Διάγραμμα 47: TtP και TtQ για UPE 80 (Auto It)	85
Διάγραμμα 48: TtP και TtQ για UPE 80 (Manual It).....	85
Διάγραμμα 49: TtP και TtQ για UPE 100 (Auto It)	86
Διάγραμμα 50: TtP και TtQ για UPE 100 (Manual It).....	86
Διάγραμμα 51: TtP και TtQ για UPE 120 (Auto It)	87
Διάγραμμα 52: TtP και TtQ για UPE 120 (Manual It).....	87
Διάγραμμα 53: TtP και TtQ για UPE 140 (Auto It)	88
Διάγραμμα 54: TtP και TtQ για UPE 140 (Manual It).....	88
Διάγραμμα 55: TtP και TtQ για UPE 160 (Auto It)	89
Διάγραμμα 56: TtP και TtQ για UPE 160 (Manual It).....	89
Διάγραμμα 57: TtP και TtQ για UPE 180 (Auto It)	90
Διάγραμμα 58: TtP και TtQ για UPE 180 (Manual It).....	90
Διάγραμμα 59: TtP και TtQ για UPE 200 (Auto It)	91
Διάγραμμα 60: TtP και TtQ για UPE 200 (Manual It).....	91
Διάγραμμα 61: TtP και TtQ για UPE 220 (Auto It)	92
Διάγραμμα 62: TtP και TtQ για UPE 220 (Manual It).....	92
Διάγραμμα 63: TtP και TtQ για UPE 240 (Auto It)	93
Διάγραμμα 64: TtP και TtQ για UPE 240 (Manual It).....	93
Διάγραμμα 65: TtP και TtQ για UPE 270 (Auto It)	94
Διάγραμμα 66: TtP και TtQ για UPE 270 (Manual It).....	94



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: Θεωρητική Αναφορά

1.1 CAD

Computer-aided design

1.1.1 Εισαγωγή

Οι διάφορες ανάγκες των καταναλωτών σε συνδυασμό με το ανταγωνιστικό περιβάλλον έχουν οδηγήσει τους κατασκευαστές, που φιλοδοξούν να πετύχουν, στην απαίτηση για βράχυνση του κύκλου κάποιων σταδίων παραγωγής όπως ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός προϊόντος.

Μία από τις πλέον κατάλληλες μεθόδους για την μείωση του κύκλου αυτών των διαδικασιών είναι η «παράλληλη μηχανική» (concurrent engineering), η οποία περιλαμβάνει το σχεδιασμό και την κατασκευή παράλληλα. Το πιο ισχυρό εργαλείο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καταστήσει τις παραπάνω διαδικασίες αποτελεσματικές είναι ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής. Το CAD (Computer Aided Design) και CAM (Computer Aided Manufacturing) έχουν γίνει δημοφιλής ως εργαλεία απαραίτητα για το σχεδιασμό και την κατασκευή μέσω υπολογιστών όπως επίσης και το CAE (Computer Aided Engineering) για τον έλεγχο των προϊόντων και τον καθορισμό της χρηστικότητας των μερών του εκάστοτε προϊόντος. (H. Toriya, H. Chiyokura, 1993)

1.1.2 Περιγραφή

Συγκεκριμένα το CAD είναι η χρήση του ηλεκτρονικού υπολογιστή με σκοπό:

- Τη δημιουργία
- Τη τροποποίηση
- Την ανάλυση ή βελτιστοποίηση του σχεδιασμού.

Το λογισμικό CAD ή αλλιώς CADD (Computer Aided Design and Drafting) χρησιμοποιείτε για να μεγιστοποιήσει την παραγωγικότητα του σχεδιαστή, να βελτιώσει την ποιότητα του σχεδιασμού και να δημιουργήσει μια βάση δεδομένων για την παραγωγή. Τα CAD αρχεία έχουν ηλεκτρονική μορφή και χρησιμοποιούνται για εκτύπωση, κατεργασία και άλλες κατασκευαστικές δραστηριότητες.

Το CAD μπορεί να παράγει:

- ✓ διανυσματικά γραφικά όπου απεικονίζουν τα αντικείμενα της παραδοσιακής σχεδίασης
- ✓ γραφικά που δείχνουν την συνολική εμφάνιση των σχεδιασμένων αντικειμένων

Σύμφωνα με την εφαρμογή ειδικών συμβάσεων και το εγχειρίδιο σχεδίασης των τεχνικών και κατασκευαστικών σχεδίων, τα αρχεία εξόδου του CAD θα πρέπει να συμπεριλαμβάνουν πληροφορίες, όπως τα υλικά, τις διαδικασίες, τις διαστάσεις και τις ανοχές.

Οπότε το CAD μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για το σχεδιασμό καμπυλών και σχημάτων σε δύο διαστάσεις (2D) ή καμπύλες, επιφάνειες, και στερεά σε τρισδιάστατο (3D) χώρο.

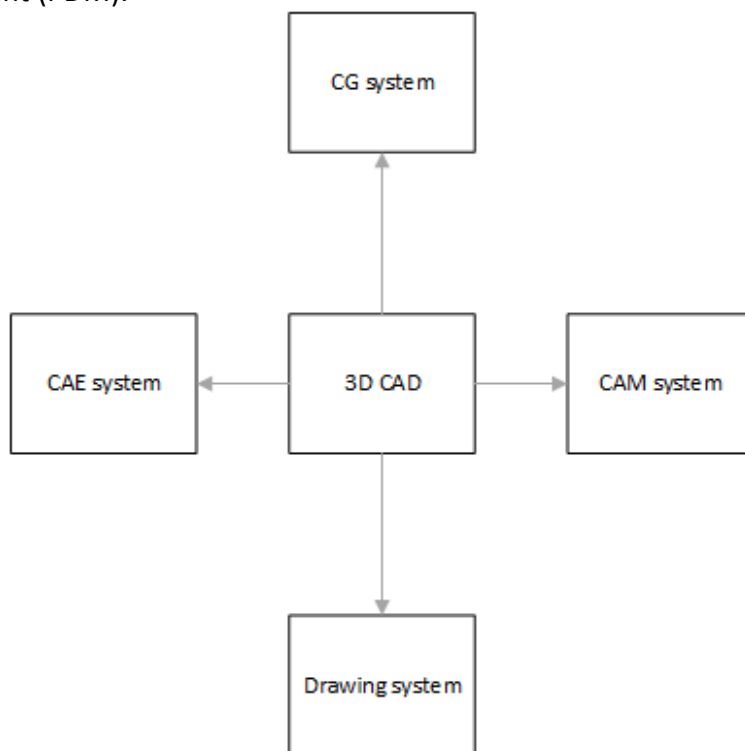


Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί πως το CAD είναι σημαντικό βιομηχανικό εργαλείο της αυτοκινητοβιομηχανίας, της ναυπηγικής, της αεροδιαστημικής βιομηχανίας, του βιομηχανικού και αρχιτεκτονικού σχεδιασμού και σε πολλά άλλα. Το CAD χρησιμοποιείται επίσης ευρέως για την παραγωγή κινουμένων σχεδίων, για ειδικά εφέ σε ταινίες, διαφημιστικά και τα τεχνικά εγχειρίδια, που συχνά αποκαλείται DCC digital content creation. Το CAD υπήρξε ακόμη σημαντική κινητήρια δύναμη για την έρευνα στην υπολογιστική γεωμετρία, τα γραφικά υπολογιστών (hardware και software), και την διακριτά διαφορική γεωμετρία.

Το Computer-aided design είναι ένα από τα πολλά εργαλεία που χρησιμοποιούνται από τους μηχανικούς και τους σχεδιαστές με πολλούς τρόπους, ανάλογα με το επάγγελμα του χρήστη και τον τύπο του εν λόγω λογισμικού.

Πλέον τα λογισμικά CAD περιλαμβάνουν εργαλεία όπως:

- Computer-aided engineering (CAE) ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων Finite element analysis (FEA)
- Computer-aided manufacturing (CAM) συμπεριλαμβανομένων οδηγιών για της Computer Numerical Control (CNC) μηχανές
- Φωτορεαλιστικά και Προσομοίωσης κίνησης
- Διαχείρισης εγγράφων και έλεγχος αναθεώρησης χρησιμοποιώντας Product Data Management (PDM).



Σχήμα 1: Το CAD ως κύτταρο



Το CAD έχει αποδειχθεί ότι είναι χρήσιμο για τους μηχανικούς χρησιμοποιώντας τέσσερις ιδιότητες όπως το ιστορικό, τα χαρακτηριστικά, η παραμετροποίηση, και οι περιορισμοί υψηλού επιπέδου. Το ιστορικό των κατασκευών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να κοιτάξουμε πίσω σε προσωπικά χαρακτηριστικά του μοντέλου και να εργαστούμε για μια συγκεκριμένη περιοχή και όχι για ολόκληρο το μοντέλο. Οι παράμετροι και οι περιορισμοί μπορεί να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό του μεγέθους, το σχήμα, και άλλες ιδιότητες των διαφόρων στοιχείων μοντελοποίησης. Τα χαρακτηριστικά του συστήματος CAD μπορεί να χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση όπως αντοχή σε εφελκυσμό, αντοχή διαρροής, ηλεκτρικές ή ηλεκτρο-μαγνητικές ιδιότητες, την τάση, την πίεση ή πώς το στοιχείο επηρεάζεται σε ορισμένες θερμοκρασίες, κ.λπ. μέσω μιας πληθώρας εργαλείων. (K. Lalit Narayan, M.M.M. Sarcar, K. Mallikarjuna Rao 2008)

1.1.3 Ιστορικά στοιχεία

Το Ινστιτούτο Τεχνολογίας της Μασαχουσέτης (MIT) το 1959 είναι υπεύθυνο για το πρώτο έργο μεγάλης κλίμακας για την ανάπτυξη του συστήματος CAD που θα επεξεργαζόταν σχέδια σε ηλεκτρονικούς υπολογιστές. Το εγχείρημα αυτό ολοκληρώθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1960 από τον Sutherland και είχε παρουσιαστεί ως SKETCHPAD. Παρόλο που το σύστημα SKETCHPAD ήταν ένα πρώιμο σύστημα επεξεργασίας σχεδίασης, περιλάμβανε τις περισσότερες από τις έννοιες που υπάρχουν στο σημερινό διδιάστατο σύστημα CAD. Την ίδια περίοδο η General Motors ανέπτυξε ένα σύστημα CAD για το σχεδιασμό αυτοκινήτων που ονομάζεται DAC-1, καθώς και ένα επιχειρηματικό σύστημα το CADAM της Lockheed Corp. το οποίο είχε τεθεί σε πρακτική χρήση το 1967. Αργότερα το 1968, η Applicon Corp. παρουσίασε το AGS και το 1969 η Computer Vision Corp. παρουσίασε το CADDs. Τα συστήματα αυτά αναβαθμίστηκαν με τη σύνδεση ενός μίνι-υπολογιστή σε ένα ειδικό τερματικό γραφικών. Αυτός ο τύπος συστήματος έγινε δημοφιλής στα τέλη της δεκαετίας του 1970. Μετά από αυτό, η Autodesk Corp. παρουσίασε το AutoCAD, σύστημα 2-διαστάσεων CAD που λειτουργεί σε προσωπικούς υπολογιστές. Το μεγάλο σε πωλήσεις σύστημα αυτό, παρείχε στους χρήστες το 80 τοις εκατό των λειτουργιών της μεγάλης κλίμακας υπολογιστών αλλά με χαμηλότερο κόστος. Η επιτυχία του AutoCAD συνέβαλε σε μεγάλο βαθμό στην εξάπλωση των συστημάτων CAD. (H. Toriya, H. Chiyokura, 1993)

Στα μέσα της δεκαετίας του 1970, όπου η σχεδίαση με τη βοήθεια υπολογιστή άρχισε να παρέχει περισσότερες δυνατότητες, έγινε αντιληπτό από τις επιχειρήσεις το όφελος του κόστους να στραφούν σε CAD λογισμικά. Το όφελος αυτό ήρθε με την δυνατότητα των συστημάτων CAD να μπορούν να παράγουν αυτοματοποιημένη παραγωγή Bill of Material (Πίνακα Υλικών), την αυτόματη διάταξη σε ολοκληρωμένα κυκλώματα, έλεγχος παρεμβολών, και πολλά άλλα. Έτσι λοιπόν μέσω του CAD επιτυγχάνετε η ικανότητά του σχεδιαστή να εκτελεί υπολογισμούς μηχανικής. (K. Lalit Narayan, M.M.M. Sarcar, K. Mallikarjuna Rao 2008)

Το CAD ήταν μια μεγάλη επαναστατική αλλαγή στον κλάδο της μηχανικής, όπου οι ρόλοι της σχεδίασης και της μηχανικής αρχίζουν να συγχωνεύονται με αποτέλεσμα και την συγχώνευση τμημάτων. Το CAD είναι παράδειγμα της επίδρασης των υπολογιστών στην βιομηχανία.



1.2 API

Το Application Programming Interface ή αλλιώς API είναι ένα σύνολο ορισμών υπορουτινών, πρωτοκόλλων, και εργαλείων με σκοπό τη δημιουργία λογισμικού και εφαρμογών. Ένα καλό API καθιστά ευκολότερο να αναπτυχθεί ένα πρόγραμμα, παρέχοντας όλα τα δομικά στοιχεία, τα οποία στη συνέχεια θα τοποθετούνται από τον προγραμματιστή.

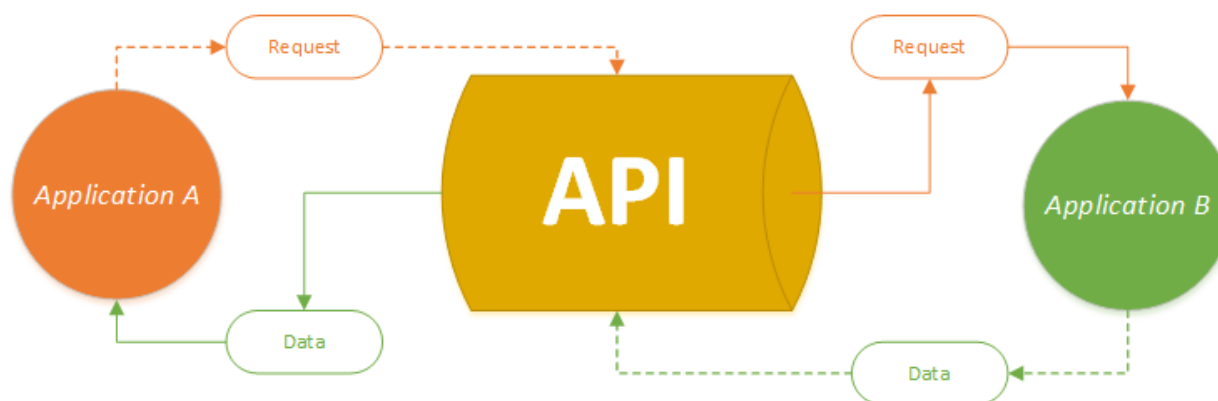
Ο στόχος ενός API είναι να επιτρέψει στους προγραμματιστές να γράψουν προγράμματα που δεν θα πάψουν να λειτουργούν όταν το εκάστοτε σύστημα αναβαθμίζεται. Τα APIs επίσης καθορίζονται από ιστοσελίδες όπως για παράδειγμα, το eBay API δίνει τη δυνατότητα στους προγραμματιστές να χρησιμοποιούν την υπάρχουσα υποδομή λιανικής για να δημιουργήσουν εξειδικευμένα καταστήματα Ιστού.

API λοιπόν μπορεί να είναι:

- web-based σύστημα
- λειτουργικό σύστημα
- σύστημα βάσης δεδομένων
- hardware υπολογιστή ή βιβλιοθήκη λογισμικού

Το API μπορεί να θεωρηθεί ιδανικό για τους προγραμματιστές που χρησιμοποιούν τεχνολογίες σε υπό κατασκευή εφαρμογές. Ακόμη υπάρχει η δυνατότητα να δώσει στον προγραμματιστή μια λειτουργία που αντιγράφει ένα αρχείο από μια θέση σε μια άλλη χωρίς να απαιτείται ο προγραμματιστής να κατανοήσει τις λειτουργίες του συστήματος αρχείων που συμβαίνουν στο παρασκήνιο.

Ένα εύκολο παράδειγμα API που χρησιμοποιείται από το hardware και τις εφαρμογές του συστήματος στα Windows είναι όταν γίνεται αντιγραφή και επικόλληση κειμένου από μία εφαρμογή σε μια άλλη. Η κίνηση αυτή συμβαίνει επειδή το API το επιτρέπει.



Σχήμα 2: Απεικόνιση λειτουργίας API (Απλοποιημένη Έκδοχή)



Εν κατακλείδι, API είναι ένα λογισμικό που διευκολύνει την αλληλεπίδραση με άλλα προγράμματα.

1.3 Lagrange

Τα Lagrange ανακαλύφθηκαν για πρώτη φορά το 1779 από τον Edward Waring και δημοσιεύθηκαν το 1795 από τον Joseph Louis Lagrange.

Τα πολυώνυμα Lagrange χρησιμοποιούνται για την πολυωνυμική παρεμβολή στην αριθμητική ανάλυση. Για ένα δεδομένο σύνολο διακριτών σημείων x_j και αριθμούς y_j , το πολυώνυμο Lagrange είναι το πολυώνυμο του λιγότερου βαθμού που σε κάθε σημείο x_j λαμβάνει το y_j αντίστοιχη τιμή (δηλαδή οι συναρτήσεις συμπίπτουν σε κάθε σημείο). (Hazewinkel, M. Ed. 2001)

Ο γενικός τύπος που καθορίζει την εξίσωση του σχήματος χρησιμοποιώντας τα πολυώνυμα Lagrange:

$$\Phi_k(n) = \prod_{i=1, i \neq k}^{NN} \frac{n - n_{(i)}}{n_{(k)} - n_{(i)}} \quad (1.1)$$

Όπου NN είναι ο αριθμός των κόμβων για κάθε στοιχείο.

- Στοιχεία 1^{ου} Βαθμού Lagrange:

$$\Phi_1(n) = \frac{(1 - n)}{2}$$

$$\Phi_2(n) = \frac{(n + 1)}{2}$$

Θέση σημείων: $n_1 = -1, n_2 = 1$

- Στοιχεία 2^{ου} Βαθμού Lagrange:

$$\Phi_1(n) = \frac{(n^2 - n)}{2}$$

$$\Phi_2(n) = (1 + n) \cdot (1 - n)$$

$$\Phi_3(n) = \frac{(n + n^2)}{2}$$

Θέση σημείων: $n_1 = -1, n_2 = 0, n_3 = 1$

- Στοιχεία 3^{ου} Βαθμού Lagrange:



$$\Phi_1(n) = \frac{(1 - 3n) \cdot (n - 1) \cdot (1 + 3n)}{16}$$

$$\Phi_2(n) = \frac{9 \cdot (1 - 3n) \cdot (1 + n) \cdot (1 - n)}{16}$$

$$\Phi_3(n) = \frac{9 \cdot (1 + 3n) \cdot (1 + n) \cdot (1 - n)}{16}$$

$$\Phi_4(n) = \frac{(3n - 1) \cdot (1 + n) \cdot (1 + 3n)}{16}$$

$$\text{Θέση σημείων: } n_1 = -1, n_2 = -\frac{1}{3}, n_3 = -\frac{1}{3}, n_4 = 1$$

1.4 BEM

1.4.1 Εισαγωγή

Η μέθοδος των συνοριακών στοιχείων ή αλλιώς (BEM) είναι μια αριθμητική υπολογιστική μέθοδος επίλυσης γραμμικών μερικών διαφορικών εξισώσεων που έχουν διατυπωθεί ως ολοκληρωτικές εξισώσεις. Είναι μια μαθηματική μέθοδος επίλυσης λιγότερο διαδεδομένη σε σχέση με άλλες όπως των πεπερασμένων στοιχείων (FEM Finite Element Method) και έχει εφαρμογή σε πολλούς τομείς της μηχανικής και της επιστήμης όπως την μηχανική ρευστών, την ακουστική, τον ηλεκτρομαγνητισμό και την μηχανική θραύσης.

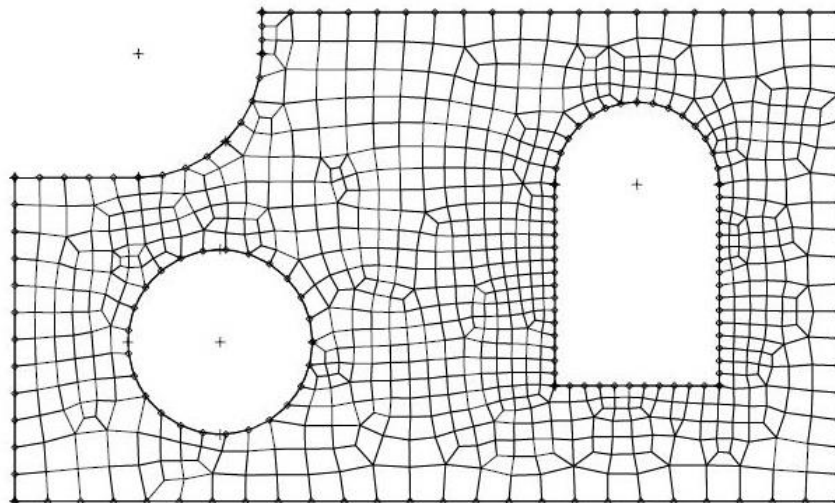
Γεγονός αποτελεί ότι η μέθοδος με την οποία γίνεται η αριθμητική ανάλυση των κατασκευών τα τελευταία 50 χρόνια είναι κυρίως η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, FEM. Μέθοδος με την οποία επιλύονται ρεαλιστικά μηχανικά προβλήματα, όπως η ανάλυση κατασκευαστικών στοιχείων οποιασδήποτε γεωμετρίας, φόρτισης, ποικιλίας καταστατικών σχέσεων, γραμμικής και μη γραμμικής συμπεριφοράς, σε δύο ή τρεις διαστάσεις.

Μολονότι η προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία, χαίρει της εκτιμήσεως των μηχανικών ως σύγχρονο υπολογιστικό εργαλείο, είναι αναποτελεσματική και επίπονη για πολλές κατηγορίες προβλημάτων.

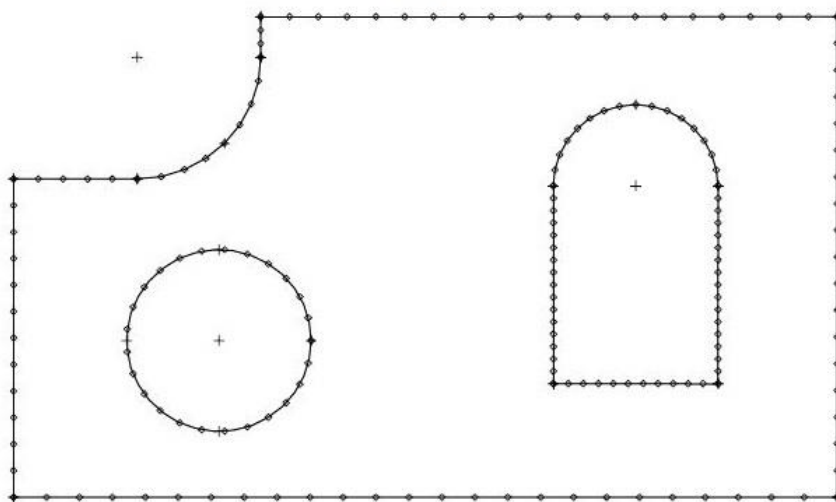


1.4.2 Μειονεκτήματα FEM

Έτσι η FEM παρά την ευρεία της εφαρμογής στα μηχανικά προβλήματα έχει μειονεκτήματα. Τα σπουδαιότερα των οποίων είναι:



(α)



(β)

Σχήμα 3: (α) Πεδιακή (FEM) και (β) συνοριακή (BEM) διακριτοποίηση

- Η διακριτοποίηση γίνεται σ' ολόκληρη την περιοχή του σώματος. Έτσι η προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία εμφανίζει δυσκολία και απαιτεί πολύ χρόνο, ιδίως όταν η γεωμετρία του σώματος δεν είναι απλή, π.χ. όταν υπάρχουν οπές ή εγκοπές απαιτείται πυκνωση των στοιχείων (Σχήμα 3α).
- Η αλλαγή των παραμέτρων προσομοίωσης για αναζήτηση καλύτερης λύσης είναι δύσκολη και απαιτεί πολύ χρόνο.



- Για προβλήματα που περιγράφονται με διαφορικές εξισώσεις τάξεως ≥ 4 , όπως π.χ. για εξισώσεις πλακών ή κελυφών τάξεως έκτης, όγδοης ή μεγαλύτερης, η FEM να είναι πρακτικά ανεφάρμοστη. (Κατσικαδέλης, 2002)

1.4.3 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα BEM

Αντιθέτως, η χρήση της BEM μπορεί να θεωρηθεί πιο αποτελεσματική και εύκολη σε ορισμένες κατηγορίες προβλημάτων συγκριτικά με τη FEM. Έτσι η BEM παρουσιάζει πλεονεκτήματα, τα σπουδαιότερα των οποίων είναι:

- Χρησιμοποιώντας τη BEM, η αριθμητική προσομοίωση καθίσταται απλή καθώς η διακριτοποίηση περιορίζεται στο σύνορο (Σχήμα 3β) με αποτέλεσμα τον περιορισμό του πλήθους των αγνώστων κατά μία τάξη.
- Είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική για τον υπολογισμό των παραγώγων συναρτήσεως πεδίου τάσεων και ροπών διότι είναι ικανή να χειρισθεί εύκολα συγκεντρωμένες δυνάμεις και ροπές στο εσωτερικό και στα σύνορα.
- Επιτρέπει τον υπολογισμό της λύσης και των παραγώγων της σ' όποια σημεία μας ενδιαφέρουν και όποτε θέλουμε χρησιμοποιώντας την ολοκληρωτική παράσταση της λύσεως ως μαθηματικό τύπο, κάτι το οποίο δεν είναι δυνατό με την FEM, όπου η λύση λαμβάνεται μόνο στα κομβικά σημεία.
- Ακόμη είναι πολύ αποτελεσματική στον υπολογισμό των ροών, πιέσεων, τάσεων κι ροπών αλλά και σε επίλυση προβλημάτων με γεωμετρικές ιδιαιτερότητες όπως ρωγμές. (Κατσικαδέλης, 2002)

Τα κύρια μειονεκτήματα της BEM είναι:

- Ωστόσο η μέθοδος BEM δεν ισχύει για μη γραμμικά προβλήματα για τα οποία δεν ισχύει η αρχή της υπέρθεσης (Fundamental Solution). Σε αυτή την περίπτωση παράγει επιφανειακά ολοκληρώματα τα οποία ευθύνονται για τον μη καθαρό οριακό χαρακτήρα της μεθόδου. Έτσι για προβλήματα των οποίων η θεμελιώδης λύση είναι άγνωστή ή δεν μπορεί να προσδιορισθεί, η μέθοδος δεν μπορεί να εφαρμοσθεί. Η εφαρμογή της BEM στα προβλήματα αυτά οδηγεί σε πεδιακή διακριτοποίηση, γεγονός το οποίο αλλοιώνει τον συνοριακό χαρακτήρα της.
- Όσο αναφορά την αλγοριθμική εφαρμογή της BEM, μειονεκτεί διότι οδηγεί σε συστήματα γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων των οποίων οι μητρώα συντελεστών είναι πλήρη και μη συμμετρικά, εν αντιθέσει με την FEM. Παρόλα αυτά η εμει πολύ μικρότερες διαστάσεις μητρώων. (Κατσικαδέλης, 2002)



1.4.4 Δομή BEM

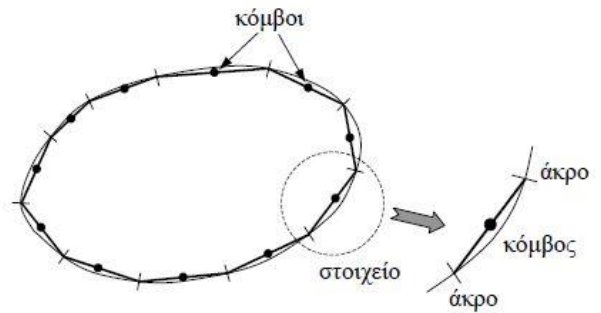
Μία τυπική εφαρμογή BEM αποτελείται από τα παρακάτω μέρη:

- Μαθηματικό μοντέλο
- Αναπαράσταση του μαθηματικού τύπου
- Οριακές ολοκληρωτικές εξισώσεις
- Συνοριακά στοιχεία
- Διακριτές εξισώσεις
- Λύσεις για γραμμικά συστήματα
- Ερμηνεία

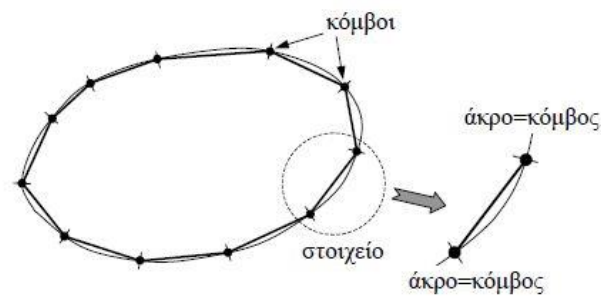
(Costabel, 1986)

1.4.5 Η BEM ως Αριθμητική Μέθοδος

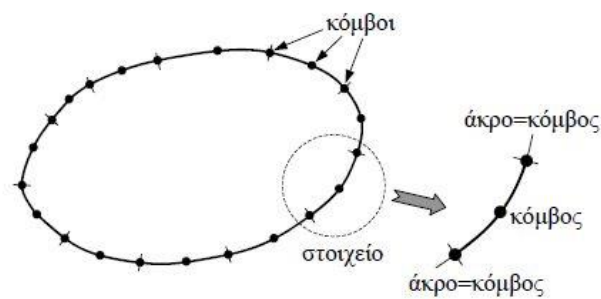
Η Μεθόδου των Συνοριακών Στοιχείων (BEM) χρησιμοποιεί ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων που έχει φυσικά σύνορα που διαμερίζονται σε τμήματα. Η ένωση των στοιχείων ονομάζεται αριθμητικό σύνορο. Στοιχείο καλείται μια ευθεία γραμμή που έχει συγκεκριμένο μέγεθος και τα άκρα της περιορίζονται από τα αριθμητικά σύνορα. Ένα πλέγμα όπου τα στοιχεία έχουν το ίδιο μέγεθος το πλέγμα αυτό ονομάζεται ενιαίο. Τα στοιχεία αριθμούνται βάσει του προτύπου σύμβασης της BEM, δηλαδή αύξουσα σειρά με αντι-ωρολογιακή λογική φοράς. Κάθε ένα από τα στοιχεία θεωρείται μια συνάρτηση. Οι συναρτήσεις αυτές διαφέρουν ως πολυώνυμα και ονομάζονται συναρτήσεις μορφής. Σύμφωνα με τη σειρά των συναρτήσεων μορφής που χρησιμοποιούνται σε κάθε στοιχείο, ο τύπος των στοιχείων που είναι σταθερός, γραμμικός ή υψηλότερης τάξης. Τα σταθερά στοιχεία, έχουν συναρτήσεις σταθερού σχήματος (σταθερές συναρτήσεις). Τα στοιχεία αντιπροσωπεύονται από μόνο έναν κόμβο που τοποθετείται στο μέσον του. Οι κόμβοι χρησιμοποιούνται και ως σημεία όπου εφαρμόζεται η ολοκληρωτική εξίσωση. Στα γραμμικά στοιχεία οι γραμμικές συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται μεταβάλλονται γραμμικά. Στις άλλες περιπτώσεις, μπορεί να χρησιμοποιηθεί τετραγωνική ή ακόμη και υψηλότερης τάξεως συνάρτηση. (Κατσικαδέλης, 2002)



(a) Σταθερά στοιχεία



(b) Γραμμικά στοιχεία



(c) Παραβολικά στοιχεία

Σχήμα 4: Διάφοροι τύποι συνοριακών στοιχείων

1.4.6 Ιστορικά στοιχεία

Στις αρχές του εικοστού αιώνα μέθοδος Μέθοδο Συνοριακών Στοιχείων (BEM) που ήταν γνωστή ως Μέθοδος Συνοριακών Ολοκληρωτικών Εξισώσεων (Boundary Integral Equation Method BIEM) χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά από τον Fredholm. Την περίοδο εκείνη χρησιμοποιούνταν ως ένα μαθηματικό εργαλείο ώστε να μπορούν να καθοριστούν οι οριακές συνθήκες ενός προβλήματος μαθηματικής φύσης, και όχι ως μέθοδος επίλυσης προβλημάτων μηχανικής. Παράλληλα οι Sherman, Mikhlin και Muskhelishvili, με πολύπλοκες συναρτήσεις προσπαθούσαν να αναπτύξουν την Boundary Integral Equation Method έτσι ώστε να επιλύσουν προβλήματα ελαστικότητας του επιπέδου. Ο Fredholm ήταν ο πρώτος που κατάφερε να βρει τις άγνωστες συνοριακές ποσότητες για τα προβλήματα της δυναμικής θεωρίας. Κατά την μέθοδο



ΑΝΩΤΑΤΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟΥ ΤΟΜΕΑ

αυτή οι άγνωστες συνοριακές ποσότητες αναφέρονται ως άμεσες BEM λόγω της άμεση φυσική ή γεωμετρική τους σημασίας σε αντίθεση με άλλες αναπτυγμένες μεθόδους έμμεσων BEM. Όντας προγενέστερων των υπολογιστών το έργο του Fredholm παραμελήθηκε μέχρι το τέλος της δεκαετίας του '50 καθώς είχε εφαρμογή μόνο για συγκεκριμένα πεδία ορισμού με πολύ απλά γεωμετρικά όρια.

Με την ανάπτυξη των Η/Υ όμως η μέθοδος του ξαναήρθε στο παρασκήνιο για να δώσει λύσεις προβλημάτων μηχανικής. Έτσι προβλήματα με πολύπλοκη συνοριακή γεωμετρία βρήκαν λύση για πρώτη φορά από την BIEM στις αρχές της δεκαετίας του εξήντα.

Αργότερα:

- οι Jaswon και Symm χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις του Fredholm προσπάθησαν να λύσουν κάποια δισδιάστατα προβλήματα της potential theory.
- οι Rizzo και Cruse εφάρμοσαν την μέθοδο σε δισδιάστατα και τρισδιάστατα προβλήματα και έλυσαν το ελαστοδυναμικό πρόβλημα
- οι Rizzo και Shippy επέκτειναν την μέθοδο για ανισοτροπική ελαστικότητα
- οι Ignaczak και Nowacki, εφάρμοσαν τις Integral Equations στην θερμοελαστικότητα
- και ο Mendelson μελέτησε τα προβλήματα ελαστοπλαστικής στρέψης .

Τέλος στα τέλη της δεκαετίας του ογδόντα η BEM εφαρμόστηκε σε ένα ευρύ φάσμα μηχανικών προβλημάτων όπως:

Μεταξύ αυτών είναι προβλήματα

- ελαστικά και ανελαστικά,
- γραμμικά και μη γραμμικά της στατικής και δυναμικής δίσκων, πλακών και κελυφών
- προβλήματα ελαστοδυναμικής και αντισεισμικής μηχανικής,
- γεωμηχανικής και θεμελιώσεων,
- αλληλεπιδράσεως εδάφους κατασκευής,
- αλληλεπιδράσεως ρευστών και κατασκευής,
- δυναμικής των ρευστών,
- μονόπλευρης επαφής,
- θραυστομηχανικής,
- ηλεκτρισμού και ηλεκτρομαγνητισμού,
- Αγωγής θερμότητας,
- ακουστικής,
- αεροδυναμικής,
- διαβρώσεως,
- βελτιστοποιήσεως,
- αναλύσεως ευαισθησίας,
- αντίστροφα προβλήματα και προβλήματα αναγνώρισεως συστημάτων, κλπ



ΑΝΩΤΑΤΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟΥ ΤΟΜΕΑ

Σήμερα η ΒΕΜ αποτελεί ώριμη μέθοδο αναλύσεως προβλημάτων μηχανικής και επιπλέον έχουν αναπτυχθεί λογισμικά για υπολογιστές απλής και παράλληλης αρχιτεκτονικής, καθώς και επαγγελματικά προγράμματα Η/Υ μεγάλων δυνατοτήτων όπως π.χ. το BEASY. (Κατσικαδέλης, 2002)



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: Διαδικασία

2.1 Εισαγωγή

Η διαδικασία της παρούσης εργασίας αποτελείτο από διάφορα στάδια. Στάδια που έχουν να κάνουν περισσότερο με την πειραματική διεξαγωγή για την αποκόμιση ζητούμενων αποτελεσμάτων και λιγότερο με την θεωρητική προσέγγιση. Παρακάτω περιγράφονται αναλυτικά τα σημαντικότερα εξ' αυτών.

Θα πρέπει σε αυτό το σημείο να ειπωθεί ότι για την εκτέλεση των δοκιμών τα στοιχεία για την δημιουργία του πλέγματος είναι Lagrange 2^{ου} βαθμού. (Στο παράρτημα παρατίθενται πίνακες με τα 2D & 3D στοιχεία)

2.2 Περιγραφή

2.2.1 Κατανόηση λειτουργίας χρησιμοποιηθέντος BEM προγράμματος

Πριν από το ξεκίνημα του ερευνητικού κομματιού της εργασίας ήταν σημαντικό να γίνει κατανοητός ο τρόπος λειτουργίας του BEM προγράμματος. Για την επίτευξη αυτού ήταν απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί ένας λιγότερο αυτοματοποιημένος τρόπος ανάλυσης κατά τον οποίο η σχεδίαση της εξεταζόμενης διατομής δεν γίνεται με κάποιο CAD αλλά μέσω αρχείου .txt όπου εντός αυτού ορίζονται πληροφορίες που αφορούν:

- Την γεωμετρία της διατομής (συντεταγμένες x,y για την θέση των κόμβων)
- Τον τύπο και τον αριθμό των κόμβων
- Τον τύπο και τον αριθμό των στοιχείων
- Τον αριθμό πηγών κ.α.

Παρακάτω παρουσιάζεται και περιγράφεται η δομή του .txt της διατομής όπου χρησιμοποιήθηκε. Τυποποιημένη κατά DIN 1025 διατομή L διαστάσεων 25x25x5.



ΑΝΩΤΑΤΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟΥ ΤΟΜΕΑ

```

RANDO L_25x25x5 1
5 2 1 3 99 4 0 5 0 6 0 7
1111111110000000000
0 0.00000 0 0.00000 0 0.00000 8
43 9 20 10 1 11 36 12 20 13 8 14 7 0 0 6
1 0.00000 0.00000 43 2 0.00000 0.00000 0.00000
2 3.00000 0.0 19 1 0.0 0.0 0.0
3 6.0000 0.0 16 17 18 0 1 20 0.0 0.0 0.0
4 9.0000 0.0 1 0 1 0.0 0.0 0.0
5 12.0000 0.0 0 1 0.0 0.0 0.0
6 15.0000 0.0 0 1 0.0 0.0 0.0
7 18.0000 0.0 0 1 0.0 0.0 0.0
8 21.5 0.0 0 1 0.0 0.0 0.0
9 25.0 0.0 0 0 2 0.0 0.0
10 25.0 0.0 9 2 0.0 0.00 0.0
11 25.0 1.5 0 1 0.0 0.00 0.0
12 25.0 3.0 0 0 1 0.0 0.00 0.0
13 24.4142 4.4142 0 0 -1 0.0 0.00 0.0
14 23.0 5.0 0 1 0.0 0.00 0.0
15 21.0 5.0 0 0 1 0.0 0.00 0.0
16 19.0 5.0 0 1 0.0 0.00 0.0
17 16.5 5.0 0 1 0.0 0.00 0.0
18 14.0 5.0 0 1 0.0 0.00 0.0
19 11.0 5.0 0 1 0.0 0.00 0.0
20 8.5 5.0 0 1 0.0 0.00 0.0
21 7.1606 5.2664 0 0 -1 0.0 0.00 0.0
22 6.0251 6.0251 0 1 0.0 0.00 0.0
23 5.2664 7.1606 0 0 -1 0.0 0.0 0.0
24 5.0 8.5 0 1 0.0 0.0 0.0
25 5.0 11.0 0 1 0.0 0.0 0.0
26 5.0 14.0 0 1 0.0 0.0 0.0
27 5.0 16.5 0 1 0.0 0.00 0.0
28 5.0 19.0 0 1 0.0 0.0 0.0
29 5.0 21.0 0 1 0.0 0.0 0.0
30 5.0 23.0 0 1 0.0 0.0 0.0
31 4.4142 24.4142 0 0 -1 0.0 0.0 0.0
32 3.0 25.0 0 1 0.0 0.0 0.0
33 1.5 25.0 0 1 0.0 0.0 0.0
34 0.0 25.0 0 0 2 0.0 0.0 0.0
35 0.0 25.0 34 2 0.0 0.0 0.0
36 0.0 21.5 0 1 0.0 0.0 0.0
37 0.0 18.0 0 1 0.0 0.0 0.0
38 0.0 15.0 0 1 0.0 0.0 0.0
39 0.0 12.0 0 1 0.0 0.0 0.0
40 0.0 9.0 0 1 0.0 0.0 0.0
41 0.0 6.0 0 1 0.0 0.0 0.0
42 0.0 3.0 0 1 0.0 0.0 0.0
43 0.0 0.0 0 0 2 0.0 0.0 0.0
0 12 1 2 3 0 0
0 12 21 3 4 5 0 0 22
0 12 5 6 7 0 0
0 12 7 8 9 0 0
0 12 10 11 12 0 0
0 22 12 13 14 0 0
0 12 14 15 16 0 0
0 12 16 17 18 0 0
0 12 18 19 20 0 0
0 22 20 21 22 0 0
0 22 22 23 24 0 0
0 12 24 25 26 0 0
0 12 26 27 28 0 0
0 12 28 29 30 0 0
0 22 30 31 32 0 0
0 12 32 33 34 0 0
0 12 35 36 37 0 0
0 12 37 38 39 0 0
0 12 39 40 41 0 0
0 12 41 42 43 0 0
1 1.00000 23 36 24 20 25 1 26 27
2 3 4 5 6 7 8 9 11 12 14 15 16 17 18
19 20 22 24 25 26 27 28 29 30 32 33 34 36 37
38 39 40 41 42 43
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15
16 17 18 19 20
0000.0000 0000.0000 0000.0000 -00.2500 0000.0000 -00.2500 28

```

Σχήμα 5: Δομή .txt για BEM σε γωνιά 25x25x5



Περιγραφή .txt (Σχήμα 5):

1. Τίτλος
2. 2D → 5
AX → 6
3D → 7
3. 1 = αντιγραφή ECHO σε αρχεία
0 =μη αντιγραφή ECHO σε αρχεία
4. Αριθμός γραμμών ανά σελίδα στην έξοδο και το πρωτόκολλο (Προεπιλογή 60). Η τιμή ισχύει για BETTIAH καθώς και για BETTIGE
5. GEOM ορίζει το σημείο στο πρόγραμμα όπου λαμβάνει χώρα η δράση από τον πλησιέστερο Κωδικό (MODE) που περιγράφεται
0 = στο τέλος του προγράμματος
1 = μετά την ρουτίνα VORBER (μέρος γεωμετρία)
2 = πριν ρουτίνα EPAUSW (αξιολόγηση ενός σημείου)
6. ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ
Λειτουργία επανεκκίνησης
0 = Ολοκλήρωση του προγράμματος (Ακύρωση)
1 = Σταματήστε το πρόγραμμα με την προηγούμενη έκδοση όλων των σχετικών δεδομένων στο αρχείο
2 = Επανεκκίνηση του προγράμματος χρησιμοποιώντας τα σχετικά δεδομένα ανάγνωσης από το αρχείο
7. ΑΡΧΕΙΟ
Το όνομά της επανεκκίνησης-αρχείου (μέγιστο 7 γράμματα)
8. Συμμετρίες
9. Σύνολο κόμβων με διπλούς
10. Σύνολο στοιχείων
11. Σύνολο ορίων (π.χ. 2 εάν έχω κ μια οπή)
12. Μέγιστος Αριθμός πηγών
13. Μέγιστος αριθμός στοιχείων
14. Μέγιστος αριθμός κόμβων ανά στοιχείο
15. Α/Α όλων των κόμβων
16. Χ συντεταγμένη σημείου
17. Υ συντεταγμένη σημείου
18. Ζ συντεταγμένη σημείου
19. Όταν έχουμε διπλό κόμβο βάζουμε τον Α/Α του πρώτου Δ.κόμβου στον δεύτερο
20. -1 -> ενδιάμεσος κόμβος στοιχείου 22
0 -> ?
1 -> μονοί κόμβοι
2 -> διπλοί κόμβοι

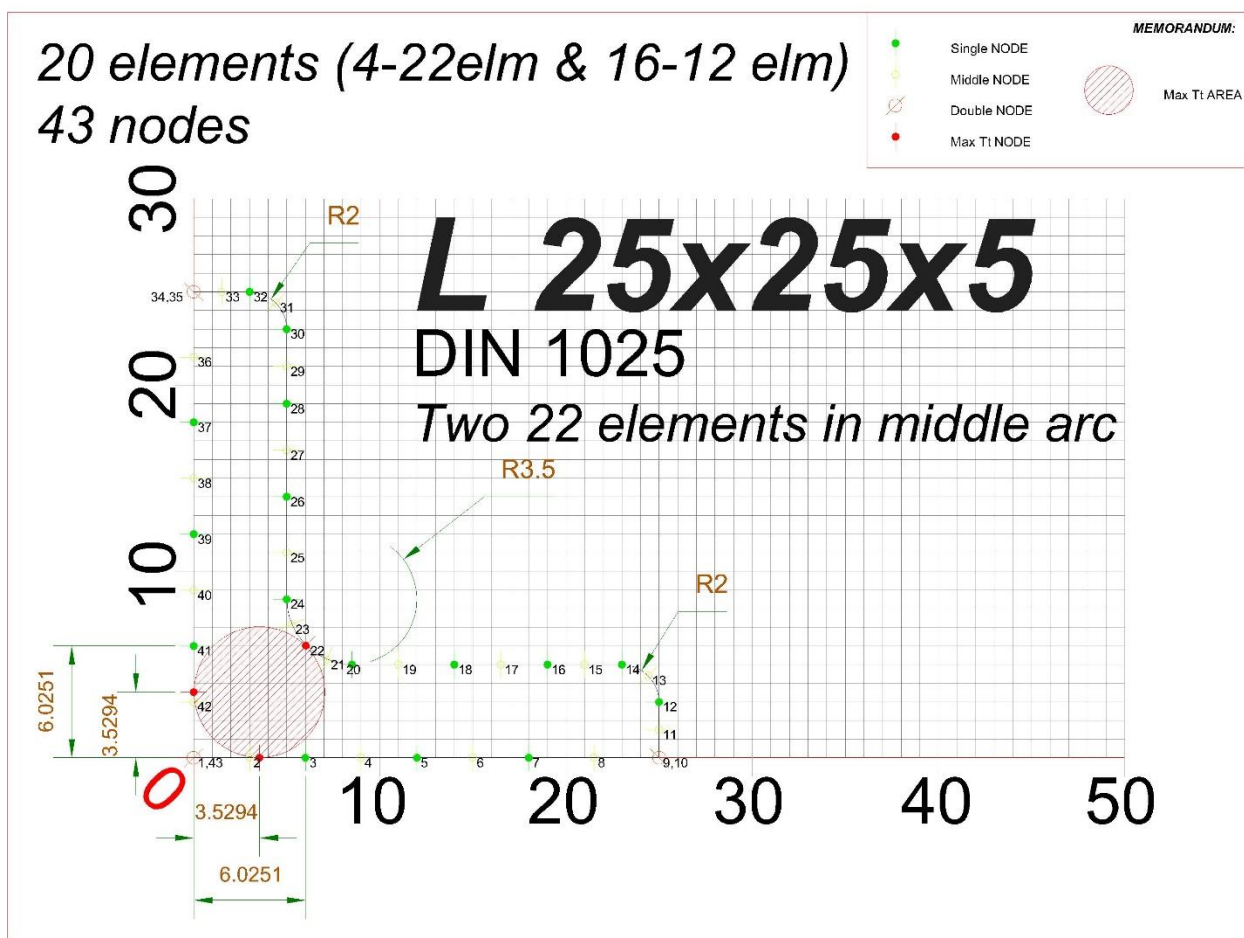


3 -> ?

4 -> ?

21. Τύπος κάθε στοιχείου
22. Κόμβοι που αποτελούν το κάθε στοιχείο
23. Συντελεστής μετάδοσης θερμότητας υλικού
24. Αριθμός πηγών
25. Αριθμός Στοιχείων
26. 0 -> 1ου βαθμού
1 -> 2ου βαθμού
2 -> 3ου βαθμού
27. Όλες οι πηγές
28. Όλα τα στοιχεία

Παράλληλα, αναγκαία για την καλύτερη κατανόηση του προβλήματος αποτέλεσε η χαρτογράφηση της προς εξέταση διατομής για την ακριβή απόδοση των συντεταγμένων όπως φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 6: Οπτικοποίηση σε CAD του .txt



ΑΝΩΤΑΤΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟΥ ΤΟΜΕΑ

Αφότου ολοκληρωθεί το στήσιμο του .txt εκτελείται μια εφαρμογή (.exe) η οποία αντλεί δεδομένα από το αρχείο κειμένου και κάνει υπολογισμούς για την θερμική αγωγιμότητα δημιουργώντας δυο νέα .txt εντός των οποίων υπάρχουν στοιχεία όπως η Θερμική ροή / Επιφάνεια που οδηγούν στην εύρεση της στρεπτικής τάσης κάθε κόμβου και κατ' επέκταση της μέγιστης που είναι και το ζητούμενο της όλης ανάλυσης.

Έπειτα γνωρίζοντας την Θερμική ροή / Επιφάνεια ($Fluss_{(i)}$) και έχοντας υπολογίσει την στρεπτική σταθερά It υπολογίζεται η στρεπτική τάση ανά κόμβο.

Για γωνιές ανισοσκελείς:

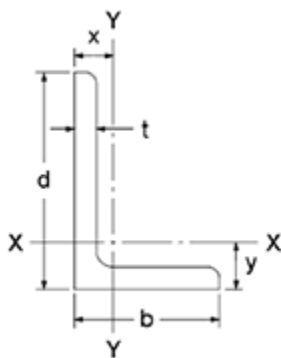
$$It = \frac{(b'+d') \cdot t^3}{3}$$

Σχήμα 7: Στρεπτική Σταθερά για γωνιές ανισοσκελείς

Για γωνιές ισοσκελείς:

$$It = \frac{2b \cdot t^3}{3}$$

Σχήμα 8: Στρεπτική Σταθερά για γωνιές ισοσκελείς



Σχήμα 9: Γεωμετρικά στοιχεία διατομής L

$$\tau t_{(i)} = \frac{2 \cdot Mt}{It} \cdot Fluss_{(i)}$$

Σχήμα 10: Τύπος τάσης στρέψης

Τέλος συγκεντρώνονται τα στοιχεία σε έναν πίνακα και έτσι καθιστάτε πλέον απλός ο εντοπισμός των επίμαχων τάσεων.



L 25x25x5						
Nodes	X	Y	Fluss	Mt	It	Tt
1	0	0	0	50000	2083.333333	0
2	3	0	2.993	50000	2083.333333	143.664
3	6	0	2.853	50000	2083.333333	136.944
4	9	0	2.655	50000	2083.333333	127.44
5	12	0	2.458	50000	2083.333333	117.984
6	15	0	2.493	50000	2083.333333	119.664
7	18	0	2.364	50000	2083.333333	113.472
8	21.5	0	2.393	50000	2083.333333	114.864
9	25	0	0	50000	2083.333333	0
10	25	0	0	50000	2083.333333	0
11	25	1.5	2.063	50000	2083.333333	99.024
12	25	3	2.527	50000	2083.333333	121.296
13	24.4142	4.4142	0	50000	2083.333333	0
14	23	5	2.855	50000	2083.333333	137.04
15	21	5	2.367	50000	2083.333333	113.616
16	19	5	2.551	50000	2083.333333	122.448
17	16.5	5	2.528	50000	2083.333333	121.344
18	14	5	2.79	50000	2083.333333	133.92
19	11	5	2.462	50000	2083.333333	118.176
20	8.5	5	5.424	50000	2083.333333	260.352
21	7.1606	5.2664	0	50000	2083.333333	0
22	6.0251	6.0251	9.008	50000	2083.333333	432.384
23	5.2664	7.1606	0	50000	2083.333333	0
24	5	8.5	5.417	50000	2083.333333	260.016
25	5	11	2.462	50000	2083.333333	118.176
26	5	14	2.789	50000	2083.333333	133.872
27	5	16.5	2.528	50000	2083.333333	121.344
28	5	19	2.551	50000	2083.333333	122.448
29	5	21	2.367	50000	2083.333333	113.616
30	5	23	2.855	50000	2083.333333	137.04
31	4.4142	24.4142	0	50000	2083.333333	0
32	3	25	2.526	50000	2083.333333	121.248
33	1.5	25	2.061	50000	2083.333333	98.928
34	0	25	0	50000	2083.333333	0
35	0	25	0	50000	2083.333333	0
36	0	21.5	2.392	50000	2083.333333	114.816
37	0	18	2.363	50000	2083.333333	113.424
38	0	15	2.491	50000	2083.333333	119.568
39	0	12	2.458	50000	2083.333333	117.984
40	0	9	2.646	50000	2083.333333	127.008
41	0	6	2.882	50000	2083.333333	138.336
42	0	3	2.759	50000	2083.333333	132.432
43	0	0	0	50000	2083.333333	0

Πίνακας 1: Υπολογισμός Tt max από Fluss



2.2.2 Εφαρμογή σε Inventor και API

Αντιλαμβανόμενοι πλέον της λειτουργίας της μεθόδου προχωράμε στην κυρία διαδικασία μέσω της οποίας θα λάβουν χώρα οι ουσιαστικές δοκιμές. Όντας πρακτικά πιο αυτοματοποιημένη, συγκρινόμενη με την αυτήν στην προηγούμενη ενότητα, ο σχεδιασμός του μελετούμενου αντικείμενου γίνεται σε σύγχρονο σύστημα CAD. Οι υπολογισμοί γίνονται μέσω κώδικα στο API του CAD και τα αποτελέσματα της μελέτης αποτυπώνονται αυτόματα σε excel.

Αξίζει να σημειωθεί ότι για την διαδικασία χρησιμοποιήθηκαν τα εξής λογισμικά:

- Autodesk Inventor 2013 x32bit
- Microsoft Excel 2013 x32bit

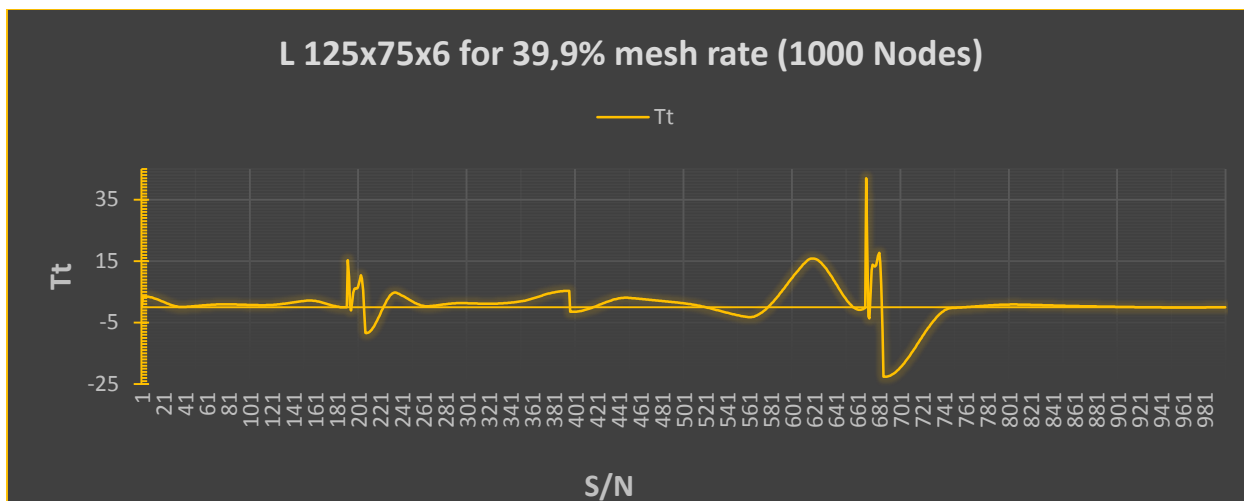
Ενώ ο κώδικας γράφτηκε με τη χρήση Visual Basic στο API του Inventor και ένα μικρό μέρος του στο API του Excel.

Αρχικά γίνεται η σχεδίαση των διατομών προς εξέταση, έπειτα ανοίγουμε την διεπαφή προγραμματιστικού περιβάλλοντος του Inventor και φορτώνουμε τον κώδικα για την ανάλυση με μέθοδο συντομικών στοιχείων. Σε ότι αφορά την σχεδίαση είναι σημαντικό να έχει σχεδιαστεί το προφίλ της διατομής σε sketch και σε αυτό να γίνει extrude. Στην συνέχεια επιλέγεται το extrude feature και εκτελείτε το πρόγραμμα στο API. Ακολουθεί ο ορισμός κάποιων βασικών παραμέτρων όπως:

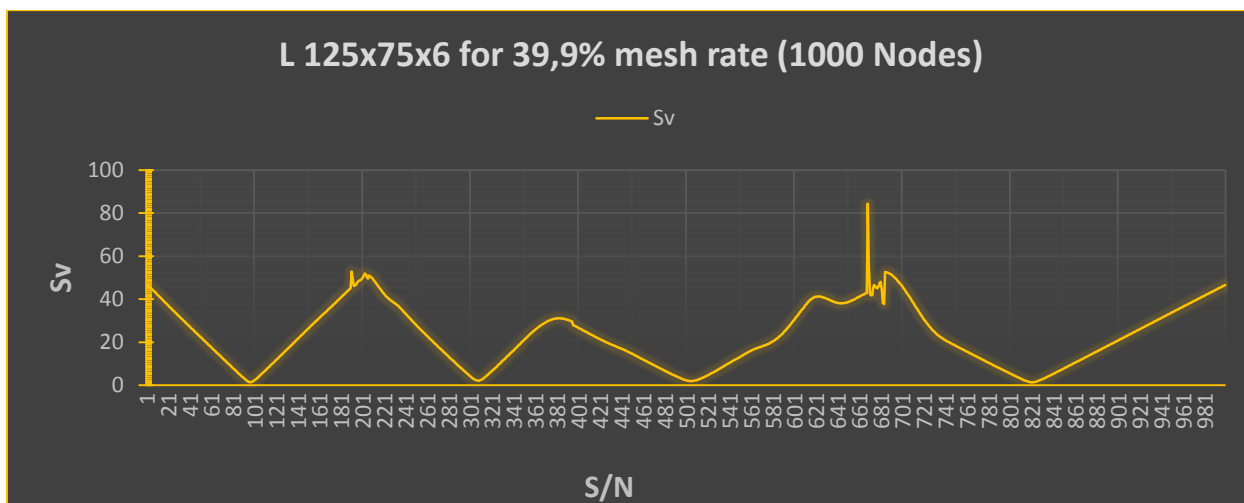
- Το ποσοστό πλεγματοποίησης, μια τιμή μεταξύ 5% -50%. Αυτή η τιμή καθορίζει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων (συγκεκριμένα το μήκος που θα χωριστούν όλα τα αντικείμενα του sketch).
- Την τιμή της ροπής στρέψης Mt (50000 N·mm) (οι φορτίσεις είναι ίδιες για όλα τα περάματα που εκτελέστηκαν)
- Την τιμή της ροπής κάμψης X Mx (-560000 N·mm)
- Την τιμή της ροπής κάμψης Y My Y (280000 N·mm)
- Το όνομα της μελέτης

Μόλις τελειώσει το πρόγραμμα έχει δημιουργηθεί ένα .xls με τα αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα στο νέο αρχείο Excel θα περιλαμβάνουν:

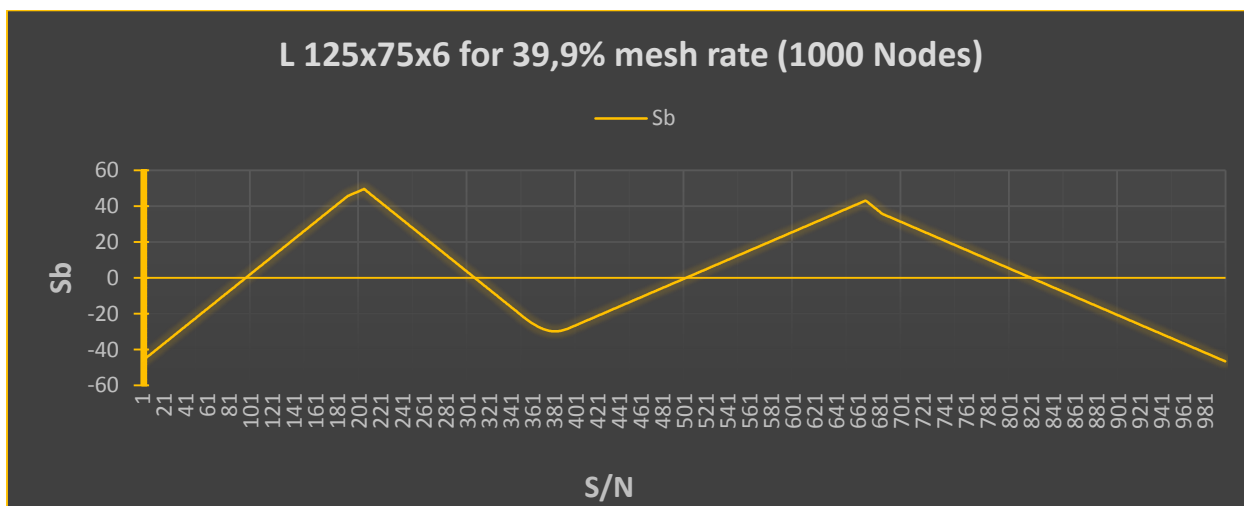
- τον αύξοντα αριθμό του κάθε σημείου (1000 σημεία),
- τις συντεταγμένες x,y
- την απόσταση από το σημείο αναφοράς του κάθε σημείου (U σε mm)
- τα αποτελέσματα της τάσης κάμψης (Sb), στρεπτική τάσης (Tt) και της ισοδύναμη τάσης (Sv) του κάθε σημείου (όπου βρίσκεται και το σημείο με τις μέγιστες Sb, Tt και Sv).



Διάγραμμα 1: $Tt=f(u)$



Διάγραμμα 2: $Sv=f(u)$

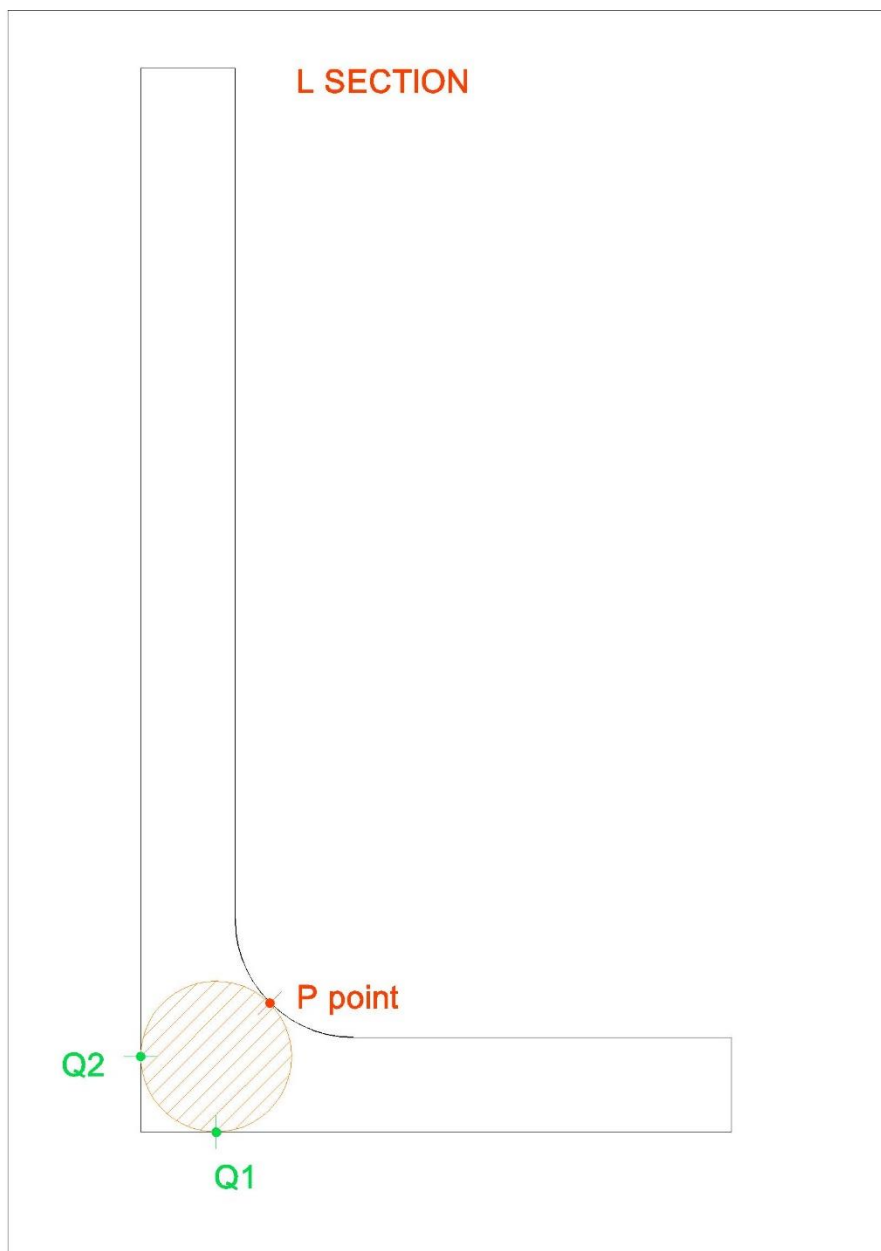


Διάγραμμα 3: $Sb=f(u)$

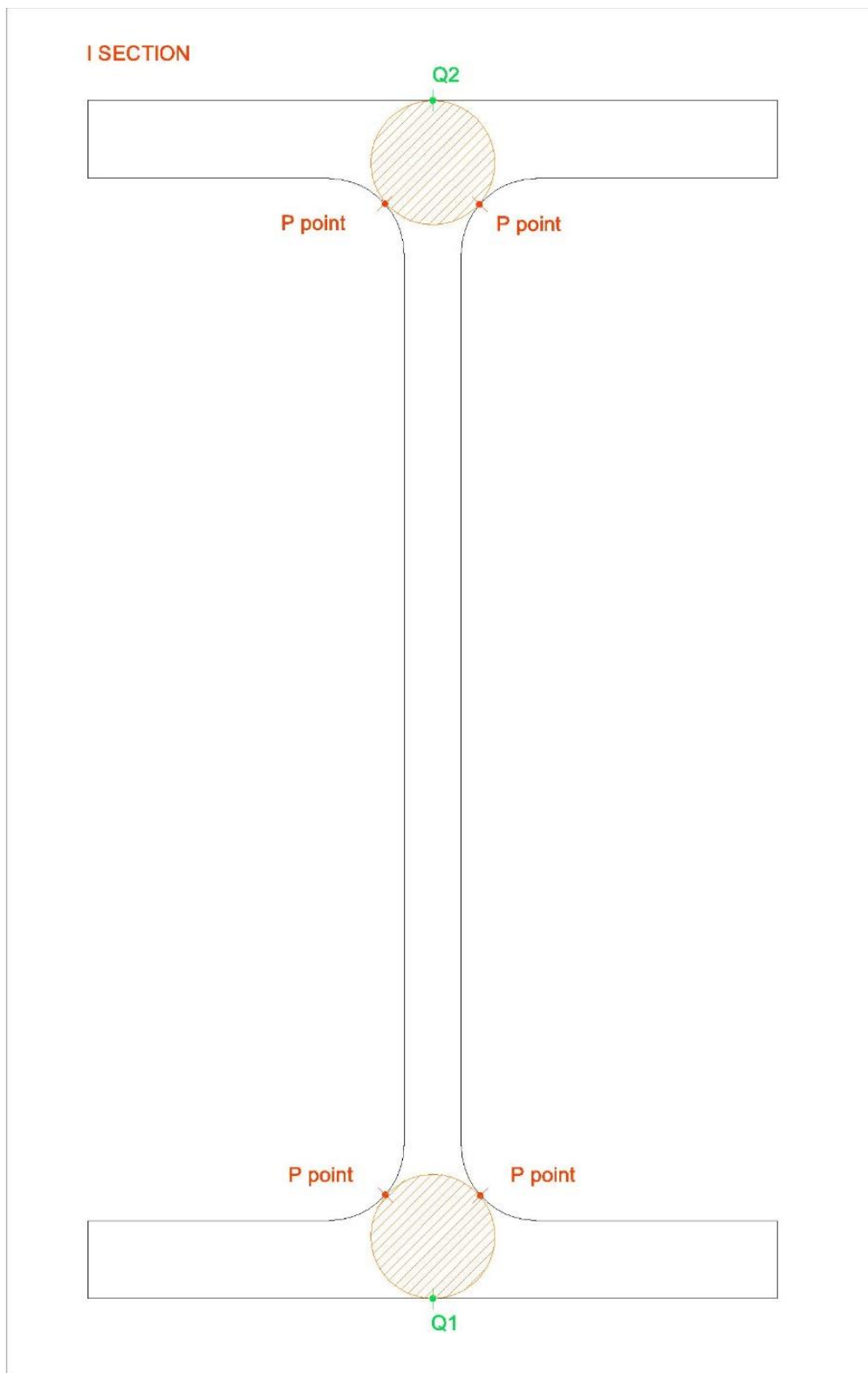


ΑΝΩΤΑΤΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟΥ ΤΟΜΕΑ

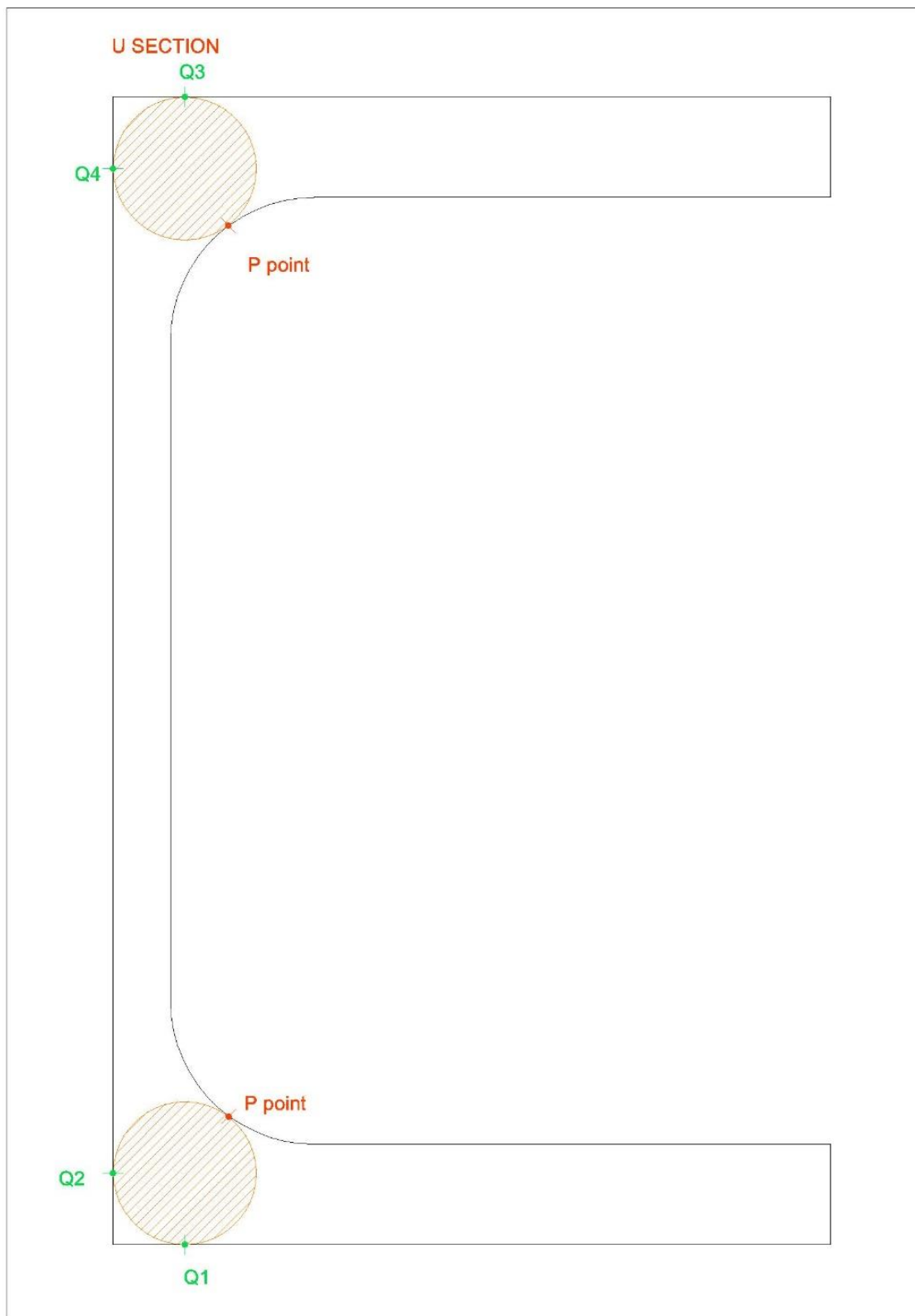
Το πρόγραμμα στο API δίνει τιμές για T_t υπολογίζοντας αυτόματα την I_t . Την διαδικασία την επαναλαμβάνουμε για τις ίδιες διατομές και ποσοστά πλέγματος τροποποιώντας αυτήν την φορά τον υπολογισμό της I_t . Αυτό επιτυγχάνεται με την εκχώρηση της πραγματικής τιμής I_t ανά διατομή μια σειρά κάτω από τον αυτόματο υπολογισμό στον κώδικα ($I_t = 5000$ π.χ.). Τις πραγματικές τιμές των I_t , T_t , Q και T_t , P τις λαμβάνουμε εύκολα διότι υπάρχουν αναφορές και εφαρμογές που τις υπολογίζουν βάσει διαστασιολόγησης καθώς έχουμε να κάνουμε με τυποποιημένες διατομές.



Σχήμα 11: Σημεία εμφάνισης T_t , P και T_t , Q για διατομή L



Σχήμα 12: Σημεία εμφάνισης $Tt P$ και $Tt Q$ για διατομή I



Σχήμα 13: Σημεία εμφάνισης $Tt P$ και $Tt Q$ για διατομή U



2.2.3 Συλλογή αποτελεσμάτων

Έχοντας για κάθε διατομή .xls με τα αποτελέσματα ανά ποσοστό πλεγματοποίησης δημιουργούμε συγκεντρωτικούς πίνακες. Από τους πίνακες προκύπτουν γραφήματα με τις σημαντικότερες καμπύλες:

- της πραγματικής τιμής Tt_{max} (σημείου P)
- της τιμής Tt_{max} (σημείου P) ανά ποσοστό πλεγματοποίησης (%)
- της πραγματικής τιμής Tt_Q
- των τιμών Tt_Q ανά ποσοστό πλεγματοποίησης (%)

Οι συντεταγμένες των Tt_Q προσδιορίζονται σχεδιαστικά γνωρίζοντας ότι τα σημεία εμφάνισης μέγιστων τάσεων βρίσκονται στα τρία σημεία επαφής των κυκλικών περιοχών στις διατομές των Εικόνων . Επομένως με μία μέτρηση ως προς X και Y από το σημείο αναφοράς (νοτιοδυτικότερο σημείο) της διατομής έχουμε τις συντεταγμένες για τα Tt_Q και βάσει αυτών μπορούμε να εντοπίσουμε τις τιμές τους από το excel.



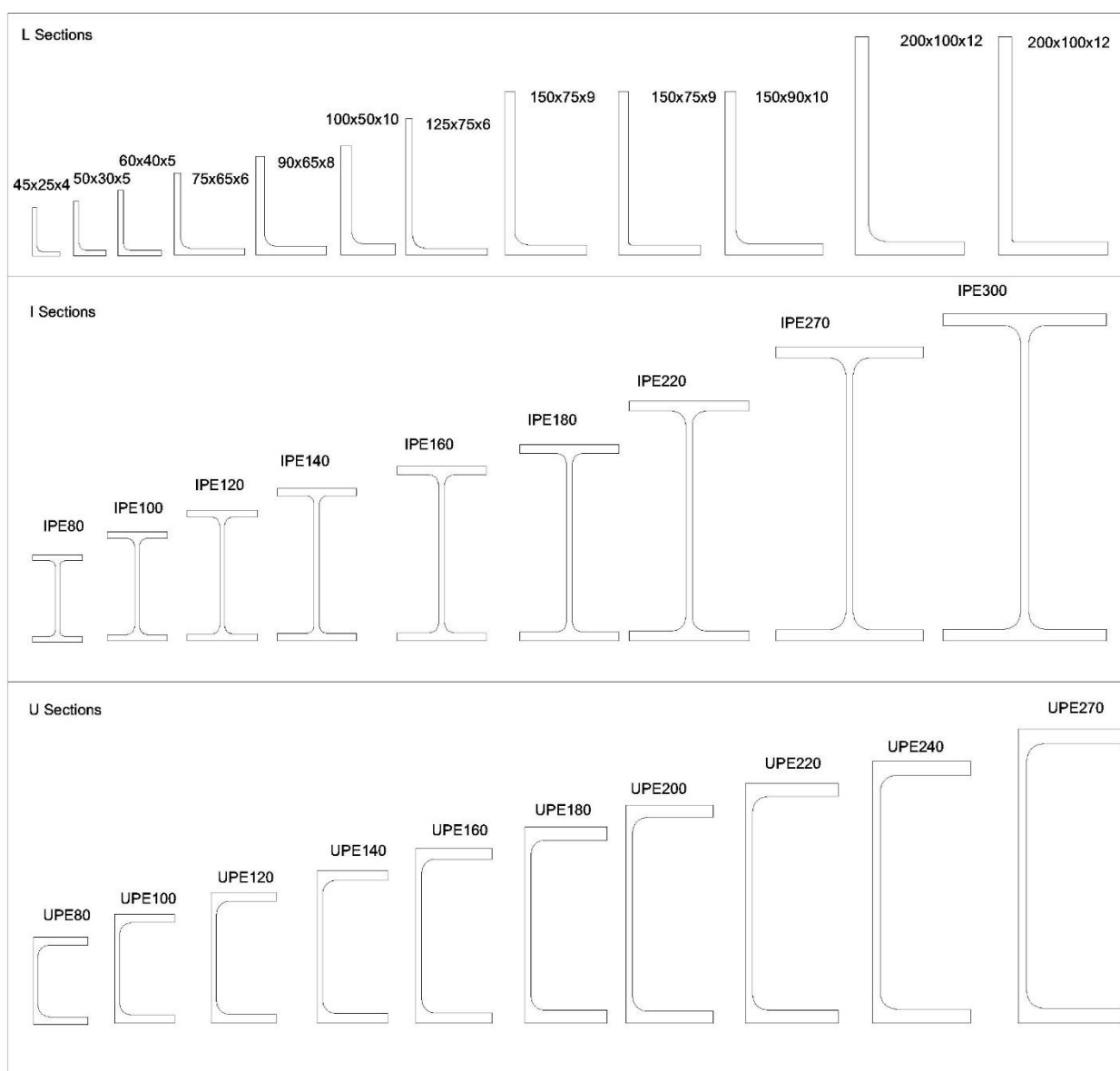
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: Δοκιμές

3.1 Εισαγωγή

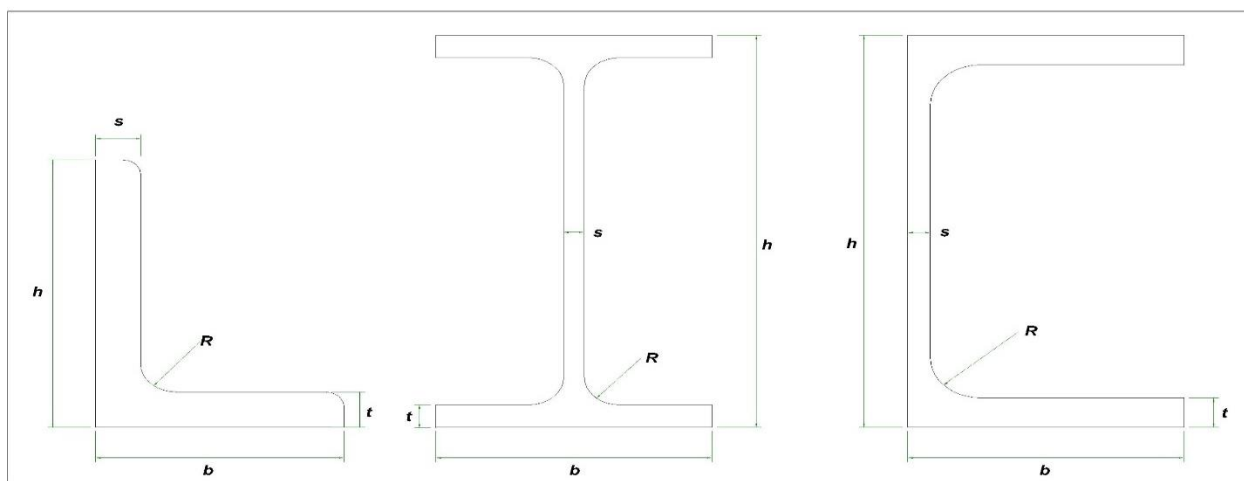
Είναι γνωστό ότι σε μια πειραματική διεξαγωγή ο αριθμός του δείγματος που θα εξεταστεί πρέπει να είναι μεγάλος για να μπορέσει να θεωρηθεί αξιόπιστο το ληφθέν πόρισμα. Στην εργασία αυτή εκτελέστηκαν πάνω από 750 δοκιμές εξαιρώντας εκείνες που δεν ολοκληρώθηκαν λόγω υπολογιστικών πόρων.

3.2 Διατομές

Στα πειράματα ελέγχθηκαν 31 τυποποιημένες διατομές εκ των οποίων 9 ήταν δοκοί IPE, 12 γωνιές ανισοσκελείς και 10 ήταν δοκοί UPE. Παρακάτω παρατίθεται πίνακας με τις διατάξεις και τις πραγματικές τιμές των I_t , T_t Q και T_t P των διατομών.



Σχήμα 14: Όλες οι εξεταζόμενες διατομές



Σχήμα 15: Σύμβολα διαστάσεων διατομών L,I,U

SECTIONS	Dimensions (mm)					$I_t \text{ (mm}^4\text{)}$	$t_{max} \text{ (n/mm}^2\text{)}$ P point	$t_{max} \text{ (n/mm}^2\text{)}$ Q point	
	h	b	s	t	R				
I	IPE80	80	46	3.8	5.2	5	7011.98	71.261	59.159
	IPE100	100	55	4.1	5.7	7	12088.14	47.670	40.585
	IPE120	120	64	4.4	6.3	7	17438.56	35.443	29.910
	IPE140	140	73	4.7	6.9	7	24571.14	26.878	22.487
	IPE160	160	82	5	7.4	9	36214.05	20.367	17.349
	IPE180	180	91	5.3	8	9	48103.52	16.197	13.703
	IPE220	220	110	5.9	9.2	12	91070.77	10.163	8.721
	IPE270	270	135	6.6	10.2	15	160210.95	6.658	5.766
IPE300	300	150	7.1	10.7	15	202078.21	5.482	4.728	
L	45x25x4	45	25	4	4	5	1604.54	228.259	197.110
	50x30x5	50	30	5	5	6	3561.35	127.393	109.611
	60x40x5	60	40	5	5	6	4394.67	103.864	89.284
	75x65x6	75	65	6	6	9	11167.97	51.238	44.933
	90x65x8	90	65	8	8	10	28232.56	26.015	22.456
	100x50x10	100	50	10	10	10	51202.60	17.294	14.593
	125x75x6	125	75	6	6	11	14323.00	42.082	37.454
	150x75x9	150	75	9	9	12	58339.00	14.391	12.489
	150x75x9	150	75	9	9	2	51803.45	17.612	10.816
	150x90x10	150	90	10	10	12	83648.11	10.949	9.407
200x100x12	200	100	12	12	15	181807.31	6.088	5.252	
200x100x12	200	100	12	12	2	163264.01	8.140	4.506	
U	UPE80	80	50	4	7	10	7614.00	73.565	65.331
	UPE100	100	55	4.5	7.5	10	10898.47	54.794	48.351
	UPE120	120	60	5	8	12	15905.54	41.667	37.051
	UPE140	140	65	5	9	12	21759.86	32.377	28.618
	UPE160	160	70	5.5	9.5	12	28835.31	25.718	22.614
	UPE180	180	75	5.5	10.5	12	38061.36	20.630	18.031
	UPE200	200	80	6	11	13	49142.56	17.002	14.889
	UPE220	220	85	6.5	12	13	67249.40	13.309	11.569
	UPE240	240	90	7	12.5	15	85055.23	11.265	9.871
UPE270	270	95	7.5	13.5	15	113319.48	8.979	7.817	

Πίνακας 2: Διαστάσεις L,I,U



Στις διατομές L 150x75x9 και 200x100x12 έγινε έλεγχος και με μη τυποποιημένο ράδιο για να μελετηθούν οι διαφορές στις τάσεις. Ενώ για την 125x75x6 έγινε και μια πιο εξονυχιστική ανάλυση όσον αφορά την δειγματοληψία σε ποσοστά πλεγματοποίησης.

3.3 Ποσοστά Πλεγματοποίησης

Κατά την πρώτη σειρά περαμάτων κάθε διατομή υποβλήθηκε σε 9 δοκιμές με αυτόματο υπολογισμό στρεπτικής σταθεράς για ποσοστά πλέγματος 5%,10%,15%,21%,25%,28%,35%,39% και 50% για τις γωνιές και τις UPE ενώ 8,5%,10%,15%,21%,25%,28%,35%,39% και 50% για τις IPE. Η δεύτερη σειρά ήταν ίδια με την μόνη διαφορά στον υπολογισμό της στρεπτικής σταθεράς την οποία την ορίζαμε εμείς.

Εν συνεχεία λαμβάνοντας υπόψη τα διαγράμματα των καμπυλών της τιμής $T_t \max$ (σημείου P) ανά ποσοστό πλεγματοποίησης (%), αναζητείται το ιδανικότερο ποσοστό (όσο το δυνατόν μεγαλύτερο) κατά το οποίο η τιμή $T_t \max$ είναι η πραγματική.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο: Αποτελέσματα – Σχόλια - Συμπεράσματα

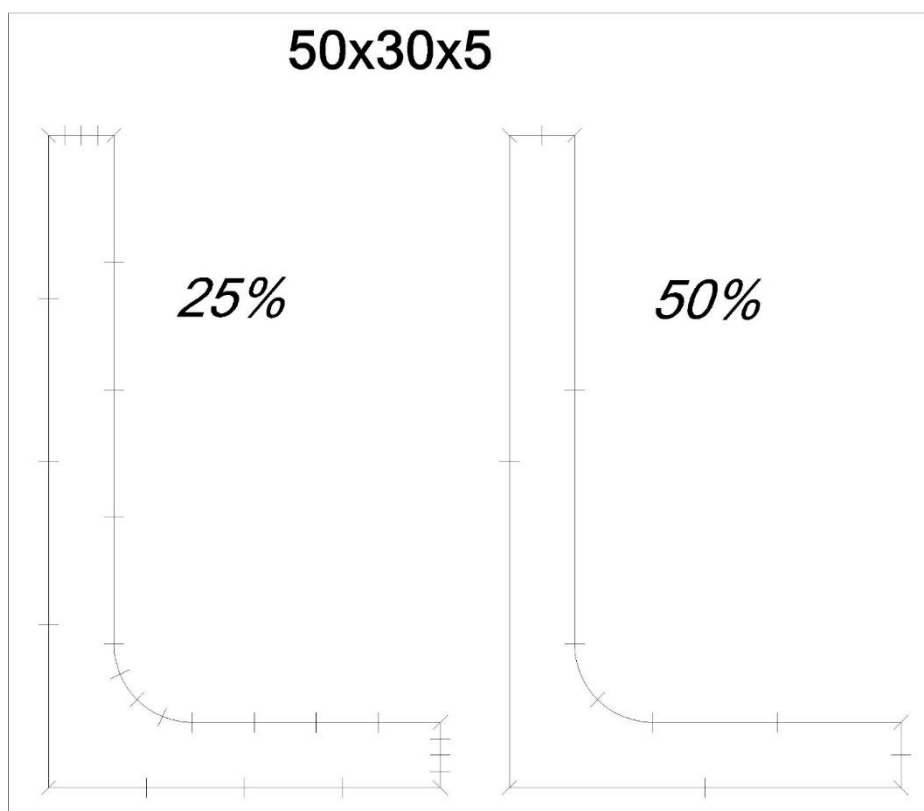
4.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα εξεταστούν τα αποτελέσματα των δοκιμών που υλοποιήθηκαν ως προς το επίπεδο απόδοσης. Θα μελετηθεί λοιπόν η αποτελεσματικότητα και η ακρίβεια της μεθόδου που ακολουθήθηκε. Επιθυμητή κατάσταση θα είναι οι λύσεις, στο εκάστοτε στατικό πρόβλημα που αντιμετωπίζουμε, να αποδίδουν ρεαλιστικές τιμές τάσεων και συγκεκριμένα στρεπτικών.

Παρακάτω θα παρουσιαστεί μια συνολική εικόνα των λύσεων που αποκομήθηκαν και επιπλέον θα εξεταστεί αναλυτικά μια διατομή με καλή απόδοση ενός συγκεκριμένου πλέγματος.

4.2 Γενικά Συμπεράσματα

Πριν ξεκινήσει η ανάλυση πρέπει να γίνει αντιληπτό ότι μας ενδιαφέρει σε πρώτη φάση η ακρίβεια (το ποσοστό απόκλισης από την αναλυτική λύση) των προβλημάτων. Έπειτα μας ενδιαφέρουν οι υπολογιστικοί πόροι που χρειαστήκαν για την λύση. Δηλαδή όσο μεγαλύτερο οριστεί το ποσοστό πλέγματος τόσο το μήκος των στοιχείων Lagrange μεγαλώνει και το πλήθος των κόμβων μικραίνει με αποτέλεσμα την μικρότερη υπολογιστική ισχύ. Για παράδειγμα σε μια τυχαία διατομή, όπου η μια της πλευρά έχει μήκος 50mm και πλεγματοποιείται με το μεγαλύτερο δυνατό πλέγμα της τάξης του 50%, αυτή η πλευρά θα χωριστεί σε 2 στοιχεία Lagrange των 25mm. Έτσι λοιπόν θα εφαρμοστούν οι εξισώσεις υπολογισμού μόνο για δυο στοιχεία ανά πλευρά.



Σχήμα 16: Παράδειγμα διαχωρισμού σε στοιχεία Lagrange για πλέγμα 25% και 50%



ΑΝΩΤΑΤΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟΥ ΤΟΜΕΑ

Παρατηρώντας τα διαγράμματα (Παράρτημα, σελ.53) μπορεί εύκολα να διαπιστώσει κανείς από την διακύμανση των καμπυλών, ότι η ΒΕΜ δεν δίνει σταθερές τιμές ανά ποσοστό πλέγματος. Ωστόσο παρά την διασπορά των τιμών υπάρχουν ποσοστά που ελαχιστοποιούν την απόκλιση των T_p και T_Q από τις αναλυτικές λύσεις. Παρόλα αυτά τα ποσοστά που επιλέχθηκαν (5%,10%,15%,21%,25%,28%,35%,39,50% για L και U και 8,5%,10%,15%,21%,25%,28%,35%,39%,50% για I), για την πρώτη και δεύτερη σειρά πειραμάτων, δεν απέδωσαν καλές τιμές στρεπτικών τάσεων αλλά οι καμπύλες τους τέμνουν την ευθεία της πραγματικής T_p .

Σε ότι αφορά τις δοκιμές με την πραγματική στρεπτική σταθερά, η απόκλιση της μέγιστης στρεπτικής τάσης T_p από την αναλυτική λύση είναι πολύ μεγάλη ενώ οι στρεπτικές τάσεις στα σημεία Q T_Q ήταν κακές στο σύνολο των πειραμάτων για όλες τις διατομές.

Στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται τα ιδανικά ποσοστά πλεγματοποίησης ανά διατομή. Μετά από το τελευταίο στάδιο των δοκιμών κατά το οποίο για κάθε διατομή σύμφωνα με τις καμπύλες των στρεπτικών τάσεων T_p εκτελέστηκαν πειράματα για τις περιοχές ποσοστών 25% έως 26% και 39% έως 39,95% όπου η καμπύλη T_p τέμνει την ευθεία της πραγματικής T_p . Επίσης πέραν των ποσοστών ο πίνακας περιλαμβάνει τιμές και αποκλίσεις των T_p και T_Q .

SECTIONS	Ideal Mesh		Tt Max	Difference		Q1	Q2	Q3	Q4	Tt Q	Difference								
	Mesh Rate	Tt P		Difference	%						Q1	Q1 %	Q2	Q2 %	Q3	Q3 %	Q4	Q4 %	
I	IPE80	25.55%	72.044	71.261	0.783	1.10%	28.062	27.491			59.159	31.096	-52.56%	31.668	-53.53%				
	IPE100	25.35%	47.464	47.670	0.205	-0.43%	19.638	19.470			40.585	20.947	-51.61%	21.115	-52.03%				
	IPE120	39.80%	34.749	35.443	0.693	-1.98%	4.926	4.194			29.910	24.984	-63.53%	25.716	-65.98%				
	IPE140	39.95%	26.211	26.878	0.667	-2.48%	3.302	2.685			22.487	19.185	-65.32%	19.802	-68.06%				
	IPE160	25.20%	19.726	20.367	0.641	-3.19%	8.403	8.360			17.349	8.946	-51.56%	8.989	-51.61%				
	IPE180	25.20%	14.964	16.197	1.233	-7.61%	6.291	6.242			13.703	7.412	-54.09%	7.461	-54.45%				
	IPE220	25.15%	9.880	10.163	0.284	-2.79%	4.317	4.296			8.721	4.404	-50.50%	4.424	-50.73%				
	IPE270	25.10%	7.226	6.658	0.568	8.53%	3.255	3.242			5.766	2.512	-43.56%	2.524	-43.77%				
	IPE300	50.00%	5.516	5.482	0.033	0.61%	2.297	2.298			4.728	2.431	-51.42%	2.430	-51.40%				
L	45x25x4	25.35%	229.767	228.259	1.507	0.66%	97.535	67.594			197.110	99.575	-50.52%	129.515	-65.71%				
	50x30x5	25.55%	125.046	127.393	2.347	-1.84%	50.093	39.133			109.611	59.517	-54.30%	70.478	-64.30%				
	60x40x5	25.30%	105.111	103.864	1.247	1.20%	45.245	28.537			89.284	44.039	-49.32%	60.747	-68.04%				
	75x65x6	25.20%	52.395	51.238	1.157	2.26%	20.809	15.854			44.933	24.123	-63.69%	29.079	-64.72%				
	90x65x8	25.35%	26.477	26.015	0.462	1.78%	11.393	7.867			22.456	11.063	-49.26%	14.589	-64.97%				
	100x50x10	25.50%	17.635	17.294	0.342	1.98%	6.532	5.188			14.593	8.060	-55.23%	9.405	-64.45%				
	125x75x6	39.90%	41.957	42.082	0.125	-0.30%	2.585	-0.044			37.454	34.869	-93.10%	37.498	-100.12%				
	150x75x9	39.85%	16.912	17.612	0.700	-3.98%	0.925	0.162			10.816	9.891	-91.45%	10.654	-98.50%				
	150x90x10	25.20%	10.138	10.949	0.811	-7.40%	4.248	2.144			9.407	5.160	-54.85%	7.263	-77.21%				
200x100x12	25.15%	7.908	8.140	0.232	-2.83%	1.965	0.722			4.506	2.542	-56.40%	3.784	-83.68%					
U	URE80	39.35%	73.676	73.565	0.111	0.15%	8.498	1.299	10.737	-10.335	65.331	56.833	-68.99%	64.032	-98.01%	54.594	83.57%	75.666	113.82%
	URE100	39.85%	48.741	54.794	6.053	-11.05%	3.418	-0.040	6.293	-11.591	48.351	44.933	-92.93%	48.391	-100.08%	42.059	86.99%	59.942	123.97%
	URE120	25.00%	37.869	41.667	3.798	-9.11%	18.629	7.717	16.917	4.920	37.051	18.422	-49.72%	29.334	-79.17%	20.134	54.34%	32.132	-68.72%
	URE140	25.00%	32.807	32.377	0.430	1.33%	15.732	5.184	14.700	2.800	28.618	12.886	-45.03%	23.434	-81.89%	13.918	48.63%	25.818	-90.22%
	URE160	25.05%	24.210	25.718	1.508	-5.86%	10.254	2.714	9.239	1.490	22.614	12.361	-54.66%	19.900	-88.00%	13.375	59.15%	21.124	-93.41%
	URE180	25.05%	20.110	20.630	0.520	-2.52%	8.624	1.934	8.018	0.980	18.031	9.407	-52.17%	16.097	-89.27%	10.014	55.54%	17.052	-94.57%
	URE200	25.05%	16.432	17.002	0.571	-3.36%	6.787	1.438	6.002	0.556	14.889	8.102	-54.42%	13.451	-80.34%	8.887	59.69%	14.333	-96.27%
	URE220	25.05%	13.286	13.309	0.024	-0.18%	5.185	0.866	4.833	0.392	11.569	6.383	-55.18%	10.703	-92.52%	6.735	58.22%	11.177	-96.61%
	URE240	25.05%	10.554	11.265	0.711	-6.31%	4.223	0.694	3.923	0.316	9.871	5.648	-57.22%	9.177	-92.97%	5.948	60.26%	9.555	-96.80%
URE270	25.05%	8.419	8.979	0.560	-6.24%	3.333	0.435	3.024	0.182	7.817	4.484	-57.36%	7.383	-94.44%	4.794	61.32%	7.635	-97.67%	

Πίνακας 3: Ιδανικά ποσοστά πλεγματοποίησης ανά διατομή



Είναι θεμελιώδες να σημειωθεί ότι για την εύρεση του ιδανικού ποσοστού πλέγματος το βήμα ανά δοκιμή ήταν 0,05%. Αυτό σημαίνει πως στο εύρος των ενδιάμεσων ποσοστών πλέγματος που δεν εξετάστηκαν, πιθανόν να υπάρχουν καλύτερα αποτελέσματα.

Διαβάζοντας τα δεδομένα του πίνακα διαπιστώνουμε ότι τις βέλτιστες αποδόσεις (απόκλιση κάτω από 1%) έχουν οι διατομές:

- IPE 100 που έδωσε $T_{tp} = 47,464 \text{ N/mm}^2$ (πραγματικό $T_{tp} = 47,670 \text{ N/mm}^2$) στο πλέγμα 25,35% με απόκλιση $0,205 \text{ N/mm}^2 \rightarrow 0.43\%$
- IPE 300 που έδωσε $T_{tp} = 5,516 \text{ N/mm}^2$ (πραγματικό $T_{tp} = 5,482 \text{ N/mm}^2$) στο πλέγμα 50% με απόκλιση $0,033 \text{ N/mm}^2 \rightarrow 0.61\%$
- L 45x25x4 που έδωσε $T_{tp} = 229.767 \text{ N/mm}^2$ (πραγματικό $T_{tp} = 228.259 \text{ N/mm}^2$) στο πλέγμα 25,35% με απόκλιση $1.507 \text{ N/mm}^2 \rightarrow 0.66\%$
- L 125x75x6 που έδωσε $T_{tp} = 41.957 \text{ N/mm}^2$ (πραγματικό $T_{tp} = 42.082 \text{ N/mm}^2$) στο πλέγμα 39,90% με απόκλιση $0.125 \text{ N/mm}^2 \rightarrow 0.30\%$
- UPE 80 που έδωσε $T_{tp} = 73,676 \text{ N/mm}^2$ (πραγματικό $T_{tp} = 73,565 \text{ N/mm}^2$) στο πλέγμα 39,35% με απόκλιση $0.111 \text{ N/mm}^2 \rightarrow 0.15\%$
- UPE 220 που έδωσε $T_{tp} = 13,286 \text{ N/mm}^2$ (πραγματικό $T_{tp} = 13,309 \text{ N/mm}^2$) στο πλέγμα 25,05% με απόκλιση $0.024 \text{ N/mm}^2 \rightarrow 0.18\%$

Αντίστοιχα την χειρότερη απόδοση έχει η UPE 100 που έδωσε $T_{tp} = 48.741 \text{ N/mm}^2$ (πραγματικό $T_{tp} = 54.794 \text{ N/mm}^2$) στο πλέγμα 39.85% με απόκλιση $6.053 \text{ N/mm}^2 \rightarrow 11.05\%$.

Επίσης η μεγαλύτερη και η μικρότερη απόκλιση εμφανίζεται στις δοκούς UPE.

Η μεγάλη ποσοστιαία απόκλιση όμως δεν σημαίνει απαραίτητα και μεγάλη διαφορά στις τιμές των στρεπτικών τάσεων. Επομένως ο διαχωρισμός των αποδόσεων βάσει ποσοστιαίας απόκλισης είναι υποκειμενικός. Παραδείγματος χάρη οι διατομές UPE 80 και UPE 220 που αναφέρθηκαν παραπάνω έδωσαν απόκλιση $0.111 \text{ N/mm}^2 \rightarrow 0.15\%$ και $0.024 \text{ N/mm}^2 \rightarrow 0.18\%$ αντίστοιχα για πλέγμα 39,35% και 25,05% αντίστοιχα.

Η UPE 80 έχει την μικρότερη ποσοστιαία απόκλιση αλλά η UPE 220 αριθμητικά έχει μόλις $0,024 \text{ N/mm}^2$ έναντι των $0,111 \text{ N/mm}^2$ της UPE 80. Παράλληλα η UPE 80 έχει δώσει τα αποτελέσματα αυτά σε πλέγμα 39,35% (λιγότερα στοιχεία Lagrange), πολύ μεγαλύτερο από το 25,05% της UPE 220, άρα όπως έχουμε αναφέρει και παραπάνω η ανάλυση της UPE 80 θα χρειαστεί θεωρητικά λιγότερο χρόνο και μαθηματικούς υπολογισμούς για να εκτελεστεί.

Έτσι γεννάται το εύλογο ερώτημα για το ποια αποτελέσματα είναι πιο αξιόπιστα. Η απάντηση είναι σχετική. Στην ουσία επιθυμούμε μια αναλογία του υψηλότερου δυνατού ποσοστού πλέγματος και τις χαμηλότερης δυνατής ποσοστιαίας απόκλισης της μελετούμενης τιμής T_{tp} . Την μηχανική όμως στην πραγματικότητα την απασχολεί, για παράδειγμα, σε μια πρακτική εφαρμογή ενός στατικού προβλήματος, η ακριβής τιμή της T_{tp} . Διότι εκεί λοιπόν έχουμε να κάνουμε με διαρροή και θραύση υλικών, καταστάσεις δυσάρεστες για τον κάθε μηχανικό.



Στην παρούσα πτυχιακή εργασία η καλύτερη απόδοση βρίσκεται στην διατομή η οποία δεν έχει την μικρότερη απόκλιση σε N/mm^2 αλλά σε ποσοστό με ένα αρκετά αραιό πλέγμα τάξεως του 39,35%.

4.2.1 Διατομές L

(Πίνακες: 9,13,14 – Διαγράμματα: 7-28)

Βάσει διαγραμμάτων καταλήγουμε ότι για αυτόματη It οι καμπύλες T_{τ} και T_{α} έχουν παρόμοια μορφή σε όλο το φάσμα των διατομών. Οι T_{τ} τέμνουν την ευθεία της πραγματικής τους τιμής ενώ οι T_{α} όχι.

Για της manual It οι καμπύλες έχουν ομαλή μορφή, σχεδόν σταθερή θα έλεγε κανείς απόδοση αποτελεσμάτων, σε σχέση με τις καμπύλες με αυτόματη It. Εδώ οι T_{τ} δεν τέμνουν την ευθεία της πραγματικής τους τιμής ενώ οι T_{α} ναι.

Οι T_{τ} καμπύλες τέμνουν την ευθεία της πραγματικής τους τιμής στις περιοχές από 10% έως 15%, 21% έως 25%, 25% έως 28% και από 39% έως 50%.

Οι στρεπτικές τάσεις μεγαλώνοντας την διατομή είναι λογικό να μικραίνουν όπως και γίνεται μιας και έχουμε κοινή φόρτιση σε όλες τις μελέτες.

Στις 150x75x9 και 200x100x12 έγινε έλεγχος και με μη τυποποιημένο ράδιο (2mm αντί για 12mm Πίνακας 2). Και όπως ήταν επόμενο οι τάσεις στην περίπτωση της μικρής καμπυλότητας ήταν μεγαλύτερες. Γνωρίζοντας ότι εφαρμογή ραδίου στις ασθενείς περιοχές μιας κατασκευής συνεισφέρει θετικά στις μηχανικές ιδιότητες, η αντοχή της διατομής μειώθηκε λόγω της αμελητέας σχεδόν ακτίνας του ραδίου.

Ο Πίνακα 9 είναι συγκεντρωτικός και περιχέει όλες τις απαραίτητες τιμές που περιλαμβάνονται στα γραφήματα καθώς και τις τιμές της πραγματικής στρεπτικής σταθεράς It για κάθε διατομή.

Οι Πίνακες 13 και 14 έχουν πληροφορίες που αφορούν τις συντεταγμένες για την θέση των T_{α} στα αποτελέσματα των πειραμάτων.

4.2.2 Διατομές I

(Πίνακες: 10,15,16 – Διαγράμματα: 29-46)

Παρομοίως και στις δοκούς UPE η μορφή των καμπυλών T_{τ} και T_{α} είναι παραπλήσια για κάθε περίπτωση με αυτές των διατομών L. Μόνη ουσιαστική διαφορά αποτελεί στις περισσότερες περιπτώσεις το άλμα το οποίο παρουσιάζεται στο πλέγμα 50% για Auto It.

Ως πρώτο ποσοστό πλέγματος της αρχικής σειράς των ελέγχων ορίστηκε το 5% αλλά όπως παρατηρείται εφαρμόστηκε το ποσοστό 8,5% λόγω εξαναγκασμένου τερματισμού του προγράμματος κατά την δήλωση.

Ο Πίνακα 10 είναι συγκεντρωτικός και περιχέει όλες τις απαραίτητες τιμές που περιλαμβάνονται στα γραφήματα καθώς και τις τιμές της πραγματικής στρεπτικής σταθεράς It για κάθε διατομή.



Οι Πίνακες 15 και 16 έχουν πληροφορίες που αφορούν τις συντεταγμένες για την θέση των T_{tQ} στα αποτελέσματα των πειραμάτων.

4.2.3 Διατομές U

(Πίνακες: 11,12,17,18 – Διαγράμματα: 47-66)

Γενικά και εδώ η συμπεριφορά της τάσης μοιάζει με αυτές των υπολοίπων δοκών από άποψη διακύμανσης της κυματομορφής των καμπυλών. Δηλαδή για Auto It από 10% έως 15% η τάση σημειώνει καθοδική πορεία από 21% έως 25% ανοδική από 25% έως 28% καθοδική και από 39% έως 50% πάλι ανοδική.

Το άλμα το οποίο παρουσιάζεται στο πλέγμα 50% για υπάρχει και εδώ.

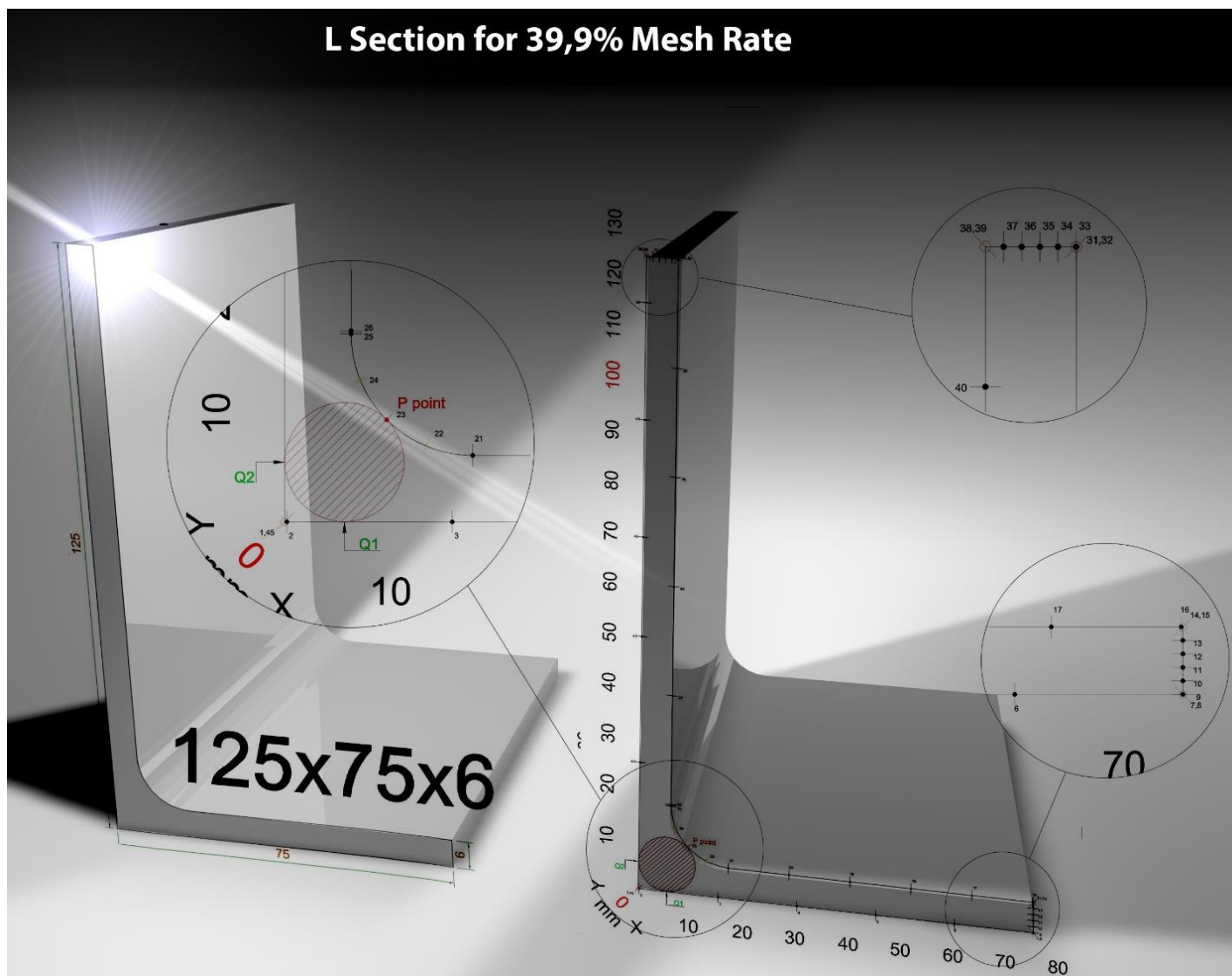
Ακόμη ξεκινώντας από την UPE 80 είναι φανερό ότι το μεγαλύτερο μέρος των τιμών T_{tP} τοποθετήστε κάτω από την ευθεία της πραγματικής T_{tP} . Καταλήγοντας όμως στην UPE 270 σταδιακά οι τάσεις ανεβαίνουν πάνω από την ευθεία της πραγματικής T_{tP} .

Άλλο χαρακτηριστικό των διαγραμμάτων των δοκών UPE είναι οι 4 T_{tQ} τάσεις στρέψης (έναντι των δυο των I και L) οι οποίες διαφέρουν αρκετά μεταξύ τους σε όλο τους το μήκος με την T_{tQ4} να σημειώνει την μεγαλύτερη απόκλιση από T_{tQ1} , T_{tQ2} , T_{tQ3} και T_{tQ} πραγματική.

4.3 Ανάλυση επιπλέον πεδίων (διατομή L 125x75x6)

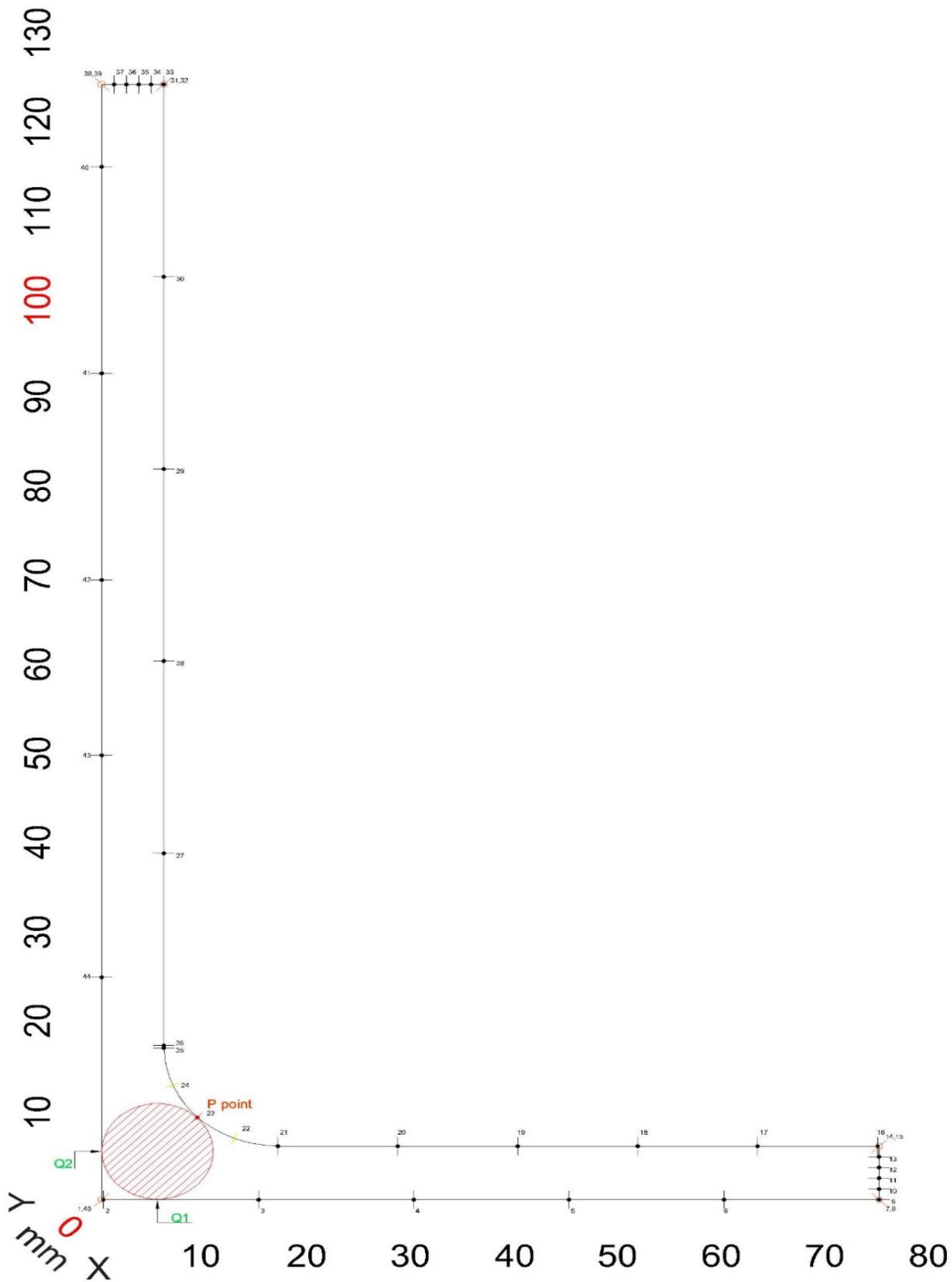
Κατά την εκτέλεση του προγράμματος ο χρήστης ερωτάται για την αποθήκευση των χαρακτηριστικών της δομής του πλέγματος σε αρχεία (Σχήμα 5).

Έτσι παρακάτω συλλέχθηκαν τα δεδομένα από τα αρχεία εξόδου και οπτικοποιήσαμε το πλέγμα 39,9% της γωνιάς 125x75x6 για Auto It.



Σχήμα 17: Απεικόνιση πλέγματος 39,9% για την γωνιά 125x75x6 (Προοπτικό)

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 14 και στον Πίνακα 4 το πλέγμα αποτελείται από 45 κόμβους και 20 στοιχεία Lagrange 2^{ου} βαθμού εκ των οποίων τα 12 είναι τύπου 12 ευθύγραμμα και τα 2 είναι τύπου 22 τόξα. Επίσης παρατηρούμε πώς στα σημεία Q δεν έχουμε κόμβους αλλά αυτό δεν θεωρείται πρόβλημα διότι το πρόγραμμα προεπιλεγμένα κάνει γραμμική παρεμβολή και χωρίζει το εξεταζόμενο προφίλ σε 1000 σημεία.



Σχήμα 18: Απεικόνιση πλέγματος 39,9% για την γωνιά 125x75x6



L 125x75x6 (39,9%)									
Nodes	X	Y	Double Node Statement	Node Type	Element Type	Elemements Nodes			
1	0	0	45	2	12	1	2	3	
2	0.1875	0	0	1	12	3	4	5	
3	15.15	0	0	1	12	5	6	7	
4	30.1125	0	0	1	12	8	9	10	
5	45.075	0	0	1	12	10	11	12	
6	60.0375	0	0	1	12	12	13	14	
7	75	0	0	2	12	15	16	17	
8	75	0	7	2	12	17	18	19	
9	75	1.50E-02	0	1	12	19	20	21	
10	75	1.212	0	1	22	21	22	23	
11	75	2.409	0	1	22	23	24	25	
12	75	3.606	0	1	12	25	26	27	
13	75	4.803	0	1	12	27	28	29	
14	75	6	0	2	12	29	30	31	
15	75	6	14	2	12	32	33	34	
16	74.855	6	0	1	12	34	35	36	
17	63.284	6	0	1	12	36	37	38	
18	51.713	6	0	1	12	39	40	41	
19	40.142	6	0	1	12	41	42	43	
20	28.571	6	0	1	12	43	44	45	
21	17	6	0	1					
22	12.79048	6.837325	0	-1					
23	9.221825	9.221825	0	1					
24	6.837325	12.79048	0	-1					
25	6	17	0	1					
26	6	17.27	0	1					
27	6	38.816	0	1					
28	6	60.362	0	1					
29	6	81.908	0	1					
30	6	103.454	0	1					
31	6	125	0	2					
32	6	125	31	2					
33	5.985	125	0	1					
34	4.788	125	0	1					
35	3.591	125	0	1					
36	2.394	125	0	1					
37	1.197	125	0	1					
38	0	125	0	2					
39	0	125	38	2					
40	0	124.6875	0	1					
41	0	99.75	0	1					
42	0	74.8125	0	1					
43	0	49.875	0	1					
44	0	24.9375	0	1					
45	0	0	0	2					

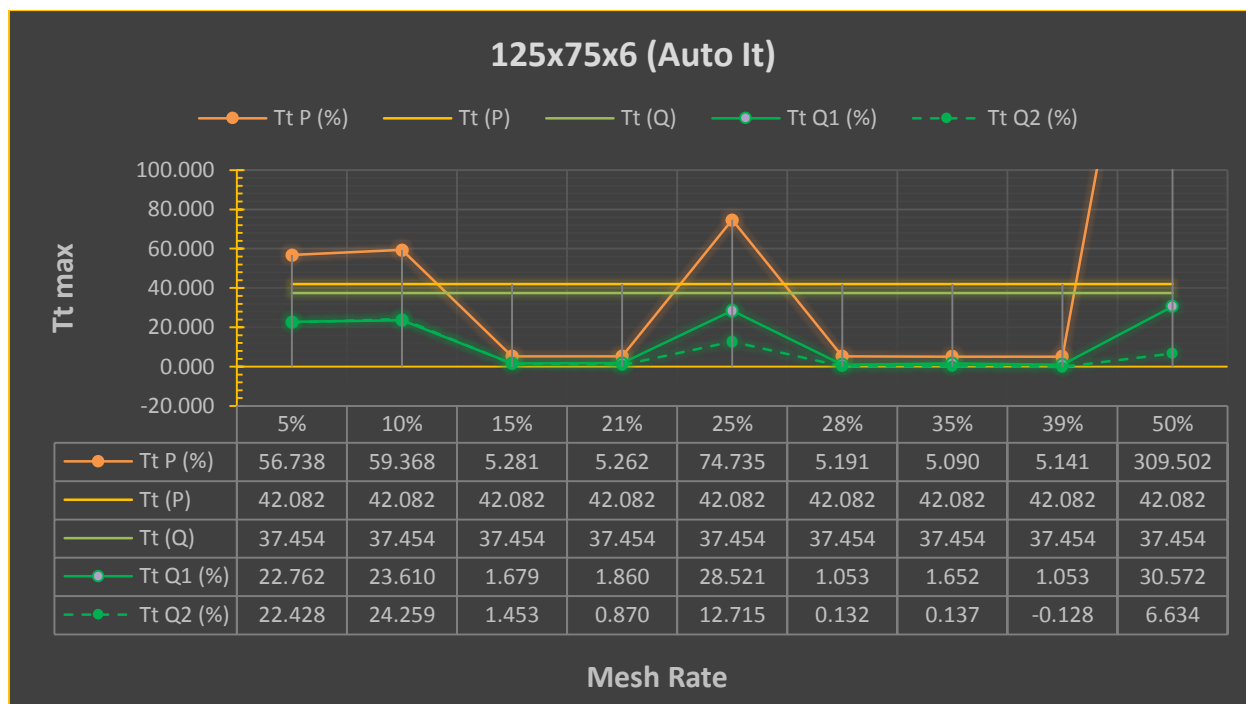
Πίνακας 4: Δεδομένα πλέγματος 39,9% για την γωνιά 125x75x6

Στον Πίνακα 5 και Διάγραμμα 4,5 προβάλλονται ενδεικτικά οι πληροφορίες που αναφέρθηκαν σε όλο το κεφάλαιο 4.

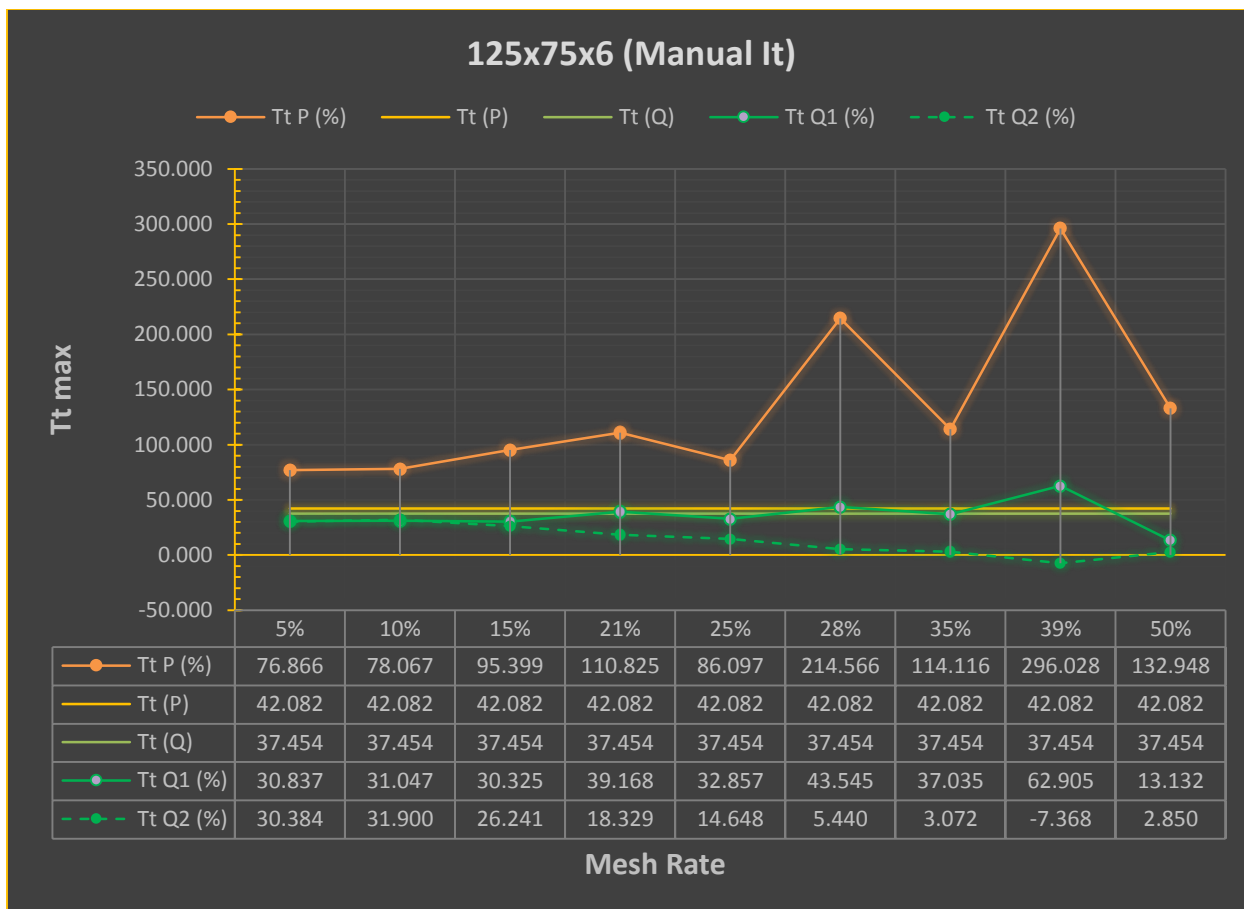


			Auto It			Manual It		
			125x75x6					
Q1 Coordinates			5.402	0.000	Tt Q real	5.402	0.000	Tt Q real
Q2 Coordinates			0.000	5.402	37.454	0.000	5.402	37.454
A/A	Mesh Rate	Node Num.	X	Y	Tt Q	X	Y	Tt Q
Q1	5%	15	5.533	0.000	22.762	5.533	0.000	30.837
Q2		986	0.000	5.533	22.428	0.000	5.533	30.384
Q1	10%	15	5.533	0.000	23.610	5.533	0.000	31.047
Q2		986	0.000	5.533	24.259	0.000	5.533	31.900
Q1	15%	15	5.533	0.000	1.679	5.533	0.000	30.325
Q2		986	0.000	5.533	1.453	0.000	5.533	26.241
Q1	21%	15	5.533	0.000	1.860	5.533	0.000	39.168
Q2		986	0.000	5.533	0.870	0.000	5.533	18.329
Q1	25%	15	5.533	0.000	28.521	5.533	0.000	32.857
Q2		986	0.000	5.533	12.715	0.000	5.533	14.648
Q1	28%	15	5.533	0.000	1.053	5.533	0.000	43.545
Q2		986	0.000	5.533	0.132	0.000	5.533	5.440
Q1	35%	15	5.533	0.000	1.652	5.533	0.000	37.035
Q2		986	0.000	5.533	0.137	0.000	5.533	3.072
Q1	39%	15	5.533	0.000	1.053	5.533	0.000	62.905
Q2		986	0.000	5.533	-0.128	0.000	5.533	-7.368
Q1	50%	15	5.533	0.000	30.572	5.533	0.000	13.132
Q2		986	0.000	5.533	6.634	0.000	5.533	2.850

Πίνακας 5: Συντεταγμένες θέσης Q Point για γωνιά 125x75x6



Διάγραμμα 4: TtP και TtQ για 125x75x6 (Auto It)



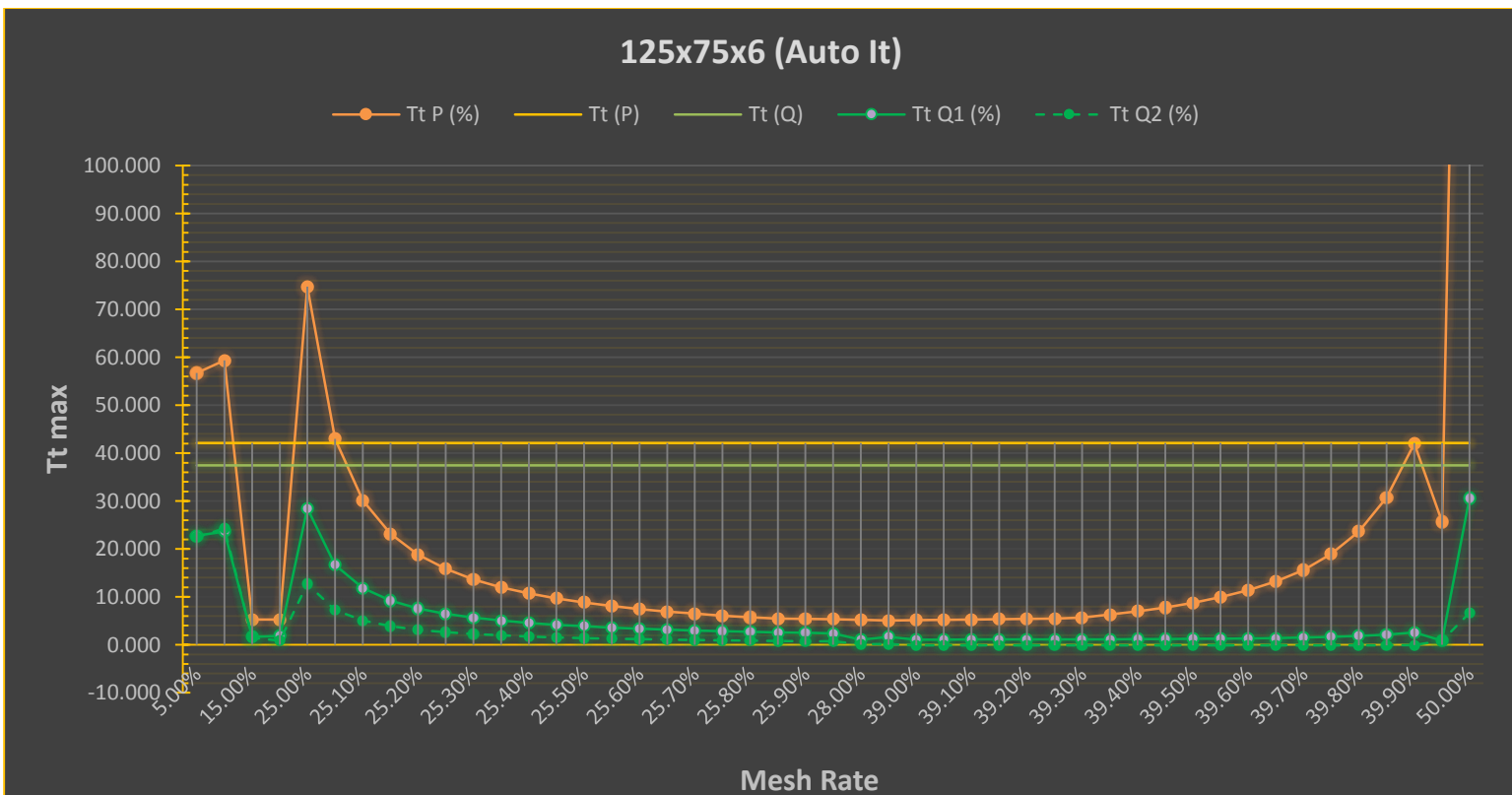
Διάγραμμα 5: TtP και TtQ για 125x75x6 (Manual It)

Στοχεύοντας να εστιάσουμε στις αποδοτικές περιοχές ποσοστών 25% έως 26% και 39% έως 39,95% εκτελέστηκαν δοκιμασίες με βήμα δοκιμής 0,05% για να εντοπιστεί το ιδανικό ποσοστό πλεγματοποίησης. Ο παρακάτω πίνακας (Πίνακας 6) και το διάγραμμα (Διάγραμμα 6) δείχνουν την απήχηση των δοκιμών αυτών και την συμπεριφορά της τάσης στρέψης.



L 125x75x6																
Mesh Rate P Point	5.00%	10.00%	15.00%	21.00%	25.00%	25.05%	25.10%	25.15%	25.20%	25.25%	25.30%	25.35%	25.40%	25.45%	25.50%	25.55%
Tt (P)	42.082	42.082	42.082	42.082	42.082	42.082	42.082	42.082	42.082	42.082	42.082	42.082	42.082	42.082	42.082	42.082
Tt max	56.738	59.368	5.281	5.262	74.735	42.995	30.1355	23.1826	18.8216	15.8364	13.662	12.0098	10.7126	9.666757	8.806621	8.086379
Tt (Q)	37.454	37.454	37.454	37.454	37.454	37.454	37.454	37.454	37.454	37.454	37.454	37.454	37.454	37.454	37.454	37.454
Mesh Rate Q 1	22.762	23.610	1.679	1.860	28.521	16.647	11.837	9.238	7.607	6.49153	5.6792	5.06235	4.57803	4.187753	3.867135	3.598796
Mesh Rate Q 2	22.428	24.259	1.453	0.870	12.715	7.275	5.071	3.879	3.132	2.61954	2.24628	1.96243	1.7392	1.558999	1.410565	1.285921
Mesh Rate P Point	25.60%	25.65%	25.70%	25.75%	25.80%	25.85%	25.90%	25.95%	28.00%	35.00%	39.00%	39.05%	39.10%	39.15%	39.20%	39.25%
Tt (P)	42.082	42.082	42.082	42.082	42.082	42.082	42.082	42.082	42.082	42.082	42.082	42.082	42.082	42.082	42.082	42.082
Tt max	7.47523	6.95012	6.49613	6.09778	5.74703	5.50062	5.43261	5.36965	5.191	5.090	5.141	5.19382	5.25447	5.326442	5.408692	5.504683
Tt (Q)	37.454	37.454	37.454	37.454	37.454	37.454	37.454	37.454	37.454	37.454	37.454	37.454	37.454	37.454	37.454	37.454
Mesh Rate Q 1	3.371	3.17552	3.0063	2.85703	2.7262	2.60932	2.50453	2.41062	1.053	1.652	1.053	1.09712	1.10272	1.110945	1.119572	1.130614
Mesh Rate Q 2	1.17971	1.08835	1.00878	0.93867	0.87681	0.82133	0.7715	0.72661	0.132	0.137	-0.128	-0.1277	-0.1272	-0.12709	-0.12639	-0.12581
Mesh Rate P Point	39.30%	39.35%	39.40%	39.45%	39.50%	39.55%	39.60%	39.65%	39.70%	39.75%	39.80%	39.85%	39.90%	39.95%	50.00%	
Tt (P)	42.082	42.082	42.082	42.082	42.082	42.082	42.082	42.082	42.082	42.082	42.082	42.082	42.082	42.082	42.082	
Tt max	5.69579	6.29846	6.99333	7.80714	8.77186	9.94076	11.3908	13.2276	15.637	18.9324	23.6195	30.7249	41.9569	25.64568	309.502	
Tt (Q)	37.454	37.454	37.454	37.454	37.454	37.454	37.454	37.454	37.454	37.454	37.454	37.454	37.454	37.454	37.454	
Mesh Rate Q 1	1.14487	1.16243	1.18286	1.20995	1.24376	1.28438	1.34016	1.41147	1.50869	1.64986	1.8445	2.14297	2.58542	0.852946	30.572	
Mesh Rate Q 2	-0.125	-0.1328	-0.1236	-0.1227	-0.1226	-0.1209	-0.1193	-0.1176	-0.1163	-0.1154	-0.1105	-0.0981	-0.0442	0.843267	6.634	

Πίνακας 6: Detailed TtP και TtQ για 125x75x6 (Auto It)



Διάγραμμα 6: Detailed TtP και TtQ για 125x75x6 (Auto It)



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο: Αντιμετώπιση Προβλημάτων

5.1 Εισαγωγή

Συνήθως το πλάνο και ο σχεδιασμός ενός έργου ή μίας πτυχιακής εργασίας, στην προκειμένη περίπτωση, διαφέρουν κατά την πρακτική εφαρμογή τους. Δημιουργούνται διάφορες δυσκολίες και εμπόδια που σε αναγκάζουν να αποκλίνεις από την αρχική ιδέα, είτε μιλώντας για διαδικασίες, είτε για χρόνο.

Παρά το γεγονός των δυσχεριών των οποίων προέκυψαν ο στόχος της εργασίας αυτής υλοποιήθηκε τεκμηριωμένα.

5.2 Περιγραφή

5.2.1 *Virtual Machine*

Όντας εκτελέσιμο μόνο σε λειτουργικό σύστημα x32bit, το πρόγραμμα BEM που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση των επιθυμητών ελέγχων και για να αποφευχθεί ο υποβαθμισμός κάποιου ήδη στημένου ηλεκτρονικού υπολογιστή, χρησιμοποιήθηκε Virtual Machine σε Microsoft Windows 7 x64bit.

Το Virtual Machine είναι λογισμικό που επιτρέπει την παράλληλη εκτέλεση ενός δεύτερου εικονικού λειτουργικού συστήματος.

Ξεκινώντας από το περίπλοκο set up όπου πρέπει να δηλωθούν εικονικές μνήμες RAM, θεωρητικοί αποθηκευτικοί χώροι, επεξεργαστές κ.ο.κ. , το VM είναι πολύ δυσλειτουργικό. Δημιουργούνται συνεχώς προβλήματα με τους κοινόχρηστους φάκελους και τις άδειες αυτών καθώς η ανταλλαγή αρχείων από λειτουργικό σε λειτουργικό γίνεται μέσω network drive. Αυτό συμβαίνει γιατί το εικονικό σύστημα θεωρείται άλλος υπολογιστής και η σύνδεση με αυτόν επιτρέπεται μόνο δικτυακά.

Επιπλέον εξαιτίας της μικρής δηλωθείσας μνήμης RAM το πρόγραμμα στο API του Inventor για την εύρεση των αναλυτικών λύσεων των I_t , T_t και T_d δεν μπορούσε να τρέξει (μήνυμα “out of memory”) . Το συγκεκριμένο πρόβλημα λύθηκε αφαιρώντας μερικές καρτέλες διατομών των οποίων δεν επρόκειτο να χρησιμοποιούνταν.

Εν τέλει για τις μελέτες χρησιμοποιήθηκε φορητός υπολογιστής του οποίου το λειτουργικό υποβιβάστηκε σε x32bit.

5.2.2 *Λάθος έκδοση .dll*

Ένα άλλο παράδοξο στην διαδικασία ήταν η χρήση λάθος εκδόσεων των .dll. Το πρόγραμμα καλούσε τα 6 αρχεία DLL για την ολοκλήρωση των υπολογισμών και αναδύοταν debugging παράθυρο διότι δεν έβρισκε τα αρχεία. Παρά το γεγονός ότι βρίσκονταν στο δηλωμένο path με το δηλωμένο όνομα το πρόγραμμα δεν τα αναγνώριζε λόγω έκδοσης.

5.2.3 *“Missing Libraries”*

Το BEM πρόγραμμα είναι προγραμματισμένο να εξάγει μαζί με τα excel και τρία γραφήματα ($S_v=f(u)$, $T_t=f(u)$, $S_b=f(u)$). Ο κώδικας δημιουργήθηκε σε API Microsoft Excel 11.0 (Release



2003) ενώ το Excel που χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή των πειραμάτων ήταν 2013. Αυτό προκάλεσε την μη ολοκλήρωση της εκτέλεσης του προγράμματος καθώς δεν αναγνωρίζονταν οι ορισμένες στον κώδικα βιβλιοθήκες των γραφημάτων. Η διόρθωση του προβλήματος αυτού ήταν εύκολη, παρακάμπτοντας τις γραμμές εκείνες του κώδικα στις οποίες κατασκευάζονταν τα διαγράμματα.

5.2.4 3D BEM

Στον τίτλο της πτυχιακής αυτής αναφέρεται πως θα εφαρμοζόταν η BEM και σε τρισδιάστατα προβλήματα. Το πρωταρχικό επίπεδο της διαδικασίας ήταν όπως και στην 2D εκδοχή η χρήση της μη αυτοματοποιημένης ανάλυσης. Τροποποιώντας λοιπόν κάποιες παραμέτρους και προσθέτοντας την συντεταγμένη z στο αρχείο κειμένου θεωρητικά όλα μοιάζουν έτοιμα για την εκτέλεση. Δυστυχώς όμως η εφαρμογή που αντλεί δεδομένα από το αρχείο κειμένου δεν δουλεύει σε 3D προβλήματα.

5.2.5 Εξαναγκασμένος τερματισμός

Κατά την επιτέλεση των δοκιμασιών παρατηρήθηκε ότι καθορίζοντας κάποια συγκεκριμένα ποσοστά πλεγματοποίησης (20%, 29%, 30%, 40% και κάποια άλλα ενδιάμεσα ποσοστά) οδηγούταν το πρόγραμμα σε εξαναγκασμένο τερματισμό. Πιθανό αίτιο στα περιστατικά αυτά να ήταν η δυσκολία εφαρμογής του υπολογιστικού μοντέλου λόγω αδυναμίας του συστήματος.

5.2.6 Έξοδος BEM σε 1000 κόμβους

Λόγω της προκαθορισμένης γραμμικής παρεμβολής το αρχείο εξόδου έδινε, ανεξαρτήτου ποσοστού πλέγματος, χίλια σημεία. Παρόλα αυτά όπως προαναφέραμε και παραπάνω το πρόγραμμα δίνει την δυνατότητα για αποθήκευση της ρεαλιστικής απόδοσης του προβλήματος σε σημεία και στοιχεία Lagrange, βάσει πλέγματος. Η εκμετάλλευση της δυνατότητας αυτής όμως καθίσταται αδύνατη καθώς τα δεδομένα εξόδου χωρίζονται σε 17 αρχεία. Ένα για κάθε παράμετρο. Αυτό σε συνδυασμό με το πολύ μεγάλο δείγμα πειραματισμών θα αποτελούσε μια ακόμη πιο χρονοβόρα διαδικασία.

5.2.7 22αρι element

Τέλος υπήρξε μια καθυστέρηση μέχρι να γίνει πλέον ξεκάθαρο πως δηλώνονται οι πηγές σε στοιχεία Lagrange 2^{ου} βαθμού τύπου τόξου 22.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο: Προτάσεις για μελλοντική εξέλιξη

6.1 Δείγμα

Σε τυχόν μελλοντική έρευνα η εξέταση ενός πιο αντιπροσωπευτικού δείγματος θα απέδιδε πιο σαφή εικόνα για το βελτιστοποιημένο ποσοστό πλεγματοποίησης. Το δείγμα αυτό θα μπορούσε να συμπεριλάβει περισσότερους τύπους διατομών και μια πυκνή σειρά δοκιμών με πολύ μικρό βήμα της τάξης μεγέθους του 0,01% για όλο το εύρος ποσοστών πλέγματος (5% έως 50). Επιπλέον θα μπορούσε να συμπεριλάβει και τους τρεις βαθμούς στοιχείων Lagrange για σύγκριση του ακριβέστερου βαθμού.

6.2 3D

Μια επιπλέον μελλοντική εφαρμογή θα ήταν η εξέλιξη του κώδικα για προσαρμογή του υπάρχοντος μοντέλου ώστε να δίνει αποτελέσματα για προβλήματα σε τρεις διαστάσεις.

6.3 Κώδικας

Εν κατακλείδι μπορεί να γίνει έρευνα προκειμένου να εμπλουτιστεί ο υπάρχων κώδικας σε διάφορα πεδία. Όπως στο πεδίο του πλήθους των αποτελεσμάτων και τις ταξινόμησης αυτών. Ιδιαίτερα χρήσιμο θα ήταν λοιπόν να προστεθεί η δυνατότητα εξέτασης πολλαπλών ποσοστών πλεγματοποίησης σε ένα πρόβλημα, όπου για μία διατομή με μία εκτέλεση της μελέτης θα λαμβάναμε π.χ. 50 τιμές μέγιστων στρεπτικών τάσεων σαν να είχαν εκτελεστεί 50 δοκιμές με την υπάρχουσα μέθοδο.



Παράρτημα

Πίνακες

The ELEMENTS			
GEOMETRY			
Polynomial Degree	Line	Arc	Curve
1st	ELM 11	ELM 21	ELM 31
	ELM 12	ELM 22	ELM 32
	ELM 13	ELM 23	ELM 33
2nd	ELM 12	ELM 22	ELM 32
3rd	ELM 13	ELM 23	ELM 33

Πίνακας 7: 2D Lagrange elements



3D ELEMENTS		GEOMETRY			
		Square		Triangle	
Polynomial Degree	1st	2nd	1st	2nd	
	1st	ELM 411		ELM 311	
ELM 412			ELM 312		
ELM 421			ELM 321		
ELM 422			ELM 322		
2nd					

Πίνακας 8: 3D Lagrange elements



ΑΝΩΤΑΤΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟΥ ΤΟΜΕΑ

		Auto It I Section								
		IPE80	IPE100	IPE120	IPE140	IPE160	IPE180	IPE220	IPE270	IPE300
It										
Tt (P)		71.261	47.670	35.443	26.878	20.367	16.197	10.163	6.658	5.482
Mesh Rate P Point	8.5%	90.214	50.919	35.062	24.461	16.636	12.285	6.870	3.748	2.741
	10%	118.436	71.102	55.915	44.664	31.318	26.304	15.407	9.791	8.734
	15%	61.807	32.903	20.165	12.942	9.334	7.384	4.583	2.827	2.187
	21%	54.346	29.450	17.198	12.852	9.522	7.426	4.570	2.780	2.130
	25%	119.804	74.177	62.399	53.549	38.516	34.876	21.525	15.806	17.663
	28%	42.764	24.552	16.557	11.700	8.293	6.194	3.655	2.133	1.594
	35%	49.502	25.646	16.454	11.776	8.570	6.490	3.916	2.330	1.752
	39%	41.749	24.775	16.183	10.938	7.714	5.690	3.350	1.944	1.447
	50%	278.330	257.784	6227.053	162.216	84.006	42.291	19.791	8.619	5.516
Tt (Q)		59.159	40.585	29.910	22.487	17.349	13.703	8.721	5.768	4.728
Mesh Rate Q 1	8.5%	32.440	19.442	13.115	8.989	6.395	4.672	2.686	1.502	1.089
	10%	43.407	27.319	21.364	16.949	12.277	10.230	6.165	4.022	3.575
	15%	22.110	12.658	7.553	4.682	3.310	2.252	1.274	0.672	0.455
	21%	19.538	11.050	6.323	3.827	2.692	1.799	1.011	0.526	0.349
	25%	48.021	31.251	26.098	22.155	16.527	14.831	9.444	7.112	7.896
	28%	13.636	7.383	3.854	2.203	1.536	0.993	0.552	0.281	0.183
	35%	17.900	9.690	5.309	3.141	2.158	1.420	0.782	0.400	0.263
	39%	10.211	5.222	2.588	1.458	0.993	0.640	0.350	0.176	0.115
	50%	105.550	103.830	2455.962	62.784	33.983	16.815	8.160	3.650	2.297
Mesh Rate Q 2	8.5%	32.350	19.341	13.046	8.937	6.342	4.633	2.655	1.481	1.073
	10%	43.354	27.273	21.336	16.926	12.252	10.212	6.150	4.010	3.565
	15%	21.858	12.410	7.445	4.585	3.247	2.193	1.241	0.654	0.437
	21%	19.051	10.793	6.105	3.642	2.576	1.696	0.958	0.494	0.327
	25%	47.969	31.205	26.068	22.130	16.498	14.810	9.426	7.098	7.882
	28%	13.155	7.109	3.642	2.025	1.427	0.897	0.503	0.252	0.158
	35%	16.743	9.134	4.950	2.863	1.995	1.287	0.717	0.366	0.238
	39%	8.401	4.267	2.004	1.063	0.729	0.447	0.244	0.117	0.070
	50%	105.759	103.967	2460.905	62.895	34.020	16.836	8.164	3.651	2.298
		Manual It I Section								
It										
Tt (P)		7011.98	12088.14	17438.56	24571.14	36214.05	48103.52	91070.77	160210.95	202078.21
Tt (Q)		71.261	47.670	35.443	26.878	20.367	16.197	10.163	6.658	5.482
Mesh Rate P Point	8.5%	146.307	94.267	71.038	54.490	40.091	32.066	19.826	12.765	10.568
	10%	143.736	93.793	69.624	52.822	39.355	31.384	19.386	12.464	10.262
	15%	147.969	94.176	71.302	55.340	43.592	39.944	27.923	21.483	20.023
	21%	144.937	95.336	70.957	55.564	53.337	48.901	34.105	26.154	24.359
	25%	134.743	87.948	65.667	50.060	37.285	29.779	18.408	11.912	9.857
	28%	159.363	115.883	109.175	101.572	79.181	72.273	48.497	36.324	33.980
	35%	141.482	92.061	78.885	72.317	58.566	53.375	36.971	28.151	26.122
	39%	190.534	148.796	143.778	131.722	103.011	94.086	63.297	47.446	44.344
	50%	129.980	85.447	63.217	47.789	35.785	28.427	17.639	11.382	9.362
Tt (Q)		59.159	40.585	29.910	22.487	17.349	13.703	8.721	5.768	4.728
Mesh Rate Q 1	8.5%	52.609	35.992	26.572	20.023	15.411	12.195	7.750	5.115	4.198
	10%	52.680	36.037	26.602	20.045	15.427	12.206	7.757	5.120	4.200
	15%	52.932	36.231	26.707	20.019	15.459	12.182	7.759	5.111	4.167
	21%	52.107	35.771	26.089	19.525	15.077	11.845	7.541	4.948	3.993
	25%	54.009	37.053	27.466	20.711	15.999	12.664	8.077	5.360	4.406
	28%	50.817	34.846	25.410	19.127	14.663	11.590	7.330	4.782	3.900
	35%	51.160	34.782	25.454	19.288	14.749	11.681	7.382	4.830	3.928
	39%	46.602	31.363	22.994	17.564	13.255	10.581	6.617	4.295	3.514
	50%	49.292	34.416	24.933	18.496	14.476	11.302	7.273	4.820	3.899
Mesh Rate Q 2	8.5%	52.464	35.806	26.432	19.909	15.283	12.092	7.663	5.045	4.135
	10%	52.616	35.977	26.567	20.018	15.396	12.184	7.738	5.104	4.189
	15%	52.329	35.520	26.325	19.604	15.164	11.861	7.562	4.968	4.003
	21%	50.807	34.938	25.186	18.582	14.428	11.166	7.146	4.648	3.742
	25%	53.950	36.999	27.434	20.689	15.971	12.646	8.061	5.349	4.399
	28%	49.025	33.553	24.014	17.575	13.629	10.470	6.678	4.297	3.360
	35%	47.854	32.786	23.731	17.584	13.635	10.587	6.773	4.420	3.546
	39%	38.341	25.628	17.807	12.797	9.729	7.387	4.612	2.855	2.135
	50%	49.389	34.462	24.983	18.529	14.492	11.317	7.276	4.821	3.900

Πίνακας 10: Overall It, TtP και TtQ για I Section



ΑΝΩΤΑΤΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟΥ ΤΟΜΕΑ

		Auto It U Section									
		UPE80	UPE100	UPE120	UPE140	UPE160	UPE180	UPE200	UPE220	UPE240	UPE270
It											
Tt (P)		73.565	54.794	41.667	32.377	25.218	20.630	17.002	13.309	11.265	8.979
Mesh Rate P Point	5%	52.949	43.651	31.931	25.930	22.269	18.308	15.322	12.620	10.402	8.764
	10%	52.780	43.983	32.277	25.760	22.066	17.981	15.130	12.441	10.332	8.766
	15%	29.753	19.176	11.703	8.565	6.557	5.268	3.996	3.240	2.419	1.903
	21%	35.019	22.885	13.679	10.068	7.277	5.852	4.310	3.379	2.503	1.846
	25%	55.382	49.731	37.869	32.807	30.854	26.940	23.692	20.281	16.874	15.418
	28%	39.995	26.349	15.246	11.567	8.165	6.358	4.533	3.516	2.625	1.954
	35%	63.104	36.318	19.638	13.826	9.735	7.729	5.578	4.201	3.147	2.227
	39%	63.585	31.260	16.339	11.565	7.996	5.989	4.313	3.242	2.448	1.733
Tt (Q)		65.331	48.351	37.051	28.618	22.614	18.031	14.889	11.569	9.871	7.817
Mesh Rate Q 1	5%	21.465	17.596	12.702	10.182	8.541	7.181	5.925	4.735	3.940	3.301
	10%	20.965	17.234	12.488	10.058	8.510	7.156	5.955	4.814	4.017	3.393
	15%	8.445	4.516	2.482	1.492	0.947	0.637	0.442	0.322	0.242	0.158
	21%	9.511	4.831	2.768	1.714	1.136	0.736	0.538	0.412	0.308	0.205
	25%	27.620	24.787	18.629	15.732	13.823	12.404	10.516	8.441	7.251	6.543
	28%	6.151	2.666	1.513	0.927	0.621	0.357	0.273	0.219	0.163	0.101
	35%	18.168	9.448	4.770	2.894	1.825	1.348	0.918	0.645	0.487	0.330
	39%	8.072	3.168	1.722	1.026	0.640	0.373	0.270	0.203	0.151	0.093
Tt (Q)		20.295	22.524	16.357	20.919	123.783	30.981	12.959	7.206	6.018	3.379
Mesh Rate Q 2	5%	20.745	16.784	12.214	9.788	8.214	6.819	5.701	4.511	3.763	3.142
	10%	20.359	16.653	12.648	10.308	8.565	7.148	5.977	4.445	3.705	3.036
	15%	8.835	4.736	2.468	1.365	0.797	0.542	0.372	0.231	0.176	0.107
	21%	7.339	3.465	1.675	0.859	0.450	0.276	0.176	0.095	0.073	0.034
	25%	16.470	12.171	7.717	5.184	3.723	2.851	2.299	1.459	1.236	0.880
	28%	3.585	1.192	0.475	0.146	0.018	-0.037	-0.039	-0.033	-0.025	-0.023
	35%	5.758	1.787	0.617	0.091	-0.056	-0.134	-0.113	-0.083	-0.062	-0.053
	39%	1.275	-0.093	-0.136	-0.176	-0.125	-0.113	-0.081	-0.050	-0.038	-0.027
Tt (Q)		4.954	3.465	1.979	1.675	9.921	1.919	0.890	0.465	0.369	0.208
Mesh Rate Q 3	5%	21.335	17.375	12.606	10.233	8.573	7.173	5.898	4.792	3.982	3.311
	10%	20.839	17.010	12.399	10.088	8.521	7.142	5.930	4.836	4.033	3.392
	15%	15.304	8.906	5.795	3.699	2.606	1.684	1.311	0.964	0.734	0.508
	21%	13.920	7.524	4.228	2.587	1.612	1.110	0.750	0.545	0.415	0.267
	25%	25.780	23.113	16.917	14.700	12.535	11.562	9.342	7.912	6.767	5.960
	28%	11.301	6.276	3.465	2.195	1.383	0.965	0.660	0.482	0.372	0.244
	35%	10.898	5.546	2.684	1.659	0.953	0.801	0.534	0.407	0.305	0.210
	39%	8.727	3.770	1.867	1.037	0.582	0.382	0.248	0.177	0.136	0.085
Tt (Q)		10.878	11.827	8.157	11.126	62.636	16.922	6.468	3.959	3.283	1.775
Mesh Rate Q 4	5%	20.372	16.207	12.185	9.663	8.228	6.765	5.505	4.464	3.730	3.089
	10%	20.268	16.917	12.757	10.049	8.483	6.983	4.979	3.982	3.332	2.515
	15%	5.543	1.198	0.364	-0.409	-0.520	-0.522	-0.491	-0.413	-0.321	-0.273
	21%	4.544	1.274	0.381	-0.189	-0.394	-0.495	-0.368	-0.325	-0.248	-0.206
	25%	11.176	6.656	4.920	2.800	2.256	1.706	1.069	0.832	0.709	0.509
	28%	-4.741	-4.210	-2.828	-2.489	-2.202	-1.940	-1.459	-1.154	-0.886	-0.676
	35%	1.749	-1.175	-1.186	-1.350	-0.991	-0.984	-0.627	-0.500	-0.379	-0.273
	39%	-9.304	-7.618	-4.683	-3.601	-2.613	-2.050	-1.519	-1.167	-0.889	-0.666
Tt (Q)		2.618	2.017	1.529	1.566	10.004	1.788	0.716	0.463	0.369	0.199

Πίνακας 11: Overall TtP και TtQ για U Section (Auto It)



ΑΝΩΤΑΤΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟΥ ΤΟΜΕΑ

		<i>Manual It</i> <i>U Section</i>									
		UPE80	UPE100	UPE120	UPE140	UPE160	UPE180	UPE200	UPE220	UPE240	UPE270
<i>It</i>		7614.00	10898.47	15905.54	21759.86	28835.31	38061.36	49142.56	67249.40	85055.23	113319.48
<i>Tt (P)</i>		73.565	54.794	41.667	32.377	25.718	20.630	17.002	13.309	11.265	8.979
Mesh Rate P Point	5%	134.729	102.335	77.215	60.551	48.762	39.198	32.398	25.614	21.573	17.310
	10%	134.584	102.923	77.752	59.738	47.721	37.819	31.265	24.578	20.800	16.651
	15%	176.081	159.235	131.158	123.601	118.145	113.694	101.420	87.876	73.850	69.594
	21%	215.066	204.724	169.614	162.255	146.955	142.005	123.841	104.533	87.427	78.362
	25%	131.327	103.462	79.369	64.167	54.323	45.466	38.396	31.010	25.984	21.611
	28%	366.072	396.754	338.791	346.752	318.446	305.601	262.889	222.714	188.875	174.629
	35%	253.336	223.866	182.672	169.695	150.605	140.263	120.943	97.881	84.466	72.299
	39%	582.166	565.596	476.702	490.373	461.100	439.649	386.836	319.666	276.394	245.197
<i>Tt (Q)</i>		65.331	48.351	37.051	28.618	22.614	18.031	14.889	11.569	9.871	7.817
Mesh Rate Q 1	5%	54.618	41.253	30.715	23.777	18.702	15.374	12.528	9.611	8.172	6.520
	10%	53.457	40.330	30.082	23.324	18.404	15.051	12.306	9.509	8.086	6.446
	15%	49.981	37.498	27.813	21.537	17.062	13.753	11.211	8.737	7.398	5.795
	21%	58.409	43.221	34.317	27.620	22.932	17.850	15.452	12.741	10.761	8.713
	25%	65.496	51.567	39.044	30.770	24.337	20.933	17.043	12.907	11.166	9.171
	28%	56.295	40.137	33.627	27.788	24.203	17.140	15.848	13.903	11.716	9.013
	35%	72.937	58.237	44.372	35.522	28.233	24.458	19.903	15.029	13.062	10.707
	39%	73.904	57.320	50.245	43.519	36.879	27.378	24.254	19.976	17.095	13.100
50%	42.559	32.747	23.564	17.561	12.952	11.368	8.833	6.449	5.606	4.579	
Mesh Rate Q 2	5%	52.786	39.348	29.535	22.858	17.986	14.599	12.055	9.156	7.805	6.206
	10%	51.914	38.969	30.469	23.904	18.524	15.034	12.351	8.782	7.458	5.767
	15%	52.287	39.330	27.661	19.692	14.355	11.692	9.441	6.276	5.373	3.931
	21%	45.070	31.002	20.765	13.843	9.088	6.700	5.065	2.949	2.561	1.450
	25%	39.055	25.322	16.174	10.139	6.556	4.811	3.726	2.231	1.903	1.234
	28%	32.809	17.949	10.564	4.369	0.690	-1.758	-2.256	-2.083	-1.799	-2.083
	35%	23.117	11.013	5.739	1.113	-0.871	-2.429	-2.449	-1.923	-1.669	-1.721
	39%	11.674	-1.688	-3.955	-7.449	-7.183	-8.273	-7.258	-4.961	-4.336	-3.780
50%	10.388	5.038	2.851	1.406	1.038	0.704	0.606	0.417	0.343	0.282	
Mesh Rate Q 3	5%	54.287	40.735	30.483	23.896	18.773	15.358	12.471	9.726	8.260	6.540
	10%	53.138	39.804	29.867	23.395	18.429	15.021	12.253	9.553	8.119	6.444
	15%	90.571	73.950	64.945	53.383	46.964	36.352	33.267	26.135	22.422	18.584
	21%	85.486	67.306	52.427	41.691	32.562	26.934	21.554	16.871	14.480	11.326
	25%	61.133	48.085	35.456	28.751	22.069	19.512	15.140	12.098	10.421	8.353
	28%	103.434	94.495	76.992	65.800	53.923	46.367	38.288	30.551	26.752	21.811
	35%	43.750	34.188	24.970	20.360	14.740	14.539	11.589	9.493	8.195	6.830
	39%	79.905	68.221	54.462	43.961	33.548	28.008	22.224	17.466	15.369	12.071
50%	22.810	17.195	11.751	9.340	6.554	6.209	4.409	3.543	3.058	2.405	
Mesh Rate Q 4	5%	51.838	37.996	29.464	22.565	18.018	14.484	11.640	9.060	7.735	6.101
	10%	51.681	39.587	30.729	23.303	18.346	14.686	10.289	7.867	6.707	4.778
	15%	32.805	9.951	4.081	-5.896	-9.368	-11.276	-12.449	-11.190	-9.802	-9.973
	21%	27.905	11.399	4.729	-3.051	-7.966	-12.005	-10.576	-10.050	-8.681	-8.723
	25%	26.503	13.848	10.311	5.476	3.971	2.879	1.733	1.272	1.092	0.714
	28%	-43.392	-63.389	-62.849	-74.611	-85.881	-93.253	-84.581	-73.102	-63.795	-60.388
	35%	7.020	-7.245	-11.033	-16.570	-15.334	-17.862	-13.605	-11.650	-10.165	-8.877
	39%	-85.184	-137.843	-136.614	-152.671	-150.694	-150.488	-136.228	-115.090	-100.319	-94.174
50%	5.490	2.932	2.203	1.314	1.047	0.656	0.488	0.414	0.344	0.270	

Πίνακας 12: Overall It, TtP και TtQ για U Section (Manual It)



ΑΝΩΤΑΤΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟΥ ΤΟΜΕΑ

			Auto It L Section																									
			45x25x4				50x30x5				60x40x5				75x65x6				90x85x8				100x50x10					
Mesh Rete	Node Num.	A/A	Q1		Q2		Node Num.	Q1		Q2		Node Num.	Q1		Q2		Node Num.	Q1		Q2		Node Num.	Q1		Q2			
			Tt	Q	Tt	Q		Tt	Q	Tt	Q		Tt	Q	Tt	Q		Tt	Q	Tt	Q		Tt	Q	Tt	Q	Tt	Q
5%	24	3.169	0.000	3.201	0.000	3.201	0.000	3.958	0.000	3.958	0.000	3.958	0.000	5.059	0.000	5.059	0.000	6.402	0.000	6.402	0.000	6.402	0.000	7.574	0.000	7.574	0.000	
10%	27	3.169	0.000	3.201	0.000	3.201	0.000	3.958	0.000	3.958	0.000	3.958	0.000	5.059	0.000	5.059	0.000	6.402	0.000	6.402	0.000	6.402	0.000	7.574	0.000	7.574	0.000	
15%	24	3.169	0.000	3.201	0.000	3.201	0.000	3.958	0.000	3.958	0.000	3.958	0.000	5.059	0.000	5.059	0.000	6.402	0.000	6.402	0.000	6.402	0.000	7.574	0.000	7.574	0.000	
21%	24	3.169	0.000	3.201	0.000	3.201	0.000	3.958	0.000	3.958	0.000	3.958	0.000	5.059	0.000	5.059	0.000	6.402	0.000	6.402	0.000	6.402	0.000	7.574	0.000	7.574	0.000	
25%	24	3.169	0.000	3.201	0.000	3.201	0.000	3.958	0.000	3.958	0.000	3.958	0.000	5.059	0.000	5.059	0.000	6.402	0.000	6.402	0.000	6.402	0.000	7.574	0.000	7.574	0.000	
28%	24	3.169	0.000	3.201	0.000	3.201	0.000	3.958	0.000	3.958	0.000	3.958	0.000	5.059	0.000	5.059	0.000	6.402	0.000	6.402	0.000	6.402	0.000	7.574	0.000	7.574	0.000	
35%	24	3.169	0.000	3.201	0.000	3.201	0.000	3.958	0.000	3.958	0.000	3.958	0.000	5.059	0.000	5.059	0.000	6.402	0.000	6.402	0.000	6.402	0.000	7.574	0.000	7.574	0.000	
39%	24	3.169	0.000	3.201	0.000	3.201	0.000	3.958	0.000	3.958	0.000	3.958	0.000	5.059	0.000	5.059	0.000	6.402	0.000	6.402	0.000	6.402	0.000	7.574	0.000	7.574	0.000	
50%	24	3.169	0.000	3.201	0.000	3.201	0.000	3.958	0.000	3.958	0.000	3.958	0.000	5.059	0.000	5.059	0.000	6.402	0.000	6.402	0.000	6.402	0.000	7.574	0.000	7.574	0.000	
Q1 Coordinates		5.402	0.000	5.402	0.000	5.402	0.000	7.331	0.000	7.331	0.000	7.331	0.000	7.917	0.000	7.917	0.000	9.603	0.000	9.603	0.000	9.603	0.000	9.603	0.000	9.603	0.000	
Q2 Coordinates		0.000	5.402	0.000	5.402	0.000	7.331	0.000	7.331	0.000	7.331	0.000	7.917	0.000	7.917	0.000	9.603	0.000	9.603	0.000	9.603	0.000	9.603	0.000	9.603	0.000	9.603	0.000
A/A		X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	
5%	15	5.533	0.000	5.533	0.000	5.533	0.000	7.117	0.000	7.117	0.000	7.117	0.000	8.072	0.000	8.072	0.000	8.072	0.000	8.072	0.000	8.072	0.000	8.072	0.000	8.072	0.000	
10%	15	5.533	0.000	5.533	0.000	5.533	0.000	7.117	0.000	7.117	0.000	7.117	0.000	8.072	0.000	8.072	0.000	8.072	0.000	8.072	0.000	8.072	0.000	8.072	0.000	8.072	0.000	
15%	15	5.533	0.000	5.533	0.000	5.533	0.000	7.117	0.000	7.117	0.000	7.117	0.000	8.072	0.000	8.072	0.000	8.072	0.000	8.072	0.000	8.072	0.000	8.072	0.000	8.072	0.000	
21%	15	5.533	0.000	5.533	0.000	5.533	0.000	7.117	0.000	7.117	0.000	7.117	0.000	8.072	0.000	8.072	0.000	8.072	0.000	8.072	0.000	8.072	0.000	8.072	0.000	8.072	0.000	
25%	15	5.533	0.000	5.533	0.000	5.533	0.000	7.117	0.000	7.117	0.000	7.117	0.000	8.072	0.000	8.072	0.000	8.072	0.000	8.072	0.000	8.072	0.000	8.072	0.000	8.072	0.000	
28%	15	5.533	0.000	5.533	0.000	5.533	0.000	7.117	0.000	7.117	0.000	7.117	0.000	8.072	0.000	8.072	0.000	8.072	0.000	8.072	0.000	8.072	0.000	8.072	0.000	8.072	0.000	
35%	15	5.533	0.000	5.533	0.000	5.533	0.000	7.117	0.000	7.117	0.000	7.117	0.000	8.072	0.000	8.072	0.000	8.072	0.000	8.072	0.000	8.072	0.000	8.072	0.000	8.072	0.000	
39%	15	5.533	0.000	5.533	0.000	5.533	0.000	7.117	0.000	7.117	0.000	7.117	0.000	8.072	0.000	8.072	0.000	8.072	0.000	8.072	0.000	8.072	0.000	8.072	0.000	8.072	0.000	
50%	15	5.533	0.000	5.533	0.000	5.533	0.000	7.117	0.000	7.117	0.000	7.117	0.000	8.072	0.000	8.072	0.000	8.072	0.000	8.072	0.000	8.072	0.000	8.072	0.000	8.072	0.000	

Πίνακας 13: Συντεταγμένες και Q τιμές L (Auto It)



ΑΝΩΤΑΤΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟΥ ΤΟΜΕΑ

Mesh Rate		48x25x4		50x25x5		60x25x5		75x25x6		90x25x8		100x25x10	
		Q	TIQ	Q	TIQ	Q	TIQ	Q	TIQ	Q	TIQ	Q	TIQ
A/A	Node Num.	2	201	2	259	3	354	5	589	6	602	7	736
	Node Num.	0.000	3.201	0.000	3.958	0.000	5.958	0.000	8.059	0.000	8.402	0.000	9.574
	TIQ	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
Q1	5%	3.169	0.000	3.934	0.000	3.948	0.000	4.969	0.000	6.418	0.000	7.656	0.000
Q2	5%	3.169	0.000	3.934	0.000	3.948	0.000	4.969	0.000	6.418	0.000	7.656	0.000
Q1	10%	3.169	0.000	3.934	0.000	3.948	0.000	4.969	0.000	6.418	0.000	7.656	0.000
Q2	10%	3.169	0.000	3.934	0.000	3.948	0.000	4.969	0.000	6.418	0.000	7.656	0.000
Q1	15%	3.169	0.000	3.934	0.000	3.948	0.000	4.969	0.000	6.418	0.000	7.656	0.000
Q2	15%	3.169	0.000	3.934	0.000	3.948	0.000	4.969	0.000	6.418	0.000	7.656	0.000
Q1	21%	3.169	0.000	3.934	0.000	3.948	0.000	4.969	0.000	6.418	0.000	7.656	0.000
Q2	21%	3.169	0.000	3.934	0.000	3.948	0.000	4.969	0.000	6.418	0.000	7.656	0.000
Q1	25%	3.169	0.000	3.934	0.000	3.948	0.000	4.969	0.000	6.418	0.000	7.656	0.000
Q2	25%	3.169	0.000	3.934	0.000	3.948	0.000	4.969	0.000	6.418	0.000	7.656	0.000
Q1	28%	3.169	0.000	3.934	0.000	3.948	0.000	4.969	0.000	6.418	0.000	7.656	0.000
Q2	28%	3.169	0.000	3.934	0.000	3.948	0.000	4.969	0.000	6.418	0.000	7.656	0.000
Q1	35%	3.169	0.000	3.934	0.000	3.948	0.000	4.969	0.000	6.418	0.000	7.656	0.000
Q2	35%	3.169	0.000	3.934	0.000	3.948	0.000	4.969	0.000	6.418	0.000	7.656	0.000
Q1	39%	3.169	0.000	3.934	0.000	3.948	0.000	4.969	0.000	6.418	0.000	7.656	0.000
Q2	39%	3.169	0.000	3.934	0.000	3.948	0.000	4.969	0.000	6.418	0.000	7.656	0.000
Q1	50%	3.169	0.000	3.934	0.000	3.948	0.000	4.969	0.000	6.418	0.000	7.656	0.000
Q2	50%	3.169	0.000	3.934	0.000	3.948	0.000	4.969	0.000	6.418	0.000	7.656	0.000
Q2 Coordinates		5.402	0.000	7.331	0.000	5.612	0.000	7.917	0.000	9.603	0.000	7.372	0.000
A/A	Node Num.	0.000	5.402	0.000	7.331	0.000	5.612	0.000	7.917	0.000	9.603	0.000	7.372
	TIQ	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
Q1	5%	5.333	0.000	7.117	0.000	5.394	0.000	8.072	0.000	9.497	0.000	7.196	0.000
Q2	5%	5.333	0.000	7.117	0.000	5.394	0.000	8.072	0.000	9.497	0.000	7.196	0.000
Q1	10%	5.333	0.000	7.117	0.000	5.394	0.000	8.072	0.000	9.497	0.000	7.196	0.000
Q2	10%	5.333	0.000	7.117	0.000	5.394	0.000	8.072	0.000	9.497	0.000	7.196	0.000
Q1	15%	5.333	0.000	7.117	0.000	5.394	0.000	8.072	0.000	9.497	0.000	7.196	0.000
Q2	15%	5.333	0.000	7.117	0.000	5.394	0.000	8.072	0.000	9.497	0.000	7.196	0.000
Q1	21%	5.333	0.000	7.117	0.000	5.394	0.000	8.072	0.000	9.497	0.000	7.196	0.000
Q2	21%	5.333	0.000	7.117	0.000	5.394	0.000	8.072	0.000	9.497	0.000	7.196	0.000
Q1	25%	5.333	0.000	7.117	0.000	5.394	0.000	8.072	0.000	9.497	0.000	7.196	0.000
Q2	25%	5.333	0.000	7.117	0.000	5.394	0.000	8.072	0.000	9.497	0.000	7.196	0.000
Q1	28%	5.333	0.000	7.117	0.000	5.394	0.000	8.072	0.000	9.497	0.000	7.196	0.000
Q2	28%	5.333	0.000	7.117	0.000	5.394	0.000	8.072	0.000	9.497	0.000	7.196	0.000
Q1	35%	5.333	0.000	7.117	0.000	5.394	0.000	8.072	0.000	9.497	0.000	7.196	0.000
Q2	35%	5.333	0.000	7.117	0.000	5.394	0.000	8.072	0.000	9.497	0.000	7.196	0.000
Q1	39%	5.333	0.000	7.117	0.000	5.394	0.000	8.072	0.000	9.497	0.000	7.196	0.000
Q2	39%	5.333	0.000	7.117	0.000	5.394	0.000	8.072	0.000	9.497	0.000	7.196	0.000
Q1	50%	5.333	0.000	7.117	0.000	5.394	0.000	8.072	0.000	9.497	0.000	7.196	0.000
Q2	50%	5.333	0.000	7.117	0.000	5.394	0.000	8.072	0.000	9.497	0.000	7.196	0.000

Πίνακας 14: Συντεταγμένες και Q τιμές L (Manual It)



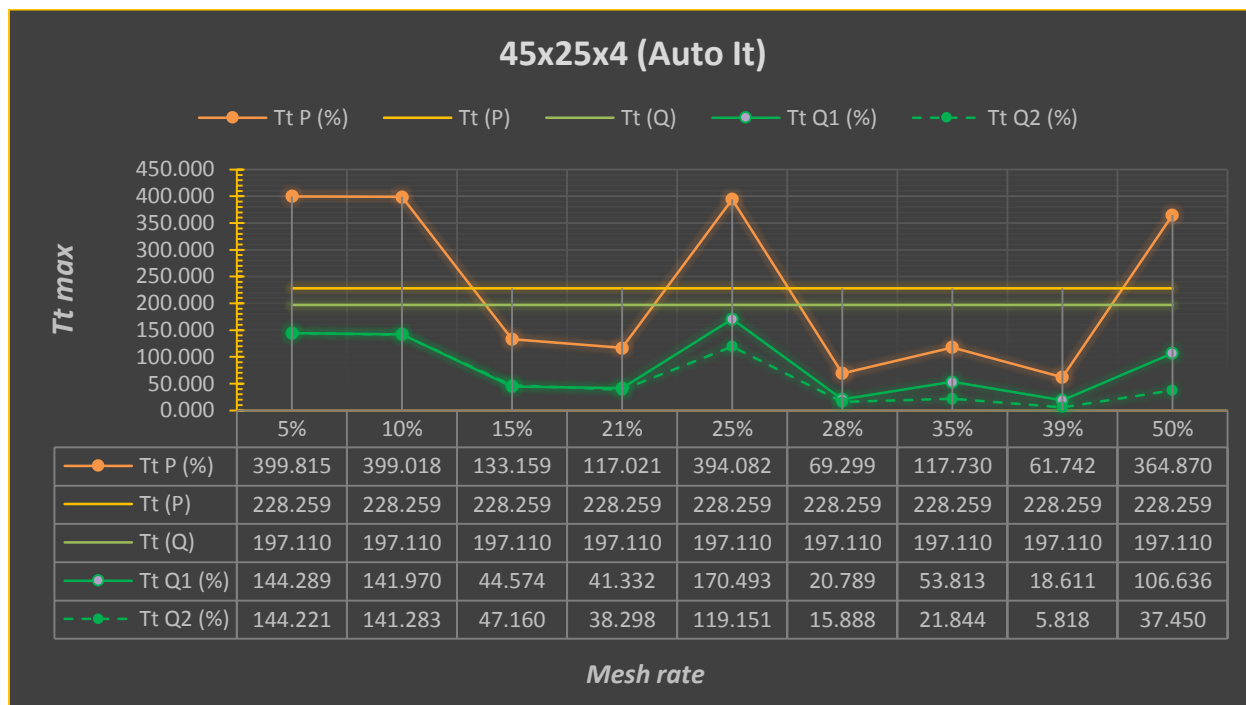
ΑΝΩΤΑΤΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟΥ ΤΟΜΕΑ

		Manual It I Section														
		IPE80			IPE100			IPE120			IPE140			IPE160		
Q1 Coordinates	Q2 Coordinates	23.0	0.0	Tt Q real	27.5	0.0	Tt Q real	32.0	0.0	Tt Q real	36.5	0.0	Tt Q real	41.0	0.0	Tt Q real
		23.0	80.0	59.158	27.5	100.0	40.585	32.0	120.0	29.918	36.5	140.0	22.487	41.0	160.0	17.349
A/A	Node Num.	X	Y	Tt Q	X	Y	Tt Q	X	Y	Tt Q	X	Y	Tt Q	X	Y	Tt Q
		Mesh Rate	Node Num.	Tt Q	Node Num.	Tt Q	Node Num.	Tt Q	Node Num.	Tt Q	Node Num.	Tt Q	Node Num.	Tt Q	Node Num.	Tt Q
Q1	8.5%	71	22.914	80.000	52.609	0.000	35.992	69	32.268	0.000	26.572	67	36.301	0.000	20.023	15.411
Q2		571	22.914	80.000	52.464	0.000	35.806	568	31.969	120.000	26.432	567	36.424	140.000	19.909	15.283
Q1	10%	71	22.914	80.000	52.680	0.000	36.037	69	32.268	0.000	26.602	67	36.301	0.000	20.045	15.427
Q2		571	22.914	80.000	52.616	0.000	35.977	568	31.969	120.000	26.567	567	36.424	140.000	20.018	15.396
Q1	15%	71	22.914	80.000	52.932	0.000	36.231	69	32.268	0.000	26.707	67	36.301	0.000	20.019	15.459
Q2		571	22.914	80.000	52.329	0.000	35.529	568	31.969	120.000	26.325	567	36.424	140.000	19.604	15.164
Q1	21%	71	22.914	80.000	52.107	0.000	35.771	69	32.268	0.000	26.089	67	36.301	0.000	19.525	15.077
Q2		571	22.914	80.000	50.807	0.000	34.938	568	31.969	120.000	25.186	567	36.424	140.000	18.582	14.428
Q1	25%	71	22.914	80.000	54.009	0.000	37.053	69	32.268	0.000	27.466	67	36.301	0.000	20.711	15.999
Q2		571	22.914	80.000	53.950	0.000	36.999	568	31.969	120.000	27.434	567	36.424	140.000	20.689	15.971
Q1	28%	71	22.914	80.000	50.817	0.000	34.846	69	32.268	0.000	25.410	67	36.301	0.000	19.127	14.663
Q2		571	22.914	80.000	49.025	0.000	33.553	568	31.969	120.000	24.014	567	36.424	140.000	17.375	13.629
Q1	35%	71	22.914	80.000	51.160	0.000	34.782	69	32.268	0.000	25.454	67	36.301	0.000	19.288	14.749
Q2		571	22.914	80.000	47.854	0.000	32.786	568	31.969	120.000	23.731	567	36.424	140.000	17.584	13.635
Q1	39%	71	22.914	80.000	46.602	0.000	31.363	69	32.268	0.000	22.994	67	36.301	0.000	17.964	13.255
Q2		571	22.914	80.000	38.341	0.000	25.828	568	31.969	120.000	17.807	567	36.424	140.000	12.797	9.729
Q1	50%	71	22.914	80.000	49.292	0.000	34.416	69	32.268	0.000	24.933	67	36.301	0.000	18.496	14.476
Q2		571	22.914	80.000	49.589	0.000	34.462	568	31.969	120.000	24.983	567	36.424	140.000	18.529	14.492
Q1 Coordinates	Q2 Coordinates	45.5	0.0	Tt Q real	55.0	0.0	Tt Q real	67.5	0.0	Tt Q real	75.0	0.0	Tt Q real			
		45.5	180.0	13.910	55.0	220.0	8.724	67.5	270.0	5.746	75.0	300.0	4.324			
A/A	Node Num.	X	Y	Tt Q	X	Y	Tt Q	X	Y	Tt Q	X	Y	Tt Q			
		Mesh Rate	Node Num.	Tt Q	Node Num.	Tt Q	Node Num.	Tt Q	Node Num.	Tt Q						
Q1	8.5%	66	45.318	180.000	12.195	0.000	7.750	66	67.579	0.000	5.115	66	75.322	0.000	4.198	
Q2		566	45.333	180.000	12.092	0.000	7.663	565	67.940	270.000	5.045	565	75.257	300.000	4.135	
Q1	10%	66	45.318	180.000	12.206	0.000	7.757	66	67.579	0.000	5.120	66	75.322	0.000	4.200	
Q2		566	45.333	180.000	12.184	0.000	7.738	565	67.940	270.000	5.104	565	75.257	300.000	4.189	
Q1	15%	66	45.318	180.000	12.182	0.000	7.759	66	67.579	0.000	5.111	66	75.322	0.000	4.167	
Q2		566	45.333	180.000	11.861	0.000	7.562	565	67.940	270.000	4.968	565	75.257	300.000	4.003	
Q1	21%	66	45.318	180.000	11.845	0.000	7.541	66	67.579	0.000	4.948	66	75.322	0.000	3.993	
Q2		566	45.333	180.000	11.166	0.000	7.146	565	67.940	270.000	4.648	565	75.257	300.000	3.742	
Q1	25%	66	45.318	180.000	12.664	0.000	8.077	66	67.579	0.000	5.360	66	75.322	0.000	4.406	
Q2		566	45.333	180.000	12.646	0.000	8.061	565	67.940	270.000	5.349	565	75.257	300.000	4.399	
Q1	28%	66	45.318	180.000	11.590	0.000	7.330	66	67.579	0.000	4.782	66	75.322	0.000	3.900	
Q2		566	45.333	180.000	10.470	0.000	6.678	565	67.940	270.000	4.297	565	75.257	300.000	3.860	
Q1	35%	66	45.318	180.000	11.681	0.000	7.382	66	67.579	0.000	4.830	66	75.322	0.000	3.928	
Q2		566	45.333	180.000	10.587	0.000	6.773	565	67.940	270.000	4.420	565	75.257	300.000	3.546	
Q1	39%	66	45.318	180.000	10.581	0.000	6.817	66	67.579	0.000	4.295	66	75.322	0.000	3.514	
Q2		566	45.333	180.000	7.387	0.000	4.612	565	67.940	270.000	2.855	565	75.257	300.000	2.135	
Q1	50%	66	45.318	180.000	11.302	0.000	7.273	66	67.579	0.000	4.820	66	75.322	0.000	3.899	
Q2		566	45.333	180.000	11.317	0.000	7.276	565	67.940	270.000	4.821	565	75.257	300.000	3.900	

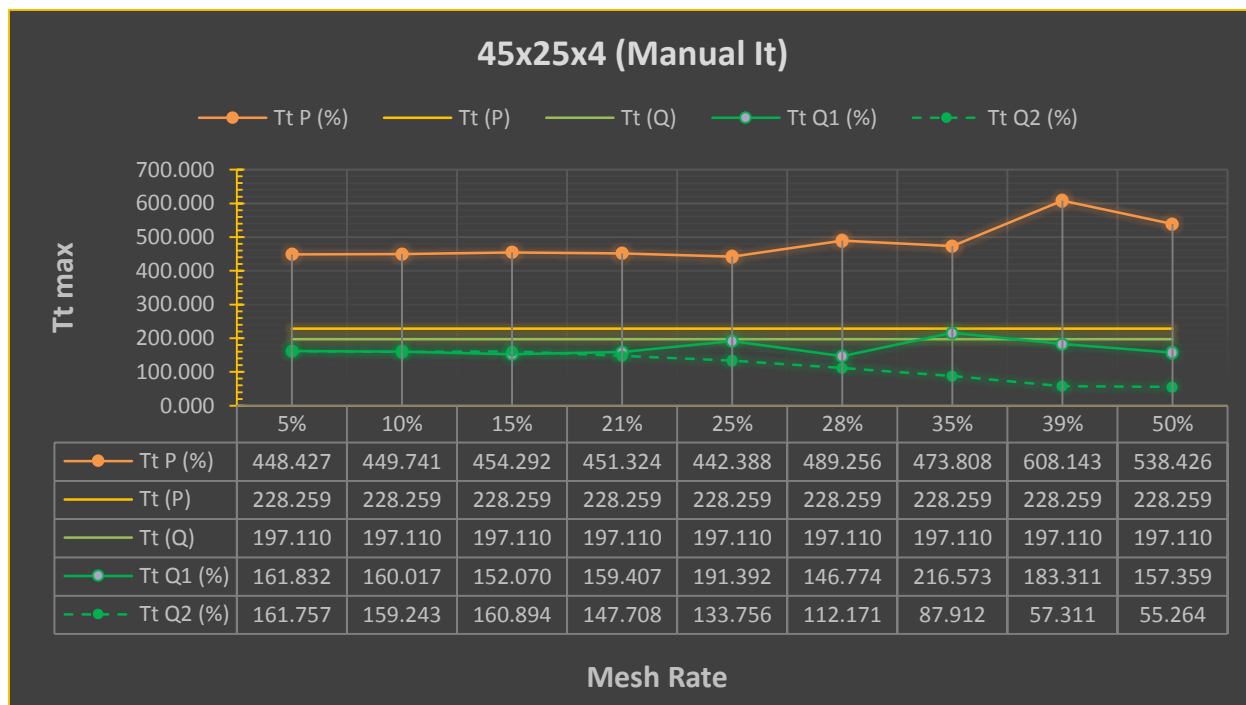
Πίνακας 16: Συντεταγμένες και Q τιμές I (Manual It)



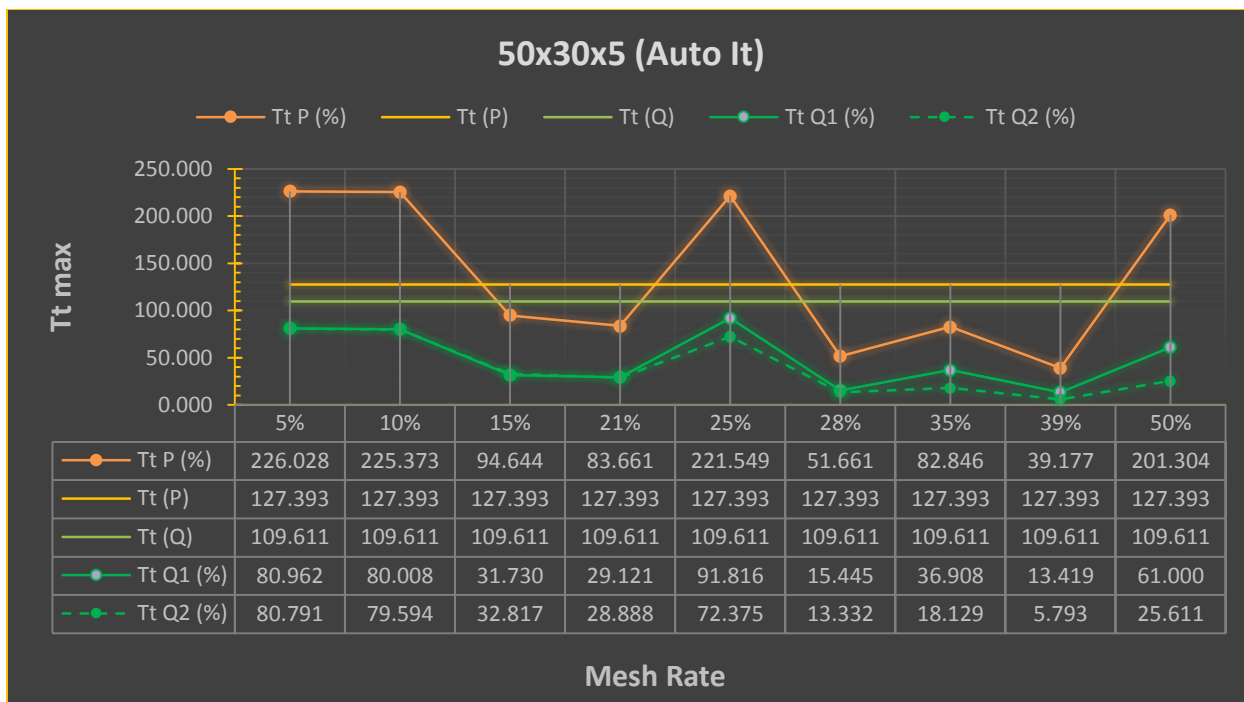
Διαγράμματα



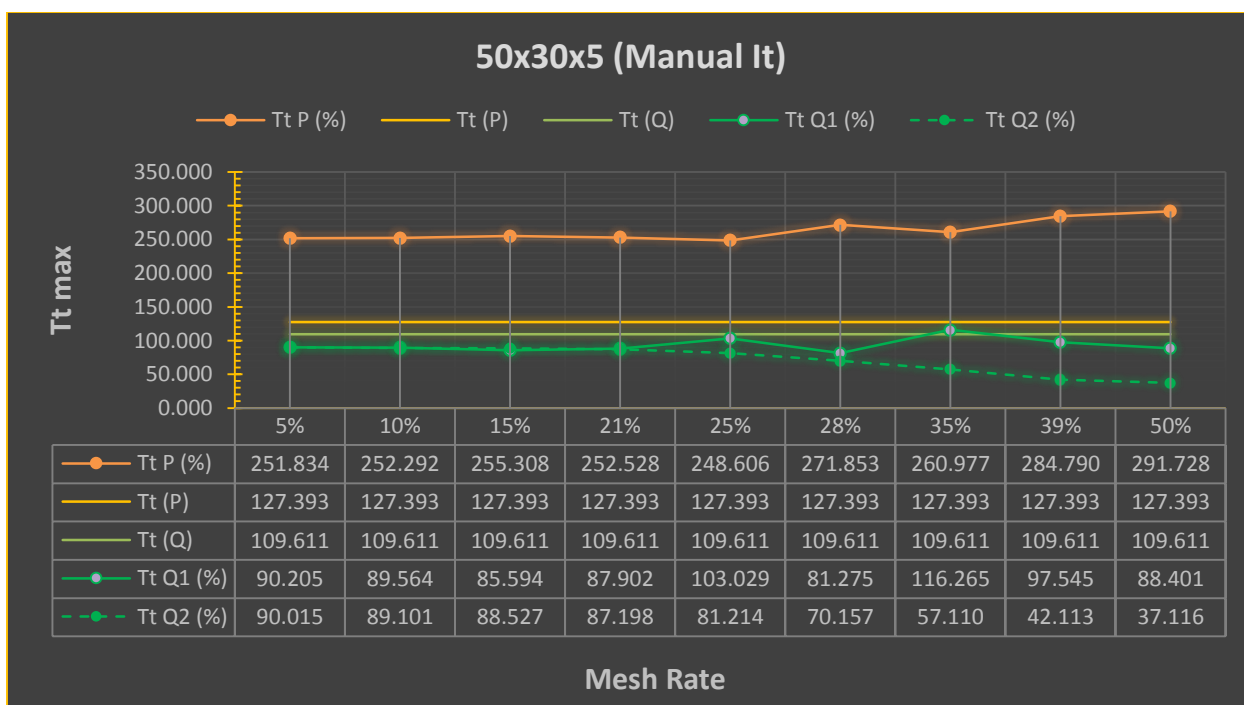
Διάγραμμα 7: TtP και TtQ για 45x25x4 (Auto It)



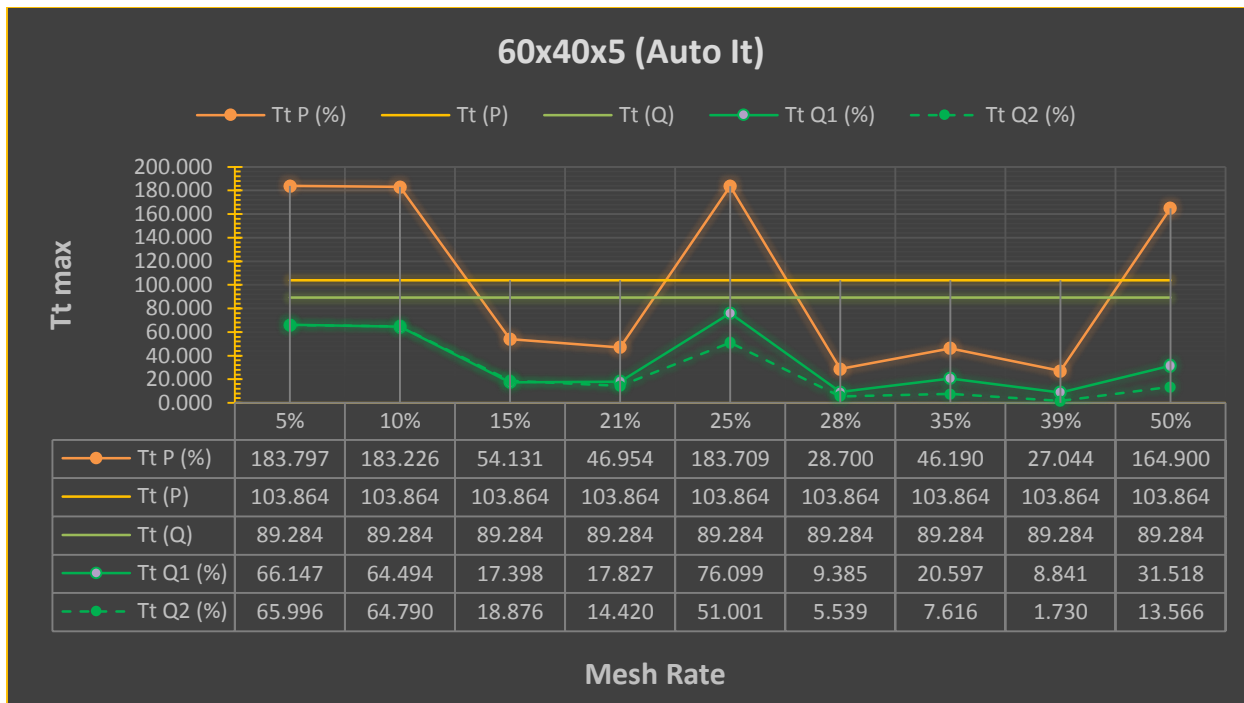
Διάγραμμα 8: TtP και TtQ για 45x25x4 (Manual It)



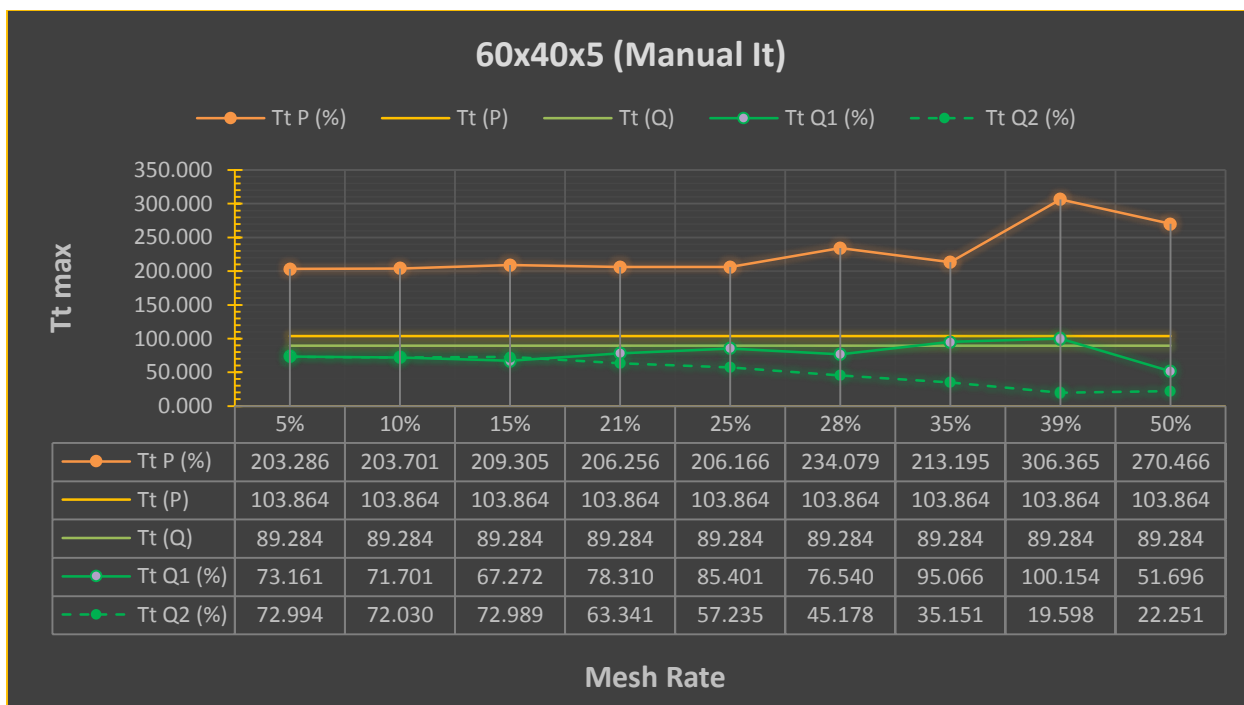
Διάγραμμα 9: TtP και TtQ για 50x30x5 (Auto It)



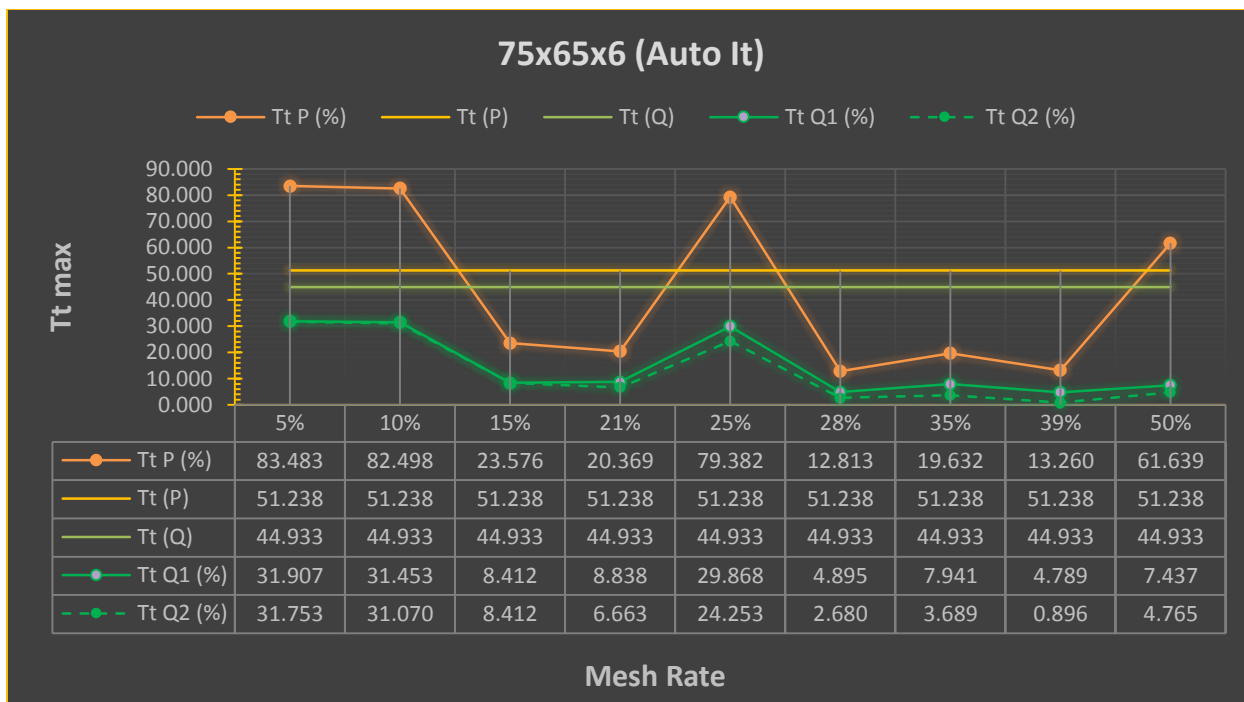
Διάγραμμα 10: TtP και TtQ για 50x30x5 (Manual It)



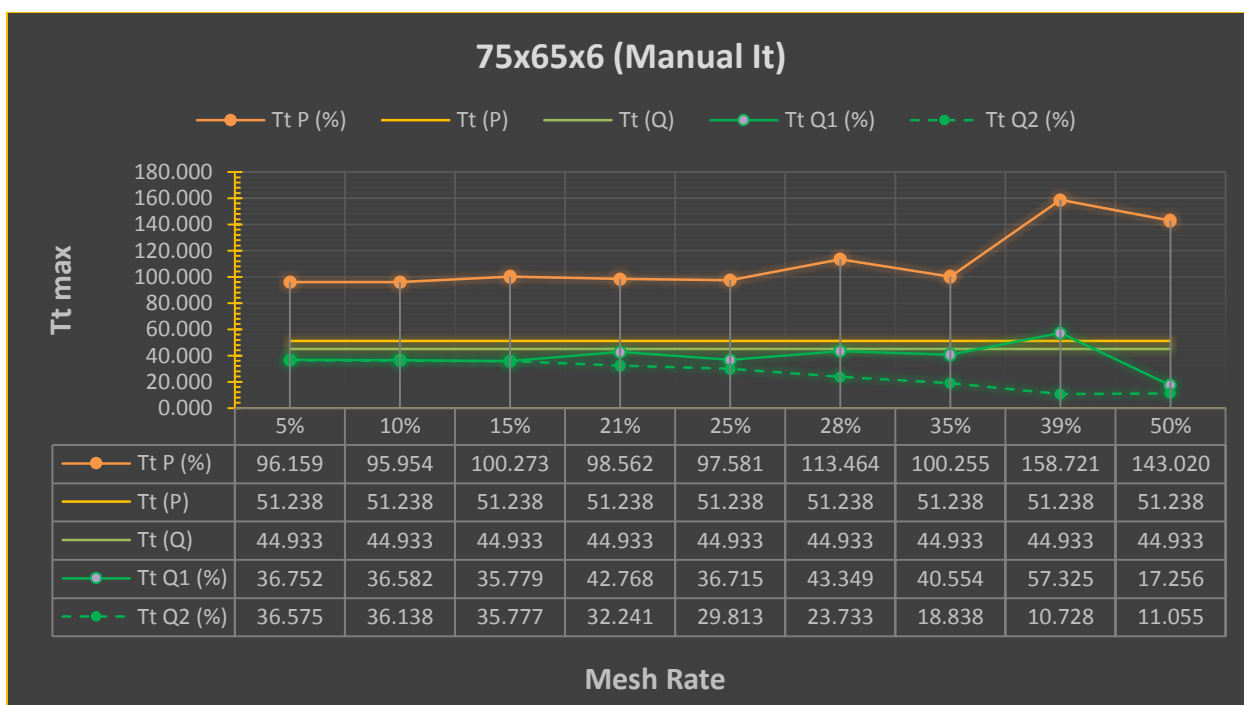
Διάγραμμα 11: TtP και TtQ για 60x40x5 (Auto It)



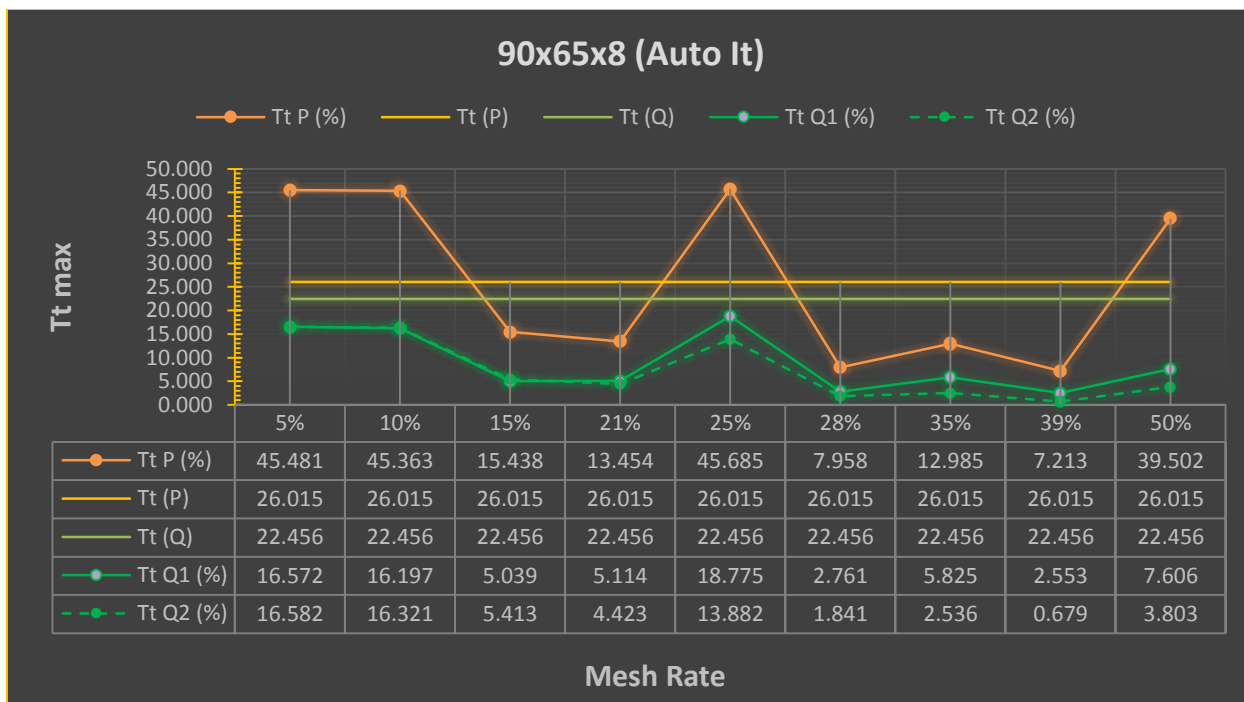
Διάγραμμα 12: TtP και TtQ για 60x40x5 (Manual It)



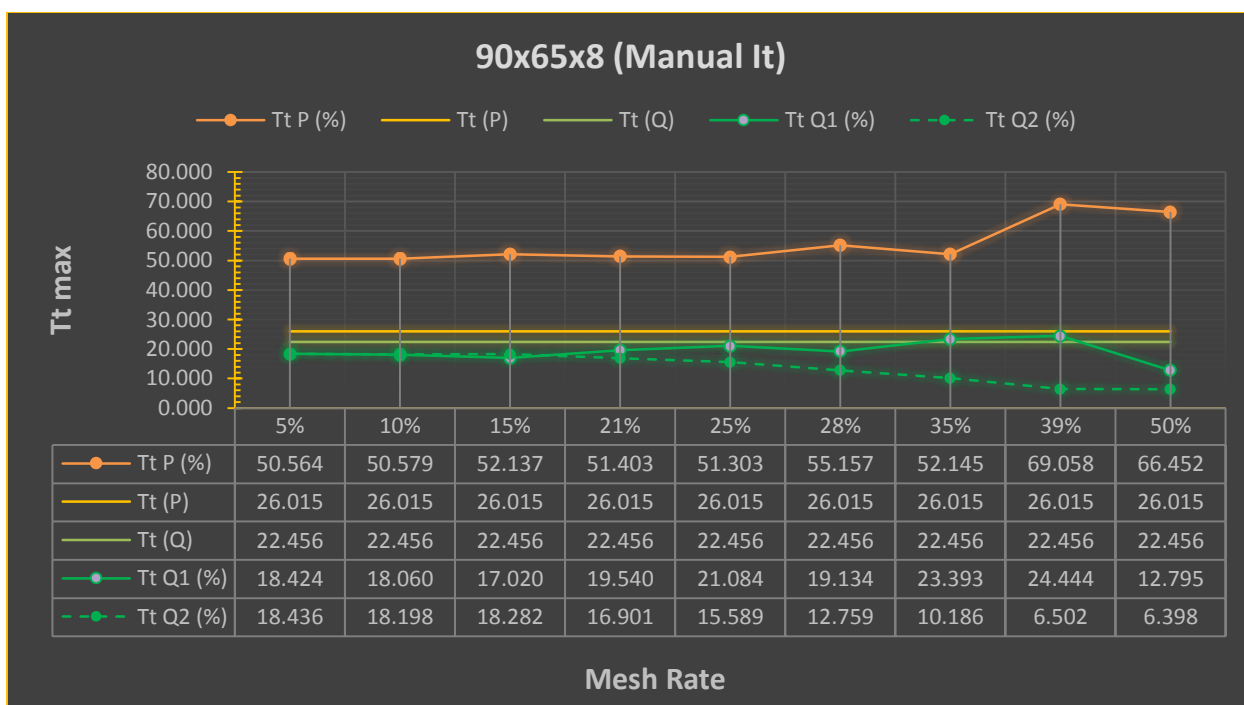
Διάγραμμα 13: TtP και TtQ για 75x65x6 (Auto It)



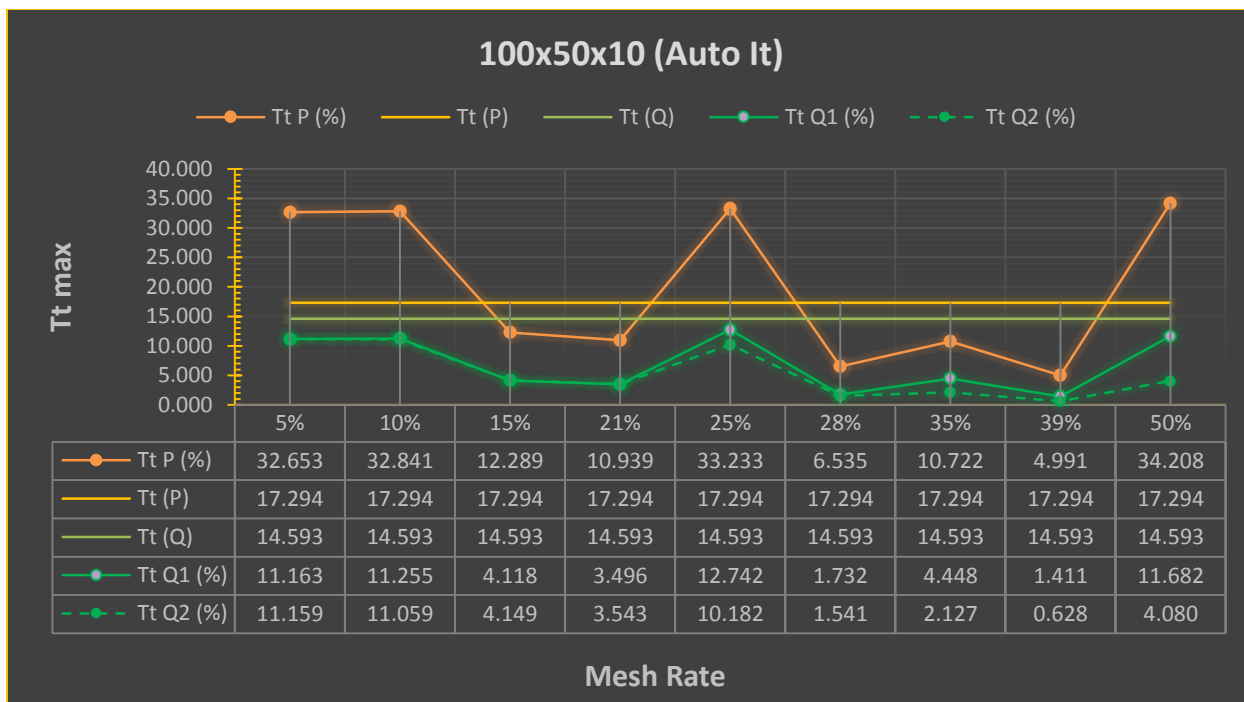
Διάγραμμα 14: TtP και TtQ για 75x65x6 (Manual It)



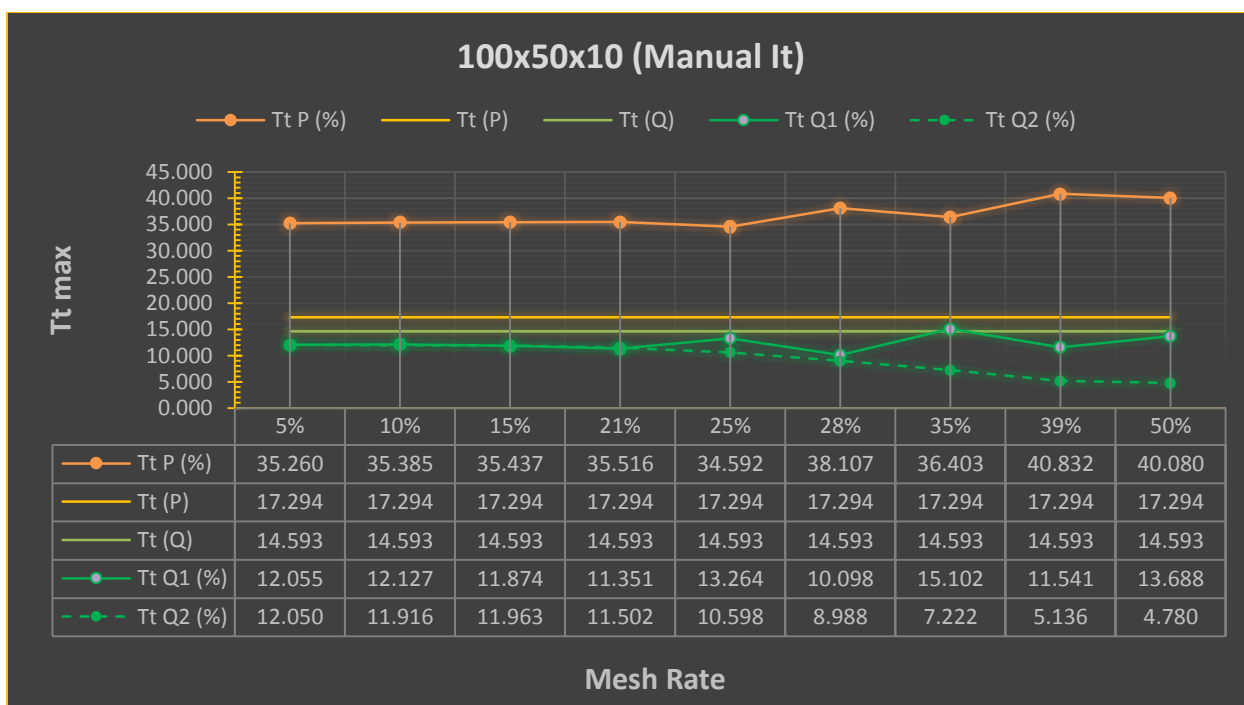
Διάγραμμα 15: TtP και TtQ για 90x65x6 (Auto It)



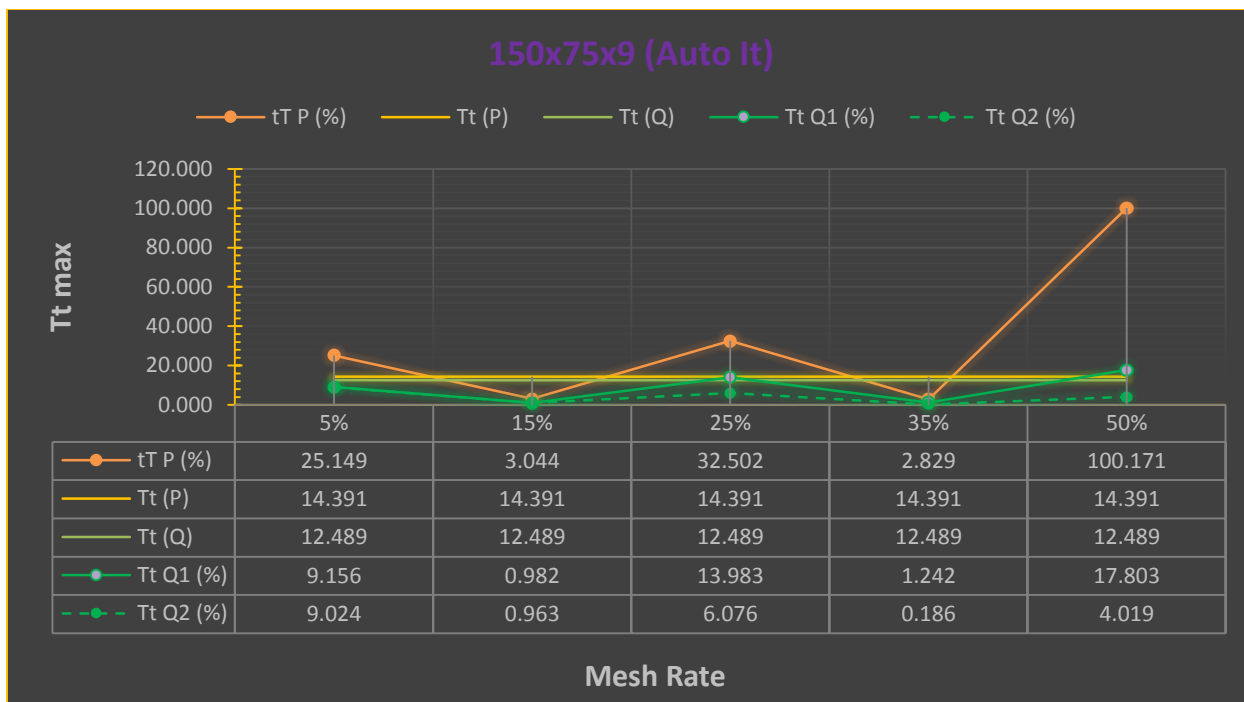
Διάγραμμα 16: TtP και TtQ για 90x65x6 (Manual It)



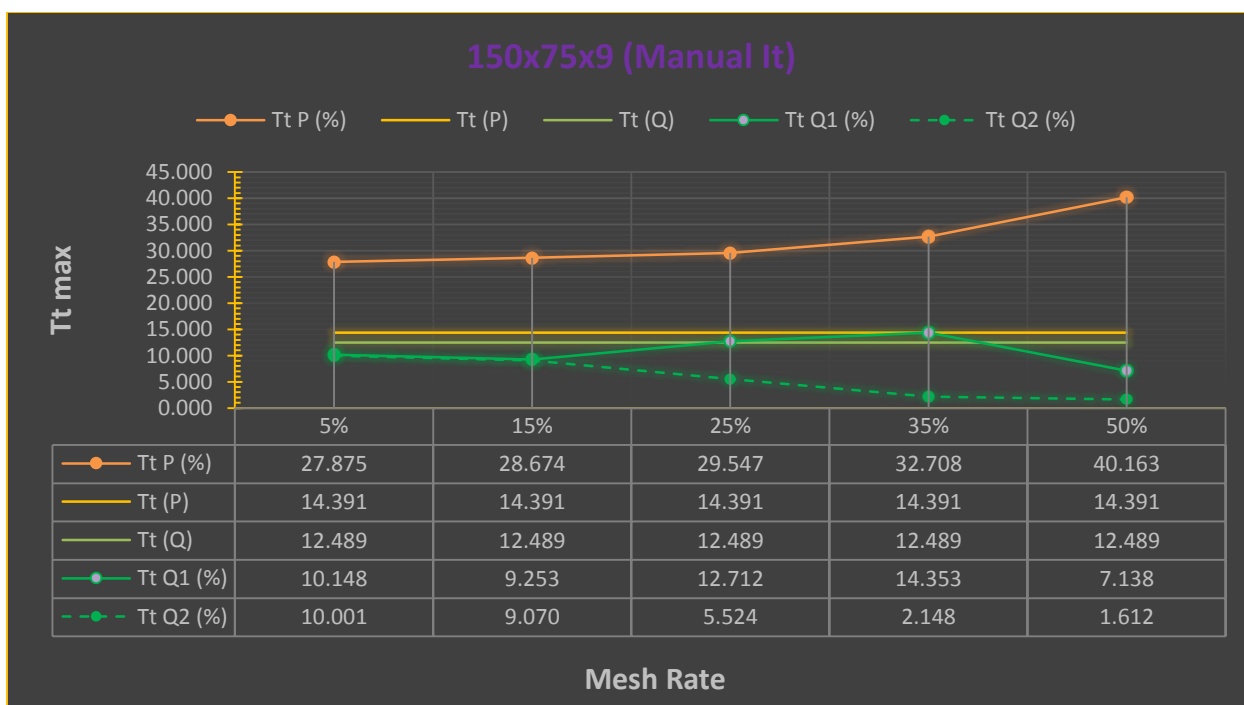
Διάγραμμα 17: TtP και TtQ για 100x50x10 (Auto It)



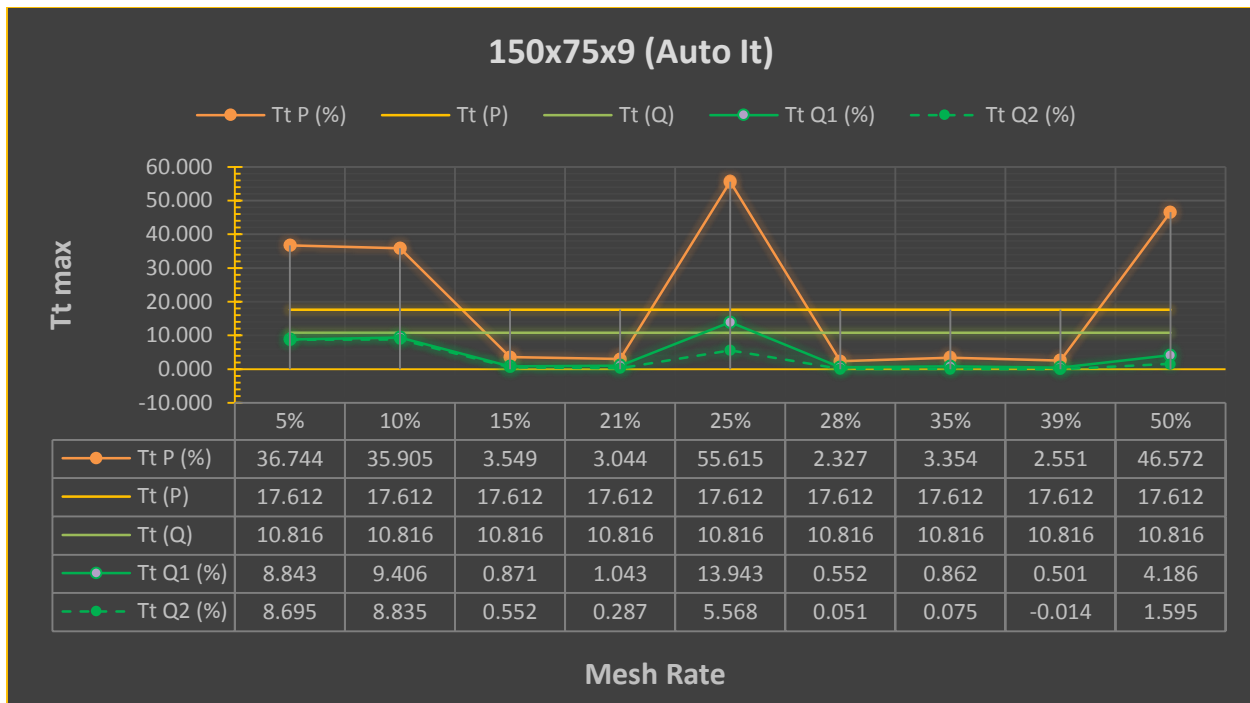
Διάγραμμα 18: TtP και TtQ για 100x50x10 (Manual It)



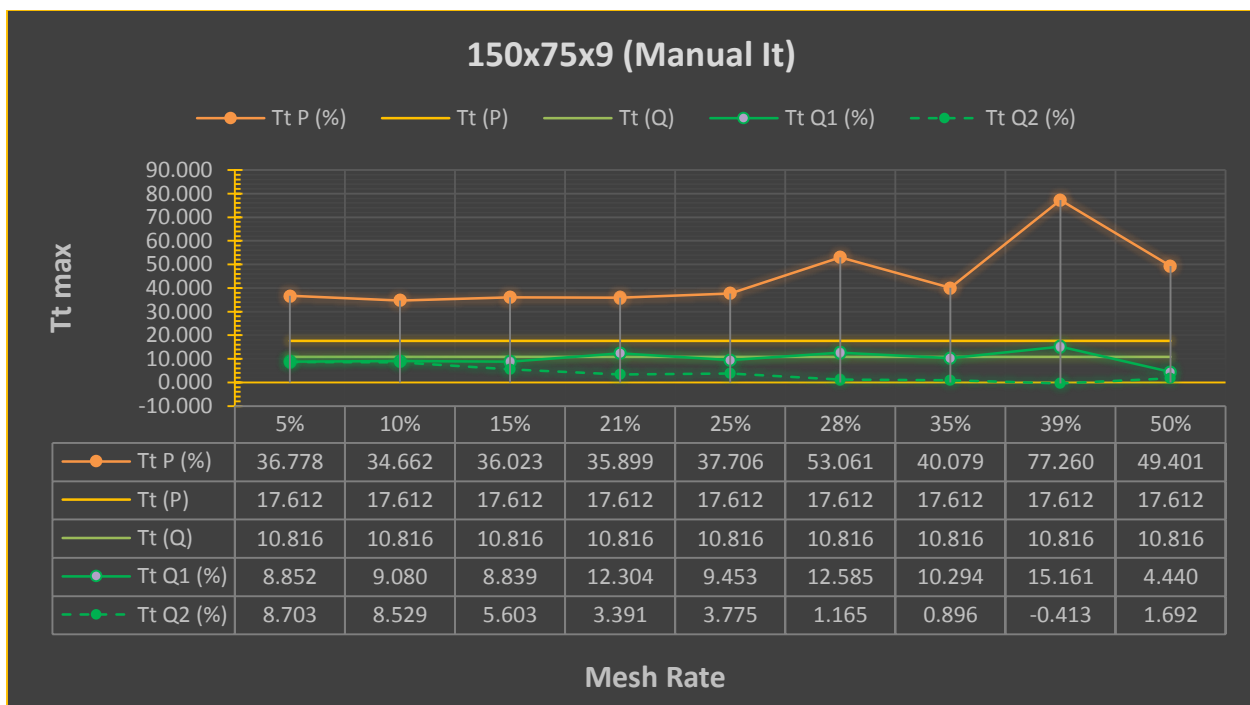
Διάγραμμα 19: TtP και TtQ για 150x75x9 (Auto It) ----Radius 12mm



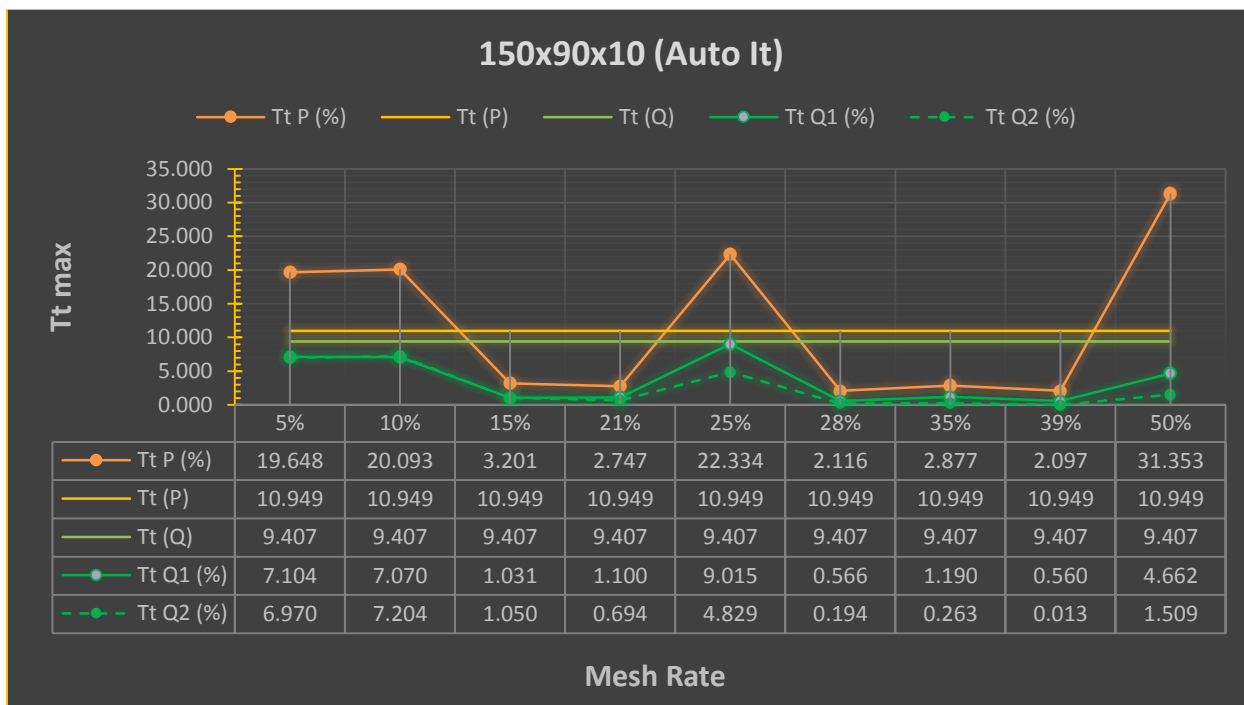
Διάγραμμα 20: TtP και TtQ για 150x75x9 (Manual It) ----Radius 12mm



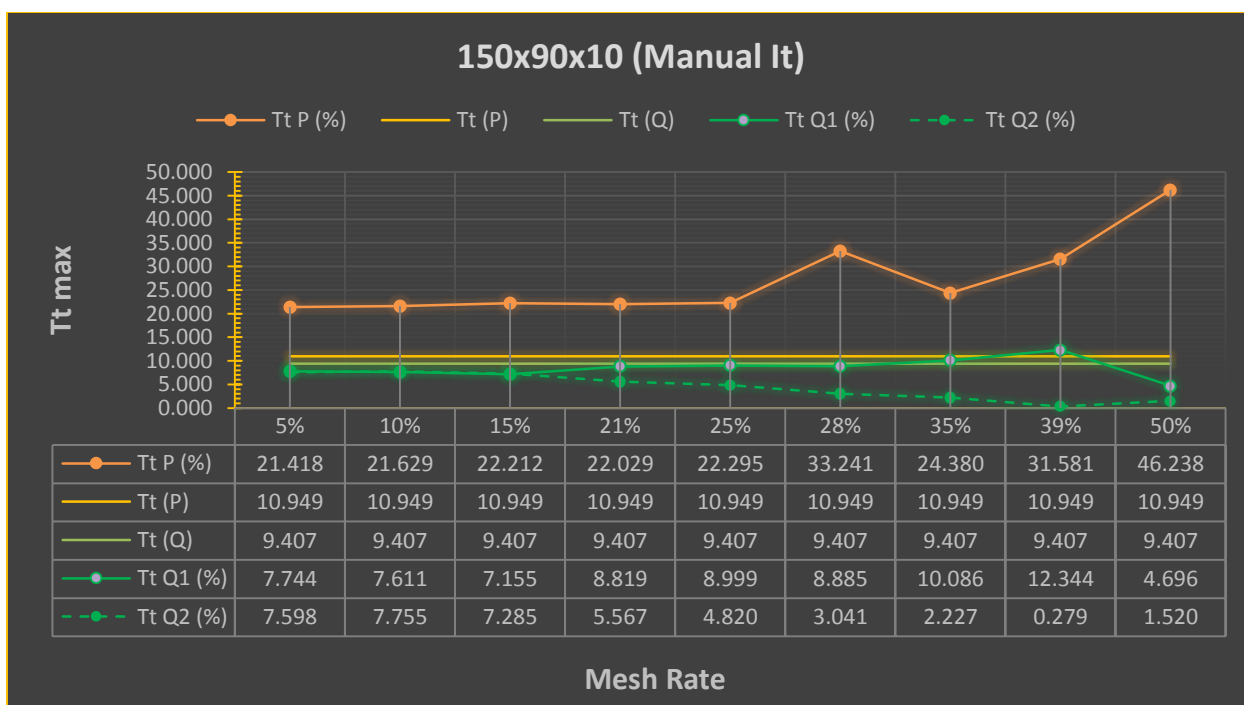
Διάγραμμα 21: TtP και TtQ για 150x75x9 (Auto It) ----Radius 2mm



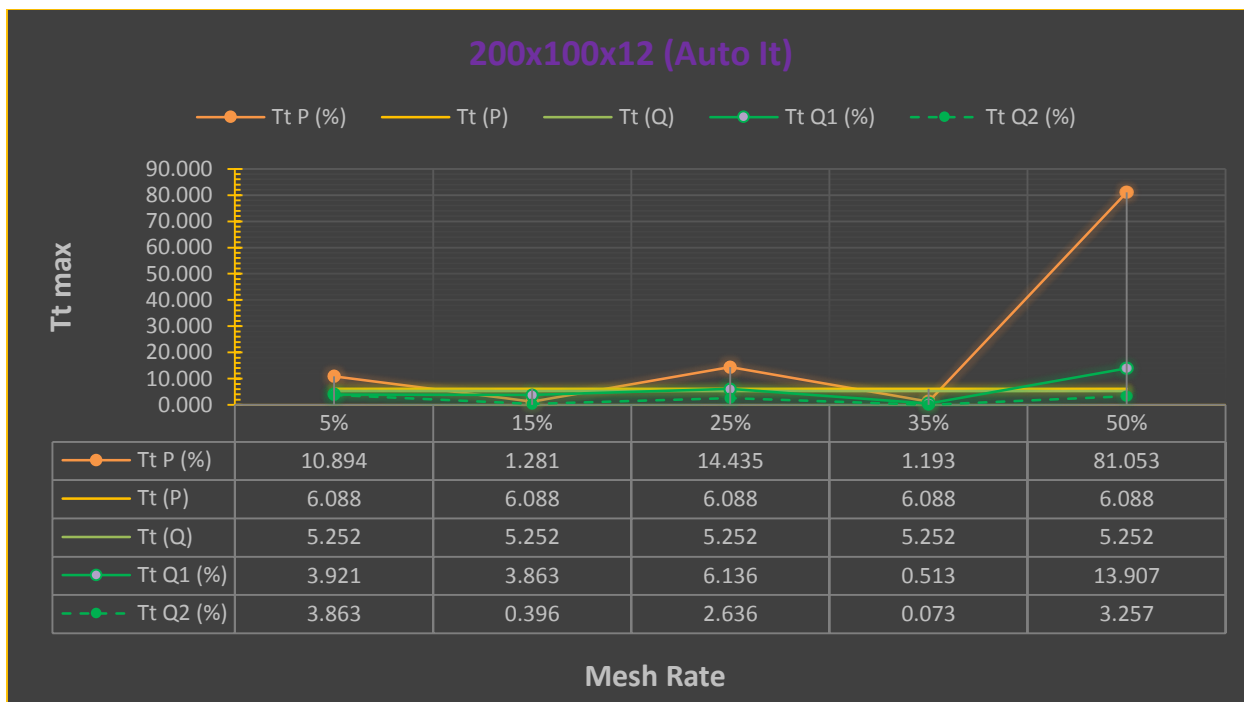
Διάγραμμα 22: TtP και TtQ για 150x75x9 (Manual It) ----Radius 2mm



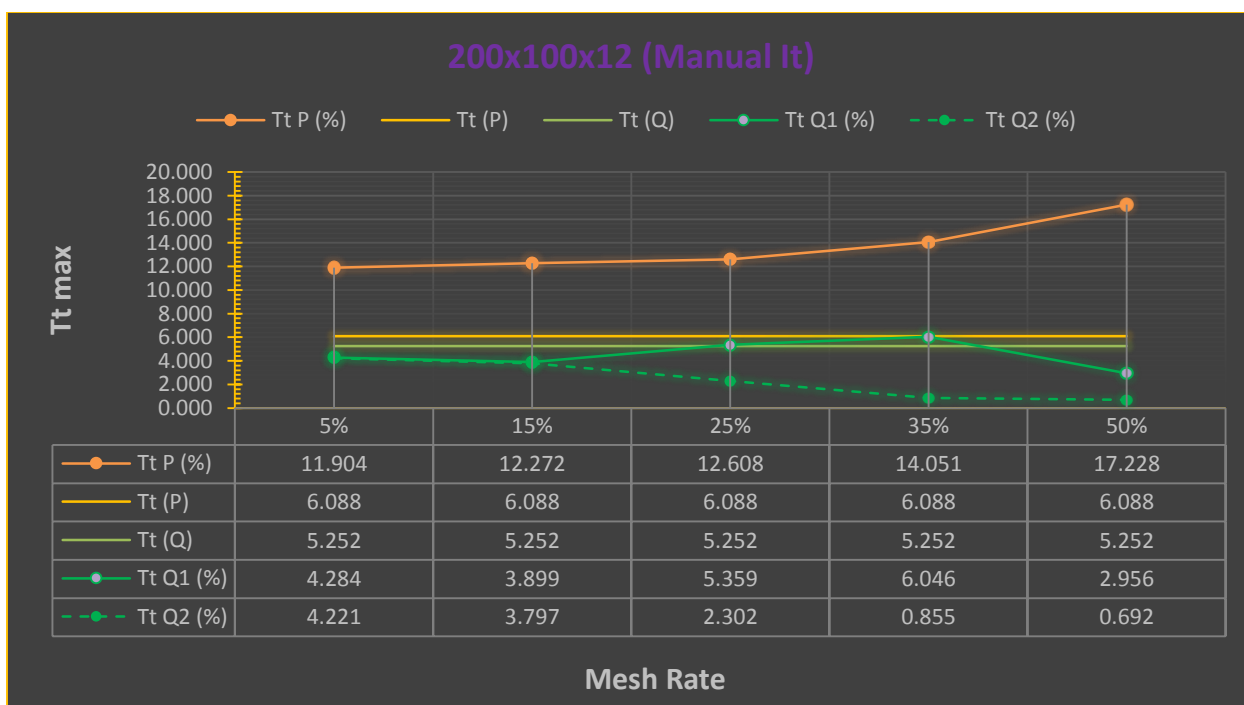
Διάγραμμα 23: TtP και TtQ για 150x90x10 (Auto It)



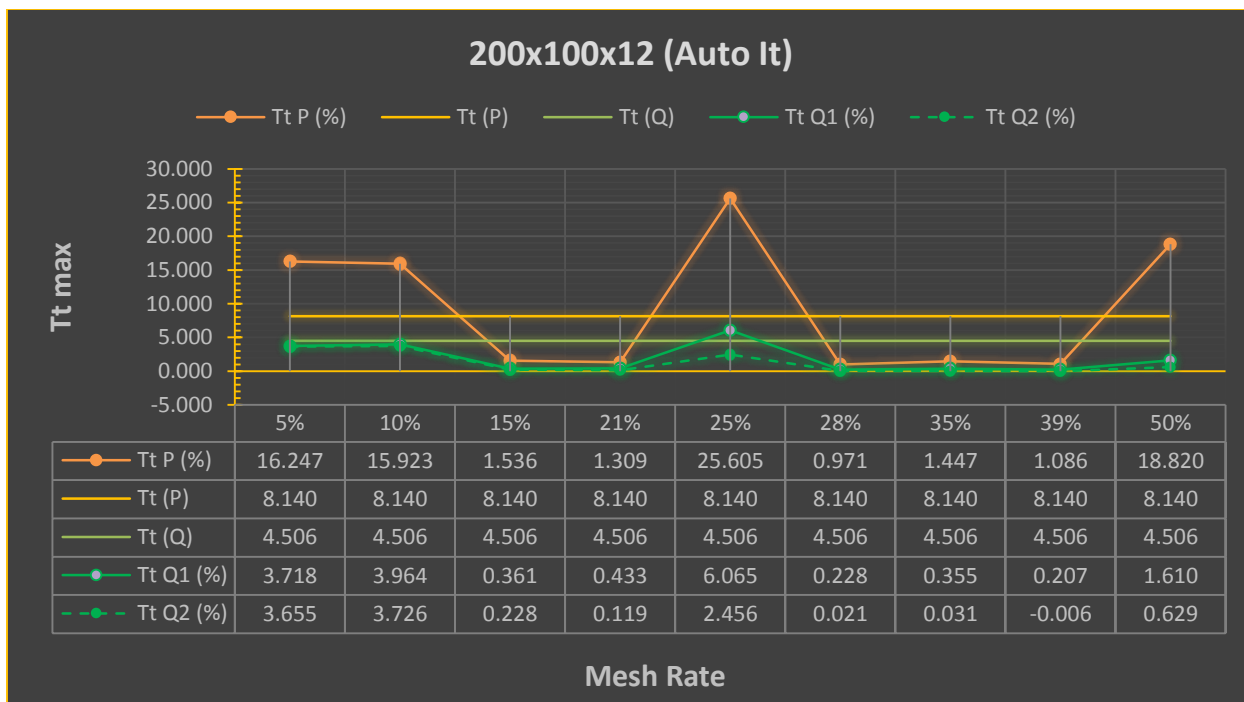
Διάγραμμα 24: TtP και TtQ για 150x90x10 (Manual It)



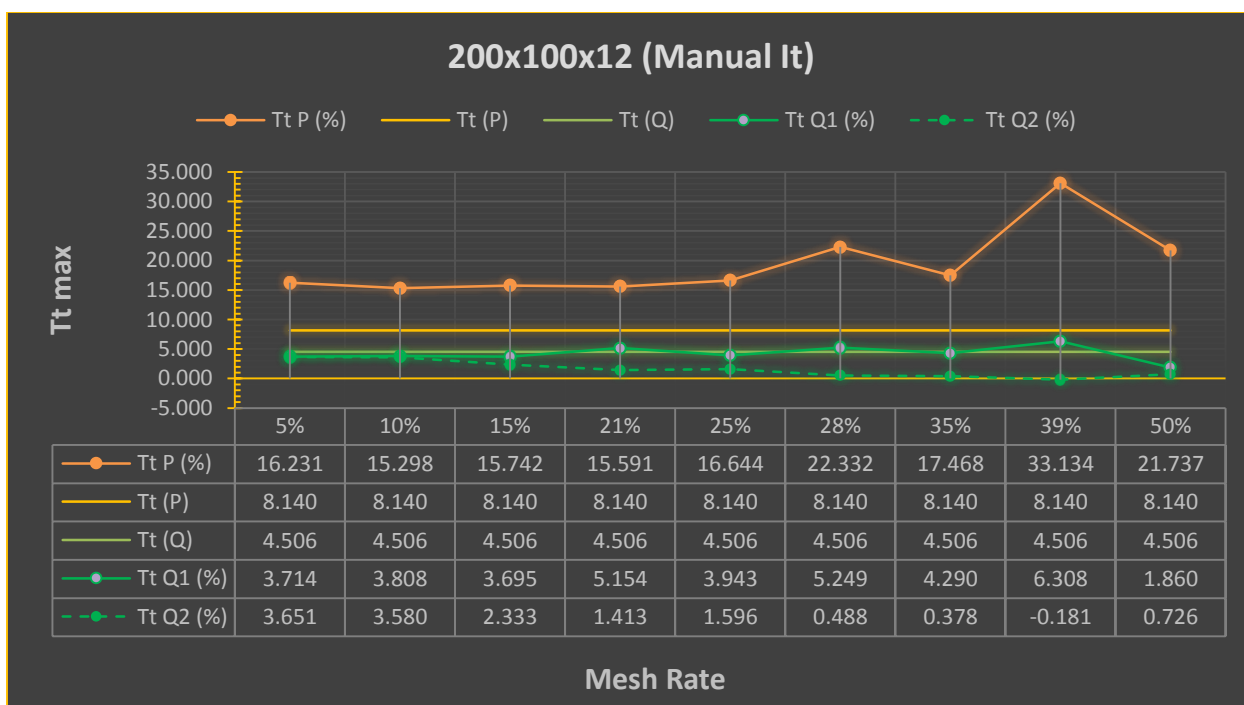
Διάγραμμα 25: TtP και TtQ για 200x100x12 (Auto It)----Radius 15mm



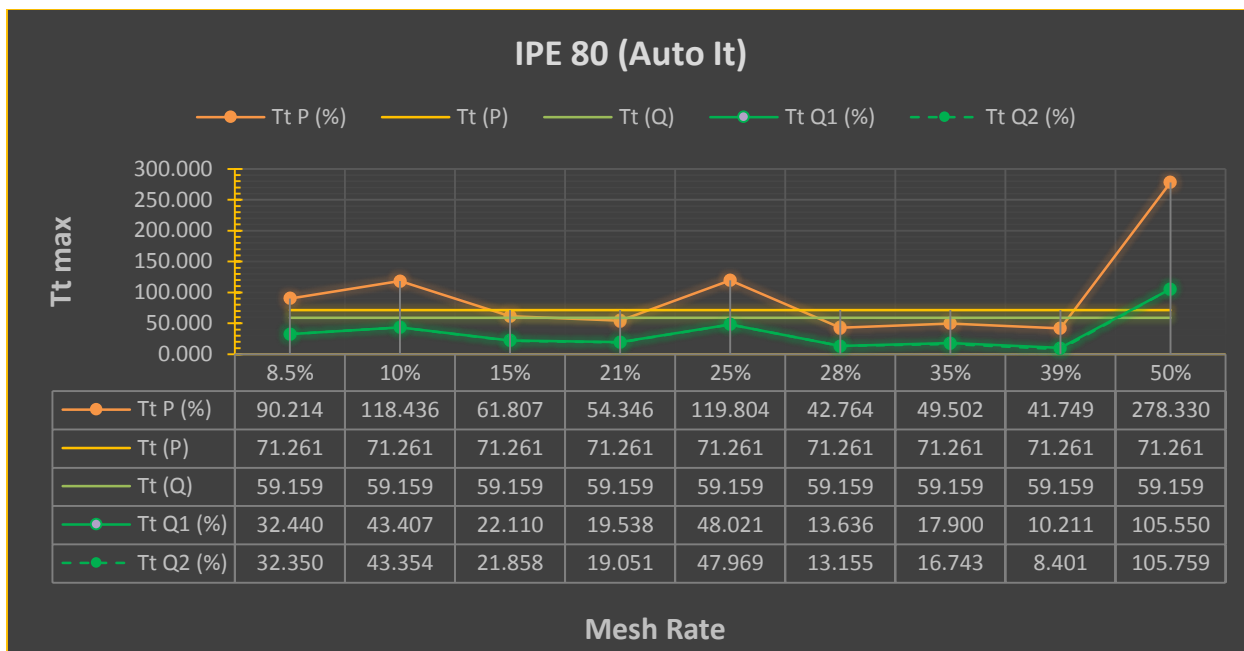
Διάγραμμα 26: TtP και TtQ για 150x90x10 (Manual It)----Radius 15mm



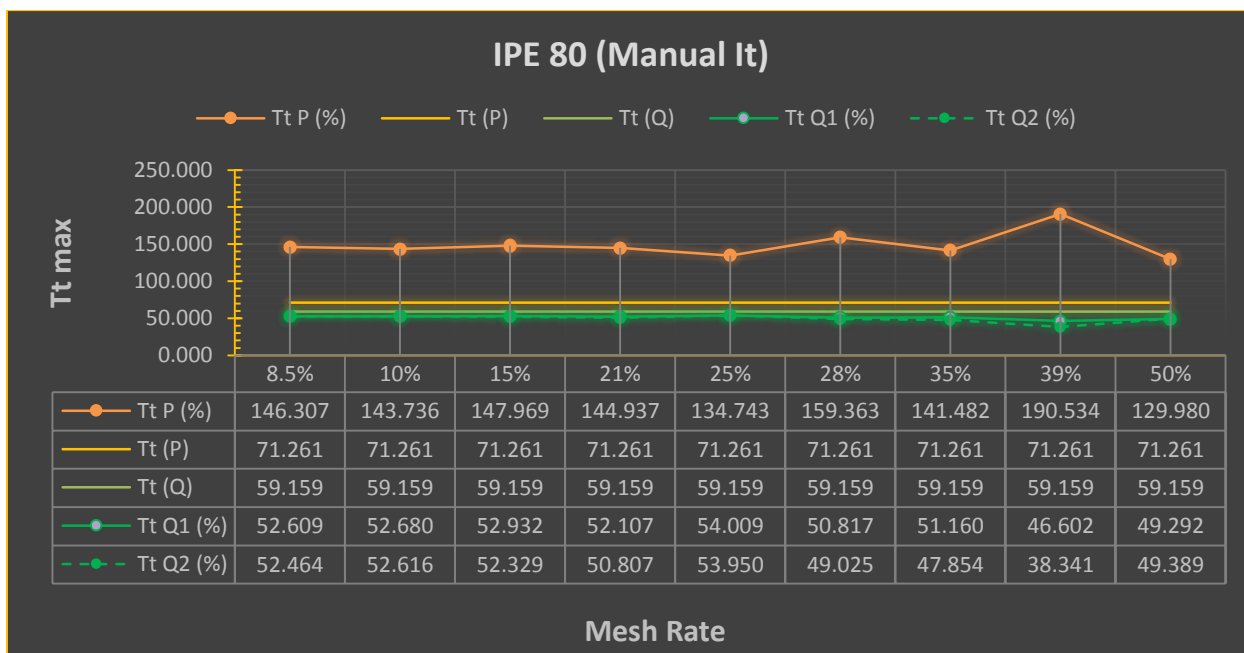
Διάγραμμα 27: TtP και TtQ για 200x100x12 (Auto It)---Radius 2mm



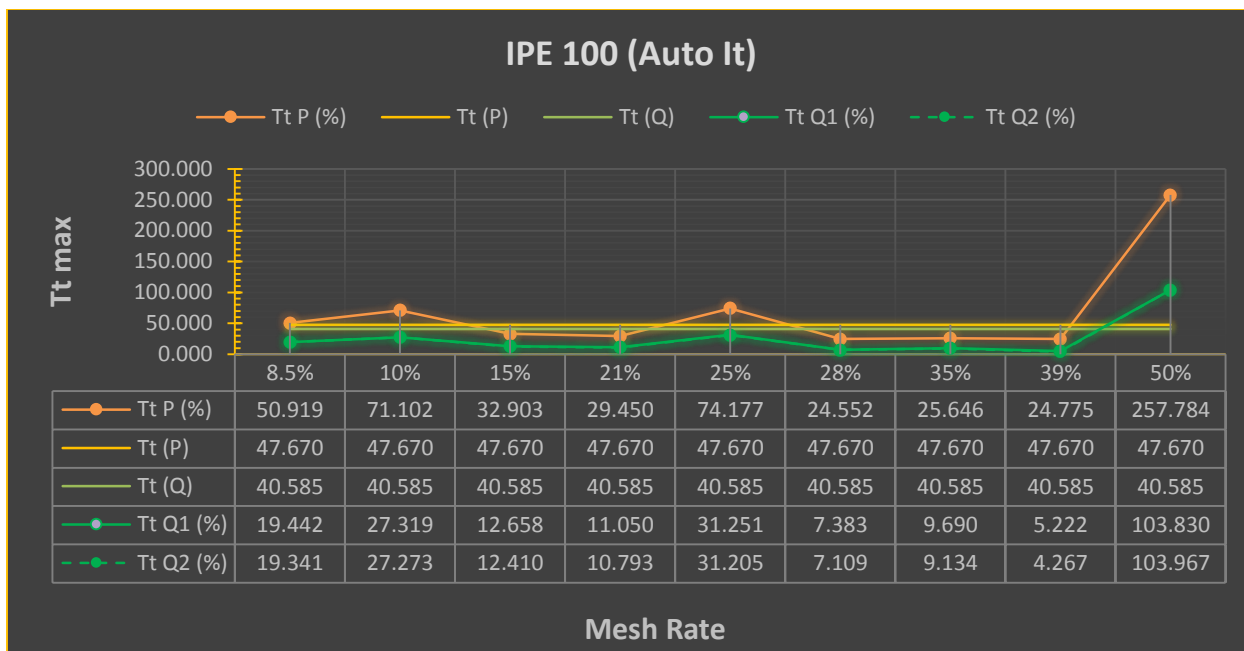
Διάγραμμα 28: TtP και TtQ για 200x100x12 (Manual It)---Radius 2mm



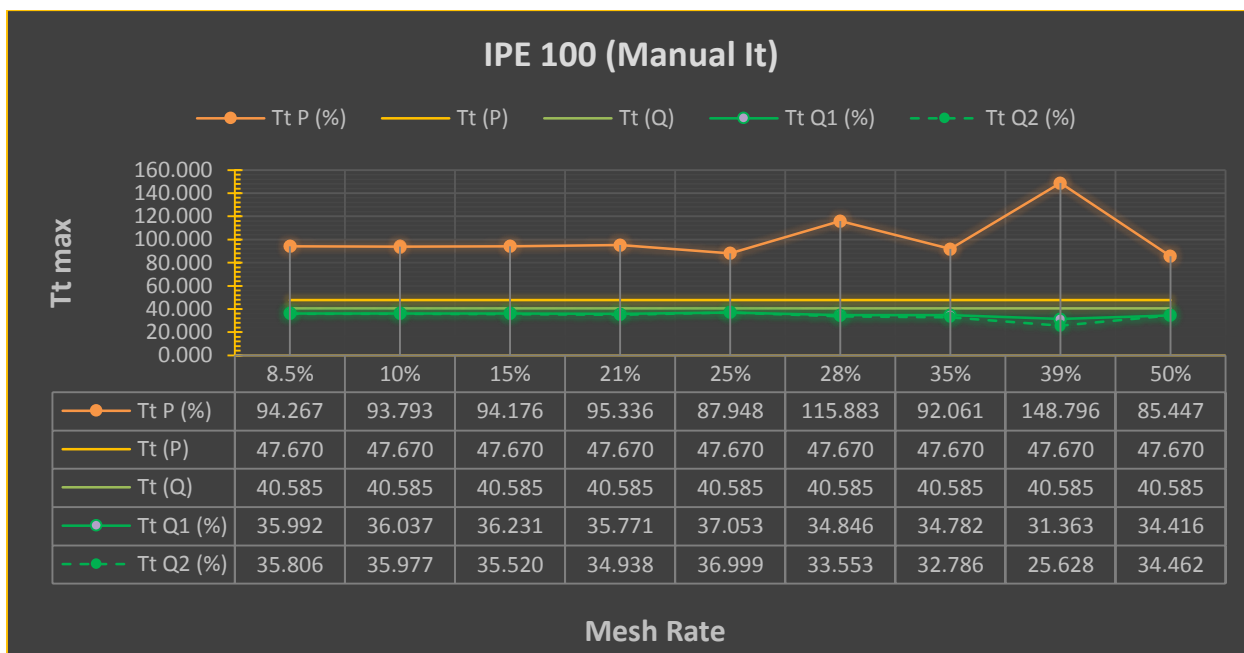
Διάγραμμα 29: TtP και TtQ για IPE 80 (Auto It)



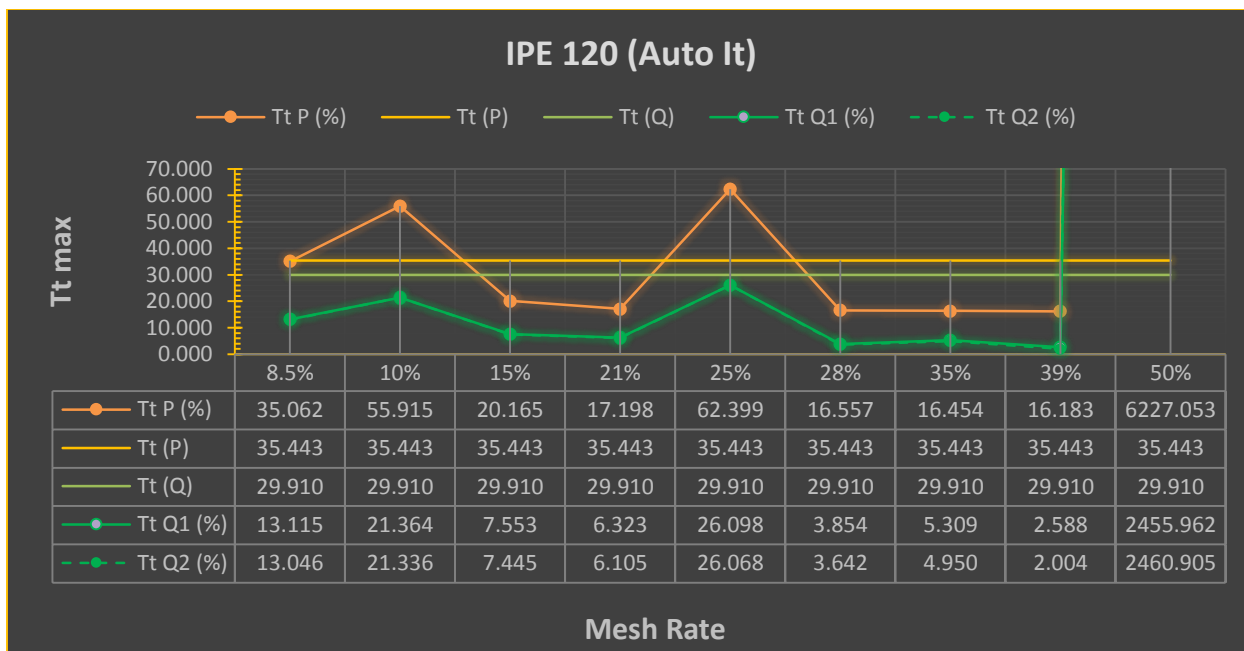
Διάγραμμα 30: TtP και TtQ για IPE 80 (Manual It)



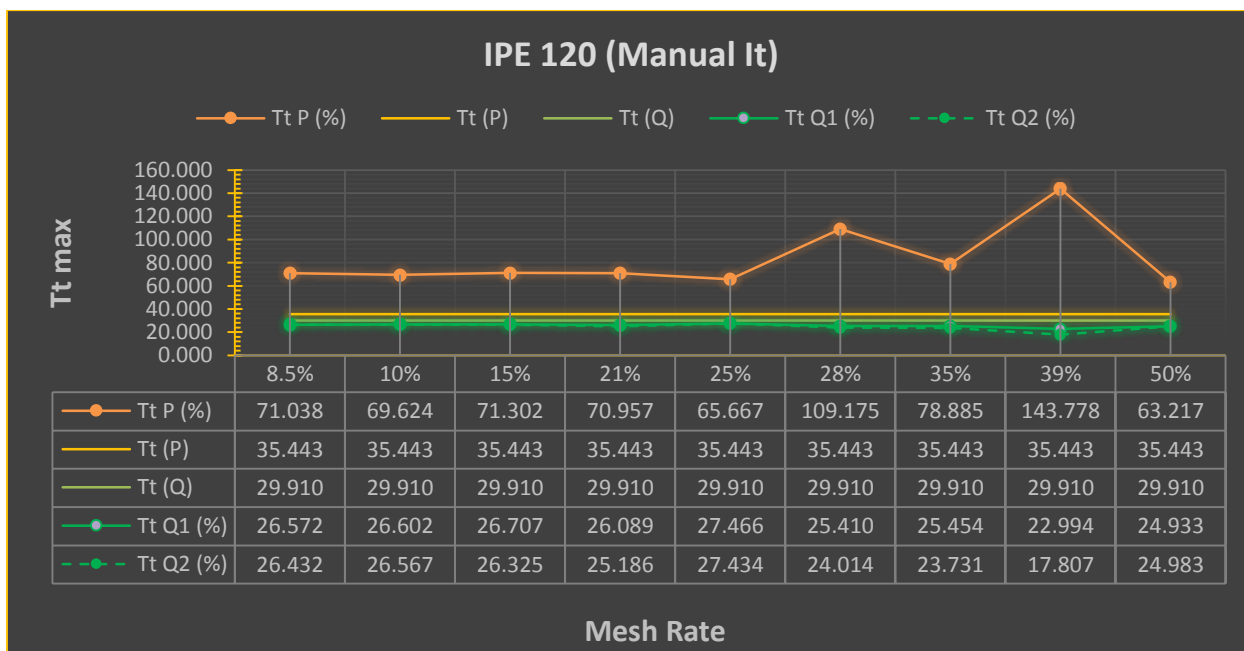
Διάγραμμα 31: TtP και TtQ για IPE 100 (Auto It)



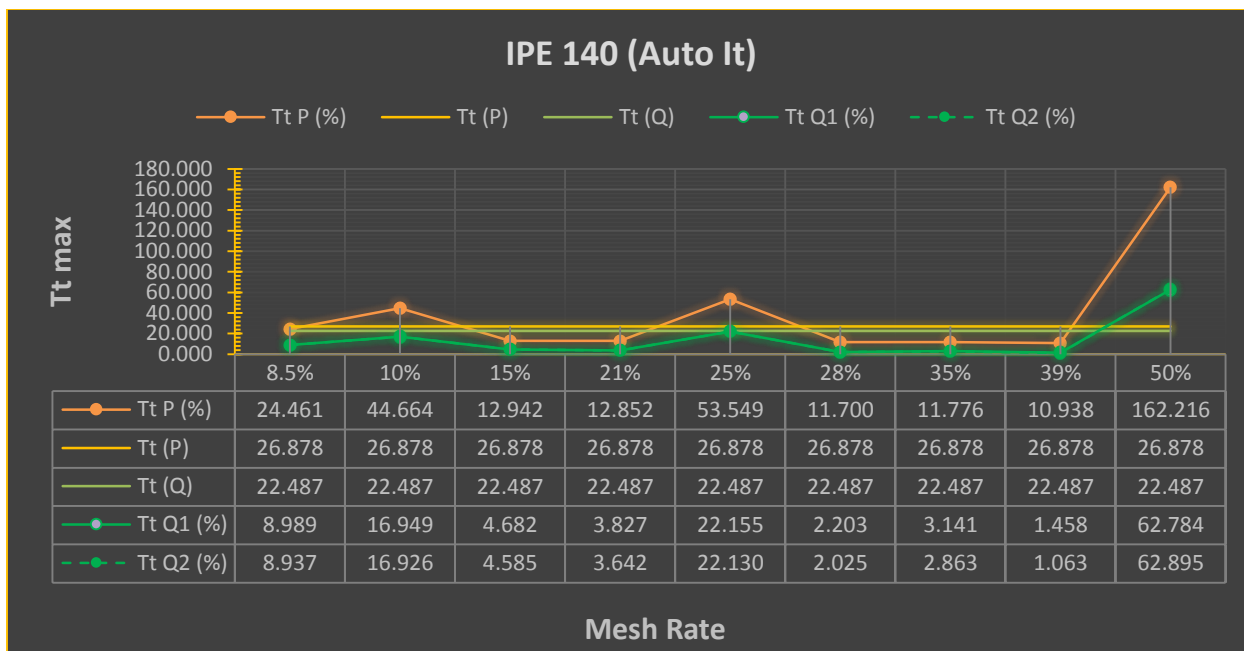
Διάγραμμα 32: TtP και TtQ για IPE 100 (Manual It)



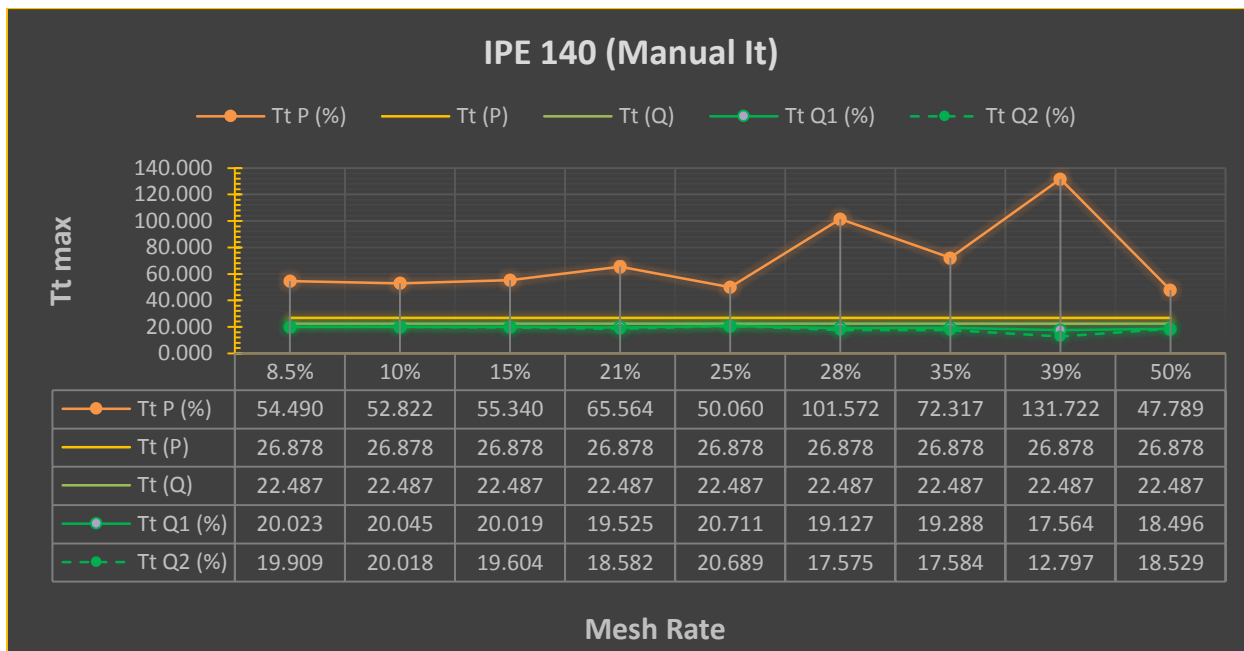
Διάγραμμα 33: TtP και TtQ για IPE 120 (Auto It)



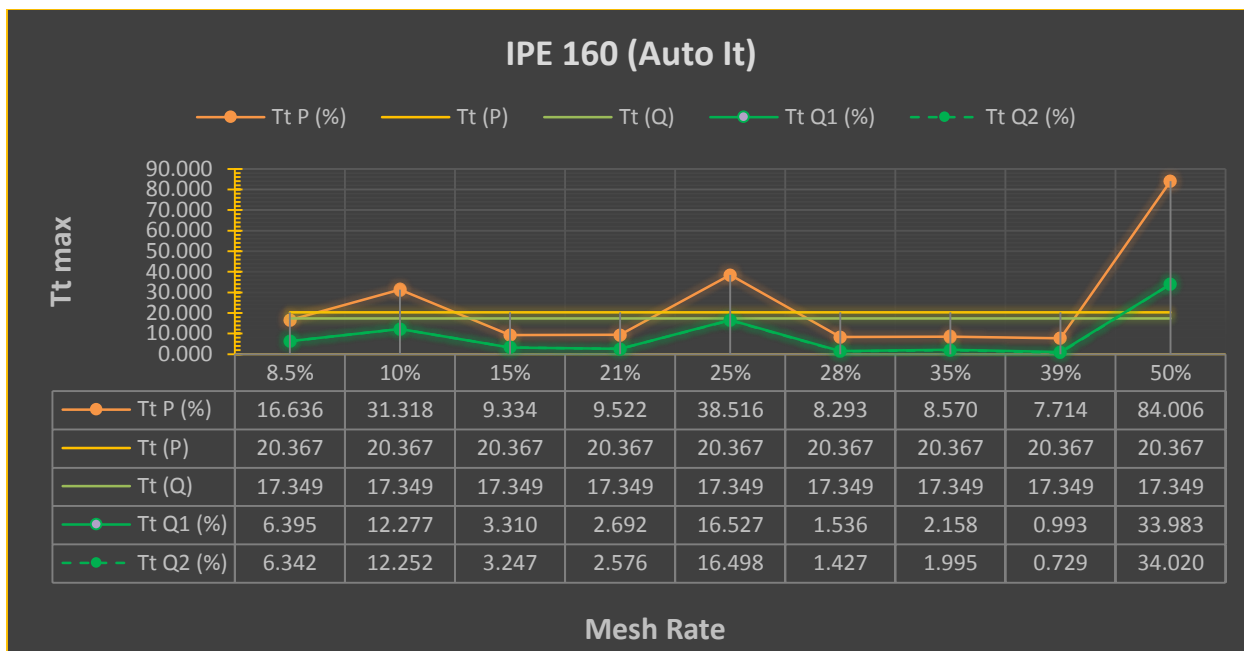
Διάγραμμα 34: TtP και TtQ για IPE 120 (Manual It)



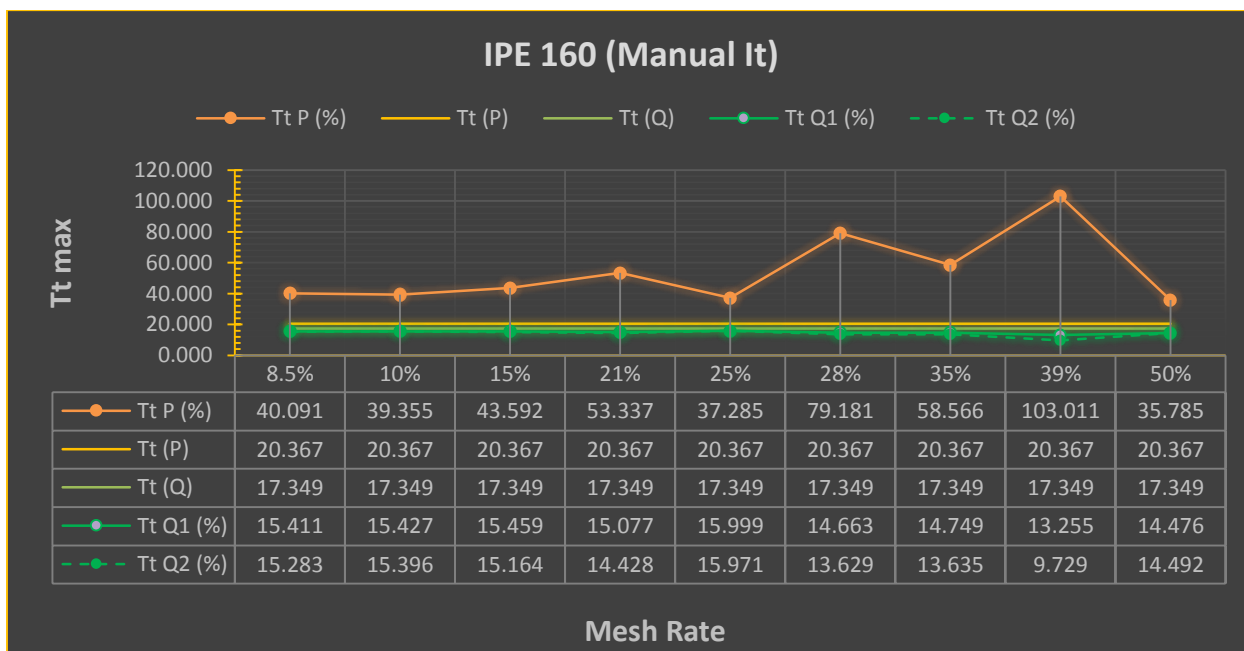
Διάγραμμα 35: TtP και TtQ για IPE 140 (Auto It)



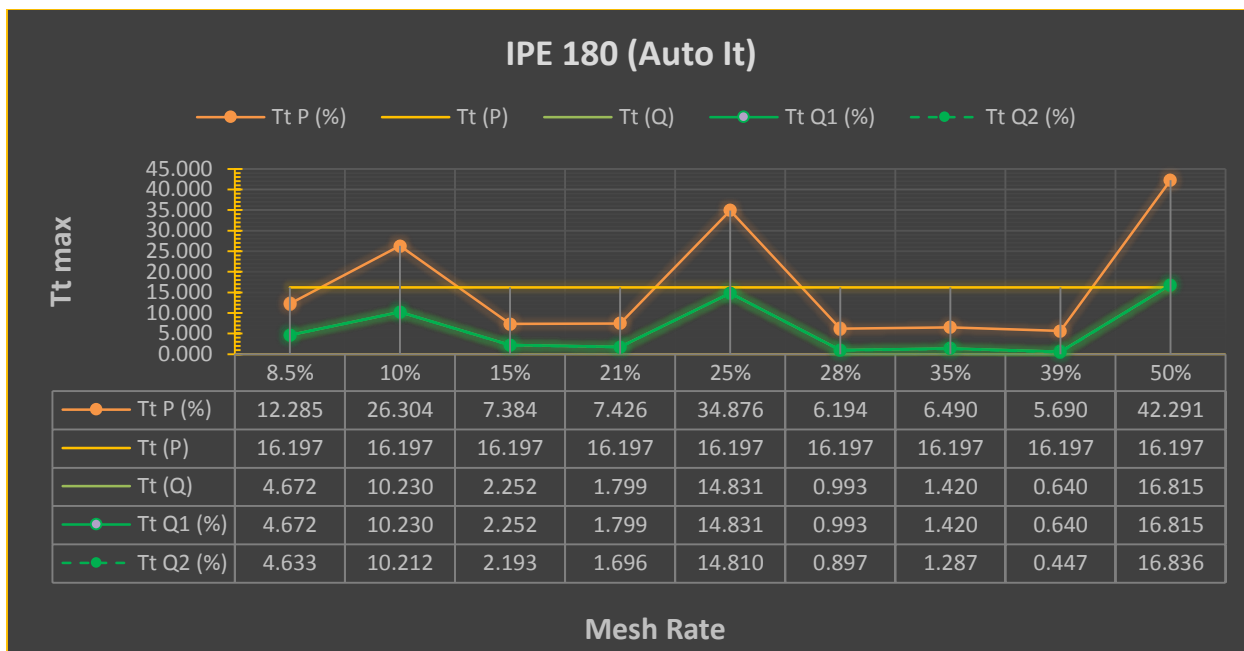
Διάγραμμα 36: TtP και TtQ για IPE 140 (Manual It)



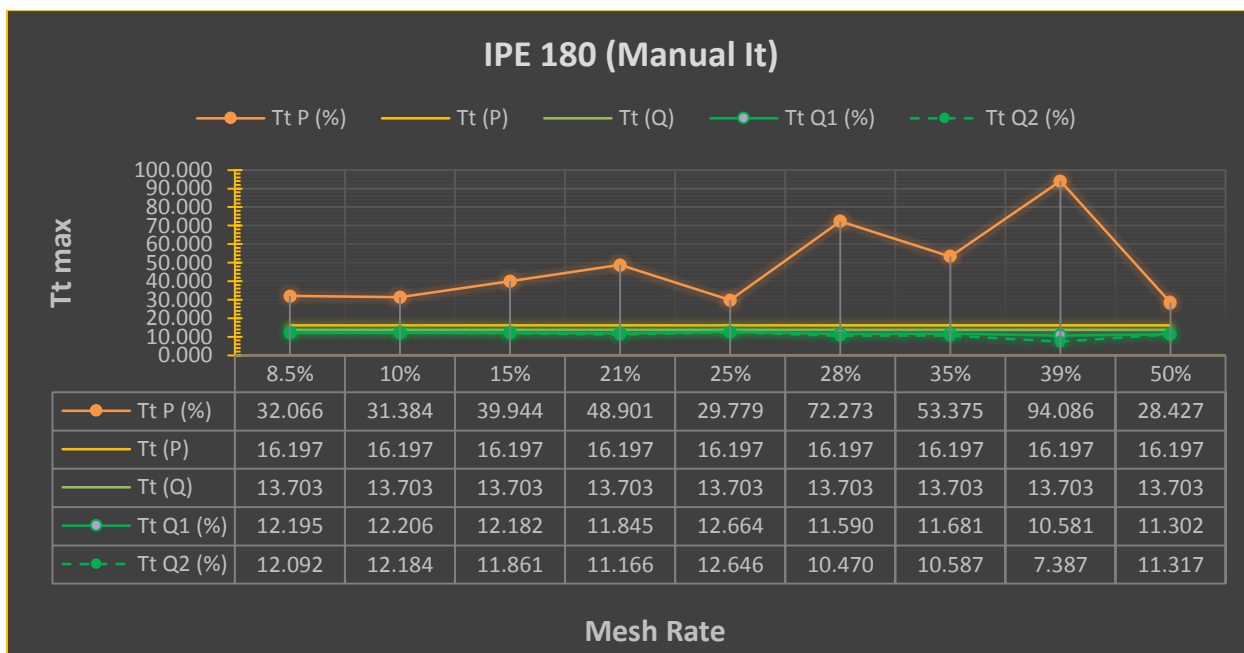
Διάγραμμα 37: TtP και TtQ για IPE 160 (Auto It)



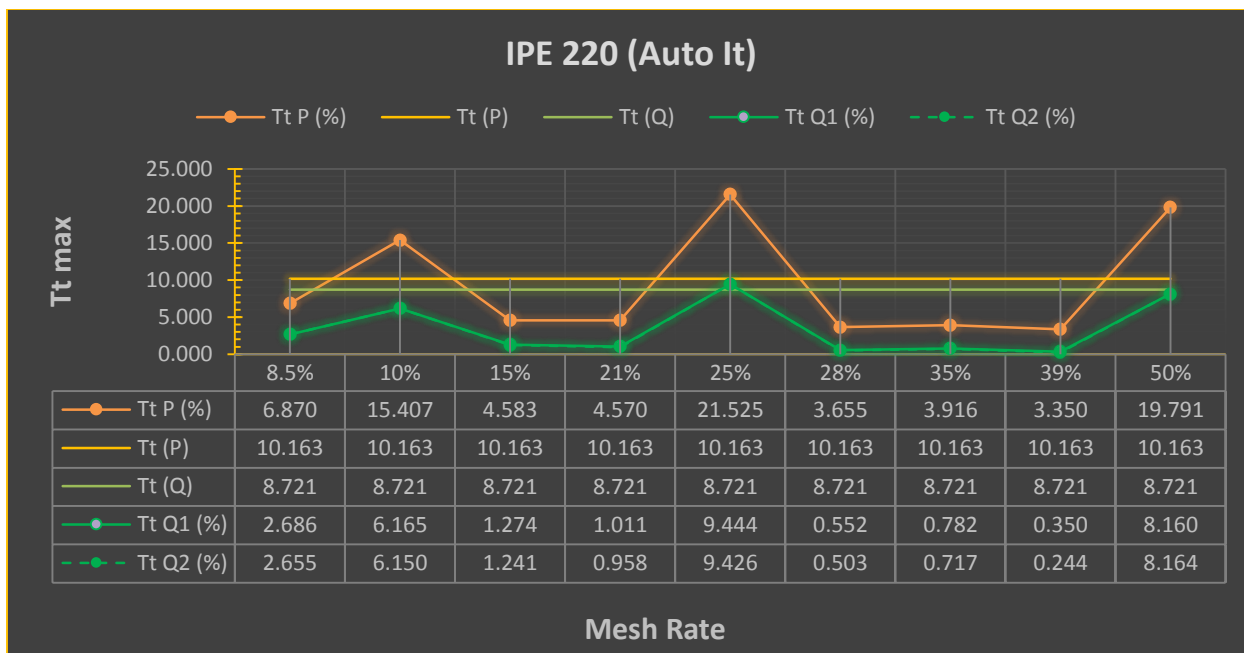
Διάγραμμα 38: TtP και TtQ για IPE 160 (Manual It)



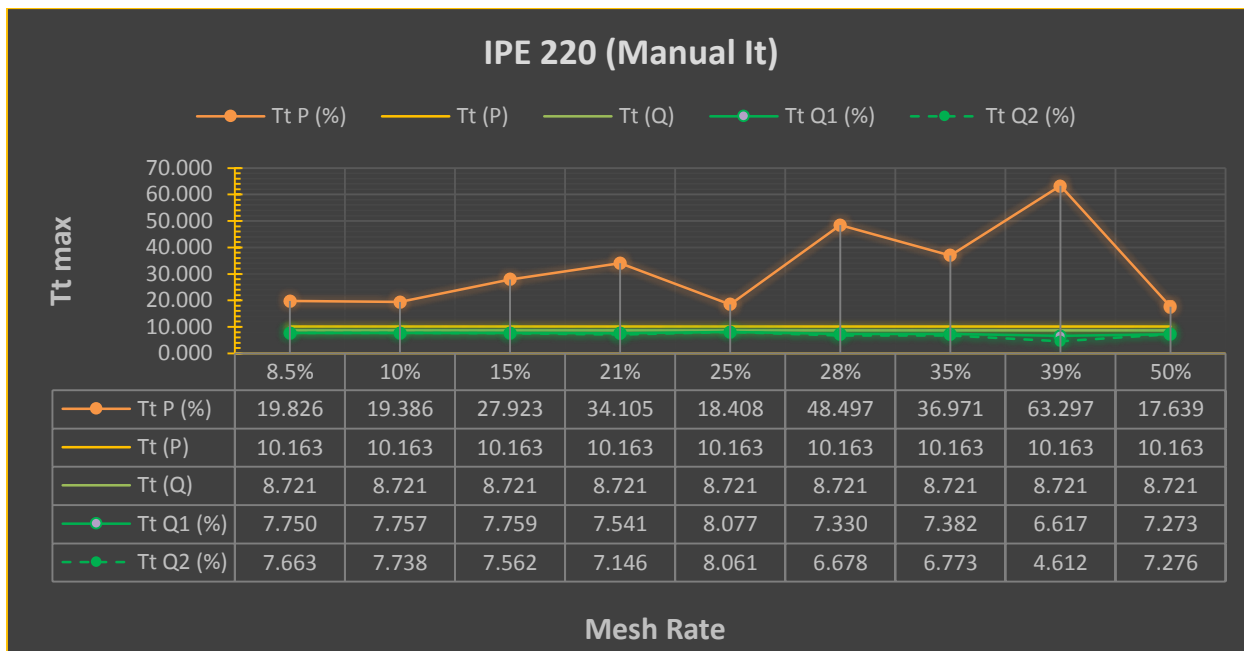
Διάγραμμα 39: TtP και TtQ για IPE 180 (Auto It)



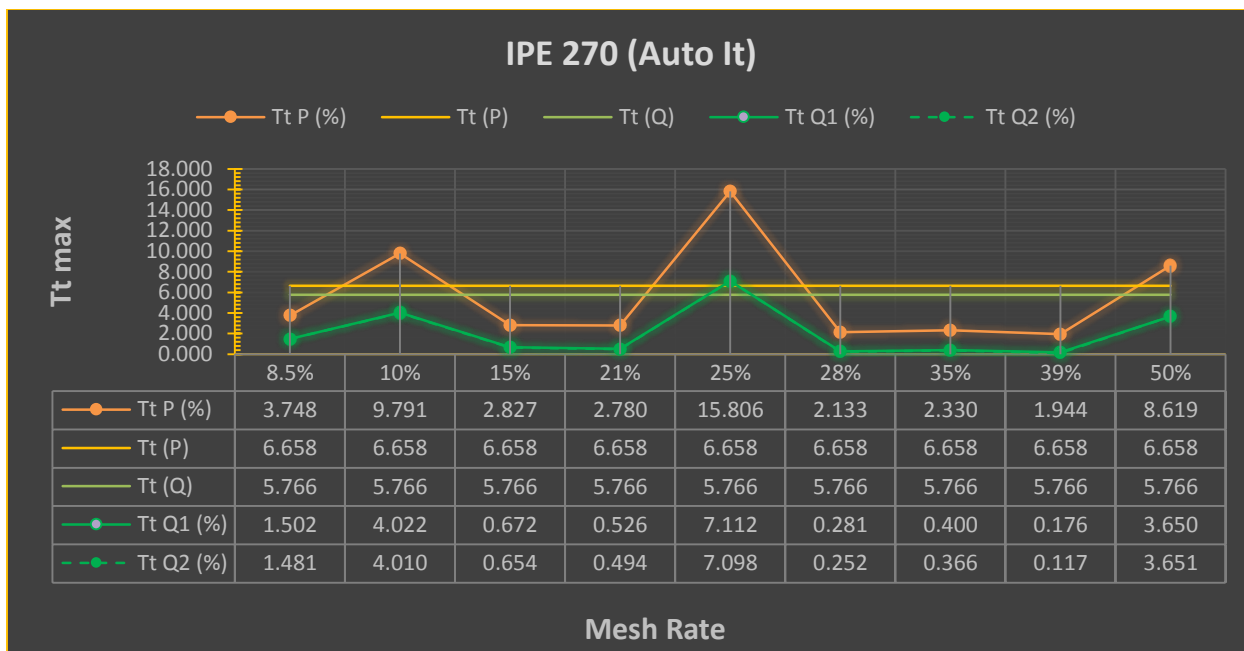
Διάγραμμα 40: TtP και TtQ για IPE 180 (Manual It)



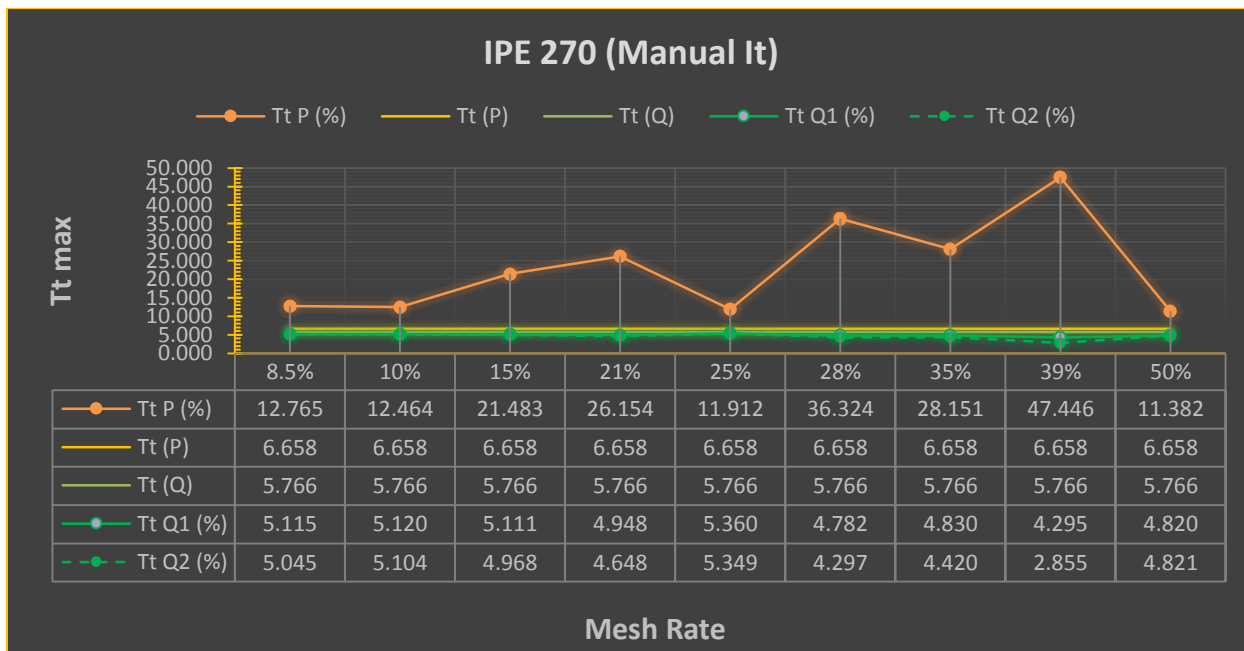
Διάγραμμα 41: TtP και TtQ για IPE 220 (Auto It)



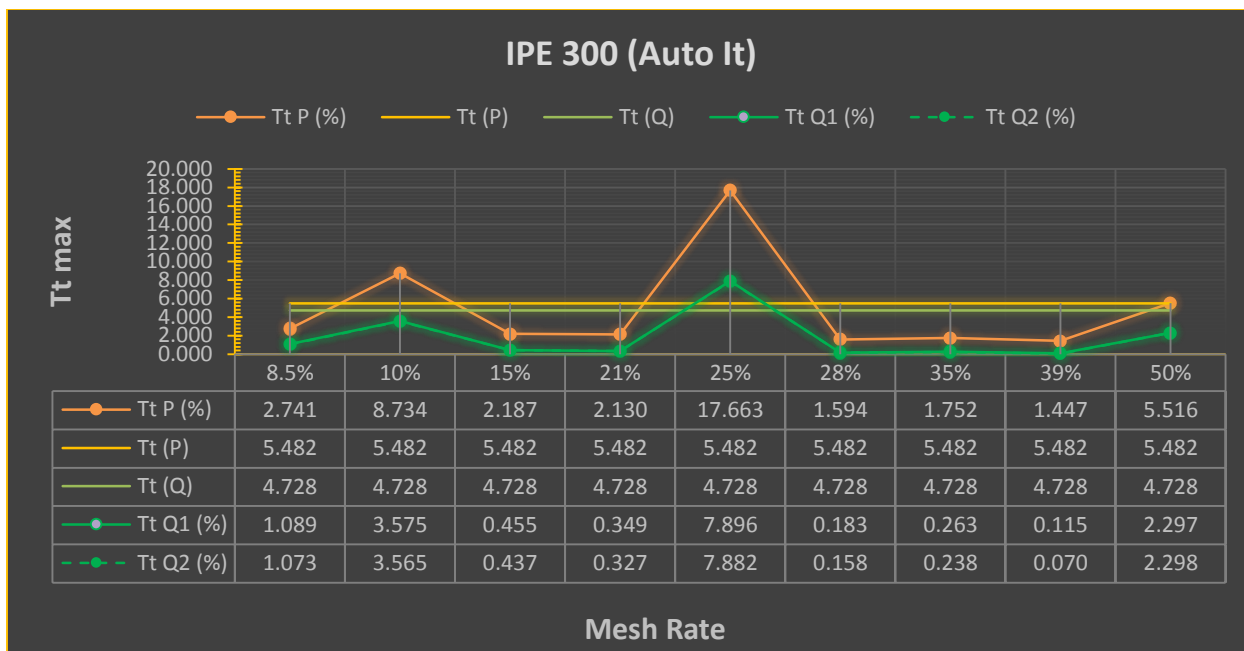
Διάγραμμα 42: TtP και TtQ για IPE 220 (Manual It)



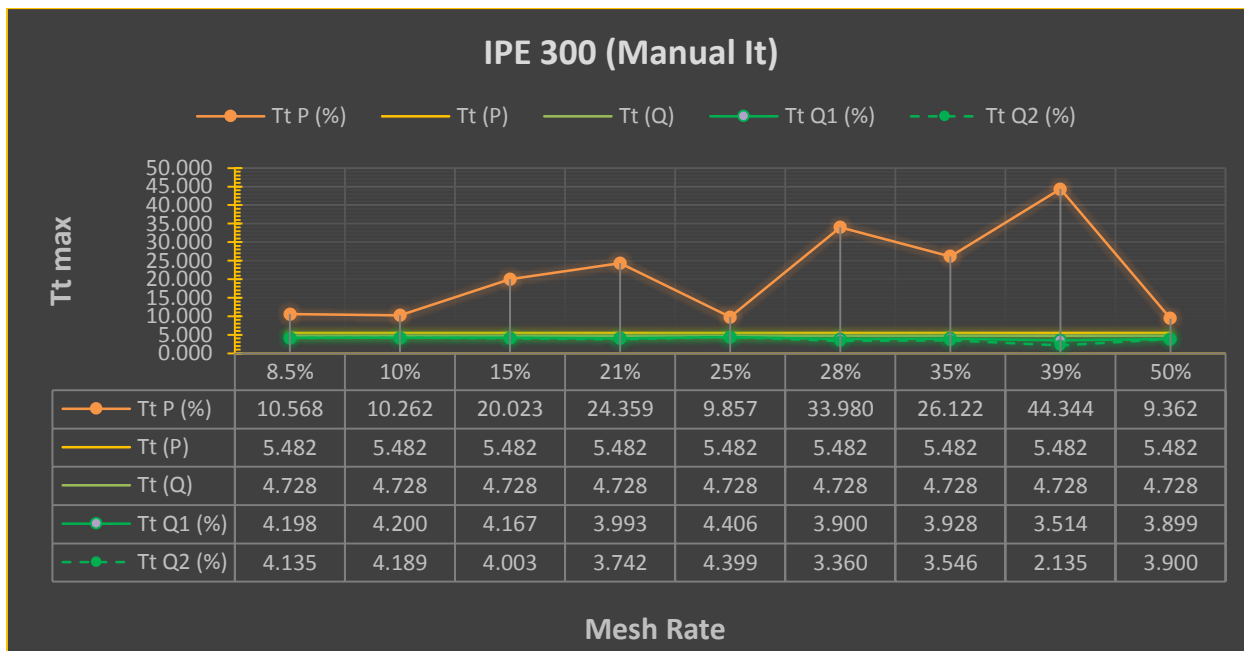
Διάγραμμα 43: TtP και TtQ για IPE 270 (Auto It)



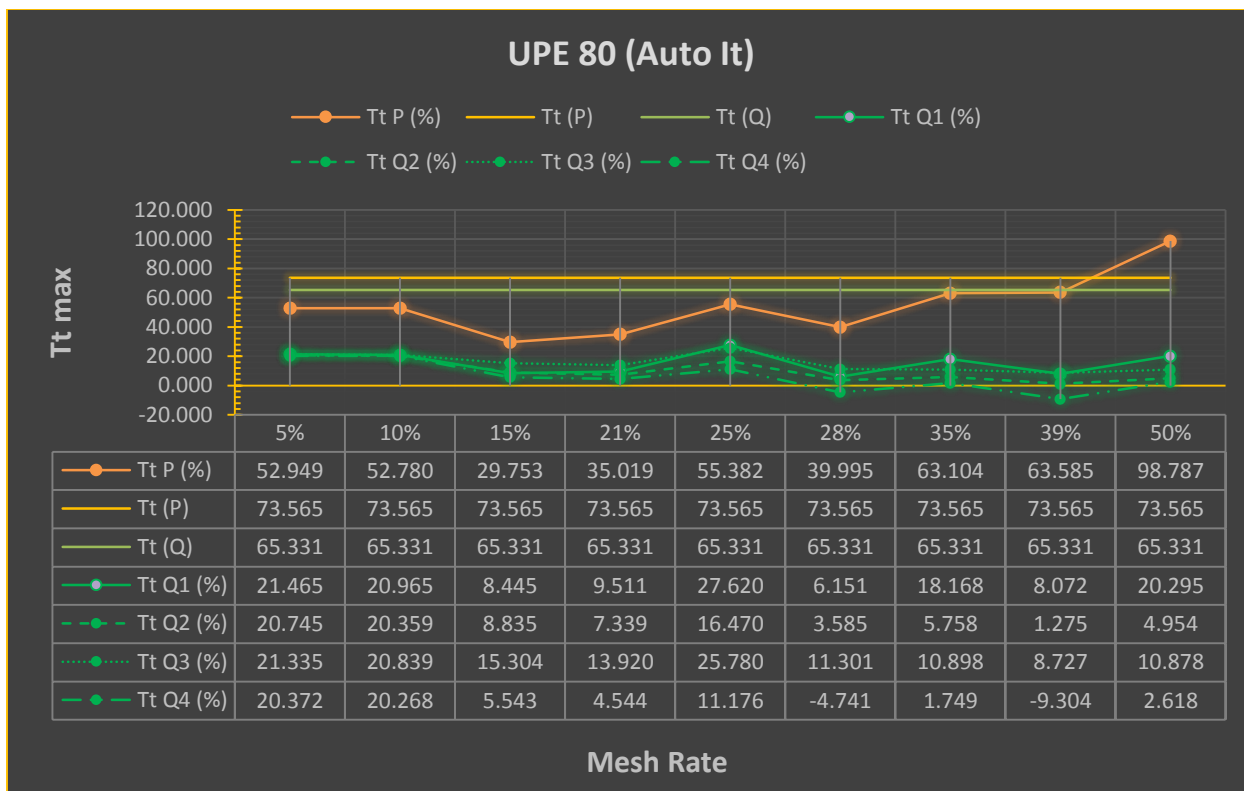
Διάγραμμα 44: TtP και TtQ για IPE 270 (Manual It)



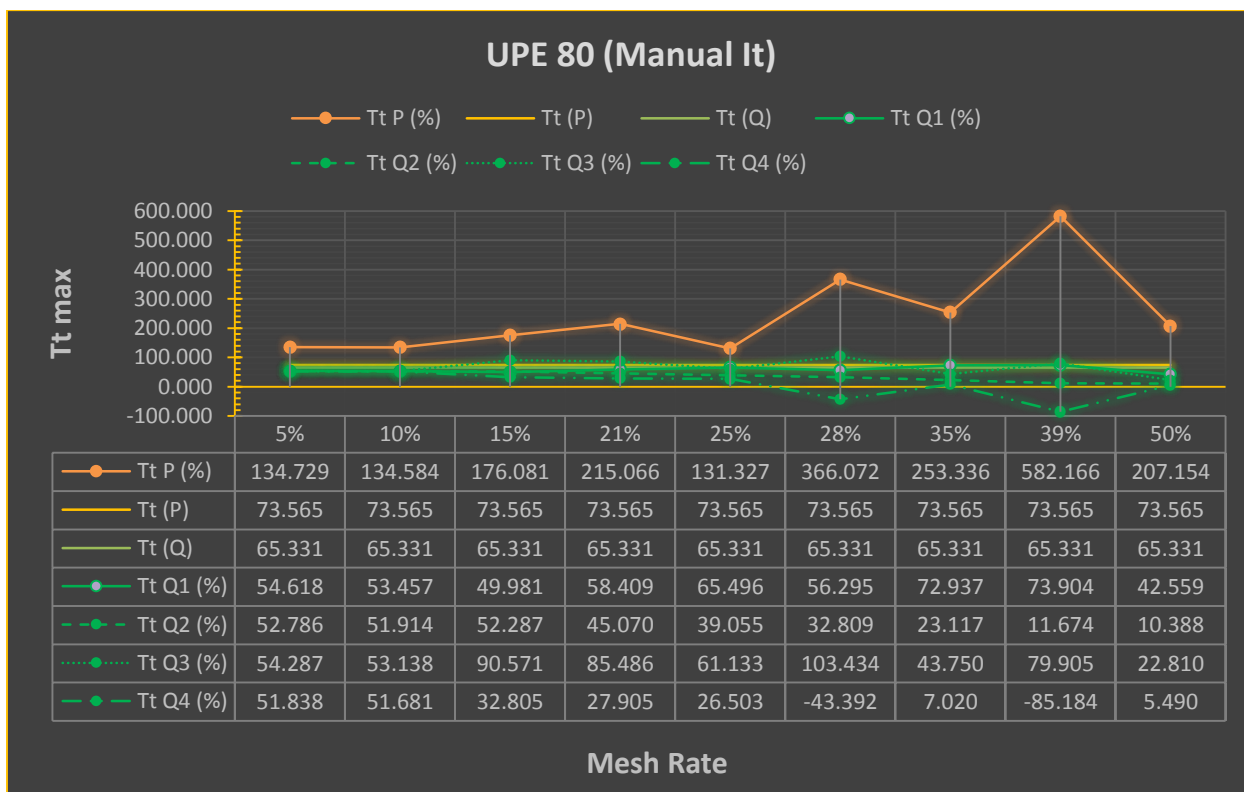
Διάγραμμα 45: TtP και TtQ για IPE 300 (Auto It)



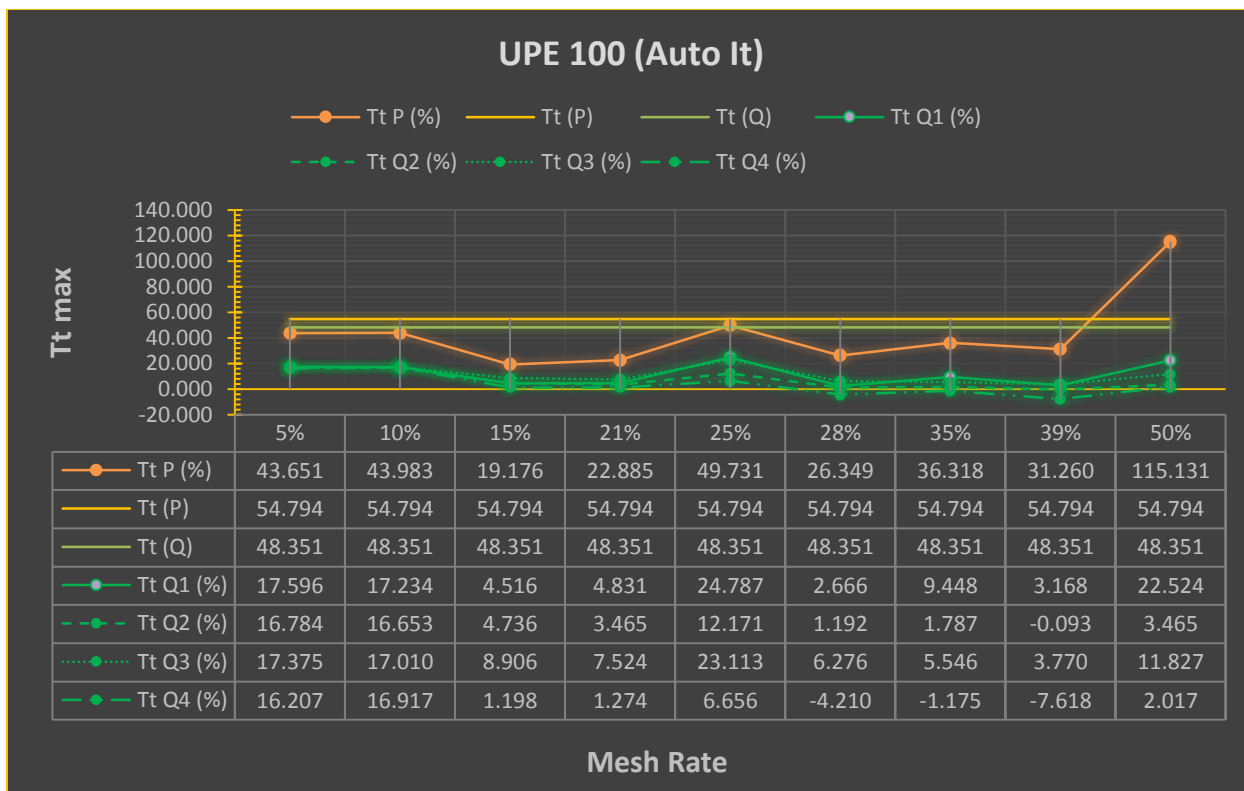
Διάγραμμα 46: TtP και TtQ για IPE 300 (Manual It)



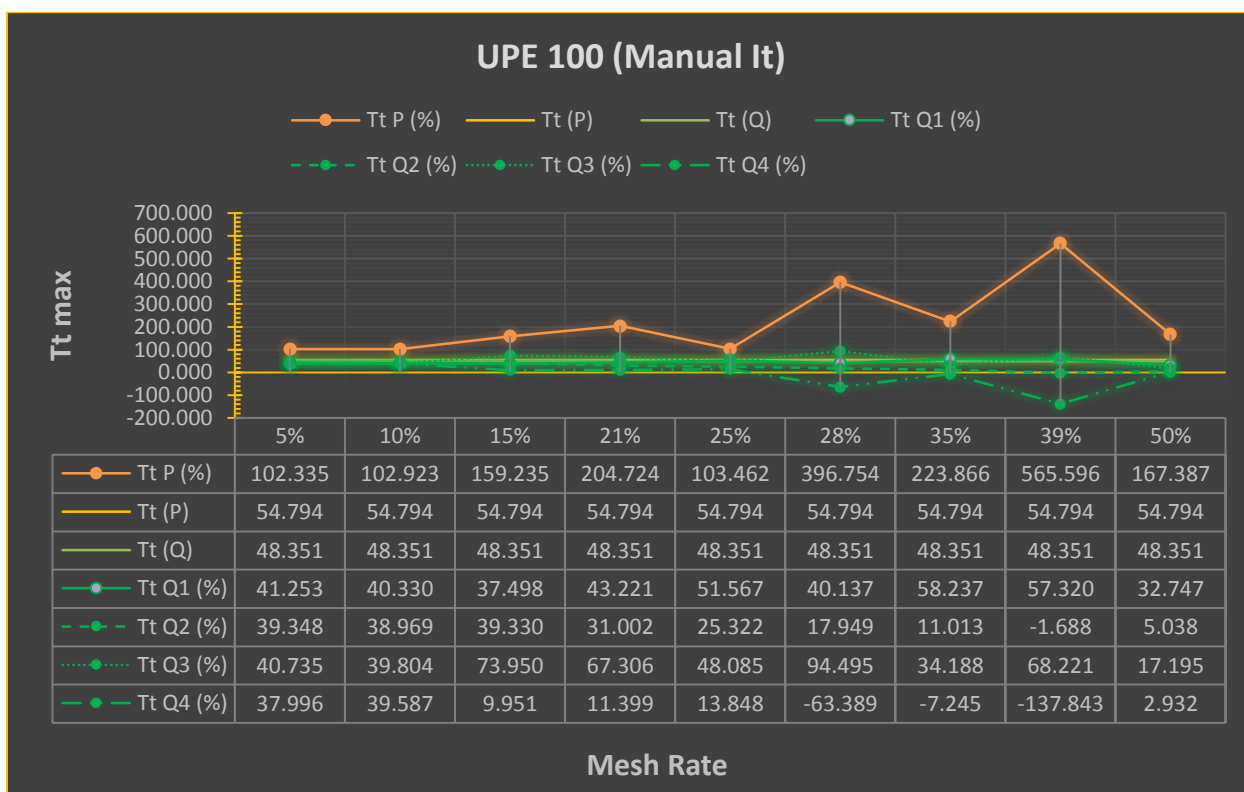
Διάγραμμα 47: TtP και TtQ για UPE 80 (Auto It)



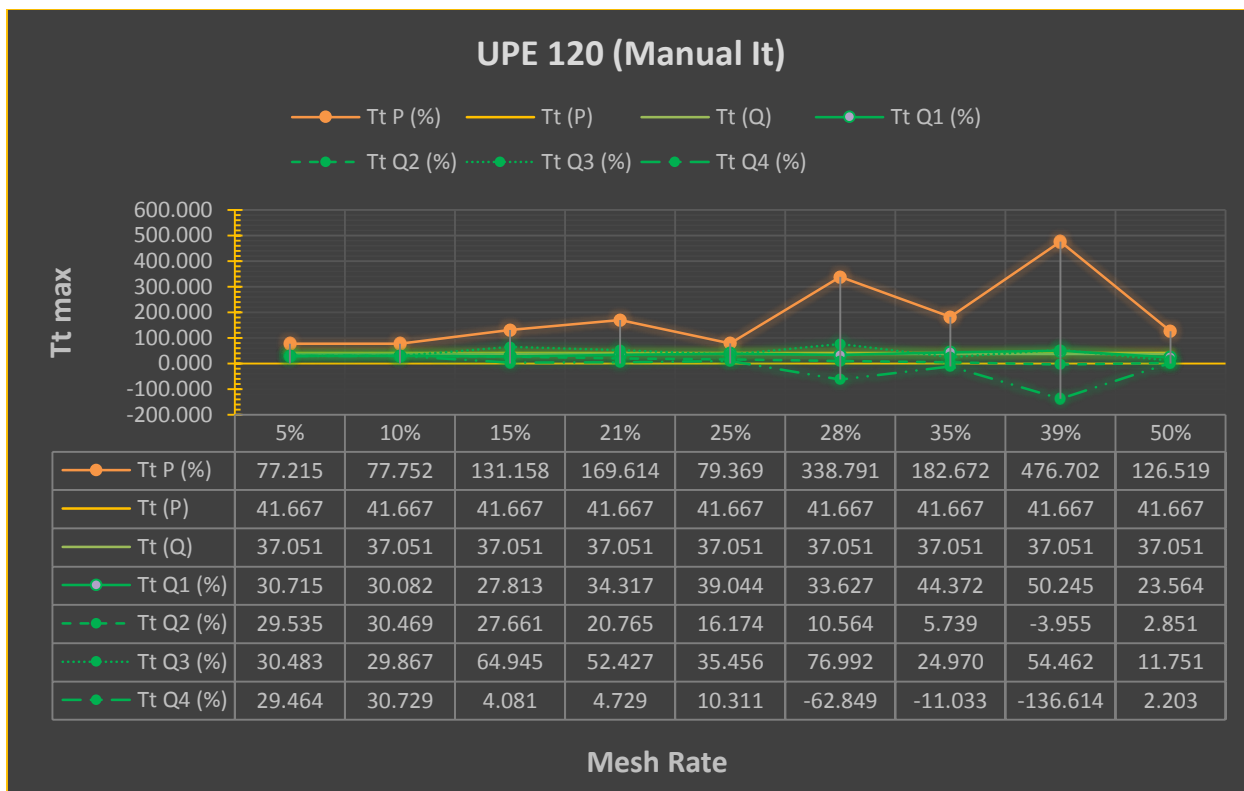
Διάγραμμα 48: TtP και TtQ για UPE 80 (Manual It)



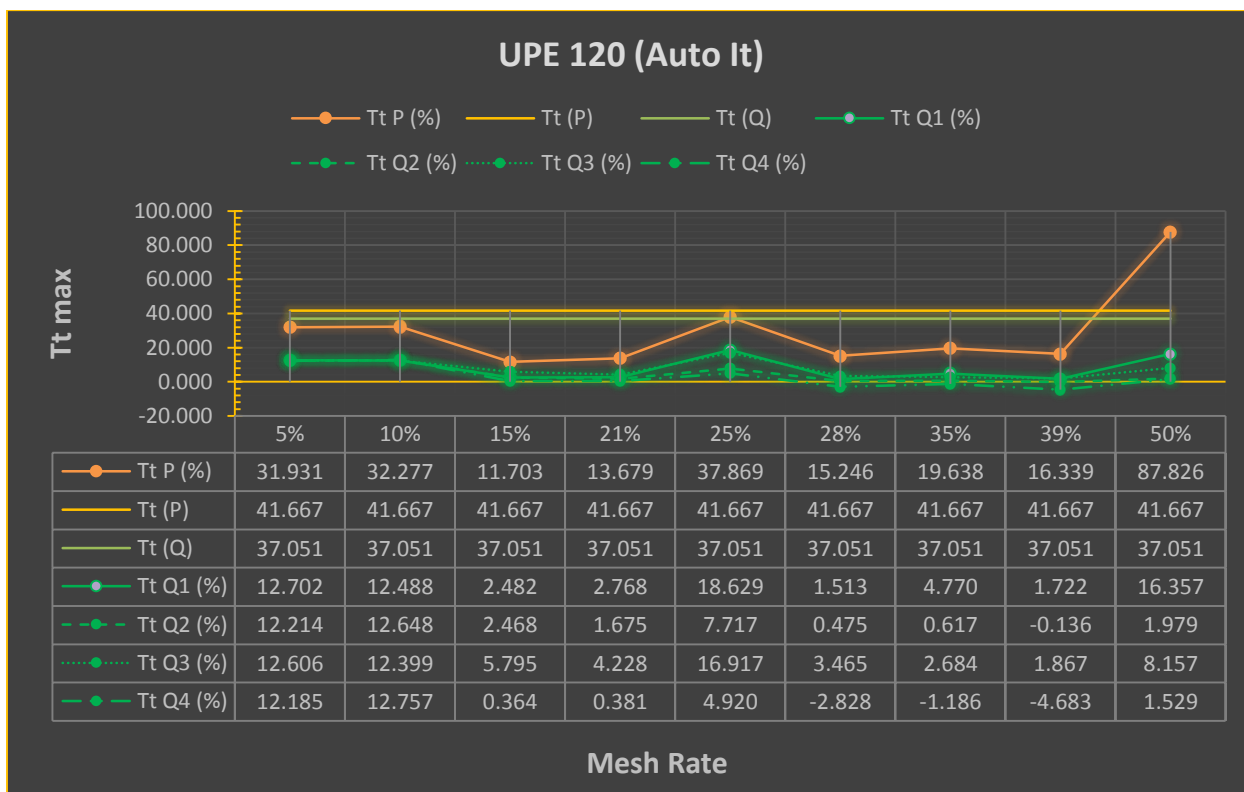
Διάγραμμα 49: TtP και TtQ για UPE 100 (Auto It)



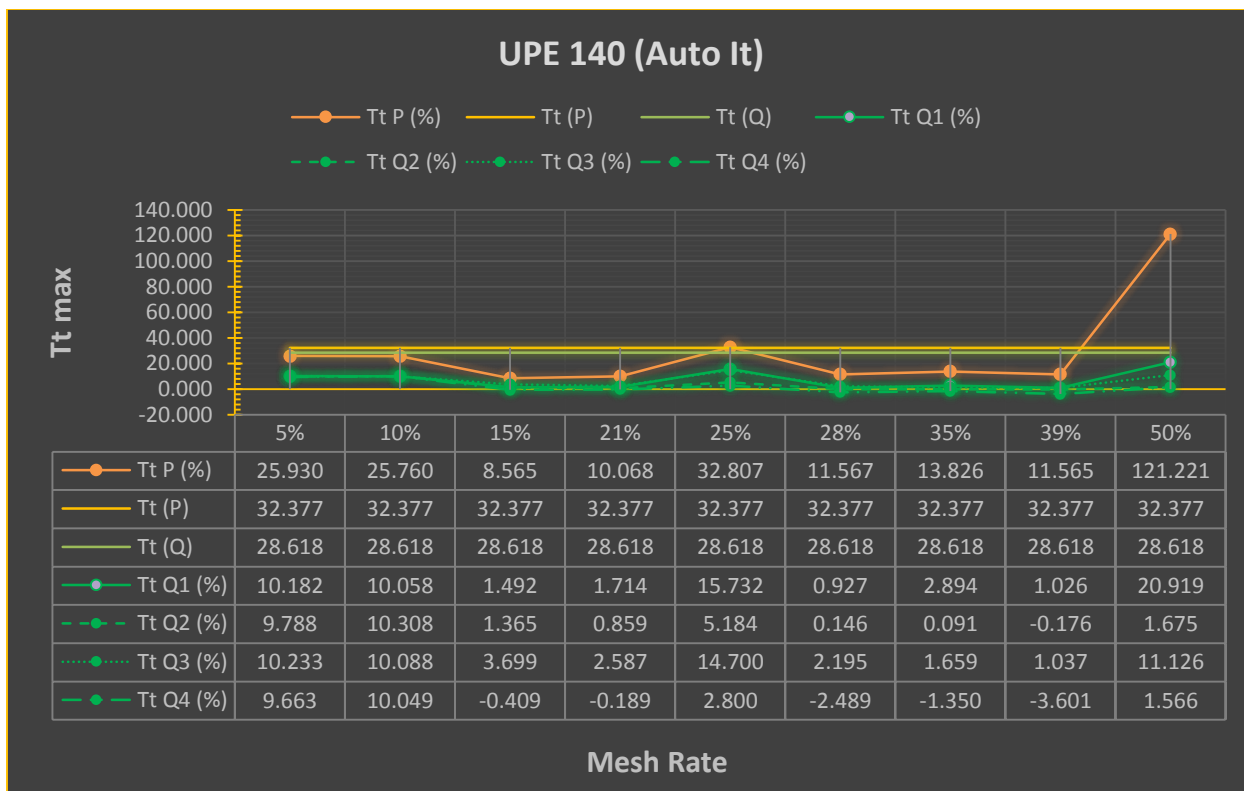
Διάγραμμα 50: TtP και TtQ για UPE 100 (Manual It)



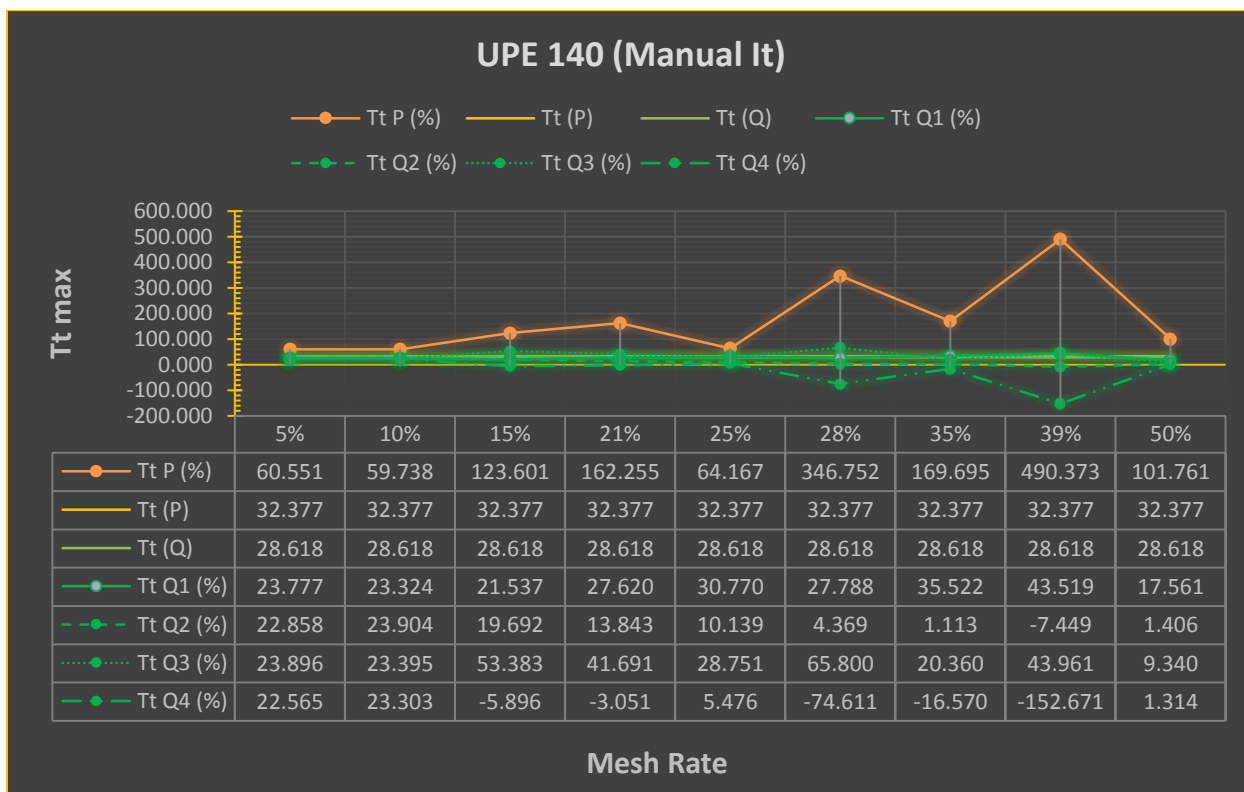
Διάγραμμα 51: TtP και TtQ για UPE 120 (Auto It)



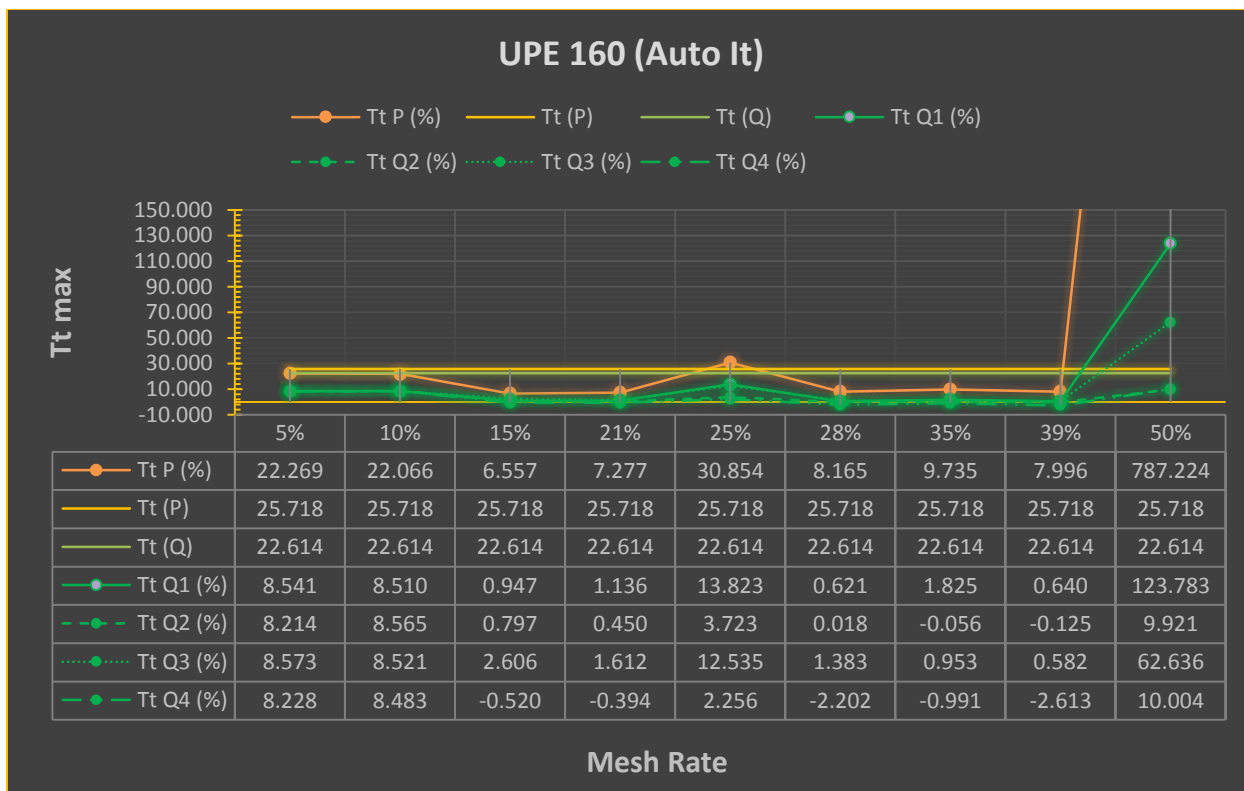
Διάγραμμα 52: TtP και TtQ για UPE 120 (Manual It)



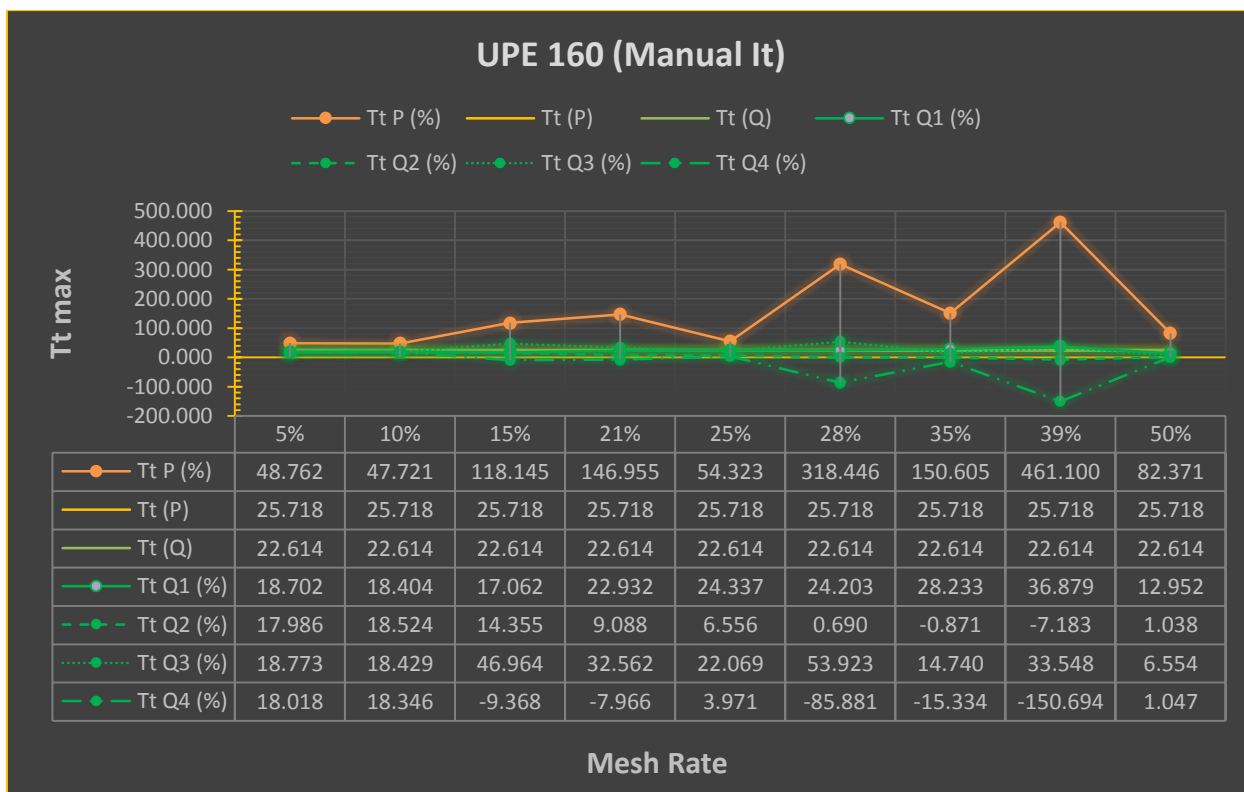
Διάγραμμα 53: TtP και TtQ για UPE 140 (Auto It)



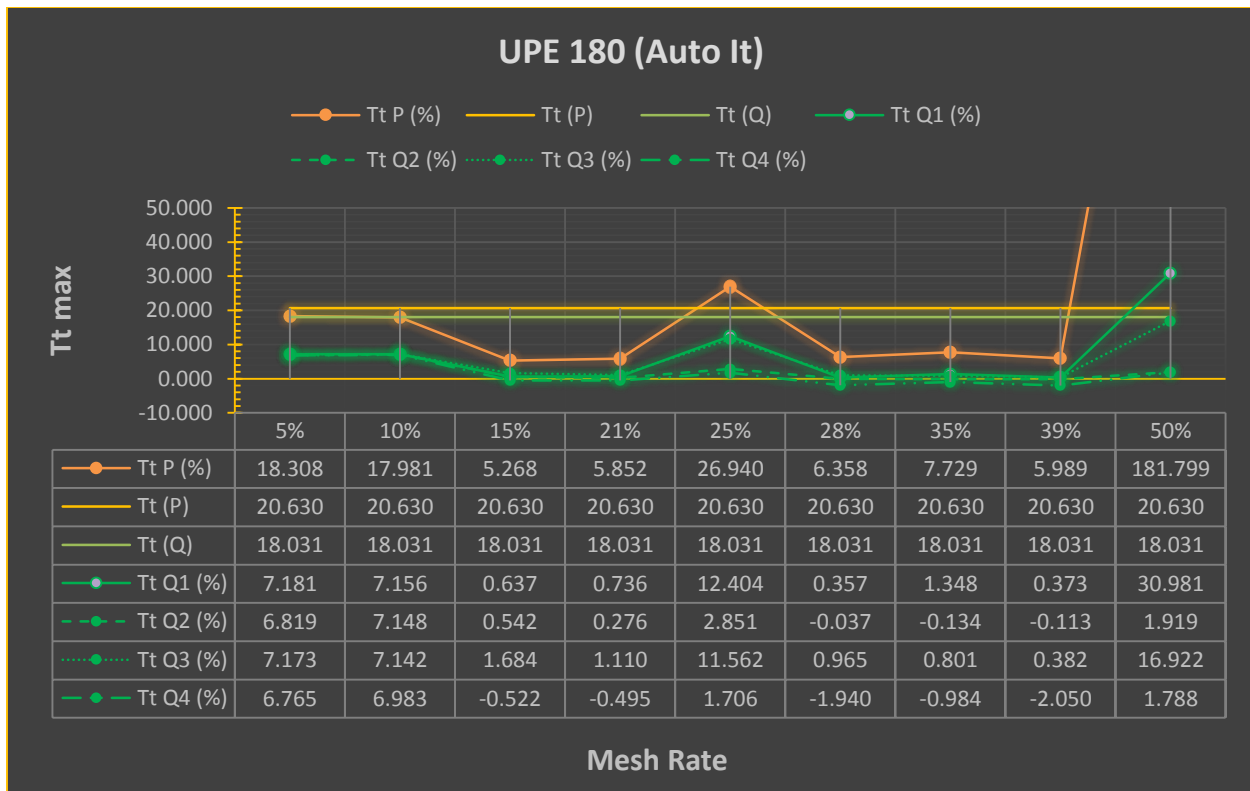
Διάγραμμα 54: TtP και TtQ για UPE 140 (Manual It)



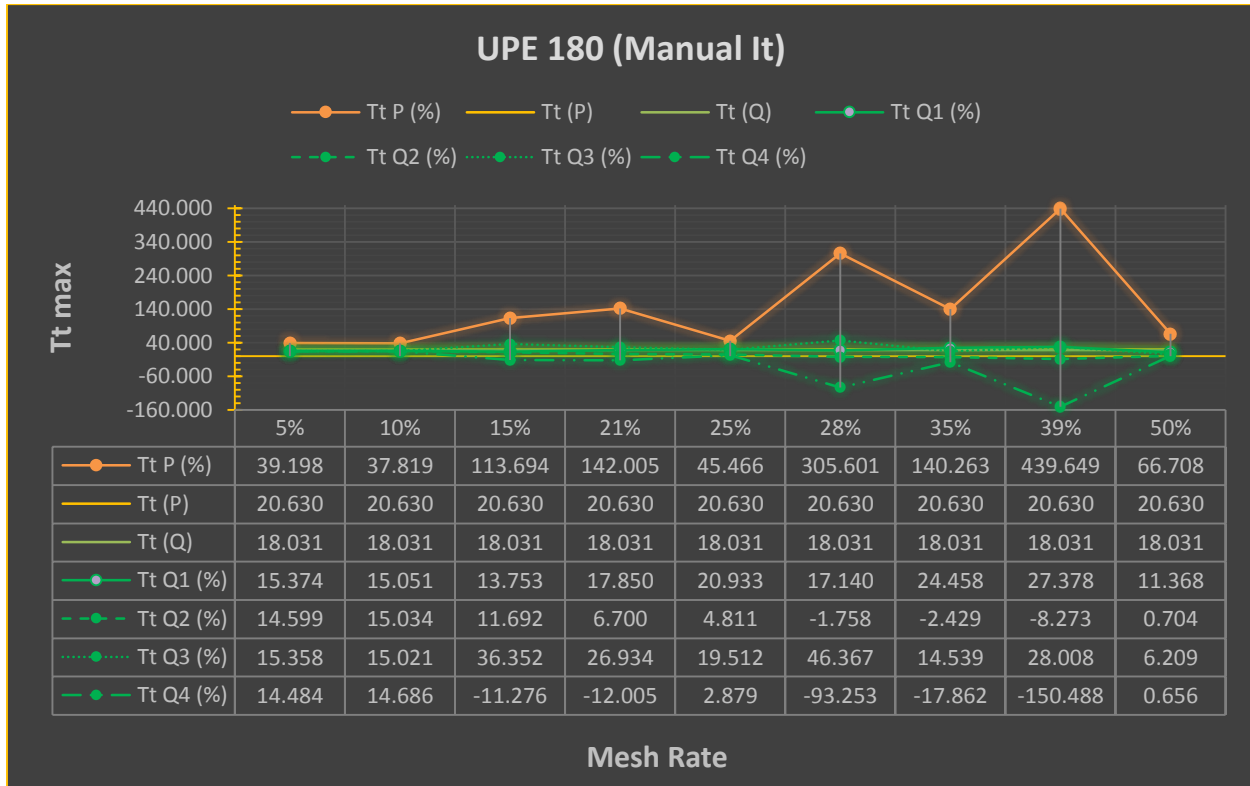
Διάγραμμα 55: TtP και TtQ για UPE 160 (Auto It)



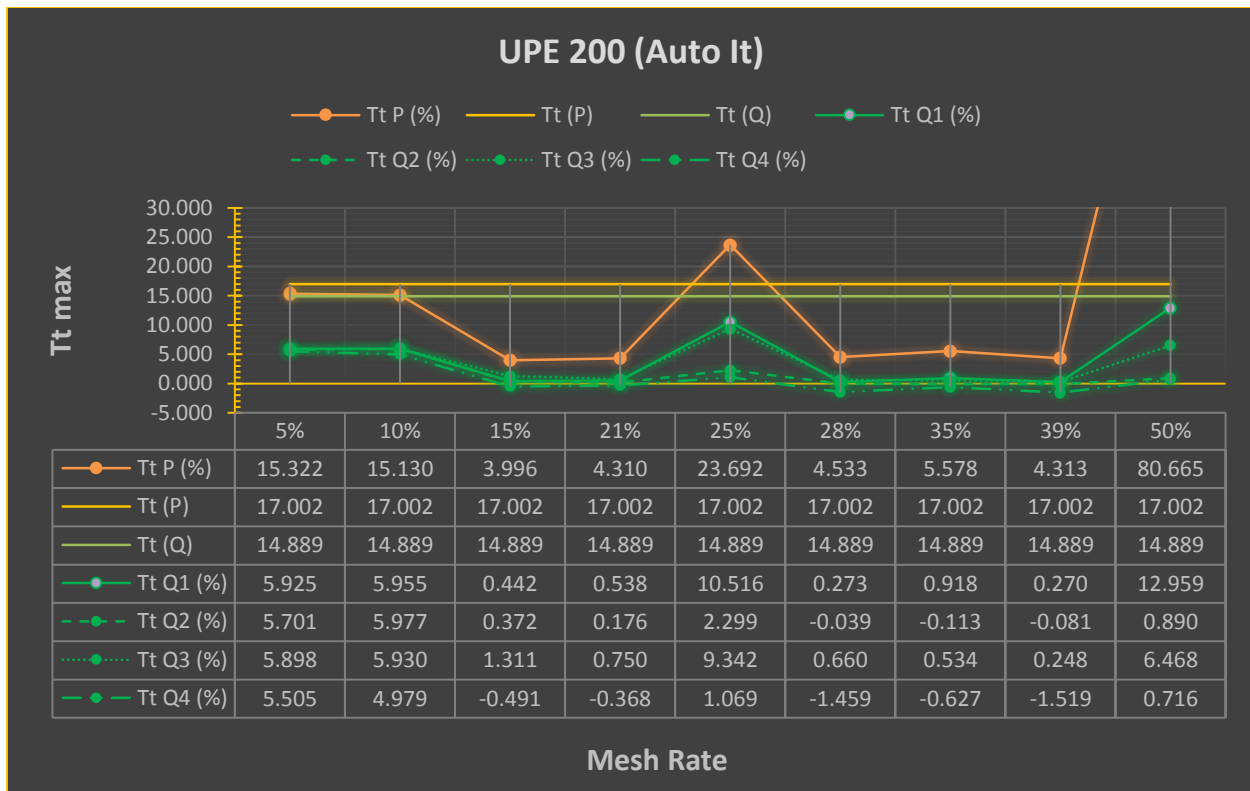
Διάγραμμα 56: TtP και TtQ για UPE 160 (Manual It)



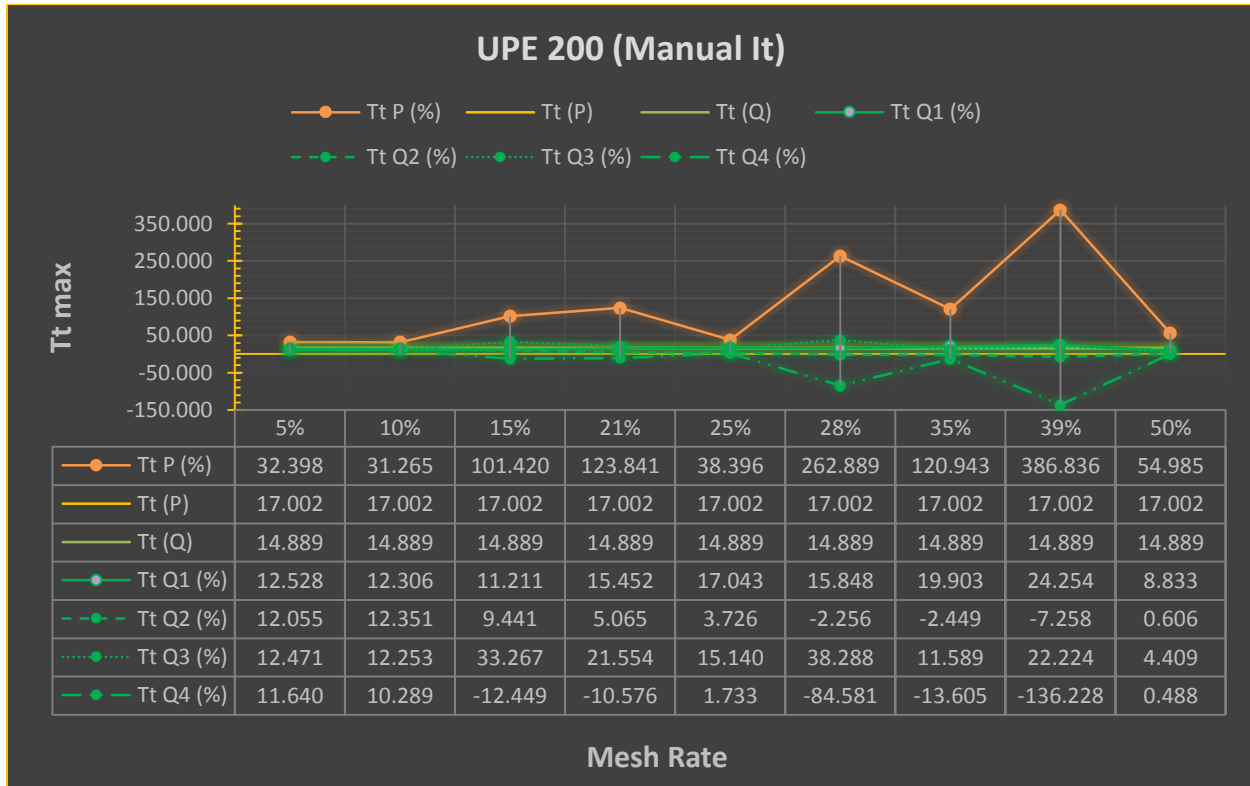
Διάγραμμα 57: TtP και TtQ για UPE 180 (Auto It)



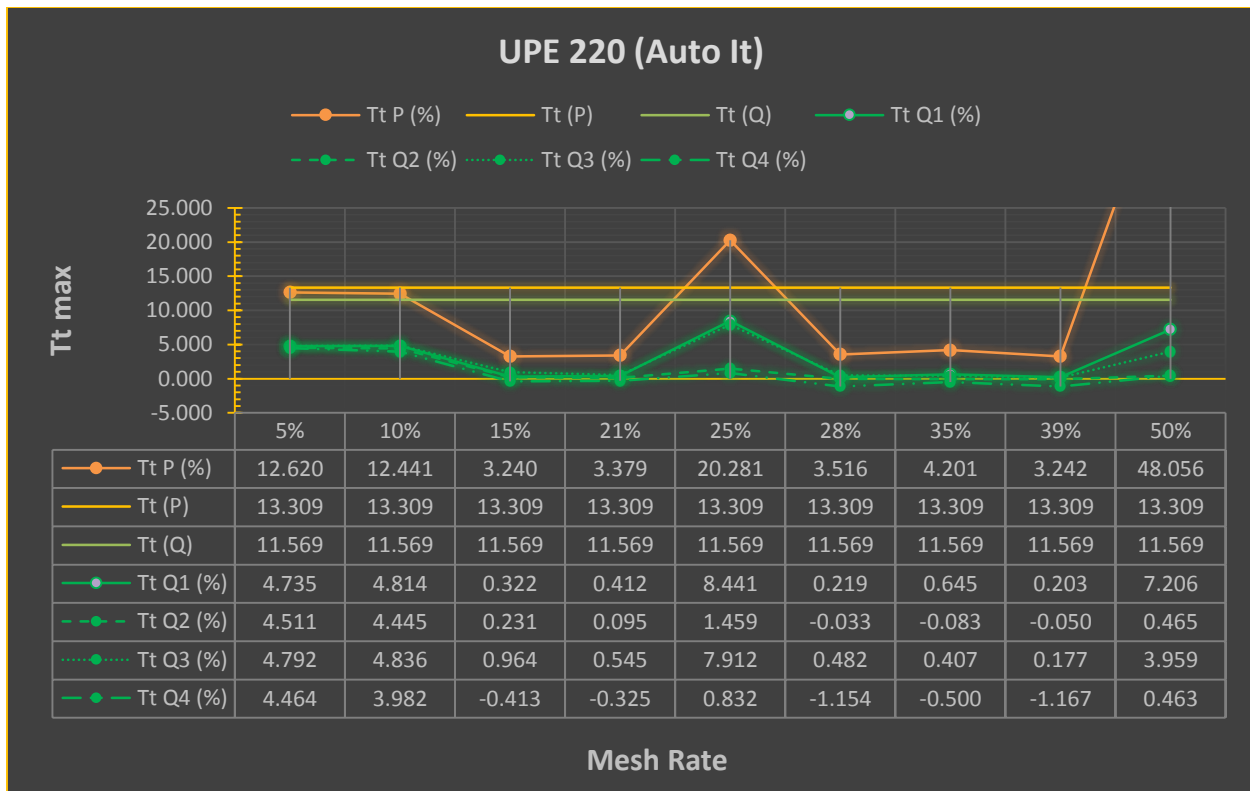
Διάγραμμα 58: TtP και TtQ για UPE 180 (Manual It)



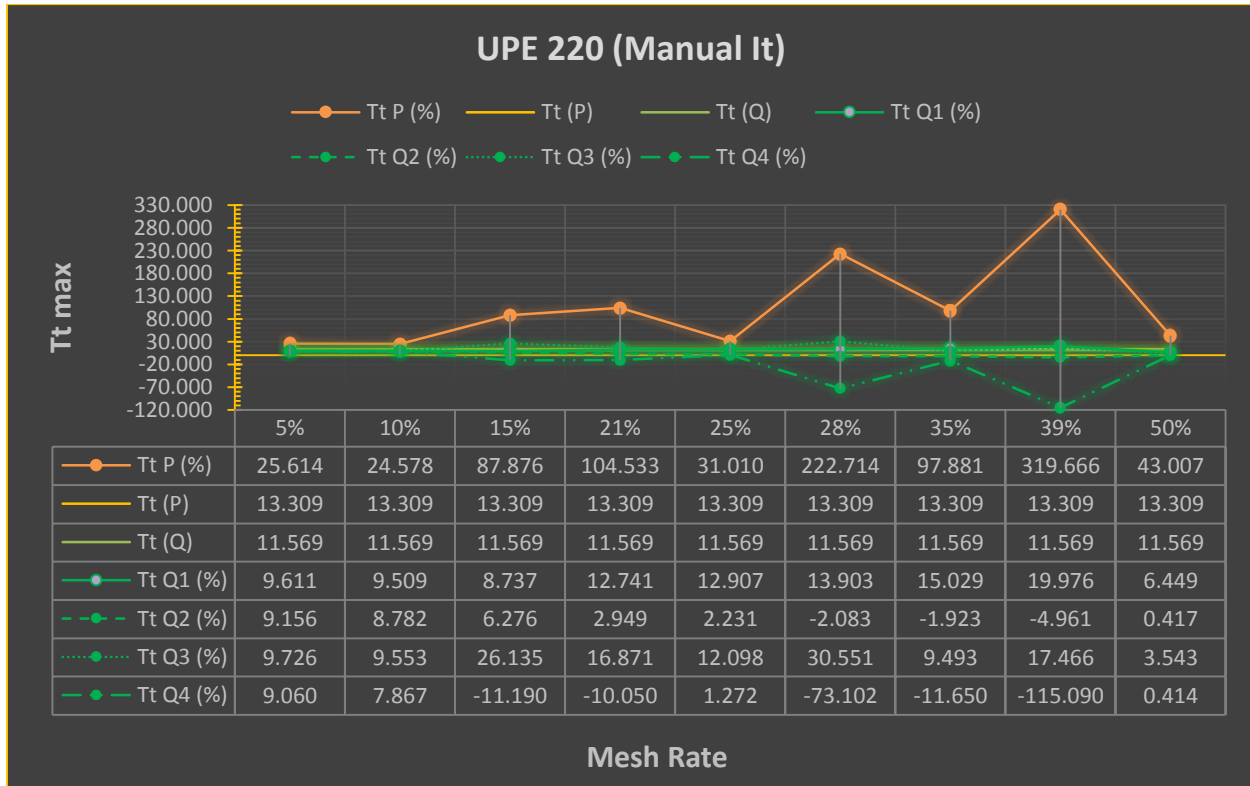
Διάγραμμα 59: TtP και TtQ για UPE 200 (Auto It)



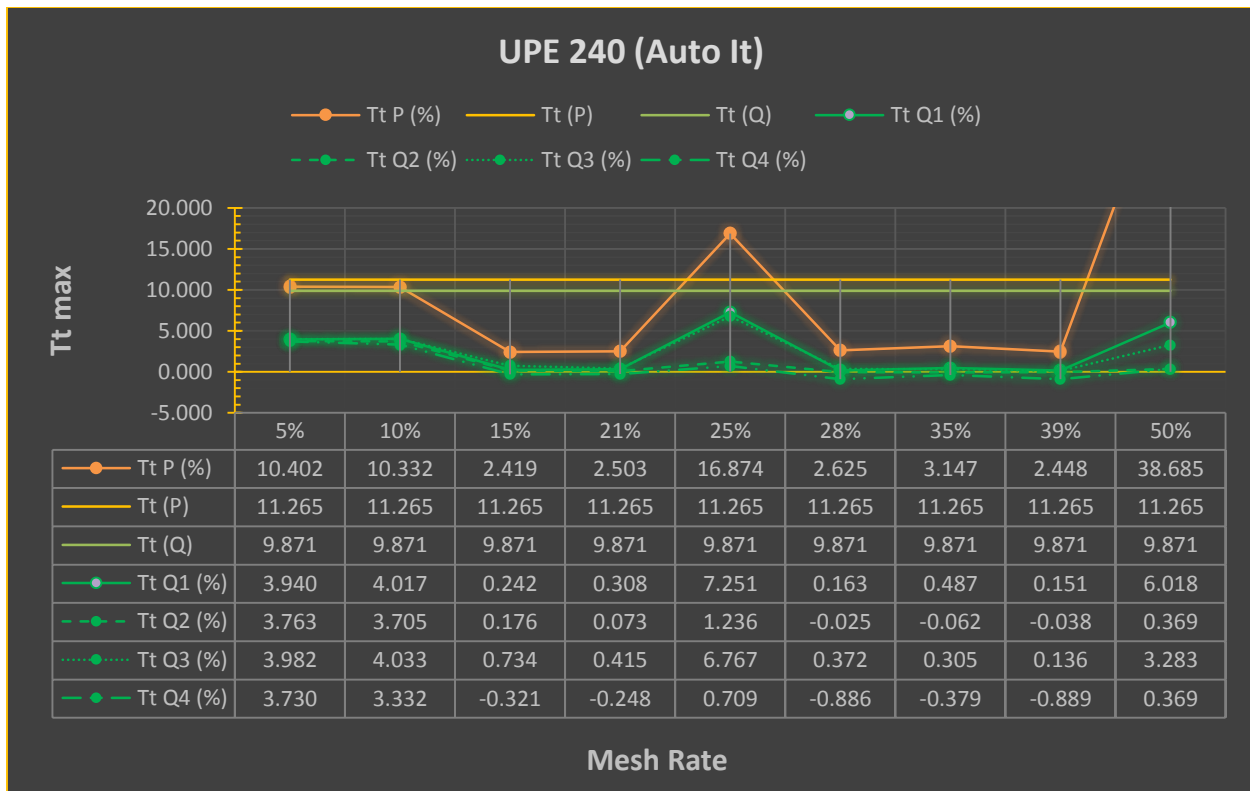
Διάγραμμα 60: TtP και TtQ για UPE 200 (Manual It)



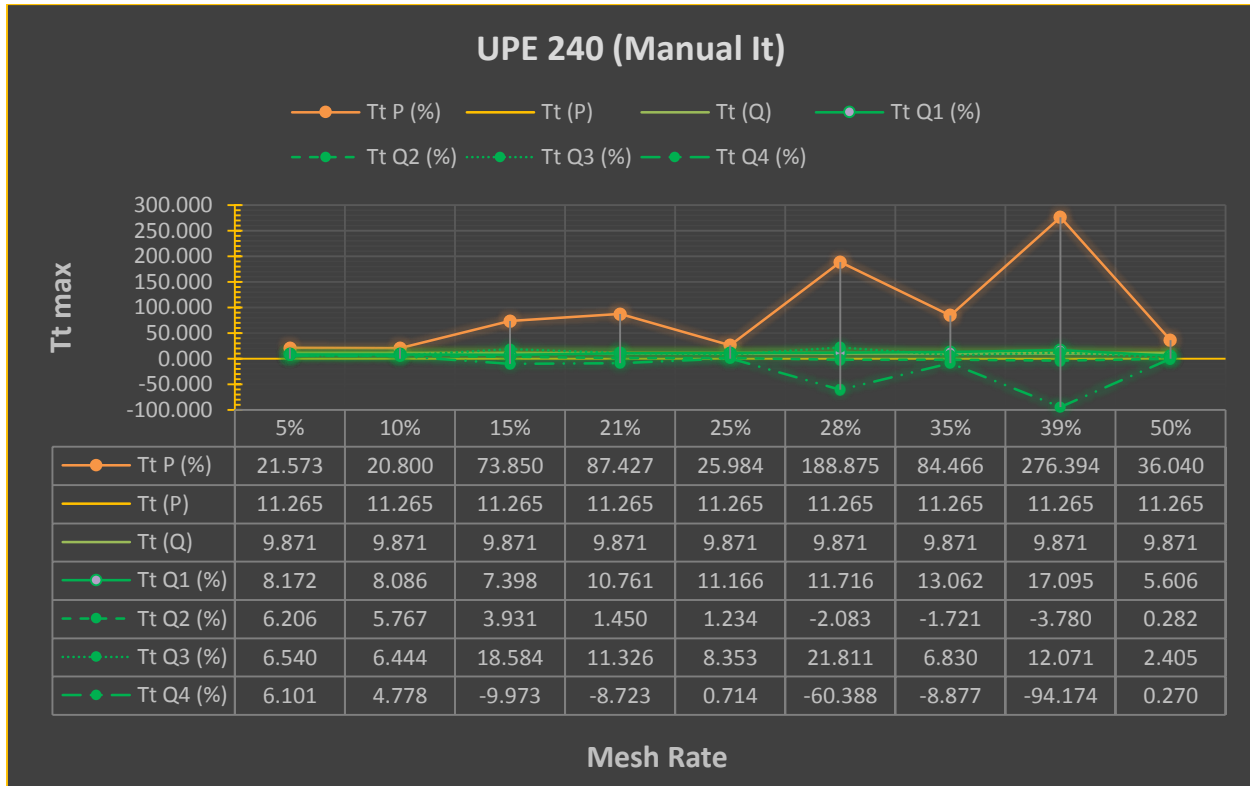
Διάγραμμα 61: TtP και TtQ για UPE 220 (Auto It)



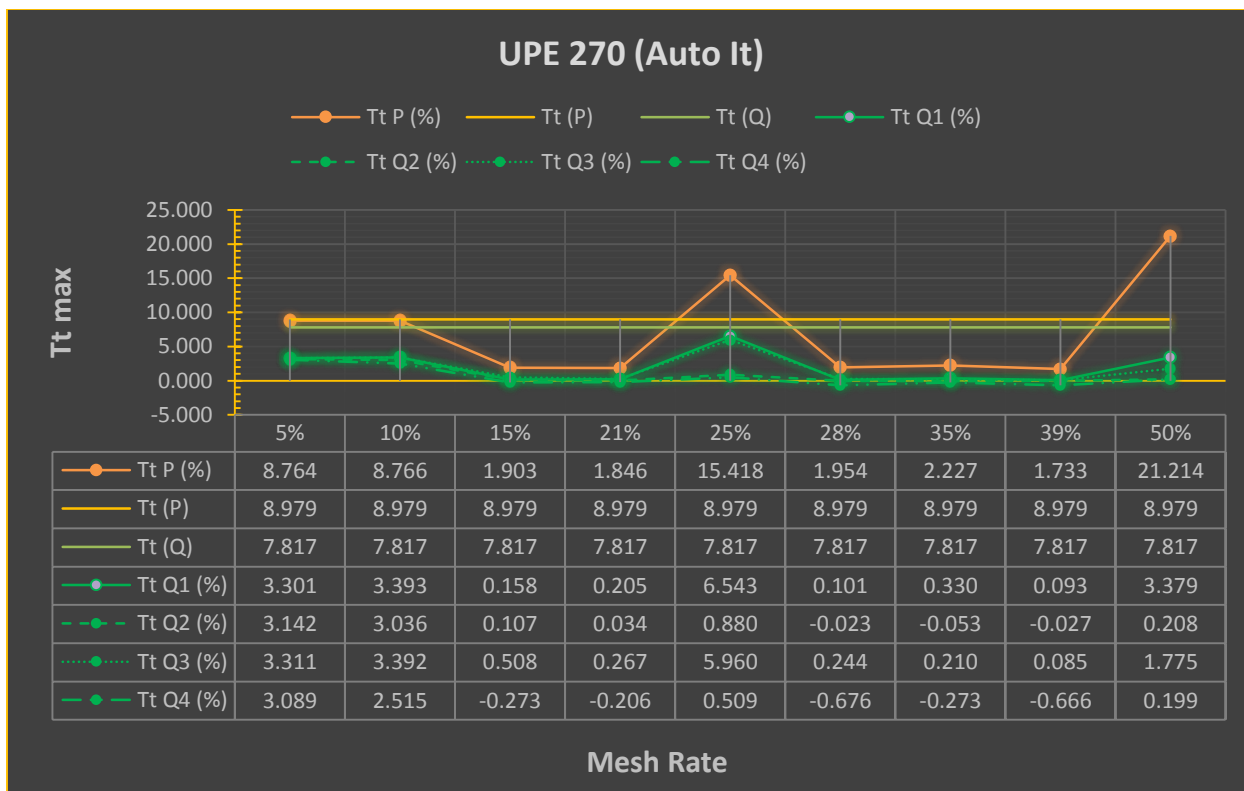
Διάγραμμα 62: TtP και TtQ για UPE 220 (Manual It)



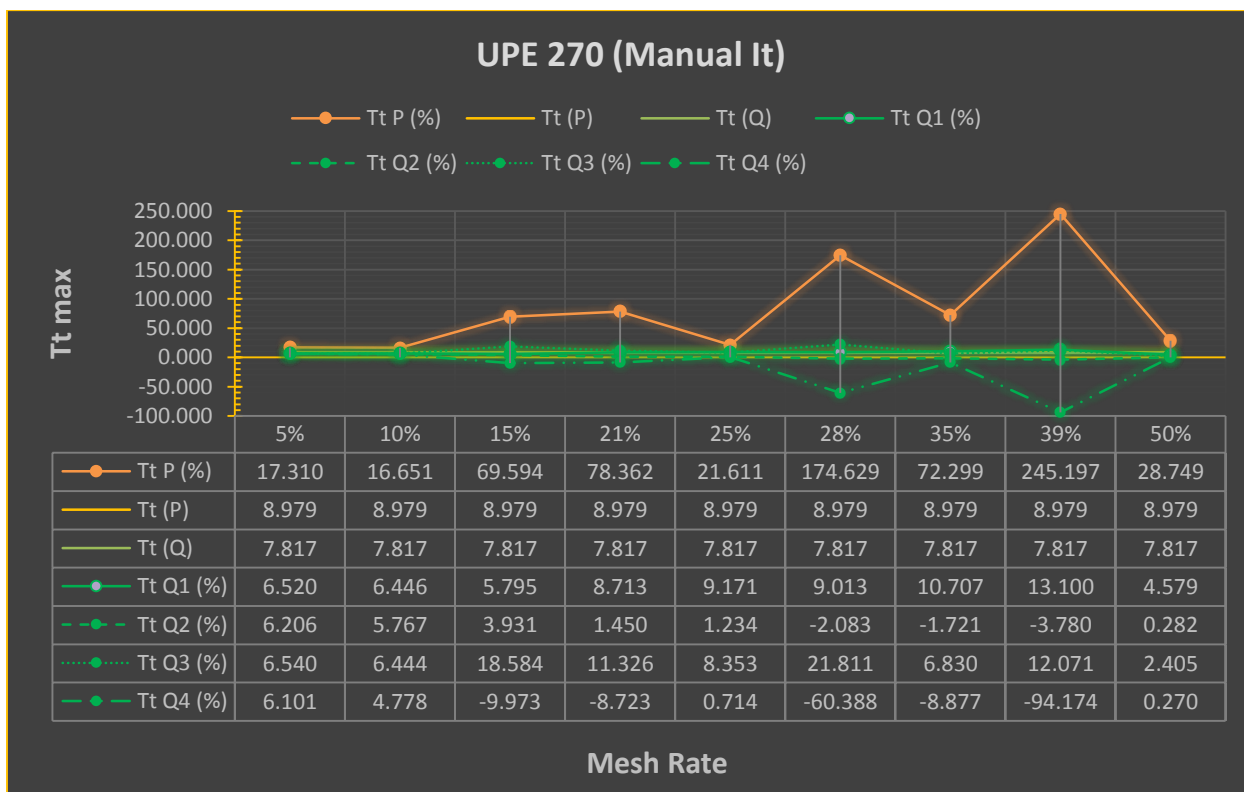
Διάγραμμα 63: TtP και TtQ για UPE 240 (Auto It)



Διάγραμμα 64: TtP και TtQ για UPE 240 (Manual It)



Διάγραμμα 65: TtP και TtQ για UPE 270 (Auto It)



Διάγραμμα 66: TtP και TtQ για UPE 270 (Manual It)



Βιβλιογραφία

- [1] H. Toriya, H. Chiyokura. (1993). *3D CAD Principles and Applications*. Tokyo, Japan: Kyoritsu Shuppan Co. Ltd.
- [2] K. Lalit Narayan, M.M.M. Sarcar, K. Mallikarjuna Rao. (2008). *Computer Aided Design and Manufacturing*. New Delhi: Prentice Hall of India.
- [3] Daniel Jacobson, Greg Brail, Dan Woods, 2012, *APIs: A Strategy Guide*, United States of America: O'Reilly Media, Inc.
- [4] Hazewinkel, M. Ed. (2001). "*Lagrange interpolation formula*" - *Encyclopedia of Mathematics*. Springer.
- [5] Κατσικαδέλης Ι. (2002). *Boundary Elements Theory and Applications*. 1st Edition. Oxford: ELSEVIER SCIENCE Ltd.
- [6] Martin Costabel. (1986). Lecture: *Principles of Boundary Element Methods*
- [7] Sauter, S. & Schwab C. (2011). *Boundary Element Methods*. Berlin: Springer.
- [8] Daryl L. Logan. (2007). *A First Course in the Finite Element Method*. Fourth Edition. Canada: Thomson.
- [9] Young, W., Budynas, R. & Sadegh, A. (2011). *Roark's Formulas for Stress and Strain*. 7th Edition. USA: McGraw-Hill Companies Inc.