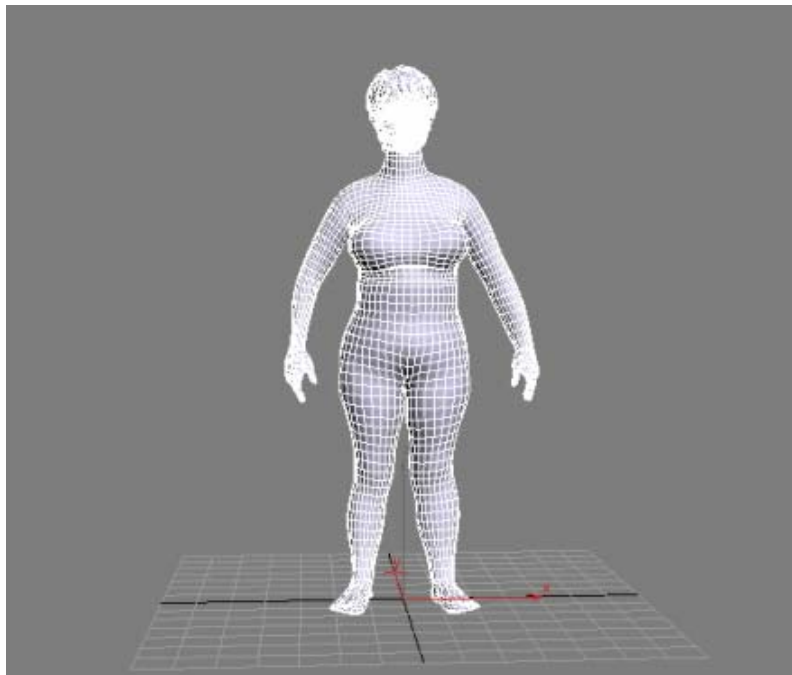


**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΘΕΜΑ: ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΠΟΛΥΓΩΝΙΚΩΝ**  
**ΑΝΘΡΩΠΙΝΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΒΑΣΕΙ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ**  
**ΣΑΡΩΣΗΣ**



*Γαρατζιώτη Α. Αντωνία*

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΜΠΙΛΑΛΗΣ**

*Στους γονείς μου,  
Αριστείδη και Ελένη*

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κύριο Νικόλαο Μπιλάλη για την άρτια καθοδήγηση και βοήθεια που μου παρείχε σε όλη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Νικόλαο Κυρίτση, υπεύθυνο του εργαστηρίου Μελέτης και Σχεδίασης με Χρήση Η/Υ –CAD LAB, για το χρόνο που αφιέρωσε δίνοντας πρόσθετες επεξηγήσεις και συμβουλές επί του θέματος.

Τέλος, ευχαριστώ θερμά το συνάδελφο Θωμά Κέστη που μου με βοήθησε στην κατανόηση του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία.

## **ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ**

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	8
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	9
2. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....	11
2.1 Γενικά .....	11
2.2 Τρισδιάστατη σάρωση και άλλες εφαρμογές.....	14
2.2.1 Σάρωση 3D (τρισδιάστατοι σαρωτές ανθρωπίνων σωμάτων) .....	14
2.2.2 Μοντέλο Ανθρωποειδούς για χρήση σε όλες τις εφαρμογές (3D μοντέλα επιφανειών) .....	15
2.2.3 Αναπαράσταση σχεδιαστικού μοντέλου σε 3 διαστάσεις (από πατρών σε 3D), οπτικοποίηση, κίνηση (animation) .....	17
3. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ 3D ΠΟΛΥΓΩΝΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ – ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ.....	19
3.1 Μοντελοποίηση ανθρωπίνων μοντέλων .....	19
3.1.1 Δεδομένα Τρισδιάστατης σάρωσης.....	19
3.1.2 Μοντέλο Αναφοράς .....	20
3.1.3 Σκελετός .....	21
3.1.4 Πρότυπο Πολυγωνικό πλέγμα.....	21
3.1.5 Χαρακτηριστικά σημεία και χαρακτηριστικές ισοϋψείς καμπύλες (Feature Points and Feature Contours) .....	22
3.1.6 Προεπεξεργασία.....	23
3.1.7 Παραμόρφωση λόγω σκελετού (Skeleton – driven deformation) .....	24
3.1.8 Αποστάσεις Αντιστοίχησης και Σχηματισμός Σκελετού (Skeleton configuration and Displacement map).....	24
3.1.9 Προσαρμογή Σκελετού (Skeleton fitting) .....	25
3.1.10 Τελειοποίηση του δέρματος (Fine skin refinement).....	28
3.1.10.1. Αντιστοίχηση Σημείων (Mapping) .....	30
3.1.10.2 Χαλάρωση (Relaxation).....	30
3.1.10.3 Αναπροσαρμογή του Σκελετού (Skeleton refitting) .....	31
3.1.11 Υποδιαίρεση υψηλής ανάλυσης (Multi- Resolution subdivision) .....	32
3.1.12 H-Anim: Προδιαγραφές Πρότυπου Ανθρωποειδούς .....	33
3.1.12.1 H-Anim: Επίπεδο σχηματισμού - Level of Articulation (LoA).....	35
3.2 Παραμετροποίηση και παραμετρική σχεδίαση ανθρωπίνων μοντέλων .....	37
3.2.1 Κατασκευή μοντέλου ακμών.....	38
3.2.2 Χαρακτηριστικά σημεία.....	38
3.2.3 Σημασιολογικά χαρακτηριστικά σημεία .....	41
3.2.4 Κατασκευή πλέγματος.....	42
3.2.5 Δημιουργία μπαλωμάτων .....	43
3.2.6 Παρεμβλλόμενη επιφάνεια .....	44
3.2.7 Τελειοποίηση επιφανείας .....	48
3.2.8 Παραμετρική σχεδίαση ανθρώπινου μοντέλου.....	52
3.2.9 Σύνθεση ανθρωπίνων σωμάτων .....	52
3.2.10 Επιλογή Μοντέλων.....	54
3.2.11 Αποτελέσματα Σύνθεσης.....	55
4. ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ 3D ΠΟΛΥΓΩΝΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	60
4.1 Προετοιμασία Σκαναρισμένου Μοντέλου .....	60
4.2 Προετοιμασία Πρότυπου Μοντέλου (GENERIC MODEL).....	75
4.3 Διαδικασία Προσαρμογής.....	76
4.4 Εξαγωγή του μοντέλου σε αρχεία .....	93
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	102
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	103

## **ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ**

Εικόνα 1: Πολυγωνικό πλέγμα με 861 κορυφές και 1.676 μπαλώματα (αραιή ανάλυση) .....	22
Εικόνα 2: (1) Μοντέλο αναφοράς, (2) Προσαρμογή μοντέλου αναφοράς στα δεδομένα σάρωσης, (3) Προσαρμογή με Γραμμική προσέγγιση του μοντέλου αναφοράς στα δεδομένα σάρωσης -αναπαράσταση με σκελετό, (4) Αναπαράσταση χωρίς σκελετό .....	28
Εικόνα 3: (1) Μοντέλο μετά από πρόχειρη προσαρμογή (Skeleton fitting), (2) Μοντέλο σάρωσης, (3) Μοντέλο μετά την τελειοποίηση του δέρματος .....	29
Εικόνα 4: Ελαστικό Πολυγωνικό Πλέγμα (ABCD) πάνω από το τετραγωνικό μπάλωμα.....	30
Εικόνα 5: Έναρξη με μια πρόχειρη προσαρμογή του μοντέλου από προηγούμενο στάδιο, (2) Πρώτη αντιστοίχιση, (3) Έπειτα από 10 επαναλήψεις και αντιστοίχισης, (4) Οι τελικές αποστάσεις αντιστοίχισης, (5) Το μοντέλο - στόχος της σάρωσης ....	32
Εικόνα 6: Πολυγωνικό πλέγμα με 3.401 κορυφές και 6.704 μπαλώματα (πυκνή ανάλυση).....	33
Εικόνα 7: Οι κόμβοι των αρθρώσεων του σώματος σύμφωνα με τις προδιαγραφές H-Anim .....	35
Εικόνα 8: Τα κύρια χαρακτηριστικά σημεία πάνω στο ανθρώπινο μοντέλο.....	40
Εικόνα 9: Καθορισμός των κυρίων χαρακτηριστικών σημείων – Δημιουργία τομών.....	40
Εικόνα 10: (α) Όλα τα χαρακτηριστικά σημεία, (β) Το τελικό χαρακτηριστικό πλέγμα, (γ) Γραφική παράσταση τοπολογίας .....	41
Εικόνα 11: Βήματα της διαδικασίας καθορισμού μιας χαρακτηριστικής καμπύλης. (α) Τα δύο σημεία που πρόκειται να συνδεθούν, (β) Το περίγραμμα των σημείων που περνάει από δύο σημεία, (γ) Η ένωση που θα προσεγγίσει την καμπύλη, (δ) Η καμπύλη χαρακτηριστικών γνωρισμάτων .....	43
Εικόνα 12: Καθορισμός της γωνίας παρεμβολής Gregory .....	45
Εικόνα 13: $P_G$ ενός μπαλώματος Gregory με πέντε πλευρές.....	45
Εικόνα 14: Ορισμός ενός μπαλώματος Gregory .....	46
Εικόνα 15: Παρεμβολή Gregory για την παραγωγή μπαλωμάτων. (α) Γραφική παράσταση τοπολογίας με διασταυρωμένα κάθετα διανύσματα. (β) Καμπύλες και ορισμένα μπαλώματα σε ένα μοντέλο ακμών. (γ) Δημιουργία όλων των μπαλωμάτων. (δ) Δομή του πλέγματος. (ε) Μαρκαρισμένο μοντέλο για τον έλεγχο των μπαλωμάτων.....	48
Εικόνα 16: Περιοχή Γ γύρω από μία κορυφή .....	50
Εικόνα 17: Τελειοποίηση επιφανείας. (α) Παρεμβαλλόμενη επιφάνεια. (β) Νέφος σημείων. (γ) Επιφάνεια με θορύβους. (δ) Τελικό αποτέλεσμα με $\varepsilon=0,1$ .....	51
Εικόνα 18: Παράδειγμα σύνθεσης ενός γυναικείου μοντέλου .....	55
Εικόνα 19: Γυναικεία μοντέλα βάσει διαστάσεων πίνακα.....	56
Εικόνα 20: Ανδρικά μοντέλα βάσει διαστάσεων πίνακα.....	57
Εικόνα 21: Γυναικεία μοντέλα με ίδιο ύψος (165 cm) και διαφορετικές διαστάσεις γοφών .....	58
Εικόνα 22: Ανδρικά μοντέλα με ίδιο ύψος (175 cm) και διαφορετική περίμετρο μέσης .....	58
Εικόνα 23: Προσαρμογή ενδύματος σε γυναικεία μοντέλα με διαφορετικές διαστάσεις .....	59
Εικόνα 24: Νέφος σημείων που προκύπτει από τη διαδικασία σκαναρίσματος.....	60
Εικόνα 25: Διαδικασία δημιουργίας αρχικού πολυγωνικού μοντέλου με 30000 τρίγωνα .....	61
Εικόνα 26: Το αρχικό πολυγωνικό μοντέλο μετά την προσαρμογή επιφανείας .....	62
Εικόνα 27: Διαδικασία γεμίσματος οπών .....	63
Εικόνα 28: Πολυγωνικό μοντέλο μετά το γέμισμα οπών .....	63
Εικόνα 29: Αποθήκευση κλειστού πολυγωνικού μοντέλου .....	64
Εικόνα 30: Πολυγωνικό μοντέλο πριν την έναρξη επεξεργασίας του στο 3DSMAX .....	65

Εικόνα 31: Απεικόνιση του πολυγωνικού μοντέλου σε όλα τα VIEWPORTS (TOP, FRONT, LEFT, PERSPECTIVE).....	66
Εικόνα 32: Το πολυγωνικό μοντέλο σωστά διευθετημένο στο χώρο .....	67
Εικόνα 33: Ρύθμιση του σημείου περιστροφής (PIVOT).....	68
Εικόνα 34: Μεταφορά του μοντέλου στο επίπεδο 0, Z (0.0m) .....	69
Εικόνα 35: Μετατροπή των μονάδων σε μέτρα.....	70
Εικόνα 36: Ρύθμιση του μεγέθους του σκαναρισμένου μοντέλου .....	71
Εικόνα 37: Επιλογή όλων των σημείων του μοντέλου .....	73
Εικόνα 38: Προσθήκη του modifier FEATURE POINTS .....	74
Εικόνα 39: Επιλογή των 48 σημείων.....	75
Εικόνα 40: Τελικά χαρακτηριστικά σημεία του πρότυπου μοντέλου (FRONT και BACK όψη).....	76
Εικόνα 41: Εισαγωγή του σκαναρισμένου μοντέλου στο πρότυπο μοντέλο (GENERIC MODEL) .....	77
Εικόνα 42: Το πρότυπο και το σκαναρισμένο μοντέλο σε FRONT όψη.....	78
Εικόνα 43: Ευθυγράμμιση των δύο μοντέλων.....	79
Εικόνα 44: Διαδικασία προσαρμογής πρότυπου μοντέλου στο πολυγωνικό πλέγμα (Fit Skeleton).....	80
Εικόνα 45: Προβληματική προσαρμογή μοντέλου (λαιμός, χέρια).....	81
Εικόνα 46: Εξαίρεση του κεφαλιού και των άκρων από τη διαδικασία .....	82
Εικόνα 47: Αρχική προσαρμογή του πλέγματος του GENERIC MODEL στο σκαναρισμένο πολυγωνικό μοντέλο (Με F4 διαφαίνεται το πολυγωνικό πλέγμα) ....	83
Εικόνα 48: Εισαγωγή του αρχείου POINTS.ftp .....	84
Εικόνα 49: Εισαγωγή του αρχείου Contour LowRes.txt .....	84
Εικόνα 50: Το πολυγωνικό μοντέλο μετά την εισαγωγή των δύο αρχείων (Points και Contours LowRes) .....	85
Εικόνα 51: Το πολυγωνικό μοντέλο μετά την πρώτη χαλάρωση (Smooth Method: M1).....	86
Εικόνα 52: Το πολυγωνικό μοντέλο με τα βάρη των σημείων, μετά από τις διορθώσεις (μείωση χαλαρότητας – μπλε χρώμα).....	87
Εικόνα 53: Το πολυγωνικό μοντέλο μετά τη δεύτερη χαλάρωση (Smooth Method: M2).....	88
Εικόνα 54: Χειροκίνητη διόρθωση της αναπαράστασης με την επιλογή Edit Mesh..	89
Εικόνα 55: Εμφάνιση του σκελετού.....	90
Εικόνα 56: Το πολυγωνικό μοντέλο μετά τον επαναπροσδιορισμό της θέσης και του μεγέθους των αρθρώσεων (Recompute Join Location).....	90
Εικόνα 57: (1) Τελικό πολυγωνικό πλέγμα (πυκνή ανάλυση), (2) Αρχικό πολυγωνικό πλέγμα (αραιή ανάλυση).....	91
Εικόνα 58: Διαδικασία αύξησης πυκνότητας πλέγματος (Spline Surface) .....	92
Εικόνα 59: Το πολυγωνικό μοντέλο στην τελική του μορφή .....	93
Εικόνα 60: Εμφάνιση του σκελετού στο τελικό πολυγωνικό μοντέλο.....	94
Εικόνα 61: Ορισμός του χρόνου έναρξης της κίνησης – Animation (Start Time: -1) ..	95
Εικόνα 62: Μεταφορά του σκελετού στο frame -1 και ενεργοποίηση του AutoKey...	95
Εικόνα 63: Απόδοση της H-Anim default πόζας στο πολυγωνικό μοντέλο.....	96
Εικόνα 64: Το πολυγωνικό μοντέλο και η θέση του σκελετού πριν την εισαγωγή του αρχείου Import For Offset.....	97
Εικόνα 65: Το πολυγωνικό μοντέλο και η θέση του σκελετού μετά την εισαγωγή του αρχείου Import For Offset.....	97
Εικόνα 66: Εξαγωγή της γεωμετρίας του σκελετού του πολυγωνικού μοντέλου (Export Skeleton Geometry).....	98
Εικόνα 67: Αποθήκευση του αρχείου offset.txt .....	99
Εικόνα 68: Αποθήκευση του αρχείου των ισοϋψών καμπύλων του πολυγωνικού μοντέλου (contours.txt) .....	100
Εικόνα 69: Δημιουργία των υπόλοιπων αρχείων του πολυγωνικού μοντέλου.....	101
Εικόνα 70: Το πολυγωνικό μοντέλο στην τελική του μορφή .....	101

Πίνακας 1: Παράμετροι διαστάσεων .....	20
Πίνακας 2: LOA 2 –Default Joint Centers .....	37
Πίνακας 3: Διαστάσεις 6 γυναικείων μοντέλων .....	56
Πίνακας 4: Διαστάσεις 6 ανδρικών μοντέλων .....	57
Πίνακας 5: 48 Χαρακτηριστικά σημεία.....	73

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «Δημιουργία τρισδιάστατων πολυγωνικών ανθρωπίνων μοντέλων βάσει δεδομένων σάρωσης», παρουσιάζεται το μαθηματικό υπόβαθρο της διαδικασίας δημιουργίας πολυγωνικών ανθρωπίνων μοντέλων, λεπτομερής περιγραφή της διαδικασίας στα λογισμικά που χρησιμοποιούνται Geomagic Studio και Bodysizer (Plug-In του 3D Studio Max), καθώς επίσης και εφαρμογές των ανθρωπίνων μοντέλων που προκύπτουν από αυτήν τη διαδικασία. Τα δεδομένα σάρωσης αποτελούνται από νέφη σημείων που λήφθηκαν από τρισδιάστατους σαρωτές βάθους, οι οποίοι εφαρμόστηκαν σε σύνολο 291 ατόμων ( 233 γυναίκες και 58 άνδρες).

Η διπλωματική εργασία αναπτύσσεται σε 5 κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στην μοντελοποίηση – παραμετροποίηση του ανθρωπίνου σώματος και στη χρησιμότητά του σε διάφορους τομείς. Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται διάφορες εφαρμογές των ανθρωπίνων μοντέλων, προσδίδοντας ιδιαίτερη έμφαση στις βιομηχανίες ένδυσης.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται μεθοδολογίες με παρουσίαση μαθηματικών τύπων που χρησιμοποιούνται στην παραμετρική σχεδίαση ανθρωπίνων σωμάτων. Στο τέταρτο κεφάλαιο αναπτύσσεται βήμα προς βήμα η δημιουργία ενός πολυγωνικού τρισδιάστατου γυναικείου μοντέλου.

Τέλος στο πέμπτο κεφάλαιο, αναφέρονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα εργασία.



## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μοντελοποίηση - παραμετροποίηση του ανθρώπινου σώματος έχει εφαρμογές σε διάφορους τομείς, όπως για παράδειγμα στη βιομηχανία ψυχαγωγίας (κινηματογράφος, τηλεόραση), στην ιατρική (εικονική αναπαράσταση του σώματος, τρισδιάστατη ανακατασκευή από διαγνωστικές δισδιάστατες τομές), στην εργονομία (χρήση ανθρωποειδών σε εικονικές αναπαραστάσεις παραγωγικών διαδικασιών), στον πολιτισμό (τρειςδιάστατες αναπαραστάσεις ζωής αρχαίων πολιτισμών) και στη βιομηχανία ένδυσης, η οποία θα αναλυθεί παρακάτω.

Οι εφαρμογές της ανάλυσης της μορφής του ανθρώπινου σώματος και της αντίστοιχης μοντελοποίησης – παραμετροποίησής του στη βιομηχανία ένδυσης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

**1. Ανάλυση – παραμετροποίηση των χαρακτηριστικών μορφών που παρουσιάζονται σε ένα δεδομένο δείγμα του πληθυσμού που επιλέγεται με κριτήρια δημογραφικά (ηλικία, φύλλο, κλπ.) με στόχο να κατασκευάζονται ρούχα που έχουν καλή εφαρμογή στα σώματα των ανθρώπων του συγκεκριμένου πληθυσμού – στόχου (target group).** Η πρωτογενής ανάλυση των μορφών γίνεται με βάση μονοδιάστατων δεδομένων (μετρήσεων), πιο συγκεκριμένα είναι μια πολυμεταβλητή στατιστική ανάλυση, η οποία καταλήγει στη δημιουργία των μεθοδολογιών για κάθε κατηγορία ρούχου. Μια άλλου τύπου κατηγοριοποίηση μπορεί να γίνει με τη χρήση δεικτών που συνδυάζουν μετρήσεις, όπως για παράδειγμα Body Mass Index (BMI)= Βάρος / (Ύψος)<sup>3</sup>, Waist – to – hip ratio (περίμετρος μέσης / περίμετρος γλουτών), chest – to – waist ratio (περίμετρος στήθους / περίμετρος μέσης), κλπ. Επίσης με ανάλυση σωματότυπων, ένας ειδικά επιστημονικός κλάδος με εφαρμογές κυρίως στον αθλητισμό, στη διαιτολογία, κ.ά.

**2. Ανάλυση – παραμετροποίηση των χαρακτηριστικών μορφών που παρουσιάζονται σε ένα δεδομένο δείγμα του πληθυσμού, το οποίο επιλέγεται με κριτήρια διαστασιομετρικά (π.χ. ποιες διαφοροποιήσεις παρουσιάζονται στο σχήμα συγκεκριμένων περιοχών του σώματος ατόμων που φορούν το ίδιο μέγεθος για ένα συγκεκριμένο είδος ρούχου), με στόχο να προσαρμόζεται η σχεδίαση του ρούχου, ώστε να καλύπτει κατά το δυνατόν όλες τις πιθανές ιδιομορφίες, οι οποίες παρουσιάζονται στα σώματα που κατατάσσονται στο ίδιο μέγεθος με μοναδικό κριτήριο τις συγκεκριμένες μετρήσεις.** Η ανάλυση αυτή μπορεί να επεκταθεί και στη διατύπωση απευθείας σχέσεων μεταξύ της μορφής κάποιας περιοχής και της

μορφής του δισδιάστατου σχεδίου – πατρών. Η διατύπωση τέτοιων σχέσεων είναι χρήσιμη για την αυτόματη τροποποίηση υπαρχόντων πατρών για την προσαρμογή τους στο σώμα του συγκεκριμένου πελάτη (ρούχα ραμμένα στα μέτρα του πελάτη, Made - To- Measure Technologies).

Τα τελευταία χρόνια πολλές Ευρωπαϊκές χώρες κινούνται προς τη κατεύθυνση της παραγωγής ενδυμάτων ραμμένων στις διαστάσεις του πελάτη (made - to -measure) καθώς επίσης και στην ανάπτυξη του τομέα αγοράς ρούχων σε απευθείας σύνδεση με το διαδίκτυο (online apparel shopping). Έχει παρατηρηθεί ότι η διεύρυνση του διαδικτύου και η ραγδαία ανάπτυξη των τεχνολογιών του, προσφέρουν ένα αισθητά ικανοποιητικό αποτέλεσμα στο χρήστη, του συστήματος επικοινωνίας.

Μέχρι πρότινος τέτοιου είδους εφαρμογές δικτύου, υποστήριζαν μόνο βασικές λειτουργίες, όπως τρισδιάστατες ή δισδιάστατες απεικονίσεις των ρούχων, συνδυασμό διαφορετικών κομματιών, μίξεις και εναρμονίσεις χρωμάτων και υφασμάτων, που ορισμένες φορές προβάλλονταν μανεκέν – μοντέλα προσαρμοσμένα στις αναλογίες του αγοραστή. Μειονέκτημα αυτής της εφαρμογής αποτελεί η προχειρότητα της πρόβας των ρούχων, η κακή εφαρμογή και το αίσθημα δυσφορίας για το ρούχο ή το χρώμα του.

Η δημιουργία ενός Περιβάλλοντος Ηλεκτρονικής Συνεργασίας και η αυτόματη προσαρμογή των τρισδιάστατων ανθρωποειδών (μοντέλων) που θα εξαχθούν από αυτήν την εργασία, σύμφωνα με τις μετρήσεις των διαστάσεων του πελάτη, πρόβα και αναπροσαρμογή των διαστάσεων του ενδύματος σε απευθείας σύνδεση με το διαδίκτυο, καθώς επίσης και προσομοίωση κίνησης του ρούχου σε πραγματικό χρόνο, αποτελεί μια σημαντική εφαρμογή.

Στα παρακάτω κεφάλαια παρουσιάζονται: οι διάφορες εφαρμογές των τρισδιάστατων πολυγωνικών μοντέλων, το μαθητικό υπόβαθρο της διαδικασίας δημιουργίας τρισδιάστατου πολυγωνικού μοντέλου βάσει σκαναρισμένων δεδομένων (νέφους σημείων), καθώς επίσης και η αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας.

## **2. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ**

### **2.1 Γενικά**

Αποτελεί γεγονός ότι η συνεχώς αυξανόμενη πίεση του ανταγωνισμού απαιτεί από όλους τους κλάδους παραγωγής να αναπτύξουν νέες μορφές λειτουργίας σε όλες τις επιχειρησιακές διαδικασίες. Μια από αυτές τις διαδικασίες είναι η ανάπτυξη και η προώθηση των νέων προϊόντων. Τα σημερινά προϊόντα χαρακτηρίζονται από μια συνεχώς αυξανόμενη πολυπλοκότητα (προϊόντος και διαδικασίας παραγωγής), υψηλό επίπεδο απαιτούμενης ποιότητας και αυτά σε συνδυασμό με συνεχώς μικρότερο χρόνο ανάπτυξης και ζωής του προϊόντος. Ο χρόνος ανάπτυξης ενός προϊόντος ηλεκτρονικής βιομηχανίας είναι λιγότερο από ένα έτος, η βιομηχανία ένδυσης απαιτεί δύο ως τρεις φάσεις σχεδίασης-δοκιμής, η ανάπτυξη ενός οχήματος είναι λιγότερο από 3 έτη, ενώ ο χρόνος ανάπτυξης των καταναλωτικών προϊόντων έχει μειωθεί στο μισό. Η επίτευξη του στόχου είναι εφικτή μόνο από τη χρήση νέων τεχνολογιών ανάπτυξης προϊόντων, που συνδυάζουν τις ευρέως χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες CAD/CAM/CAE με αυτές της διαχείρισης του κύκλου ζωής του προϊόντος και με τεχνολογίες πληροφορίας που προσφέρουν νέες υπηρεσίες και νέες εμπειρίες εργασίας, όπως είναι η ηλεκτρονική εργασία (e-working) , και η δυνατότητα συνεργασίας διαφόρων απομακρυσμένων χρηστών, οι οποίοι έχουν την δυνατότητα να μοιράζονται πληροφορίες και ιδέες εργαζόμενοι ταυτόχρονα σε κοινό θέμα (e-collaboration).

Όλες οι εταιρείες υιοθετούν διαδικασίες παράλληλης μηχανικής στην ανάπτυξη νέων προϊόντων στην οποία η ανάπτυξη του προϊόντος, οι διαδικασίες σχεδιασμού των παραγωγικών διαδικασιών και η προμηθευτική αλυσίδα αναπτύσσονται παράλληλα και απαιτούν τη συμμετοχή διαφόρων τμημάτων της ίδιας της βιομηχανίας, που συνήθως βρίσκονται σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές, καθώς και εξωτερικών φορέων όπως προμηθευτών, οι οποίοι σχεδιάζουν και αναπτύσσουν συνεργατικά τμήματα του προϊόντος, υπεργολάβων και πελατών. Παράλληλα η προώθηση του προϊόντος γίνεται σε μεγάλο βαθμό μέσα από το διαδίκτυο και συνεχώς προκύπτει μια βελτίωση του τρόπου παρουσίασης που να ανταποκρίνεται στο πραγματικό περιβάλλον αγοράς.

Πιο συγκεκριμένα, μέσω της δημιουργίας ενός Περιβάλλοντος Ηλεκτρονικής Συνεργασίας, σύγχρονων τεχνολογιών που προέρχονται από τη βιομηχανία της ένδυσης και των καταναλωτικών μηχανολογικών προϊόντων, για την υποστήριξη της προώθησης και του σχεδιασμού προϊόντων και διαδικασιών παραγωγής. Πιο

συγκεκριμένα, με χρήση τεχνικών Διαδικτύου, Τρισδιάστατης Σάρωσης, Μοντελοποίησης Ψηφιακών Ανθρωποειδών, Ταχείας Προτυποποίησης, Εικονικής Πραγματικότητας και Εργονομίας, το περιβάλλον αυτό θα υποστηρίξει:

- Την αναβαθμισμένη παρουσίαση των προϊόντων ένδυσης στο Διαδίκτυο με τη χρήση του 3D ανθρώπινου μοντέλου και ενδύματος
- Το σχεδιασμό προϊόντων, με σκοπό τη μείωση των φάσεων προτυποποίησης, την ευελιξία στο σχεδιασμό, τη βελτίωση της ποιότητας κατασκευής και τη δυνατότητα συνεργασίας μεταξύ των συνεργαζόμενων εταίρων (σχεδιαστών, κατασκευαστών, κά.), με έμφαση στα προϊόντα ένδυσης.
- Το σχεδιασμό παραγωγικών διαδικασιών, με σκοπό τη δυνατότητα ελέγχου της εργονομίας των παραγωγικών διαδικασιών, τη μείωση του κόστους και του χρόνου παραγωγής και τη δυνατότητα συνεργασίας μεταξύ της βιομηχανίας και των συνεργαζόμενων φορέων.

Επίσης μπορούν να αναπτυχθούν πιλοτικές εφαρμογές σχεδιασμού προϊόντων και διαδικασιών μέσω αυτής της ηλεκτρονικής πύλης, σε πεδία που κρίνεται ότι η χρήση τέτοιων μεθόδων θα οδηγήσει σε βελτίωση των διαδικασιών σχεδιασμού και των παραγομένων προϊόντων και υπηρεσιών. Τέτοια πεδία αφορούν σε βιομηχανίες παραγωγής ενδυμάτων καθώς και βιομηχανίες παραγωγής πολύπλοκων προϊόντων όπως ψυκτικών θαλάμων και πλαστικών προϊόντων.

Στα ενδύματα, ο παραδοσιακός τρόπος σχεδιασμού τους περιλαμβάνει τη γεωμετρική σχεδίαση των πατρών των ρούχων, τα οποία στη συνέχεια τοποθετούνται γύρω από το σώμα κατά την διαδικασία της προτυποποίησης, γίνεται έλεγχος του αποτελέσματος, ανάδραση κλπ.. Το σύστημα εικονικής προσομοίωσης, με χρήση ψηφιακών ανθρωποειδών, που αναπτύσσεται στα πλαίσια του έργου, μπορεί να αναπαράγει αυτή τη διαδικασία, καταργώντας την ανάγκη της δημιουργίας πραγματικών πρωτότυπων μοντέλων. Έτσι με αυτό τον τρόπο:

1. Εξαλείφονται πολλές επαναλαμβανόμενες διαδικασίες της φάσης προτυποποίησης, όπως δημιουργία δισδιάστατων πατρών, κοπή δειγμάτων, έλεγχος πάνω σε κούκλες, αξιολόγηση, επανασχεδίαση των πατρών, κλπ. και

αντικαθίστανται από την άμεση συνεργασία της ομάδας σχεδίασης με την ομάδα προτυποποίησης.

2. Μειώνεται σημαντικά ο χρόνος της διαδικασίας πρωτοτυποποίησης, κρίσιμο στοιχείο για μια βιομηχανία ενδυμάτων που ακολουθεί τη μόδα και απαιτεί την δημιουργία 4 μέχρι και 12 κολεξιόν το χρόνο (σύγχρονες τάσεις).
3. Ακόμη μειώνεται σημαντικά και ο χρόνος εργασίας καθώς επίσης και η χρήση πρώτων υλών.

Αν στα παραπάνω προστεθούν και τα πλεονεκτήματα του Περιβάλλοντος Ηλεκτρονικής Συνεργασίας, το τελικό αποτέλεσμα θα παρέχει σημαντική ευελιξία, ειδικά στις βιομηχανίες όπου οι σχεδιαστές και οι κατασκευαστές βρίσκονται σε απομακρυσμένα μέρη.

Όσον αφορά την περίπτωση των βιομηχανικών προϊόντων, η εικονική προσομοίωση παρέχει σημαντικά πλεονεκτήματα στη φάση του σχεδιασμού τόσο των ίδιων των προϊόντων όσο και των διαδικασιών παραγωγής τους, αφού δίνει τη δυνατότητα οπτικοποίησης σε πραγματικό χρόνο, αξιολόγησης των σχεδιαστικών προτάσεων και ελέγχου εργονομίας των διαδικασιών παραγωγής. Με την ολοκλήρωση αυτού του περιβάλλοντος σε ένα συνεργατικό ηλεκτρονικό πεδίο, όλα τα παραπάνω θα εμφανίζονται σε ένα μόνο περιβάλλον προσομοίωσης, στο οποίο θα έχουν πρόσβαση όλοι οι χρήστες που συμμετέχουν στις διαδικασίες σχεδιασμού και παραγωγής και που μπορούν να βρίσκονται σε απομακρυσμένα σημεία. Οι χρήστες θα έχουν τη δυνατότητα να αλληλεπιδρούν με το εικονικό περιβάλλον, να αλλάζουν το σχεδιασμό, να αναζητούν συγκεκριμένες πληροφορίες, να ανταλλάσσουν απόψεις, να ελέγχουν την λειτουργικότητα των προϊόντων και την εργονομία των παραγωγικών διαδικασιών, και να δουλεύουν ταυτόχρονα σε πραγματικό χρόνο για το βέλτιστο αποτέλεσμα. Η ολοκλήρωση ενός τέτοιου περιβάλλοντος προσφέρει ποικίλα πλεονεκτήματα όπως:

- Εξελιγμένη διαδικασία σχεδιασμού προϊόντων και διαδικασιών παραγωγής.
- Διασύνδεση των ομάδων εργασίας.

- Συμμετοχή τελικών χρηστών και προμηθευτών για συντομότερη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του σχεδιασμού.
- Μείωση του κόστους μετακινήσεων και βελτίωση της επικοινωνίας των συμμετεχόντων ομάδων εργασίας σε όλο τον κύκλο ζωής των προϊόντων.
- Βελτίωση των διαδικασιών παραγωγής.

## **2.2 Τρισδιάστατη σάρωση και άλλες εφαρμογές**

### **2.2.1 Σάρωση 3D (τρειςδιάστατοι σαρωτές ανθρωπίνων σωμάτων)**

Για τη λήψη τρισδιάστατων δεδομένων, έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορες τεχνικές. Η επικρατέστερη τεχνική είναι μέσω της χρήσης φωτισμού, η οποία βασίζεται στην αρχή της τριγωνοποίησης. Η ακρίβεια σάρωσης εξαρτάται από το πλήθος των κεφαλών σάρωσης και την ανάλυση κάθε κεφαλής του σαρωτή. Για εφαρμογές ένδυσης ακρίβεια της τάξης του mm είναι επαρκής. Ο βασικός σκοπός για την επεξεργασία του τρισδιάστατου νέφους σημείων από το σαρωτή, είναι η λήψη μετρήσεων, που ορίζονται με τέτοιο τρόπο, ώστε να προσεγγίζουν τις μετρήσεις που λαμβάνονται με το χέρι, οι οποίες βασίζονται στην ανατομία του χρήστη.

Η χρήση τρισδιάστατων δεδομένων σάρωσης του ανθρώπινου σώματος δεν περιορίζεται στις εφαρμογές ένδυσης και στη δημιουργία διαγραμμάτων μετρήσεων. Τα δεδομένα αυτά, μέσω της ανάπτυξης λεπτομερών τρισδιάστατων γεωμετρικών μοντέλων σωματότυπων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περιοχές, όπου οι διαστάσεις του ανθρώπινου σώματος αποτελούν βασικό παράγοντα για την ανάπτυξη του προϊόντος ή για τη λήψη αποφάσεων σχετικών με τη μορφοποίηση χώρων διαβίωσης. Τα τρισδιάστατα δεδομένα σάρωσης, εκτός από τη μέτρηση βασικών ανθρωπίνων διαστάσεων, όπως η διάμετρος της περιφέρειας ή το ύψος, χρησιμοποιούνται επιπλέον για τη δημιουργία εικονικών ανθρωπίνων μοντέλων, γνωστών ως ανθρωποειδή. Τα ανθρωποειδή χρησιμοποιούνται σε εργονομικές εφαρμογές, όπου μπορεί να προσδιοριστεί η θέση των αρθρώσεων για συγκεκριμένες αλληλουχίες κινήσεων. Παρακάτω παρατίθενται διάφοροι τομείς εφαρμογής των δεδομένων σάρωσης του ανθρώπινου σώματος:

- Ηλεκτρονικό εμπόριο: Χρήση δεδομένων σάρωσης για τη δημιουργία ανθρωποειδών χρηστών, τα οποία αξιοποιούνται σε Εικονικά Δοκιμαστήρια ρούχων ή σε ηλεκτρονικά παιχνίδια.
- Αυτοκινητοβιομηχανία: Χρήση εικονικών μοντέλων για το σχεδιασμό του εσωτερικού του αυτοκινήτου.
- Βιομηχανία επίπλων:
  1. Χρήση εικονικών μοντέλων για εργονομικό σχεδιασμό καθισμάτων.
  2. Χρήση εικονικών μοντέλων για εργονομικό σχεδιασμό επίπλων γραφείου.
  3. Χρήση εικονικών μοντέλων για εργονομικό σχεδιασμό κρεβατιών.
- Αθλητικός εξοπλισμός: Χρήση εικονικών μοντέλων για εργονομικό σχεδιασμό αθλητικού εξοπλισμού.
- Αρχιτεκτονική: Χρήση εικονικών μοντέλων για εργονομικό σχεδιασμό σε πόρτες, κλιμακοστάσια, κυκλιδώματα, κλπ.
- Γραμμές παραγωγής για τους βιομηχανικούς τομείς:
  1. Χρήση εικονικών μοντέλων για εργονομικό σχεδιασμό θέσεων εργασίας.
  2. Χρήση δεδομένων σάρωσης για την ανάπτυξη δυναμικών, κινούμενων εικονικών μοντέλων για την εικονική προσομοίωση διαδικασιών.

### **2.2.2 Μοντέλο Ανθρωποειδούς για χρήση σε όλες τις εφαρμογές (3D μοντέλα επιφανειών)**

Ένα ακριβές και καλά δομημένο Μοντέλο Ανθρωποειδούς ανεπτυγμένο από νέφος σημείων είναι επαρκές για κάποιες εφαρμογές, όπως η διαφήμιση, όπου η επεξεργασία των τρισδιάστατων μοντέλων είναι περιορισμένη. Πολλές εφαρμογές όμως απαιτούν περισσότερο συμπαγή μοντέλα, κατάλληλα για την υλοποίηση εξειδικευμένων εφαρμογών όπως κινούμενα γραφικά, γεωμετρική επεξεργασία ή εργαλεία προσομοίωσης μηχανολογικών συστημάτων.

Μια κρίσιμη απαίτηση για όλες τις εφαρμογές είναι η ανάπτυξη επιφανειακού μοντέλου του ανθρώπινου σώματος χωρίς ασυνέχειες. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της συμπλήρωσης των κενών που προκύπτουν κατά τη σάρωση σε τυφλές περιοχές, όπως είναι οι περιοχές που δεν είναι ορατές από τις κεφαλές του σαρωτή (π.χ. μασχάλες), μέσω της μείωσης των λανθασμένων ή περιττών μετρήσεων από το σαρωτή, κλπ. Εξίσου σημαντική για τις περισσότερες εφαρμογές, είναι η ανάπτυξη ενός Spline επιφανειακού μοντέλου από ένα δεδομένο νέφος σημείων. Αυτό είναι απαραίτητο για τη δημιουργία ενός ανθρωποειδούς, το οποίο να μπορεί να ντυθεί, αφού η επικάλυψη του σώματος με το εικονικό ένδυμα επηρεάζεται από την ανίχνευση σύγκρουσης μεταξύ του εικονικού ενδύματος και οποιουδήποτε σημείου της επιφάνειας του σώματος. Παρόλα αυτά η διαδικασία δημιουργίας ενός ανθρωποειδούς δεν είναι απλή ακόμα και για ανθρωποειδή που δεν προορίζονται στην παραγωγή κινούμενων γραφικών (στην περίπτωση αυτή απαιτείται η τοποθέτηση ενός σκελετού στο εσωτερικό). Παρά τη δυνατότητα δημιουργίας ανθρωποειδών χωρίς ασυνέχειες από μερικά συστήματα, χρειάζεται επιπλέον έρευνα για τη βελτίωση της ακρίβειας και της χρηστικότητας της τελικής επιφάνειας. Επιπλέον απαιτούνται βελτιωμένες τεχνικές μείωσης του πλέγματος για μείωση του όγκου των δεδομένων κατά το φωτορεαλισμό. Η δυνατότητα αυτή έχει χρησιμότητα σε διαδικτυακές εφαρμογές. Τεχνική περιγραφή:

- Δημιουργία ανθρωποειδών με δυνατότητες τροποποίησης, στα οποία να μπορεί να τοποθετηθεί εικονική ένδυση. Το ανθρωποειδή πρέπει να έχουν μέση σωματική διάπλαση και διαστάσεις αντίστοιχες με τους υποψήφιους καταναλωτές.
- Δημιουργία ανθρωποειδών χωρίς ασυνέχειες για κάθε χρήστη, απευθείας από δεδομένα σάρωσης. Η τεχνική αυτή απαιτείται σε επιχειρηματικά μοντέλα, όπως οι δικτυακές εφαρμογές Εικονικού Δοκιμαστηρίου, όπου χρησιμοποιούνται μετρήσεις από το σώμα του πελάτη.

Η διαθεσιμότητα ανθρωποειδών με δυνατότητες τροποποίησης, ειδικά εάν αναπαριστούν μέσους σωματότυπους ενός πληθυσμού, είναι μια από τις σημαντικές απαιτήσεις της Εικονικής Πρωτοτυποποίησης ενδυμάτων. Επιπλέον θεωρείται παράμετρος αύξησης της αξίας και της ευελιξίας της εφαρμογής. Στις υπάρχουσες τεχνικές χρησιμοποιούνται μοντέλα χωρίς δυνατότητες τροποποίησης, των οποίων οι διαστάσεις δεν ανταποκρίνονται στην πραγματική σωματική διάπλαση του πληθυσμού.



### **2.2.3 Αναπαράσταση σχεδιαστικού μοντέλου σε 3 διαστάσεις (από πατράν σε 3D), οπτικοποίηση, κίνηση (animation)**

Στη βιομηχανία ένδυσης και στη κλωστοϋφαντουργία σήμερα τα συστήματα σχεδίασης σε δύο διαστάσεις είναι ιδιαίτερα διαδεδομένα, τα συστήματα σχεδίασης σε τρεις διαστάσεις είναι σε πρώιμη μορφή και η τεχνολογία Εικονικής Πρωτοτυποποίησης δεν εφαρμόζεται καθόλου. Αυτό οφείλεται στην πολυπλοκότητα που απαιτεί η προσομοίωση ενδυμάτων (σε σχέση με άλλα τρισδιάστατα αντικείμενα), λόγω της φύσης τους (εύκαμπτα υλικά) και λόγω του μεγάλου πλήθους των σχεδίων των ενδυμάτων. Επιπλέον, σε αντίθεση με άλλα προϊόντα, η προσαρμογή του ενδύματος στο ανθρώπινο σώμα είναι ιδιαίτερα κρίσιμος και υποκειμενικός παράγοντας επιλογής του προϊόντος (προτιμήσεις, επιθυμητό στυλ, κλπ.).

Για την ανάπτυξη μιας ολοκληρωμένης εφαρμογής Εικονικής Πρωτοτυποποίησης απαιτείται να λυθούν αρκετά δύσκολα προβλήματα. Μια ιδανική λύση θα παρείχε δυνατότητα μεταφοράς δισδιάστατων σχημάτων στις τρεις διαστάσεις και αντίστροφα και επιπλέον τη δυνατότητα μοντελοποίησης απευθείας στις τρεις διαστάσεις. Η μεταφορά ενός τρισδιάστατου μοντέλου σε δύο διαστάσεις είναι αρκετά δύσκολη αν και έχουν αναπτυχθεί κάποιες εφαρμογές που παρέχουν τέτοιες δυνατότητες, οι οποίες είναι προσανατολισμένες σε άλλα προϊόντα, αλλά πιθανώς να είναι εφικτή η προσαρμογή τους στον τομέα της ένδυσης. Πρόσφατες εξελίξεις της τεχνολογίας παρέχουν τη δυνατότητα (τουλάχιστον για ένα συγκεκριμένο εύρος ενδυμάτων) μετατροπής δισδιάστατων σχεδίων σε τρισδιάστατα πρωτότυπα.

Η παραδοσιακή διαδικασία σχεδιασμού ενδυμάτων περιλαμβάνει τη γεωμετρική μορφοποίηση του πατράν των ενδυμάτων, τα οποία στη συνέχεια τοποθετούνται γύρω από το σώμα κατά τη διάρκεια της διαδικασίας πρωτοτυποποίησης. Τα συστήματα Εικονικής Προσομοίωσης Ενδυμάτων αναπαράγουν αυτή τη διαδικασία, καταργώντας την ανάγκη κατασκευής πραγματικών ενδυμάτων για την πρωτοτυποποίηση. Με τον τρόπο αυτό παραλείπονται πολλά ενδιάμεσα βήματα της πρωτοτυποποίησης (πατράν δύο διαστάσεων, κόψιμο των δειγμάτων, δοκιμή σε μοντέλα, διόρθωση, επιστροφή στο πατράν, κλπ.), μειώνοντας σημαντικά τη διαδικασία πρωτοτυποποίησης (κρίσιμος παράγοντας για τη βιομηχανία μόδας, λόγω της υπάρχουσας τακτικής για τη δημιουργία έως και 12 κολεξιόν ετησίως),

μειώνοντας τις απαιτούμενες ώρες σε μη παραγωγική εργασία και μειώνοντας το απαιτούμενο υλικό (και το σκάρτο). Αν τα παραπάνω συνδυαστούν με τα πλεονεκτήματα της ηλεκτρονικής συνεργασίας, το τελικό αποτέλεσμα θα παρέχει μεγάλη ευελιξία, ειδικά στη συγκεκριμένη βιομηχανία, όπου οι σχεδιαστές και οι κατασκευαστές βρίσκονται σε απομακρυσμένα μεταξύ τους σημεία.

### 3. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ 3D ΠΟΛΥΓΩΝΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ – ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

#### 3.1 Μοντελοποίηση ανθρωπίνων μοντέλων

##### 3.1.1 Δεδομένα Τρισδιάστατης σάρωσης

Η μοντελοποίηση εφαρμόστηκε σε δείγμα 291 σκαναρισμένων σωμάτων (233 γυναικών και 58 ανδρών) ενηλίκων και τα δεδομένα λήφθηκαν από τρισδιάστατο σαρωτή βάθους (Vitus/smart – Tecmath).

Τα αρχικά πολυγωνικά μοντέλα υπόκεινται σε περαιτέρω προεπεξεργασία, με τη χρήση διάφορων πακέτων γραφικών του εμπορίου (στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Geomagic Studio), για το γέμισμα οπών, μείωση του πλήθους των τριγωνικών μπαλωμάτων έως 30000 και τη σύνδεση αυτών δημιουργώντας έτσι ένα πολυγωνικό πλέγμα. Σαν αποτέλεσμα, κάθε ένα από τα δεδομένα σάρωσης αντιπροσωπεύεται από ένα μοναδικό πολυγωνικό πλέγμα, χωρίς οπές και ελεύθερες ακμές.

Όλα τα άτομα τοποθετήθηκαν σε όρθια στάση με τα άκρα ελαφρώς εκτεταμένα και με διακριτικό ρουχισμό (εικόνα 2), ώστε οι μετρήσεις να είναι μεγάλης ακρίβειας. Οι πληροφορίες σάρωσης προκύπτουν με μετρήσεις σε διάφορα τμήματα του σώματος, κυρίως γύρω από τον κορμό και καταγράφονται σαν παράμετροι μετρήσεων μετροταινίας – διαστάσεων (sizing parameters). Στον παρακάτω πίνακα διαφαίνονται οι παράμετροι διαστάσεων και συγκεκριμένα ο ορισμός τους.

Μετρήσεις Μετροταινίας (Παράμετροι Διαστάσεων)	Ορισμός
Ανάστημα (Stature)	Η κάθετη απόσταση από το έδαφος της περιμέτρου του κεφαλιού (crown of the head).
Ύψος καβάλου (Crotch length)	Είναι η κάθετη απόσταση από το έδαφος, του επιπέδου του καβάλου στο κέντρο του σώματος.

<b>Μήκος άνω άκρων</b> (Arm length)	Είναι η απόσταση από το σημείο διατομής μεταξύ του άξονα του βραχίονα και του ώμου (acromion) που περνάει τον αγκώνα και καταλήγει στην προέκταση του καρπού (ulna) κατά μήκος της ευθείας του μικρού δακτύλου της παλάμης.
<b>Περίμετρος λαιμού</b> (Neck girth)	Είναι η περίμετρος της βάσης του λαιμού.
<b>Περίμετρος στήρνου</b> (Chest / Bust girth)	Είναι η μέγιστη περιφέρεια του κορμού που μετριέται στο ύψος του στήρνου.
<b>Περίμετρος υπό - στήρνου</b> (Under – bust girth)	Είναι η οριζόντια περίμετρος του τμήματος του σώματος αμέσως κάτω από το στήρνο.
<b>Περίμετρος μέσης</b> (Waist girth)	Είναι η οριζόντια περίμετρος στο ύψος της μέσης.
<b>Περίμετρος ισχίου</b> (Hip girth)	Είναι η οριζόντια περίμετρος του κορμού που μετριέται στο ύψος των γλουτών.

Πίνακας 1: Παράμετροι διαστάσεων

### 3.1.2 Μοντέλο Αναφοράς

Το πρότυπο μοντέλο συνθέτει μια μέση δομή του ανθρώπινου σκελετού του ανθρώπου και μια επιφάνεια δέρματος, την οποία συνθέτουν τετράπλευρα επιφανειακά μπαλώματα. Η προετοιμασία των μοντέλων αναφοράς περιλαμβάνει τρία διαδοχικά στάδια:

- Δημιουργία σκελετού και πρότυπου πολυγωνικού πλέγματος.
- Προσαρμογή σκελετού και πολυγωνικού πλέγματος.
- Υπολογισμός πληροφοριών σύνδεσης του δέρματος.

### 3.1.3 Σκελετός

Η ιεράρχηση του σκελετού έγινε σε επίπεδο αρθρώσεων τύπου 2 (Level of Articulation 2, LoA2) H-Anim (Προδιαγραφές Πρότυπου Ανθρωποειδούς). Η διαμόρφωση αυτή περιλαμβάνει 33 αρθρώσεις συμπεριλαμβανομένου της βάσης, εκτός από τις αρθρώσεις των δακτύλων. Ο σκελετός που προκύπτει αποτελεί μια πολύ καλή προσέγγιση της πραγματικής κινηματικής του ανθρώπου, ενώ παράλληλα η επίλυση και η απόδοση κίνησης είναι σχετικά απλή και οι αρθρώσεις κατά μήκος της ραχοκοκαλιάς έχουν απλοποιηθεί. Η συνδεσμολογία των οστών ακολουθεί τους κανόνες ιεραρχίας, εννοώντας ότι κάθε μετασχηματισμός μεγέθυνσης (scale), περιστροφής (rotate) και μετατόπισης (translate), κληρονομείται από τους αμέσως προηγούμενους στους επόμενους συνδέσμους, βάσει της κατάταξής τους. Ειδική περίπτωση αποτελεί ο σύνδεσμος βάσης του κρανίου στον οποίο η κληρονομικότητα απενεργοποιείται.

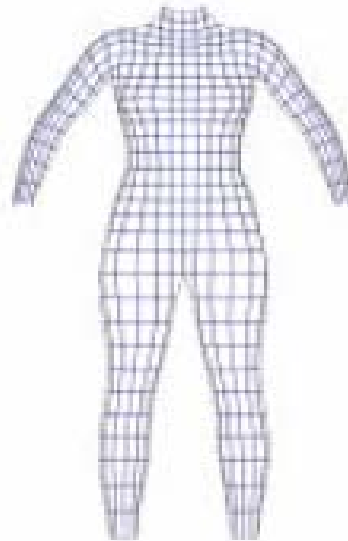
### 3.1.4 Πρότυπο Πολυγωνικό πλέγμα

Το πρωταρχικό πολυγωνικό πλέγμα αποτελείται από 861 κορυφές και 1.676 μπαλώματα (αραιή ανάλυση) και κυρίως αποτελείται από ένα σύνολο ισοϋψών καμπύλων και κάθετων γραμμών, οι οποίες σχηματίζουν ένα σύνολο τετραγωνικών μπαλωμάτων Bezier. Με τη δημιουργία τετραγωνικού πλέγματος Bezier μπορούμε να βελτιώσουμε το μοντέλο εκτελώντας τμηματοποίηση κατά Bezier. Με τα μπαλώματα Bezier προσεγγίζουμε πλέγμα σημείων στο χώρο, τα σημεία αυτά αποτελούν τα σημεία ελέγχου. Το μπάλωμα διέρχεται από τα ακραία σημεία του πλέγματος και προσεγγίζει τα υπόλοιπα. Τα μπαλώματα Bezier ορίζονται ως εξής:

$$P(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m P_{ij} B_{i,n}(u) B_{j,m}(v), \quad 0 \leq u \leq 1, \quad 0 \leq v \leq 1$$

όπου  $P(u, v)$  είναι ένα σημείο στην επιφάνεια του μοντέλου και  $P_{ij}$  είναι τα σημεία ελέγχου. Τα σημεία ελέγχου, όπως προαναφέρθηκε αποτελούν τις κορυφές του πολυέδρου ελέγχου (ή αλλιώς χαρακτηριστικού πολυέδρου) και τοποθετούνται σε

ορθογώνιο πίνακα διαστάσεων  $(n+1) \times (m+1)$ . Το πρότυπο πολυγωνικό πλέγμα έχει ανελαστική κατασκευή και η μέτρηση των διαστάσεων ενός μοντέλου πραγματοποιείται με απλό τρόπο καθώς ανάγεται στην άμεση μέτρηση των οριζόντιων και κάθετων ισοϋψών καμπύλων.



Εικόνα 1: Πολυγωνικό πλέγμα με 861 κορυφές και 1.676 μπαλώματα (αραιή ανάλυση)

Κατά την προσαρμογή του σκελετού και του δέρματος αναφοράς εκτελείται η λειτουργία σύνδεσης του δέρματος δηλαδή προσαρμογή επιφάνειας καμπύλων στο χώρο (skinning). Σκοπός είναι η ομαλή παραμόρφωση του δέρματος κατά τον μετασχηματισμό των αρθρώσεων του σκελετού.

### **3.1.5 Χαρακτηριστικά σημεία και χαρακτηριστικές ισοϋψείς καμπύλες (Feature Points and Feature Contours)**

Παράλληλα με την πραγματοποίηση σύνδεσης της επιφάνειας του δέρματος, προσδιορίζονται και τα χαρακτηριστικά σημεία του πλέγματος για την καθοδήγηση της προσαρμογής του σκελετού. Μερικά χαρακτηριστικά, όπως για παράδειγμα ο ομφαλός του ανθρώπινου σώματος, είναι αρκετά δύσκολο να εντοπισθούν αυτόματα, αφού δεν υπάρχουν συγκεκριμένες πληροφορίες για την υφή τους και η ακρίβεια των

δεδομένων σάρωσης δεν αρκεί για τον προσδιορισμό της θέσης τους. Στην παρούσα εφαρμογή τα δεδομένα που εισάγει ο χρήστης, αξιοποιούνται με τέτοιο τρόπο ώστε να αναγνωρίζονται εύκολα τα σημεία αυτά.

Σε αυτή τη φάση ορίζονται επίσης και οι χαρακτηριστικές καμπύλες (contours), οι οποίες χρησιμοποιούνται όχι μόνο στην των διαστάσεων του πρότυπου μοντέλου, ανά πάσα στιγμή κατά τη διάρκεια της διαδικασίας, αλλά και στο στάδιο της προσαρμογής του.

### **3.1.6 Προεπεξεργασία**

Η γεωμετρία του σώματος αναπαρίσταται με τη μορφή διανύσματος προκαθορισμένων διαστάσεων (είναι γνωστής τοπολογίας εξαρχής – a priori), το οποίο προκύπτει διαμορφώνοντας το μοντέλο αναφοράς σε κάθε μοντέλο σάρωσης. Συμπερασματικά οποιαδήποτε σωματική γεωμετρία είναι εφικτή μέσω παραμόρφωσης του μοντέλου αναφοράς. Υπάρχουν διαφορές μέθοδοι οι οποίες μπορούν να εφαρμοσθούν με επιτυχία, θα αναλυθεί η μέθοδος που βασίζεται σε χαρακτηριστικά σημεία. Συγκεκριμένα χρησιμοποιείται ένα σύνολο προκαθορισμένων οριακών επιφανειών ή χαρακτηριστικών σημείων για την μέτρηση της ακρίβειας εφαρμογής μεταξύ των δύο μοντέλων (αναφοράς και σάρωσης) και την καθοδήγηση της διαμόρφωσης του πρότυπου μοντέλου στο μοντέλο σάρωσης με μέθοδο βελτιστοποίησης. Ο αλγόριθμος αυτός περιλαμβάνει δύο φάσεις: την προσαρμογή σκελετού (skeleton fitting) και την τελειοποίηση του δέρματος (skin refinement).

Κατά την προσαρμογή του σκελετού προκύπτει μια γραμμική προσέγγιση (της όψης των αναλογιών) του μοντέλου σάρωσης συμμορφώνοντας το μοντέλο αναφοράς στα δεδομένα σάρωσης, μέσω της διαδικασίας παραμόρφωσης που προκαλεί ο σκελετός (skeleton – driven deformation). Με βάση τα χαρακτηριστικά σημεία, συμπεραίνεται ότι κυρίως οι παράμετροι των αρθρώσεων είναι αυτές που ελαχιστοποιούν τις αποστάσεις αντιστοίχησης θέσεων πριν και μετά την προσαρμογή. Στη φάση της τελειοποίησης του δέρματος, βελτιώνεται με επαναληπτική διαδικασία η ακρίβεια της επιφάνειας. Η επαναληπτική διαδικασία ελαχιστοποιεί τις διαφορές μορφής μεταξύ του μοντέλου αναφοράς και του μοντέλου σάρωσης. Η διαφορά αυτή αποθηκεύεται στη βάση δεδομένων των αποστάσεων αντιστοίχησης (displacement map).

### **3.1.7 Παραμόρφωση λόγω σκελετού (Skeleton – driven deformation)**

Για την ολοκλήρωση του πολυγωνικού μοντέλου, ο σκελετός προσαρμόζεται ώστε να ταιριάζει απόλυτα σε αυτό πριν ακόμα εφαρμοσθεί η σχέση του λόγου δέρματος / οστών (skin – to – bone relation). Η παραμόρφωση λόγω σκελετού αποτελεί μια ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική στον τομέα παραμόρφωσης δέρματος σε τρισδιάστατο χώρο. Απαραίτητη προϋπόθεση μιας τέτοιου είδους επιτυχούς παραμόρφωσης είναι η κατάλληλη σύνδεση της επιφάνειας του δέρματος και του υποκείμενου σκελετού, πιο συγκεκριμένα η ανάθεση σε κάθε κορυφή του πολυγωνικού πλέγματος, του πλήθους των οστών που η κορυφή επηρεάζει και του αντίστοιχου βάρους κάθε κορυφής. Το βάρος κορυφής ανάλογα με το οστό στο οποίο αντιστοιχεί, είναι τέτοιο ώστε σε κάθε σχηματισμό του, η κορυφή να παραμένει στο ίδιο επίπεδο και προς την ίδια κατεύθυνση με αυτό.

Η παραμόρφωση βάσει σκελετού χρησιμοποιείται όχι μόνο για τον καθορισμό των παραμορφώσεων του δέρματος αλλά και για την τροποποίηση των διαστάσεων και της τοποθέτησης διαφόρων τμημάτων, εφαρμόζοντας ανελαστική παραμόρφωση με αρθρώσεις. Η μορφή των δεδομένων σάρωσης, είναι αποτέλεσμα της παραμόρφωσης που υφίστανται το αρχικό πολυγωνικό πλέγμα κατά τη προσαρμογή του στον σκελετό. Υπολογίζεται ο πίνακας μετασχηματισμού για κάθε άρθρωση με τέτοιο τρόπο ώστε η πρωτογενής μορφή που προκύπτει από την παραμόρφωση λόγω σκελετού να προσεγγίζει καλύτερα το πολυγωνικό πλέγμα σάρωσης. Οι πίνακες που αναπαράγονται εκφράζουν το γενικό σχηματισμό – δομή του σκελετού (skeleton configuration) και ανταποκρίνονται στις ολικές αναλογίες των σωμάτων σάρωσης.

### **3.1.8 Αποστάσεις Αντιστοίχησης και Σχηματισμός Σκελετού (Skeleton configuration and Displacement map)**

Για την περιγραφή κάθε πολυγωνικού πλέγματος σάρωσης χρησιμοποιείται το ίδιο πρωτογενές μοντέλο. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητος ο ορισμός παραμέτρων για την αναδόμηση της πραγματικής μορφής του πολυγωνικού πλέγματος σάρωσης, με τη χρήση πρωτογενούς μοντέλου. Οι παράμετροι αυτοί είναι η δομή του σκελετού (skeleton configuration) και οι αποστάσεις μετατόπισης (displacement map). Η δομή του σκελετού περιλαμβάνει τις γενικές αναλογίες των σωμάτων, δηλαδή τους



μετασχηματισμούς μεταφοράς (translation), περιστροφής (rotation) και κλίμακας ή αλλιώς μεγέθυνσης (scaling) κάθε άρθρωσης. Με την εφαρμογή της δομής του σκελετού στο πρωτογενές μοντέλο, λαμβάνεται ένα νέο σχήμα σαν αποτέλεσμα της παραμόρφωσης λόγω σκελετού. Οι αποστάσεις αντιστοίχισης αντιπροσωπεύονται από μια λίστα διανυσμάτων μεταφοράς και χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της τελικής θέσης των κορυφών της επιφάνειας σάρωσης μετά την παραμόρφωση που προκαλεί ο σκελετός. Οι πίνακες μεταφοράς βρίσκουν εφαρμογή σε διάφορους τομείς. Η δομή του σκελετού σε συνδυασμό με τις αποστάσεις αντιστοίχισης του σχήματος της αρχικής επιφάνειας σάρωσης από το πρωτογενές πολυγωνικό πλέγμα. Η κατασκευή της βάσης δεδομένων γίνεται προσδιορίζοντας τις δύο αυτές παραμέτρους για κάθε ένα από τα δεδομένα σάρωσης.

### 3.1.9 Προσαρμογή Σκελετού (Skeleton fitting)

Ο αλγόριθμός που ακολουθείται σε πρώτη φάση βρίσκει τη κατάλληλη θέση, τις αναλογίες και την όψη-πόζα του μοντέλου σάρωσης, προσαρμόζοντας σε αυτό το μοντέλο αναφοράς. Οι μετασχηματισμοί (transformations) που εφαρμόζονται σε κάθε άρθρωση του σκελετού αναφοράς αποτελούν τις παραμέτρους της εκάστοτε άρθρωσης. Κατά την διάρκεια της προσαρμογής, χρησιμοποιώντας διαφορετικές παραμέτρους, μέσω της παραμόρφωσης λόγω σκελετού, η τοποθέτηση του δέρματος επαναπροσδιορίζεται, σύμφωνα πάντα με τους μετασχηματισμούς του υποκείμενου σκελετού. Κατάλληλο σύνολο παραμέτρων, είναι αυτό που μετακινεί το δέρμα αναφοράς κατά τέτοιο τρόπο ώστε να προσεγγίζει ικανοποιητικά χαρακτηριστικά σημεία, ελαχιστοποιώντας την απόκλιση. Η τιμή απόκλιση δίδεται από την παρακάτω σχέση:

$$E_F(X) = \sum_{i=1}^m \|P_i - P'_i(X)\|$$

όπου το  $X$  εκφράζει τις παραμέτρους της κάθε άρθρωσης,  $m$  είναι το πλήθος των χαρακτηριστικών σημείων που επηρεάζονται από το  $X$ ,  $P_i$  και  $P'_i$  είναι οι μεταβλητές που δηλώνουν αντίστοιχα τη θέση του χαρακτηριστικού σημείου  $i$  στο πολυγωνικό πλέγμα σάρωσης και τη θέση που υπολογίζεται για το αντίστοιχο σημείο στο μοντέλο αναφοράς μέσω παραμόρφωσης λόγω σκελετού.

Κάθε οστό επηρεάζει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά σημεία του πλέγματος του δέρματος στα οποία προστίθεται η απόσταση – διάστημα απόκλισης. Τα χαρακτηριστικά σημεία αναγνωρίζονται με τη βοήθεια των πληροφοριών σύνδεσης του δέρματος. Όταν σε ένα οστό δεν αντιστοιχούν χαρακτηριστικά σημεία, χρησιμοποιούνται τα χαρακτηριστικά σημεία των απογόνων πρώτου ή μεγαλύτερου βαθμού του οστού. Ακόμα και με αυτό το υποσύνολο των χαρακτηριστικών σημείων μπορεί να επιτευχθεί η απαιτούμενη ακρίβεια. Σε ορισμένες περιπτώσεις μια αδύναμη σύνδεση χαρακτηριστικών σημείων με ένα οστό έχει σαν αποτέλεσμα τη στρέβλωση του οστού, εφόσον υπόκεινται σε ακραίου βαθμού μετασχηματισμό μεγέθυνσης κατά μήκος μιας ή και δύο κατευθύνσεων. Αν αποδοθεί στην απόσταση βάρος σύμφωνα με το λόγο βάρους: κορυφή / οστό (vertex – to – bone) η στρέβλωση μπορεί να αποφευχθεί. Ωστόσο μπορεί να έχουμε χαλαρή σύνδεση σε κάποια σημεία. Αυτό το πρόβλημα παρακάμπτεται με την εισαγωγή δυναμικού όρου στην αντικειμενική συνάρτηση τιμωρίας της δομής άρθρωσης, η οποία παραβιάζει τη σταθερότητα της αναλογίας κλίμακας. Επομένως η ενέργεια που εκφράζει η προηγούμενη σχέση μετατρέπεται ως εξής:

$$E(X) = \alpha * E_F + \beta * E_D$$

$$\text{όπου } E_D = \frac{s_x}{s_y} + \frac{s_y}{s_z} + \frac{s_z}{s_x}.$$

Για την εύρεση λύσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφοροι μέθοδοι βελτιστοποίησης, βασισμένες στην παραγωγή αναλυτικών συναρτήσεων. Όμως η πολυπλοκότητα του παρόντος προβλήματος απαιτεί μια χρονοβόρα διαδικασία και για το λόγο αυτό γίνεται χρήση της μεθόδου ορισμού κατεύθυνσης. Στην αρχή αναζητείται ο μισός αριθμός των οστών στα οποία αντιστοιχούν τα χαρακτηριστικά σημεία. Ακραία οστά, όπως το κρανίο, τα άνω και κάτω άκρα εξαιρούνται, αφού δεν υπάρχουν σημεία τέλους και η αναζήτηση καθίσταται αδύνατη. Για κάθε οστό ορίζονται οι παράμετροι των αρθρώσεων. Για κάθε νέο οστό που συναντάται στην αναζήτηση κατά βάθος (Depth First Search, DFS), ορίζεται και ένα πεδίο αναζήτησης βάση του βαθμού ελευθερίας (DoF) του οστού. Η άρθρωση – ρίζα του «δέντρου»,

έχει το μέγιστο βαθμό ελευθερίας, πιο συγκεκριμένα έχει τρεις βαθμούς ελευθερίας (μεταφορά, περιστροφή, μεγέθυνση), ενώ οι άλλες αρθρώσεις εκτός των αρθρώσεων της σπονδυλικής στήλης παρουσιάζουν μόνο μετασχηματισμό μεγέθυνσης ( $s_x, s_y, s_z$ ) και περιστροφής ( $r_x, r_y, r_z$ ). Οι αρθρώσεις της σπονδυλικής στήλης περιστρέφονται μέχρι κάποια συγκεκριμένη γωνία για την αποφυγή ανεπιθύμητων ροπών στρέψης ή απόσπασής τους από τη σπονδυλική στήλη εξαιτίας των περιορισμένων προδιαγραφών των χαρακτηριστικών σημείων. Εισάγεται περιορισμός ώστε το εύρος αναζήτηση μετασχηματισμού περιστροφής να κυμαίνεται στο διάστημα  $[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$  και για μετασχηματισμό μεγέθυνσης – κλίμακας να υπερβαίνει την τιμή μηδέν (0.0).

Είναι προφανές ότι το μειονέκτημα της παραπάνω προσέγγισης είναι ότι η αναζήτηση μπορεί να τερματιστεί με διαφορετικές παραμέτρους που εξαρτώνται από τη σειρά με την οποία εκτελούνται οι μετασχηματισμοί στο διάστημα αναζήτησης. Εξετάζοντας τους συνδυασμούς, μεταφορά, περιστροφή, κλίμακα (TRS) και κλίμακα, περιστροφή, μεταφορά (SRT), προέκυψε το συμπέρασμα ότι η αλλαγή στην σειρά των μετασχηματισμών δεν επηρεάζει σημαντικά την τελικά δομή του σκελετού. Στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιείται TRS μετασχηματισμός και η παράμετρος άρθρωσης  $X_j$  γίνεται:

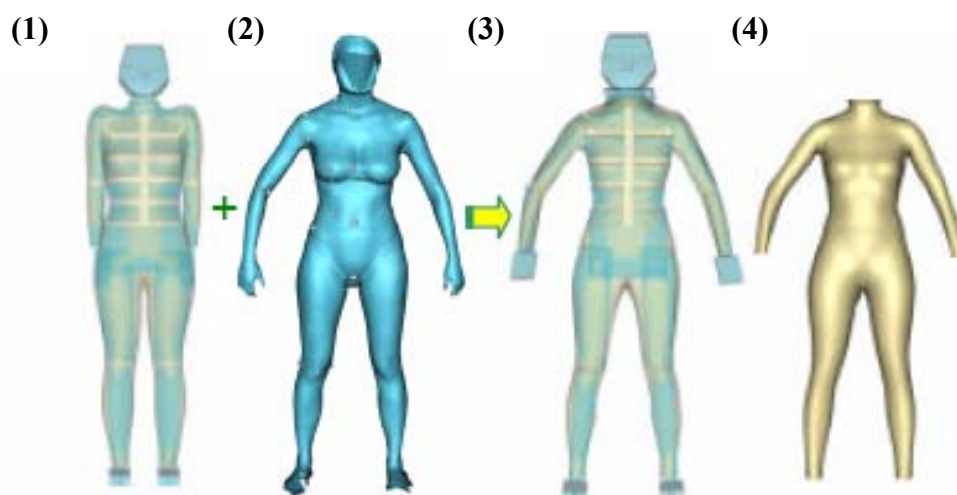
$$X_j = (t_{xj}, t_{yj}, t_{zj}, \theta_{xj}, \theta_{yj}, \theta_{zj}, s_{xj}, s_{yj}, s_{zj}),$$

όπου  $t_{xj}$  και  $s_{xj}$  εκφράζουν το μετασχηματισμό μεταφοράς και κλίμακας κατά τον άξονα  $x_j$  και  $\theta_{xj}$  είναι η γωνία περιστροφής γύρω από τον άξονα  $x$  της άρθρωσης  $j$ .

Λόγω της αρχής ιεραρχίας, κάθε οστό κληρονομεί τους μετασχηματισμούς του προηγούμενου και οι μετασχηματισμοί ως αρχικές τιμές. Για το οστό – ρίζα του ανθρωποειδούς (“Humanoid Root” bone), χρησιμοποιήθηκε η προκαθορισμένη τιμή του μοντέλου αναφοράς σαν αρχικός μετασχηματισμός. Σε ορισμένες περιπτώσεις η επιρροή των οστών πάνω σε ένα κοινό χαρακτηριστικό σημείο, για παράδειγμα τα σημεία γύρω από τον αγκώνα επηρεάζονται από τα οστά του άνω και κάτω βραχίονα, μπορεί να οδηγήσει διαδοχική αναζήτηση με το οστό – απόγονο να προκαλεί αύξηση της απόστασης του χαρακτηριστικού σημείου με τον πρόγονο του, δεδομένου ότι πριν τη διαδικασία αναζήτησης η απόσταση αυτή ήταν μικρότερη. Ωστόσο η διαδοχική αναζήτηση κατά (DFS) και εύρεση βέλτιστων τοπικών

μετασχηματισμών, έχει σαν αποτέλεσμα μια πολύ καλή προσέγγιση των υπό εξέταση στοιχείων.

Ενώ με την παραπάνω μέθοδο προκύπτει μια αποδεκτή γραμμική προσέγγιση, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να ορίσει επιλεκτικά τον μετασχηματισμό για κάθε οστό μετά την αυτόματη προσαρμογή. Επαναλήψεις της διαδικασίας βελτιστοποίησης, οδήγησαν σε μια αρκετά καλή προσέγγιση της δομής του σκελετού.



Εικόνα 2: (1) Μοντέλο αναφοράς, (2) Προσαρμογή μοντέλου αναφοράς στα δεδομένα σάρωσης, (3) Προσαρμογή με Γραμμική προσέγγιση του μοντέλου αναφοράς στα δεδομένα σάρωσης -αναπαράσταση με σκελετό, (4) Αναπαράσταση χωρίς σκελετό

### 3.1.10 Τελειοποίηση του δέρματος (Fine skin refinement)

Με βάση το πρόχειρα προσαρμοσμένο μοντέλο αναφοράς, το οποίο προέκυψε στο στάδιο προσαρμογής σκελετού, με συνεχείς επαναλήψεις βελτιώνεται η ακρίβεια της προσαρμογής αυτής μέσω ελαχιστοποίησης των μορφολογικών διαφορών μεταξύ του μοντέλου σάρωσης. Η μορφολογική διαφορά αποθηκεύεται στα δεδομένα αποστάσεων μετατόπισης (displacement map). Ο αλγόριθμος τελειοποίησης της επιφάνειας του δέρματος περιλαμβάνει τα παρακάτω στάδια:

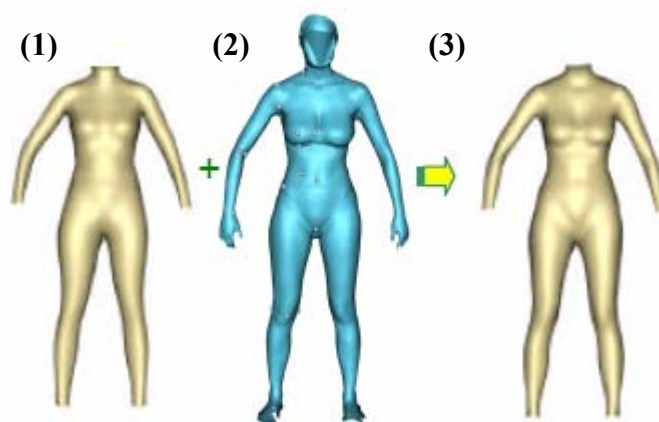
1. Αρχική Αντιστοίχιση: Αρχικά εντοπίζεται το πρότυπο πολυγωνικό πλέγμα πάνω στο πλέγμα σάρωσης. Κάθε κορυφή του πρότυπου πλέγματος προβάλλεται πάνω στην πλησιέστερη κορυφή, ακμή ή τρίγωνο του πλέγματος σάρωσης με εκτέλεση ανίχνευσης επαφής (collision detection). Με αυτό τον τρόπο αναπαράγονται οι συντεταγμένες του κέντρου βάρους για κάθε κορυφή του μοντέλου αναφοράς.

2. Χαλάρωση: Οι θέσεις των κορυφών του πολυγωνικού πλέγματος αναφοράς ενημερώνονται κατά την ελαχιστοποίηση της δυναμικής συνάρτησης, η οποία: (α) ελαχιστοποιεί το βαθμό παραμόρφωσης του πολυγωνικού πλέγματος και (β) θέτει τον περιορισμό: οι κορυφές που ανήκουν στην ίδια χαρακτηριστική ίσοι καμπύλη να είναι ομοεπίπεδες. Τέλος υπολογίζεται το διάνυσμα απόστασης μεταξύ παλιάς και νέας θέσης.

3. Αντιστοίχιση: Οι νέες κορυφές προβάλλονται στην επιφάνεια του πολυγωνικού πλέγματος σάρωσης. Οι αρχικές συντεταγμένες κέντρου βάρους ενημερώνονται κατά εκτέλεση βελτιστοποιημένης ανίχνευσης επαφής, κάνοντας χρήση των διανυσμάτων απόστασης.

4. Αν η μορφή που προκύπτει είναι ικανοποιητική, τερματίζεται ο αλγόριθμος, ειδάλλως επαναλαμβάνονται τα βήματα 2 και 3.

5. Αναπροσαρμογή του σκελετού: Η εύρεση των αποστάσεων μετατόπισης έχει ολοκληρωθεί και βελτιώνεται η προσαρμογή του σκελετού ώστε το εύρος των συντεταγμένων αυτών να ελαχιστοποιηθεί. Λογικό είναι να υπολογιστεί ο μετασχηματισμός κάθε άρθρωσης που ελαχιστοποιεί την απόσταση μεταξύ των δύο τμημάτων, όπου το ένα περιλαμβάνει μόνο την παραμόρφωση λόγω σκελετού και το άλλο περιλαμβάνει και τις συντεταγμένες αντιστοίχισης. Η συνάρτηση τιμωρίας της ελαχιστοποίησης υπολογίζει το άθροισμα της απόστασης των διανυσμάτων αρχικής κατάστασης και τελικού στόχου. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται η μέθοδος ορισμού κατεύθυνσης.



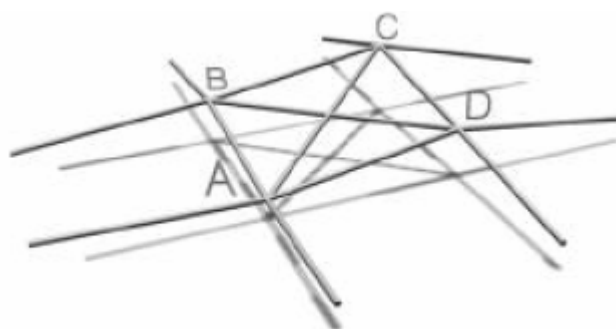
Εικόνα 3: (1) Μοντέλο μετά από πρόχειρη προσαρμογή (Skeleton fitting), (2) Μοντέλο σάρωσης, (3) Μοντέλο μετά την τελειοποίηση του δέρματος

#### 3.1.10.1. Αντιστοίχιση Σημείων (Mapping)

Κάθε κορυφή του πολυγωνικού πλέγματος αναφοράς μετακινείται στην πλησιέστερη κορυφή, ακμή ή τρίγωνο του πλέγματος σάρωσης με ανίχνευση επαφής. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ανίχνευσης επαφής, για κάθε κορυφή του πλέγματος αναφοράς ανιχνεύεται με ποια κορυφή, ακμή ή τρίγωνο του πλέγματος σάρωσης, η απόστασή της είναι ελάχιστη και εκεί αντιστοιχείται. Για την αποφυγή επανάληψης της ανίχνευσης επαφής μετά από κάθε βήμα της λειτουργίας της χαλάρωσης, ελέγχεται πριν κάθε ανίχνευση αν η νέα απόσταση μιας κορυφής του πλέγματος αναφοράς έχει αλλάξει από κάποια προηγούμενη αντιστοίχιση. Μόνο οι κορυφές για τις οποίες έχει αλλάξει η απόσταση υπολογίζονται ξανά.

#### 3.1.10.2 Χαλάρωση (Relaxation)

Με δεδομένες τις θέσεις όλων των κορυφών του πρωτογενούς πολυγωνικού πλέγματος, υπολογίζεται η ολική ενέργεια η οποία απαρτίζεται από δύο όρους. Ο πρώτος όρος εκτιμά την παραμόρφωση ενός ελαστικού πολυγωνικού πλέγματος (spring mesh). Όπως φαίνεται στην εικόνα 4 παρακάτω το ελαστικό πολυγωνικό πλέγμα δημιουργείται πάνω από το τετραγωνικό μπάλωμα του πλέγματος. Απαρτίζεται από τέσσερις ελαστικές ακμές (AB,BC,CD,DA) του τετραγωνικού μπάλωματος και δύο πρόσθετα ελατήρια (AC και BD) κατά μήκος της διαγωνίου κάθε μπάλωματος.



Εικόνα 4: Ελαστικό Πολυγωνικό Πλέγμα (ABCD) πάνω από το τετραγωνικό μπάλωμα

Η δυναμική συνάρτηση του ελαστικού αυτού πολυγωνικού πλέγματος που σχηματίζεται εκφράζεται ως εξής:

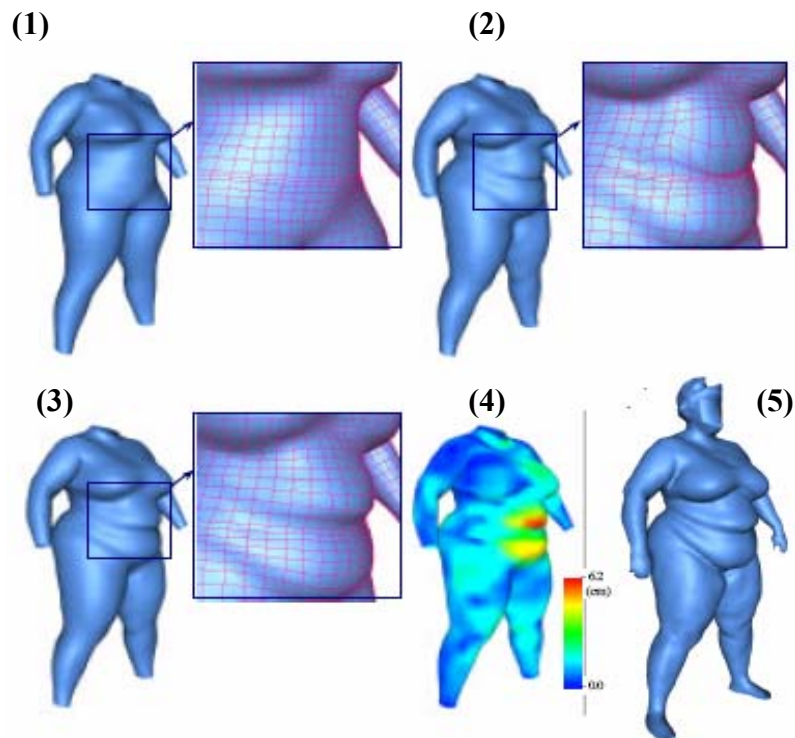
$$S(e) = \sum_i |e_i - e_i'|,$$

όπου  $e_i$  και  $e_i'$  είναι τα αντίστοιχα μήκη του αρχικού και του παρόντος ελαστικού πολυγωνικού πλέγματος.

Ο δεύτερος όρος θέτει τον περιορισμό οι κορυφές που ανήκουν στην ίδια χαρακτηριστική ισοϋψή καμπύλη να βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο. Για κάθε ισοϋψή καμπύλη υπολογίζεται μέσο επίπεδο, οι κορυφές αναγκάζονται να μετακινηθούν στη θέση προβολής τους πάνω στο επίπεδο αυτό με πλασματικά ελατήρια (ελατήρια μηδενικού μήκους). Η προσαρμογή γίνεται μέσω επαναληπτικής μεθόδου (gradient descent method), με στόχο την ελαχιστοποίηση της συνάρτησης ολικής ενέργειας. Μετά από κάθε βήμα χαλάρωσης, οι νέες κορυφές προβάλλονται στην επιφάνεια του πολυγωνικού πλέγματος σάρωσης κατά τρόπο ο οποίος παρουσιάστηκε στο στάδιο της αντιστοίχισης.

### 3.1.10.3 Αναπροσαρμογή του Σκελετού (Skeleton refitting)

Με εύρεση των αποστάσεων μετατόπισης (displacement map), είναι δυνατή η βελτίωση της προσαρμογής του σκελετού, έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται η πυκνότητα των αποστάσεων αυτών. Αρχικά το πλέγμα του δέρματος χωρίζεται σε διαφορετικά τμήματα τα οποία επηρεάζονται περισσότερο από το ίδιο οστόν. Υπάρχουν δύο μορφές για κάθε τμήμα, η μορφή προέλευσης, η οποία είναι αποτέλεσμα αποκλειστικά της παραμόρφωσης λόγω σκελετού και η μορφή-στόχος στην οποία περιλαμβάνονται και οι αποστάσεις αντιστοίχισης των κορυφών. Η διαδικασία της προσαρμογής ανάγεται στην επίλυση του προβλήματος υπολογισμού του κατάλληλου μετασχηματισμού για κάθε άρθρωση, ο οποίος θα ελαχιστοποιήσει την απόσταση μεταξύ των δύο αυτών τμημάτων. Η συνάρτηση κόστους ελαχιστοποίησης είναι το άθροισμα των αποστάσεων των κορυφών της μορφής προέλευσης και στόχου και υπολογίζεται με μέθοδο ορισμού διεύθυνσης κατάβασης. Σαν αποτέλεσμα λοιπόν προκύπτει ένας νέος σχηματισμός σκελετού.

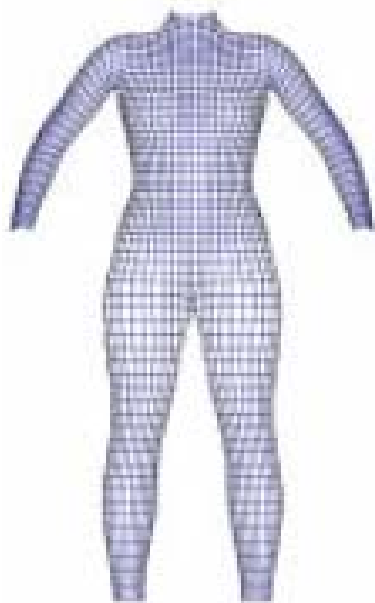


Εικόνα 5: Έναρξη με μια πρόχειρη προσαρμογή του μοντέλου από προηγούμενο στάδιο, (2) Πρώτη αντιστοίχιση, (3) Έπειτα από 10 επαναλήψεις και αντιστοίχισης, (4) Οι τελικές αποστάσεις αντιστοίχισης, (5) Το μοντέλο - στόχος της σάρωσης

### 3.1.11 Υποδιαίρεση υψηλής ανάλυσης (Multi- Resolution subdivision)

Για υψηλότερη ακρίβεια προσαρμογής της επιφάνειας, μπορεί να εφαρμοστεί υποδιαίρεση του πολυγωνικού πλέγματος καμπύλων. Αυτό επιτυγχάνεται με υποδιαίρεση κάθε τετραγωνικού μπαλώματος σε τέσσερα τετράγωνα. Κάθε μία από τις νέες κορυφές που παράγονται αντιστοιχίζεται στα δεδομένα της επιφάνειας σάρωσης και υπολογίζεται ένα διάνυσμα απόστασης. Το τελικό πολυγωνικό πλέγμα θα αποτελείται από 3.401 κορυφές και 6.704 μπαλώματα (πυκνή ανάλυση).





Εικόνα 6: Πολυγωνικό πλέγμα με 3.401 κορυφές και 6.704 μπαλώματα (πυκνή ανάλυση)

### 3.1.12 H-Anim: Προδιαγραφές Πρότυπου Ανθρωποειδούς

Οι προδιαγραφές H-Anim καθιστούν δυνατή τη μοντελοποίηση ανθρωποειδών στη γλώσσα εικονικής πραγματικότητας VRML' 97, τα μοντέλα αυτά με τη χρήση βασικών εργαλείων διακομιστή ή με εισαγωγή κατάλληλων αρχείων μπορούν να κινηθούν μέσω καρέ αναφοράς, αντίστροφης κινηματικής, συστημάτων απόδοσης κίνησης και άλλων τεχνικών. Τα μοντέλα αυτά διαθέτουν συμβατότητα με όλες της μηχανές αναζήτησης VRML' 97, ευελιξία και απλότητα.

Τη δομή ενός μοντέλου H-Anim συνθέτουν ένας αριθμός τμημάτων (όπως η ωλένη, τα χέρια και τα πόδια) τα οποία είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους με αρθρώσεις (αγκώνας, καρπός και αστράγαλος). Για την επίτευξη της κίνησης του ανθρωποειδούς, θα πρέπει να είναι η πρόσβαση στις αρθρώσεις και η μεταβολή των γωνιών των αρθρώσεων αυτών. Επίσης θα πρέπει να συλλεχθούν απαραίτητες πληροφορίες όσον αφορά τα όρια των αρθρώσεων και της μάζας των τμημάτων.

Κάθε τμήμα του σώματος ορίζεται από ένα πολυγωνικό πλέγμα και η εκάστοτε εφαρμογή μεταβάλλει τις θέσεις των κορυφών του πολυγωνικού πλέγματος, ενώ είναι απαραίτητη και η απόκτηση δεδομένων για το ποιες θα πρέπει να αντιμετωπισθούν σαν σύνολο για την πραγματοποίηση παραμορφώσεων.

Ένα αρχείο H-Anim αποτελείται από ένα σύνολο κόμβων αρθρώσεων το οποίο ακολουθεί τους κανόνες ιεραρχίας. Κάθε κόμβος κορυφής μπορεί να περιλαμβάνει και άλλους κόμβους. Οι κόμβοι κορυφών δύνανται να περιλαμβάνουν και ένα κόμβο τμήματος το οποίο περιγράφει το μέρος του σώματος που σχετίζεται με τον εκάστοτε κόμβο άρθρωσης.

Κάθε κόμβος τμήματος μπορεί να εμπεριέχει και έναν αριθμό κόμβων θέσης, οι οποίοι περιγράφουν τη θέση σε σχέση με το σχήμα του σώματος. Οι κόμβοι θέσης χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση ενδυμάτων και κοσμημάτων στο σώμα και ακόμη σαν τελικό αποτέλεσμα αντίστροφης κινηματικής. Τέλος χρησιμοποιούνται για τον ορισμό θέσης των ματιών και της θέσης του κέντρου προβολής. Κάθε τμήμα έχει έναν αριθμό κόμβων αντιστοίχισης, οι οποίοι καθορίζουν ποιες κορυφές εντός του τμήματος βρίσκονται σε αντιστοιχία με ένα συγκεκριμένο χαρακτηριστικό σχηματισμό κορυφών.

Το αρχείο περιέχει επίσης έναν μοναδικό κόμβο ανθρωποειδούς, στον οποίο αποθηκεύονται δεδομένα τα οποία είναι αναγνώσιμα από τον άνθρωπο και τα οποία είναι σχετικά με το ανθρωποειδές, όπως πληροφορίες αυθεντικότητας και εκδότη.

Οι κόμβοι των αρθρώσεων του σώματος σύμφωνα με τις προδιαγραφές H-Anim, διαφαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Οι αρθρώσεις vl5 και του οστού sacroliac, είναι απόγονοι της ρίζας – βάσης του ανθρωποειδούς (Humanoid Root). Η βάση του ανθρωποειδούς αποθηκεύεται στο πεδίο σώματος ανθρωποειδούς του κόμβου, αλλά όλες οι υπόλοιπες αρθρώσεις είναι πρόγονοι είτε του vl5 ή του οστού sacroliac. Αν αυτές οι αρθρώσεις λείπουν τότε οι αρθρώσεις χαμηλότερου επιπέδου είναι απόγονοι της βάσης του ανθρωποειδούς.

l_hip	l_knee	l_ankle	l_subtalar	l_midtarsal	l_metatarsal	
r_hip	r_knee	r_ankle	r_subtalar	r_midtarsal	r_metatarsal	
vl5	vl4	vl3	vl2	vl1		
vt12	vt11	vt10	vt9	vt8	vt7	
vt6	vt5	vt4	vt3	vt2	vt1	
vc7	vc6	vc5	vc4	vc3	vc2	vc1
l_sternoclavicular	l_acromioclavicular	l_shoulder	l_elbow	l_wrist		
r_sternoclavicular	r_acromioclavicular	r_shoulder	r_elbow	r_wrist		
sacroiliac (pelvis)	skullbase	HumanoidRoot				

Εικόνα 7: Οι κόμβοι των αρθρώσεων του σώματος σύμφωνα με τις προδιαγραφές H-Anim

### 3.1.12.1 H-Anim: Επίπεδο σχηματισμού - Level of Articulation (LoA)

Με την ανθρωποειδή βάση ενός επιπέδου σχηματισμού διασφαλίζεται η συμβατότητα κίνησης του ανθρωποειδούς με άλλα του ίδιου ή και ψηλότερου επιπέδου. Συνολικά υπάρχουν τέσσερα επίπεδα σχηματισμού του σκελετού, ο παρακάτω πίνακας περιλαμβάνει την προτεινόμενη τοποθέτηση των αρθρώσεων για επίπεδο σχηματισμού 2.

Joint	center	Joint	center
HumanoidRoot	0.0000 0.8240 0.0277	l_middle1	0.1987 0.7818 - 0.0530
sacroiliac	0.0000 0.9149 0.0016	l_middle2	0.2013 0.7273 - 0.0503
l_hip	0.0961 0.9124 -0.0001	l_middle3	0.2026 0.7011 - 0.0494
l_knee	0.1040 0.4867 0.0308	l_ring0	0.1956 0.8019 - 0.0794
l_ankle	0.1101 0.0656 -0.0736	l_ring1	0.1956 0.7815 - 0.0794
l_midtarsal	0.1086 0.0001 0.0368	l_ring2	0.1973 0.7287 - 0.0777
r_hip	-0.0950 0.9171 0.0029	l_ring3	0.1983 0.7045 - 0.0767

r_knee	-0.0867 0.4913 0.0318	l_pinky0	0.1925 0.8066 - 0.1036
r_ankle	-0.0801 0.0712 -0.0766	l_pinky1	0.1925 0.7866 - 0.1036
r_subtalar	-0.0801 0.0000 -0.0368	l_pinky2	0.1938 0.7452 - 0.1024
r_midtarsal	-0.0801 0.0000 0.0368	l_pinky3	0.1948 0.7277 - 0.1017
r_metatarsal	-0.0801 0.0039 0.0732	r_sternoclavicular	-0.0694 1.4600 - 0.0330
vl5	0.0028 1.0568 -0.0776	r_acromioclavicular	-0.0836 1.4281 - 0.0401
vl3	0.0041 1.1276 -0.0796	r_shoulder	-0.1907 1.4407 - 0.0325
vl1	0.0048 1.1912 -0.0805	r_elbow	-0.1949 1.1388 - 0.0620
vt10	0.0056 1.2848 -0.0822	r_wrist	-0.1959 0.8694 - 0.0521
vt6	0.0059 1.3866 -0.0800	r_thumb1	-0.1899 0.8502 - 0.0473
vt1	0.0065 1.4951 -0.0387	r_thumb2	-0.1874 0.8256 0.0306
vc4	0.0066 1.5662 -0.0084	r_thumb3	-0.1864 0.8190 0.0506
vc2	0.0066 1.5928 -0.0103	r_index0	-0.1961 0.8055 - 0.0218
skullbase	0.0044 1.6209 0.0236	r_index1	-0.1961 0.7846 - 0.0218
l_sternoclavicular	0.0820 1.4488 -0.0353	r_index2	-0.1954 0.7393 - 0.0185
l_acromioclavicular	0.0962 1.4269	r_index3	-0.1945 0.7169 -

	-0.0424		0.0173
l_shoulder	0.2029 1.4376 -0.0387	r_middle0	-0.1972 0.8060 - 0.0468
l_elbow	0.2014 1.1357 -0.0682	r_middle1	-0.1972 0.7849 - 0.0468
l_wrist	0.1984 0.8663 -0.0583	r_middle2	-0.1950 0.7304 - 0.0441
l_thumb1	0.1924 0.8472 -0.0534	r_middle3	-0.1939 0.7042 - 0.0432
l_thumb2	0.1951 0.8226 0.0246	r_ring0	-0.1951 0.8049 - 0.0732
l_thumb3	0.1955 0.8159 0.0464	r_ring1	-0.1951 0.7845 - 0.0732
l_index0	0.1983 0.8024 -0.0280	r_ring2	-0.1920 0.7318 - 0.0716
l_index1	0.1983 0.7815 -0.0280	r_pinky0	-0.1926 0.8096 - 0.0975
l_index2	0.2017 0.7363 -0.0248	r_pinky1	-0.1926 0.7896 - 0.0975
l_index3	0.2028 0.7139 -0.0236	r_pinky2	-0.1902 0.7483 - 0.0963
l_middle0	0.1987 0.8029 -0.0530	r_pinky3	-0.1908 0.7540 - 0.0960

Πίνακας 2: LOA 2 –Default Joint Centers

### 3.2 Παραμετροποίηση και παραμετρική σχεδίαση ανθρωπίνων μοντέλων

Παρακάτω παρουσιάζεται επίσης μια μεθοδολογία παραμετρικής σχεδίασης ανθρωπίνων μοντέλων με αρκετές διαφοροποιήσεις, κυρίως στη μορφή μπαλωμάτων. Ακόμη χρησιμοποιείται και σε άλλα σχεδιαστικά προγράμματα όπως το Maya.

### **3.2.1 Κατασκευή μοντέλου ακμών**

Τα δεδομένα εισαγωγής - νέφος σημείων - δεν έχουν θόρυβο. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εξαγωγής χαρακτηριστικών γνωρισμάτων ο Χ άξονας είναι ορισμένος προς τον αναγνώστη, ο άξονας Υ οριζόντια με φορά από αριστερά προς τα δεξιά και τέλος ο άξονας Ζ συμπληρώνει το δεξιόστροφο σύστημα συντεταγμένων, τοποθετημένος κάθετα στον Υ και με φορά από κάτω προς τα πάνω. Τα σκαναρισμένα δεδομένα που δεν έχουν υποστεί επεξεργασία, πρέπει να φιλτραριστούν και να επανακατευθυνθούν έτσι ώστε να ικανοποιούν τις απαιτήσεις εισαγωγής δεδομένων της διαδικασίας.

Η κατασκευή του μοντέλου ακμών αποτελείται από τρία βήματα:

1. Εξαγωγή των κυρίων χαρακτηριστικών σημείων στα σημεία του νέφους.
2. Χρησιμοποίηση των ανθρωπομετρικών κανόνων, για να καθοριστούν τα σημασιολογικά χαρακτηριστικά σημεία.
3. Σύνδεση όλων των χαρακτηριστικών σημείων με χρήση καμπυλών που παρεμβάλουν τα σημεία του νέφους.

Τα συνδεδεμένα χαρακτηριστικά σημεία και οι καμπύλες σύνδεσης αποτελούν το μοντέλο ακμών.

### **3.2.2 Χαρακτηριστικά σημεία**

Τα κύρια χαρακτηριστικά σημεία που βρίσκονται στην επιφάνεια του ανθρώπινου σώματος, συμπεριλαμβανομένων των σημείων που είναι κάτω από τους βραχίονες, στον καρπό, στον αφαλό, στο μπροστινό σημείο του λαιμού, στο πίσω σημείο του λαιμού και στην περιοχή του στήθους, πρέπει να εξαχθούν πρώτα. Η κεντρική ιδέα είναι η εξής, χρησιμοποιούνται μερικές τομές για να χωρίσουν τα τρισδιάστατα μη οργανωμένα σημεία του σκαναρίσματος του ανθρώπινου σώματος ή τα προβαλλόμενα σημεία σε ορισμένες τομές, έτσι ώστε να μπορούν να ληφθούν δισδιάστατα περιγράμματα. Οι κρίσιμες καμπές στα δισδιάστατα περιγράμματα μπορούν να καθοριστούν από τις "αιχμηρές" γωνίες κατά μήκος του περιγράμματος.

Πιο συγκεκριμένα, σε ένα δισδιάστατο πολύγωνο εάν οι θέσεις τριών παρακείμενων σημείων  $p_{i-1}$ ,  $p_i$  και  $p_{i+1}$  ισοδυναμούν με γωνία  $\angle p_{i-1}p_ip_{i+1}$  μικρότερης ενός κατωτάτου ορίου, τότε το  $p_i$  είναι η κρίσιμη καμπή. Με τη βοήθεια των κρίσιμων καμπών, μπορούν να ανιχνευθούν τα κύρια χαρακτηριστικά σημεία.

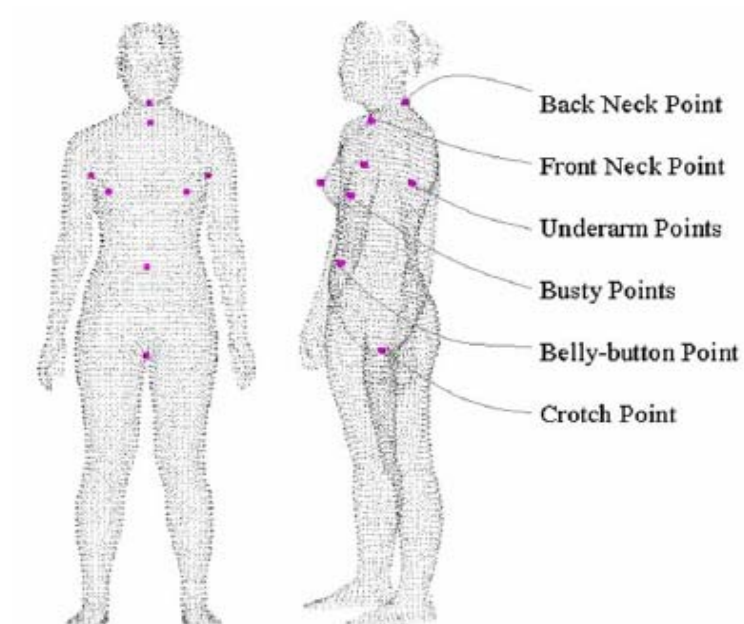
Για το σημείο του καβάλου, χωρίζεται το σώμα στο  $\frac{1}{2}$  του ύψους του, λαμβάνεται το κάτωθεν "κομμάτι" και όταν οι διατομές χωριστούν σε δύο κύκλους, το σημείο του καβάλου  $P_{crotch}$  είναι τοποθετημένο στο κέντρο του οριοθετημένου "κουτιού" του περιγράμματος των δύο ποδιών. Μετά προβάλλεται η πλάγια όψη του ανθρώπινου μοντέλου ( εικόνα 9, αριστερό τμήμα), βάσει δύο κρίσιμων καμπών  $P_1$  και  $P_2$ , καθορίζεται η θέση του μπροστινού σημείου του λαιμού ( $P_1$ ) και η απόσταση των σημείων του στήθους- θηλής,  $H_{busty}$  (σύμφωνα με το  $P_2$ ). Έπειτα το κοντινότερο σημείο που βρίσκεται στο δεξί όριο του περιγράμματος ( $P_3$ ), δείχνει τη θέση του σημείου στο λαιμό πίσω. Η απόσταση από το σημείο που βρίσκεται στο λαιμό πίσω μέχρι το ανώτατο σημείο σκαναρίσματος αποτελεί το  $H_{head}$ . Το ύψος του αφαλού,  $H_{belly}$  είναι περίπου ίσο με το άθροισμα  $H_{crotch} + H_{head}$ . Συνεπώς, με το χώρισμα διαφόρων οριζοντίων τομών γύρω από την περιοχή  $H_{crotch} + H_{head}$  (εικόνα 9, δεξιό κάτω τμήμα) και όταν το κρίσιμο σημείο  $P_4$  είναι καθορισμένο, τότε αυτό είναι και το ακριβές σημείο του αφαλού.

Για να καθοριστούν τα σημεία του στήθους, χωρίζεται το νέφος σημείων στο ύψος του  $H_{busty}$ , ώστε να ληφθεί ένα περίγραμμα όπως διαφαίνεται στην εικόνα 9, το χαμηλότερο αριστερό σημείο και το χαμηλότερο δεξιό σημείο αποτελούν τα σημεία του στήθους (θηλής). Στη συνέχεια αφού έχει καθοριστεί το ύψος του σημείου του αφαλού  $H_{belly}$  και το ύψος του σημείου που βρίσκεται στο πίσω μέρος του λαιμού  $H_{backneck}$ , το ύψος του σημείου που είναι κάτω από το βραχίονα μπορεί να υπολογιστεί από την ανθρωπομετρική εξίσωση:

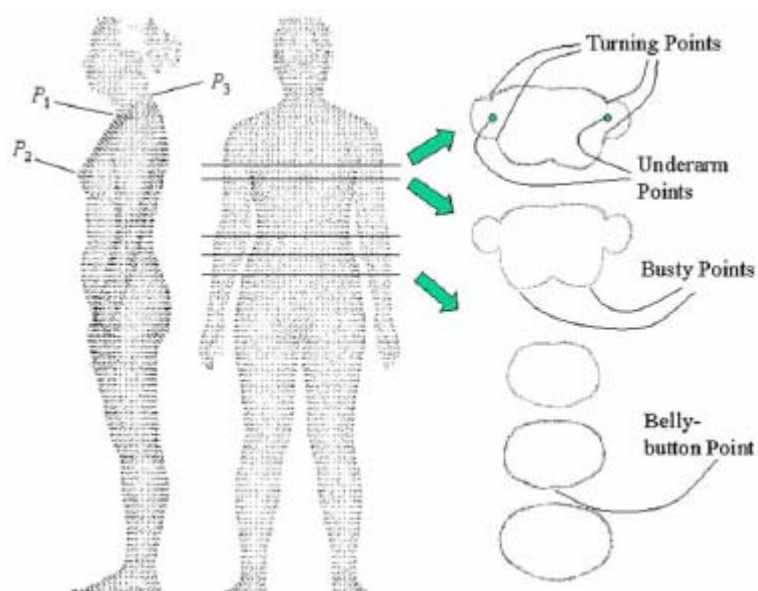
$$H_{underarm} = H_{belly} + 0.55 (H_{backneck} - H_{belly}).$$

Επομένως, χωρίζοντας το νέφος των σημείων και βρίσκοντας τις 4 κρίσιμες καμπές στα περιγράμματα, εντοπίζεται και το σημείο κάτωθεν του βραχίονα.

Σύμφωνα με τις παραπάνω μεθόδους, τα κύρια χαρακτηριστικά σημεία μπορούν να καθοριστούν αυτόματα σε περισσότερα από 85% δείγματα. Για τα υπόλοιπα 15% είναι απαραίτητη η χειροκίνητη επιλογή των κύριων χαρακτηριστικών σημείων.



Εικόνα 8: Τα κύρια χαρακτηριστικά σημεία πάνω στο ανθρώπινο μοντέλο.

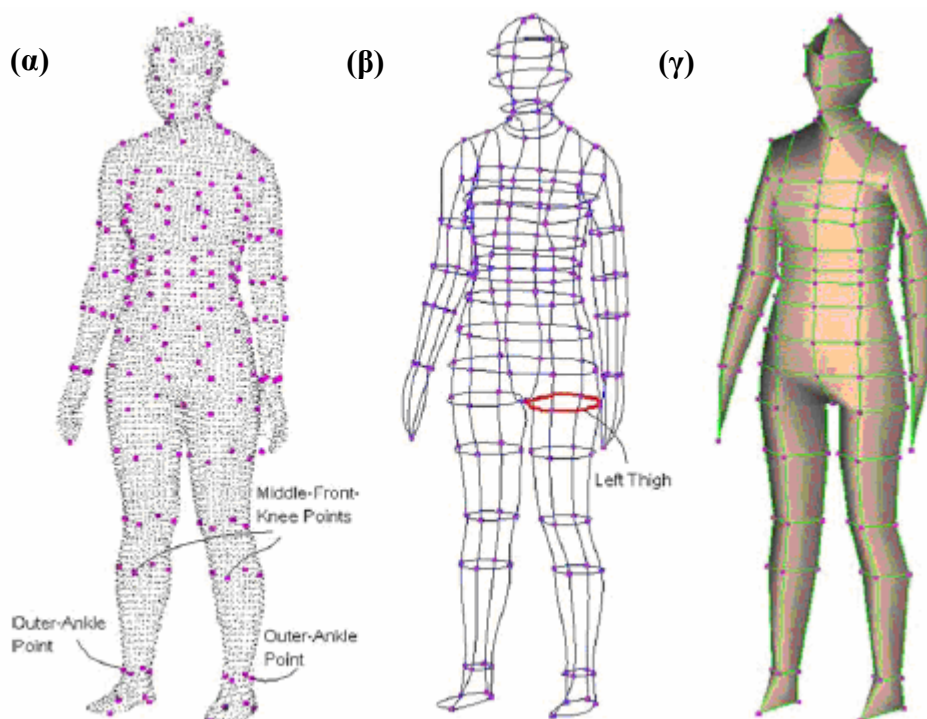


Εικόνα 9: Καθορισμός των κυρίων χαρακτηριστικών σημείων – Δημιουργία τομών.



### 3.2.3 Σημασιολογικά χαρακτηριστικά σημεία

Η θέση ενός σημασιολογικού χαρακτηριστικού σημείου πάνω στην επιφάνεια του σκαναρισμένου ανθρώπινου μοντέλου, μπορεί καθοριστεί κατά προσέγγιση βάσει των ανθρωπομετρικών κανόνων των κύριων χαρακτηριστικών σημείων. Για να εντοπισθούν επακριβώς τα σημασιολογικά χαρακτηριστικά σημεία, πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένας αλγόριθμος εξαγωγής χαρακτηριστικών γνωρισμάτων. Η κεντρική ιδέα είναι παρόμοια με προηγούμενη προσέγγιση ανίχνευσης κυρίων χαρακτηριστικών σημείων χρησιμοποιώντας τομές και προβολές αυτών. Παρουσιάζεται ένα παράδειγμα στην εικόνα 10(α), όπου φαίνονται τα κύρια χαρακτηριστικά σημεία και τα αποτελέσματα του αλγορίθμου εξαγωγής χαρακτηριστικών γνωρισμάτων. Κάθε σημασιολογικό χαρακτηριστικό σημείο έχει τη δική ανθρωπομετρική έννοια (π.χ το σημείο που βρίσκεται στο μέσον του γονάτου μπροστά και τα δύο εξωτερικά σημεία των αστραγάλων), έτσι καθορίζεται η ολική δομή των σημασιολογικών χαρακτηριστικών σημείων, για παράδειγμα ένα σημείο στο γόνατα δεν είναι δυνατό να εμφανιστεί στην περιοχή του αγκώνα.

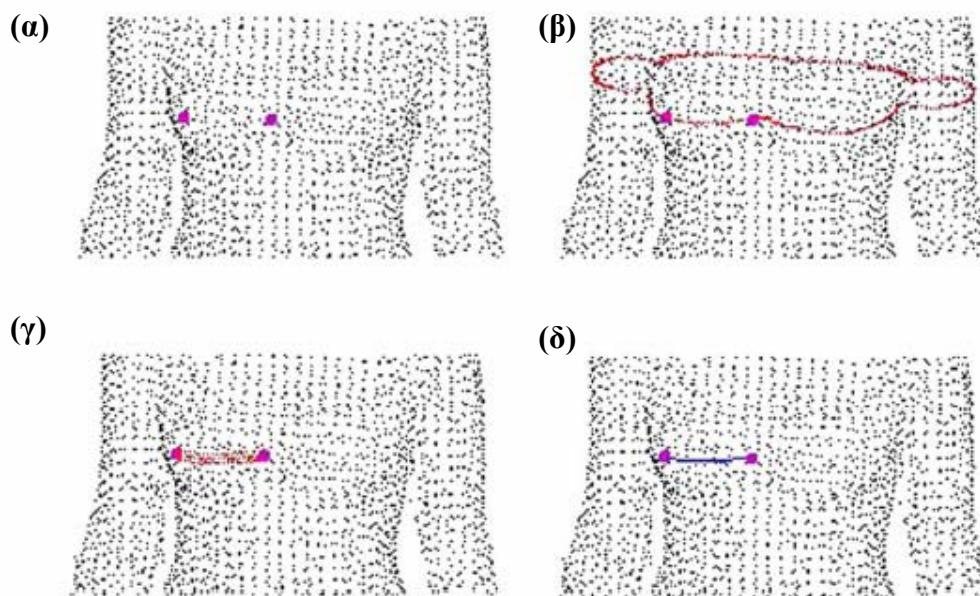


Εικόνα 10: (α) Όλα τα χαρακτηριστικά σημεία, (β) Το τελικό χαρακτηριστικό πλέγμα, (γ) Γραφική παράσταση τοπολογίας

### 3.2.4 Κατασκευή πλέγματος

Για να κατασκευαστεί το πλέγμα, πρέπει να συνδεθούν τα χαρακτηριστικά σημεία με παραμετρικές καμπύλες. Αυτές οι καμπύλες καλούνται χαρακτηριστικές καμπύλες, δεδομένου ότι κάθε καμπύλη έχει τη δική της εννοιολογική σημασία σύμφωνα με την ταξινόμηση των διαστάσεων (εικόνα 10(β)), με κόκκινο χρώμα φαίνεται η τελική περίμετρος του αριστερού μηρού). Οι καμπύλες πρέπει να περνάνε μέσω των χαρακτηριστικών σημείων και να προσεγγίζουν τη σκαναρισμένη μορφή του ανθρώπινου σώματος. Οι παραμετρικές καμπύλες που χρησιμοποιούνται είναι Bezier 4<sup>ης</sup> τάξης. Κάθε καμπύλη έχει τέσσερα σημεία ελέγχου, το πρώτο και το τελευταίο σημείο ελέγχου συμπίπτουν με χαρακτηριστικά σημεία, έτσι μόνο τα δύο μεσαία σημεία ελέγχου μπορούν να ρυθμιστούν ώστε να προσεγγίζουν τη σκαναρισμένη μορφή του μοντέλου. Κάθε χαρακτηριστική καμπύλη βρίσκεται σε ένα επίπεδο, το οποίο καθορίζεται από τους ανθρωπομετρικούς κανόνες (π.χ το επίπεδο που καθορίζει τις χαμηλότερες καμπύλες μέσης περνάει τον αφαλό και είναι παράλληλο με το έδαφος). Κατά τον υπολογισμό των σημείων ελέγχου μίας καμπύλης  $c_i$ , χωρίζεται αρχικά το νέφος σημείων από ένα επίπεδο, ώστε να ληφθεί το περίγραμμα των σημείων (π.χ τα κόκκινα σημεία στην εικόνα 11(β)). Έπειτα χρησιμοποιούνται τα σημασιολογικά χαρακτηριστικά σημεία και τα δύο τελικά σημεία της καμπύλης  $c_i$ , για να επιλεγθούν σημεία που να προσεγγίζουν τη χαρακτηριστική καμπύλη (εικόνα 11(γ)). Σε αυτό το σημείο οι πληροφορίες που αφορούν τα σημασιολογικά χαρακτηριστικά σημεία, είναι συνήθως ένα οριοθετημένο ορθογώνιο πλαίσιο που ορίζει που είναι η πιθανή περιοχή της καμπύλης  $c_i$ .

Τέλος μια ελάχιστη τετραγωνική προσαρμογή υιοθετείται για να καθορίσει τις θέσεις των δύο μεσαίων σημείων ελέγχου. Η διαδικασία του υπολογισμού μιας "θωρακικής" χαρακτηριστικής καμπύλης διαφαίνεται στην εικόνα 11. Ύστερα από τον καθορισμό όλων των χαρακτηριστικών καμπύλων, το πλέγμα προσεγγίζει ομαλά τα σημεία ελέγχου, αφήνοντας γειτονικές ομοεπίπεδες καμπύλες που έχουν συνοχή. Όπως οι χαρακτηριστικές καμπύλες είναι πραγματικά μετρούμενες καμπύλες για την ταξινόμηση των διαστάσεων, από το πλέγμα, βάσει αυτού ο πλήρης πίνακας των διαστάσεων ενός σκαναρισμένου ανθρώπου μπορεί να υπολογιστεί εύκολα.



Εικόνα 11: Βήματα της διαδικασίας καθορισμού μιας χαρακτηριστικής καμπύλης. (α) Τα δύο σημεία που πρόκειται να συνδεθούν, (β) Το περίγραμμα των σημείων που περνάει από δύο σημεία, (γ) Η ένωση που θα προσεγγίσει την καμπύλη, (δ) Η καμπύλη χαρακτηριστικών γνωρισμάτων

### 3.2.5 Δημιουργία μπαλωμάτων

Ένα ανθρώπινο μοντέλο χωρίς μπαλώματα συνήθως παρουσιάζει προβλήματα στο να βρεθούν ακριβώς οι κορυφές των υφασμάτων, όταν σχεδιάζονται γύρω από το σώμα. Για παράδειγμα, αν η θέση μιας α κορυφής πρέπει να καθοριστεί από τα σημεία ενός μπαλώματος και υπολογιστεί η θέση της από τα σημεία που βρίσκονται στα όρια του μπαλώματος, τότε αυτό μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένη τελική θέση της. Ακόμη χωρίς τις πληροφορίες ενδιάμεσα των επιφανειών, η μορφή του ανθρώπινου μοντέλου είναι επίσης λάθος καθορισμένη. Τα παραγόμενα μπαλώματα πρέπει να παρεμβάλουν το πλέγμα και να διατηρούν αρκετές λεπτομέρειες από το νέφος σημείων. Τα μπαλώματα που παρεμβάλλουν τις χαρακτηριστικές καμπύλες παράγονται αρχικά χρησιμοποιώντας μπαλώματα Gregory, έπειτα με τη χρήση ενός αλγόριθμου τα μπαλώματα "ενημερώνονται" σύμφωνα με τα σκαναρισμένα σημεία. Τέλος η επιφάνεια του πλέγματος ρυθμίζεται ώστε να είναι συμμετρική.

### 3.2.6 Παρεμβαλλόμενη επιφάνεια

Αρχικά, τα μπαλώματα δημιουργούνται από τη γραφική παράσταση τοπολογίας ενός ανθρώπινου σώματος. Από κάθε όψη συμπληρώνεται ένα μπαλώμα Gregory που παρεμβάλλει τις χαρακτηριστικές καμπύλες και τις απέναντι εφαπτόμενες. Έστω δύο καμπύλες  $P(u): 0 \leq u \leq 1$  και  $Q(v): 0 \leq v \leq 1$  στο  $R^3$ , με  $P(0) = Q(0)$  και  $T_P(u): 0 \leq u \leq 1$ ,  $T_Q(v): 0 \leq v \leq 1$  να είναι δύο διανυσματικές συναρτήσεις στο  $R^3$  που να ικανοποιούν (όπως φαίνεται στην εικόνα 12):

$$T_P(0) = \left. \frac{dQ(v)}{dv} \right|_{v=0} \quad \text{και} \quad T_Q(0) = \left. \frac{dP(u)}{du} \right|_{u=0}$$

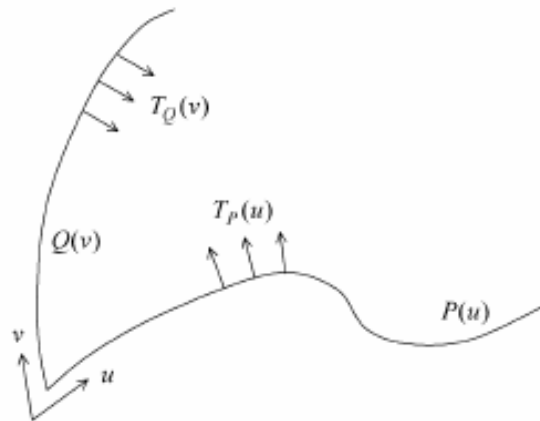
Η συνάρτηση γωνίας παρεμβολής Gregory (επιφάνεια στο  $R^3$ ) ορίζεται από τη σχέση (1):

$$r(u, v) = P(u) + vT_P(u) + Q(v) + uT_Q(v) - P(0) - vT_P(0) - uT_Q(0) - uv \frac{vT'_P(0) + uT'_Q(0)}{u + v} \quad (1)$$

Η συνάρτηση της γωνίας παρεμβολής Gregory  $r(u, v)$  ισούται με τις καμπύλες  $P(u)$  και  $Q(v)$  κατά μήκος των δύο πλευρών ( $r(u, 0) = P(u)$  και  $r(0, v) = Q(v)$  – εικόνα 12). Ακόμη, οι μερικές παράγωγοι ως προς  $u$  και  $v$  ισούται με  $T_P(u)$  και  $T_Q(v)$  κατά μήκος των αντίστοιχων πλευρών, αφού  $T_P(0) = Q'(0)$  και  $T_Q(0) = P'(0)$ .

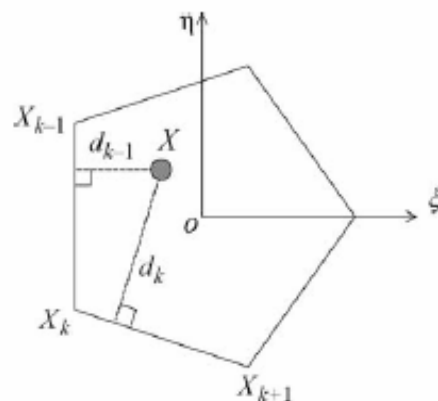
$$-\left. \frac{\partial r(u, v)}{\partial v} \right|_{v=0} = T_P(u) \quad \text{και} \quad \left. \frac{\partial r(u, v)}{\partial u} \right|_{u=0} = T_Q(v)$$

Για μια επιφάνεια  $n$  πλευρών, τέτοιες συναρτήσεις παρεμβολής μπορούν να οριστούν στις  $n$  γωνίες. Η τελική επιφάνεια θα είναι το σταθμισμένο άθροισμα των  $n$  αυτών συναρτήσεων.



Εικόνα 12: Καθορισμός της γωνίας παρεμβολής Gregory

Το παραμετρικό πεδίο ορισμού ενός μπαλώματος Gregory με  $n$  πλευρές ορίζεται ως ένα μοναδιαίου μήκους κανονικό  $n$ -γωνο που βρίσκεται στο πεδίο ορισμού  $\xi$ - $\eta$  (εικόνα 13). Το πεδίο ορισμού ενός μπαλώματος Gregory  $G$  ονομάζεται  $P_G$ , όπου όλες οι γωνίες  $X_k$  ( $k = 0, 1, \dots, n-1$ ) είναι διατεταγμένες κατά την αντίθετη φορά των δεικτών του ρολογιού (counter-clockwise).



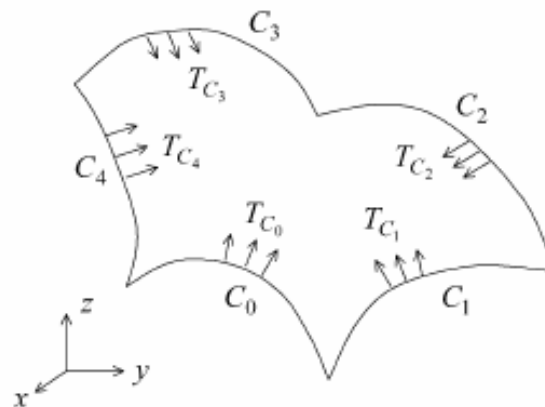
Εικόνα 13:  $P_G$  ενός μπαλώματος Gregory με πέντε πλευρές

Δεδομένου ενός σημείου  $X = (\xi_0, \eta_0)$  που βρίσκεται στη περιοχή  $P_G$ , κατά τον υπολογισμό της τρισδιάστατης θέσης του, μέσω της γωνίας παρεμβολής Gregory  $r_k(u_k, v_k)$ , οι παράμετροι  $(u_k, v_k)$  του σημείου που αντιστοιχεί στη γωνία  $X_k$  ορίζονται ως εξής:

$$(u_k, v_k) = \left( \frac{d_{k-1}}{d_{k-1} + d_{k+1}}, \frac{d_k}{d_{k-2} + d_k} \right) \quad (2)$$

όπου  $d_k$  είναι η κάθετη απόσταση από το  $X$  σημείο μέχρι την πλευρά  $X_k X_{k+1}$ . Είναι εύκολο να διαπιστωθεί εάν το  $(\xi_0, \eta_0)$  βρίσκεται στη πλευρά  $X_k X_{k+1}$ :  $v_k=0$ , αφού  $d_k=0$ , αν το  $(\xi_0, \eta_0)$  βρίσκεται στην πλευρά  $X_{k-1} X_k$  τότε  $u_k=0$ , αφού  $d_{k-1}=0$ , όταν  $(\xi_0, \eta_0)$  και  $X_{k+1}$  συμπίπτουν έχουμε  $u_k=1$  (2), και όταν  $(\xi_0, \eta_0)$  και  $X_{k-1}$  συμπίπτουν έχουμε  $v_k=1$ .

Έστω ότι  $C_0(u), C_1(u), \dots, C_{n-1}(u)$  είναι η συμμετρικές τρισδιάστατες καμπύλες που διαμορφώνουν ένα κλειστό βρόχο,  $C_k(1)=C_{(k+1) \bmod n}(0)$  ( $k= 0, 1, \dots, n-1$ ) και  $T_{C_0}(u), T_{C_1}(u), \dots, T_{C_{n-1}}(u)$  είναι η τρισδιάστατες συνεχείς διανυσματικές συναρτήσεις ορισμένες στο  $C_k(u)$ , αντίστοιχα το μπάλωμα Gregory των  $C_k(u)$  και  $T_{C_k}(u)$  ορίζεται σαν μια χαρτογράφηση από το  $P_G$  στο  $R^3$  (εικόνα 14).



Εικόνα 14: Ορισμός ενός μπαλώματος Gregory

$$G(X) = \sum_{k=0}^{n-1} w_k(X) r_k(u_k(X), v_k(X)) \quad (3)$$

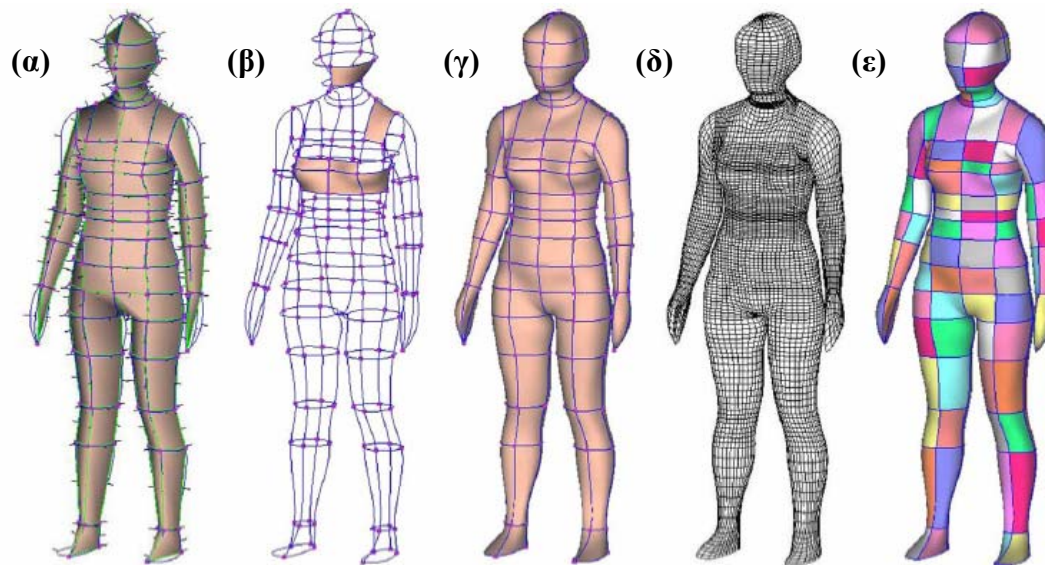
όπου

$$w_k(X) = \frac{\prod_{j \neq k-1, k} dj^2}{\sum_{i=0}^{n-1} \prod_{j \neq i-1, i} dj^2}$$

και  $r_k(u_k, v_k)$  παριστάνουν τη συνάρτηση γωνίας παρεμβολής Gregory για την k-οστή γωνία των τεσσάρων στοιχείων  $\{ C_k(u), \bar{C}_k(v), T_{Ck}(u), \bar{T}_{Ck}(v) \}$ , όπου  $\bar{C}_k(u) = C_k(1-u)$  και  $\bar{T}_{Ck}(u) = T_{Ck}(1-u)$ . Στη χαρακτηριστική παρεμβολή μπαλώματος, οι  $C_i(u)$  παραμετρικές καμπύλες Bezier 4<sup>ης</sup> τάξης αποτελούν τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα του πλέγματος. Η καμπύλη  $T_{Ci}(u)$  ορίζεται ως εξής:

$$T_{Ci}(u) = N_i \times \frac{\partial C_i(u)}{\partial u} \quad (4)$$

Για να υπάρχει συνέχεια στη σύνδεση των καμπύλων, τα μπαλώματα που βρίσκονται σε διαφορετικές πλευρές μιας χαρακτηριστικής καμπύλης πρέπει να έχουν τον ίδιο αριθμό πλεγμάτων κατά μήκος της καμπύλης.



Εικόνα 15: Παρεμβολή Gregory για την παραγωγή μπαλωμάτων. (α) Γραφική παράσταση τοπολογίας με διασταυρωμένα κάθετα διανύσματα. (β) Καμπύλες και ορισμένα μπαλώματα σε ένα μοντέλο ακμών. (γ) Δημιουργία όλων των μπαλωμάτων. (δ) Δομή του πλέγματος. (ε) Μαρκαρισμένο μοντέλο για τον έλεγχο των μπαλωμάτων.

### 3.2.7 Τελειοποίηση επιφανείας

Από την παραπάνω εικόνα παρατηρείται ότι η επιφάνεια παρεμβολής δεν δίνει τις απαραίτητες λεπτομέρειες που έχει η επιφάνεια του ανθρώπινου σώματος. Για να προστεθούν οι λεπτομέρειες αυτές, εισάγεται ένας επαναληπτικός αλγόριθμος ο οποίος βελτιώνει την ακρίβεια των συναρμολογήσεων με την ελαχιστοποίηση της διαφοράς μεταξύ της επιφάνειας  $M$  του πλέγματος και των σκαναρισμένων δεδομένων. Η διαδικασία τελειοποίησης επιφανείας αποτελείται από τρία βήματα: **(1)** Κατασκευή voxel<sup>1</sup> (ενός στοιχείου όγκου, ανάλογο του pixel). **(2)** Αναπροσαρμογή των θέσεων των κορυφών. **(3)** Χαλάρωση του πλέγματος. Το δεύτερο και το τρίτο βήμα επαναλαμβάνεται μέχρι την τελειοποίηση του πλέγματος.

**(1)** Κατασκευή voxel: Σε αυτό το βήμα προετοιμάζονται voxels για την αναπροσαρμογή θέσεως κάθε κορυφής στην παρεμβαλλομένη επιφάνεια πλέγματος. Αν το μέγεθος του κάθε voxel επιλεχθεί ως  $\delta$  και το οριοθετημένο τμήμα ενός νέφους σημείων καθοριστεί ως  $(x_{min}, y_{min}, z_{min}) \times (x_{max}, y_{max}, z_{max})$ , τότε μπορούν να οριστούν  $m \times n \times l$  voxels, όπου:

<sup>1</sup> A **voxel** is a volume element, representing a value in three dimensional space. This is analogous to a pixel, which represents 2D image data [9].



$$m = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{\delta} + 1, \quad n = \frac{y_{\max} - y_{\min}}{\delta} + 1, \quad l = \frac{z_{\max} - z_{\min}}{\delta} + 1$$

Κάθε voxel περιέχει μία λίστα σημείων που έχουν ένα συγκεκριμένο εύρος συντεταγμένων. Για ένα voxel  $V_{i,j,k}$  το εύρος των συντεταγμένων των σημείων είναι:

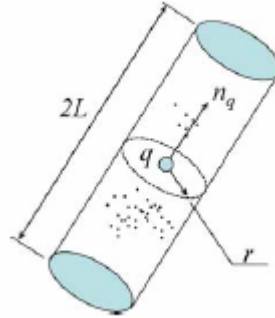
$$[i\delta + x_{\min}, (i+1)\delta + x_{\min}] \times [j\delta + y_{\min}, (j+1)\delta + y_{\min}] \times [k\delta + z_{\min}, (k+1)\delta + z_{\min}]$$

Κατά συνέπεια, από το δείκτη ενός voxel, μπορεί εύκολα να υπολογιστεί ένα εύρος σημείων.

**(2)** Αναπροσαρμογή των θέσεων των κορυφών: Σε κάθε κορυφή στην παρεμβαλλόμενη επιφάνεια, αναπροσαρμόζεται η θέση της βάσει των σημείων που βρίσκονται σε μία κυλινδρική περιοχή γύρω από αυτήν. Όπως φαίνεται στην εικόνα 16, για μία κορυφή  $q$  με κανονική διεύθυνση  $n_q$  στην επιφάνεια πλέγματος, όλα τα σκαναρισμένα σημεία στην περιοχή  $\Gamma$ , που ορίζεται από την  $r$  και το  $L$ , πρέπει να ελεγχθούν (συνήθως  $r=1,125\text{cm}$  και  $L=1,5\text{cm}$ ). Από όλα τα σκαναρισμένα σημεία στην περιοχή  $\Gamma$ , ζητείται ένα σημείο  $p$  που να είναι κοντινότερο στο  $q$ . Η κορυφή  $q$  μετακινείται ώστε να συμπίπτει με το  $p$ . Για να επιταχυνθεί αυτή η διαδικασία χρησιμοποιούνται τα voxels του 1<sup>ου</sup> βήματος. Αν οι συντεταγμένες του  $q$  είναι  $(x_q, y_q, z_q)$ , μόνο τα σημεία στα εννέα voxels  $V_i \in [\alpha - 1, \alpha + 1], j \in [\beta - 1, \beta + 1], k \in [\gamma - 1, \gamma + 1]$  εξετάζονται, όπου:

$$\alpha = INT\left(\frac{x_q - x_{\min}}{\delta}\right), \quad \beta = INT\left(\frac{y_q - y_{\min}}{\delta}\right), \quad \gamma = INT\left(\frac{z_q - z_{\min}}{\delta}\right)$$

Επομένως, το επιλεγμένο  $\delta$  σχετίζεται με την τιμή του  $L$ . Άρα όταν  $\delta=L$ , όλα τα πιθανά σημεία της περιοχής  $\Gamma$  περιέχονται στα voxels, των οποίων οι δείκτες ικανοποιούν τις  $i \in [\alpha - 1, \alpha + 1]$ ,  $j \in [\beta - 1, \beta + 1]$ ,  $k \in [\gamma - 1, \gamma + 1]$ .



Εικόνα 16: Περιοχή  $\Gamma$  γύρω από μία κορυφή

(3) Χαλάρωση του πλέγματος: Με την απλή αναπροσαρμογή θέσεως της κορυφής στην επιφάνεια  $M$ , το αποτέλεσμα του πλέγματος δεν θα είναι πολύ ελκυστικό, διότι τα γειτονικά μέρη της  $M$  μπορούν να τοποθετηθούν σε ανόμοια μέρη των σκαναρισμένων σημείων. Για να αντιμετωπιστεί αυτή η διαφορά, η σχετική παραμόρφωση μεταξύ κορυφών στην  $M$  πρέπει να είναι ελάχιστη. Επίσης οι κορυφές που προήλθαν από τις χαρακτηριστικές καμπύλες, πρέπει να περιοριστούν σε αυτές. Η ενέργεια χαλάρωσης της  $q$ , δεδομένης της τρέχουσας θέσης είναι:

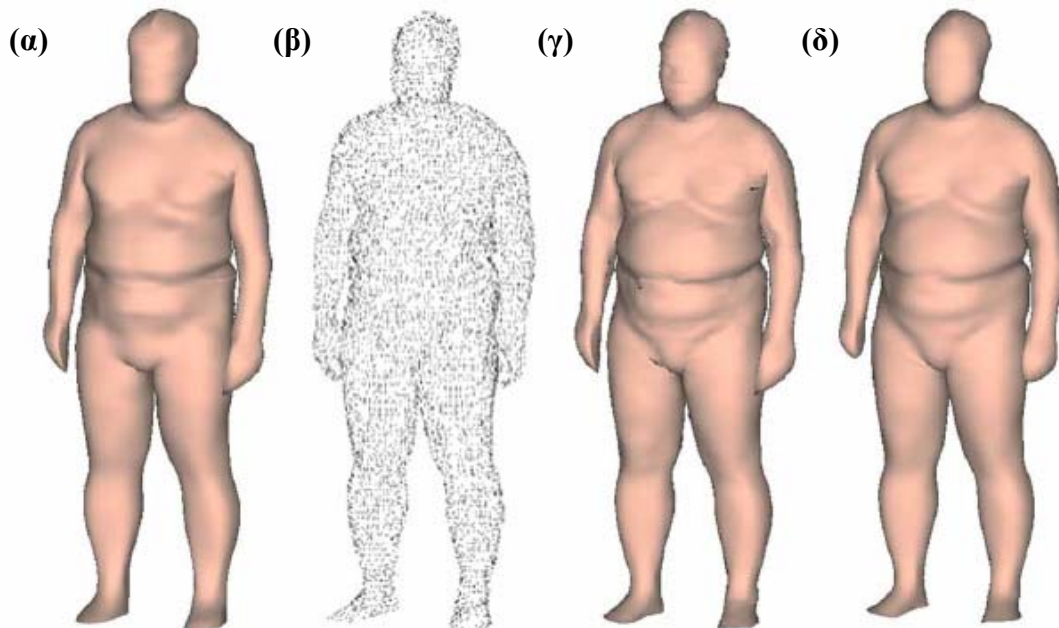
$$E = \sum_j \left( \|v_j q\| - l_{v_j q}^0 \right)^2 + E_{FC} \quad (5)$$

όπου  $v_j$  είναι η γειτονική κορυφή της  $q$  στην  $M$ ,  $l_{v_j q}^0$  είναι η απόσταση μεταξύ της  $v_j$  και της  $q$  στην  $M$  πριν από την τελειοποίηση της επιφανείας, τέλος  $E_{FC}$  είναι η ενέργεια των κορυφών που βρίσκονται σε χαρακτηριστικές καμπύλες:

$$E_{FC} = (q - q_0)^2 \quad (6)$$

όπου  $q_0$  είναι η θέση της  $q$  στο χαρακτηριστικό μοντέλο ακμών, αλλιώς  $E_{FC}=0$ . Η χαλάρωση του πλέγματος είναι στην ουσία μια διαδικασία ελαχιστοποίησης της ενέργειας  $E$  από κορυφή σε κορυφή.

Η τελειοποίηση του πλέγματος ολοκληρώνεται με επαναλήψεις των βημάτων 2 και 3 μέχρι το σφάλμα της μέσης απόστασης μεταξύ των κορυφών στην  $M$  και των σκαναρισμένων σημείων, να είναι μικρότερο από ένα όριο  $\varepsilon$  ( $\varepsilon = 0,1 \text{ mm}$ ). Όμως, στην τρέχουσα επιφάνεια υπάρχουν θόρυβοι από το σκαναρισμένο νέφος σημείων (εικόνα 17(γ)), οι θόρυβοι αυτοί επιδρούν εμφανέστατα στην ομαλότητα της επιφάνειας. Το πρόβλημα αυτό λύνεται με την εφαρμογή διαφόρων εξισώσεων μείωσης τριβής σε κάθε κορυφή μετά από δέκα επαναλήψεις των βημάτων 2 και 3. Το τελικό αποτέλεσμα τελειοποίησης επιφανείας είναι πιο ικανοποιητικό (εικόνα 17(δ)). Η διαδικασία αυτή μπορεί να ολοκληρωθεί μέσα σε ένα λεπτό σε έναν υπολογιστική με τα εξής χαρακτηριστικά, PIII, 900 MHz CPU και 256MB RAM, όταν το νέφος σημείων έχει περίπου 100.000 σημεία.



Εικόνα 17: Τελειοποίηση επιφανείας. (α) Παρεμβλλόμενη επιφάνεια. (β) Νέφος σημείων. (γ) Επιφάνεια με θορύβους. (δ) Τελικό αποτέλεσμα με  $\varepsilon=0,1$ .

### 3.2.8 Παραμετρική σχεδίαση ανθρώπινου μοντέλου

Όλα τα παραμετροποιημένα ανθρώπινα μοντέλα αποθηκεύονται σε μία τρισδιάστατη ψηφιακή βάση δεδομένων Π. Όταν συλλεχθούν αρκετά δεδομένα, ένα νέο ανθρώπινο σώμα μπορεί να δημιουργηθεί σύμφωνα τις διαστάσεις, συνθέτοντας τα παραδειγματικά μοντέλα της βάσης Π. Με διαφορετικές διαστάσεις δημιουργούνται και διαφορετικά ανθρώπινα σώματα.

### 3.2.9 Σύνθεση ανθρωπίνων σωμάτων

Έστω ότι υπάρχουν  $n$  ανθρώπινα σώματα:  $H_i (i=0, \dots, n-1)$ , το ανθρώπινο σώμα που θα προκύψει από τη σύνθεση  $H_s$ , λαμβάνεται στην ουσία μέσω μιας παρεμβολής  $H_s = I(w_0, H_0, w_1, H_1, \dots, w_{n-1}, H_{n-1})$ , όπου  $I(\dots)$  είναι η συνάρτηση παρεμβολής και  $w_i$  είναι τα βάρη της παρεμβολής που ικανοποιούν τις :  $\sum_{i=0}^{n-1} w_i = 1$  και  $w_i \geq 0$ .

Επίσης ορίζεται μια συνάρτηση μέτρησης  $\Psi_M(H)$ , τις οποίας δεδομένο εισόδου είναι ένα ανθρώπινο σώμα  $H$  και το αποτέλεσμα είναι το διάνυσμα διάστασης του  $H$ . Με ένα διάνυσμα  $D$  και έχοντας σαν δεδομένα εισόδου τις παραμετρικές διαστάσεις, η  $\|\Psi_M(H) - D\|$  δίνει τη διαφορά μεταξύ του ανθρωπίνου σώματος και των καθορισμένων διαστάσεων του παραμετρικού σχεδίου. Ακόμη για να αυξηθεί ο βαθμός ελευθερίας, κάθε ανθρώπινο σώμα  $H_i$  μπορεί να εκφραστεί σε κλίμακα, χρησιμοποιώντας σαν παράγοντα κλίμακας το  $\alpha_i$  κατά την παρεμβολή ( $\alpha_i \geq 0$ ). Παράδειγμα:  $H_i, s$ , ζητείται να καθοριστούν τα βάρη της παρεμβολής και οι παράγοντες κλίμακας. Ορίζεται ένα διάνυσμα  $X$ :  $X = (\omega_0, \omega_1, \dots, \omega_{n-1}, s_0, s_1, \dots, s_{n-1})$ , τότε η σύνθεση του ανθρωπίνου σώματος καθορίζεται από τις εξής σχέσεις :

$$H_s = I\left(\frac{\omega_0^2}{\sum_i \omega_i^2}, s_0^2 H_0, \frac{\omega_1^2}{\sum_i \omega_i^2}, s_1^2 H_1, \dots, \frac{\omega_{n-1}^2}{\sum_i \omega_i^2}, s_{n-1}^2 H_{n-1}\right)$$

όπου

$$s_i^2 = \alpha_i \quad \text{και} \quad \frac{\omega_j^2}{\sum_i \omega_i^2} = w_j$$

Κατά συνέπεια όταν  $\sum_i \omega_i^2 \neq 0$ , οι ανισότητες  $w_i \geq 0$  και  $\alpha_i \geq 0$  ικανοποιούνται από οποιοδήποτε  $X$ . Το διάνυσμα  $X$  είναι μια μεταβλητή η οποία καθορίζεται κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης. Η σύνθεση του ανθρωπίνου σώματος μπορεί να θεωρηθεί ως συνάρτηση του  $X - H_s(X)$ . Η παραμετρική σχεδίαση διατυπώνεται σαν ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης, όπου αναζητείται το  $X$  που δώσει την ελάχιστη διαφορά μεταξύ του  $H_s$  και των δεδομένων εισόδου:

$$\min \|\Psi_M(H_s(X)) - D\|^2 \quad (7)$$

Με βάση την παραπάνω εξίσωση,  $J[X] = \|\Psi_M(H_s(X)) - D\|^2$  ορίζεται η αντικειμενική συνάρτηση βελτιστοποίησης. Στο ξεκίνημα της βελτιστοποίησης, οι τιμές του  $X$  δίνονται  $\omega_i = s_i = 1$ . Για να εξασφαλιστεί η  $\sum_i \omega_i^2 \neq 0$ , ορίζεται η τιμή του  $\omega_0$ , όταν ισχύει  $\omega_i^2 < 10^{-6}$  κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης. Ακόμη η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης μειώνεται καθώς ο αριθμός των επαναλήψεων αυξάνεται. Αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογιστεί το τελικό κριτήριο του αριθμού των επαναλήψεων, που είναι είτε:

$$\frac{\|J[X^i] - J[X^{i-1}]\|}{J[X^0]} < \varepsilon$$

Είτε ο αριθμός των επαναλήψεων να είναι μεγαλύτερος από  $N_{\max}$ , όπου  $J[X^i]$  η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης στην  $i$ -οστή επανάληψη (τρέχουσα τιμή),  $J[X^0]$  η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης πριν τη βελτιστοποίηση,  $N_{\max}$  ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων και  $\varepsilon$  ένας μικρός αριθμός (συνήθως  $\varepsilon=0,01\%$  και  $N_{\max}=100$ ). Η συνάρτηση  $\Psi_M(\dots)$  δίνει το μοντέλο ακμών του ανθρωπίνου σώματος, αλλά όχι και την επιφάνεια του πλέγματος για λόγους επιτάχυνσης της βελτιστοποίησης. Αφού

λοιπόν καθοριστούν τα βάρη της παρεμβολής και τα βάρη της κλίμακας, η επιφάνεια του πλέγματος του ανθρωπίνου σώματος δημιουργείται.

### 3.2.10 Επιλογή Μοντέλων

Για να λειτουργήσει ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης της σύνθεσης ανθρωπίνων σωμάτων, πρέπει να χρησιμοποιηθούν κατάλληλα μοντέλα, δηλαδή πόσα θα επιλεχθούν και αυτά να έχουν το κατάλληλο εύρος διαστάσεων. Αν  $\Psi_M(H_S) = \sum_i w_i \Psi_M(H_i)$ , βάσει θεωρήματος γραμμικής άλγεβρας, για  $m$  διαστάσεις ως δεδομένα εισόδου, χρειάζονται τουλάχιστον  $m$  ανθρωπίνα μοντέλα των οποίων τα επιστρεφόμενα διανύσματα του  $\Psi_M(\dots)$  δεν είναι γραμμικά συσχετιζόμενα. Πολλά ανθρωπίνα μοντέλα μαζί οδηγούν σε μακροχρόνιους υπολογισμούς, ενώ λίγα ανθρωπίνα μοντέλα σπάνια ικανοποιούν πλήρως τις δεδομένες διαστάσεις. Από πειράματα, χρησιμοποιώντας 4m μοντέλα με κατάλληλες διαστάσεις λειτουργούν συνήθως καλά.

Για ένα διάνυσμα δεδομένων εισόδου  $D$ , η απόσταση από το ανθρωπίνο μοντέλο  $H$  στο  $D$ , στη παράμετρο διάστασης χώρου, ορίζεται ως η ευκλείδεια νόρμα του  $\Psi_M(H) - D$ :

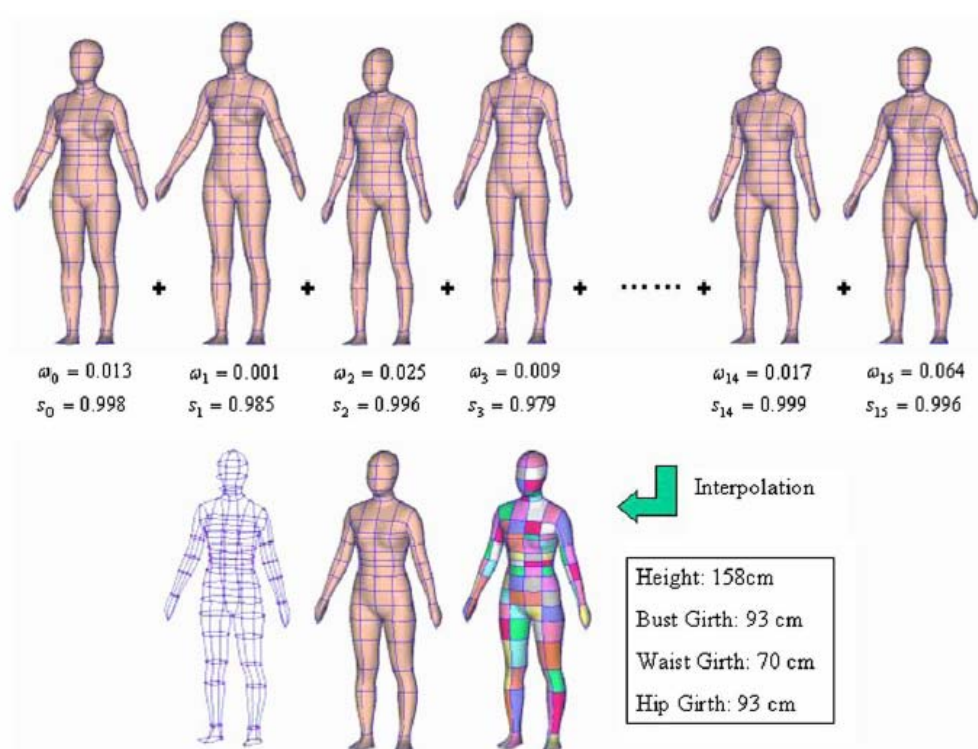
$$L = \|\Psi_M(H_S(X)) - D\| \quad (8)$$

Όσο μικρότερη είναι η  $L$ , τόσο πιο κατάλληλο είναι το μοντέλο για τη σύνθεση. Συνοψίζοντας, δεδομένου ενός  $D$  με  $m$  συνιστώσες, ταξινομούνται όλα τα μοντέλα στην τρισδιάστατη ψηφιακή βάση δεδομένων  $\Pi$  σύμφωνα με την απόσταση  $L$ . Τα πρώτα 4m μοντέλα που θα βρεθούν επιλέγονται για τον αλγόριθμο σύνθεσης. Αν η βελτιστοποίηση δώσει ανακριβές αποτέλεσμα σύμφωνα με το  $D$  (οι επαναλήψεις σταματήσουν στο  $N_{\max}$  και η επιστρεφόμενη τιμή  $J[X]$  υπερβαίνει κάποιο όριο), τότε επιλέγονται περισσότερα  $m$  μοντέλα.

Ο αλγόριθμος επαναληπτικά επιλέγει μοντέλα και τα συνθέτει ώσπου να βρεθεί το μοντέλο που οι διαστάσεις του να είναι κοντινότερες στο  $D$ . Άρα η δημιουργία μιας τρισδιάστατης ψηφιακής βάσης δεδομένων με μεγάλο αριθμό μοντέλο είναι πολύ σημαντική.

### 3.2.11 Αποτελέσματα Σύνθεσης

Με δεδομένα εισόδου τις διαστάσεις, μπορούν να δημιουργηθούν πολλά διαφορετικά ανθρώπινα μοντέλα. Στην εικόνα 18 παρουσιάζεται ένα γυναικείο μοντέλο που παράχθηκε από συνδυασμό διαφορετικών παραμέτρων διαστάσεων, όπου απεικονίζονται και τα τελικά βάρη.

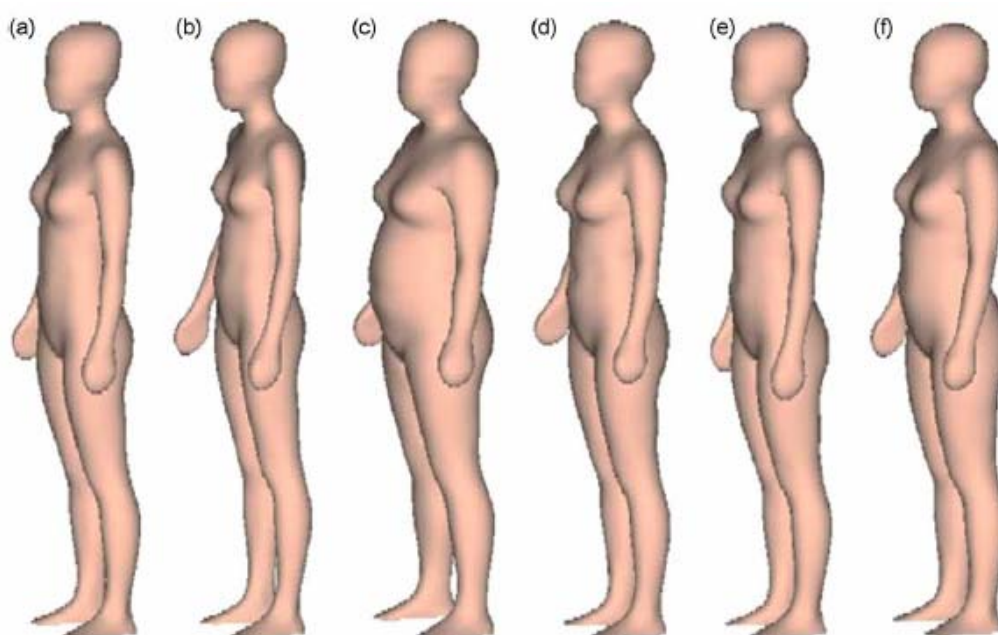


Εικόνα 18: Παράδειγμα σύνθεσης ενός γυναικείου μοντέλου

Ακολουθεί ένας πίνακας με διαφορετικές διαστάσεις 6 γυναικείων μοντέλων και στη συνέχεια στην εικόνα 19 τα μοντέλα που δημιουργηθήκαν βάσει αυτών των διαστάσεων.

Model	Height	Neck girth	Bust girth	Under bust	Waist girth	Hip girth	Inseam-length
(a)	159	32	85	74	66	89	69
(b)	168	32	83	77	66	90	77
(c)	165	39	107	94	92	108	70
(d)	163	33	92	77	72	95	70
(e)	156	31	85	73	65	87	67
(f)	159	34	95	82	75	96	68

**Πίνακας 3: Διαστάσεις 6 γυναικείων μοντέλων**



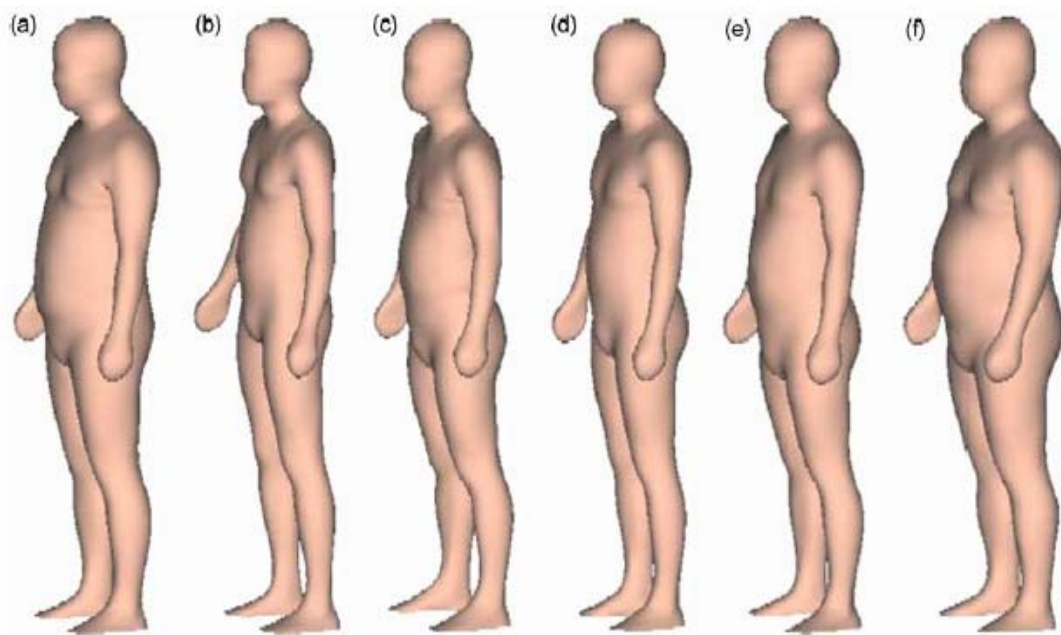
**Εικόνα 19: Γυναικεία μοντέλα βάσει διαστάσεων πίνακα**

Όμοια ακολουθεί ένας πίνακας με διαφορετικές διαστάσεις 6 ανδρικών μοντέλων και στη συνέχεια στην εικόνα 20 τα μοντέλα που δημιουργήθηκαν βάσει αυτών των διαστάσεων.



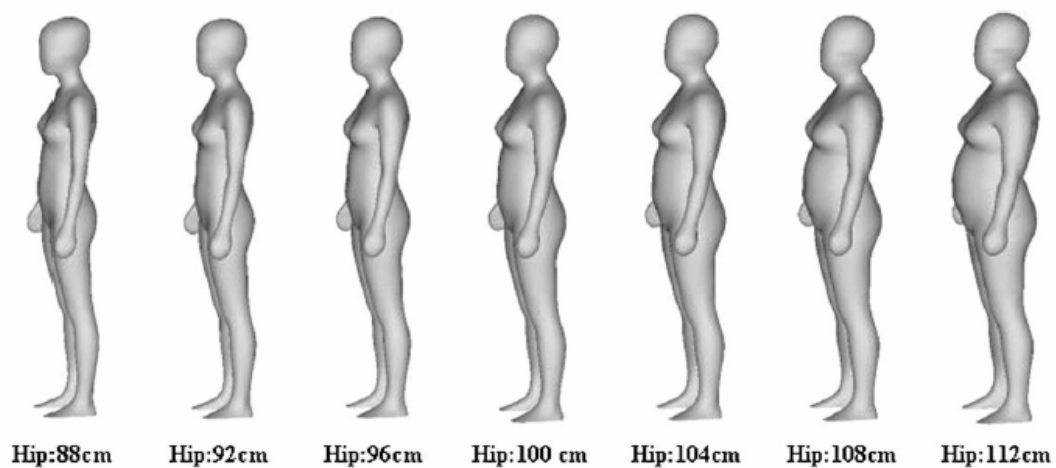
Model	Height	Neck girth	Chest girth	Waist girth	Hip girth	Inseam-length
(a)	175	42	110	105	109	74
(b)	184	39	97	84	101	84
(c)	169	39	95	86	98	70
(d)	175	40	98	85	99	76
(e)	170	40	100	90	99	69
(f)	174	45	115	112	114	71

**Πίνακας 4: Διαστάσεις 6 ανδρικών μοντέλων**

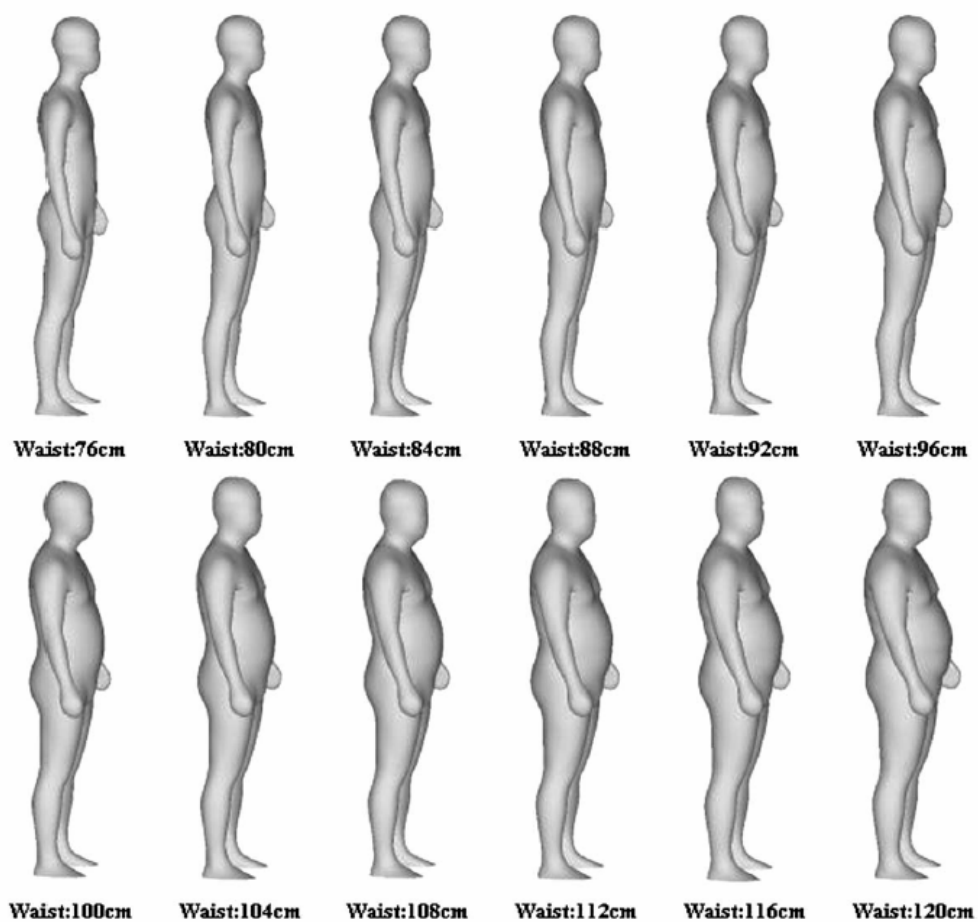


**Εικόνα 20: Ανδρικά μοντέλα βάσει διαστάσεων πίνακα**

Στην εικόνα 21 παρουσιάζονται γυναικεία μοντέλα με ίδιο ύψος, αλλά με διαφορετικές διαστάσεις γοφών. Ακόμη ακολουθούν ανδρικά μοντέλα με ίδιο ύψος, αλλά διαφορετική περίμετρο μέσης (εικόνα 22).

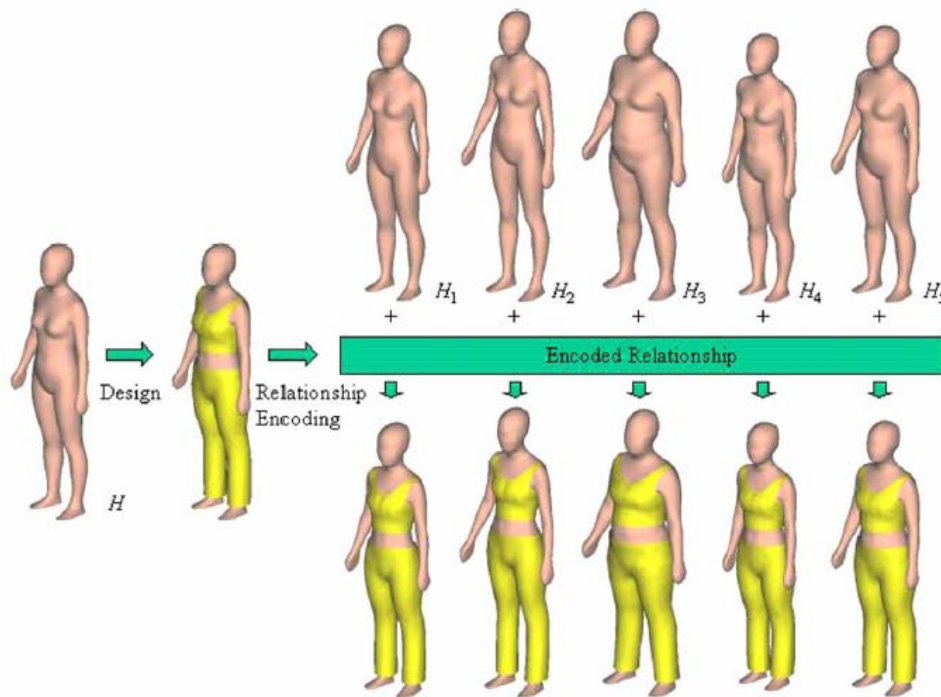


Εικόνα 21: Γυναικεία μοντέλα με ίδιο ύψος (165 cm) και διαφορετικές διαστάσεις γοφών



Εικόνα 22: Ανδρικά μοντέλα με ίδιο ύψος (175 cm) και διαφορετική περίμετρο μέσης

Στην εικόνα 23 φαίνεται ένα παράδειγμα εφαρμογής ενδύματος σε γυναικεία μοντέλα με διαφορετικές διαστάσεις.



Εικόνα 23: Προσαρμογή ενδύματος σε γυναικεία μοντέλα με διαφορετικές διαστάσεις

## 4. ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ 3D ΠΟΛΥΓΩΝΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

### 4.1 Προετοιμασία Σκαναρισμένου Μοντέλου

1. Το σκαναρισμένο μοντέλο αρχικά βρίσκεται σε μορφή νέφους σημείων, επομένως το πρώτο βήμα της διαδικασίας είναι η δημιουργία κλειστής επιφάνειας, η οποία θα αποτελείται από πολύγωνα, του σώματος από το νέφος σημείων. Η προεπεξεργασία αυτή γίνεται με τη χρήση του λογισμικού Geomagic Studio.

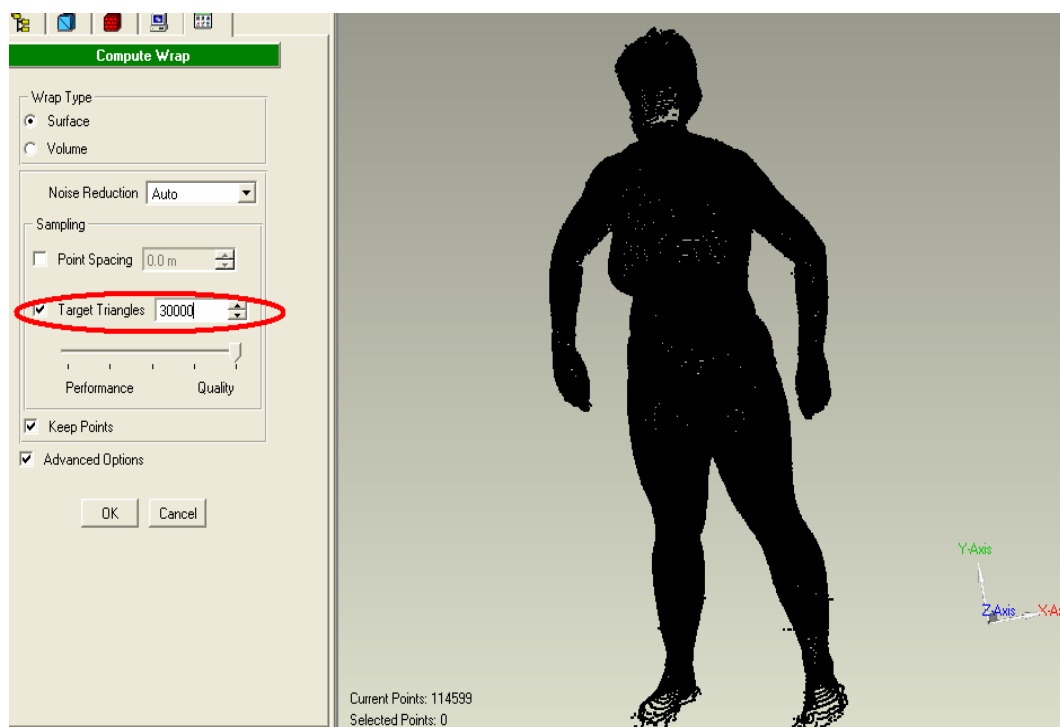
Αρχικά εισάγεται το αρχείο του μοντέλου που πρόκειται να υποστεί επεξεργασία:

*File→Import*

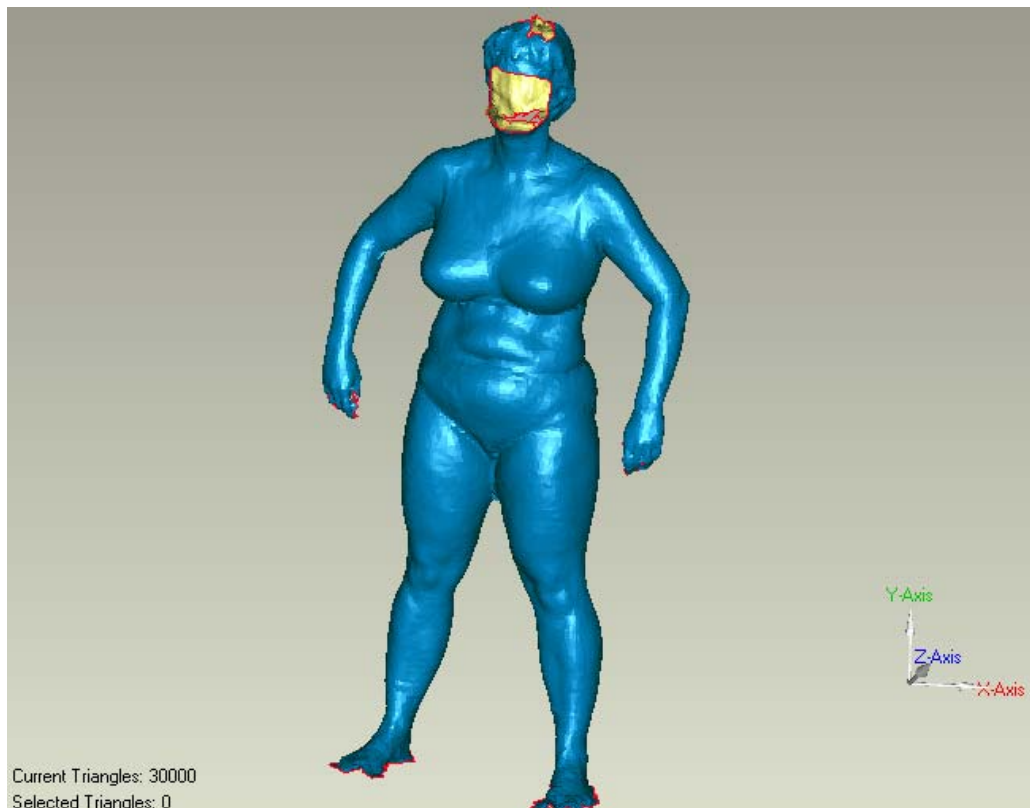


Εικόνα 24: Νέφος σημείων που προκύπτει από τη διαδικασία σκαναρίσματος

Στη συνέχεια δημιουργείται ένα αρχικό πολυγωνικό μοντέλο με την προσαρμογή επιφάνειας στα σημεία του σκαναρισμένου μοντέλου, η οποία αποτελείται από περίπου 30000 τρίγωνα. Δεν είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν όλα τα σημεία του σκαναρισμένου μοντέλου καθώς στο βήμα αυτό επιθυμείται η δημιουργία, απλά μιας κλειστής επιφάνειας από τα δεδομένα, η οποία θα επεξεργαστεί διεξοδικά μέσα από το Bodysizer (3D Studio Max) με τη βοήθεια των πρότυπων μοντέλων. Πιο συγκεκριμένα στο user interface του Geomagic χρησιμοποιούνται τα εξής εργαλεία: *Points→Wrap, Wrap type: Surface (Advanced Options) → Noise Reduction: Auto → Target Triangles: 30000→OK*

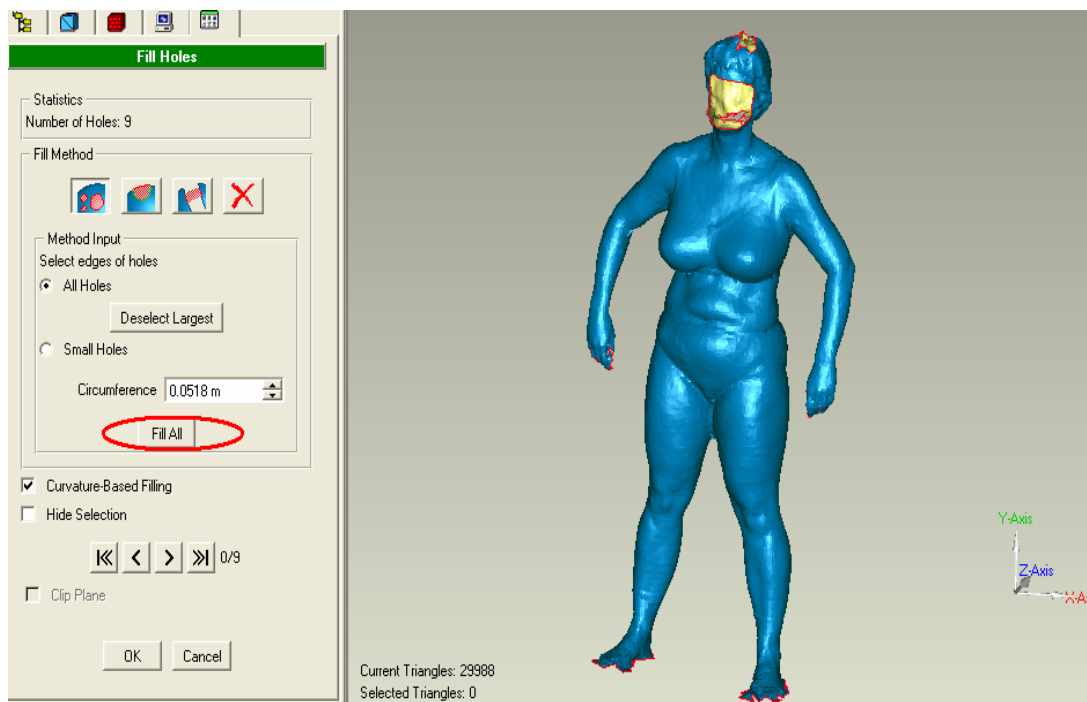


Εικόνα 25: Διαδικασία δημιουργίας αρχικού πολυγωνικού μοντέλου με 30000 τρίγωνα

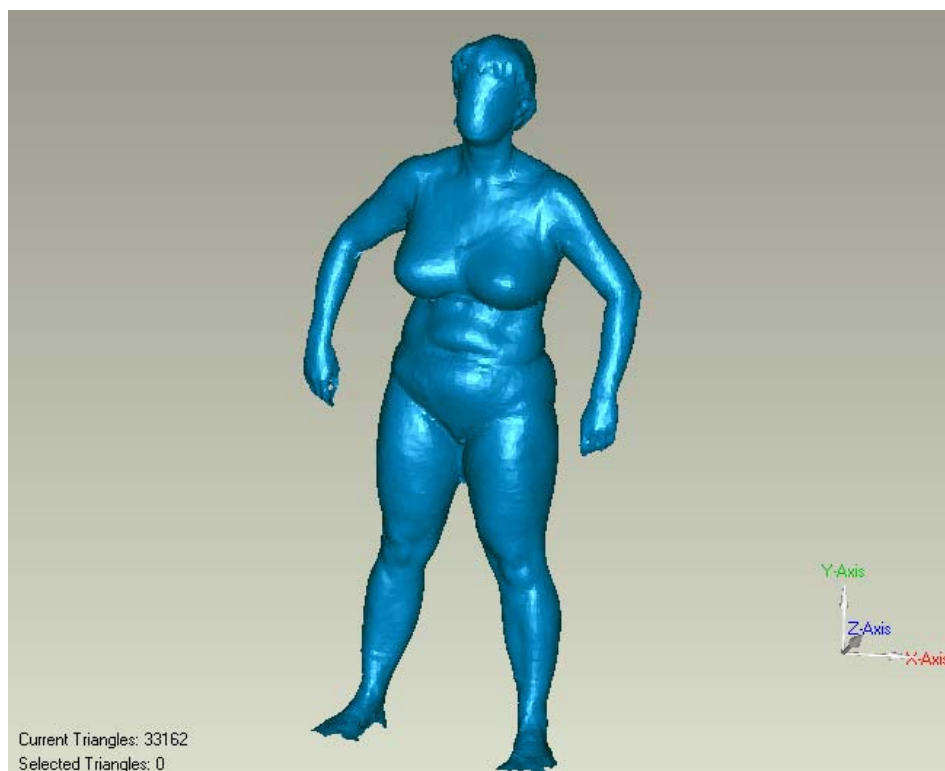


Εικόνα 26: Το αρχικό πολυγωνικό μοντέλο μετά την προσαρμογή επιφανείας

Έπειτα η επεξεργασία του αρχικού πολυγωνικού μοντέλου συνεχίζεται γεμίζοντας τις τρύπες που υπάρχουν στην επιφάνεια που δημιουργήθηκε από τη πρώτη προσαρμογή (οι τρύπες διαφαίνονται στην εικόνα 10 με κόκκινο περίγραμμα). Συχνά παρατηρείται ότι υπάρχουν παραμορφώσεις σε περιοχές που τρισδιάστατα δεδομένα δεν μπορούσαν να ληφθούν με ακρίβεια, όπως οι παλάμες, οι πατούσες, οι μασχάλες και το πρόσωπο. Το πρόσωπο αφαιρέθηκε σκόπιμα κατά τη διαδικασία σκαναρίσματος, λόγω πολιτικής προστασίας προσωπικών δεδομένων. Οι παραμορφώσεις αυτές δεν θα επηρεάσουν το τελικό αποτέλεσμα καθώς θα απαλειφθούν πάλι μέσα από το Bodysizer με τη βοήθεια των πρότυπων μοντέλων. Γέμισμα τρυπών: *Polygons*→ *Make Manifold*→*Open* , *Polygons*→*Fill Holes*→*Fill All*→*OK* (Στο ερώτημα για *flat filling* επιλέγεται *No*).

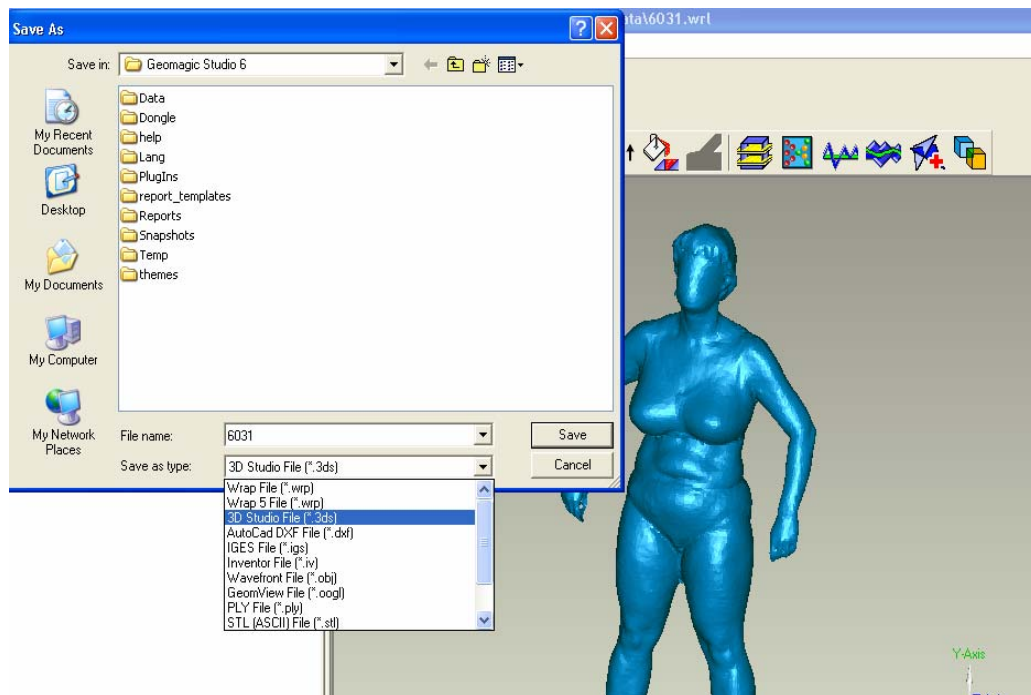


**Εικόνα 27: Διαδικασία γεμίσματος οπών**



**Εικόνα 28: Πολυγωνικό μοντέλο μετά το γέμισμα οπών**

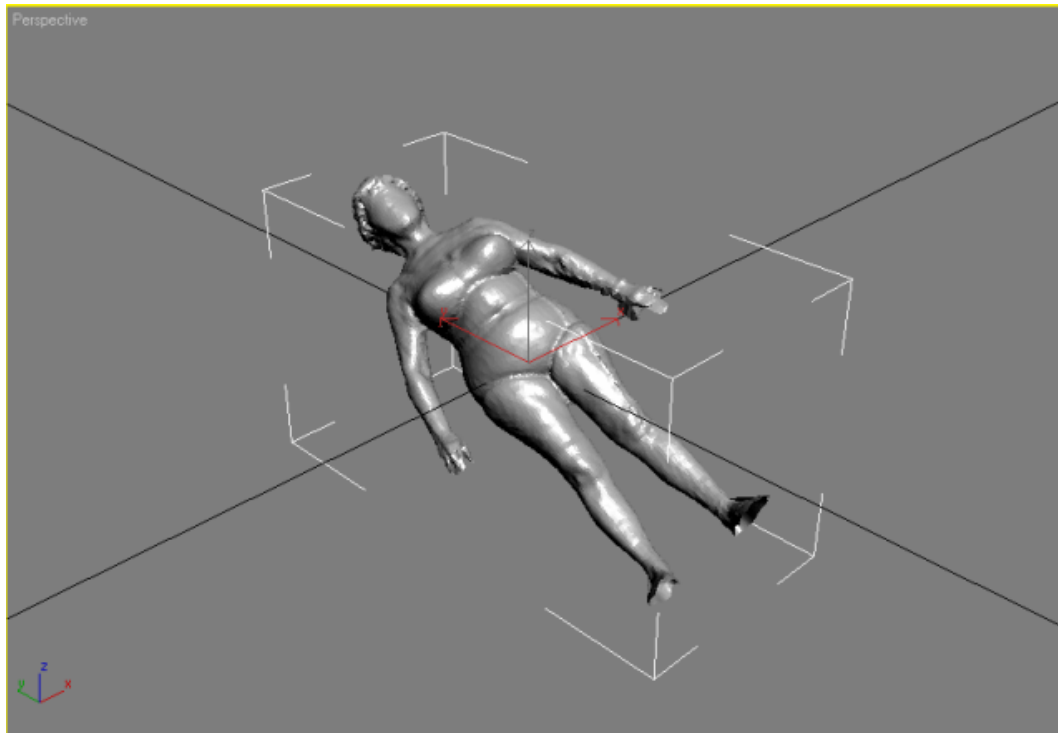
Τέλος μετά το γέμισμα των οπών και την δημιουργία της επιφάνειας το κλειστό πολυγωνικό μοντέλο αποθηκεύεται σε μορφή την οποία υποστηρίζει το 3D Studio Max (.3ds).



**Εικόνα 29: Αποθήκευση κλειστού πολυγωνικού μοντέλου**

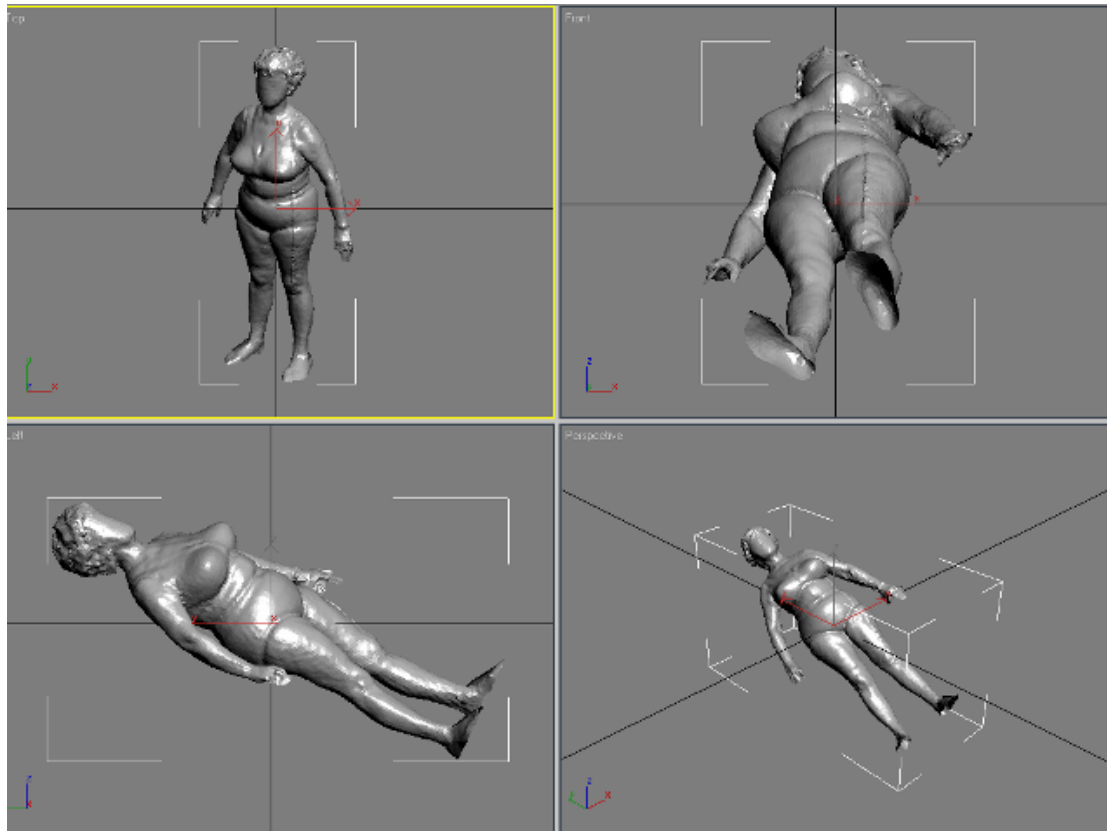
2. Η διαδικασία προσαρμογής με τη χρήση του Bodysizer ξεκινά με την εισαγωγή του κλειστού πολυγωνικού μοντέλου στο 3DSMAX: *File→Import*





Εικόνα 30: Πολυγωνικό μοντέλο πριν την έναρξη επεξεργασίας του στο 3DSMAX

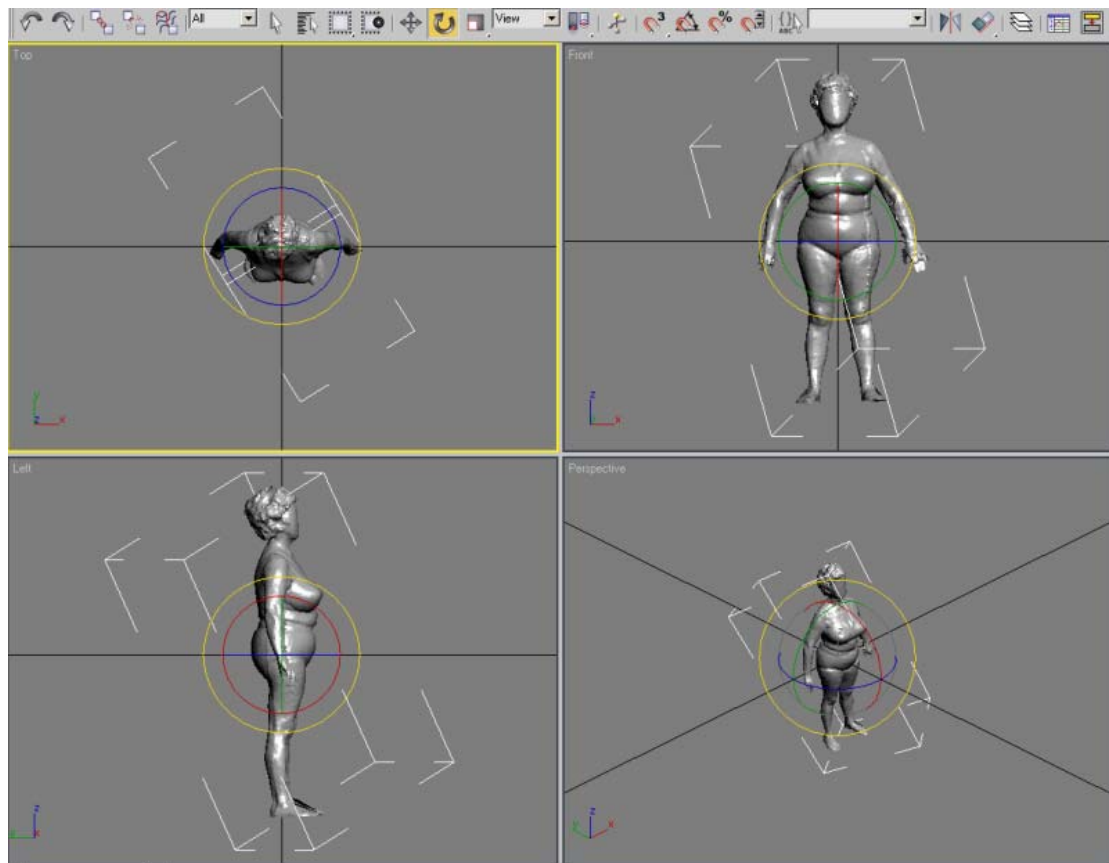
Παρατηρείται ότι σε όλα τα *VIEWPORTS*, πλην του *PERSPECTIVE*, δεν φαίνεται τίποτα. Ρυθμίζεται η απεικόνιση από *WIREFRAME* σε *SMOOTH + HIGHLIGHTS*. (Με F3 επιλέγεται το *VIEWPORT* ή δεξί κλικ πάνω στην ονομασία του *VIEWPORT* π.χ. δεξί κλικ πάνω στο *FRONT* ).



Εικόνα 31: Απεικόνιση του πολυγωνικού μοντέλου σε όλα τα VIEWPORTS (TOP, FRONT, LEFT, PERSPECTIVE)

Το μοντέλο τις περισσότερες φορές δεν είναι σωστά διευθετημένο στο χώρο. Διορθώνεται ως εξής:

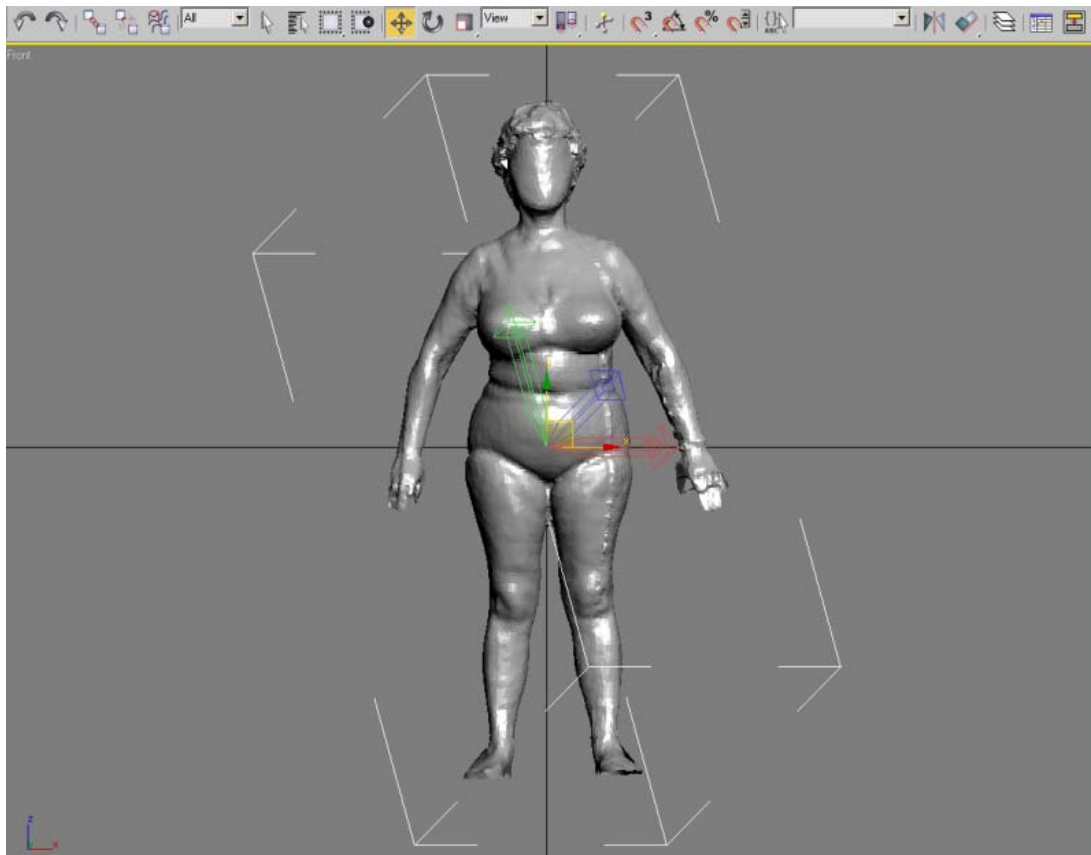
- Από το *LEFT VIEWPORT* με *ROTATE* το μοντέλο τοποθετείται σε κατακόρυφη θέση.
- Από το *TOP VIEWPORT* με *ROTATE* το μοντέλο περιστρέφεται έτσι ώστε να κοιτάει μπροστά.



Εικόνα 32: Το πολυγωνικό μοντέλο σωστά διευθετημένο στο χώρο

3. Στη συνέχεια ρυθμίζεται το σημείο περιστροφής (*PIVOT*) ως εξής:

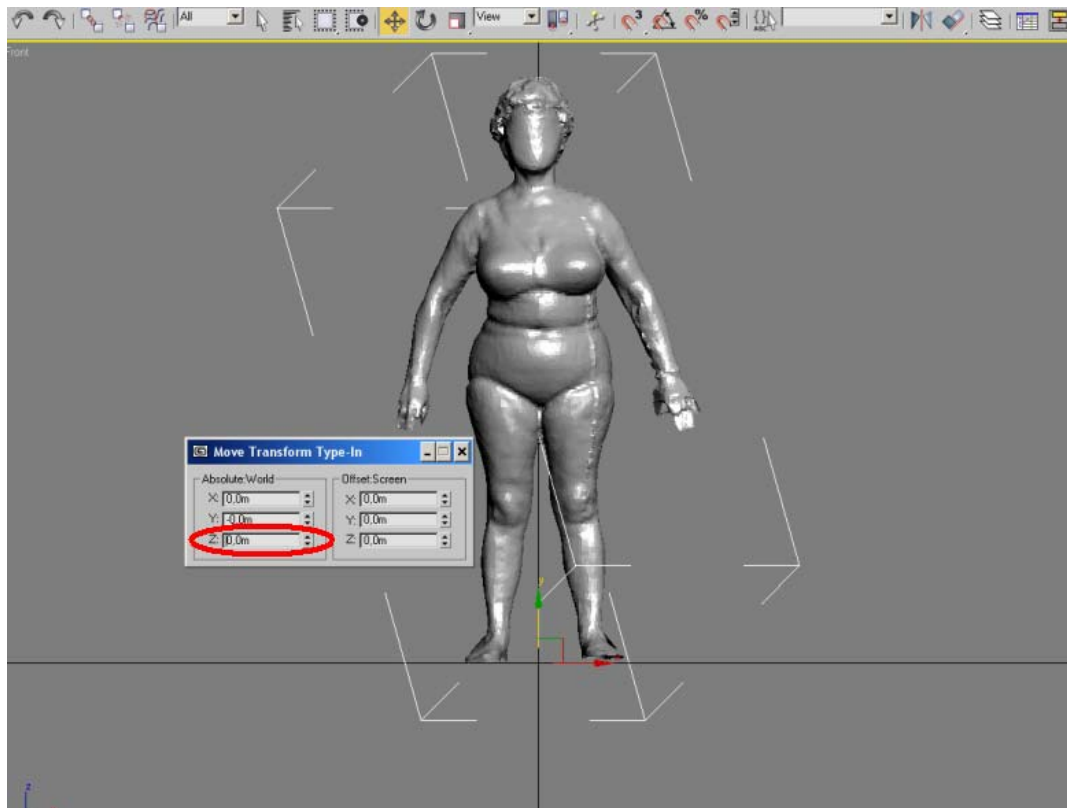
- Από την καρτέλα *HIERARCHY* επιλέγεται: *PIVOT* → *AFFECT PIVOT ONLY* → *ALIGN TO WORLD*.
- Από την όψη *FRONT* με *MOVE* στο *PIVOT* στον άξονα *Z*, το σημείο περιστροφής τοποθετείται στο επίπεδο που πατάνε τα πόδια .



Εικόνα 33: Ρύθμιση του σημείου περιστροφής (PIVOT)

4. Έπειτα μεταφέρεται το μοντέλο στο επίπεδο 0:

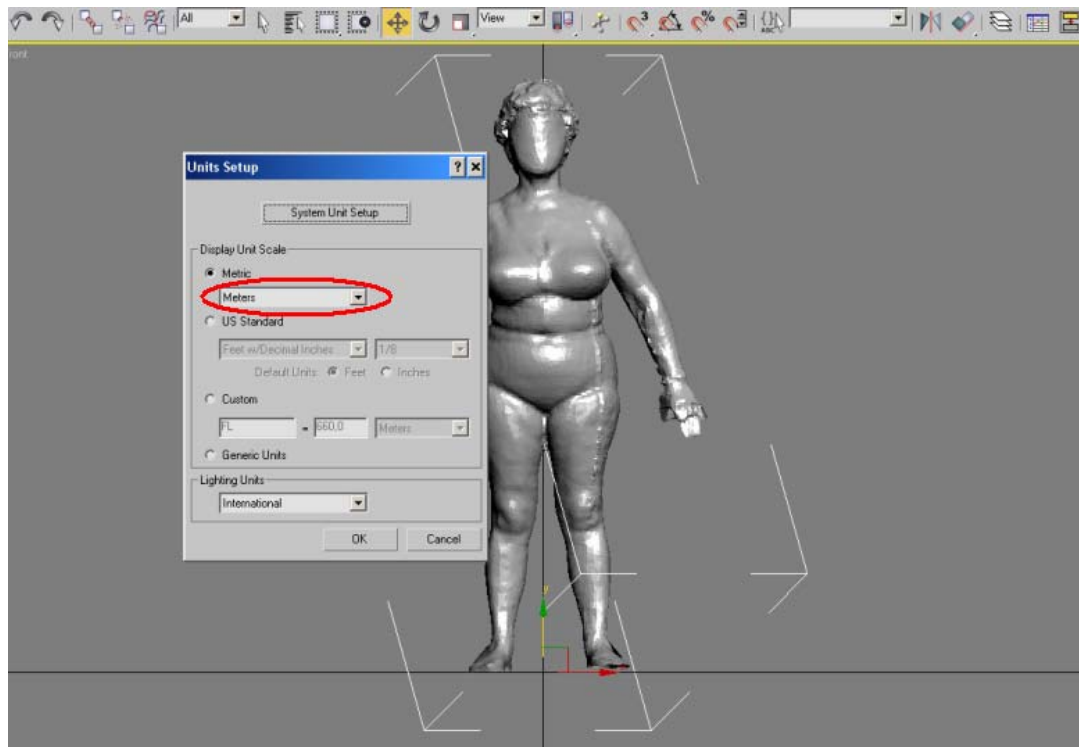
- Κάνοντας κλικ στο *SELECT AND MOVE* και με δεξί κλικ πάνω σε αυτό διορθώνεται στο *ABSOLUTE WORLD* το Z σε 0.0m.



Εικόνα 34: Μεταφορά του μοντέλου στο επίπεδο 0, Z (0.0m)

5. Μετατρέπονται οι μονάδες, οι οποίες πρέπει να είναι σε μέτρα:

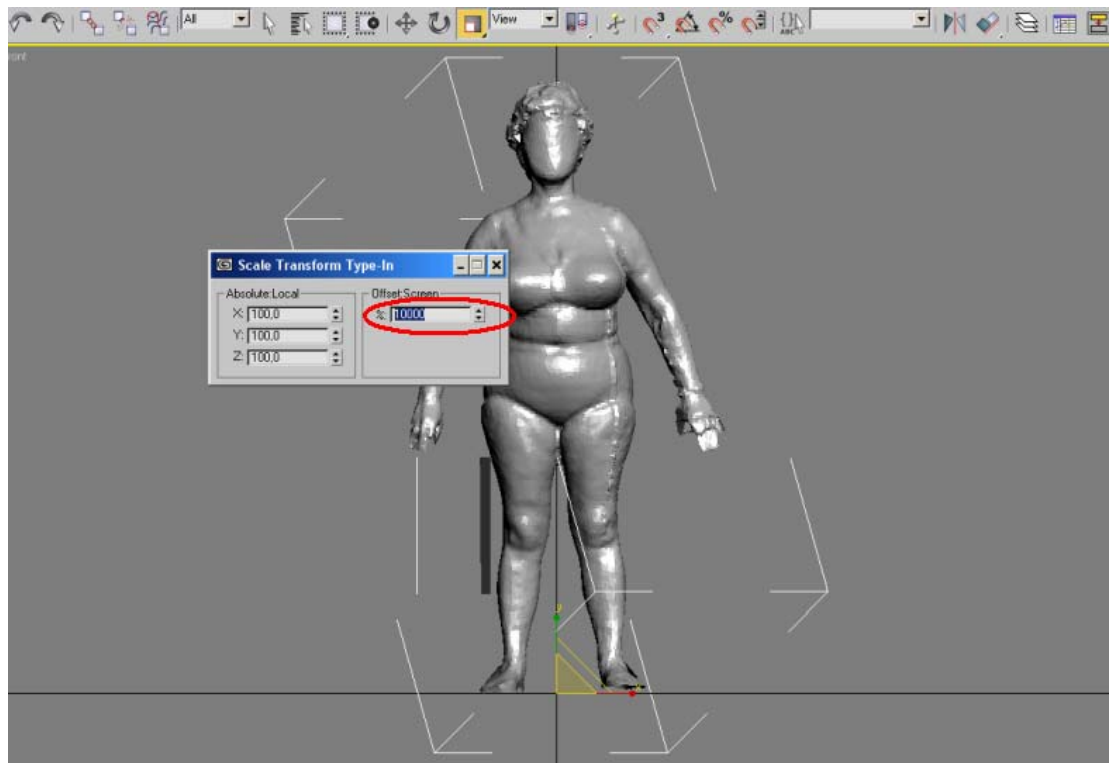
- *CUSTOMIZE* → *UNITS SETUP* → *METRIC* → *METERS*



Εικόνα 35: Μετατροπή των μονάδων σε μέτρα

6. Το μέγεθος του σκαναρισμένου μοντέλου είναι πολύ μικρό σε σχέση με το GENERIC MODEL, οπότε ρυθμίζεται ως εξής:

- Κάνοντας κλικ στο πλήκτρο *UNIFORM SCALE* και με δεξί κλικ πάνω σε αυτό, στο *OFFSET SCREEN* δίνεται η τιμή 10.000 %.



Εικόνα 36: Ρύθμιση του μεγέθους του σκαναρισμένου μοντέλου

Το επόμενο βήμα της διαδικασίας είναι η επιλογή 48 συγκεκριμένων σημείων πάνω στο κλειστό πολυγωνικό μοντέλο τα οποία χρησιμοποιούνται για την προσαρμογή του πολυγωνικού μοντέλου με το πρότυπο μοντέλο (GENERIC MODEL). Τα σημεία αυτά είναι ιδιάζουσας σημασίας διότι καθορίζουν και τις παραμέτρους μεγέθους του σώματος.

**Σημείωση:** Τα σημεία που θα έπρεπε να επιλεγθούν αρχικά ήταν 46, όμως παρατηρήθηκε ότι η μετέπειτα διαδικασία φαίνεται να δουλεύει καλύτερα στην περιοχή των χεριών με την επιλογή δυο επιπλέον σημείων. Έτσι θέτονται τα σημεία 47 και 48 στο μέσο της εσωτερικής πλευράς του αγκώνα αντίστοιχα. Αυτή η τροποποίηση θα πρέπει να γίνει και στο GENERIC MODEL.

Sizing parameter	Definition
Stature	Vertical distance between the crown of the head and the ground.
Crotch length	The vertical distance between the crotch level at center of body and the ground.
Arm length	The distance from the armscye shoulder line intersection (acromion) over the elbow to the far end of the prominent wrist bone (ulna) in line with small finger.
Neck girth	The girth of the neck-base
Chest/Bust girth	Maximum circumference of the trunk measured at bust /chest height
Underbust girth	Horizontal girth of the body immediately below the breasts.
Waist girth	Horizontal girth at waist height
Hip girth	Horizontal girth of the trunk measured at hip height

Στον παρακάτω Πίνακα διαφαίνονται που τοποθετούνται τα 48 σημεία πάνω στο σώμα.

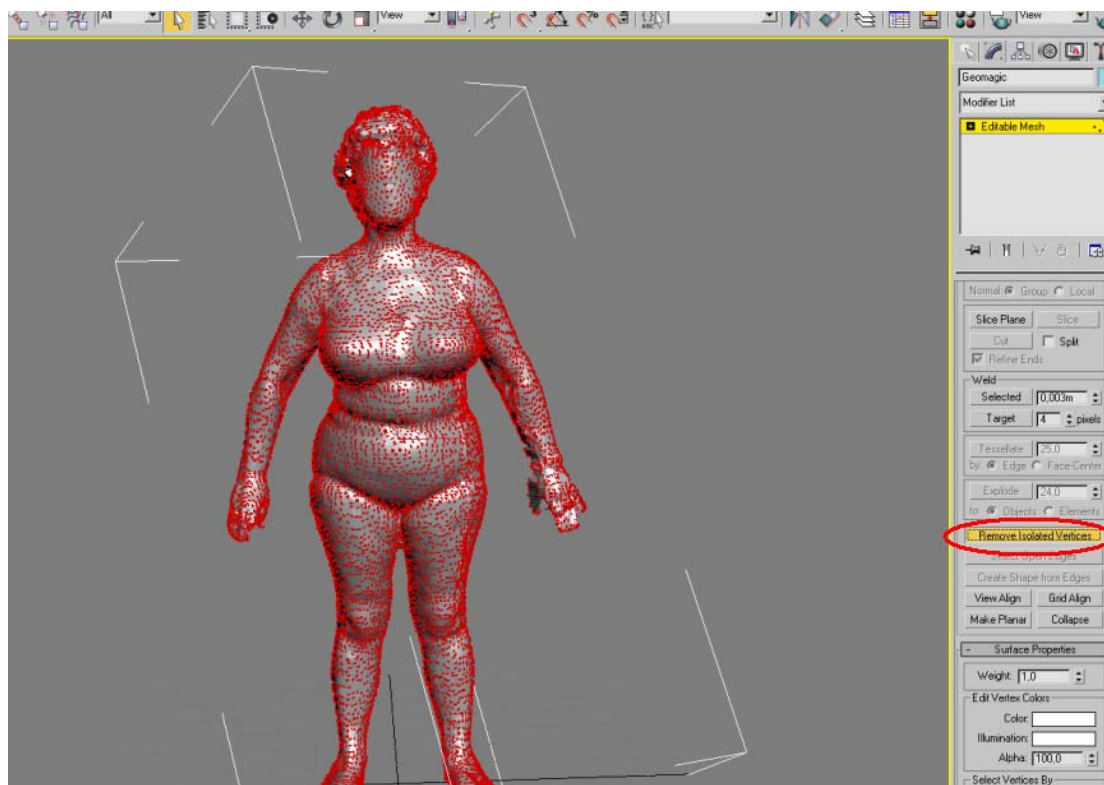
ΣΗΜΕΙΑ	ΘΕΣΗ ΣΤΟ ΣΩΜΑ
1,2	Καρπός Δεξιού Χεριού
3,4,47	Αγκώνας Δεξιού Χεριού
5,6,7	Ωμος Δεξιός (Τομή Δεξιού Χεριού – Σώματος)
9,34	Λαιμός
8,33	Κλείδα
12,13,36	Στήθος
14,37	Βάση Στήθους
15,38	Κοιλιά
17	Αφαλός
18,39	Γοφοί
20	Γεννητικά Όργανα
22,23,24	Δεξιό Γόνατο
25	Φτέρνα Δεξιού Ποδιού
40,41	Οπίσθιο Αριστερό
16	Μέση
11,35	Ωμοπλάτη
10	Σβέρκος
46	Κεφάλι



26,27	Καρπός Αριστερού Χεριού
28,29,48	Αγκώνας Αριστερού Χεριού
30,31,32	Ωμος Αριστερός (Τομή Αριστερού Χεριού – Σώματος)
42,43,44	Αριστερό Γόνατο
45	Φτέρνα Αριστερού Ποδιού
19,21	Οπίσθιο Δεξιό

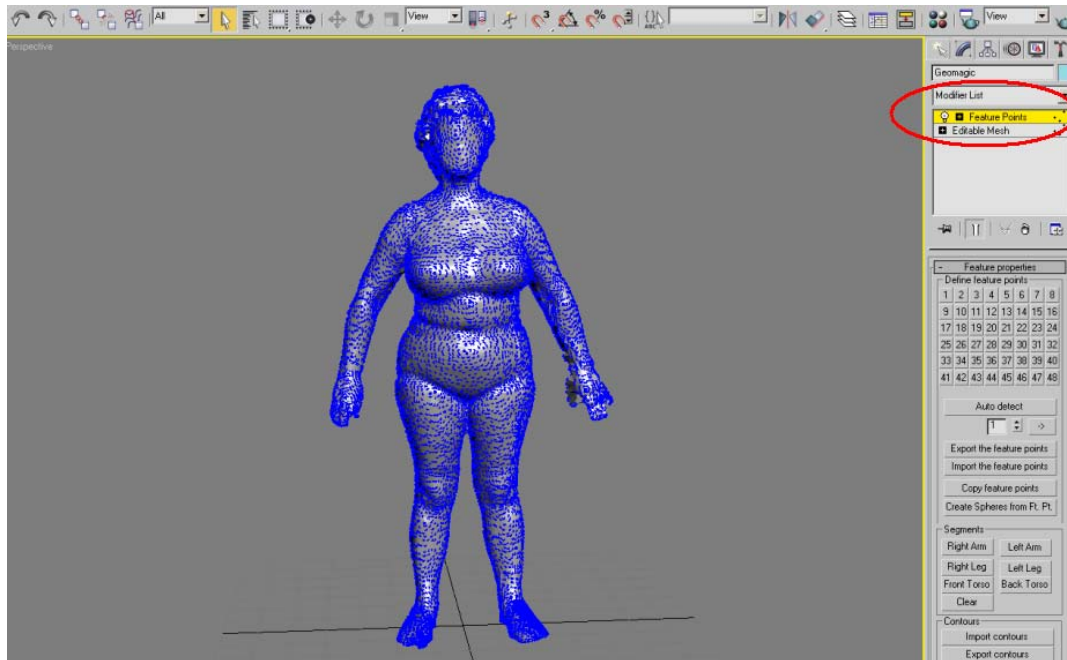
Πίνακας 5: 48 Χαρακτηριστικά σημεία

7. Επιλέγεται το μοντέλο. Από την καρτέλα *MODIFY* → *VERTEX*, πατώντας *CTRL+A* επιλέγονται όλα τα σημεία. Με *REMOVE ISOLATED VERTICES* πραγματοποιείται η απομάκρυνση όλων των απομονωμένων σημείων.

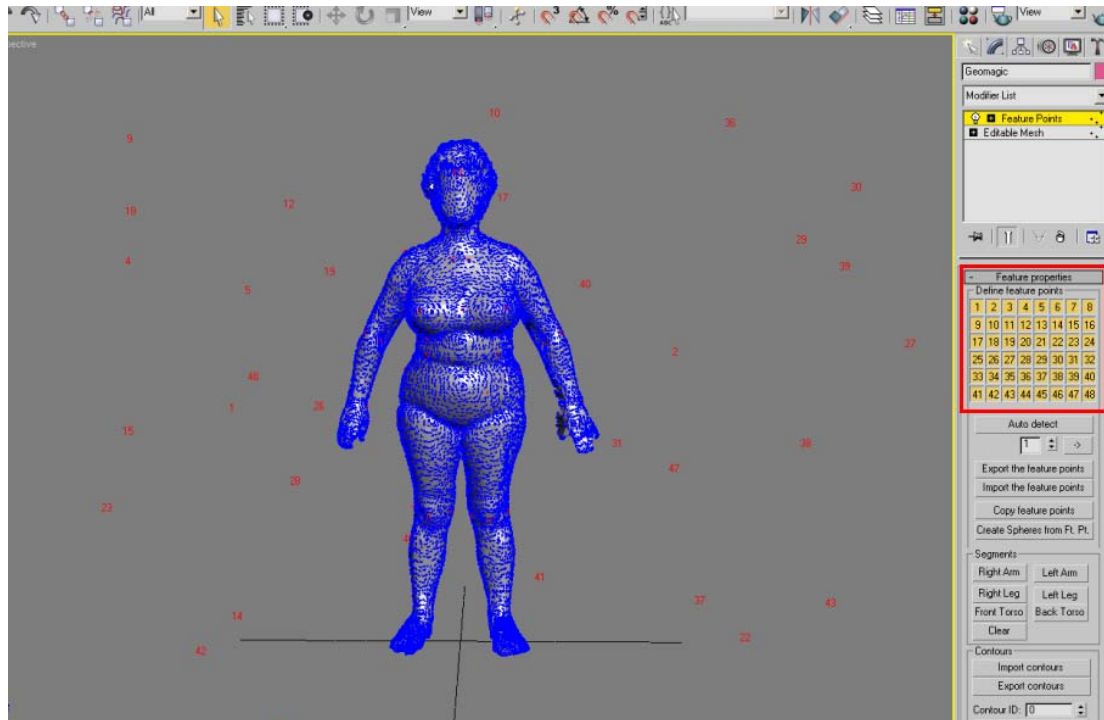


Εικόνα 37: Επιλογή όλων των σημείων του μοντέλου

8. Γίνεται προσθήκη του modifier *FEATURE POINTS*. Σε αυτό το σημείο λαμβάνει χώρα η επιλογή των 48 χαρακτηριστικών σημείων σε αντιστοιχία με τα σημεία του πρότυπου μοντέλου (GENERIC MODEL).



Εικόνα 38: Προσθήκη του modifier *FEATURE POINTS*



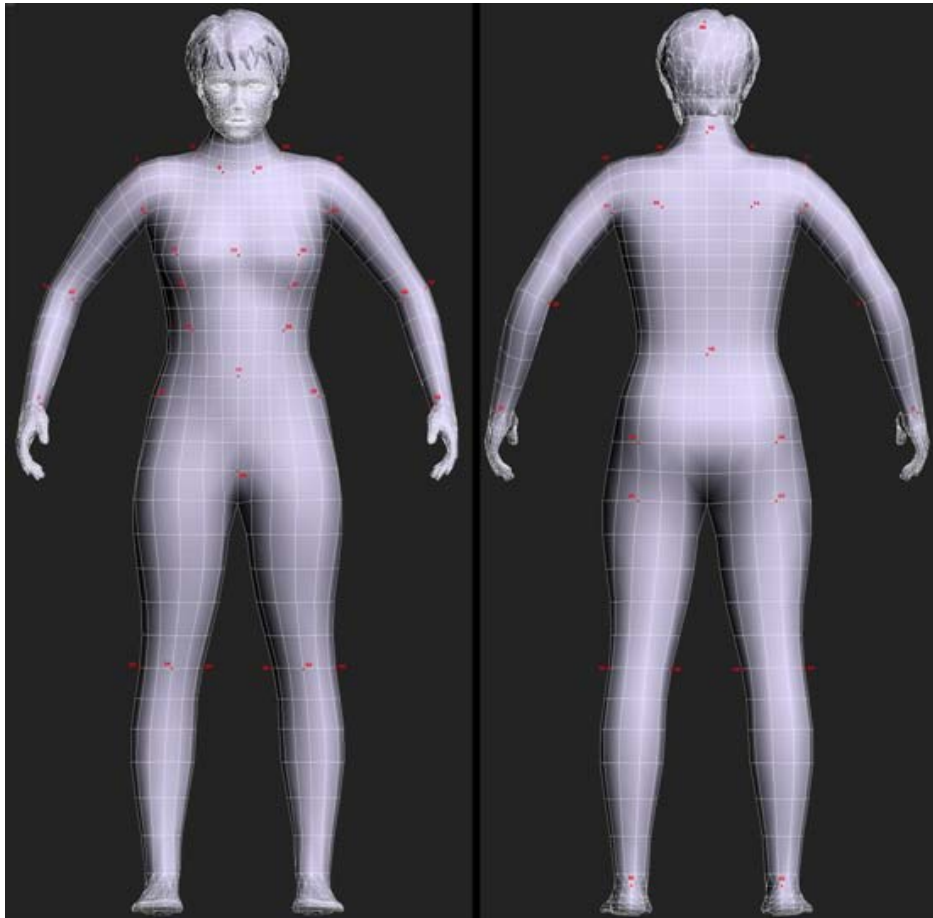
Εικόνα 39: Επιλογή των 48 σημείων

## 4.2 Προετοιμασία Πρότυπου Μοντέλου (GENERIC MODEL)

1. Εισάγεται το αρχείο του GENERIC MODEL.
2. Μετατρέπονται οι μονάδες σε μέτρα.
3. Από την καρτέλα *MODIFY* διαγράφονται οι modifiers *OFFSET DEFORMER* και *QUAD/TRI REARRANGE*. Θα προστεθούν εκ νέου μετέπειτα.
4. Τα χαρακτηριστικά σημεία του GENERIC MODEL χρειάζονται μερικές μετατροπές:
  - Το σημείο 13 δεν έχει αντιδιαμετρικό. Μεταφέρεται στο κέντρο.
  - Η θέση του σημείου 31 είναι λανθασμένη. Τοποθετείται ένα *VERTEX* αριστερά, σε αντιστοιχία με το αντιδιαμετρικό του (ΣΗΜΕΙΟ 6).

- Προσθέτονται δυο σημεία, τα σημεία 47 και 48, στο μέσο της εσωτερικής πλευράς των δυο αγκώνων. Η αντιστοιχία πρέπει να είναι συνεπής σε σχέση με τα σημεία που επιλέξαμε στο σκαναρισμένο μοντέλο.

5. Στον modifier *FEATURE POINTS* γίνεται εξαγωγή αρχείου, *export feature points* και στη συνέχεια αποθηκεύεται (π.χ. POINTS.TXT).



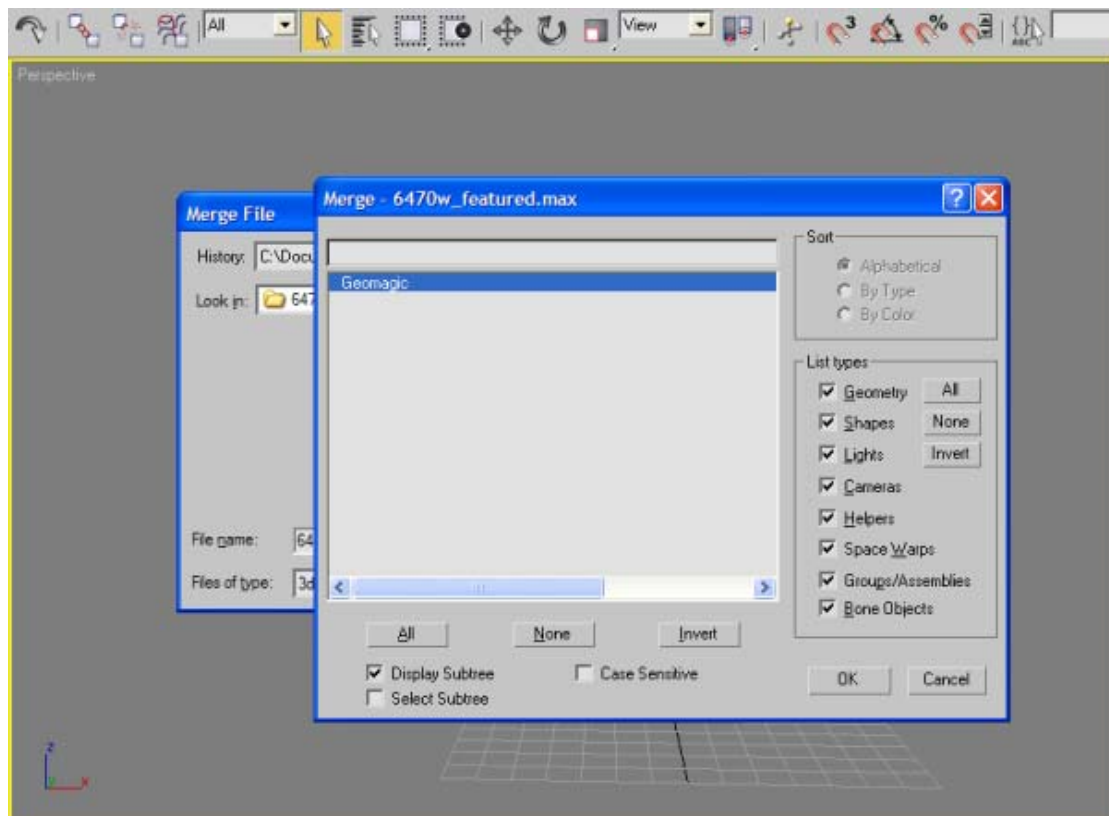
Εικόνα 40: Τελικά χαρακτηριστικά σημεία του πρότυπου μοντέλου (FRONT και BACK όψη)

### 4.3 Διαδικασία Προσαρμογής

Σε αυτό το σημείο πραγματοποιείται η προσαρμογή του πολυγωνικού μοντέλου στο πρότυπο μοντέλο. Το πρότυπο μοντέλο αποτελείται από μια προσέγγιση του ανθρώπινου σκελετού η οποία χρησιμοποιεί 33 αρθρώσεις που προσομοιώνουν

ικανοποιητικά την κινηματική του ανθρώπου και την επιφάνεια του δέρματος του ανθρώπου που ορίζεται από τετραγωνικά μπαλώματα.

1. Εισάγεται στο αρχείο του GENERIC MODEL το σκαναρισμένο μοντέλο: *FILE*→*MERGE* (κάνοντας *FILE*→*OPEN* στο GENERIC MODEL, από την καρτέλα που εμφανίζεται πρέπει να επιλεγθούν τα *GENERIC MESH* και *HUMANOID ROOT*.)

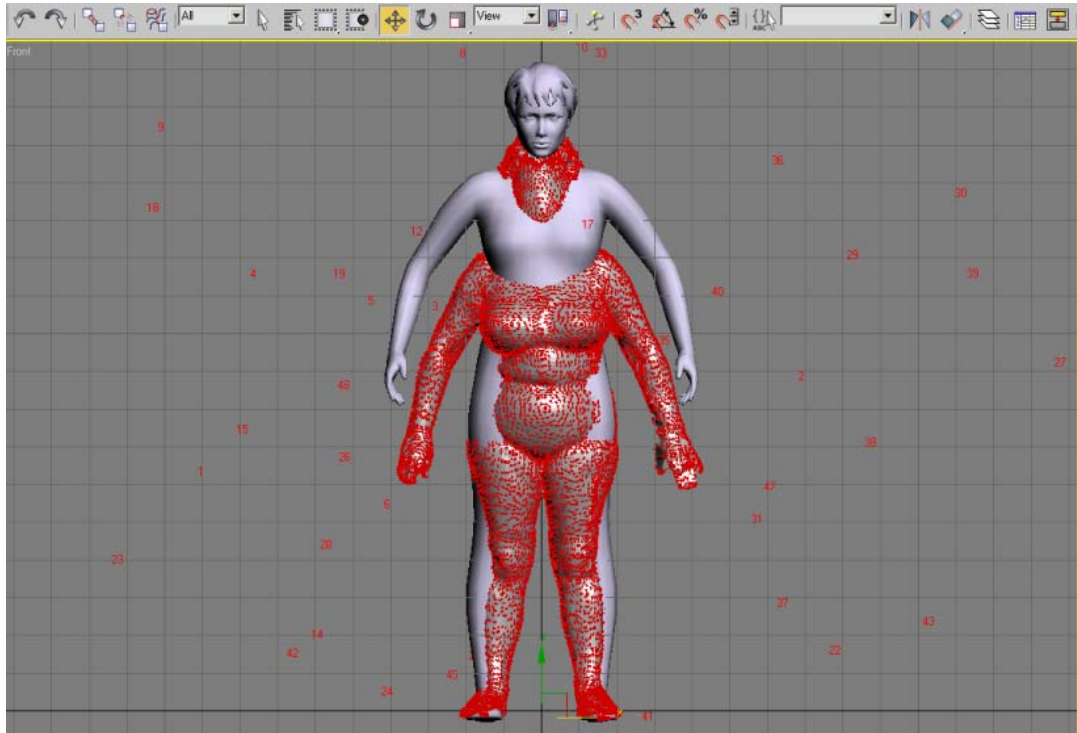


Εικόνα 41: Εισαγωγή του σκαναρισμένου μοντέλου στο πρότυπο μοντέλο (GENERIC MODEL)

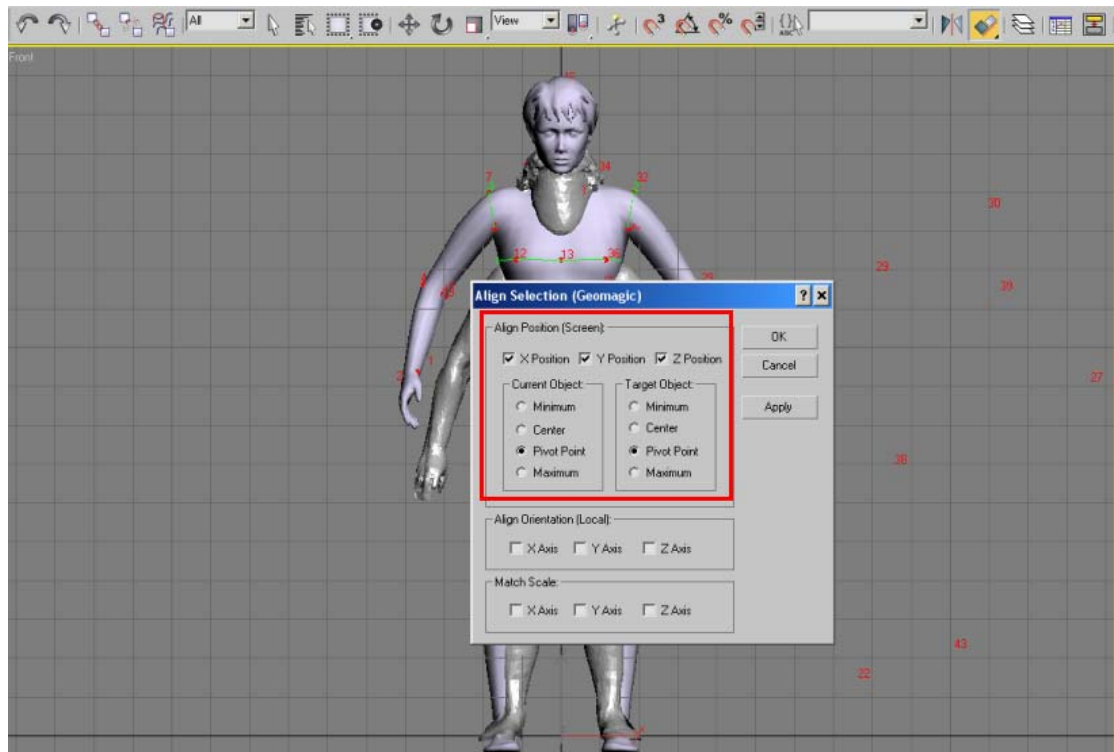
2. Στη συνέχεια πρέπει να ευθυγραμμισθούν τα δυο μοντέλα, αυτό γίνεται ως εξής:

- Επιλέγοντας το σκαναρισμένο μοντέλο, χρησιμοποιώντας το *ALIGN TOOL* (*TOOLS*→*ALIGN*) και δείχνοντας ταυτόχρονα το GENERIC MODEL. Στην καρτέλα που εμφανίζεται κάνοντας κλικ στα X, Y, Z και PIVOT POINT, τα *ALIGN ORIENTATION* και *MATCH SCALE* παραμένουν κενά.

- Τα πόδια πρέπει να βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο. Αν δεν βρίσκονται, μετακινούνται με *SELECT AND MOVE*.



Εικόνα 42: Το πρότυπο και το σκαναρισμένο μοντέλο σε FRONT όψη



Εικόνα 43: Ευθυγράμμιση των δύο μοντέλων

Έπειτα χρησιμοποιώντας την επιλογή **Fit Skeleton** προσαρμόζεται το πρότυπο μοντέλο στο πολυγωνικό πλέγμα. Παρατηρείται ότι οι αρθρώσεις του προτύπου μοντέλου μετακινούνται ώστε να προσαρμοστούν με τα δεδομένα του πολυγωνικού μοντέλου. Πολλές φορές η προσαρμογή των δύο μοντέλων δεν είναι απολύτως ακριβής, σε αυτήν την περίπτωση είναι απαραίτητο να γίνει χειροκίνητη προσαρμογή ορισμένων κοκάλων κυρίως στα άκρα, στο λαιμό αλλά και στη μέση.

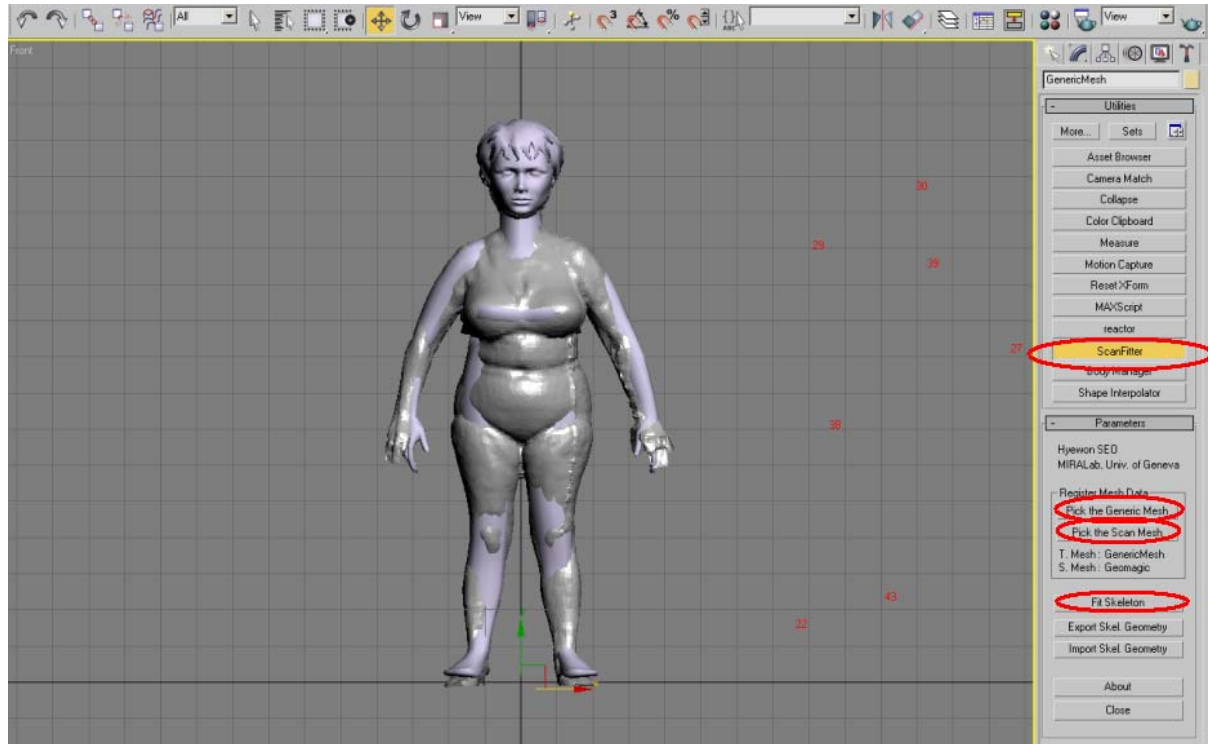
### 3. Από την καρτέλα *UTILITIES* επιλέγεται η εφαρμογή *SCANFITTER*.

- Από το panel επιλέγεται το *GENERIC MESH*, το *SCAN MESH* και στη συνέχεια εφαρμόζεται το *FIT SKELETON*.

Αν η μορφή που προκύπτει είναι τελείως αλλόκοτη, το πιθανότερο είναι ότι έχει γίνει λάθος στην επιλογή των *FEATURE POINTS* του σκαναρισμένου μοντέλου. Ελέγχεται αν τα άκρα και ο λαιμός βρίσκονται στη σωστή θέση (πολλές φορές δεν βρίσκονται). Η διόρθωση πραγματοποιείται κάνοντας *UNHIDE ALL* και

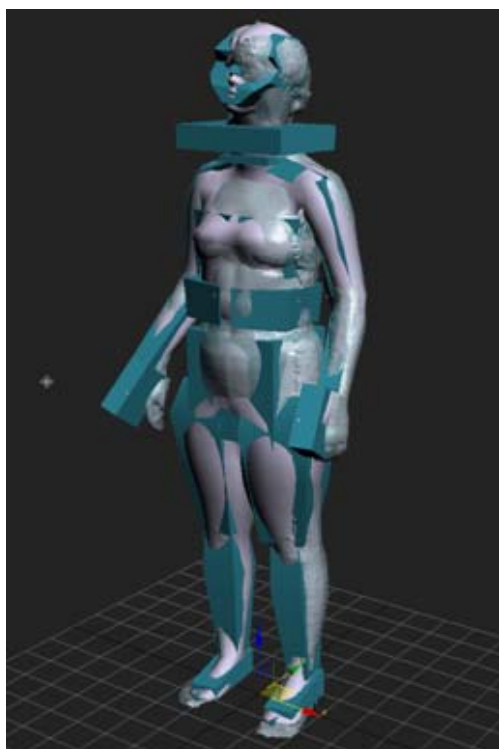


μετακινώντας τα αντίστοιχα BONES στη σωστή θέση με *MOVE*, *ROTATE* και *SCALE*. Ακόμη ελέγχεται το VL3 BONE. Πολλές φορές το μέγεθος του προκύπτει λάθος και χρειάζεται ανάλογη διόρθωση (στο MALE GENERIC MODEL βγαίνει πάντα τελείως λάθος).



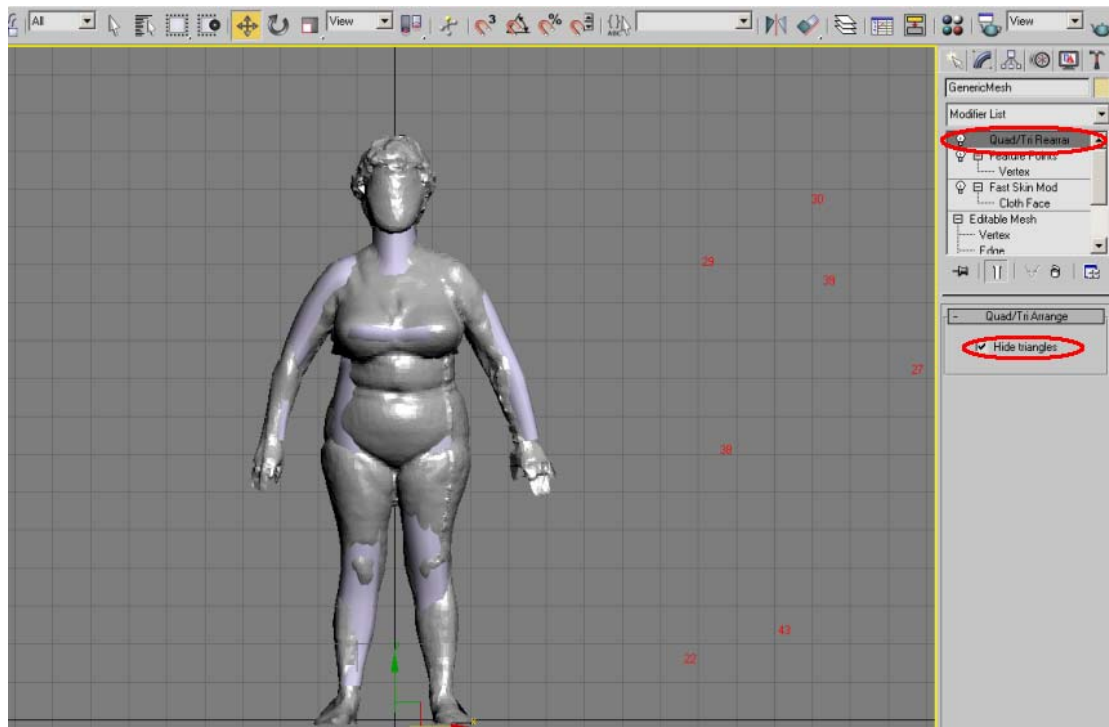
Εικόνα 44: Διαδικασία προσαρμογής πρότυπου μοντέλου στο πολυγωνικό πλέγμα (Fit Skeleton)





Εικόνα 45: Προβληματική προσαρμογή μοντέλου (λαιμός, χέρια)

4. Σε αυτό το βήμα αρχικά επιλέγεται το *GENERIC MODEL* και στη συνέχεια γίνεται προσθήκη του modifier *QUAD/TRI REARRANGE*. Οι παλάμες, οι πατούσες και το κεφάλι δεν πρέπει να συμμετέχουν στην μετατροπή, συνεπώς επιλέγεται το *HIDE TRIANGLES*.

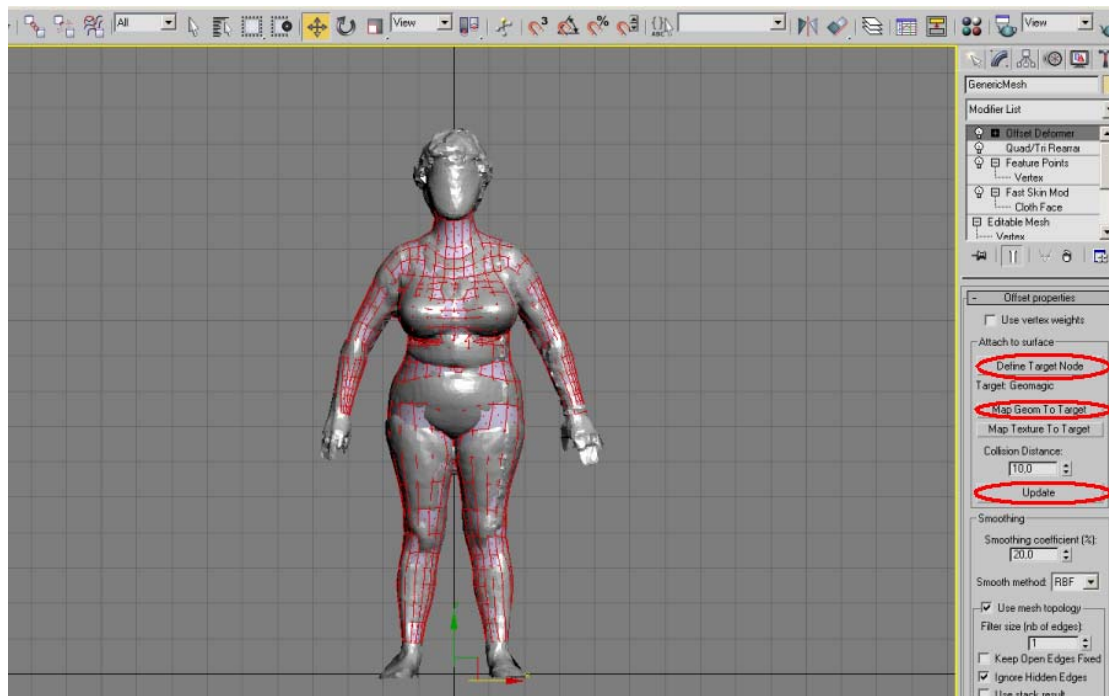


Εικόνα 46: Εξαίρεση του κεφαλιού και των άκρων από τη διαδικασία

Μετά την αρχική προσαρμογή των δυο μοντέλων ακολουθεί η αντιστοίχιση του πλέγματος του προτύπου μοντέλου στο σκαναρισμένο πολυγωνικό μοντέλο. Ουσιαστικά κάθε κορυφή του πλέγματος του προτύπου μοντέλου προβάλλεται στην πλησιέστερη κορυφή, ακμή ή τρίγωνο του σκαναρισμένου μοντέλου.

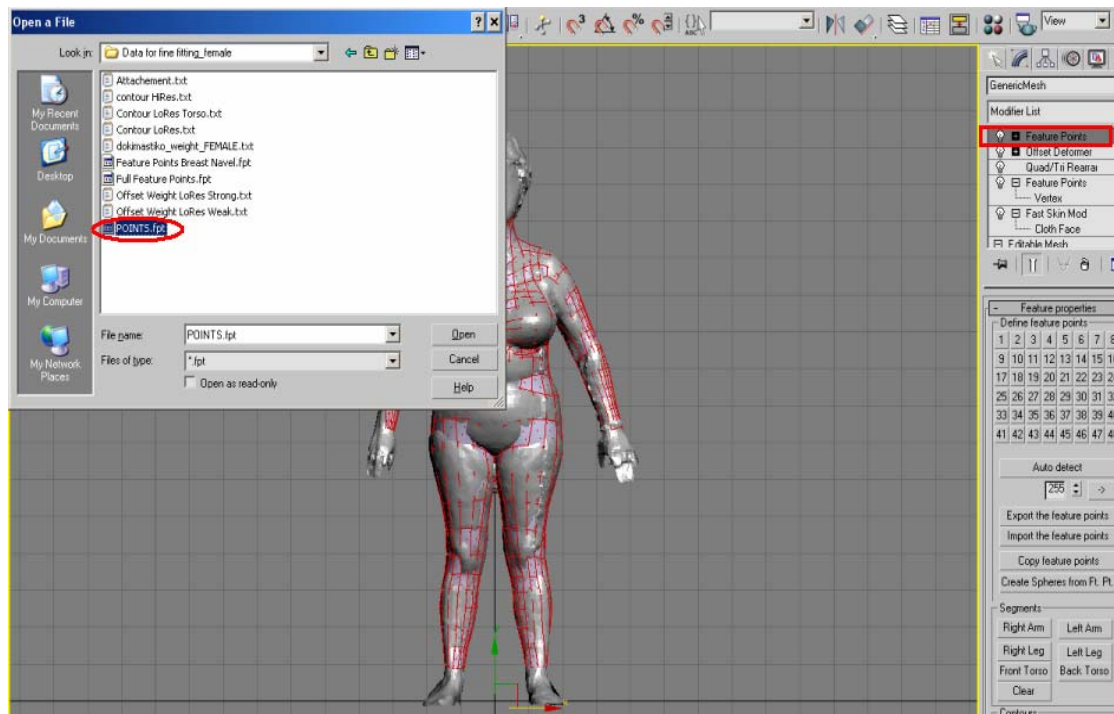
5. Η αντιστοίχιση του πλέγματος του GENERIC MODEL στο σκαναρισμένο μοντέλο πραγματοποιείται ως εξής:

- Αρχικά προστίθεται ο modifier *OFFSET DEFORMER*.
- Στη συνέχεια χρησιμοποιείται το *DEFINE TARGET NODE* και επιλέγεται το σκαναρισμένο μοντέλο. Αν ζητηθεί επαναπροσδιορίζεται ο *DEFORMER* ( Με *RESET DEFORMER*).
- Έπειτα επιλέγεται το *MAP GEOM TO TARGET* και τέλος γίνεται *UPDATE*.

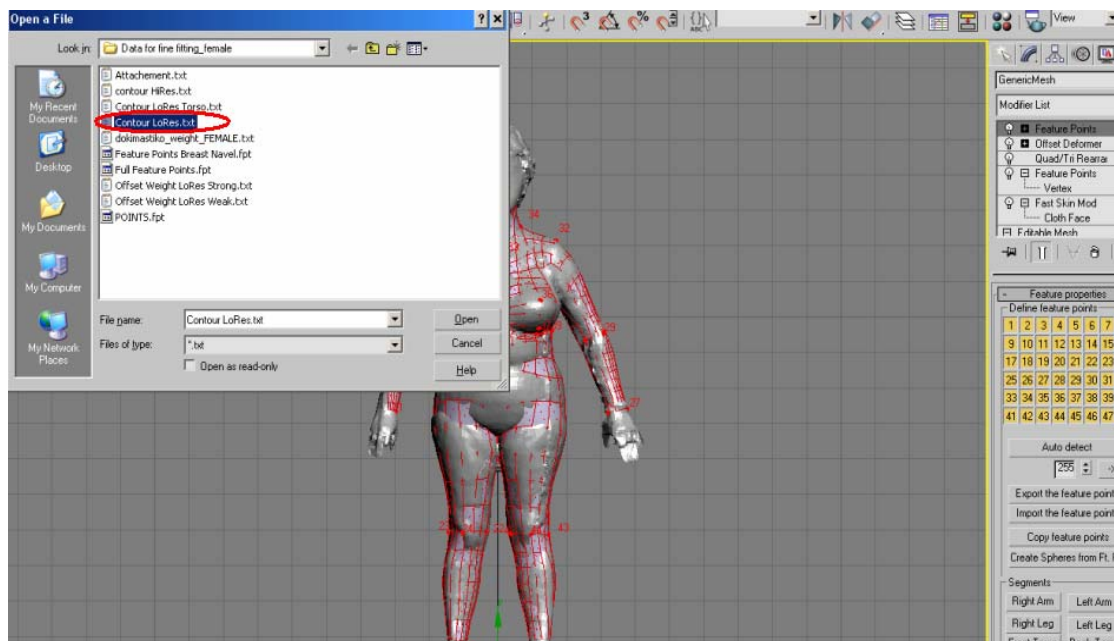


Εικόνα 47: Αρχική προσαρμογή του πλέγματος του GENERIC MODEL στο σκαναρισμένο πολυγωνικό μοντέλο (Με F4 διαφαίνεται το πολυγωνικό πλέγμα)

6. Προστίθεται ακόμα ένας modifier *FEATURE POINTS*. Με την επιλογή *import feature points* εισάγεται το αρχείο POINTS.fpt που είχε σωθεί παραπάνω, εισάγονται δηλαδή τα σημεία του πρότυπου πολυγωνικού μοντέλου. Τέλος με τον ίδιο τρόπο επιλέγεται το *import contours* και εισάγεται το αρχείο *Contour LowRes.txt*, πιο συγκεκριμένα εισάγεται το αρχείο των διαδοχικών περιγραμμάτων κατά μήκος του σώματος, δηλαδή ισοϋψών καμπύλων.



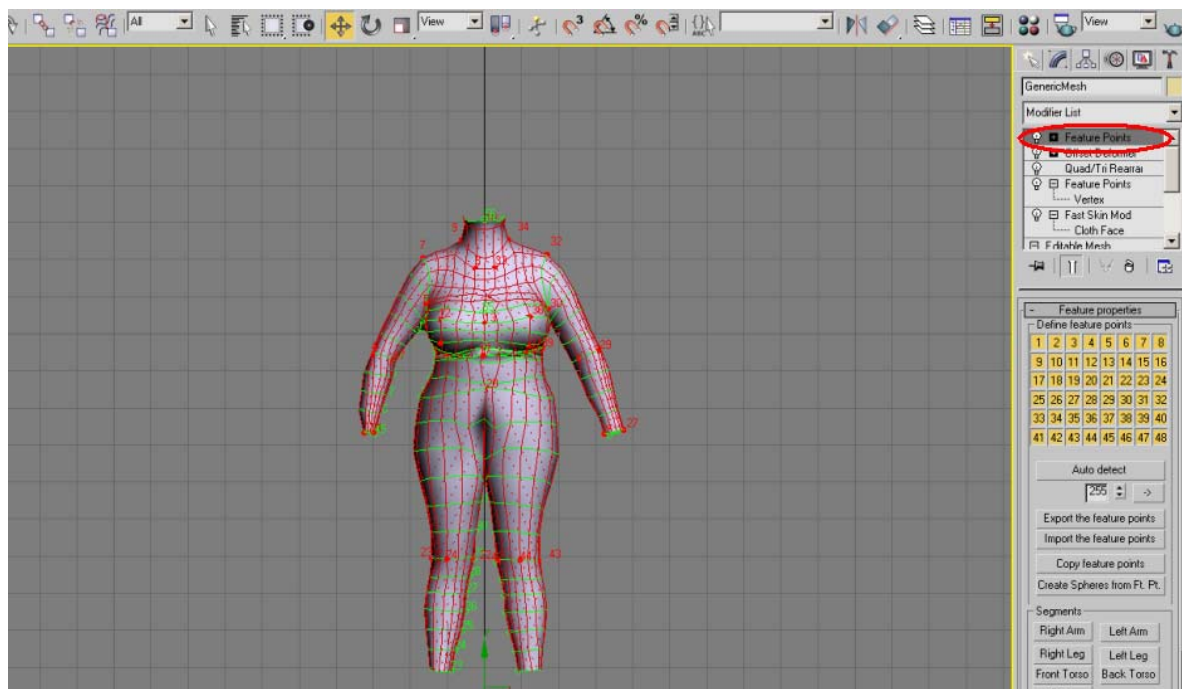
Εικόνα 48: Εισαγωγή του αρχείου POINTS.fpt



Εικόνα 49: Εισαγωγή του αρχείου Contour LowRes.txt

Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας την επιλογή **Relaxation** μειώνεται η συνάρτηση ενέργειας του πλέγματος με αποτέλεσμα τη μείωση της παραμόρφωσης του πλέγματος και τη καλύτερη προσαρμογή του πλέγματος του πρότυπου μοντέλου στο πολυγωνικό.

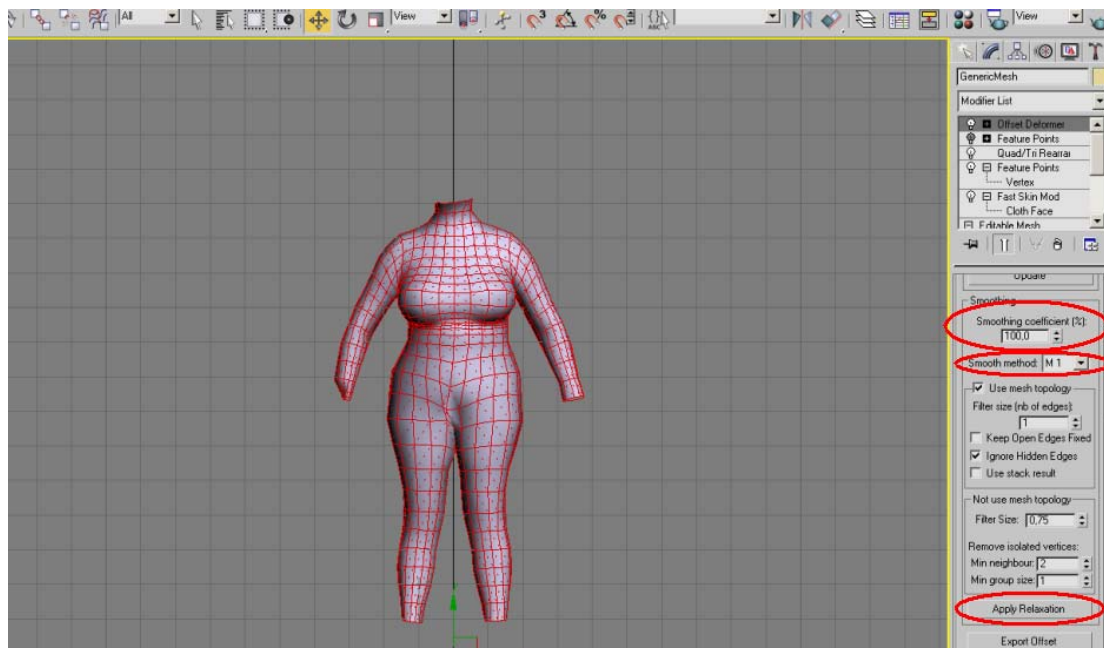
7. Ο **FEATURE POINTS** modifier μεταφέρεται κάτω από τον **OFFSET DEFORMER** και απενεργοποιείται (αυτό γίνεται για να μην συμπεριληφθεί ο modifier στη διαδικασία και δημιουργήσει πρόβλημα στην εφαρμογή του 3D Studio Max).



Εικόνα 50: Το πολυγωνικό μοντέλο μετά την εισαγωγή των δύο αρχείων (Points και Contours LowRes)

Έπειτα στον **OFFSET DEFORMER** αυξάνεται το **SMOOTHING COEFFICIENT** κατά 100%, επιλέγεται σαν **SMOOTHING METHOD** το **M1** και εφαρμόζεται η χαλάρωση **Apply Relaxation**.

Με αυτό το βήμα το πλέγμα που προκύπτει προσαρμόζεται καλύτερα στα δεδομένα του πολυγωνικού μοντέλου, όμως παρατηρείται ότι το πλέγμα δεν είναι παντού ομοιόμορφο. Για να βελτιωθεί η ομοιομορφία του πλέγματος χρησιμοποιούνται τα επιπλέον σημεία και οι ισοϋψείς καμπύλες που ορίζονται από τα σημεία. Επαναλαμβάνεται η διαδικασία **Relaxation** (3 ή 4 φορές).



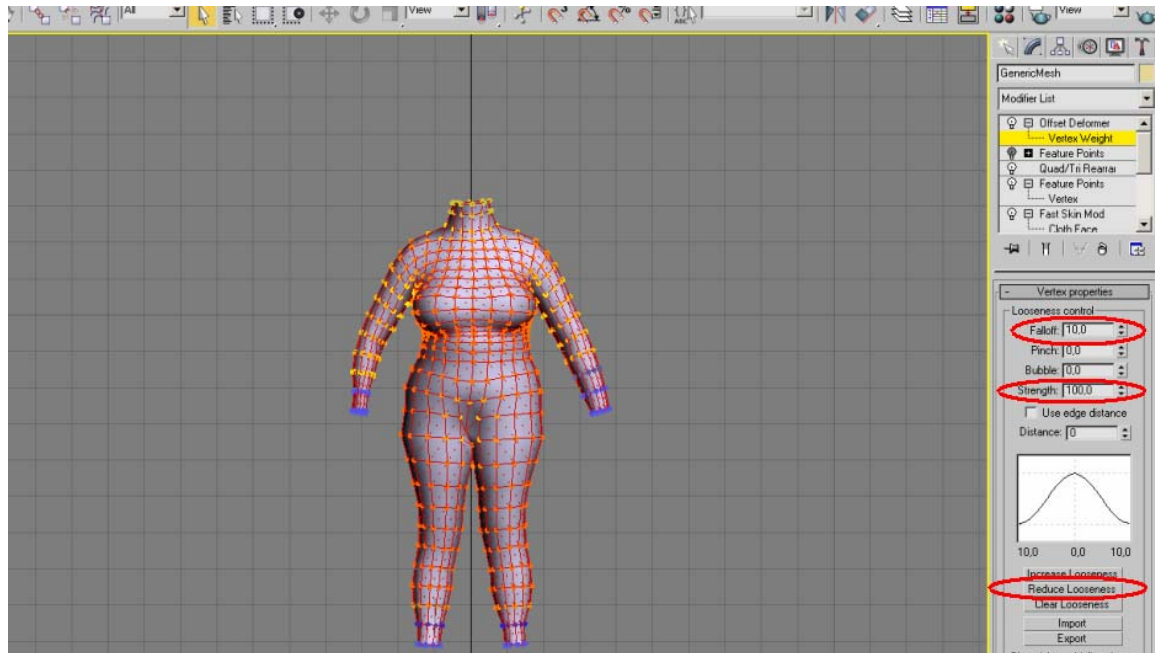
Εικόνα 51: Το πολυγωνικό μοντέλο μετά την πρώτη χαλάρωση (Smooth Method: M1)

Μπορεί να βελτιωθεί επιπλέον η προσαρμογή του πλέγματος καθορίζοντας το βάρος της κάθε κορυφής του, δηλαδή το βαθμό στον οποίο η κάθε κορυφή επηρεάζει τα γειτονικά μπαλώματα. Μετατρέποντας το βάρος των σημείων μπορούμε να προσεγγίσουμε καλύτερα περιοχές όπως ο λαιμός, οι μασχάλες και τα άκρα.

8. Η βελτίωση της προσαρμογής του πλέγματος γίνεται ως εξής: εφαρμόζεται το *USE VERTEX WEIGHTS* και η υποεπιλογή του *VERTEX WEIGHT*. Επιλέγεται *IMPORT* και από το φάκελο *DATA FOR FINE FITTING* εισάγεται το αρχείο *Offset Weight LoRes Strong.txt* ή *Offset Weight LoRes Weak.txt*. Με αυτό τον τρόπο βελτιώνεται η επιφάνεια του σώματος στα σημεία όπου παρατηρείται συνήθως περισσότερος θόρυβος. Ακόμα οι καρποί, τα πόδια, ο λαιμός και οι αγκώνες χρειάζονται παραπάνω διόρθωση:

- Με strength 100 και falloff 10 εφαρμόζεται μείωση της χαλάρωσης - reduce looseness στους καρπούς και τα πόδια.

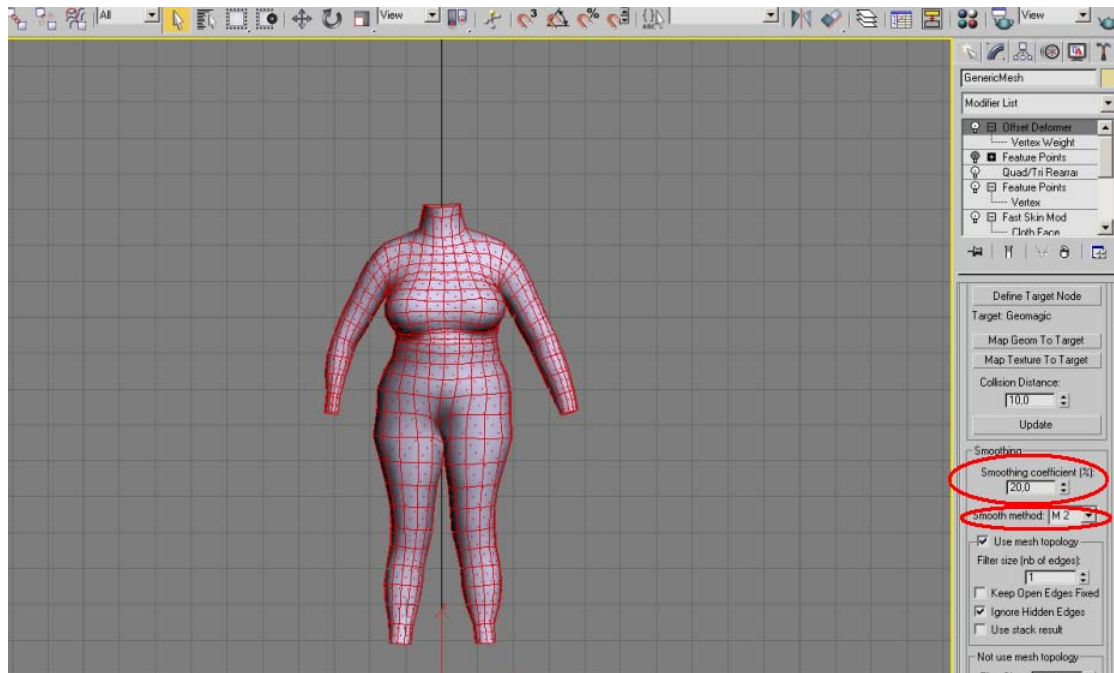
- Με strength 100 και falloff 4 εφαρμόζεται reduce looseness στο λαιμό.
- Με strength 10 και falloff 40 εφαρμόζεται reduce looseness στους αγκώνες.



Εικόνα 52: Το πολυγωνικό μοντέλο με τα βάρη των σημείων, μετά από τις διορθώσεις (μείωση χαλαρότητας – μπλε χρώμα)

9. Σε αυτό το βήμα πραγματοποιείται και η δεύτερη χαλάρωση. Στον *OFFSET DEFORMER* μειώνεται το *SMOOTHING COEFFICIENT* κατά 20%, επιλέγεται σαν *SMOOTHING METHOD* το *M2* και εφαρμόζεται η δεύτερη χαλάρωση *Apply Relaxation*. Εφαρμόζεται και εδώ το **Relaxation** 4 ή 5 φορές.

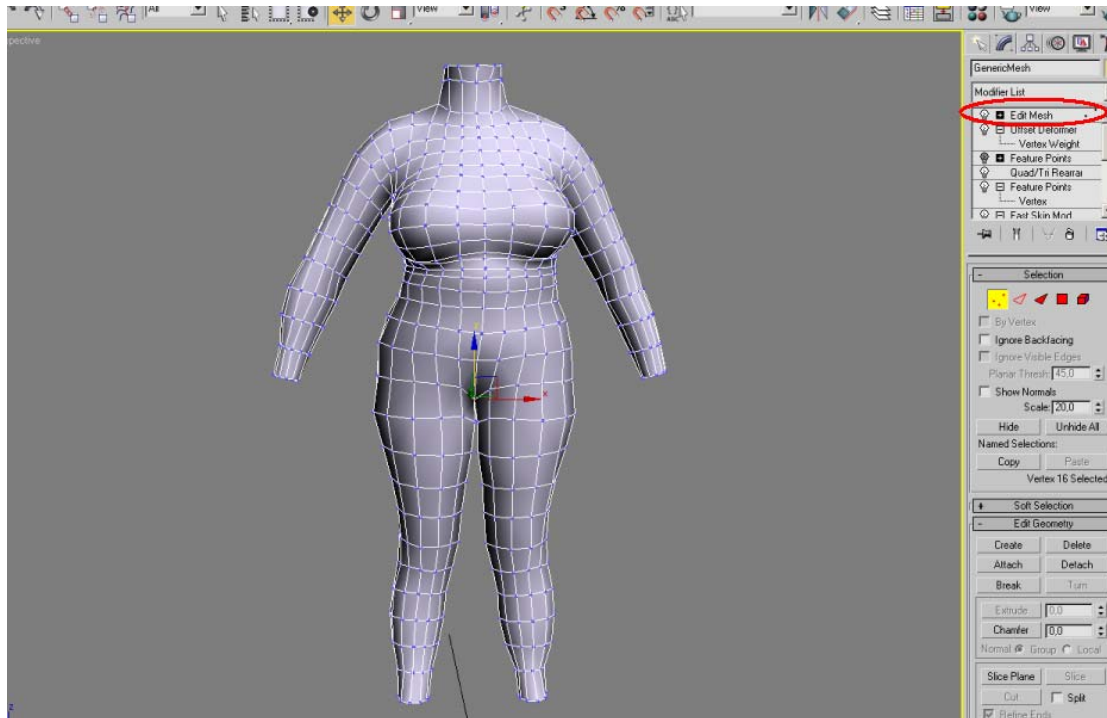




Εικόνα 53: Το πολυγωνικό μοντέλο μετά τη δεύτερη χαλάρωση (Smooth Method: M2)

Συχνά είναι δυνατό να εμφανιστούν λάθη στην αναπαράσταση του μοντέλου που οφείλονται στην λανθασμένη προβολή των σημείων του προτύπου πλέγματος στο πολυγωνικό μοντέλο. Τα λάθη αυτά μπορούν να διορθωθούν χειροκίνητα χρησιμοποιώντας την επιλογή **Edit Mesh**.



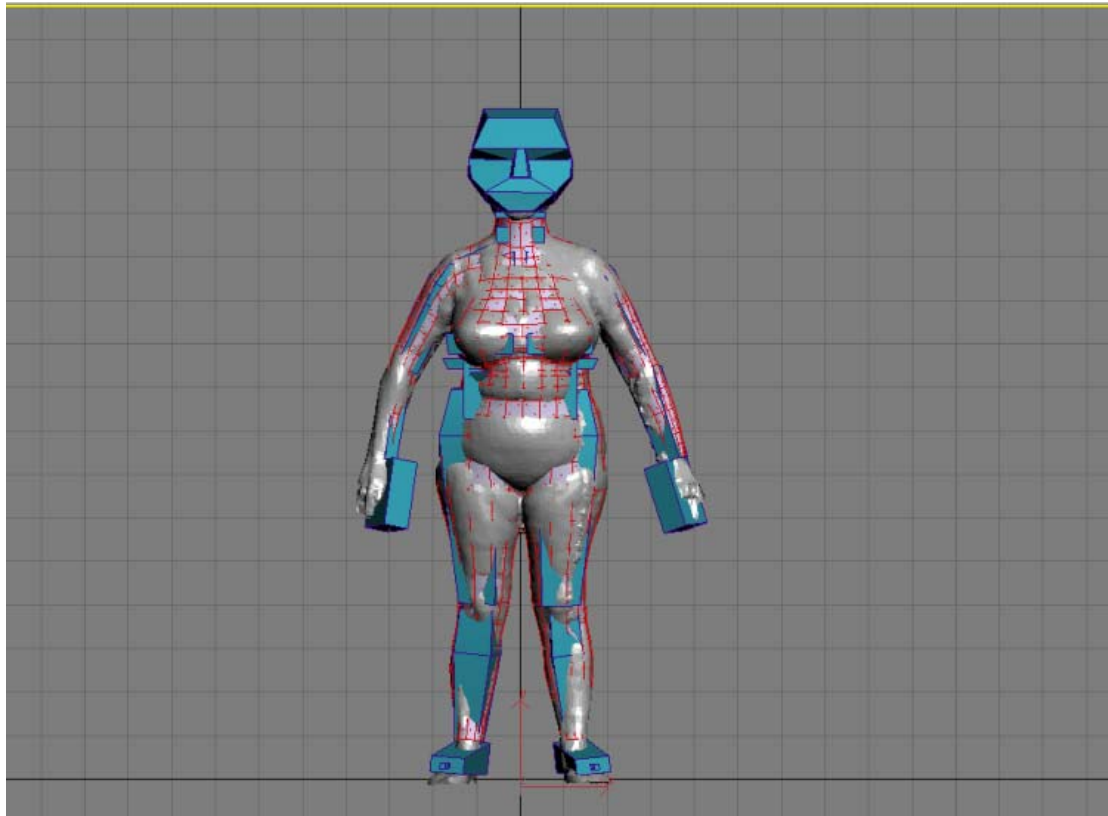


Εικόνα 54: Χειροκίνητη διόρθωση της αναπαράστασης με την επιλογή Edit Mesh

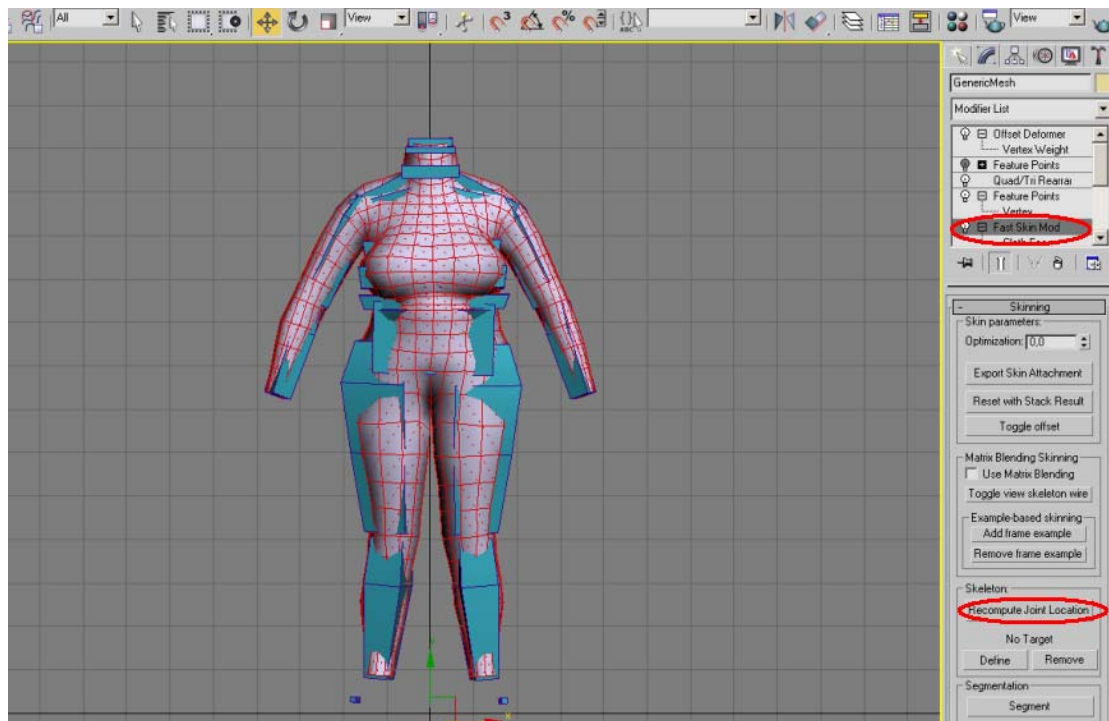
Το επόμενο βήμα είναι ο επαναπροσδιορισμός της θέσης και του μεγέθους των αρθρώσεων του μοντέλου ώστε να μπορεί να ανταποκρίνεται και κινηματικά. Ο επαναπροσδιορισμός γίνεται με την χρήση της επιλογής **Recompute Joint Location**.

**10.** Με δεξί κλικ μέσα στο *VIEWPORT* όπου γίνεται η επεξεργασία, εφαρμόζεται το *UNHIDE ALL* και εμφανίζεται ο σκελετός. Το σκαναρισμένο μοντέλο είναι καλό να μην φαίνεται. Έπειτα στον *FAST SKIN* modifier γίνεται ο επαναπροσδιορισμός της θέσης και του μεγέθους των αρθρώσεων του πρότυπου μοντέλου με *RECOMPUTE JOINT LOCATION*.

**Σημείωση:** Για να αποφευχθούν ακούσιες μετατροπές στο κεφάλι, τις παλάμες ή τις πατούσες, επιλέγονται τα αντίστοιχα bones και εξαιρούνται (δεξί κλικ και *HIDE*) πριν εφαρμοστεί το *RECOMPUTE JOINT LOCATION*.



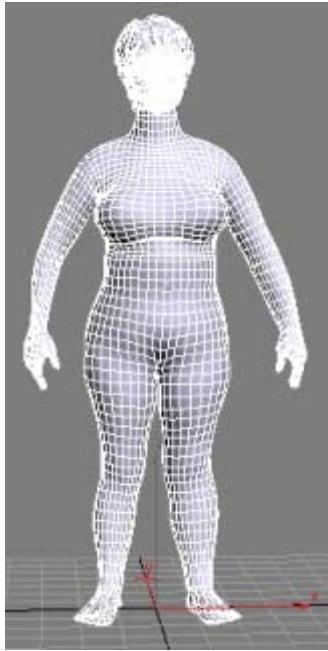
Εικόνα 55: Εμφάνιση του σκελετού



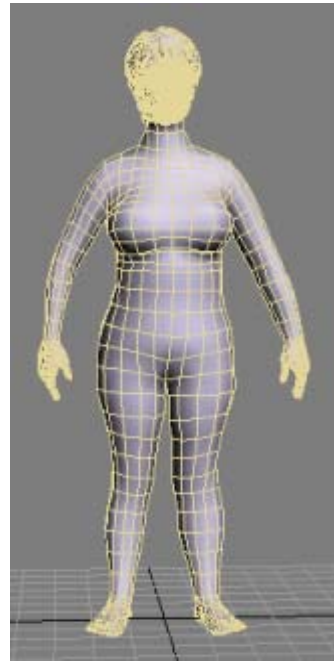
Εικόνα 56: Το πολυγωνικό μοντέλο μετά τον επαναπροσδιορισμό της θέσης και του μεγέθους των αρθρώσεων (Recompute Joint Location)

**11.** Αυξάνεται η πυκνότητα του πλέγματος με την προσθήκη του modifier *SPLINE SURFACE*. Το τελικό πολυγωνικό πλέγμα αποτελείται από 3.401 κορυφές και 6.704 μπαλώματα, ενώ το προηγούμενο αποτελείτο από 861 κορυφές και 1.676 μπαλώματα.

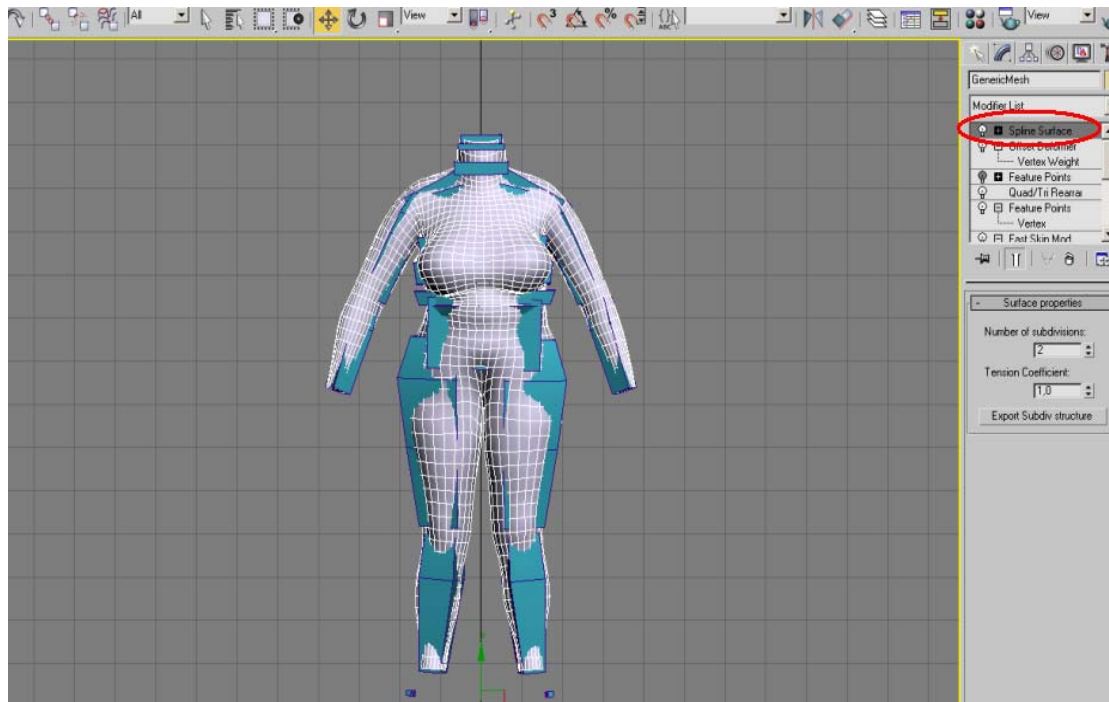
**(1)**



**(2)**

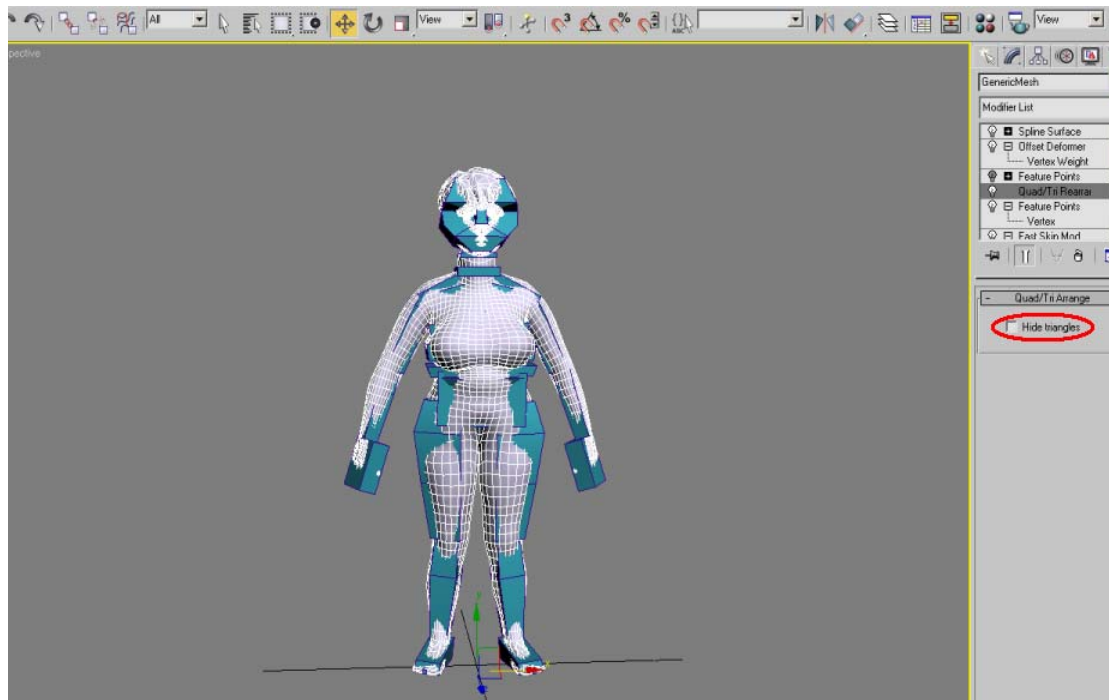


**Εικόνα 57:** (1) Τελικό πολυγωνικό πλέγμα (πυκνή ανάλυση), (2) Αρχικό πολυγωνικό πλέγμα (αραιή ανάλυση)



Εικόνα 58: Διαδικασία αύξησης πυκνότητας πλέγματος (Spline Surface)

12. Σαν τελευταίο βήμα της διαδικασίας εμφανίζονται το κεφάλι, οι παλάμες και οι πατούσες επιλέγοντας ξανά το *HIDE TRIANGLES* από τον modifier *QUAD/TRI REARRANGE*. Τέλος αποθηκεύεται το τελικό πολυγωνικό μοντέλο.

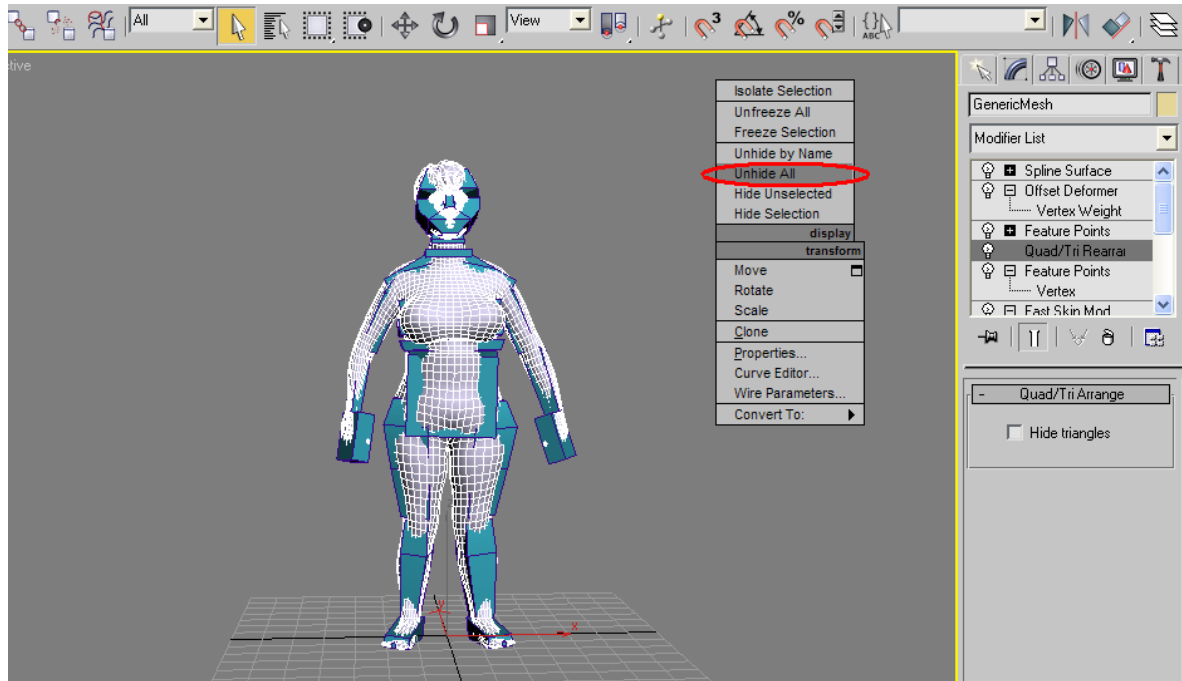


Εικόνα 59: Το πολυγωνικό μοντέλο στην τελική του μορφή

#### 4.4 Εξαγωγή του μοντέλου σε αρχεία

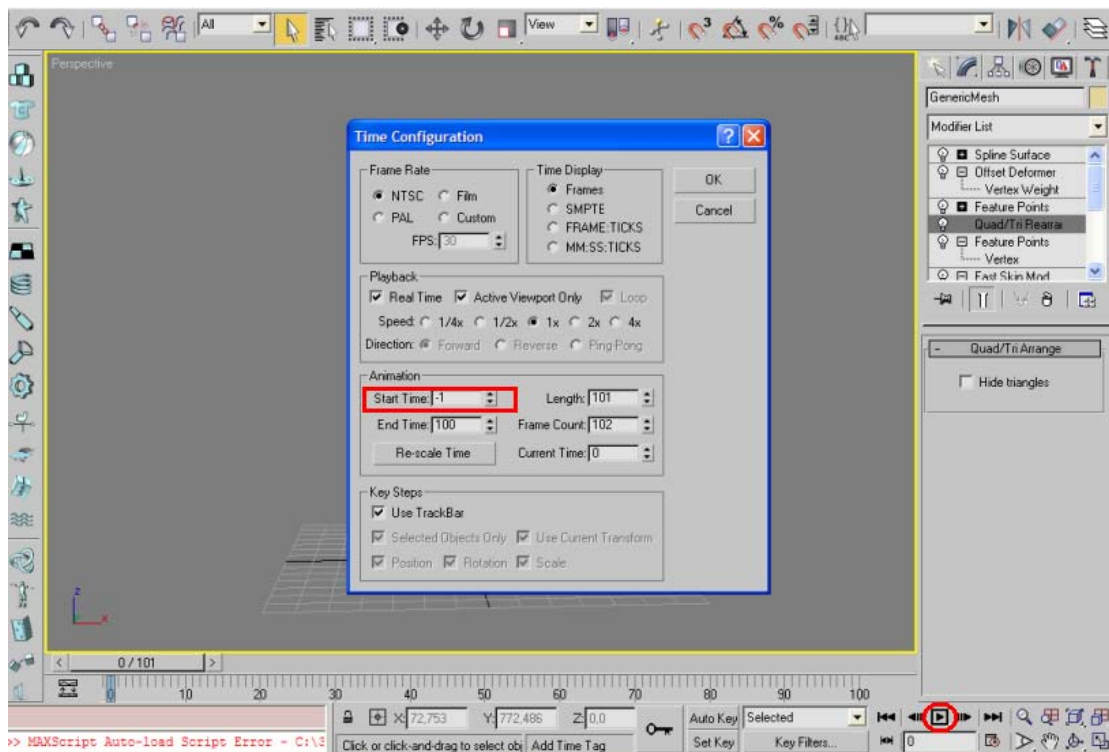
Το τελικό πολυγωνικό μοντέλο πρέπει να εξαχθεί σε συγκεκριμένα αρχεία, ώστε αυτά να περιέχουν πληροφορίες για το σκελετό, τις διαστάσεις, τις ισοϋψείς καμπύλες του εκάστοτε μοντέλου κ.α

1. Αρχικά γίνεται *UNHIDE ALL*, δηλαδή πρέπει να εμφανίζεται ο σκελετός. Ακόμα ελέγχεται ότι το κεφάλι, τα πόδια και τα χέρια του *GENERIC MODEL* απεικονίζονται.

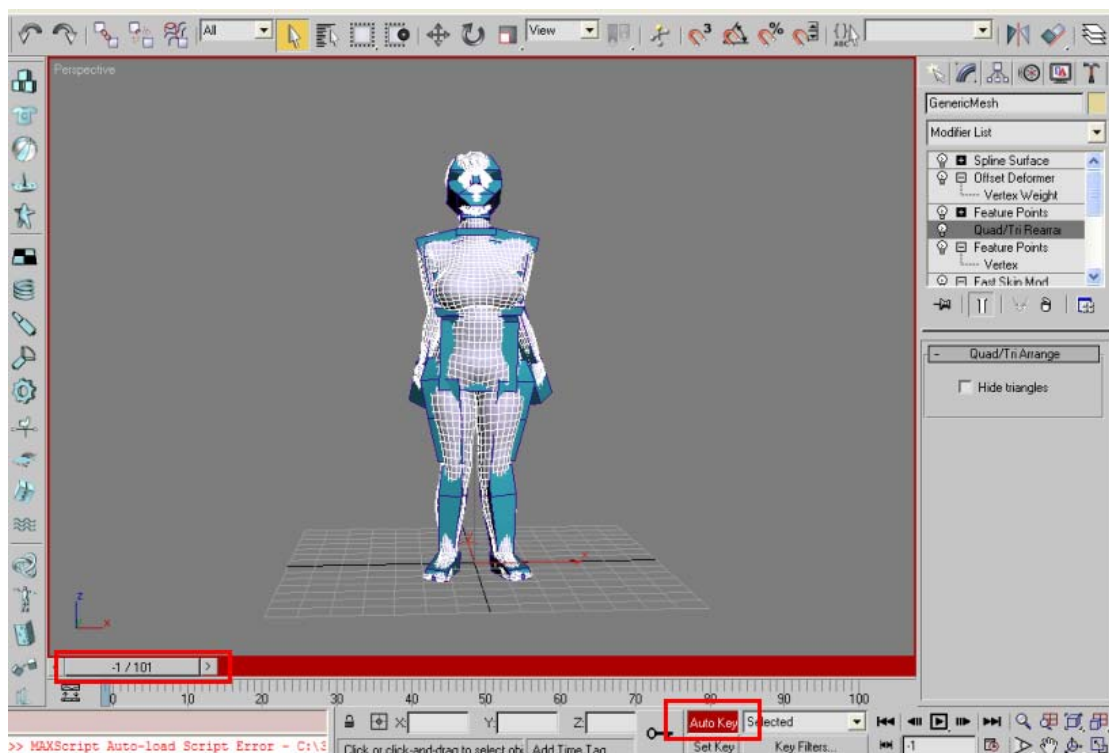


Εικόνα 60: Εμφάνιση του σκελετού στο τελικό πολυγωνικό μοντέλο

2. Στη συνέχεια εφαρμόζεται δεξί κλικ πάνω στο κουμπί *PLAY* και ορίζεται ως *START TIME* το *FRAME -1*. Οδηγείται το μοντέλο στο frame -1. Τέλος ενεργοποιείται το πλήκτρο *AUTO KEY* (παρατηρείται το πλαίσιο γύρω από το *VIEWPORT* κοκκινίζει.)



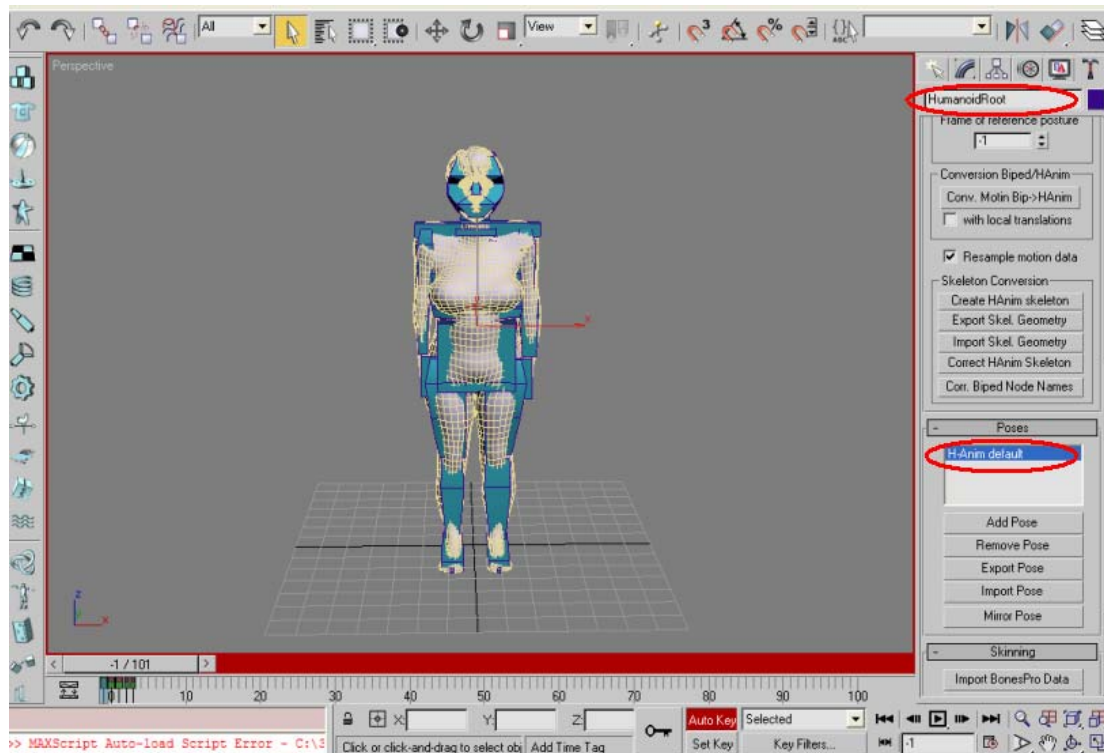
Εικόνα 61: Ορισμός του χρόνου έναρξης της κίνησης – Animation (Start Time: -1)



Εικόνα 62: Μεταφορά του σκελετού στο frame -1 και ενεργοποίηση του AutoKey



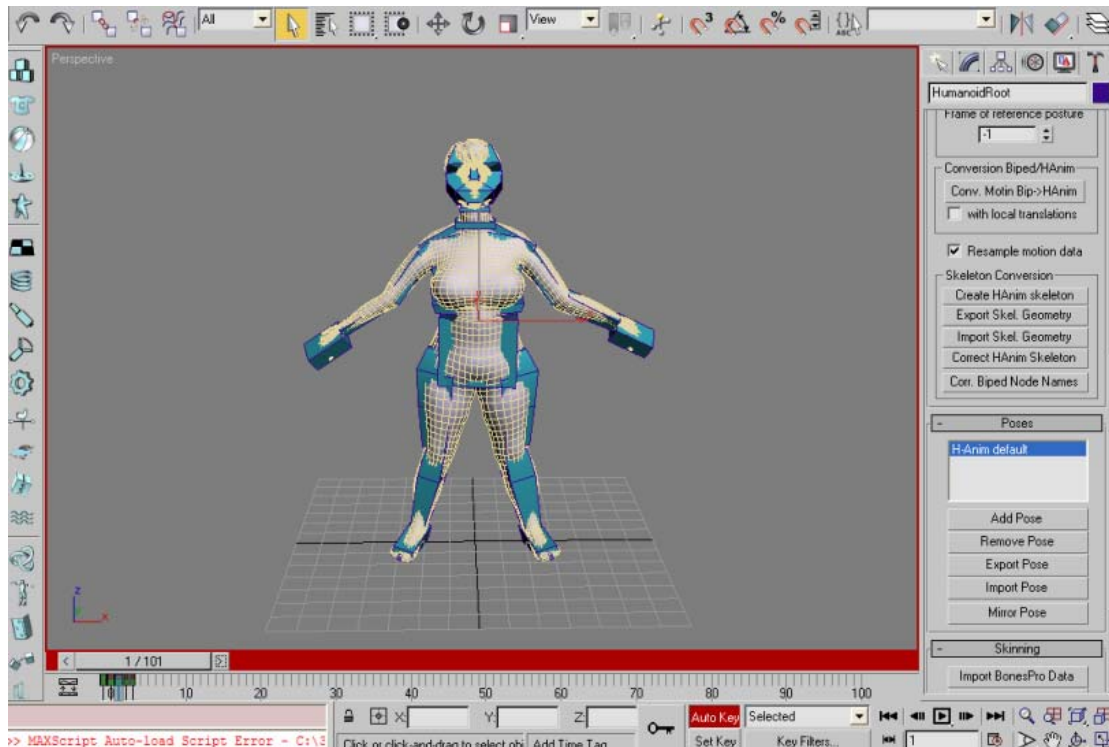
3. Από την καρτέλα *UTILITIES* εφαρμόζεται το *BODY MANAGER* και έπειτα επιλέγεται το *HUMANOID ROOT*. Στα *POSES* αποδίδεται η πόζα *H-ANIM* πατώντας δύο φορές πάνω στην επιλογή *H-ANIM DEFAULT*.



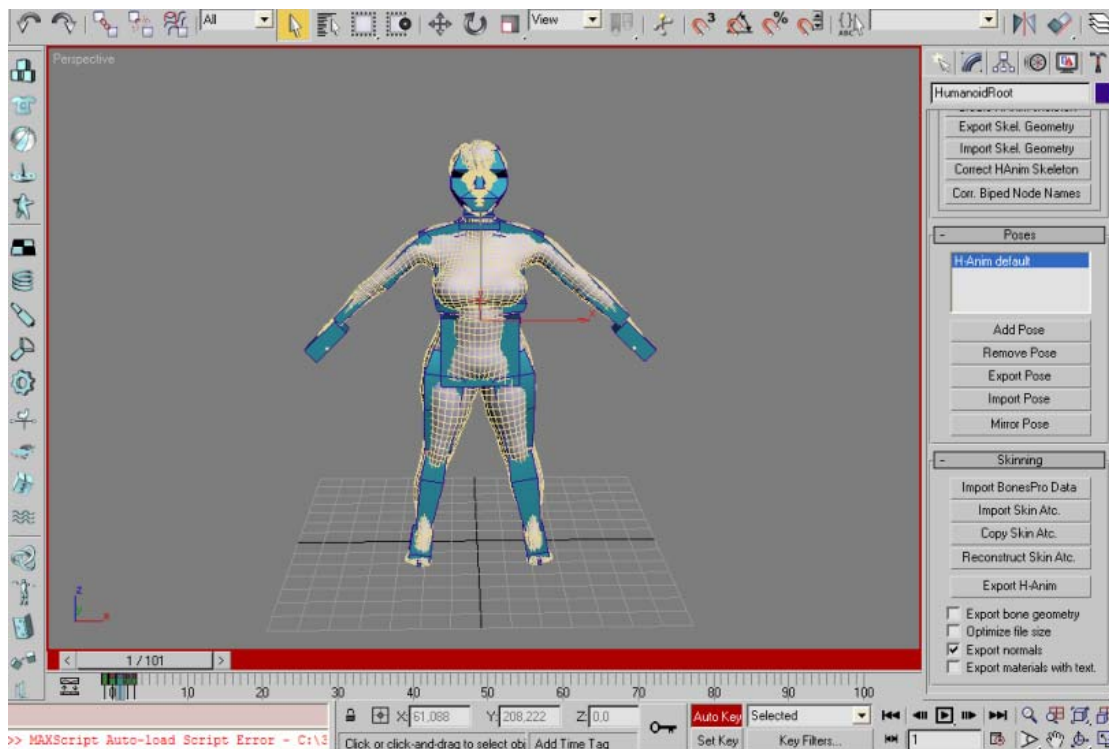
Εικόνα 63: Απόδοση της H-Anim default πόζας στο πολυγωνικό μοντέλο

4. Οδηγείται το time line στο *FRAME 1*. Στη συνέχεια έχοντας επιλέξει το *HUMANOID ROOT* και κάνοντας *IMPORT POSE*, εισάγεται το αρχείο *IMPORT FOR OFFSET*.



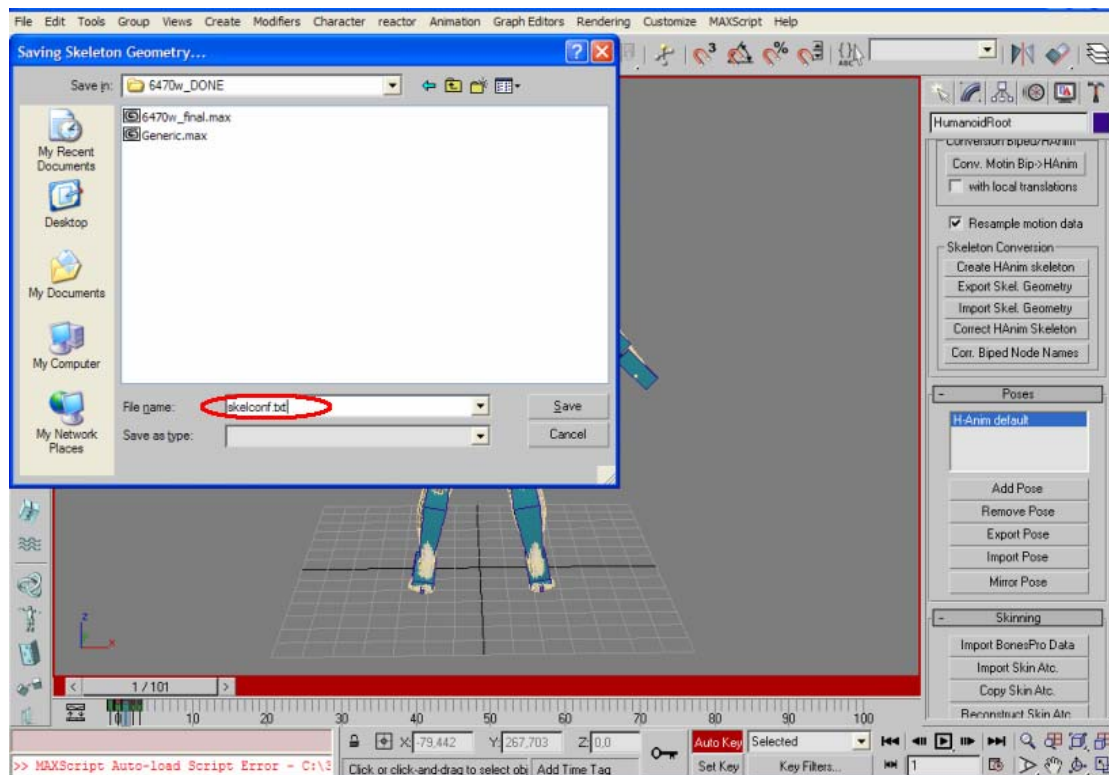


Εικόνα 64: Το πολυγωνικό μοντέλο και η θέση του σκελετού πριν την εισαγωγή του αρχείου Import For Offset



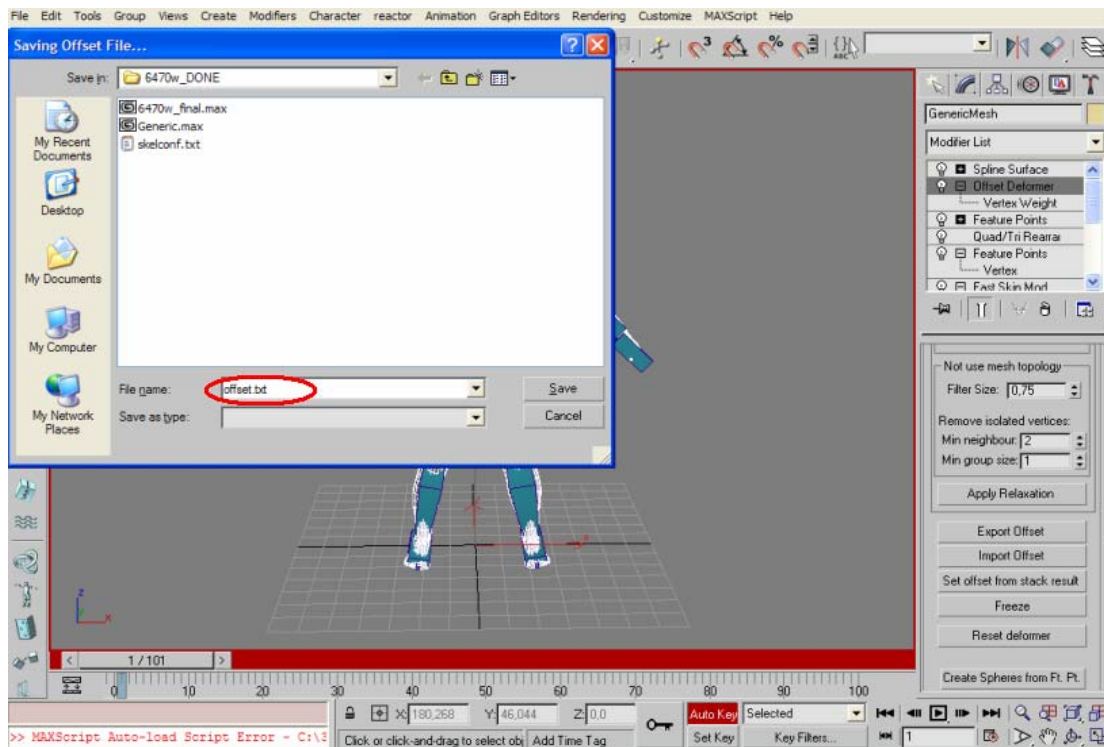
Εικόνα 65: Το πολυγωνικό μοντέλο και η θέση του σκελετού μετά την εισαγωγή του αρχείου Import For Offset

5. Σε αυτό το σημείο πρέπει να αποθηκευτεί η γεωμετρία του σκελετού του εκάστοτε πολυγωνικού μοντέλου. Με επιλογή του *EXPORT SKEL.GEOMETRY* από το *BODY MANAGER* αποθηκεύεται το αρχείο ως *SKELCONF.TXT* (με το *HUMANOID ROOT* επιλεγμένο).



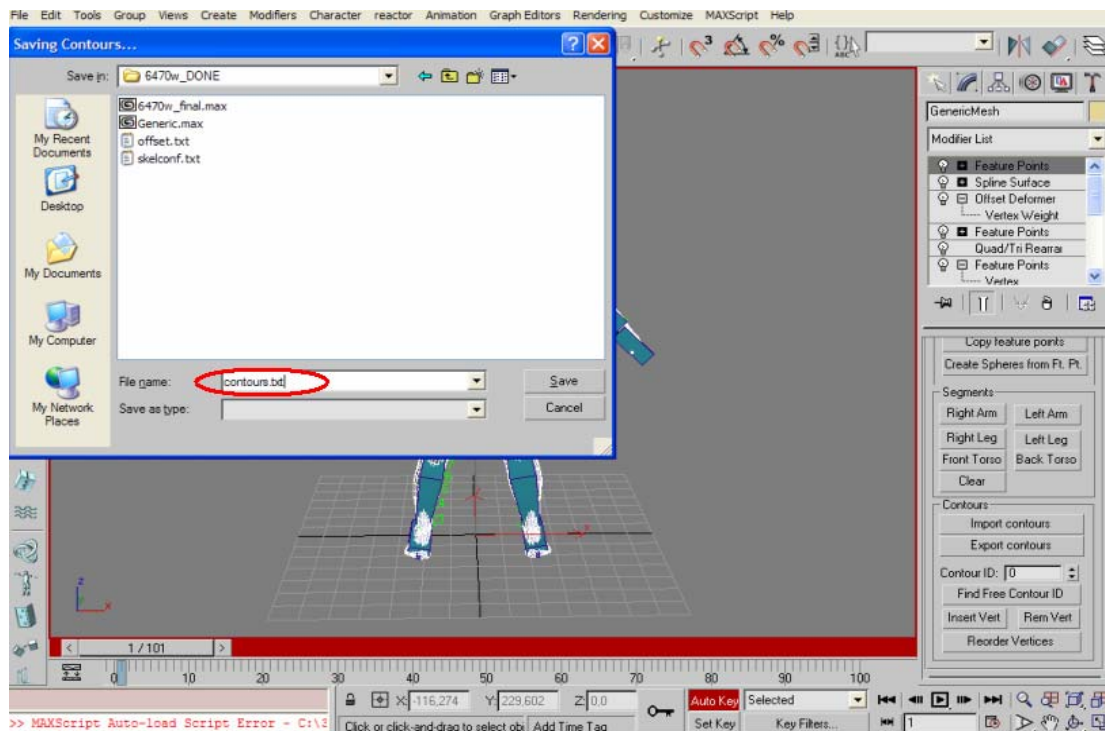
Εικόνα 66: Εξαγωγή της γεωμετρίας του σκελετού του πολυγωνικού μοντέλου (Export Skeleton Geometry)

6. Στη συνέχεια στον modifier *OFFSET DEFORMER* επιλέγεται το *EXPORT OFFSET* και αποθηκεύεται το αρχείο ως *OFFSET.TXT*.



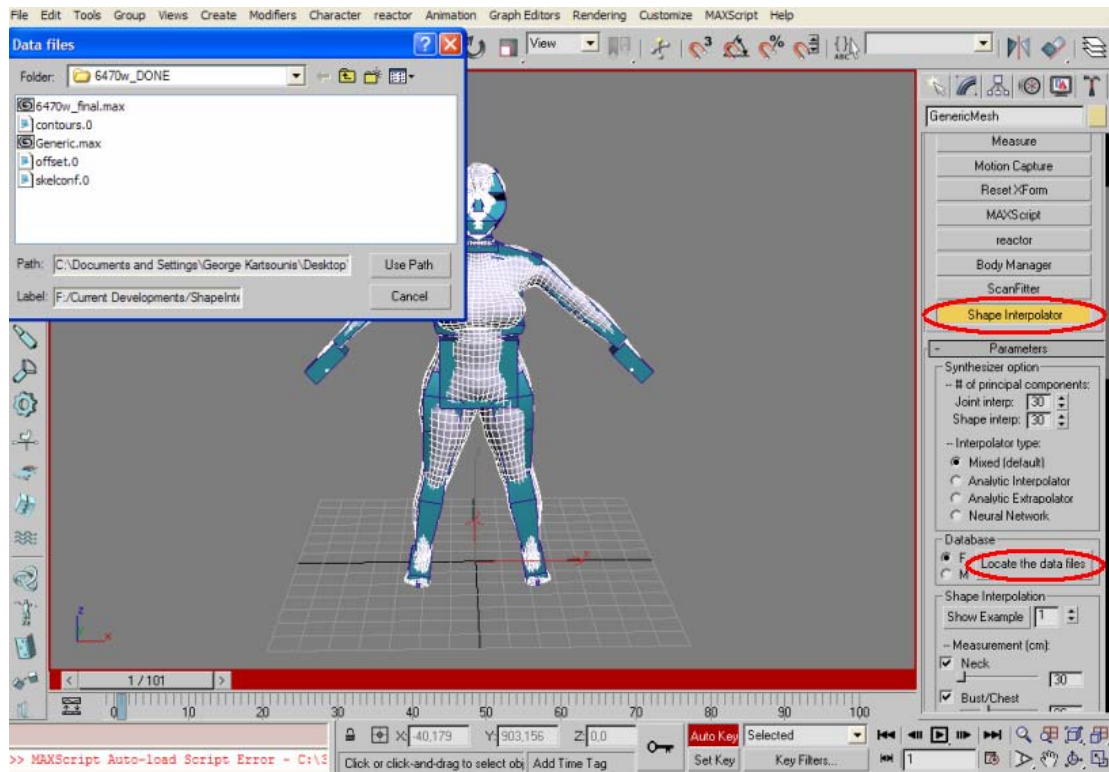
Εικόνα 67: Αποθήκευση του αρχείου offset.txt

7. Ακολουθεί η αποθήκευση των ισοϋψών καμπύλων του εκάστοτε πολυγωνικού μοντέλου. Έπειτα προστίθεται ένας νέος modifier *FEATURE POINTS* στο πρότυπο πολυγωνικό μοντέλο - *GENERIC MESH*. Επιλέγεται το *IMPORT CONTOURS* και εισάγεται το αρχείο *Contour LoRes.txt*. Τέλος επιλέγεται το *EXPORT CONTOURS* και αποθηκεύεται το αρχείο ως *CONTOURS.TXT*.

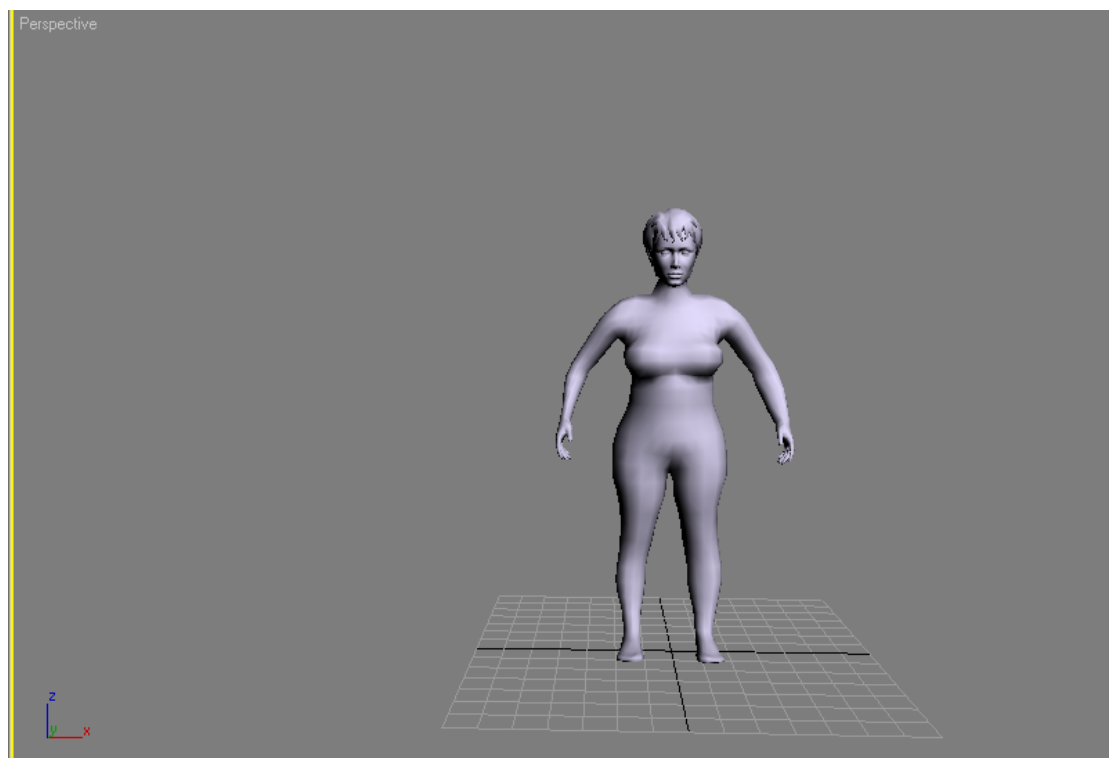


Εικόνα 68: Αποθήκευση του αρχείου των ισοϋψών καμπύλων του πολυγωνικού μοντέλου (contours.txt)

8. Το τελευταίο βήμα της διαδικασίας εξαγωγής του μοντέλου σε αρχεία είναι το εξής: Αρχικά αντιγράφονται τα αρχεία *OFFSET.TXT*, *CONTOURS.TXT*, *SKELCONF.TXT*, σε ένα φάκελο π.χ 6470w\_DONE. Στη συνέχεια πραγματοποιείται *rename* σε αυτά *OFFSET.0*, *CONTOURS.0*, *SKELCONF.0*. Στο φάκελο που είχαν σωθεί τα αρχεία και το τελικό μοντέλο, αντιγράφεται το *generic.max*. Τέλος εφαρμόζεται το *Shape interpolator*, κάνοντας *locate the data files* και επιλέγοντας το φάκελο που είχαν σωθεί τα προηγούμενα αρχεία δημιουργούνται από την εφαρμογή *Shape interpolator* τα *pca*, *jpca* ...αρχεία.



Εικόνα 69: Δημιουργία των υπόλοιπων αρχείων του πολυγωνικού μοντέλου



Εικόνα 70: Το πολυγωνικό μοντέλο στην τελική του μορφή

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε σαν θέμα τη δημιουργία τρισδιάστατων πολυγωνικών ανθρωπίνων μοντέλων βάσει δεδομένων σάρωσης. Τα δεδομένα σάρωσης αποτελούνταν από νέφη σημείων που λήφθηκαν από τρισδιάστατους σαρωτές βάθους, οι οποίοι εφαρμόστηκαν σε σύνολο 291 ατόμων ( 233 γυναίκες και 58 άνδρες).

Με τη χρησιμοποίηση των λογισμικών Geomagic Studio και Bodysizer (Plug-In του 3D Studio Max) επιτεύχθηκε η δημιουργία επιφανείας, η δημιουργία πολυγωνικού πλέγματος, η προσαρμογή σκελετού και η απόδοση κίνησης σε κάθε ένα από τα ανθρώπινα μοντέλα. Το Geomagic Studio που χρησιμοποιήθηκε κυρίως για την δημιουργία επιφανείας είναι ένα πρόγραμμα εύχρηστο και φιλικό προς το χρήστη. Το 3D Studio Max – Bodysizer έχει πιο περίπλοκο interface. Οι δυσκολίες που παρουσιάστηκαν στην εφαρμογή του Bodysizer αφορούσαν κυρίως τα ανδρικά μοντέλα, λόγω ασυμβατότητας του ανδρικού προτύπου (Male Generic Model), γι'αυτό το λόγο είναι λιγότερα τα ανδρικά μοντέλα που εξήχθησαν σε σχέση με τα γυναικεία. Ακόμη, μια γενική παρατήρηση είναι ότι εξαιτίας της χειροκίνητης επιλογής 48 χαρακτηριστικών σημείων (feature points) σε κάθε σώμα, η ολοκλήρωση της εφαρμογής της διαδικασίας για όλα τα μοντέλα ήταν χρονοβόρα.

Τα ανθρώπινα μοντέλα που εξήχθησαν από αυτήν τη διαδικασία μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πολλές εφαρμογές (Κεφάλαιο 2). Η πιο σημαντική από αυτές είναι η χρησιμοποίηση των μοντέλων αυτών σε μια ηλεκτρονική πύλη, τα μοντέλα που έχουν εισαχθεί, θα ταξινομηθούν σύμφωνα με τις διαστάσεις τους ώστε να χρησιμοποιηθούν από βιομηχανίες ένδυσης. Ακόμη τα μοντέλα μπορούν να αποτελέσουν αντικείμενο μελέτης από ινστιτούτα ανθρωπομετρίας για στατιστικούς λόγους. Επίσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν εικονικά μοντέλα – ανθρωποειδή, τα οποία έχουν πραγματικές διαστάσεις και χρησιμοποιούνται σε εργονομικές εφαρμογές. Πιο συγκεκριμένα: στην αυτοκινητοβιομηχανία, στη βιομηχανία επίπλων, στο ηλεκτρονικό εμπόριο, στον αθλητικό εξοπλισμό, στην αρχιτεκτονική και τέλος σε γραμμές παραγωγής των βιομηχανικών τομέων.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] Hyewon Seo, Nadia Magnenat – Thalmann, “ An Automatic Modeling of Human Bodies from Sizing Parameters”, Miralab, University of Geneva, 2003.
- [2] Allen B., Curless B., Popovic Z., “ Articulated body deformation from range scan data”, Proceedings SIGGRAPH 2002, pp. 612-619, Addison – Wesley, 2002.
- [3] Charlie C.L. Wang, “Parameterization and parametric design of mannequins”, May 2004.
- [4] Charlie C.L. Wang, Yu Wang, Matthew M.F. Yuen, “ Design automation for customized apparel products”, 12-August 2004.
- [5] Λυμάκη Μαρίνα, Διπλωματική εργασία με θέμα: “ Εικονική Αναπαράσταση και Παραμετροποίηση Τρισδιάστατων Μοντέλων Σωμάτων στη Βιομηχανία της Ένδυσης”, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά 2004.
- [6] <http://www2.miralab.unige.ch/>
- [7] H-Anim Specification: <http://ece.uwaterloo.ca/~H-ANIM/spec1.1>
- [8] <http://www2.acae.cuhk.edu.hk/~cwang/publication.html>
- [9] <http://en.wikipedia.org/wiki/Voxel>