



ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δημιουργία απτικών διεπαφών σε τρισδιάστατα αντικείμενα στο unity για εφαρμογές εικονικής πραγματικότητας

Του φοιτητή

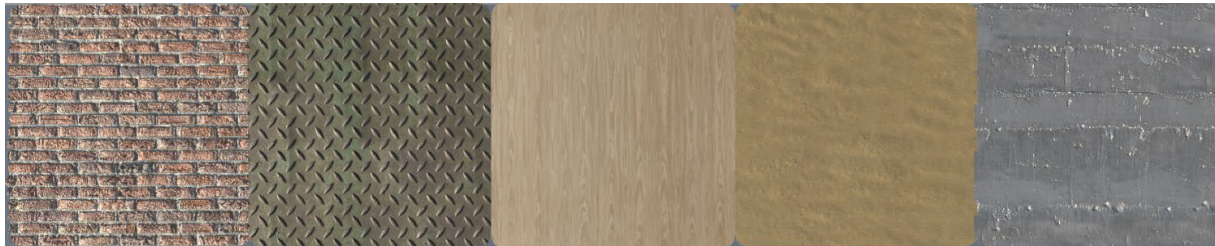
Ηλία Παραφέστα

Αρ. Μητρώου: 2019135

Επιβλέπων

Ονοματεπώνυμο Κοκκώνης Γεώργιος

Βαθμίδα Επίκουρος Καθηγητής



Ημερομηνία 10/09/2025

Τίτλος Δ.Ε. Δημιουργία απτικών διεπαφών σε τρισδιάστατα αντικείμενα στο Unity για εφαρμογές εικονικής πραγματικότητας.

Κωδικός Δ.Ε. 24229

Ονοματεπώνυμο φοιτητή/τών Ηλίας Παραφέστας

Ονοματεπώνυμο εισηγητή ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΚΟΚΚΩΝΗΣ

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε. 14/03/2025

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε. 10/09/2025

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως διπλωματική εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Ηλία Παραφέστα που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

Πρόλογος

Η επιλογή του θέματος της παρούσας διπλωματικής εργασίας εξαρτήθηκε πολύ από τα προσωπικά μου ενδιαφέροντα και την προηγούμενη ενασχόληση που είχα με τις απτικές τεχνολογίες στα πλαίσια της σχολής. Στο παρελθόν είχα ξαναδουλέψει με τα εργαλεία τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στην ανάπτυξη της διπλωματικής εργασίας δηλαδή το Unity και Blender και ήθελα να αξιοποιήσω τις γνώσεις που είχα σε αυτά τα εργαλεία και σε ένα διαφορετικό Project από αυτά που είχα αναπτύξει στο παρελθόν.

Μέσα από την παρούσα εργασία αποκόμισα σημαντικά οφέλη όπως να προσαρμόζω τις γνώσεις που έχω ήδη για να χρησιμοποιηθούν σε διαφορετικούς τομείς καθώς και τη διεύρυνση των γνώσεών μου σε καινούργιες μεθόδους. Παράλληλα ενίσχυσα την κατανόησή μου γύρω από τον τρόπο με τον οποίο ο ψηφιακός κόσμος μπορεί να αλληλεπιδράσει με τον πραγματικό.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στην ανάπτυξη και βελτιστοποίηση υφών που προσφέρουν ρεαλιστική απτική εμπειρία όταν αλληλεπιδρά ο χρήστης με αυτές. Η εφαρμογή υλοποιήθηκε με τη χρήση των εργαλείων Unity και Blender τα οποία επέτρεψαν τη δημιουργία της λειτουργικότητας της εφαρμογής και τη δημιουργία τρισδιάστατων υφών με πολύ μεγάλη λεπτομέρεια. Για την απτική αλληλεπίδραση χρησιμοποιήθηκε η συσκευή Touch. Για την αξιολόγηση της εφαρμογής πραγματοποιήθηκαν δύο έρευνες στις οποίες συμμετείχαν συνολικά 47 άτομα. Αυτές οι έρευνες χωρίζονταν σε δύο κομμάτια το πρώτο για την αξιολόγηση των υφών και το δεύτερο για το τυφλό παιχνίδι αναγνώρισης των υφών. Στη δεύτερη έρευνα έγινε βελτίωση των ρυθμίσεων από τις υφές και παρατηρήθηκε βελτίωση στην αναγνώριση των υφών στο δεύτερο κομμάτι του παιχνιδιού. Συνολικά η εργασία απέδειξε ότι μέσω της μεθοδολογίας και των εργαλείων που χρησιμοποιήθηκαν μπορούν να δημιουργηθούν υφές οι οποίες είναι πολύ κοντά στην πραγματικότητα και προσφέρουν μια ρεαλιστική απτική εμπειρία.

Creation of Haptic Interfaces on Three-Dimensional Objects in Unity for Virtual Reality Applications

Ilias Parafestas

Abstract

The thesis focuses on the development and optimization of textures that provide a realistic haptic experience when users interact with them. The application was created using Unity and Blender which made possible both the creation of the application's functionality and the design of three dimensional textures with high levels of detail. For the haptic interaction the Touch device was used. The evaluation of the application was made through two user studies involving a total of 47 participants. These studies were conducted in two parts the first focused on the assessment of the values of the settings of the textures while the second involved a blind recognition game of the textures. In the second study improvements were made in the settings of the textures and there was an improvement in the texture recognition during the blind game. Overall the thesis demonstrates that through the methodology and tools used it is possible to create textures that closely resemble real world surfaces and provide a realistic haptic experience.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου κ. Γεώργιο Κοκκώνη με τον οποίο συνεργαστήκαμε άψογα και με την πολύτιμη καθοδήγηση και στήριξή του κατάφερα να ολοκληρώσω την παρούσα διπλωματική εργασία. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Νίκο Τζήμο για την πολύτιμη βοήθειά του στην ολοκλήρωση της εργασίας. Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στην οικογένειά μου που με στήριξε και με το παραπάνω σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου προσφέροντάς μου ότι χρειαζόμουν για να φτάσω στην ολοκλήρωσή τους. Τέλος ένα μεγάλο και ξεχωριστό «ευχαριστώ» στην κοπέλα μου η οποία στάθηκε δίπλα μου σε κάθε βήμα αποτελώντας στήριγμα και έμπνευση σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου και όχι μόνο.

Περιεχόμενα

Πρόλογος	3
Περίληψη	4
Abstract	5
Ευχαριστίες	6
Περιεχόμενα	7
Κεφάλαιο 1^ο : Εισαγωγή	9
1.1 Η Αφή ως Κανάλι Αντίληψης	9
1.2 Η Αφή Στον Ψηφιακό Κόσμο	10
1.3 Η Έννοια και η Σημασία της Ρεαλιστικής Προσομοίωσης Υφών	10
1.4 Σκοπός Και Στόχοι Της Εφαρμογής.....	11
1.5 Ακαδημαϊκή Συνεισφορά και Δημοσίευση	11
1.6 Επίλογος	12
Κεφάλαιο 2^ο : Θεωρητικό Υπόβαθρο	13
2.1 Εισαγωγή.....	13
2.2 Αλληλεπίδραση Ανθρώπου – Υπολογιστή.....	17
2.3 Απτική Αλληλεπίδραση Ανθρώπου – Υπολογιστή.....	18
2.4 Απτικές Συσκευές – Εφαρμογές.....	18
2.5 Αισθητήρες Αφής Δέρματος	22
2.6 Σχετική Βιβλιογραφία	24
2.7 Επίλογος	27
Κεφάλαιο 3^ο : Η Συσκευή Touch	29
3.1 Τεχνικά Χαρακτηριστικά	29
3.2 Τεχνολογία Επανατροφοδότησης Δύναμης (Force Feedback)	30
3.3 Ο Ρόλος της Συσκευής Touch στη Μελέτη.....	31
3.4 Εγκατάσταση και Οδηγοί (Drivers)	32
3.5 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της Συσκευής Touch.....	34
3.6 Επίλογος.....	36
Κεφάλαιο 4^ο : Unity και Ανάπτυξη Εφαρμογής	37
4.1 Επισκόπηση του Unity 3D Engine	37
4.2 Unity Plugin Haptics Direct	41
4.3 Υλοποίηση Υφών στο Unity	45

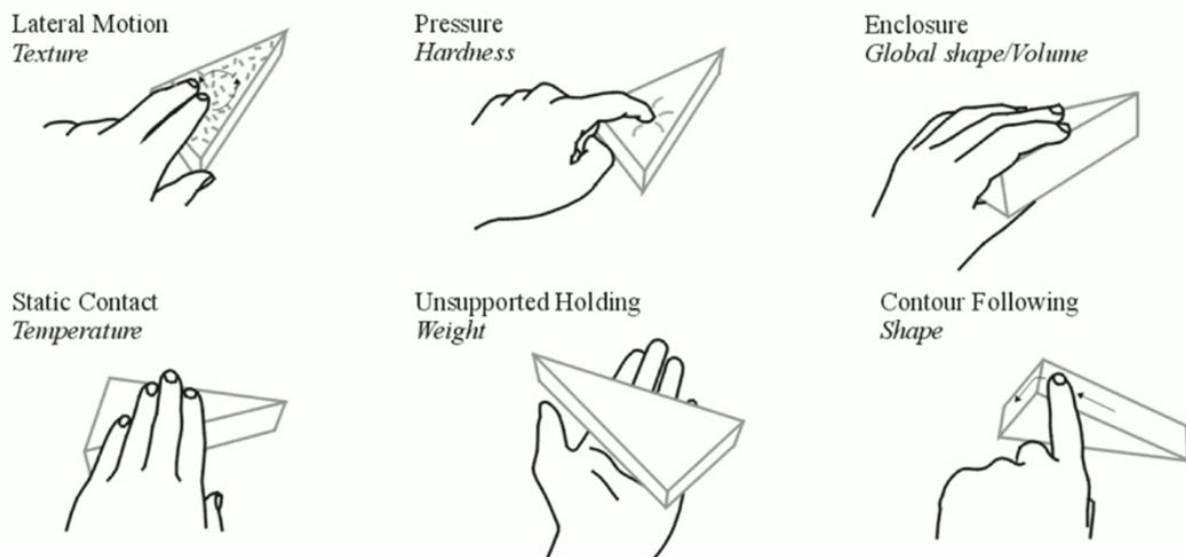
4.4 Προγραμματισμός σε C#.....	54
4.5 Επίλογος.....	66
Κεφάλαιο 5° : Σχεδιασμός και Υλοποίηση Υφών.....	67
5.1 Επιλογή Υλικών.....	67
5.2 Χαρτογράφηση Υφών.....	73
5.3 Δημιουργία Υφών στο Blender.....	75
5.4 Επίλογος.....	92
Κεφάλαιο 6° : Διεπαφή και Χρήση της Εφαρμογής.....	93
6.1 Σχεδιασμός UI/UX.....	93
6.2 Σενάριο Αξιολόγησης Υφών.....	97
6.3 Σενάριο Παιχνιδιού.....	98
6.4 Επίλογος.....	99
Κεφάλαιο 7° : Μεθοδολογία Αξιολόγησης και Αποτελέσματα.....	100
7.1 Καταγραφή Δεδομένων.....	100
7.2 Βελτιστοποίηση των Ρυθμίσεων.....	101
7.3 Διαγράμματα Σύγκρισης.....	105
7.4 Μέσος Χρόνος Επιτυχίας.....	107
7.5 Αξιολόγηση Εφαρμογής.....	110
7.6 Επίλογος.....	113
Κεφάλαιο 8° : Σύγκριση Δυο Επιφανειών σε 3D Objects με Ελεύθερη Περιήγηση.....	114
8.1 Δημιουργία της σκηνής.....	114
8.2 Δημιουργία των αντικειμένων.....	114
8.3 Κίνηση του παίκτη.....	119
8.4 Αλλαγή των αντικειμένων.....	122
8.5 Επίλογος.....	124
Κεφάλαιο 9° : Συμπεράσματα.....	125
9.1 Συνοπτικά Συμπεράσματα.....	125
9.2 Προτάσεις για Μελλοντική Εξέλιξη.....	126
Βιβλιογραφία.....	128

Κεφάλαιο 1^ο : Εισαγωγή

1.1 Η Αφή ως Κανάλι Αντίληψης

Εμείς οι άνθρωποι αντιλαμβανόμαστε το περιβάλλον μας χρησιμοποιώντας τις αισθήσεις μας, όπως την όραση, την όσφρηση, την ακοή, τη γεύση ή την αφή. Μέχρι τώρα μέσω των διαθέσιμων τεχνολογιών που υπάρχουν είναι εφικτό να μεταδίδουμε αξιόπιστα μόνο οπτικά και ακουστικά δεδομένα, τα οποία διεγείρουν μόνο δύο από τις ανθρώπινες αισθήσεις μας, αλλά με τις καινούριες τεχνολογίες που αφορούν τις απτικές αλληλεπιδράσεις θα είναι δυνατή η απτική επικοινωνία, η οποία με άλλα λόγια σημαίνει ότι θα μπορούμε να συλλέγουμε απτικά δεδομένα και έπειτα να τα μεταφέρουμε μέσω του διαδικτύου.

Τι σημαίνει λοιπόν να συλλέγουμε απτικά δεδομένα; Κάθε αντικείμενο έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά τα οποία εμείς οι άνθρωποι μπορούμε να τα ανακαλύψουμε αν έρθουμε σε άμεση επαφή με αυτό το αντικείμενο, αυτά τα χαρακτηριστικά είναι: Το ανάγλυφο ενός αντικειμένου το οποίο μπορούμε να καταλάβουμε εφόσον κάνουμε μια πλευρική κίνηση πάνω στο αντικείμενο, Η πίεση πάνω στο αντικείμενο ή με άλλα λόγια το πόσο σκληρό είναι το οποίο μπορούμε να κατανοήσουμε εφόσον πιέσουμε το αντικείμενο, Το περίβλημα ή αλλιώς ο όγκος ενός αντικειμένου τον οποίο αντιλαμβανόμαστε αν αγκαλιάσουμε με το χέρι μας το αντικείμενο, Η στατική επαφή μέσω της οποίας μπορούμε να αντιληφθούμε τη θερμοκρασία που έχει το αντικείμενο, Το βάρος του αντικειμένου το οποίο μπορούμε να κατανοήσουμε αφήνοντας το αντικείμενο πάνω στο χέρι μας χωρίς κάποια άλλη επιπλέον άσκηση δύναμης και τέλος το σχήμα του αντικειμένου που γίνεται αντιληπτό εφόσον ψηλαφήσουμε το αντικείμενο.



Adapted from R.L. Klatzky, et al., "Procedures for haptic object exploration vs. manipulation," *Vision and action: The control of grasping*, ed. M. Goodale, New Jersey: Ablex, 1990, pp. 110-127.

Εικόνα 1.1 Διαφορετικοί τρόποι που αντιλαμβανόμαστε απτικά ένα αντικείμενο από το βιβλίο *Vision and Action: The Control of Grasping* [1]

1.2 Η Αφή Στον Ψηφιακό Κόσμο

Για να μπορέσουμε να προσεγγίσουμε αποτελεσματικά την έννοια της απτικής αλληλεπίδρασης και να την εφαρμόσουμε σε ψηφιακά περιβάλλοντα, είναι απαραίτητο να κατανοήσουμε βασικές επιστημονικές έννοιες που τη διέπουν :

- Haptics είναι η τεχνολογία που αναδημιουργεί την αίσθηση της αφής με την εφαρμογή δυνάμεων ή δονήσεων στην απτική αίσθηση του χρήστη - "Touch". Ο άνθρωπος έχει δύο απτικές αισθήσεις, την απτική-Αίσθηση της Αφής (Tactile) και την Κιναισθητική (Kinesthetic).
- Tactile - αίσθηση αφής είναι η ανίχνευση δύναμης ή θερμικής ενέργειας στο δέρμα μας. Η Tactile- αίσθηση αφής μας βοηθά να αναγνωρίσουμε χαρακτηριστικά του αντικειμένου όπως άκρες, σπές, επιφανειακή τριβή και ακαμψία.
- Κιναισθητική είναι η αίσθηση της κίνησης του σώματος και της μυϊκής δύναμης. Ανιχνεύει τη ροπή μάζας και ροπής ενός αντικειμένου, όταν αυτό σηκώνεται και μετακινείται.

Για να μπορέσουμε να έχουμε αλληλεπίδραση του χρήστη με εικονικά αντικείμενα χρειαζόμαστε και τις κατάλληλες συσκευές που θα επιτρέψουν να έχει ο χρήστης την αίσθηση της αφής μέσω αυτών.



Εικόνα 1.2 Διαφορετικές απτικές συσκευές από το άρθρο Haptic display for virtual reality: progress and challenges [2]

1.3 Η Έννοια και η Σημασία της Ρεαλιστικής Προσομοίωσης Υφών

Στα εικονικά περιβάλλοντα επαυξημένης πραγματικότητας σημαντικό ρόλο στην εμπύθιση του χρήστη αποτελεί η ρεαλιστική προσομοίωση υφών. Ο όρος υφή αναφέρεται στα χαρακτηριστικά εκείνα τα οποία ο χρήστης αντιλαμβάνεται κατά την επαφή του με μια επιφάνεια: την τραχύτητα ή ομαλότητα, τη σκληρότητα καθώς και τη γεωμετρία κατά την κίνηση του χεριού πάνω σε αυτήν.

Η πιστή αναπαράσταση αυτών των υφών στο εικονικό περιβάλλον έχει δύο λειτουργίες. Από τη μια ενισχύει τη ρεαλιστικότητα και πειστικότητα της εικονικής εμπειρίας την οποία βιώνει ο χρήστης με αποτέλεσμα η αλληλεπίδραση να γίνεται με αντικείμενα που συμπεριφέρονται σαν αυτά της πραγματικής ζωής και όχι με αφηρημένες ψηφιακές οντότητες. Από την άλλη διευκολύνει την κατανόηση και την εκπαίδευση σε εφαρμογές όπου η αφή κατέχει κρίσιμο ρόλο, όπως είναι για παράδειγμα κάποια ιατρική προσομοίωση ή κάποια εφαρμογή εκπαιδευτικού χαρακτήρα σε σχολεία με αντικείμενο τη βιολογία ή τη χημεία.

Πολλές φορές η οπτική πληροφορία από μόνη της δεν επαρκεί κάτι που κάνει ακόμα πιο εμφανής τη σημασία της ρεαλιστικής απτικής αναπαράστασης. Συχνά η όψη ενός αντικειμένου σε ένα περιβάλλον εικονικής πραγματικότητας δεν μπορεί να μεταδώσει τη συνολική εμπειρία των χαρακτηριστικών αυτού του αντικειμένου. Για παράδειγμα μπορεί να έχουμε δύο αντικείμενα τα οποία οπτικά φαίνονται παρόμοια όμως διαφέρουν προς την τραχύτητα και τη σκληρότητά τους. Η ορθή προσομοίωση των διαφορών μεταξύ αυτών των δύο αντικειμένων αυξάνει κατά πολύ τον ρεαλισμό της προσομοίωσης.

1.4 Σκοπός Και Στόχοι Της Εφαρμογής

Η ανάπτυξη αυτής της εφαρμογής καθώς και των ερευνών που έγιναν με τη χρήση αυτής είναι η προσέγγιση της ρεαλιστικής απτικής προσομοίωσης συγκεκριμένων υφών μέσω της χρήσης ενός haptic interface (συσσκευής αφής) σε ένα εικονικό περιβάλλον. Στην εφαρμογή έγινε η προσπάθεια να αποδοθούν έξι επιλεγμένα υλικά τούβλο, μέταλλο, ξύλο, άμμος, πάγος και τσιμέντο με τρόπο τέτοιο ώστε να προκαλούν στον χρήστη μια ρεαλιστική αίσθηση αφής ακόμα και χωρίς οπτική αναπαράσταση αυτών. Το ερευνητικό κομμάτι της διαδικασίας είχε ως σκοπό τόσο να βελτιστοποιήσει τις απτικές ρυθμίσεις τις οποίες έχει το κάθε υλικό όσο και να μετρήσει την ικανότητα του κάθε χρήστη να αναγνωρίζει σωστά την κάθε υφή με αποκλειστικό γνώμονα την αφή.

Η εφαρμογή που χρησιμοποιήθηκε για την έρευνα αναπτύχθηκε με τη χρήση της μηχανής Unity3D ενώ για την απτική διεπαφή με τα εικονικά υλικά χρησιμοποιήθηκε η συσκευή Touch της 3D Systems η οποία επιτρέπει την απόδοση της απτικής πληροφορίας μέσω συγκεκριμένων μεταβλητών όπως είναι η τριβή (friction), η σκληρότητα (stiffness) και υφή (texture). Η αξιολόγηση των ρυθμίσεων αυτών έγινε με τη συμμετοχή διαφόρων χρηστών σε δύο διαφορετικές φάσεις: αρχικά μέσω επαφής του χρήστη με την εκάστοτε υφή και έπειτα πειραματισμό με τις διαθέσιμες ρυθμίσεις, και στη συνέχεια με την προσπάθεια τυφλής αναγνώρισης των υφών από τον χρήστη χωρίς οπτική πληροφορία.

Ο τελικός στόχος είναι διπλός. Πρώτον να καταλήξουμε στις πιο ρεαλιστικές ρυθμίσεις για την κάθε υφή μέσα από τον πειραματισμό των χρηστών με τις επιλεγμένες υφές και έπειτα τη συλλογή δεδομένων και απόψεων με βάση την εμπειρία τους. Δεύτερον να δημιουργηθεί μια μεθοδολογία εντοπισμού και αξιολόγησης ρεαλιστικών απτικών αναπαραστάσεων η οποία θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στο μέλλον σε άλλες εφαρμογές ως βάση για την ανάπτυξη περιβαλλόντων επαυξημένης εικονικής πραγματικότητας τα οποία περιέχουν υφές εξαιρετικά ρεαλιστικές.

1.5 Ακαδημαϊκή Συνεισφορά και Δημοσίευση

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτέλεσε το υπόβαθρο για τη συγγραφή και υποβολή επιστημονικής δημοσίευσης με τίτλο “*Multimodal interaction with Haptic interfaces on 3D Objects in Virtual*” (N. Tzimos, E. Parafestas, G. Voutsakelis, S. Kontogiannis, G. Kokkonis, *Electronics*, 2025, Under Review)

1.6 Επίλογος

Συνοψίζοντας στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάστηκε η αφή ως έννοια δηλαδή τι σημαίνει να ερχόμαστε σε επαφή με ένα αντικείμενο και τι δεδομένα παίρνουμε από αυτό. Εξηγήθηκαν κάποιες έννοιες που είναι σημαντικές για την κατανόηση της αφής στον ψηφιακό χώρο. Αναδείχθηκαν κάποιοι από τους λόγους που είναι σημαντικό να έχουμε μια ρεαλιστική αναπαράσταση των ψηφιακών αντικειμένων όταν έχει να κάνει με υφές με τις οποίες θα έρθουμε σε επαφή με κάποια απτική τεχνολογία. Τέλος διατυπώθηκαν ο σκοπός και οι στόχοι αυτής της εφαρμογής καθώς και το ότι η εφαρμογή που αναπτύχθηκε χρησιμοποιήθηκε για να γίνει μια έρευνα.

Κεφάλαιο 2^ο : Θεωρητικό Υπόβαθρο

2.1 Εισαγωγή

Κατά την τελευταία δεκαετία, η τεχνολογία της εικονικής πραγματικότητας (VirtualReality - VR) έχει παρουσιάσει αξιοσημείωτη πρόοδο, προσφέροντας σημαντικές δυνατότητες στον τομέα της οπτικής εμπύθισης των χρηστών μέσα σε πλήθος διαφορετικών ψηφιακών περιβαλλόντων. Η πρόοδος αυτή οφείλεται κυρίως στις τεχνολογικές εξελίξεις που έχουν επιτευχθεί στη δημιουργία και απεικόνιση ρεαλιστικών τρισδιάστατων οθονών, οι οποίες επιτρέπουν πιο ζωντανές και πιστές στην πραγματικότητα εμπειρίες. Παρ' όλα αυτά, τα σύγχρονα εικονικά περιβάλλοντα εξακολουθούν να παρουσιάζουν περιορισμούς, καθώς δεν είναι ακόμη σε θέση να αναπαράγουν το πλήρες φάσμα αισθητηριακών ερεθισμάτων που οι άνθρωποι βιώνουν κατά τις φυσικές τους αλληλεπιδράσεις. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η απουσία της αίσθησης της αφής, η οποία αποτελεί κρίσιμο παράγοντα στη διαμόρφωση μιας αυθεντικής εμπειρίας. Η έλλειψη αυτή μειώνει τον βαθμό ρεαλισμού και καθιστά την εμπύθιση μερική και ατελή, καθώς η ανθρώπινη αντίληψη είναι από τη φύση της πολυαισθητηριακή και διαδραστική.

Τα πολυτροπικά περιβάλλοντα εικονικής πραγματικότητας (VR), στα οποία οι χρήστες δεν περιορίζονται μόνο στη θέαση αλλά έχουν τη δυνατότητα να βιώνουν και απτικά ερεθίσματα, ανοίγουν τον δρόμο για εφαρμογές με άμεσο και ουσιαστικό αντίκτυπο σε πλήθος τομέων, όπως το ηλεκτρονικό εμπόριο, η εκπαίδευση και η βιομηχανία των ψηφιακών παιχνιδιών. Στον χώρο του ηλεκτρονικού εμπορίου, για παράδειγμα, πολλές εταιρείες πειραματίζονται ήδη με νέες μορφές εικονικών και επανυξημένων εμπειριών αγορών, όπου οι καταναλωτές έχουν τη δυνατότητα να «δοκιμάζουν» προϊόντα σε ένα ρεαλιστικά αποδοσμένο περιβάλλον χρησιμοποιώντας κυρίως την όρασή τους. Ωστόσο, η ενσωμάτωση πολυτροπικών στοιχείων θα μπορούσε να μετασχηματίσει ριζικά την αγοραστική εμπειρία, καθώς θα επέτρεπε στους πελάτες όχι μόνο να παρατηρούν τα προϊόντα σε τρισδιάστατη εικονική μορφή, αλλά και να αλληλεπιδρούν απευθείας με αυτά, λαμβάνοντας ταυτόχρονα απτική ανατροφοδότηση σε πραγματικό χρόνο. Έτσι, η διαδικασία της εικονικής αγοράς θα προσομοίαζε πολύ πιο πιστά τη φυσική εμπειρία, ενισχύοντας την εμπιστοσύνη του καταναλωτή και προσφέροντας μια πιο ολοκληρωμένη και ρεαλιστική αίσθηση προϊόντος.

Η υφή ενός αντικειμένου ορίζεται από τα μικροδομικά χαρακτηριστικά της επιφάνειάς του, τα οποία συνδέονται με παραμέτρους όπως η μεταβολή του ύψους (τραχύτητα) και η κατανομή των λεπτομερειών σε διαφορετικές χωρικές συχνότητες. Όταν ένας χρήστης κινεί μια χειροκίνητη απτική συσκευή πάνω από μια πραγματική επιφάνεια, η αλληλεπίδραση αυτή παράγει ένα δονητικό σήμα, το οποίο εξαρτάται τόσο από τον τρόπο κίνησης του χρήστη (ταχύτητα, κατεύθυνση, πίεση) όσο και από τις φυσικές ιδιότητες του υλικού (σκληρότητα, ελαστικότητα, μορφολογία επιφάνειας). Έρευνες έχουν δείξει ότι η δόνηση αυτή παίζει καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση της ανθρώπινης αντίληψης της υφής, επηρεάζοντας το πώς οι άνθρωποι αναγνωρίζουν και κατηγοριοποιούν διαφορετικά υλικά μέσω της αφής.

Για την αναπαράσταση αυτών των απτικών εμπειριών έχουν προταθεί δύο κύριες κατηγορίες προσεγγίσεων: οι φυσικο-βασισμένες και οι μεθοδολογίες που στηρίζονται σε δεδομένα. Οι φυσικο-βασισμένες προσεγγίσεις επιχειρούν να προσομοιώσουν με ακρίβεια την απτική εμπειρία αξιοποιώντας πλήρη γνώση της γεωμετρίας του αντικειμένου και των φυσικομηχανικών ιδιοτήτων του υλικού. Ωστόσο, τέτοιες απαιτήσεις είναι δύσκολο να ικανοποιηθούν σε μη ελεγχόμενα περιβάλλοντα εκτός εργαστηρίου, ενώ επιπλέον τα υπολογιστικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται είναι

ιδιαίτερα απαιτητικά σε πόρους, γεγονός που καθιστά δύσκολη την εκτέλεσή τους σε πραγματικό χρόνο.

Από την άλλη πλευρά, οι κλασικές προσεγγίσεις που βασίζονται σε δεδομένα μπορούν να υποστηρίξουν λειτουργία σε πραγματικό χρόνο, αλλά συχνά εκπαιδεύουν ένα ξεχωριστό μοντέλο για κάθε τύπο υλικού. Αυτό συνεπάγεται σημαντικό κόστος σε χρόνο και πόρους, καθώς η επεκτασιμότητα σε ένα μεγάλο εύρος πραγματικών υφών καθίσταται περιορισμένη. Επίσης, διαφορετικές επιφάνειες δημιουργούν ποικίλα μοτίβα δονήσεων είτε στα άκρα των δακτύλων του ανθρώπου είτε σε μια φορητή απτική συσκευή που τις ανιχνεύει κατά την κίνηση. Η σχέση μεταξύ της παραγόμενης δόνησης, των υλικών ιδιοτήτων της υφής και της δυναμικής της κίνησης του χρήστη είναι εξαιρετικά περίπλοκη και μη γραμμική, γεγονός που καθιστά την αξιόπιστη μοντελοποίησή της ιδιαίτερα απαιτητική πρόκληση για την επιστημονική κοινότητα.

Παρά τις σημαντικές προόδους στον τομέα της απτικής τεχνολογίας, η ακριβής και ρεαλιστική αναπαραγωγή υφών – όπως η τραχύτητα μιας επιφάνειας, η αίσθηση της ομαλότητας, αλλά και οι λεπτές απτικές λεπτομέρειες – εξακολουθεί να αποτελεί μία από τις πιο δύσκολες και ανεπτυγμένες προκλήσεις. Η δυσκολία αυτή γίνεται ακόμη πιο έντονη όταν πρόκειται για την προσομοίωση δονήσεων υψηλής συχνότητας, που σχετίζονται με μικροδομικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας, καθώς και για την απόδοση σύνθετων υφών που συνδυάζουν ποικίλα μοτίβα και παραμέτρους. Για να ξεπεραστούν αυτά τα εμπόδια, είναι απαραίτητη μια βαθύτερη και πιο ολοκληρωμένη κατανόηση των μηχανισμών που διέπουν την ανθρώπινη απτική αντίληψη, συμπεριλαμβανομένου του τρόπου με τον οποίο το νευρικό σύστημα επεξεργάζεται τα απτικά ερεθίσματα. Μια τέτοια κατανόηση αποτελεί βασική προϋπόθεση για την εξέλιξη των υφιστάμενων τεχνολογιών απτικής ανάδρασης και για την ανάπτυξη μελλοντικών εφαρμογών που θα προσφέρουν πειστικότερες, πιο ρεαλιστικές και ολοκληρωμένες πολυαισθητηριακές εμπειρίες.

Σήμερα, η αναπαραγωγή της απτικής υφής επιχειρείται κυρίως μέσω τεχνικών όπως η απτική ανάδραση παλμών, οι ηλεκτροστατικές μέθοδοι καθώς και οι τεχνολογίες βασισμένες σε υπερήχους. Αν και αυτές οι προσεγγίσεις έχουν συμβάλει σημαντικά στη βελτίωση της απτικής εμπειρίας, εξακολουθούν να εμφανίζουν σοβαρούς περιορισμούς: συχνά αδυνατούν να αποτυπώσουν με ακρίβεια τις λεπτομέρειες της μικροδομής της υφής και να αναπαράγουν τις δονήσεις υψηλής συχνότητας που είναι κρίσιμες για την πρόκληση μιας αυθεντικής και καθηλωτικής αίσθησης αφής. Στο πλαίσιο αυτό, οι πρόσφατες εξελίξεις στην ενσωμάτωση της τεχνητής νοημοσύνης (AI) και, πιο συγκεκριμένα, των αλγορίθμων βαθιάς μάθησης (deep learning), προσφέρουν νέες προοπτικές. Τα μοντέλα αυτά έχουν τη δυνατότητα να μαθαίνουν σύνθετα πρότυπα δονήσεων και να προσαρμόζουν δυναμικά την απτική ανατροφοδότηση, επιτρέποντας τη δημιουργία εμπειριών αφής που είναι πιο εξατομικευμένες και ευέλικτες, ώστε να ανταποκρίνονται σε διαφορετικά είδη υφών και αλληλεπιδράσεων. Παρά τις υποσχόμενες δυνατότητές τους, οι τεχνολογίες αυτές βρίσκονται ακόμη σε πειραματικό στάδιο, και το πραγματικό εύρος της εφαρμογής τους – τόσο σε επίπεδο τεχνικής απόδοσης όσο και σε εμπορική κλιμάκωση – δεν έχει ακόμη αξιοποιηθεί πλήρως.

Για την πιστή και επιτυχή απόδοση των απτικών ιδιοτήτων μέσα σε εικονικά περιβάλλοντα, οι απτικοί αντιπρόσωποι (hapticproxies) οφείλουν να παρέχουν στον χρήστη απτικές εμπειρίες που όχι μόνο συνυπάρχουν και εναρμονίζονται με το εικονικό τους αντίστοιχο, αλλά και αναπαράγουν με ικανοποιητική ακρίβεια τις βασικές φυσικές παραμέτρους του αντικειμένου. Αυτές οι παράμετροι περιλαμβάνουν τόσο τις υλικές ιδιότητες, όπως η υφή και η αίσθηση της σκληρότητας ή της ομαλότητας, όσο και τις γεωμετρικές ιδιότητες, όπως το σχήμα, οι καμπυλότητες και οι διαστάσεις. Ωστόσο, η απαίτηση για αντιστοιχία μεταξύ φυσικών και εικονικών χαρακτηριστικών δημιουργεί σημαντικές προκλήσεις κλιμάκωσης. Καθώς το πλήθος των εικονικών αντικειμένων σε ένα

περιβάλλον αυξάνεται και το καθένα από αυτά διαθέτει διαφορετικές και μοναδικές απτικές ιδιότητες, ο αριθμός των φυσικών αντιπροσώπων που απαιτούνται για την ακριβή αναπαράστασή τους πολλαπλασιάζεται εκθετικά. Το γεγονός αυτό καθιστά την εφαρμογή της μεθόδου δύσκολη σε μεγάλης κλίμακας εικονικά συστήματα, καθώς προκύπτει αυξημένη πολυπλοκότητα στη διαχείριση, την υλοποίηση και την πρακτική χρήση των απτικών αντιπροσώπων.

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στον τομέα της κατασκευής απτικών αντικειμένων-αντιπροσώπων με στόχο τη δημιουργία πιο επεκτάσιμων και ευέλικτων λύσεων. Οι πρόσφατες τεχνολογικές εξελίξεις στις τεχνικές κατασκευής επιτρέπουν πλέον την παραγωγή φυσικών αντικειμένων με υψηλή λεπτομέρεια, γεγονός που έχει αξιοποιηθεί για τη δημιουργία αντικειμένων με ποικίλες απτικές ιδιότητες. Αυτά τα αντικείμενα έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί σε εικονικά περιβάλλοντα για την παροχή απτικών εμπειριών μέσω παθητικών απτικών αντιπροσώπων. Η παρούσα εργασία προχωρά ένα βήμα παραπέρα, εστιάζοντας στην ανάπτυξη αντικειμένων-αντιπροσώπων των οποίων οι απτικές ιδιότητες μπορούν να τροποποιούνται δυναμικά, προσφέροντας μεγαλύτερη ευελιξία και προσαρμοστικότητα στις πολυαισθητηριακές αλληλεπιδράσεις σε VR.

Συγκεκριμένα, τα κύρια σημεία συνεισφοράς μας περιλαμβάνουν:

1. Την εισαγωγή μιας καινοτόμου προσέγγισης για την προσομοίωση απτικών εμπειριών σε περιβάλλοντα εικονικής πραγματικότητας μέσω της ενεργοποίησης φυσικών υλικών με τεχνικές 3D εκτύπωσης.
2. Τον σχεδιασμό και την κατασκευή φυσικών υλικών, περιλαμβανομένης της τεχνολογικής διαδικασίας κατασκευής τους, καθώς και της διάθεσης των σχεδίων τους σε μορφή ανοιχτού κώδικα, προκειμένου να υποστηριχθεί η αναπαραγωγή και η περαιτέρω έρευνα από την κοινότητα.
3. Την παρουσίαση μιας αρχικής μελέτης σχετικά με την αποτελεσματικότητα των ενεργοποιημένων φυσικών υλικών στην προσομοίωση χαρακτηριστικών όπως η τραχύτητα και η σκληρότητα, καθώς και τη δυνατότητα εφαρμογής τους για την αναπαράσταση σύνθετων απτικών υφών και εμπειριών υλικών σε περιβάλλοντα VR.



Εικόνα 2.1 Οι υφές που δημιουργήθηκαν για αυτή την εφαρμογή

2.2 Αλληλεπίδραση Ανθρώπου – Υπολογιστή

Η αλληλεπίδραση ανθρώπου–υπολογιστή (Human–Computer Interaction – HCI) αποτελεί έναν πολυδιάστατο και πολυεπιστημονικό τομέα έρευνας και εφαρμογής, ο οποίος ασχολείται με τον τρόπο με τον οποίο οι άνθρωποι χρησιμοποιούν, κατανοούν και συνεργάζονται με τα υπολογιστικά συστήματα. Κεντρικός του στόχος είναι η δημιουργία τεχνολογιών που δεν είναι μόνο λειτουργικές και αποδοτικές, αλλά και εύχρηστες, προσβάσιμες και ευχάριστες στη χρήση. Για να το επιτύχει αυτό, η HCI ενσωματώνει γνώσεις από ποικίλους κλάδους:

- **Την επιστήμη των υπολογιστών**, που προσφέρει τις τεχνικές υποδομές και τους αλγορίθμους.
- **Την ψυχολογία και τις γνωστικές επιστήμες**, που μελετούν πώς οι άνθρωποι αντιλαμβάνονται την πληροφορία, μαθαίνουν και λαμβάνουν αποφάσεις.
- **Τον βιομηχανικό και γραφιστικό σχεδιασμό**, που συμβάλλουν στη δημιουργία ελκυστικών και κατανοητών διεπαφών χρήστη.
- **Την κοινωνιολογία και την ανθρωπολογία**, που εξετάζουν το κοινωνικό και πολιτισμικό πλαίσιο μέσα στο οποίο αναπτύσσεται και χρησιμοποιείται η τεχνολογία.

Η HCI επικεντρώνεται σε ένα ευρύ φάσμα ζητημάτων, όπως:

- Ο σχεδιασμός **διεπαφών χρήστη** (user interfaces), δηλαδή του τρόπου με τον οποίο ο χρήστης αλληλεπιδρά με την τεχνολογία (π.χ. οθόνες αφής, φωνητικές εντολές, συστήματα εικονικής και επαυξημένης πραγματικότητας).
- Η **ευχρηστία** (usability), δηλαδή το κατά πόσο εύκολα μπορεί κάποιος να μάθει και να χειριστεί ένα σύστημα.
- Η **προσβασιμότητα**, που διασφαλίζει ότι οι τεχνολογίες είναι αξιοποιήσιμες από όλα τα άτομα, συμπεριλαμβανομένων εκείνων με αναπηρίες.
- Η **αξιολόγηση της εμπειρίας χρήστη (UX)**, η οποία μελετά πώς αισθάνεται ο χρήστης κατά την αλληλεπίδραση με το σύστημα, πέρα από τη λειτουργικότητα.

Καθώς η τεχνολογία εξελίσσεται με ταχύ ρυθμό – από τα παραδοσιακά υπολογιστικά περιβάλλοντα έως τις φορητές συσκευές, το διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT), την τεχνητή νοημοσύνη και τα συστήματα εικονικής πραγματικότητας – η HCI καλείται να ανταποκριθεί σε νέες προκλήσεις. Για παράδειγμα, σήμερα διερευνώνται ζητήματα όπως η εμπιστοσύνη και η διαφάνεια στην αλληλεπίδραση με «έξυπνα» συστήματα, η προστασία της ιδιωτικότητας, αλλά και η ηθική διάσταση του σχεδιασμού τεχνολογίας.

Τέλος, η HCI δεν περιορίζεται μόνο στη βελτίωση της αποτελεσματικότητας των εργαλείων, αλλά προωθεί και μια πιο ανθρώπινη προσέγγιση στη σχέση μας με την τεχνολογία. Με άλλα λόγια, επιδιώκει να εξασφαλίσει ότι οι υπολογιστές προσαρμόζονται στις ανάγκες και τις δυνατότητες των ανθρώπων και όχι το αντίστροφο, συμβάλλοντας έτσι στη δημιουργία τεχνολογικών εμπειριών που είναι πιο φυσικές, περιεκτικές και κοινωνικά χρήσιμες.

2.3 Απτική Αλληλεπίδραση Ανθρώπου – Υπολογιστή

Η απτική αλληλεπίδραση ανθρώπου–υπολογιστή (HHCI) αποτελεί έναν εξειδικευμένο κλάδο της HCI που επικεντρώνεται στη χρήση της αφής ως μέσου επικοινωνίας και αλληλεπίδρασης με τα υπολογιστικά συστήματα. Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές διεπαφές, που βασίζονται κυρίως στην όραση και την ακοή, η HHCI αξιοποιεί τις **απτικές (haptic)** και **κιναισθητικές (kinesthetic)** αισθήσεις για να προσφέρει μια πιο φυσική και ρεαλιστική εμπειρία χρήσης. Οι τεχνολογίες αυτές βασίζονται στην παροχή **ανάδρασης δύναμης, δόνησης ή πίεσης**, επιτρέποντας στον χρήστη να «νιώσει» εικονικά αντικείμενα ή ενέργειες με τρόπο που μιμείται την πραγματική φυσική αλληλεπίδραση.

Η εφαρμογή της HHCI έχει σημαντική επίδραση σε πολλούς τομείς:

- **Ιατρική και εκπαίδευση:** Χειρουργικοί προσομοιωτές με απτική ανάδραση επιτρέπουν στους φοιτητές ιατρικής να εξασκούνται σε εικονικές επεμβάσεις, αναπαράγοντας την αίσθηση του ιστού και των οργάνων χωρίς κίνδυνο για τον ασθενή.
- **Ψυχαγωγία και gaming:** Τα σύγχρονα χειριστήρια παιχνιδιών με απτική ανάδραση ενισχύουν την εμπύθιση, προσφέροντας στον χρήστη την αίσθηση πρόσκρουσης, επιτάχυνσης ή ακόμα και της υψής αντικειμένων.
- **Εικονική και επαυξημένη πραγματικότητα (VR/AR):** Η προσθήκη απτικής ανατροφοδότησης κάνει τις εμπειρίες πιο ρεαλιστικές, επιτρέποντας στους χρήστες όχι μόνο να βλέπουν αλλά και να «νιώθουν» το εικονικό περιβάλλον.
- **Βιομηχανία και τηλεχειρισμός:** Ρομποτικά συστήματα με απτική ανάδραση χρησιμοποιούνται σε επικίνδυνα περιβάλλοντα (π.χ. διαστημικές αποστολές, υποβρύχιες εργασίες) επιτρέποντας στους χειριστές να εκτελούν ακριβείς κινήσεις εξ αποστάσεως με αίσθηση αφής.

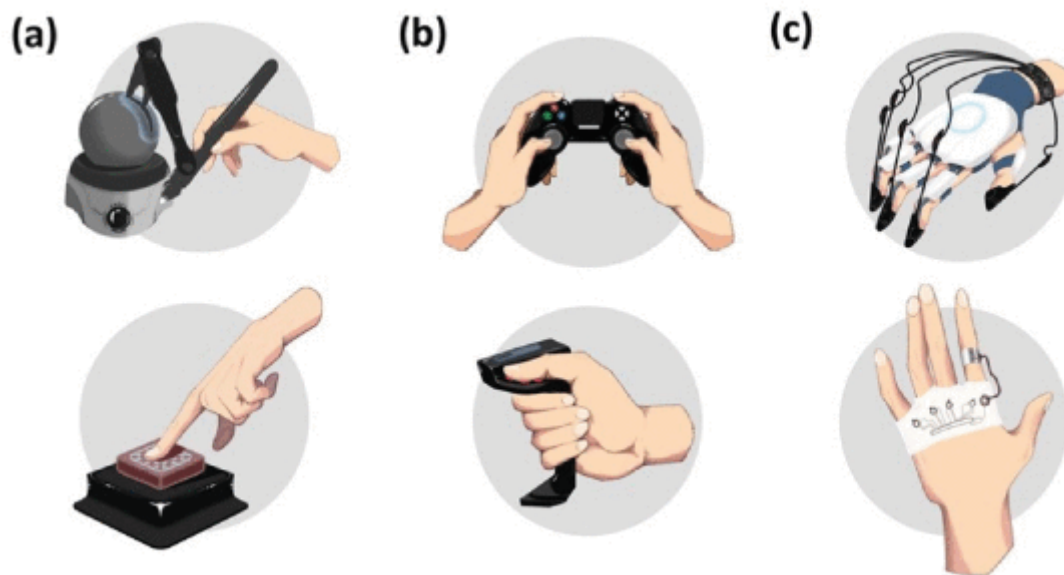
Η έρευνα στην HHCI επικεντρώνεται επίσης σε προκλήσεις, όπως:

- Η **ρεαλιστική αναπαραγωγή υφών και δυνάμεων**, ώστε οι χρήστες να αντιλαμβάνονται με ακρίβεια το εικονικό περιβάλλον.
- Η **προσαρμογή στις ατομικές ανάγκες των χρηστών**, π.χ. σε άτομα με προβλήματα όρασης, όπου η απτική ανάδραση μπορεί να αποτελέσει βασικό εργαλείο προσβασιμότητας.
- Η **μείωση του κόστους και της πολυπλοκότητας** τέτοιων συστημάτων, ώστε να καταστούν πιο ευρέως διαθέσιμα.

Συνολικά, η απτική αλληλεπίδραση αποτελεί μια καινοτόμο διάσταση στη σχέση ανθρώπου–υπολογιστή, καθώς προσθέτει την αίσθηση της αφής – μια από τις πιο θεμελιώδεις αισθήσεις μας – στη διαδικασία αλληλεπίδρασης με την τεχνολογία. Με αυτόν τον τρόπο, η HHCI δεν περιορίζεται μόνο στην ενίσχυση της εμπειρίας χρήστη, αλλά ανοίγει νέους δρόμους για την εκπαίδευση, την ψυχαγωγία, την εργασία και την κοινωνική ένταξη.

2.4 Απτικές Συσκευές – Εφαρμογές

Σήμερα, σε τεχνολογικό επίπεδο, έχουν αναπτυχθεί πλήθος συσκευών και εφαρμογών που αξιοποιούν την αίσθηση της αφής, με σκοπό να διευκολύνουν την αλληλεπίδραση των ατόμων με προβλήματα όρασης με τον ψηφιακό κόσμο και να βελτιώσουν την ποιότητα της καθημερινής τους ζωής. Τέτοιες τεχνολογίες επιτρέπουν, για παράδειγμα, την ανάγνωση ψηφιακών κειμένων μέσω **δυναμικών απτικών οθονών Braille**, την πλοήγηση σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους με τη χρήση **απτικών σημάτων σε έξυπνα βραχιόλια ή ρολόγια**, καθώς και την αλληλεπίδραση με εφαρμογές κινητών τηλεφώνων που παρέχουν **δονήσεις κατεύθυνσης** για ασφαλέστερη μετακίνηση. Έτσι, η αφή λειτουργεί ως βασικό κανάλι επικοινωνίας με τις συσκευές, αναπληρώνοντας σε σημαντικό βαθμό την έλλειψη οπτικών ερεθισμάτων.



Εικόνα 2.2 Απτικές Συσκευές [3]

Παράλληλα, την τελευταία δεκαετία έχουν σημειωθεί σημαντικές εξελίξεις στην ανάπτυξη συσκευών που επιτρέπουν στον χρήστη όχι μόνο να αγγίζει εικονικά αντικείμενα, αλλά και να αισθάνεται τις δυνάμεις που αυτά θα ασκούσαν στον πραγματικό κόσμο. Ενδεικτικά παραδείγματα αποτελούν τα **γάντια απτικής ανάδρασης** (haptic gloves), τα οποία μεταφέρουν στον χρήστη την αίσθηση υφής, πίεσης ή ακόμα και θερμοκρασίας, καθώς και οι **χειριστήριες συσκευές με ανάδραση δύναμης**, που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές εικονικής πραγματικότητας, στην εκπαίδευση ή στη βιομηχανία. Αυτές οι τεχνολογίες δεν περιορίζονται μόνο στη βελτίωση της εμπειρίας χρήστη σε παιχνίδια ή προσομοιώσεις, αλλά βρίσκουν εφαρμογή και σε τομείς όπως η **ιατρική εκπαίδευση**, η **τηλεχειρουργική** και ο **τηλεχειρισμός ρομποτικών συστημάτων**.

Η πρόοδος στον τομέα της απτικής αλληλεπίδρασης καταδεικνύει ότι η αίσθηση της αφής αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο όχι μόνο για την ενίσχυση της προσβασιμότητας, αλλά και για τη δημιουργία πιο φυσικών και εμπυθιστικών εμπειριών σε ευρύ φάσμα δραστηριοτήτων. Ως εκ τούτου, έχουν προταθεί διάφοροι τύποι απτικών συσκευών, με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά (π.χ. βαθμοί ελευθερίας, φόρτος εργασίας, μέγιστες δυνάμεις, μέγιστη ακαμψία κ.λπ.).

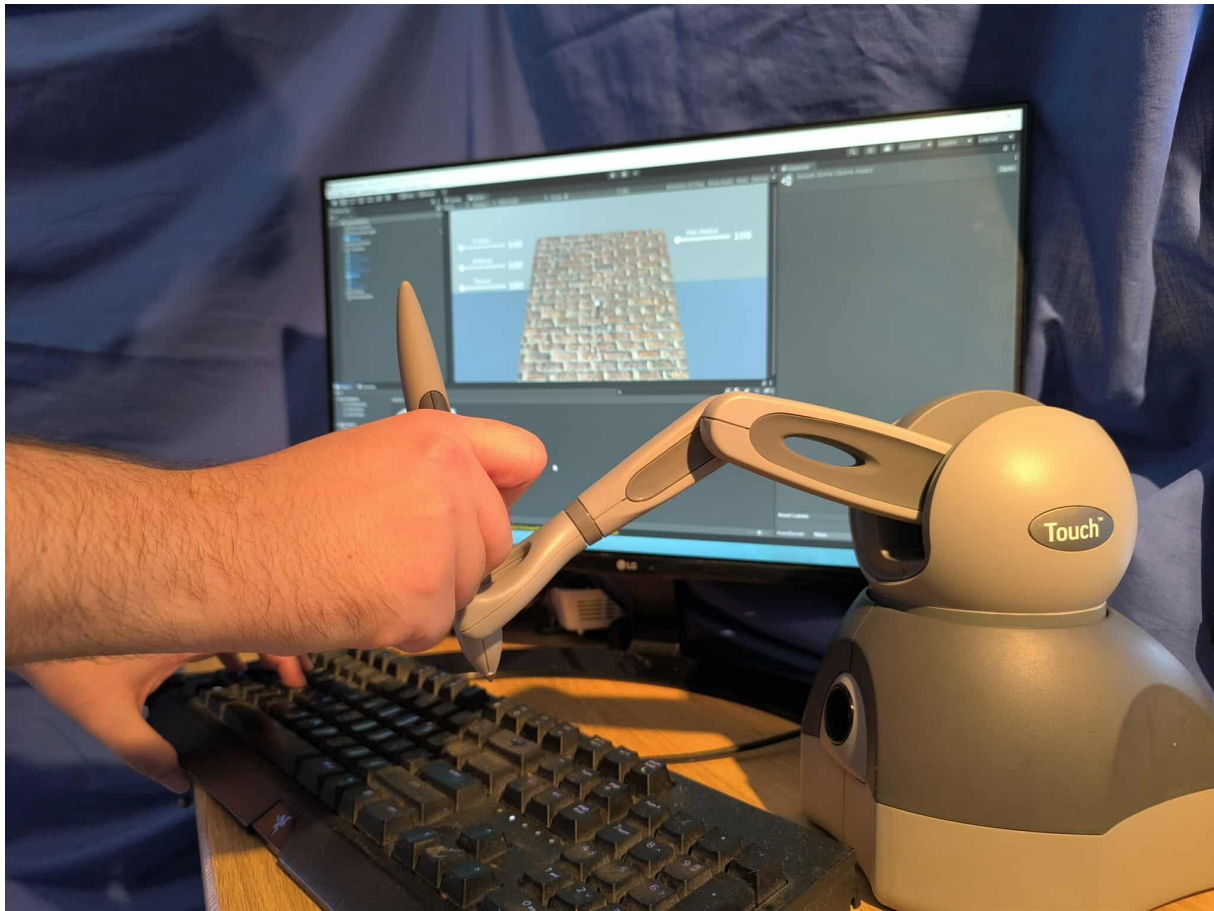
DesktopHaptics

Αυτές οι συσκευές είναι συστήματα κιναισθητικής ανάδρασης. Αποτελούνται από αισθητήρες που αντιλαμβάνονται την κίνηση του γραφιδιού που κινείται από τον χρήστη. Επιπλέον, υπάρχουν οι ενεργοποιητές (ηλεκτρικοί κινητήρες) που παράγουν την δύναμη ανάδρασης κατά την επαφή με το εικονικό αντικείμενο. Η ανάδραση δύναμης από άκαμπτα αντικείμενα υπολογίζεται συνήθως χρησιμοποιώντας το μοντέλο δύναμης ελατηρίου. Για παραμορφώσιμα αντικείμενα, η ανάδραση δύναμης υπολογίζεται απευθείας από τις ιδιότητες παραμόρφωσης του μοντέλου.

Οι συσκευές ανάδρασης δύναμης μπορούν να χωριστούν περαιτέρω σε συσκευές αντίστασης και συσκευές ενεργές. Οι συσκευές αντίστασης περιορίζουν μόνο την κίνηση (όπως το τιμόνι στα βιντεοπαιχνίδια), ενώ οι ενεργές συσκευές χρησιμοποιούν κινητήρες για να αναγκάσουν το σώμα να κινηθεί. Οι ενεργές συσκευές μπορούν να προσομοιώσουν πολλές κινήσεις, αλλά πρέπει να τροφοδοτούνται ενεργά, ενώ οι συσκευές αντίστασης μπορούν συχνά να λειτουργούν παθητικά. Τα ενεργά συστήματα είναι πιο περίπλοκα από τα παθητικά, γεγονός που τα καθιστά πιο δύσκολα στο σχεδιασμό, την κατασκευή και τη χρήση. Μια συσκευή απτικής ανάδρασης για επιτραπέζιους

υπολογιστές, που είναι ένας ρομποτικός βραχίονας με ένα γραφίδα που κρατά ο χρήστης στο χέρι του, είναι μια τέτοια συσκευή. Η συσκευή παρακολουθεί την κίνηση της γραφίδας και είναι υπεύθυνη για την ανάδραση δύναμης που παρέχεται στη γραφίδα.

Μια σημαντική και ευρέως χρησιμοποιούμενη συσκευή αυτής της κατηγορίας είναι το OmniPHANToM της SensAble Technologies, το οποίο διαθέτει 6 βαθμούς ελευθερίας για την ανάγνωση της θέσης του αισθητήρα και τρεις ή έξι βαθμούς ελευθερίας για ανατροφοδότηση, ανάλογα με το μοντέλο. Η συσκευή είναι σε θέση να παρέχει ανάδραση δύναμης στα επίπεδα x, y και z με μέγιστη εφαρμοζόμενη δύναμη 3,3N. Η ανάδραση δύναμης είναι περίπου 16,3 cm (πλάτος) × 12,2 cm (ύψος) × 7,1 cm (βάθος). Για τη συσκευή OmniPHANToM, η γωνία βάσης περιορίζεται από την κατασκευή σε περίπου $\pm 60^\circ$.



Εικόνα 2.3 Η συσκευή Touch κατά την διάρκεια χρήσης στην εφαρμογή

Μια άλλη συνηθισμένη απτική συσκευή αυτής της κατηγορίας είναι η NovintFalcon, που κυκλοφόρησε το 2007 και ήταν η πρώτη απτική συσκευή που προσέφερε υψηλής ανάλυσης τρισδιάστατη ανάδραση στον χρήστη με 3 βαθμούς ελευθερίας (DOF). Σύμφωνα με την Novint, ο συνολικός χώρος εργασίας μπορεί να θεωρηθεί περίπου ένας κύβος με μήκος πλευράς 10 cm, ενώ ως διεπαφή προγραμματισμού, η Novint παρέχει ένα κιτ ανάπτυξης λογισμικού βασισμένο σε C++ για Windows. Η σχετικά χαμηλή τιμή του NovintFalcon το έχει καταστήσει ένα ενδιαφέρον εργαλείο για τους ερευνητές. Σχετική έρευνα προσδιορίζει και αξιολογεί τη χρηστικότητα του Falcon στην αναγνώριση και εξερεύνηση τρισδιάστατων απτικών σχημάτων με τρεις διαφορετικές μεθόδους, καταγράφοντας υψηλές επιδόσεις των χρηστών στην εξερεύνηση και την νοητική αναπαράσταση των προτεινόμενων απτικών σχημάτων.

Surface Haptics

Τα συστήματα απτικής ανάδρασης διεγείρουν την αίσθηση της αφής του χρήστη. Επιπλέον, η μηχανική ή ηλεκτρική διέγερση των υποδοχέων κατατάσσει τις συσκευές σε τρεις κατηγορίες. Συσκευές που χρησιμοποιούν μηχανική ενέργεια για να διεγείρουν τους μηχανικούς υποδοχείς. Μια δεύτερη κατηγορία συσκευών ενεργοποιεί απευθείας τα νεύρα χρησιμοποιώντας ένα ηλεκτρικό πεδίο. Μια τρίτη κατηγορία χρησιμοποιεί εστιασμένους υπερήχους για να ενεργοποιήσει τους υποδοχείς. Πολλά συστήματα απτικής ανάδρασης χρησιμοποιούν δόνηση (ονομάζεται επίσης δονητική ανάδραση), ηλεκτρικά σήματα, πίεση αέρα και ηχητικά κύματα. Γενικά προσομοιώνουν την επαφή μεταξύ των χεριών και των αντικειμένων. Για παράδειγμα, οι χρήστες μπορούν να αγγίξουν και να αισθανθούν το περίγραμμα ή την τραχύτητα μιας εικόνας που εμφανίζεται στην οθόνη. Οι επιφάνειες, τα σχήματα και οι υφές είναι δημοφιλή θέματα στην απτική εξερεύνηση. Οι απτικές συσκευές αφής προσομοιώνουν τη θερμοκρασία, την υφή, την πίεση, τη διάτρηση, την τριβή, την τραχύτητα και τα σχήματα που αντιλαμβάνονται οι δερματικοί υποδοχείς κάτω από το δέρμα μας. Μια τυπική συσκευή αφής αποτελείται από ένα σύνολο απτικών στοιχείων/ακίδων. Ο αριθμός των ακίδων, η συχνότητα και η πυκνότητα των ακίδων είναι οι κύριοι παράμετροι που αφορούν το σχεδιασμό μιας απτικής συσκευής. Η υψηλότερη πυκνότητα και συχνότητα έχουν ως αποτέλεσμα μια ομαλότερη και καλύτερη εμπειρία χρήστη. Μια ανανεώσιμη οθόνη Braille είναι μια ηλεκτρομηχανική συσκευή που εμφανίζει χαρακτήρες Braille διαδοχικά, ανυψώνοντας και χαμηλώνοντας ακίδες μέσω οπών σε μια επίπεδη επιφάνεια σε απόκριση σε ένα ηλεκτρονικό σήμα. Η ηλεκτροστατική ανάδραση χρησιμοποιεί ηλεκτρικά ερεθίσματα για να παρέχει απτική διέγερση στις νευρικές απολήξεις του δέρματος του χρήστη. Η ηλεκτροστατική ανάδραση μπορεί να δημιουργήσει εξαιρετικά ρεαλιστικές εμπειρίες για χρήστες που φορούν στολές ή γάντια εξοπλισμένα με τεχνολογία ηλεκτροστατικής επαφής. Τα απτικά ποντίκια επιτρέπουν σε τυφλούς και άτομα με προβλήματα όρασης να πλοηγούνται στην οθόνη ενός υπολογιστή παρέχοντας απτική ανάδραση στα δάχτυλα του χρήστη. Η υπερηχητική απτική ανάδραση χρησιμοποιεί ηχητικά κύματα υψηλής συχνότητας για να προσομοιώσει τις αισθήσεις σε ένα περιβάλλον. Δύο ή περισσότεροι πομποί στέλνουν υπερήχους μεταξύ τους για να δημιουργήσουν ένα πεδίο απτικής ανάδρασης, δημιουργώντας αισθήσεις για τους χρήστες που απλά περπατούν μέσα στο πεδίο. Η υπερηχητική απτική ανάδραση δεν απαιτεί από όσους βιώνουν την απτική ανάδραση να φορούν οι ίδιοι τις συσκευές. Ωστόσο, είναι πιο ακριβή και δημιουργεί μια λιγότερο ζωντανή εμπειρία σε σύγκριση με τις δονητικές και ηλεκτροστατικές αντίστοιχες τεχνολογίες.

Wearable Haptics

Η ανάπτυξη της εικονικής πραγματικότητας απαιτεί ένα νέο είδος απτικής ανάδρασης, για παράδειγμα ένας χρήστης που κινείται σε ένα μεγάλο χώρο εργασίας ενώ ταυτόχρονα λαμβάνει ανάδραση δύναμης σε συγκεκριμένα μέρη του σώματός του (π.χ. ολόκληρο το χέρι, τα δάχτυλα). Η ποιότητα της διαδραστικής εμπειρίας με τον πραγματικό και τον εικονικό κόσμο χρησιμοποιώντας φορητές τεχνολογίες HMI εξαρτάται από τις διπλής κατεύθυνσης απτικές διεπαφές που προσφέρουν και τις πληροφορίες που στέλνουν και λαμβάνουν σε πραγματικό χρόνο με βάση την αφή. Η ανάπτυξη της εικονικής πραγματικότητας έδωσε στον χρήστη τη δυνατότητα να βιώσει εικονικά αντικείμενα με τρισδιάστατα γραφικά. Οι φορητές συσκευές VR συνέβαλαν σε αυτό. Οι πιο γνωστές είναι το Oculus Rift και το HTC Vive. Οι πρόοδοι σε τομείς όπως η επιστήμη των υλικών έχουν οδηγήσει περαιτέρω στην υλοποίηση νέων φορητών και εμφυτεύσιμων συσκευών με εύκαμπτες, ελαστικές μορφές, οι οποίες μπορούν να προσαρμοστούν στο ανθρώπινο σώμα για την ακριβή ανίχνευση ερεθισμάτων. Τέτοιες συσκευές μπορούν να έχουν διάφορες μορφές, όπως touchpads, ζώνες για το χέρι/καρπό, γιλέκα και γάντια. Επιπλέον, το απτικό γάντι είναι μια τυπική μορφή φορητής απτικής συσκευής. Πρόκειται συχνά για γάντια με ενσωματωμένους αισθητήρες (π.χ. αφής, πίεσης, κάμψης). Στα σημερινά έξυπνα γάντια, η τεχνολογία που τα χαρακτηρίζει καθορίζει επίσης την εφαρμογή τους.

Χωρίστηκαν σε γάντια βασισμένα σε χειρονομίες (εφαρμογή στην ιατρική αποκατάσταση), γάντια βασισμένα στην αφή (εφαρμογή στην ανθρώπινη επικοινωνία) και γάντια με συνδυασμό χειρονομίας και αφής για μια πλουσιότερη διαδραστική εμπειρία. Οι εξελίξεις στον τομέα των ηλεκτρονικών δερμάτων οδηγούν επίσης στην ανάπτυξη διεπαφών βασισμένων σε έξυπνα γάντια που επιτρέπουν αμφίδρομη επικοινωνία τόσο με αισθητήρες αφής όσο και με ενεργοποιητές απτικής ανάδρασης. Με βάση αυτή τη φιλοσοφία, πολλές εταιρείες ανέπτυξαν και κατασκεύασαν απτικά γάντια, με τα πιο αντιπροσωπευτικά να είναι τα CyberGrasp, H-glove, Dexmo, Haptx, Plexus και Vrglun.



Εικόνα 2.4 Το VIVE Focus Series από την VIVE [4]

2.5 Αισθητήρες Αφής Δέρματος

Οι άνθρωποι αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον μέσω της όρασης, της ακοής και, φυσικά, της αφής. Η αλληλεπίδραση με το περιβάλλον μέσω της αφής, ωστόσο, είναι ενεργητική. Οι άνθρωποι διαθέτουν διάφορες αισθήσεις, μέσα από τις οποίες αντιλαμβάνονται και ερμηνεύουν τον κόσμο γύρω τους. Η όραση μάς προσφέρει εικόνες, σχήματα και χρώματα· η ακοή μας δίνει τη δυνατότητα να ακούμε ήχους, να επικοινωνούμε και να αντιλαμβανόμαστε τον χώρο. Ωστόσο, η αφή διαφέρει, γιατί δεν περιορίζεται μόνο στη λήψη ερεθισμάτων, αλλά απαιτεί την ενεργητική συμμετοχή του ανθρώπου. Για να «νιώσει» κάποιος την υφή, τη θερμοκρασία ή το σχήμα ενός αντικειμένου, χρειάζεται να το αγγίξει, να το εξερευνήσει με τα χέρια του ή με άλλα μέρη του σώματος. Έτσι, η αφή δεν είναι παθητική διαδικασία, αλλά μια ενεργητική αλληλεπίδραση, κατά την οποία ο άνθρωπος επηρεάζει και επηρεάζεται από το περιβάλλον. Μέσα από αυτή τη διαδικασία δημιουργείται μια πιο άμεση και προσωπική σχέση με τα πράγματα, που ενισχύει την εμπειρία και τη γνώση του κόσμου.

Αυτού του είδους οι πληροφορίες, δηλαδή οι πληροφορίες που λαμβάνονται μέσω της αφής, ανήκουν στις λεγόμενες «πληροφορίες του δέρματος» και γίνονται αντιληπτές από τα αισθητήρια όργανα που βρίσκονται σε αυτό. Στο δέρμα μας υπάρχουν εξειδικευμένοι υποδοχείς, όπως είναι οι μηχανοϋποδοχείς, οι θερμοϋποδοχείς και οι αλγοϋποδοχείς, που αντιδρούν σε συγκεκριμένα ερεθίσματα. Έτσι, μπορούμε να κατανοήσουμε την υφή ενός υλικού, να νιώσουμε αν κάτι είναι κρύο ή ζεστό, σκληρό ή απαλό, ακόμα και να αντιληφθούμε τον πόνο, ο οποίος λειτουργεί προστατευτικά για τον οργανισμό.

Η λειτουργία αυτή είναι καθοριστική για την καθημερινή μας ζωή, καθώς επιτρέπει στον άνθρωπο να προσαρμόζεται στο περιβάλλον, να εκτελεί δραστηριότητες με ακρίβεια, αλλά και να διαμορφώνει βαθύτερη σχέση με τα αντικείμενα και τα όντα που τον περιβάλλουν. Επιπλέον, η αφή, σε αντίθεση με την όραση ή την ακοή που μπορούν να λειτουργούν παθητικά, απαιτεί σωματική εμπλοκή και ενεργητική διερεύνηση. Γι' αυτό η εμπειρία που προκύπτει μέσω του δέρματος έχει πιο άμεσο, βιωματικό και προσωπικό χαρακτήρα.

Κάθε τύπος μηχανικού υποδοχέα στο δέρμα έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά, τόσο ως προς τη συχνότητα με την οποία ενεργοποιείται όσο και ως προς την ικανότητά του να αντιλαμβάνεται δονήσεις διαφορετικής συχνότητας. Για παράδειγμα, οι δίσκοι του Merkel ανταποκρίνονται κυρίως σε σταθερή πίεση και μας επιτρέπουν να ξεχωρίζουμε την υφή και το σχήμα των αντικειμένων, ενώ τα σωμάτια του Meissner ενεργοποιούνται γρήγορα και είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα σε ελαφρά αγγίγματα και κινήσεις πάνω στην επιφάνεια του δέρματος. Αντίθετα, τα σωμάτια του Pacini είναι σχεδιασμένα να ανιχνεύουν υψηλής συχνότητας δονήσεις, κάτι που μας βοηθά να αντιλαμβανόμαστε λεπτές δονήσεις ή απότομα χτυπήματα, ενώ τα σωμάτια του Ruffini ανταποκρίνονται σε τέντωμα του δέρματος, συμβάλλοντας έτσι στην αίσθηση της κίνησης και της θέσης των άκρων.

Αυτή η εξειδίκευση επιτρέπει στο δέρμα να λειτουργεί σαν ένα πολύπλοκο και εξαιρετικά ευαίσθητο αισθητήριο όργανο, ικανό να συλλέγει πληροφορίες με μεγάλη ακρίβεια. Χάρη στην ποικιλία και τη συνεργασία των μηχανικών υποδοχέων, ο άνθρωπος μπορεί να αλληλεπιδρά με το περιβάλλον του με τρόπο ενεργό, λεπτομερειακό και πολυδιάστατο.

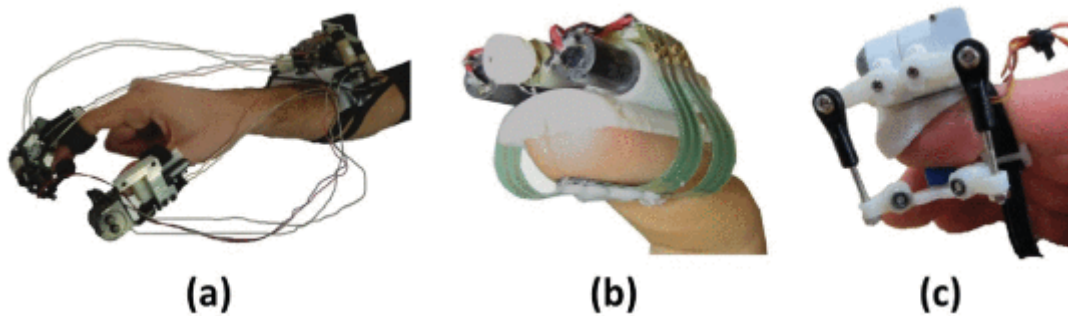
Γενικά, οι αισθητήρες αφής που βρίσκονται στα χέρια δεν είναι ομοιόμορφα κατανομημένοι. Ορισμένες περιοχές, όπως οι άκρες των δακτύλων, διαθέτουν υψηλή πυκνότητα υποδοχέων, γεγονός που επιτρέπει την ακριβή αντίληψη της υφής και των λεπτομερειών των αντικειμένων, ενώ άλλες περιοχές, όπως η παλάμη, έχουν χαμηλότερη πυκνότητα και επομένως μειωμένη ευαισθησία στην αφή.

Οι αισθητήρες αυτοί χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο που προσαρμόζονται στα ερεθίσματα: **ταχείς υποδοχείς προσαρμογής** και **βραδείας προσαρμογής**. Οι ταχείς υποδοχείς ανταποκρίνονται γρήγορα σε αλλαγές και δονήσεις, παρέχοντας πληροφορίες για κινούμενα ή ελαφρά αγγιζόμενα αντικείμενα. Αντίθετα, οι βραδείας προσαρμογής υποδοχείς ενεργοποιούνται πιο αργά και διατηρούν την αντίδρασή τους για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, επιτρέποντας την αντίληψη σταθερών πιέσεων ή παρατεταμένων αγγιγμάτων.

Με αυτόν τον τρόπο, το δέρμα των χεριών συνδυάζει διαφορετικούς τύπους υποδοχέων για να παρέχει μια ολοκληρωμένη και πολυδιάστατη αίσθηση αφής, ικανή να υποστηρίξει τόσο την ακριβή χειρωνακτική εργασία όσο και την ευαίσθητη αντίληψη περιβαλλοντικών ερεθισμάτων.

Σε αντίθεση με την όραση και την ακοή, που περιορίζονται σε συγκεκριμένα όργανα (μάτια και αυτιά αντίστοιχα), οι αισθητήρες αφής είναι κατανομημένοι σε όλο το σώμα. Αυτό σημαίνει ότι σχεδόν κάθε τμήμα του δέρματος μπορεί να αντιληφθεί εξωτερικά ερεθίσματα, παρέχοντας συνεχή και ευρεία αίσθηση του περιβάλλοντος. Η κατανομή αυτή επιτρέπει στον άνθρωπο όχι μόνο να αντιλαμβάνεται επαφές και κινήσεις στα χέρια και τα πόδια, αλλά και να αντιλαμβάνεται θερμοκρασιακές αλλαγές,

πίεση ή πόνο σε διαφορετικά σημεία του σώματος, συμβάλλοντας στην ασφάλεια, την κίνηση και την προσαρμογή στο περιβάλλον.



Εικόνα 2.5 Συσκευές απτικής αλληλεπίδρασης με το δέρμα [5]

2.6 Σχετική Βιβλιογραφία

Η έρευνα στον τομέα της απτικής ανατροφοδότησης σε εικονικά και επεκταμένα περιβάλλοντα έχει γνωρίσει σημαντική ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια, καλύπτοντας θέματα όπως η διάκριση υφής και σκληρότητας, η πολυμορφική απτική ανατροφοδότηση και οι πολυτροπικές προσεγγίσεις που συνδυάζουν όραση, αφή και άλλες αισθήσεις.

Η μελέτη των Hodaya Dahan και συνεργατών [6] επικεντρώθηκε στην ανάπτυξη και συστηματική αξιολόγηση ενός απτικού συστήματος εικονικής πραγματικότητας (VR) για τη μέτρηση της ικανότητας διάκρισης σκληρότητας και υφής σε ανθρώπους. Στόχος ήταν η σύγκριση των αποτελεσμάτων του εικονικού τεστ με καθιερωμένα κλινικά εργαλεία, όπως το Shape/Texture Identification Test και το Moberg Pick-Up Test, τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως για την εκτίμηση της απτικής αντίληψης και της αισθητικοκινητικής λειτουργίας. Στη μελέτη συμμετείχαν 44 υγιείς ενήλικες, οι οποίοι αλληλεπιδρούσαν με εικονικές επιφάνειες μέσω της απτικής συσκευής 3D Systems Touch. Οι συμμετέχοντες κλήθηκαν να αξιολογήσουν ζεύγη εικονικών επιφανειών που διέφεραν είτε στην τριβή είτε στη σκληρότητα, επιλέγοντας κάθε φορά την επιφάνεια που θεωρούσαν πιο λεία ή πιο σκληρή.

Η μεθοδολογία περιλάμβανε την εφαρμογή ενός δυναμικού συστήματος “staircase”, μέσω του οποίου η δυσκολία των ζευγών επιφανειών προσαρμοζόταν συνεχώς ανάλογα με τις προηγούμενες απαντήσεις των συμμετεχόντων, επιτρέποντας έτσι την ακριβή εκτίμηση του κατωφλίου διακριτικότητας κάθε ατόμου. Τα αποτελέσματα έδειξαν πολύ υψηλή συμφωνία με τις παραδοσιακές κλινικές μετρήσεις, υποδεικνύοντας ότι το προτεινόμενο VR απτικό τεστ είναι αξιόπιστο και έγκυρο. Η μελέτη κατέδειξε επίσης ότι η χρήση εικονικής πραγματικότητας μπορεί να προσφέρει ευέλικτες, επαναλαμβανόμενες και τυποποιημένες συνθήκες μέτρησης, οι οποίες δεν εξαρτώνται από φυσικά αντικείμενα ή περιορισμούς χώρου, καθιστώντας την προσέγγιση αυτή ιδιαίτερα υποσχόμενη για εφαρμογές σε κλινικά και ερευνητικά περιβάλλοντα ως εναλλακτικό ή συμπληρωματικό εργαλείο αξιολόγησης απτικής αντίληψης.

Οι υπάρχουσες εφαρμογές εικονικής πραγματικότητας (VR) συχνά αποτυγχάνουν να αναπαράγουν με ακρίβεια την αίσθηση της αφής όπως βιώνεται στον πραγματικό κόσμο, ειδικά την αίσθηση της υφής κατά την κίνηση πάνω σε μια επιφάνεια. Οι παραδοσιακές μέθοδοι απαιτούν ξεχωριστό μοντέλο για κάθε υφή, γεγονός που δυσχεραίνει σημαντικά την κλιμάκωση και τη γενίκευση σε νέες υφές. Στο πλαίσιο αυτό, οι Negin Heravi και συνεργάτες [7,8] παρουσίασαν την ανάπτυξη και αξιολόγηση ενός μοντέλου μηχανικής μάθησης για ρεαλιστική απτική απόδοση σε πραγματικό χρόνο σε VR περιβάλλοντα. Το προτεινόμενο μοντέλο βασίζεται σε νευρωνικό δίκτυο που λαμβάνει ως είσοδο εικόνες από τον οπτικο-απτικό αισθητήρα GelSight, καθώς και δεδομένα κίνησης και πίεσης του χρήστη. Η έξοδος του δικτύου είναι ένα φάσμα επιταχύνσεων (DFT magnitude), το οποίο στη

συνέχεια μετατρέπεται σε δονητική ανατροφοδότηση μέσω ενός υψηλής συχνότητας vibrotactile transducer συνδεδεμένου με τη συσκευή 3D Systems Touch. Η μέθοδος αξιολογήθηκε πειραματικά σε 25 συμμετέχοντες, μέσα από τέσσερις φάσεις: σύγκριση ομοιότητας, forced-choice δοκιμασίες, αξιολόγηση χαρακτηριστικών όπως τραχύ-λεπτό και γενίκευση σε νέες, άγνωστες υφές. Τα αποτελέσματα κατέδειξαν ότι το μοντέλο μπορεί να λειτουργήσει σε πραγματικό χρόνο, να κλιμακώνεται εύκολα σε μεγάλο αριθμό υφών και να παρέχει ρεαλιστική δονητική ανατροφοδότηση ακόμη και για επιφάνειες που δεν περιλαμβάνονταν στο αρχικό σετ εκπαίδευσης. Συνολικά, οι δύο μελέτες υπογραμμίζουν τη σημασία της μάθησης δράσης-εξαρτώμενων απτικών χαρακτηριστικών (action-conditional modeling) για την παραγωγή δυναμικών υφών που προσαρμόζονται στην κίνηση του χρήστη, παρέχοντας σημαντική βελτίωση στην ποιότητα της απτικής εμπειρίας σε VR περιβάλλοντα και προσφέροντας μια πιο ευέλικτη και επεκτάσιμη προσέγγιση σε σχέση με τις παραδοσιακές τεχνικές που βασίζονται σε ξεχωριστά μοντέλα ανά υφή.

Μια άλλη καινοτόμος προσέγγιση που επιχειρεί να ενσωματώσει όραση, ακοή και αφή σε ένα ενοποιημένο σύστημα είναι το HapticVLM [9]. Το σύστημα αυτό αποτελεί ένα πολυμορφικό πλαίσιο που αξιοποιεί Convolutional Neural Networks (CNN) για την αναγνώριση υλικών, όπως μέταλλο, ξύλο και ύφασμα, και ένα Vision- Language Model (VLM) για την αξιολόγηση του περιβάλλοντος, με στόχο τη δημιουργία ρεαλιστικής απτικής ανάδρασης σε πραγματικό χρόνο. Το HapticVLM λειτουργεί σε δύο βασικά στάδια: αρχικά, το νευρωνικό δίκτυο αναγνωρίζει το υλικό του αντικειμένου και αποδίδει την αντίστοιχη υφή μέσω συνδυασμού ήχων και δονήσεων, προσομοιώνοντας έτσι την απτική εμπειρία που θα είχε ο χρήστης στην πραγματικότητα. Στη συνέχεια, το σύστημα εκτιμά τη θερμοκρασία του αντικειμένου με βάση τις περιβαλλοντικές συνθήκες και μεταδίδει τη θερμική αίσθηση μέσω μονάδας Peltier, επιτρέποντας στους χρήστες να βιώσουν ταυτόχρονα τόσο απτική όσο και θερμική ανάδραση. Το HapticVLM αναδεικνύει τη δυνατότητα δια- αισθητηριακής ολοκλήρωσης (multimodal integration), για να βελτιστοποιήσει την απτική εμπειρία, κάτι που ανοίγει νέους δρόμους για ευφυείς VR εφαρμογές όπου οι χρήστες μπορούν να αντιλαμβάνονται υφές και περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά με μεγαλύτερη ρεαλιστικότητα και αλληλεπιδραστικότητα. Το μοντέλο προσφέρει ένα παράδειγμα συμβίωσης υπολογιστικής όρασης και απτικής ανατροφοδότησης, παρέχοντας ένα πλαίσιο που μπορεί να επεκταθεί σε εφαρμογές εκπαίδευσης, τηλε- χειρισμού και ψυχαγωγίας.

Σε μια άλλη προσέγγιση, παρουσιάζεται το ViboPneumo [10], μια λεπτή, φορητή συσκευή που τοποθετείται στο δάχτυλο και συνδυάζει δονητική και κινητική ανάδραση για την τροποποίηση της αντιληπτής τραχύτητας της επιφάνειας με την οποία έρχεται σε επαφή το δάχτυλο του χρήστη. Το σύστημα είναι σχεδιασμένο ώστε να υποστηρίζει παράλληλα την αντίληψη άλλων απτικών ιδιοτήτων, όπως θερμοκρασία ή κολλητικότητα, μέσα σε Mixed Reality (MR) περιβάλλοντα, ενισχύοντας έτσι την ρεαλιστικότητα της αλληλεπίδρασης.

Πειραματικά, οι χρήστες ήταν σε θέση να αντιληφθούν μεταβολές στην τραχύτητα των επιφανειών, επιβεβαιώνοντας ότι η συσκευή μπορεί να τροποποιήσει την αντιληπτή υφή υλικών με ακρίβεια. Η χρήση του ViboPneumo οδήγησε σε σημαντική βελτίωση της οπτικο-απτικής εμπειρίας, συγκριτικά με την αλληλεπίδραση χωρίς τη συσκευή, δείχνοντας ότι η συνδυαστική χρήση δονητικής και κινητικής ανάδρασης μπορεί να ενισχύσει την πιστότητα της απτικής ανατροφοδότησης σε MR εφαρμογές. Η μελέτη αναδεικνύει τη σημασία των φορητών, υψηλής ακρίβειας απτικών συσκευών για την αναπαραγωγή πολύπλοκων υφών και την εμπλουτισμένη αλληλεπίδραση σε επαυξημένα και μικτά περιβάλλοντα πραγματικότητας.

Μια άλλη καινοτόμος προσέγγιση παρουσιάζεται μέσω ενός απαλού, φορητού απτικού δακτυλίου (haptic ring), σχεδιασμένου για εφαρμογές σε εικονικά και επεκταμένα περιβάλλοντα (XR) [11]. Ο δακτύλιος παρέχει πολυμορφική απτική ανατροφοδότηση, συνδυάζοντας τρία συστήματα: ένα υδραυλικό για θερμική διέγερση, ένα πνευματικό για εφαρμογή πίεσης και δονητική ανάδραση, τοποθετημένο στη βάση του δακτύλου ώστε να επιτρέπει την πλήρη κίνηση του χεριού και να διατηρεί τη φυσική και ελεύθερη αλληλεπίδραση με το περιβάλλον.

Στο πλαίσιο ενός user study συμμετείχαν 15 άτομα, τα οποία καλούνταν να ταυτοποιήσουν έξι ψηφιακές υφές μέσω του δακτυλίου, συσχετίζοντάς τες με τις αντίστοιχες πραγματικές υφές. Τα αποτελέσματα έδειξαν εξαιρετικά υψηλά ποσοστά αναγνώρισης, με ακρίβεια που έφτανε έως και 90%, υπογραμμίζοντας την ικανότητα του δακτυλίου να μεταφέρει ρεαλιστικές και αναγνωρίσιμες απτικές πληροφορίες. Η μελέτη αναδεικνύει τη σημασία φορετών πολυμορφικών απτικών συσκευών που συνδυάζουν θερμική, πνευματική και δονητική ανάδραση, προσφέροντας φυσική και πλούσια εμπειρία αλληλεπίδρασης σε XR περιβάλλοντα.

Η έρευνα των Tzimos N. και συνεργατών [12] επικεντρώθηκε στην ανάπτυξη και αξιολόγηση γεωμετρικών απτικών μοτίβων για τρισδιάστατα εικονικά αντικείμενα, με στόχο τη βελτίωση της εμπειρίας αλληλεπίδρασης μέσω της αφής σε VR περιβάλλοντα. Συγκεκριμένα, δημιουργήθηκαν και δοκιμάστηκαν εννέα διαφορετικά γεωμετρικά μοτίβα χρησιμοποιώντας τη συσκευή 3D Systems Touch (Phantom Omni) και το λογισμικό H3DAPI, ενώ στην πειραματική διαδικασία συμμετείχαν τόσο τυφλοί όσο και βλέποντες χρήστες. Οι συμμετέχοντες κλήθηκαν να αναγνωρίσουν τις υφές χωρίς οπτικά ερεθίσματα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι χρήστες μπορούσαν να διακρίνουν διαφορετικές υφές, αλλά αντιμετώπιζαν δυσκολίες στην ακριβή ταυτοποίηση, υπογραμμίζοντας τα όρια των γεωμετρικών απτικών μοτίβων όσον αφορά την πιστότητα αναγνώρισης.

Σε μια αντίστοιχη μελέτη, οι Papadopoulos K. και συνεργάτες [13] μελέτησαν παρόμοια γεωμετρικά απτικά μοτίβα με έμφαση στην τραχύτητα ως βασική απτική μεταβλητή. Η έρευνα διερεύνησε την αναγνώριση των παραμέτρων τριβής και σκληρότητας μέσω της απτικής συσκευής Geomagic Touch, σε χρήστες με και χωρίς οπτική αναπηρία. Τα ευρήματα κατέδειξαν ότι η σωστή διάκριση των επιφανειών απαιτεί αισθητά διαφοροποιημένες υφές, ενώ οι χρήστες με οπτική αναπηρία χρειάστηκαν περισσότερο χρόνο και προσπάθεια για να αντιληφθούν τις συγκεκριμένες ιδιότητες. Αυτό υπογραμμίζει την ανάγκη για ειδική σχεδίαση περιεχομένου απτικής διεπαφής, με έμφαση στην προσβασιμότητα και στη δυνατότητα διαφοροποίησης των απτικών χαρακτηριστικών για όλους τους χρήστες.

Συνολικά, οι δύο μελέτες δείχνουν ότι η ανάπτυξη τρισδιάστατων απτικών μοτίβων μπορεί να βελτιώσει την εμπειρία αλληλεπίδρασης με εικονικά αντικείμενα, αλλά η αποτελεσματική διάκριση των υφών απαιτεί σαφή γεωμετρική διαφοροποίηση και προσαρμογή στις ανάγκες των χρηστών με ειδικές δεξιότητες, στοιχείο κρίσιμο για την υλοποίηση προσιτών και ρεαλιστικών απτικών διεπαφών στο πλαίσιο του Tactile Internet και των VR/MR εφαρμογών.

Η μελέτη των Ruiz και συνεργατών [14] προτείνει μια μεθοδολογία για την εκπαίδευση μοντέλων αναγνώρισης αντικειμένων που αξιοποιούν τόσο οπτικά όσο και απτικά δεδομένα. Οι ερευνητές χρησιμοποίησαν συνθετικά δεδομένα από 3D προσομοιώσεις, δεδομένου ότι η συλλογή πραγματικών απτικών δειγμάτων είναι δύσκολη και χρονοβόρα. Η προσέγγιση αυτή αποδεικνύεται οικονομική και εύκολα επεκτάσιμη, καθώς επιτρέπει τη δημιουργία μεγάλων ποσοτήτων δεδομένων χωρίς την ανάγκη φυσικής συλλογής ή σύνθετων πειραμάτων.

Τα αποτελέσματα της μελέτης δείχνουν ότι η συνδυαστική χρήση εικονικών και πραγματικών δειγμάτων βελτιώνει σημαντικά την ακρίβεια των μοντέλων αναγνώρισης, υπογραμμίζοντας τη σημασία των πολυτροπικών μεθόδων (vision + haptics) για την εκπαίδευση ρομποτικών συστημάτων που αλληλεπιδρούν με αντικείμενα σε πραγματικό περιβάλλον. Η εργασία αναδεικνύει ότι η ενσωμάτωση σύνθετων 3D δεδομένων με πραγματικά απτικά δεδομένα μπορεί να γεφυρώσει την εικονική και την πραγματική πραγματικότητα, προσφέροντας μια πρακτική και αποτελεσματική στρατηγική για την ανάπτυξη ρομποτικών εφαρμογών με βελτιωμένη ικανότητα αναγνώρισης αντικειμένων μέσω αφής και όρασης.

Η μελέτη των Cao και συνεργατών [15] παρουσιάζει την προσέγγιση Vis2Har, η οποία επιτρέπει απτική αναπαράσταση βασισμένη στην όραση (vision-based haptic rendering). Το σύστημα αξιοποιεί οπτικές πληροφορίες για την αναπαράσταση υφών, χωρίς να απαιτείται άμεση φυσική επαφή με τα αντικείμενα. Η προσέγγιση αυτή βασίζεται στη διασταύρωση οπτικών και απτικών σημάτων (cross-modal generation), επιτρέποντας τη δημιουργία ρεαλιστικών απτικών αισθήσεων ακόμη και σε περιβάλλοντα όπου η φυσική αλληλεπίδραση είναι περιορισμένη ή αδύνατη.

Η μέθοδος αναδεικνύει τη δυναμική των cross-modal τεχνικών για την απτική ανατροφοδότηση, επιτρέποντας την αναπαράσταση διαφορετικών υφών και επιφανειών με υψηλή πιστότητα μέσω απτικών δονήσεων ή άλλων μορφών ανατροφοδότησης. Τα αποτελέσματα υπογραμμίζουν τη σημασία της αξιοποίησης οπτικών δεδομένων ως πηγής πληροφοριών για την βελτίωση της εμπειρίας αφής, ανοίγοντας νέους δρόμους για εφαρμογές σε VR/MR όπου η φυσική επαφή δεν είναι πάντα εφικτή, αλλά η αίσθηση της υφής εξακολουθεί να παίζει καθοριστικό ρόλο στην εμπειρία του χρήστη.

Η μελέτη των Tena-Sánchez και συνεργατών [16] παρουσιάζει ένα περιβάλλον εικονικής εκπαίδευσης βασισμένο στην ψηφιακή ανακατασκευή πραγματικής βλάστησης, με στόχο την προσομοίωση της απτικής εμπειρίας. Η προσέγγιση συνδυάζει τρισδιάστατη μοντελοποίηση με μεθόδους απτικής απεικόνισης, ώστε να αποδοθούν με υψηλό ρεαλισμό οι υφές και τα απτικά χαρακτηριστικά των φυτικών στοιχείων, όπως η τραχύτητα των φύλλων ή η υφή του φλοιού.

Το έργο αναδεικνύει τις δυνατότητες των απτικών προσομοιώσεων σε εκπαιδευτικά σενάρια, επιτρέποντας στους χρήστες να βιώσουν και να αλληλεπιδράσουν με φυσικά περιβάλλοντα μέσω εικονικών αναπαραστάσεων. Με αυτόν τον τρόπο ενισχύεται η σύνδεση μεταξύ φυσικού και εικονικού περιβάλλοντος, ενώ παράλληλα παρέχεται μια πρακτική λύση για την εκπαίδευση σε περιοχές όπου η άμεση επαφή με φυσικά στοιχεία μπορεί να είναι δύσκολη, επικίνδυνη ή αδύνατη. Η μελέτη υπογραμμίζει τη σημασία της ακριβούς απτικής αναπαράστασης για τη βελτίωση της ρεαλιστικότητας και της αποτελεσματικότητας των VR-based εκπαιδευτικών εφαρμογών.

Η μελέτη των Bazelle και συνεργατών [17] διερευνά μια οικονομική και ελαφριά προσέγγιση για την προσομοίωση υφών σε περιβάλλοντα εικονικής πραγματικότητας μέσω δονητικών απτικών γαντιών. Το σύστημα αξιοποιεί απλούς δονητές τοποθετημένους στα δάχτυλα για να αναπαράγει την τραχύτητα διαφόρων υλικών, χρησιμοποιώντας δεδομένα από heightmaps και παρακολούθηση θέσης των χεριών για την ακριβή εφαρμογή της δόνησης ανάλογα με την κίνηση του χρήστη.

Τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών έδειξαν ότι οι χρήστες μπορούν να διακρίνουν διαφορετικές υφές με σχετική ακρίβεια, επιβεβαιώνοντας ότι ακόμα και ένα απλό και χαμηλού κόστους σύστημα μπορεί να παρέχει πειστική και ρεαλιστική απτική εμπειρία. Η εργασία υπογραμμίζει τη δυνατότητα δημιουργίας ποιοτικών απτικών διεπαφών για VR εφαρμογές, οι οποίες μπορούν να υποστηρίξουν τόσο ψυχαγωγικές όσο και εκπαιδευτικές χρήσεις, χωρίς την ανάγκη σύνθετου και ακριβού εξοπλισμού.

Συνολικά, οι παραπάνω μελέτες καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα τεχνολογιών και προσεγγίσεων για την απτική αναπαράσταση και διάκριση υφών, από VR-based τεστ και φορητές συσκευές μέχρι πολυτροπικά μοντέλα και cross-modal τεχνικές,

δείχνοντας την ποικιλία στρατηγικών που βελτιώνουν την αλληλεπίδραση και ρεαλιστικότητα της απτικής εμπειρίας σε εικονικά και επεκταμένα περιβάλλοντα.

2.7 Επίλογος

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάστηκε η απτική τεχνολογία ως επιστημονικός και τεχνολογικός κλάδος εξετάζοντας τη σημασία της στην αλληλεπίδραση ανθρώπου-υπολογιστή (HCI). Αναδείχθηκε ο ρόλος της απτικής αλληλεπίδρασης ως μέσου ενίσχυσης της εμπειρίας χρήστη σε περιβάλλοντα εικονικής και επαυξημένης πραγματικότητας όπου η αίσθηση της αφής συμπληρώνει την οπτική και ακουστική αντίληψη προσφέροντας μια πιο ολοκληρωμένη και ρεαλιστική εμπειρία.

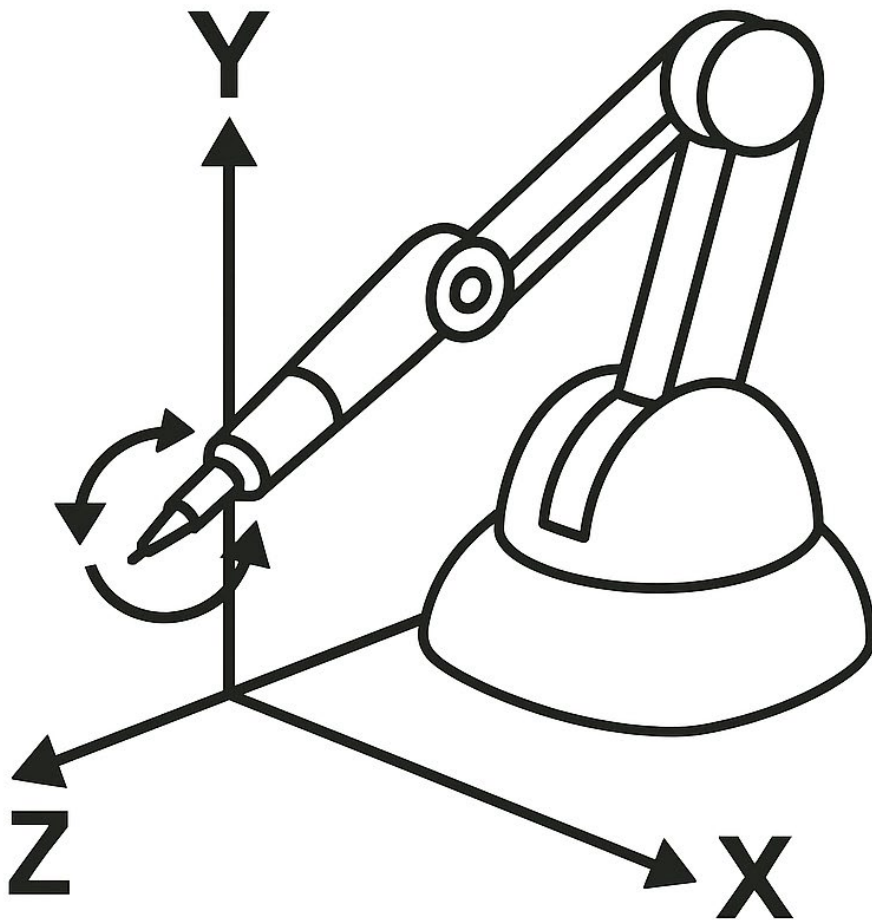
Στο κεφάλαιο αναλύθηκαν οι βασικές τεχνολογίες και συσκευές που αξιοποιούν την αφή, όπως συστήματα ανάδρασης δύναμης απτικές επιφάνειες και φορητά γάντια καθώς και οι αισθητήρες αφής δέρματος που επιτρέπουν την ενεργητική αντίληψη της υφής, της πίεσης και της θερμοκρασίας. Επίσης αναφερθηκε η πολυπλοκότητα της προσομοίωσης υφών και δονήσεων υψηλής συχνότητας αλλά και οι προκλήσεις που ανακύπτουν κατά την ανάπτυξη συστημάτων κλιμακούμενων ρεαλιστικών και ευέλικτων.

Τέλος παρουσιάστηκε το related work περιλαμβάνοντας ερευνητικές προσπάθειες για την αναπαράσταση απτικών εμπειριών σε VR μέσω συσκευών όπως το 3D Systems Touch μοντέλων μηχανικής μάθησης για απόδοση ρεαλιστικών υφών και πολυμορφικών συστημάτων που συνδυάζουν απτική θερμική και οπτικοακουστική ανάδραση. Οι μελέτες αυτές δείχνουν την πρόοδο στον τομέα και παρέχουν ένα πλαίσιο για την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών που ενσωματώνουν την αίσθηση της αφής σε πολυαισθητηριακά ψηφιακά περιβάλλοντα.

Κεφάλαιο 3^ο : Η Συσκευή Touch

3.1 Τεχνικά Χαρακτηριστικά

Η συσκευή Touch της 3D Systems είναι ένα εργαλείο απτικής ανατροφοδότησης το οποίο προσφέρει υψηλή ακρίβεια και είναι σχεδιασμένο για τη δημιουργία ρεαλιστικών εμπειριών αφής σε εικονικά περιβάλλοντα. Ο τρόπος με τον οποίο είναι σχεδιασμένη η συσκευή επιτρέπει την αναπαραγωγή δυνάμεων σε τρεις άξονες (X, Y, Z) δίνοντας τη δυνατότητα στον χρήστη να έχει ένα μεγάλο εύρος κινήσεων κατά τον χειρισμό της συσκευής κάτι που προσφέρει μεγάλη ακρίβεια και ρεαλισμό κατά την αλληλεπίδραση με τα ψηφιακά αντικείμενα.



Εικόνα 3.1 Αναπαράσταση των αξόνων της κίνησης της συσκευής Touch

Η εργονομία με συνδυασμό το μεγάλο εύρος κινήσεων που προσφέρει η συσκευή Touch επιτρέπει στον χρήστη να χειρίζεται τη συσκευή με τις φυσικές κινήσεις του χεριού του προσφέροντας εμβέλεια κίνησης που ακολουθεί την περιστροφή του καρπού του χρήστη. Ο χώρος στον οποίο περιορίζεται η κίνηση της συσκευής είναι 431 mm πλάτος x 348 mm ύψος x 165 mm βάθος κάτι που καλύπτει σε

ένα επαρκές επίπεδο την εμβέλεια που θα χρειαστούν οι περισσότερες εφαρμογές που αφορούν αυτήν τη συσκευή. Όσον αφορά το φυσικό αποτύπωμα η συσκευή καταλαμβάνει μικρό χώρο στα 168 mm x 203 mm ενώ το βάρος της περιορίζεται στα 1.42 kg κάνοντάς την έτσι πολύ εύκολη στη φορητότητα και την τοποθέτηση της συσκευής σε διάφορους χώρους.

Όσον αφορά την ακρίβεια η Touch προσφέρει ανάλυση θέσης άνω των 450 dpi που αντιστοιχεί σε 0.055 mm επιτρέποντας έτσι τον εντοπισμό της θέσης του στυλό με μεγάλη ακρίβεια. Η συσκευή διαθέτει πολύ χαμηλό επίπεδο εσωτερικής τριβής λιγότερο από 0.26 N γεγονός που βελτιώνει σημαντικά το εύρος των τιμών που μπορεί να πάρει η συσκευή και γενικότερα την απόκρισή της. Η μέγιστη δύναμη που μπορεί να ασκήσει η συσκευή είναι 3.3 N ενώ η σταθερή δύναμη που μπορεί να ασκήσει η συσκευή και μπορεί να τη διατηρήσει για μεγάλα χρονικά διαστήματα είναι 0.88 N.

Ένα ακόμα από τα χαρακτηριστικά που προσφέρει η συσκευή είναι η δυναμική ακαμψία (Stiffness) που γίνεται αντιληπτή κατά την ανάδραση της απτικής πληροφορίας. Οι τιμές για τον κάθε άξονα είναι:

- X άξονας: > 1.26 N/mm
- Y άξονας: > 2.31 N/mm
- Z άξονας: > 1.02 N/mm

Οι τιμές αυτές επιτρέπουν στη συσκευή να έχουμε διαφορετικά ανάγλυφα ή επίπεδα σκληρότητας που γίνονται αντιληπτά με μεγάλο ρεαλισμό και πειστικότητα κάθε φορά διαφορετικά για την κάθε υφή.

Επιπλέον είναι σημαντικό να αναφερθεί και ένα ακόμα τεχνικό χαρακτηριστικό που επηρεάζει κατά πολύ την απτική εμπειρία που προσφέρει η συσκευή και αυτό είναι το inertia δηλαδή η αίσθηση της μάζας που γίνεται αντιληπτή όταν η γραφίδα αλληλεπιδρά με ένα αντικείμενο και ασκείται μια δύναμη η οποία επιμένει για λίγο για να δώσει την αίσθηση ρεαλισμού. Στη συγκεκριμένη συσκευή η τιμή είναι στα 45 g. Αυτή η τιμή συμβάλλει στην ευκολία χειρισμού της συσκευής καθώς και στη ρεαλιστική αλληλεπίδραση με τα ψηφιακά αντικείμενα.

Τέλος η συσκευή υποστηρίζεται από αισθητήρες θέσης με ψηφιακούς κωδικοποιητές (encoders) σε όλους τους άξονες για τον έλεγχο της γραφίδας στον ψηφιακό χώρο καθώς και αισθητήρες γωνίας για την κίνηση του στυλό (pitch, roll, yaw). Η σύνδεση της συσκευής με τον υπολογιστή γίνεται μέσω θύρας USB 2.0 ή 3.0 και έχει ρυθμό ανανέωσης δεδομένων 1 KHZ κάτι που εξασφαλίζει πολύ γρήγορη απόκριση.

3.2 Τεχνολογία Επανατροφοδότησης Δύναμης (Force Feedback)

Η τεχνολογία της επανατροφοδότησης δύναμης (Force Feedback) είναι ο βασικός μηχανισμός ο οποίος επιτρέπει στους χρήστες τη δυνατότητα να βιώσουν την αίσθηση αφής σε ένα εικονικό περιβάλλον. Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές διεπαφές οι οποίες περιορίζονται σε οπτικά ή ηχητικά ερεθίσματα η απτική τεχνολογία επιτρέπει στον χρήστη να νιώσει τα αντικείμενα τα οποία λαμβάνουν χώρο στο εικονικό περιβάλλον.

Στην περίπτωση της συσκευής Touch που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση της διπλωματικής εργασίας η αίσθηση αυτή επιτυγχάνεται με έναν ειδικά σχεδιασμένο βραχίονα ο οποίος στην άκρη του έχει την πένα η αλλιώς Stylus η οποία κινείται ελεύθερα στον τρισδιάστατο χώρο. Καθώς ο χρήστης κινεί αυτή την πένα μπορεί να αγγίξει και να ωθήσει εικονικά αντικείμενα και η εφαρμογή σε συνεργασία με την συσκευή Touch χρησιμοποιεί αλγορίθμους φυσικής για να δημιουργήσει αντίσταση στο χέρι του χρήστη δίνοντας έτσι την αίσθηση επαφής με το αντικείμενο. Αυτό πρακτικά

σημαίνει ότι ο χρήστης μπορεί να νιώσει όταν ακουμπά μια επιφάνεια η όταν τη διαπερνά η όταν κινείται πάνω σε διαφορετικά εικονικά υλικά με διαφορετική τριβή, ανάγλυφο και σκληρότητα που οπτικά θα μπορούσαν να φαίνονται τα ίδια.

Η αίσθηση αυτή επιτυγχάνεται με την πολύ γρήγορη απόκριση που έχει το σύστημα της συσκευής Touch. Η συσκευή καταγράφει συνεχώς τη θέση της στον πραγματικό κόσμο και τον αναπαράγει με πολύ μεγάλη ακρίβεια στον εικονικό κόσμο.

Device Specifications	Touch		Touch X	
	Imperial	Metric	Imperial	Metric
Force Feedback Workspace	- 17 W x 13.7 H x 6.5 D in	> 431 W x 348 H x 165 D mm	- 14 W x 9 H x 7.1 D in	> 355 W x 228 H x 180 D mm
Footprint (physical area the base of the device occupies on a surface)	- 6 5/8 W x 8 D in	- 168 W x 203 D mm	- 6 5/8 W x 7 1/4 D in	- 168 W x 184 D mm
Weight (device only)	3 lbs 15 oz	-1.42 kg	7 lbs 3 oz	-3.257 kg
Range of Motion	Hand movement pivoting at wrist		Hand movement pivoting at wrist	
Nominal Position Resolution	> 450 dpi	-0.055 mm	> 1100 dpi	-0.023 mm
Backdrive Friction	< 1 oz	< 0.26 N	< 0.23 oz	< 0.06 N
Maximum Exertable Force (at nominal orthogonal arms position)	.75 lbf	3.3 N	1.8 lbf	7.9 N
Continuous Exertable Force (24 hrs)	> 0.2 lbf	> .88 N	> 0.4 lbf	> 1.75 N
Stiffness	X axis > 7.3 lbs./in Y axis > 13.4 lbs./in Z axis > 5.9 lbs./in	X axis > 1.26 N/mm Y axis > 2.31 N/mm Z axis > 1.02 N/mm	X axis > 10.8 lbs./in Y axis > 13.6 lbs./in Z axis > 8.6 lbs./in	X axis > 1.86 N/mm Y axis > 2.35 N/mm Z axis > 1.48 N/mm
Inertia (apparent mass at tip)	- 0.101 lbm	- 45 g	- 0.077 lbm	- 35 g
Force Feedback	X, Y, Z		X, Y, Z	
Position Sensing	X, Y, Z (digital encoders)		X, Y, Z (digital encoders)	
Stylus gimbal	Pitch, roll, yaw (\pm 5% linearity potentiometers)		Pitch, roll, yaw (Magnetic absolute position sensor, 14-bit precision.)	
Interface	USB 2.0 / 3.0 port or USB Hub that supports USB 2.0/ 3.0. 1 KHz refresh rate		USB 2.0 / 3.0 port or USB Hub that supports USB 2.0/ 3.0. Up to 4 KHz refresh rate	
OpenHaptics® SDK, Unreal®, Unity® compatibility	Yes		Yes	

Εικόνα 3.2 Τεχνικά Χαρακτηριστικά της συσκευής Touch από την επίσημη σελίδα της 3D Systems [18]

3.3 Ο Ρόλος της Συσκευής Touch στη Μελέτη

Η συσκευή Touch αποτελεί το βασικό μέσο με το οποίο πραγματοποιείται η απτική διεπαφή στην μελέτη καθώς είναι υπεύθυνη για την μεταφορά της αίσθησης της αφής από τον ψηφιακό κόσμο στο χέρι του χρήστη. Μέσω της τεχνολογίας Force Feedback επιτρέπει στον χρήστη να αισθανθεί τις εικονικές υφές με τις οποίες γίνεται το πείραμα (τούβλο, μέταλλο, ξύλο, άμμος, πάγος, τσιμέντο)

Συγκεκριμένα η συσκευή χρησιμοποιείται:

- Κατά την πρώτη φάση της έρευνας στην οποία γίνεται η εξοικείωση του χρήστη με τις υφές όπου ο χρήστης ψηλαφίζει με την συσκευή Touch την πρώτη υφή η οποία του παρουσιάζεται





και μέσω διαφόρων κινήσεων αντιλαμβάνεται το ανάγλυφο την σκληρότητα και την τριβή που έχει το αντικείμενο. Έτσι ο χρήστης αλληλεπιδρά με την κάθε υφή βλέποντάς την και ταυτόχρονα στην οθόνη και αισθάνεται την αντίστοιχη απτική ανάδραση μέσω της συσκευής.

- Στη δεύτερη φάση περνάμε στο κομμάτι του πειράματος που γίνεται χωρίς οπτική επαφή και πλέον ο χρήστης χρησιμοποιεί μόνο την συσκευή Touch για να αναγνωρίσει την υφή μόνο μέσω επαφής. Η συσκευή είναι το μοναδικό μέσο αναγνώρισης οπότε η απτική ακρίβεια και ρεαλιστικότητα των υφών εξαρτώνται μόνο από την επαφή με την συσκευή. Συνολικά ο ρόλος της συσκευής Touch στο πείραμα δεν είναι απλά σημαντικός αλλά είναι ο πυρήνας της πειραματικής διαδικασίας. Μέσα από τις απτικές δυνατότητές της επιτρέπει τη μελέτη της σχέσης μεταξύ σε ρυθμίσεις φυσικών παραμέτρων και την υποκειμενική αίσθηση ρεαλισμού σε ψηφιακές υφές.

3.4 Εγκατάσταση και Οδηγοί (Drivers)

Για να μπορέσει ο υπολογιστής στον οποίο θα χρησιμοποιηθεί η εφαρμογή να αναγνωρίσει και να λειτουργήσει σωστά με την συσκευή Touch είναι απαραίτητη η εγκατάσταση των κατάλληλων οδηγών (Drivers) τους οποίους προσφέρει δωρεάν η 3D Systems. Η διαδικασία ξεκινάει με την πλοήγηση στην επίσημη ιστοσελίδα της 3D Systems και συγκεκριμένα στην σελίδα με όλους τους διαθέσιμους οδηγούς .

Από εκεί θα πρέπει να επιλέξουμε τους κατάλληλους οδηγούς για την συσκευή που βρίσκονται στην κατηγορία OpenHaptics και έπειτα επιλέγοντας τους οδηγούς για την συσκευή Touch.


OpenHaptics	v3.5	<p>Touch Device Driver v2023.10.11:</p> <p><i>for Ethernet Touch or Touch X, USB Touch or Touch X, and HID Touch or Touch X devices</i></p> <p>Interface:  </p> <p>OS: 10/11 (64-bit)</p>	Download	More
		<p>Phantom Device Driver v5.1.7:</p> <p><i>for Firewire or Parallel devices</i></p> <p>Interface:  </p> <p>OS: 7/8/10 (64 bit)</p>	Download	

Εικόνα 3.3 Drivers συσκευής Touch [19]


Μετά τη λήψη θα δημιουργηθεί ένας καινούργιος φάκελος με όνομα 3D Systems μέσα στον φάκελο θα βρούμε ένα εκτελέσιμο αρχείο με όνομα Touch_Setup.exe το οποίο ανοίγει το απαραίτητο γραφικό περιβάλλον για την πρώτη ρύθμιση της συσκευής. Μέσα σε αυτό το περιβάλλον εμφανίζονται διάφορες πληροφορίες σχετικά με τη συσκευή:

- Device Name
- Device Model
- Interface
- Device Serial Number
- Device List
- Firmware Version


Ts Touch Setup ✕



Hardware



Reset Angle



About

Device Name: ▼

Device Model: ▼

Interface: ▼

Device Serial Num:

Device List: ▼

Firmware Version:

Oct 11 2023, 20:13:59

Εικόνα 3.4 Setup της συσκευής Touch

Μέσα σε αυτό το περιβάλλον ο χρήστης πρέπει να δώσει προσοχή στο Device Serial Number για να δει ότι εμφανίζεται ο κωδικός της συσκευής, γεγονός που υποδεικνύει πως η συσκευή έχει αναγνωριστεί επιτυχώς από το σύστημα. Αφού ελεγχθεί αυτό, επιλέγεται η εντολή Apply ώστε να οριστικοποιηθούν οι ρυθμίσεις και να έχουμε πλέον σύνδεση της συσκευής με τον υπολογιστή. Αυτή η διαδικασία χρειάζεται να πραγματοποιηθεί μόνο μια φορά κατά την πρώτη σύνδεση της συσκευής στον υπολογιστή. Μετά την αρχική ρύθμιση ο υπολογιστής θα αναγνωρίζει αυτόματα τη συσκευή κάθε φορά που θα θελήσει ο χρήστης να την χρησιμοποιήσει χωρίς να χρειάζεται κάποια επιπλέον παραμετροποίηση.

3.5 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της Συσκευής Touch

Η συσκευή Touch αποδείχτηκε πολύ κατάλληλη για την υλοποίηση αυτής της εφαρμογής και διπλωματικής, αλλά όπως κάθε τι άλλο έχει τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά της.

Πλεονεκτήματα συσκευής Touch:

1. Ρεαλιστική απτική αίσθηση (Force Feedback)

Η συσκευή παρέχει μια υψηλής ποιότητας ανατροφοδότηση δύναμης προσφέροντας μεγάλο εύρος και γενικότερα μια εξαιρετικά ρεαλιστική αίσθηση αφής, ιδανική για μια εφαρμογή σαν αυτή που απαιτεί μεγάλη ακρίβεια στην αναγνώριση υφών και επιφανειών.

2. Υψηλή ακρίβεια στην καταγραφή θέσης

Η συσκευή Touch προσφέρει α νάλυση έως και 450 dpi, αυτό σημαίνει ότι το σύστημα εντοπίζει μέχρι και πολύ λεπτές κινήσεις του χρήστη, κάτι που είναι κρίσιμο για να έχουμε μεγάλη ακρίβεια της φυσικής θέσης της πένας σε σχέση με την εικονική.

3. Συμβατότητα με Haptics Direct

Η συσκευή είναι συμβατή με το plugin Haptics Direct που βρίσκεται στο Asset Store του Unity Game Engine, κάτι που κάνει τη διαδικασία σύνδεσης της συσκευής με το Unity μια πολύ απλή διαδικασία.

4. Εύκολη εγκατάσταση

Η διαδικασία εγκατάστασης της συσκευής μαζί με όλα τα Drivers αποδείχθηκε μια πολύ απλή διαδικασία χωρίς να χρειαστεί ψάξιμο ή να υπάρχει κάποιο κόλλημα που απαιτούσε κάποια περίπλοκη λύση.

5. Σταθερά καλή απόδοση

Η συσκευή σε κάθε συνεδρία που χρησιμοποιήθηκε απέδιδε όπως περιμέναμε χωρίς να έχουμε ιδιαίτερα προβλήματα σύνδεσης και το γεγονός ότι δεν χρειαζόταν ρύθμιση πέρα από την πρώτη φορά που χρησιμοποιήθηκε έκανε τη διαδικασία εξαιρετικά απλή για την έρευνα.

6. Συμπαγής σχεδιασμός

Το γεγονός ότι η συσκευή καταλαμβάνει μικρό φυσικό χώρο και είναι αρκετά ελαφριά έκανε πολύ εύκολο τον χειρισμό της και στη μεταφορά αλλά και κατά τη χρήση στις έρευνες που έγιναν με αυτές, αφού ήταν πολύ εύκολο να επανατοποθετήσουμε τη συσκευή όπου χρειαζόταν.

Μειονεκτήματα συσκευής Touch:

1. Περιορισμένο εύρος κίνησης

Το εύρος κίνησης της συσκευής παρότι ήταν επαρκές για την εφαρμογή την οποία χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής, για μια άλλη χρήση θα μπορούσε σίγουρα να θεωρηθεί περιορισμένο, όπως για παράδειγμα η μεταφορά ενός αντικειμένου σε ένα εικονικό περιβάλλον από μια θέση Α σε μια θέση Β.

2. Απουσία φυσικής υφής στην πένα

Η συσκευή Touch είναι πολύ καλή στην προσομοίωση της αίσθησης μέσω δύναμης, όμως δεν προσφέρει φυσική ανατροφοδότηση από την επιφάνεια της πέννας, κάτι που περιορίζει πολύ την πολυπλοκότητα των ερεθισμάτων που είναι εφικτό να υλοποιήσει.

3. Εξάρτηση από Drivers και λογισμικό

Για τη χρήση της συσκευής απαιτείται να κατεβάσεις τους κατάλληλους οδηγούς για να δουλέψει σωστά και παρότι είναι απλή η διαδικασία πρέπει να αναφερθεί ότι είναι ένα ακόμα εμπόδιο αν η συσκευή χρησιμοποιούνταν από χρήστες στον προσωπικό τους υπολογιστή.

4. Χαμηλό όριο Exertable Force

Η μέγιστη δύναμη η οποία μπορεί να ασκήσει η συσκευή είναι περιορισμένη, κάτι που προκαλεί πρόβλημα σε υφές οι οποίες είναι πολύ σκληρές καθώς δεν μπορεί να αποδώσει την σκληρότητά τους αρκετά ρεαλιστικά ή αν έχουμε κάποιο βαρύ αντικείμενο που σπρώχνει η πένα.

5. Περιορισμένη φυσική αλληλεπίδραση

Με τη συσκευή ο χρήστης χρησιμοποιεί μόνο μια πένα, η συσκευή δεν υποστηρίζει πολυδακτυλική επαφή και έτσι ο χρήστης μπορεί να έρθει σε επαφή μόνο με ένα αντικείμενο σαν να κρατούσε έναν στυλό και όχι σαν να το πιάνει με τα ίδια του τα δάχτυλα.

3.6 Επίλογος

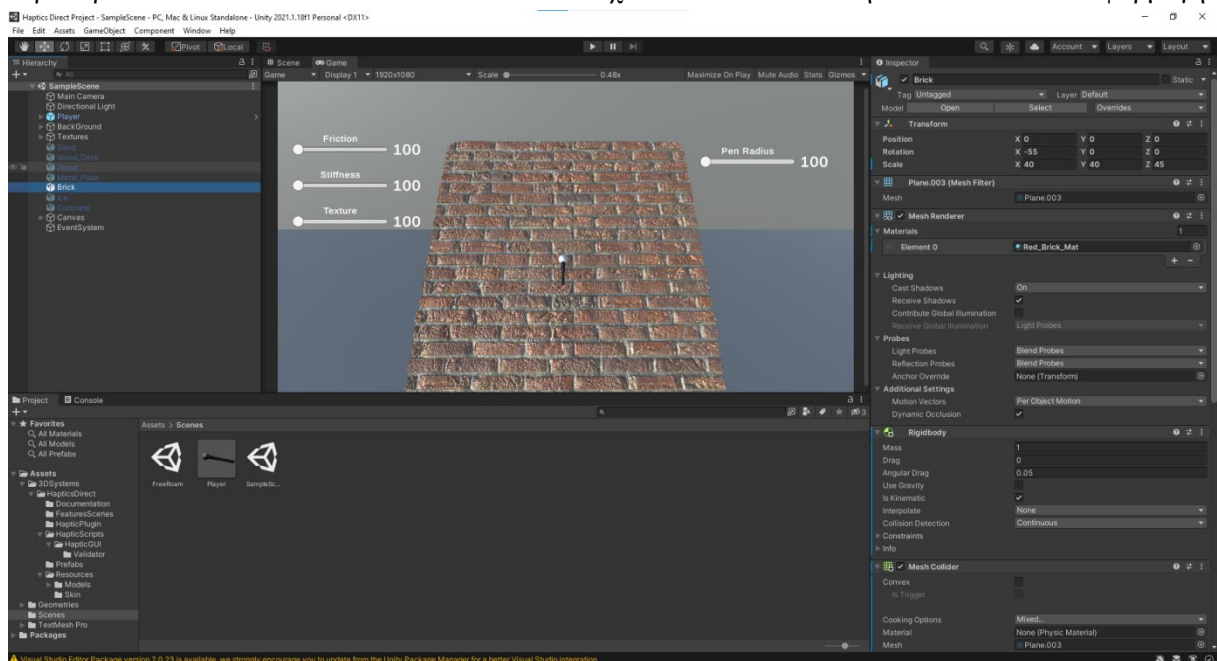
Η συσκευή Touch αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο στην αλληλεπίδραση με εικονικά περιβάλλοντα καθώς συνδυάζει υψηλή ακρίβεια εντοπισμού θέσης και προσανατολισμού με δυνατότητες απτικής ανάδρασης. Η τεχνολογία επανατροφοδότησης δύναμης που χρησιμοποιεί επιτρέπει στους χρήστες να αντιλαμβάνονται φυσικά χαρακτηριστικά των αντικειμένων ενισχύοντας την αίσθηση ρεαλισμού και τη συμμετοχή στη μελέτη. Παρά τις περιορισμένες δυνατότητες χώρου εργασίας λόγω της δομής που έχει η συσκευή και την ανάγκη για συγκεκριμένους οδηγούς εγκατάστασης τα πλεονεκτήματά της όπως η βελτιωμένη εμπειρία μάθησης και η ακριβής αλληλεπίδραση την καθιστούν σημαντικό εργαλείο για εφαρμογές εικονικής πραγματικότητας και κύριος εκπαιδευτικές μελέτες. Συνολικά, η συσκευή Touch συνεισφέρει ουσιαστικά στην κατανόηση της αλληλεπίδρασης ανθρώπου-μηχανής, ανοίγοντας νέους δρόμους στην έρευνα και την πρακτική εφαρμογή της VR τεχνολογίας.

Κεφάλαιο 4^ο : Unity και Ανάπτυξη Εφαρμογής

4.1 Επισκόπηση του Unity 3D Engine

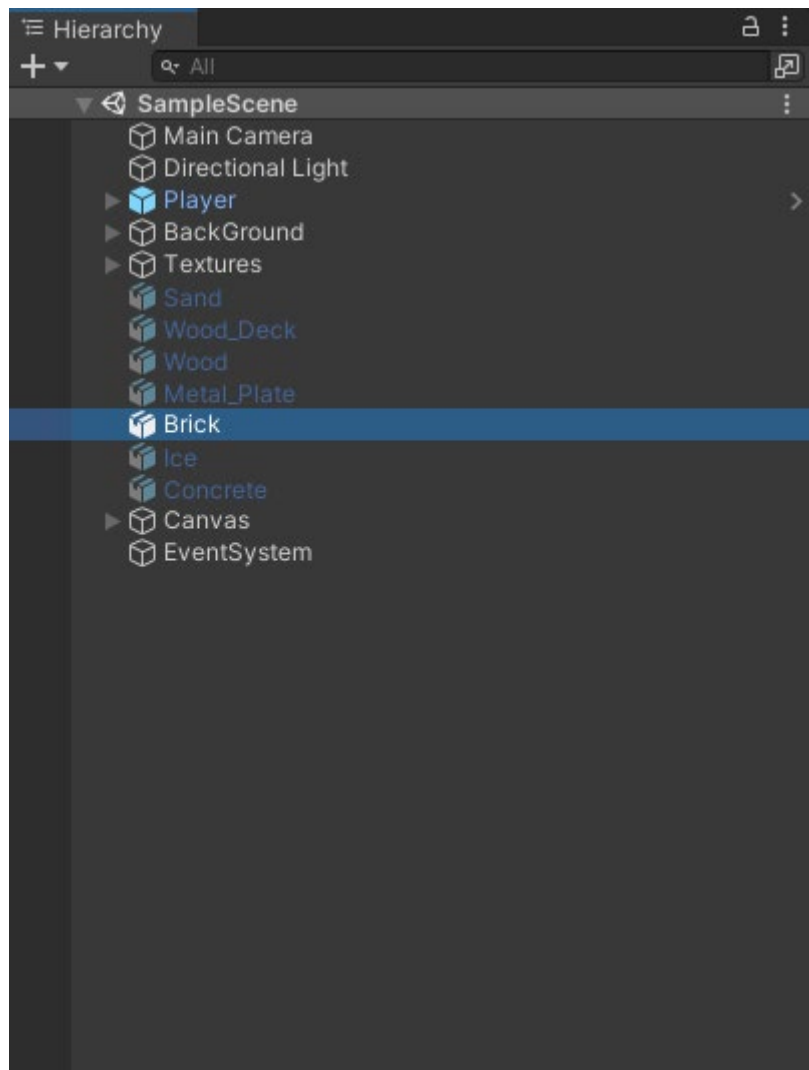
Το Unity 3D είναι μια από τις πιο διαδεδομένες μηχανές ανάπτυξης κυρίως βιντεοπαιχνιδιών αλλά και άλλων εφαρμογών. Το Unity προσφέρει μεγάλη ευελιξία και έτσι χρησιμοποιείται από μεγάλες ομάδες ατόμων για τη δημιουργία περίπλοκων εφαρμογών μέχρι και από μικρές έως και ομάδες ενός ατόμου για τη δημιουργία πιο απλών εφαρμογών. Η δημοτικότητα του οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι η μηχανή είναι πολύ φιλική προς τη χρήση με πάρα πολύ υλικό διαθέσιμο στο διαδίκτυο για κάποιον που θέλει να μάθει τη μηχανή και το γεγονός ότι είναι δωρεάν την κάνει ακόμα πιο ελκυστική για κάποιον που θέλει να ξεκινήσει να ασχολείται με τη δημιουργία βιντεοπαιχνιδιών.

Με το που ανοίξει η εφαρμογή του Unity το πρώτο πράγμα που αντικρίζει κάποιος είναι τα διάφορα παράθυρα που έχει η εφαρμογή.



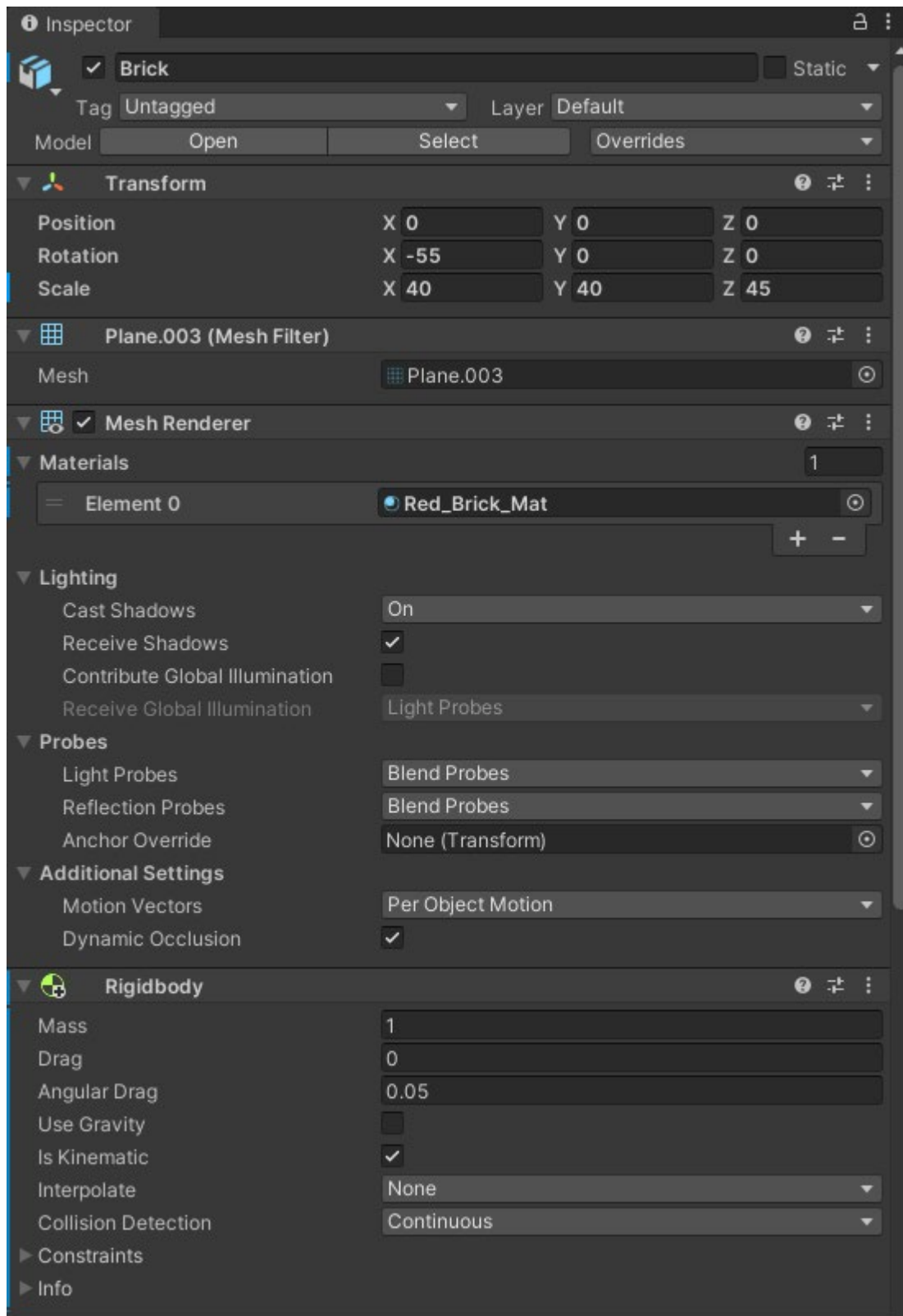
Εικόνα 4.1 Το UI του Unity Game Engine

Συγκεκριμένα έχουμε την ιεραρχία (Hierarchy) όπου εκεί μπορούμε να επιλέξουμε τα διάφορα αντικείμενα που έχουμε μέσα στη σκηνή που είναι ενεργή.



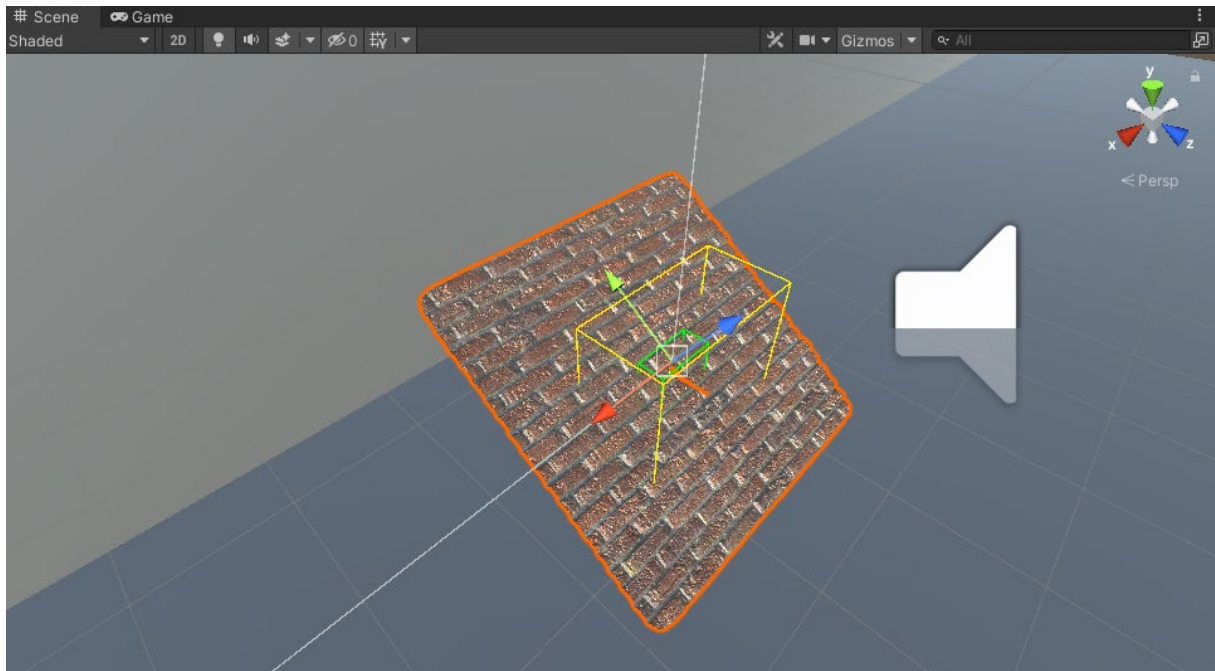
Εικόνα 4.2 Το παράθυρο της ιεραρχίας στο Unity

Αφού επιλέξουμε ένα συγκεκριμένο αντικείμενο στην Ιεραρχία, μπορούμε έπειτα στον Επιθεωρητή (Inspector) να δούμε τα διάφορα Συστατικά (Component) που έχει πάνω το αντικείμενο, είτε αυτά είναι έτοιμα από το Unity είτε είναι φτιαγμένα από εμάς.



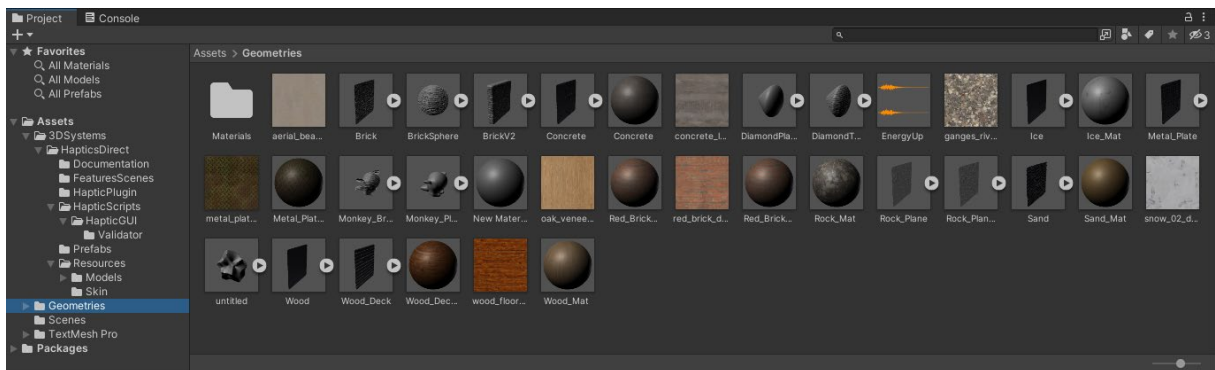
Εικόνα 4.3 Το παράθυρο επιθεώρησης στο Unity

Το σημείο στο οποίο μπορούμε να δούμε τι γίνεται στη σκηνή μας αλλά και να την τροποποιήσουμε είναι το παράθυρο Θέασης Σκηνής (Scene View).



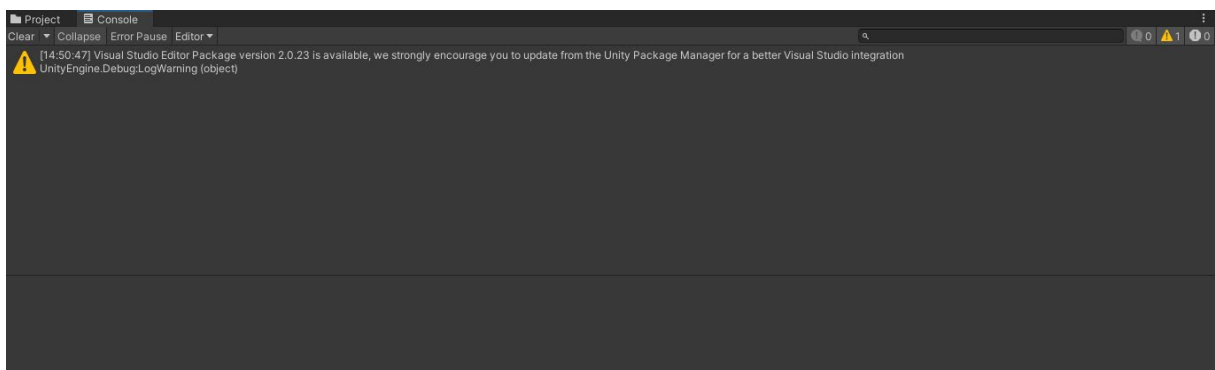
Εικόνα 4.4 Το παράθυρο θέασης της σκηνής στο Unity

Έπειτα έχουμε το παράθυρο στο οποίο μπορούμε να δούμε τα αρχεία τα οποία δημιουργούμε (Project). Εκεί είναι το σημείο στο οποίο εμφανίζεται οτιδήποτε καινούριο φτιάχνουμε, είτε είναι κάποιο υλικό για χρήση είτε είναι κάποιο Script.



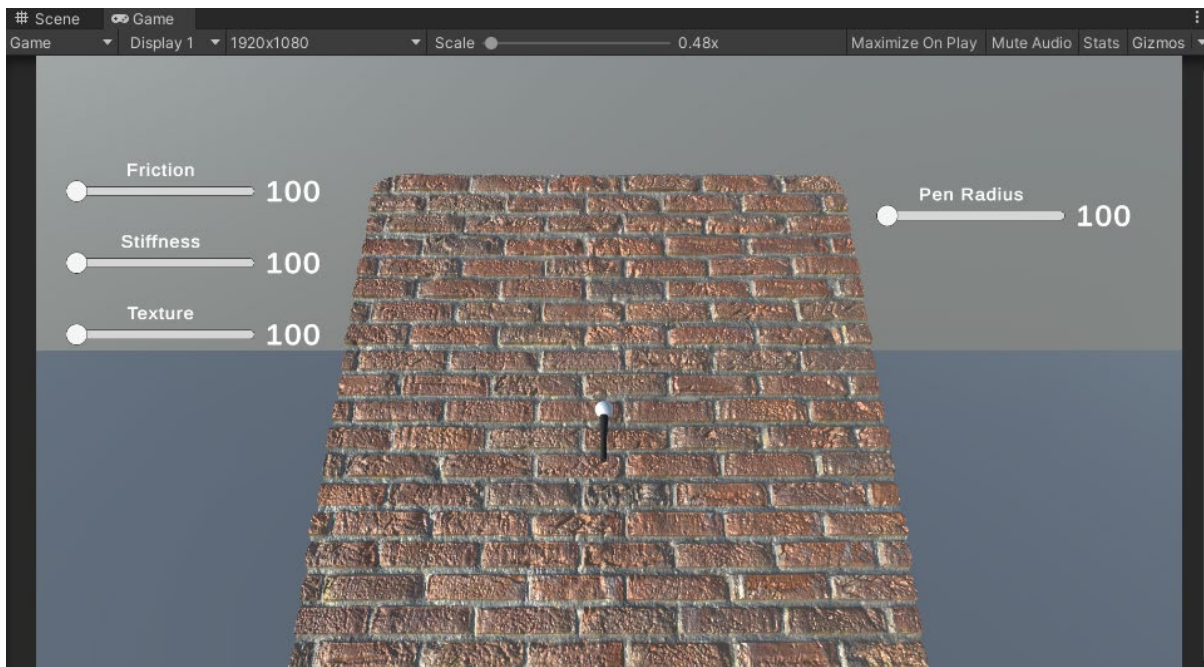
Εικόνα 4.5 Το παράθυρο Project στο Unity

Σε παρόμοιο σημείο έχουμε και την κονσόλα (Console) του Unity. Εκεί πέρα εμφανίζονται τα διάφορα errors που μπορεί να πετάξει το Project, αλλά και μηνύματα τα οποία έχουμε βάλει ως εντολή εμείς από τον κώδικά μας.



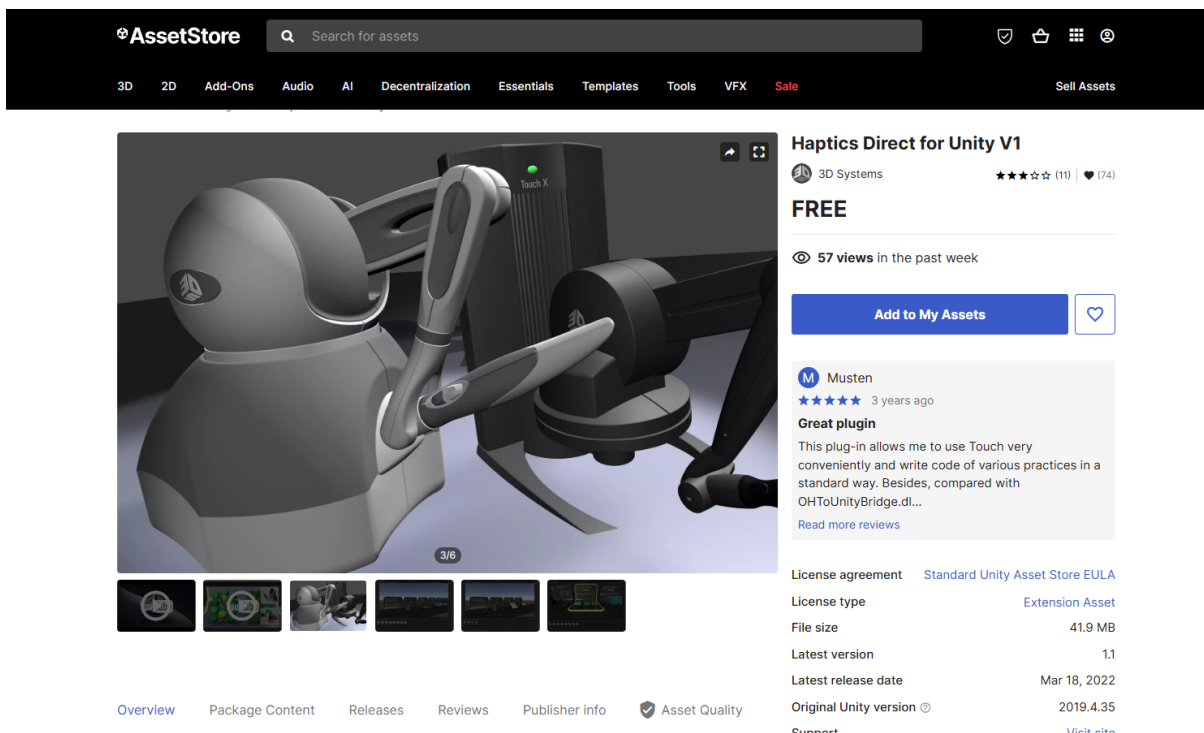
Εικόνα 4.6 Το παράθυρο της κονσόλας στο Unity

Τέλος, έχουμε και την Όψη Παιχνιδιού (Game View), όπου εκεί μπορούμε να παρακολουθήσουμε πατώντας το κουμπί Play την όψη του παιχνιδιού όπως θα την βλέπαμε μέσα από τα μάτια του χρήστη.



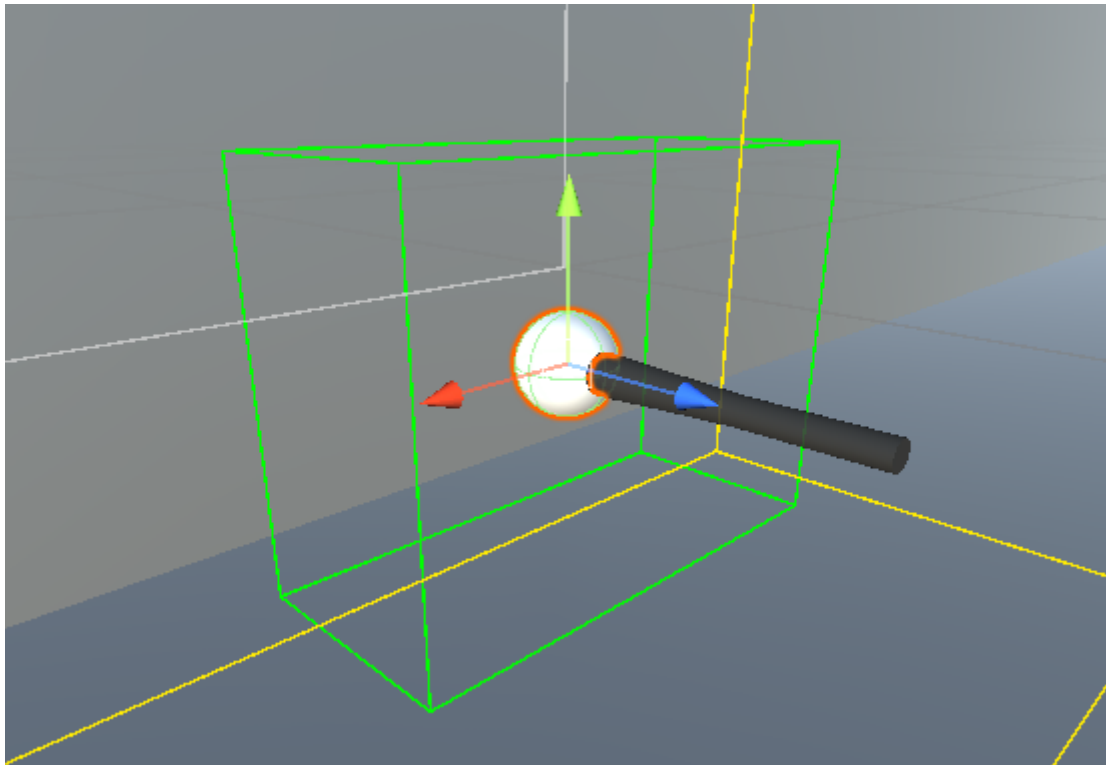
Εικόνα 4.7 Το παράθυρο της όψης παιχνιδιού στο Unity

4.2 Unity Plugin Haptics Direct



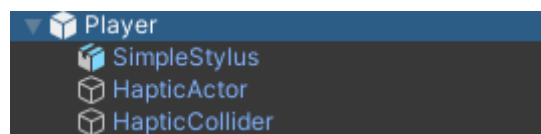
Εικόνα 4.8 Το Asset Store του Unity με το Plugin Haptics Direct [20]

Το Haptics Direct είναι ένα plugin που επιτρέπει την απευθείας σύνδεση μεταξύ του Unity και της απτικής συσκευής Touch, χωρίς την ανάγκη κάποιας σύνθετης εξωτερικής προγραμματιστικής γέφυρας. Το plugin αυτό έπαιξε καθοριστικό ρόλο στην υλοποίηση της εφαρμογής, καθώς μέσω αυτού έγινε πολύ εύκολη η υλοποίηση της ψηφιακής πένα στη σκηνή της εφαρμογής, και επίσης μέσω της χρήσης του συστατικού (Component) που ήταν διαθέσιμο από το plugin, έγινε πολύ εύκολο να ρυθμιστούν οι υφές κατάλληλα. Η ψηφιακή πένα έρχεται έτοιμη μαζί με το plugin και αποτελείται από μερικά κομμάτια.



Εικόνα 4.9 Η ψηφιακή πένα του Haptic Direct Plugin

Στην Ιεραρχία μπορούμε να δούμε τα διάφορα κομμάτια που αποτελούν την ψηφιακή πένα.



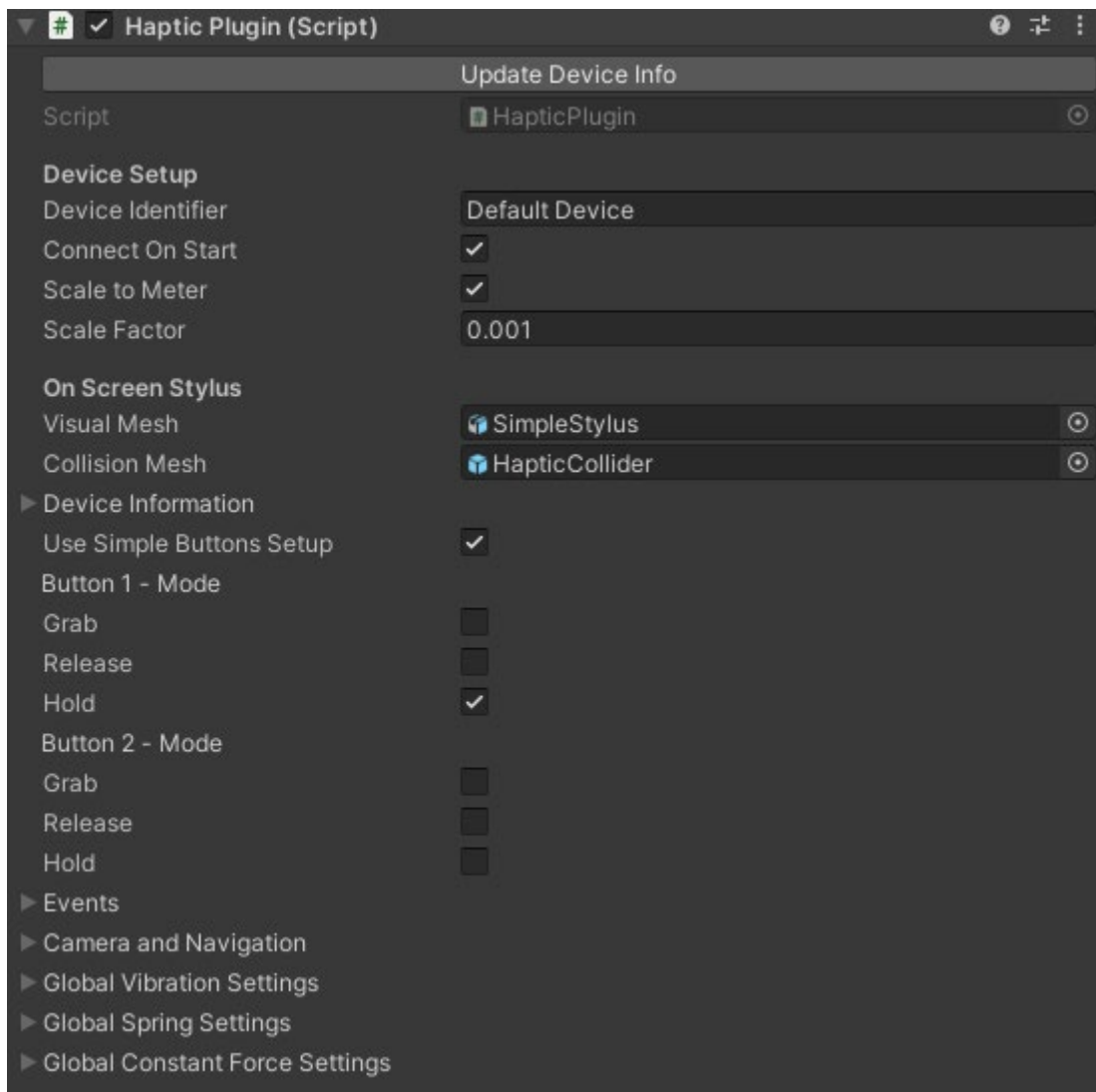
Εικόνα 4.10 Τα διαφορετικά κομμάτια της πέννας στην ιεραρχία

Το αντικείμενο Player είναι ένα κενό αντικείμενο το οποίο δημιουργήσαμε έτσι ώστε να αποθηκευτούν τα υπόλοιπα κομμάτια της πέννας κάτω από αυτό και πέρα από σκοπούς τακτοποίησης της σκηνής δεν έχει καμία άλλη λειτουργία.

Το αντικείμενο SimpleStylus αποτελεί τα οπτικά συστατικά της πέννας αλλά μόνο για τον κορμό της πέννας. Την μπάλα στην άκρη της πέννας την αναλαμβάνει άλλο αντικείμενο.

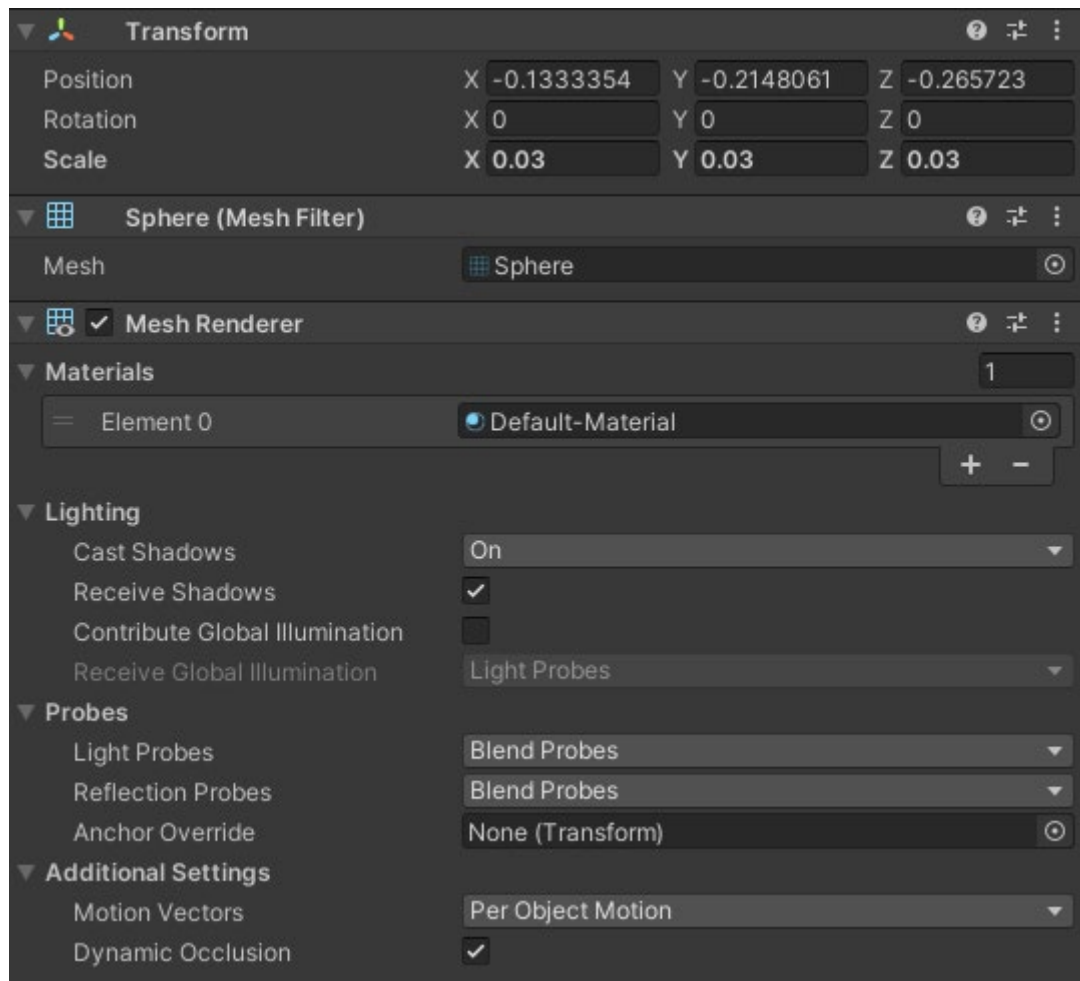
Το αντικείμενο HapticActor είναι υπεύθυνο για τη διασύνδεση της συσκευής με την συγκεκριμένη πένα. Με λίγα λόγια είναι υπεύθυνο σε κάθε έναρξη της σκηνής να σετάρει την ψηφιακή πένα για όλα

τα στοιχεία, οπτικά και απτικά. Το συγκεκριμένο συστατικό δεν χρειαζόταν να το ρυθμίσουμε με οποιονδήποτε τρόπο για να δουλέψει σωστά η εφαρμογή.



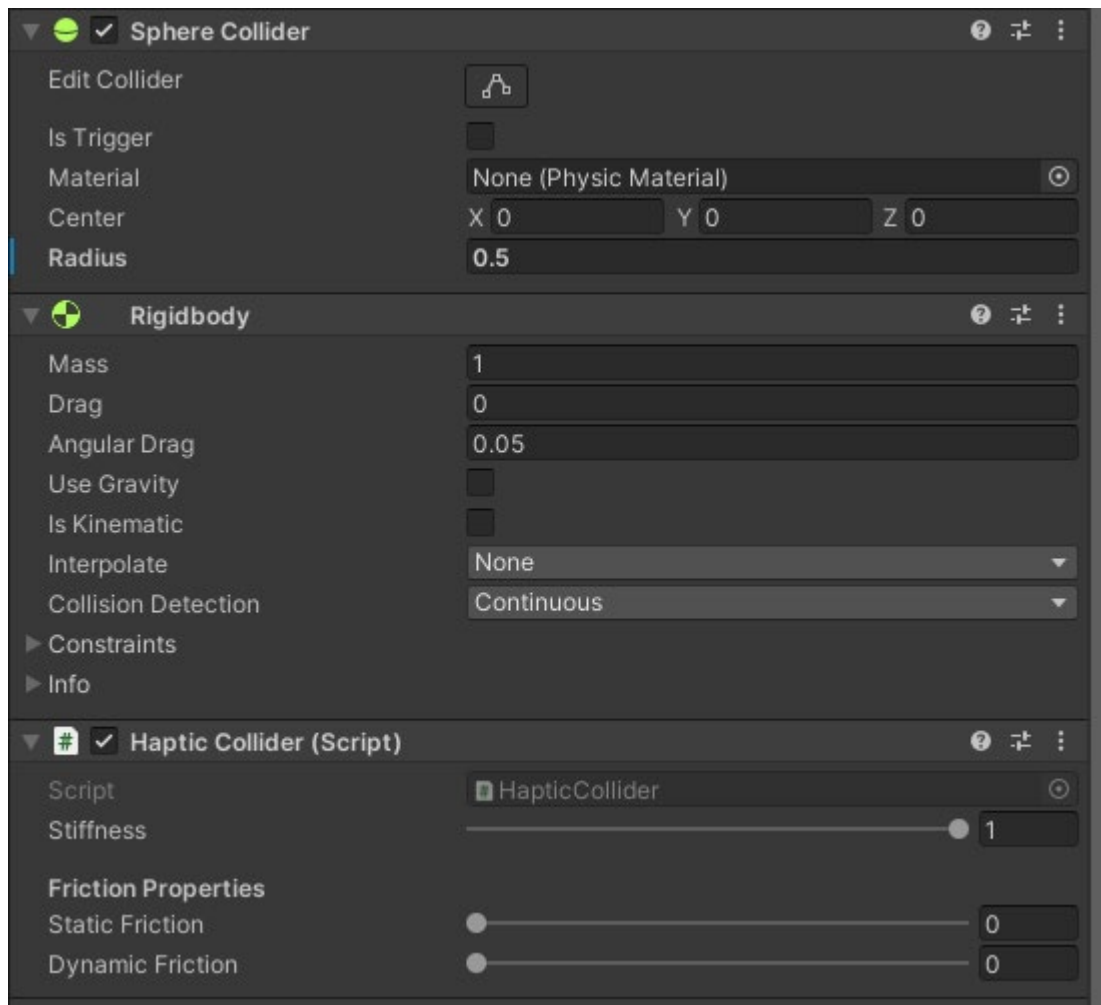
Εικόνα 4.11 Το Haptic Plugin Script υπεύθυνο για τη διασύνδεση της συσκευής με την πένα

Το Haptic Collider είναι το αντικείμενο που είναι υπεύθυνο για την επαφή της πένας με τις υφές. Επίσης έχει συστατικά για την εμφάνιση της σφαίρας στην άκρη πένας.



Εικόνα 4.12 Τα συστατικά εμφάνισης της πέννας

Τα σημαντικότερα συστατικά όμως είναι αυτά που επιτρέπουν την πένα να έρχεται σε επαφή με τις υφές τα οποία είναι τα εξής:



Εικόνα 4.13 Τα τρία σημαντικά συστατικά της πέννας υπεύθυνα για την επαφή της πέννας με αντικείμενα

Το πρώτο συστατικό το Sphere Collider είναι υπεύθυνο για να δημιουργεί ένα αντικείμενο σε σχήμα σφαίρας εκεί που φαίνεται οπτικά η άσπρη σφαίρα της πέννας και αυτό το αντικείμενο δεν είναι οπτικό αλλά είναι συμπαγές και επιτρέπει την επαφή με άλλα αντικείμενα που έχουν Colliders.

Το Rigidbody είναι υπεύθυνο για τον τρόπο με τον οποίο η πένα συμπεριφέρεται ως φυσικό αντικείμενο στον χώρο της σκηνής και είναι απαραίτητο για να μπορούμε να έχουμε επαφή με άλλα αντικείμενα.

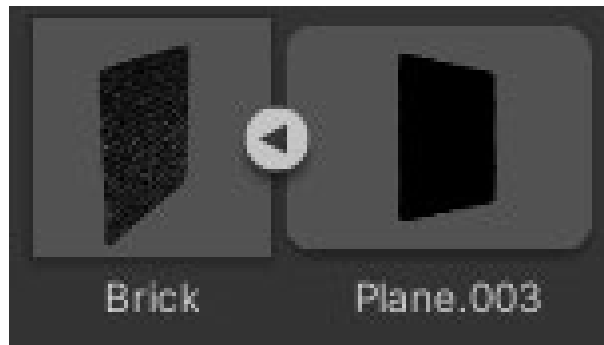
Τέλος το Haptic Collider είναι υπεύθυνο για την σκληρότητα και την τριβή που θα έχει η πένα όταν θα έρχεται σε επαφή με άλλα αντικείμενα. Αυτό το συστατικό επιλέξαμε να μην το πειράζουμε με σκοπό να αλλάζουν μόνο οι ρυθμίσεις από τις ίδιες τις υφές και να μην έχουμε άλλες μεταβλητές που επηρεάζουν το αποτέλεσμα από τα πειράματα.

4.3 Υλοποίηση Υφών στο Unity

Για τη δημιουργία των υφών χρησιμοποιήθηκε ένα άλλο πρόγραμμα το οποίο ονομάζεται Blender που είναι ένα πρόγραμμα δημιουργίας μοντέλων αυτό θα το εξετάσουμε σε παρακάτω κεφάλαιο. Αφού οι

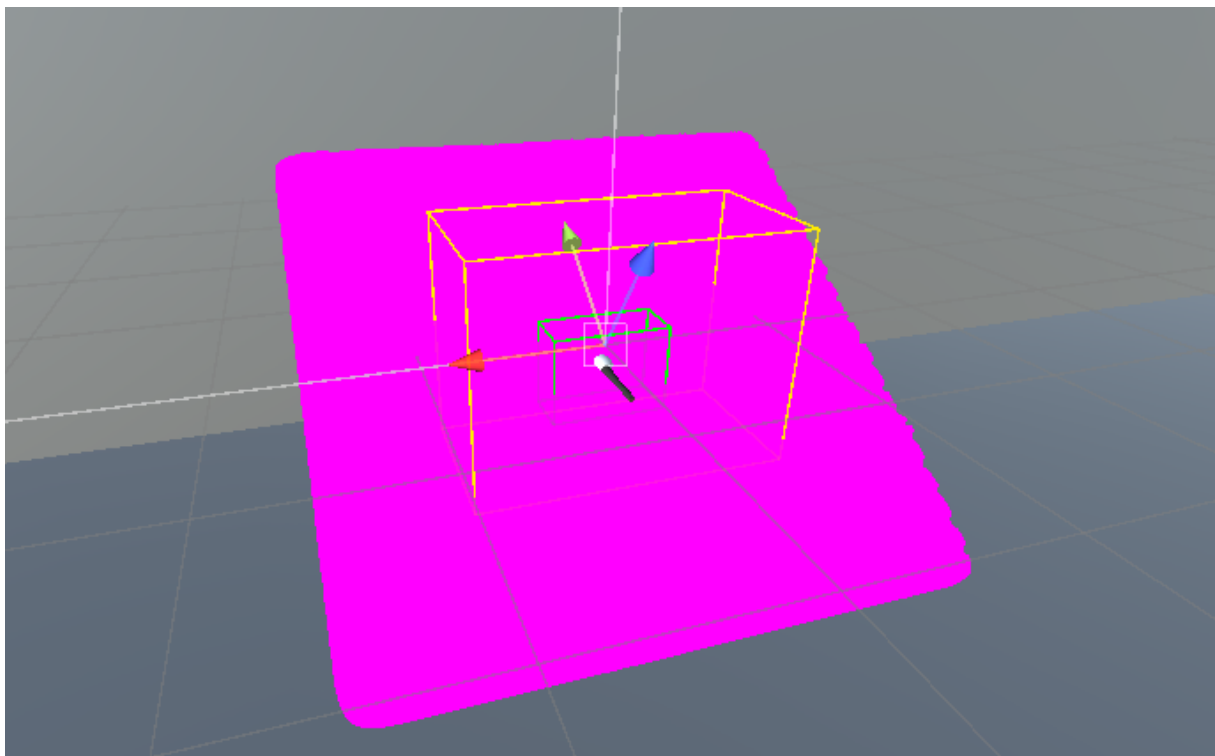
υφές φτιάχτηκαν στο Blender και μπήκαν στο Unity Ακολουθήθηκαν κάποιοι μέθοδοι για να μπορέσουμε να χρησιμοποιήσουμε τις υφές με τον τρόπο που θέλουμε μέσα στο Unity.

Με το που κάνουμε την εισαγωγή του αρχείου .fbx που κάνει export το Blender εμφανίζεται η γεωμετρία της υφής στον φάκελο της επιλογής μας για παράδειγμα για το τούβλο:



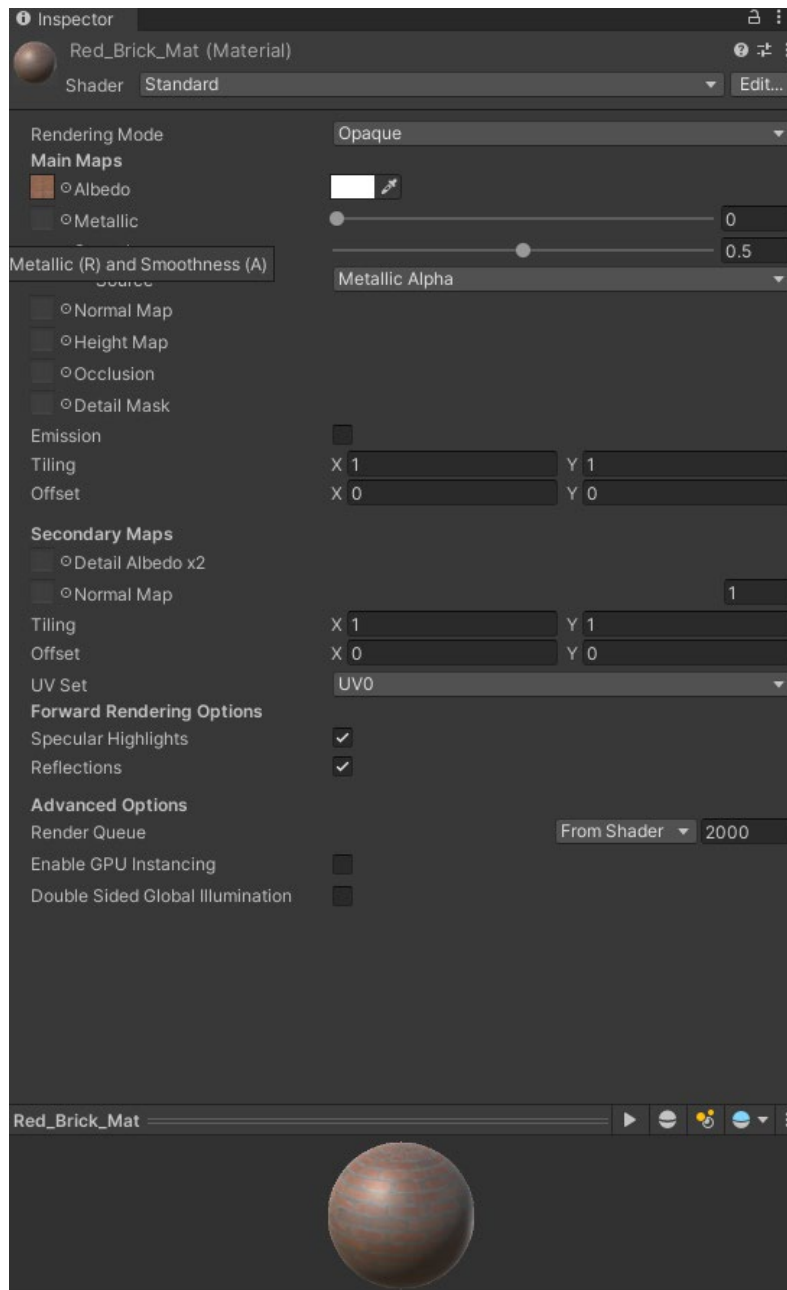
Εικόνα 4.14 Η γεωμετρία της υφής του τούβλου στο παράθυρο του project

Αφού έχουμε τη γεωμετρία της υφής μπορούμε να την περάσουμε στην σκηνή μας όμως θα παρατηρήσουμε ότι αφού περάσουμε την υφή αυτή δεν έχει κρατήσει το χρώμα από το αρχείο .fbx.



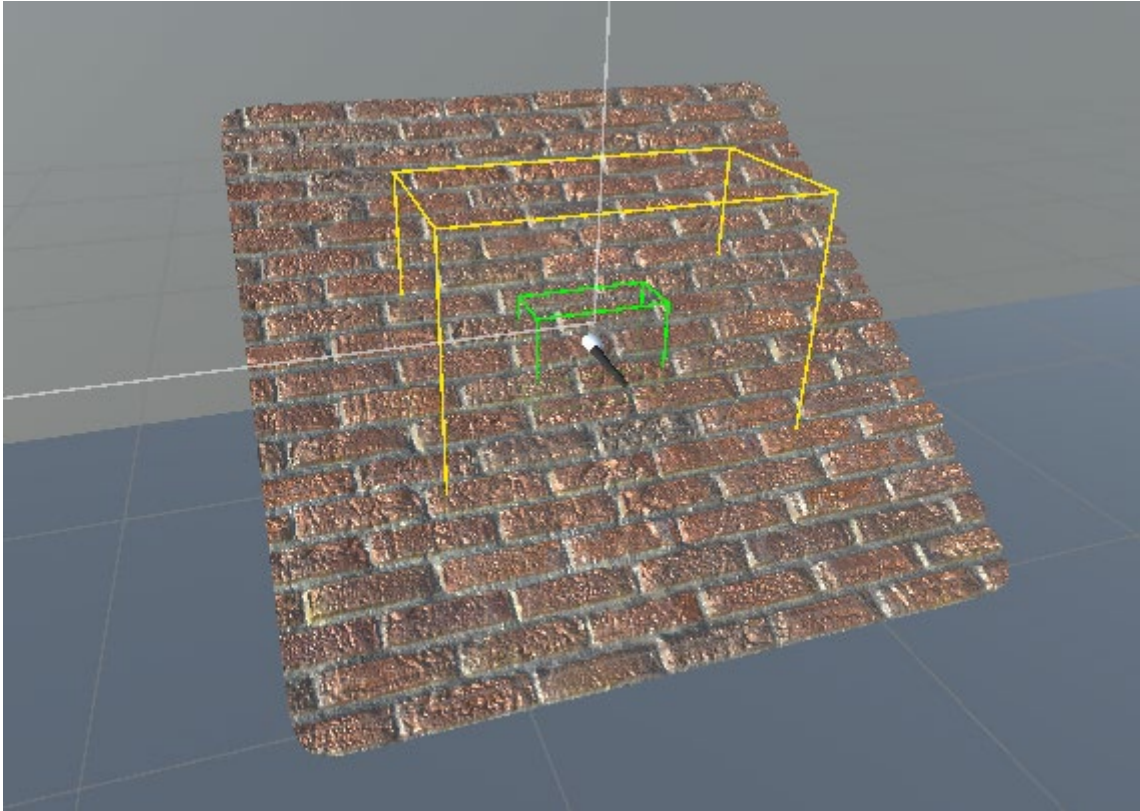
Εικόνα 4.15 Η γεωμετρία του τούβλου εμφανιζόμενη μέσα στην σκηνή του Unity χωρίς όμως να έχει υλικό

Οπότε πρέπει να δημιουργήσουμε ένα καινούργιο υλικό με το χρώμα του τούβλου για να μπορέσουμε να το βάλουμε πάνω στην γεωμετρία μας.



4.16 Τα στοιχεία του υλικού που δημιουργήθηκαν για το τούβλο

Αφού δημιουργήσουμε το καινούργιο υλικό, αυτό που έχουμε να κάνουμε είναι να πάρουμε το χρώμα του τούβλου που είχαμε ήδη από το Blender και να το περάσουμε στο πλαίσιο Albedo που είναι το κύριο χρώμα του αντικειμένου στο οποίο θα μπει το υλικό. Έτσι θα έχουμε το εξής αποτέλεσμα:



Εικόνα 4.17 Η υφή του τούβλου με το καινούργιο υλικό επάνω

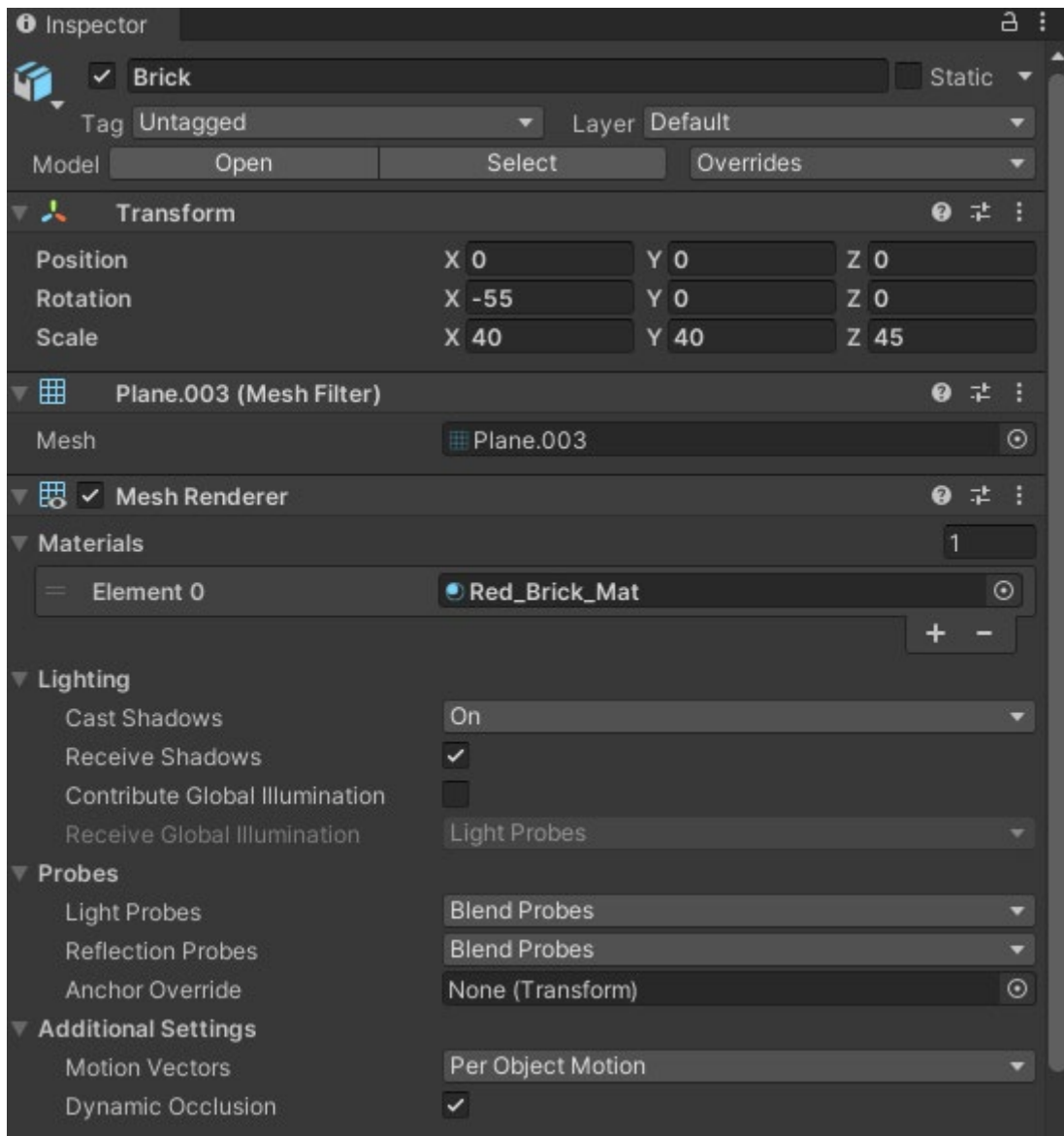
Πλέον το αντικείμενο μας έχει κανονικά το χρώμα το οποίο θέλουμε να έχει, αυτό όμως είναι μόνο το οπτικό κομμάτι του αντικειμένου χρειάζεται να κάνουμε κάποιες άλλες ενέργειες για να μπορέσουμε να έχουμε επαφή του αντικειμένου με την πένα της συσκευής Touch.

Αφού έχουμε τις υφές έτοιμες στην ιεραρχία με τα οπτικά τους στοιχεία στήμενα.



Εικόνα 4.18 Όλες οι υφές στην ιεραρχία

Θα πρέπει να προσθέσουμε κάποια συστατικά (Components) στα αντικείμενα για να μπορέσουν να δουλέψουν.



Εικόνα 4.19 Τα συστατικά όψης της υφής του τούβλου

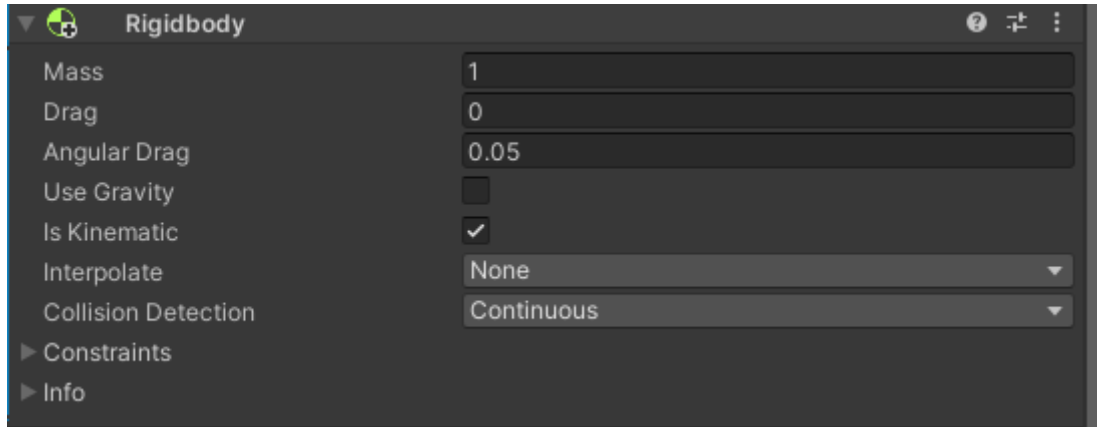
Τα πρώτα αντικείμενα τα οποία κάνουν αυτόματα εισαγωγή είναι το Transform, Mesh Filter και το Mesh Renderer αυτά κάνουν τα εξής:

Το Transform έχει τρία κομμάτια το Position, Rotation και Scale. Το Position αναφέρεται στην τοποθεσία την οποία καταλαμβάνει το αντικείμενό μας στον χώρο της σκηνής αναθέτοντας διαφορετικές τιμές για τον κάθε άξονα ανάλογα με το που θα κουνήσουμε το αντικείμενό μας. Το Rotation κρατάει τις μοίρες τις οποίες έχει ο κάθε άξονας του αντικειμένου. Τέλος το Scale είναι το μέγεθος που έχει το αντικείμενο σε κάθε ξεχωριστό άξονα. Αυτά τα στοιχεία δίνουν μεγάλη ευελιξία στο πώς θα τοποθετηθεί το αντικείμενο στην σκηνή.

Το Mesh Filter δουλεύει μαζί με το Mesh Renderer για να εμφανίσουν οπτικά το αντικείμενο στην σκηνή. Το Mesh Filter κρατάει την πληροφορία της γεωμετρίας του αντικειμένου που εμφανίζει και το Mesh Renderer είναι το συστατικό που κρατάει το χρώμα του αντικειμένου και από εκεί επίσης

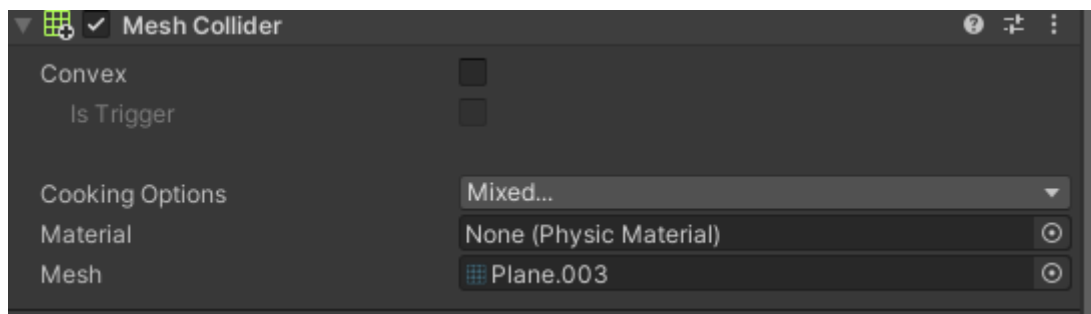
ρυθμίζει ο χρήστης το πώς θα αντιδρά γενικότερα το αντικείμενο οπτικά δηλαδή με τις σκιές, φως και την κάμερα.

Έπειτα προχωράμε στα συστατικά τα οποία έχουμε εισαγάγει εμείς το πρώτο είναι το Rigidbody.



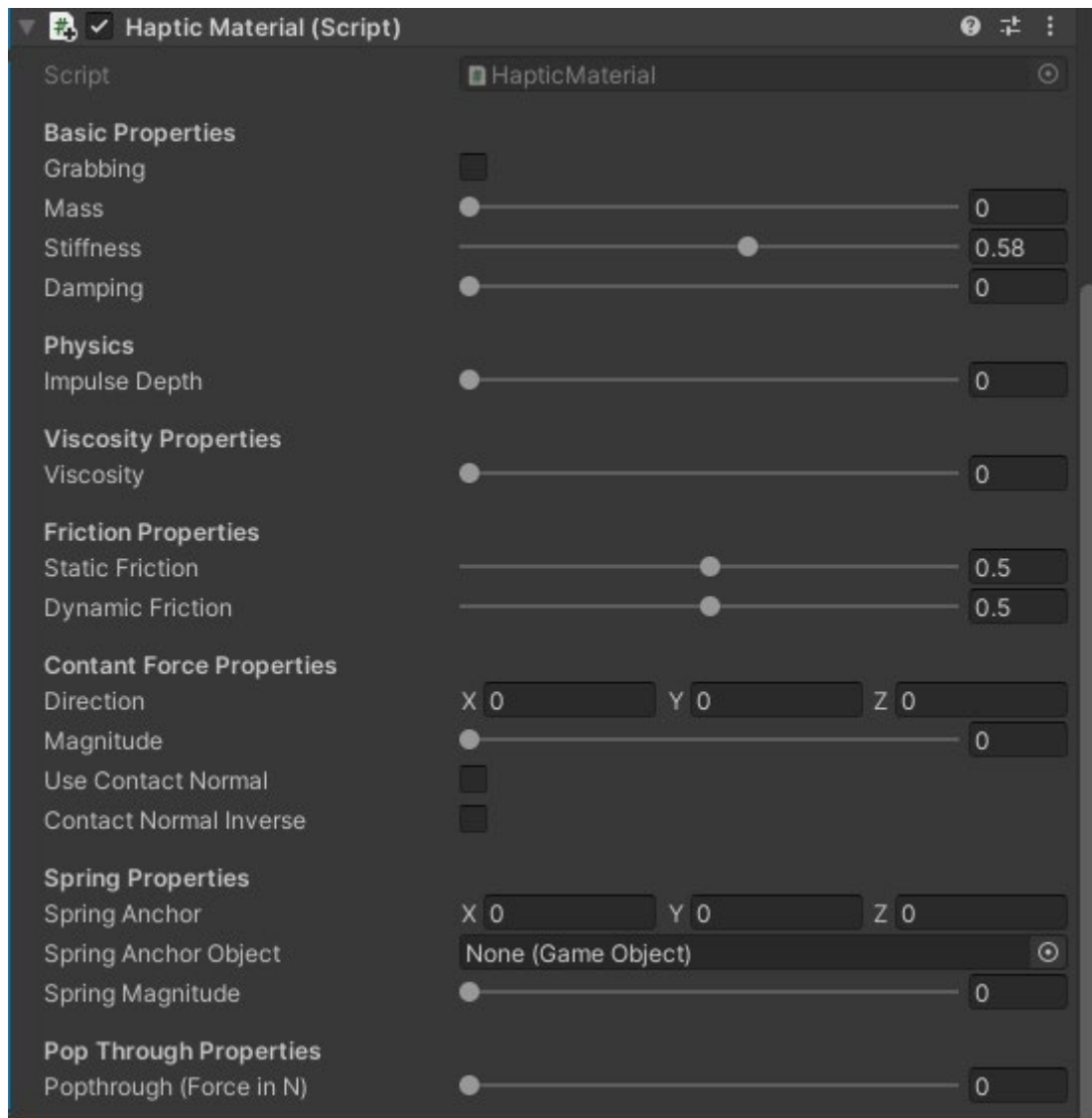
Εικόνα 4.20 Το συστατικό Rigidbody του τούβλου

Το Rigidbody είναι το συστατικό το οποίο κανονίζει πως το αντικείμενο θα έρχεται σε επαφή με το περιβάλλον σαν φυσικό αντικείμενο. Από εδώ μπορεί ο χρήστης να ορίσει τη μάζα του αντικειμένου ή την τριβή που έχει με άλλα φυσικά αντικείμενα ή και ακόμα να δώσει βαρύτητα στο αντικείμενο. Για την εφαρμογή που αναπτύξαμε δεν πειράξαμε τις ρυθμίσεις που έχει το Rigidbody παρά μόνο να βάλουμε το Collision Detection σε Continuous για καλύτερη επαφή με την πένα της συσκευής παρόλα αυτά τα υπόλοιπα στοιχεία θα αλλάξουν από το συστατικό που προσφέρει το plugin που θα αναλυθεί παρακάτω.



Εικόνα 4.21 Το συστατικό Mesh Collider του τούβλου

Έπειτα έχουμε το συστατικό Mesh Collider αυτό το συστατικό είναι υπεύθυνο για να δώσει σχήμα στο αντικείμενό μας και παρόμοια με το Mesh Filter κρατάει το Plane.003 που είναι η γεωμετρία του τούβλου αλλά αντί το αποτέλεσμα να είναι οπτικό όπως στο Mesh Filter πλέον το αποτέλεσμα είναι να δημιουργεί μια στερεά επιφάνεια στο σχήμα του τούβλου. Αυτή η λειτουργία είναι απαραίτητη για να μπορεί να έρχεται σε επαφή η πένα με το αντικείμενο.

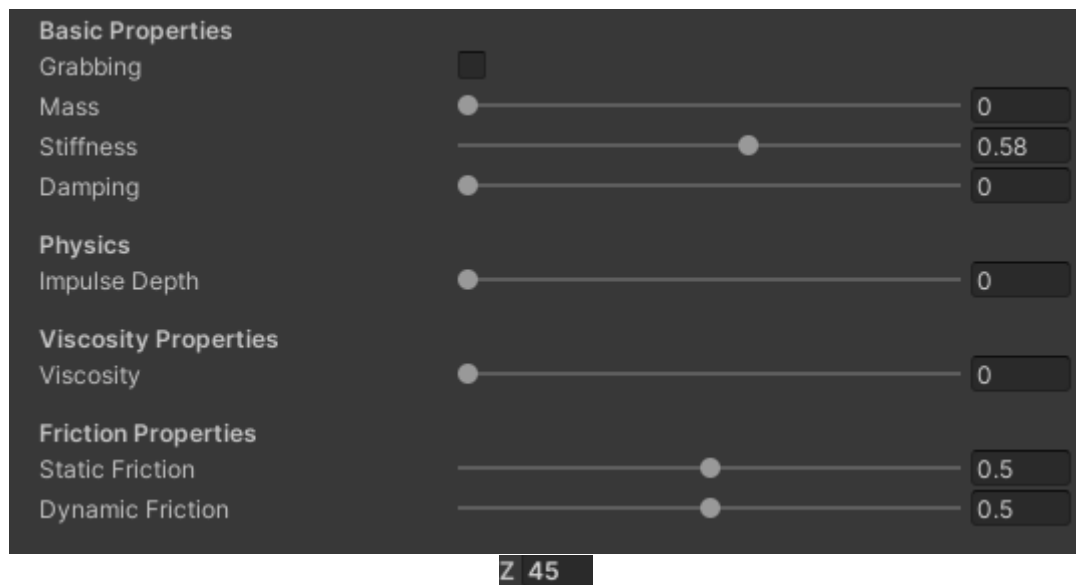


Εικόνα 4.22 Το συστατικό Haptic Material του τούβλου

Το τελευταίο αλλά και πολύ σημαντικό από τα συστατικά μας είναι το Haptic Material. Αυτό το συστατικό είναι υπεύθυνο για τον τρόπο με τον οποίο η πένα έρχεται σε επαφή με το αντικείμενο καθώς και τις ρυθμίσεις που έχει το αντικείμενο. Στα Basic Properties μπορεί να ρυθμιστεί η μάζα που θα έχει το αντικείμενο, το Stiffness που είναι η σκληρότητα του αντικειμένου και η αλλαγή αυτού διαφοροποιεί το πόσο εύκολο είναι να πατήσεις το αντικείμενο με την πένα καθώς και το Damping που χρησιμοποιείται κυρίως σε πιο ρευστές υφές. Τα Physics είναι ένα κομμάτι του συστατικού με το οποίο δεν πειραματίστηκα και δεν μπορώ να σχολιάσω πάνω σε αυτό. Τα Viscosity Properties επίσης χρησιμοποιείται σε υφές οι οποίες είναι πιο ρευστές όπως αυτή της άμμου η οποία χρησιμοποιήθηκε και στην ουσία αλλάζει το πόσο παχύρευστη είναι η υφή αφού ο χρήστης έχει εισάγει την πένα μέσα στην υφή και όχι απλά ψιλαφίζοντας την από έξω. Στο Friction Properties αλλάζουμε το πόσο τραχιά είναι μια υφή ανεβάζοντας και χαμηλώνοντας αυτή την τιμή αλλάζουμε τη δυσκολία με την οποία η πένα ταξιδεύει πάνω στην επιφάνεια του αντικειμένου. Μια υψηλή τιμή είναι ιδανική για υφές όπως είναι το τσιμέντο που θέλουμε μεγάλη τριβή και χαμηλές τιμές είναι ιδανικές για υφές όπως είναι ο πάγος που είναι μια πολύ λεία επιφάνεια. Το Spring Properties είναι μια λειτουργία που προσφέρει το plugin στο οποίο όταν η πένα μπει μέσα

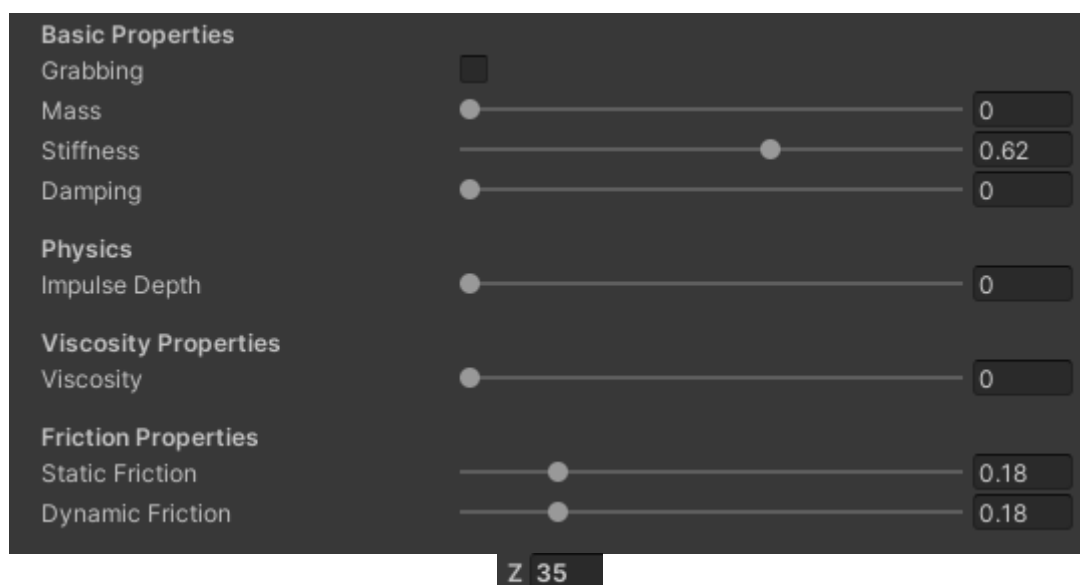
σε μια επιφάνεια αυτή την τινάζει έξω σαν να ήταν ένα ελατήριο. Η συγκεκριμένη λειτουργία δεν χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή. Μια επιπρόσθετη ρύθμιση που δεν υπήρχε στο Plugin και την δημιουργήσαμε για την εφαρμογή ήταν το Texture. Το Texture αλλάζει το μέγεθος του αντικειμένου στον άξονα Z με αυτό τον τρόπο αλλάζοντας το πόσο έντονη είναι η γεωμετρία του αντικειμένου δηλαδή το ανάγλυφο του. Τέλος είναι το Pop Through Properties το οποίο ελέγχει πόση δύναμη χρειάζεται να ασκήσεις στην πένα για να περάσεις μέσα από ένα αντικείμενο, εφόσον η τιμή σε αυτό είναι μηδέν η λειτουργία δεν είναι σε ισχύ. Η συγκεκριμένη λειτουργία δεν χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή. Για την εφαρμογή οι σημαντικότερες ρυθμίσεις που χρησιμοποιήθηκαν ήταν το Stiffness, Texture και Friction με τις συγκεκριμένες τιμές της κάθε υφής να είναι:

1. Ρυθμίσεις του Τούβλου



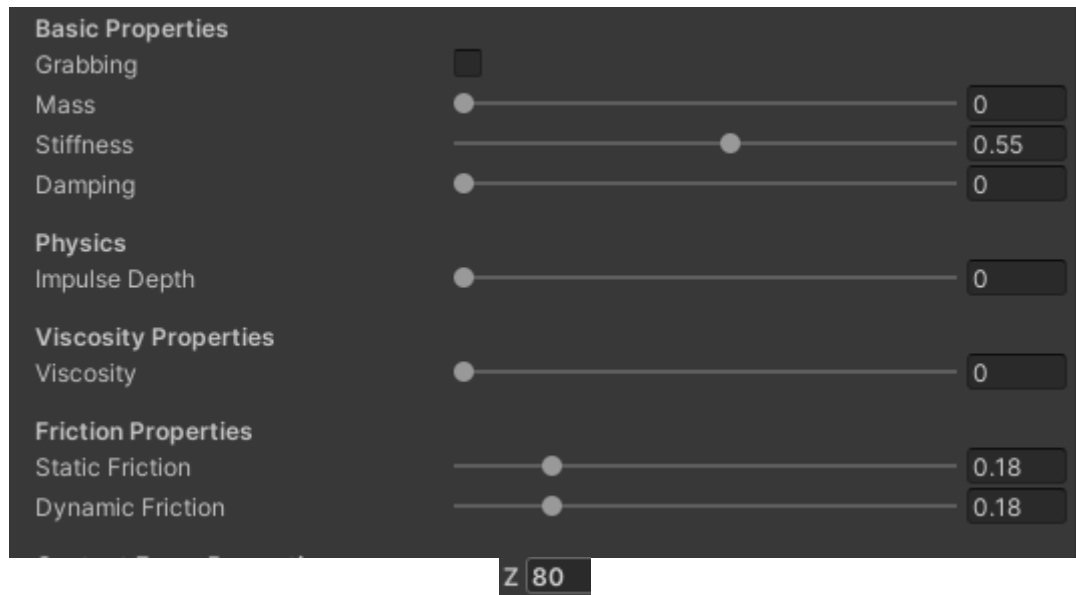
Εικόνα 4.23 Ρυθμίσεις του Τούβλου

2. Ρυθμίσεις του Μετάλλου



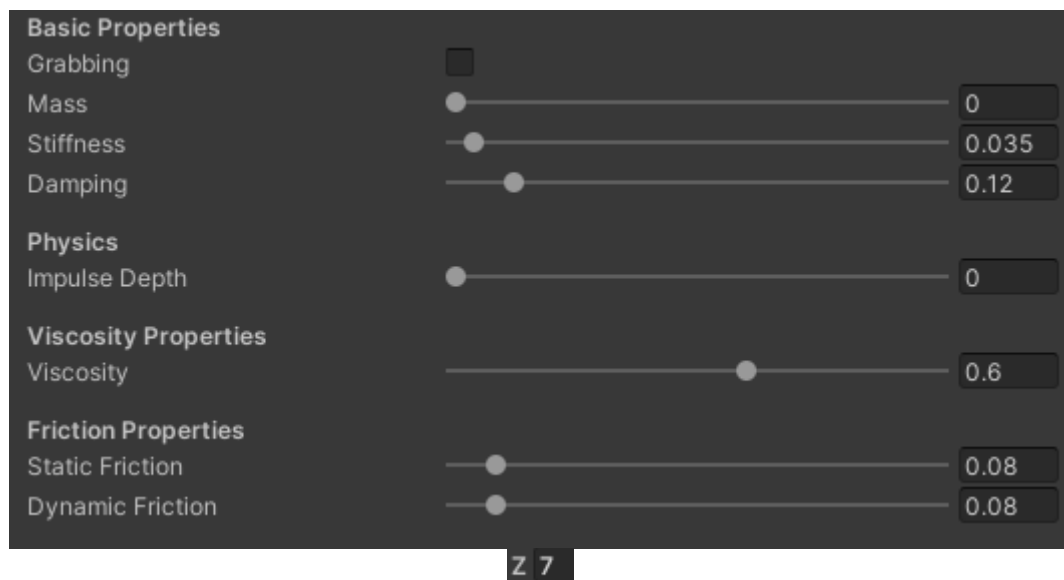
Εικόνα 4.24 Ρυθμίσεις του Μετάλλου

3. Ρυθμίσεις του Ξύλου



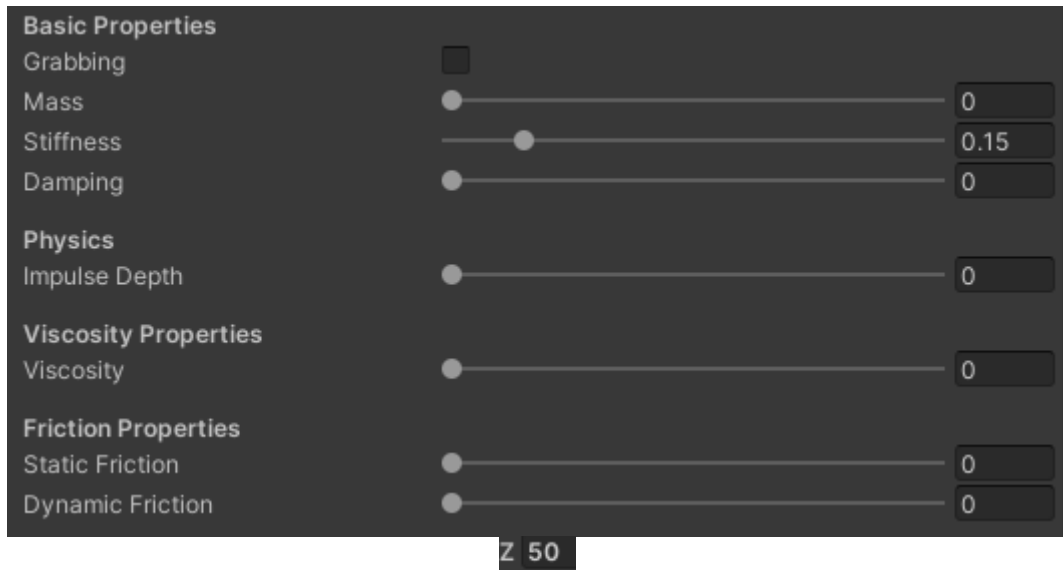
Εικόνα 4.25 Ρυθμίσεις του Ξύλου

4. Ρυθμίσεις της Άμμου



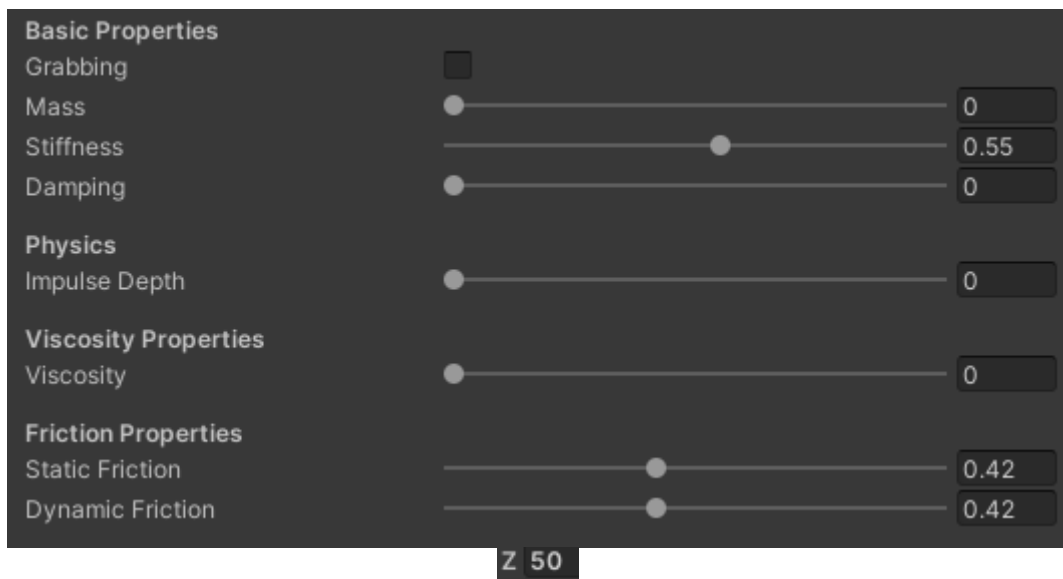
Εικόνα 4.26 Ρυθμίσεις της Άμμου

5. Ρυθμίσεις του Πάγου



Εικόνα 4.27 Ρυθμίσεις του Πάγου

6. Ρυθμίσεις του Τσιμέντου



Εικόνα 4.28 Ρυθμίσεις του Τσιμέντου

4.4 Προγραμματισμός σε C#

Η ανάπτυξη της εφαρμογής έγινε χρησιμοποιώντας τη γλώσσα προγραμματισμού C#. Το περιβάλλον που γράφτηκε ο κώδικας της εφαρμογής ήταν το Visual Studio. Η επιλογή της γλώσσας προγραμματισμού και του Visual Studio έγινε κυρίως επειδή αυτά είναι τα εργαλεία με τα οποία συνεργάζεται το Unity οπότε έχουν πλήρη συμβατότητα με τις βιβλιοθήκες του Unity κάτι που διευκολύνει την ανάπτυξη της εφαρμογής.

Επειδή το Plugin που συνδέει τη συσκευή με το Unity είχε ήδη έτοιμα τα Scripts που αφορούν την

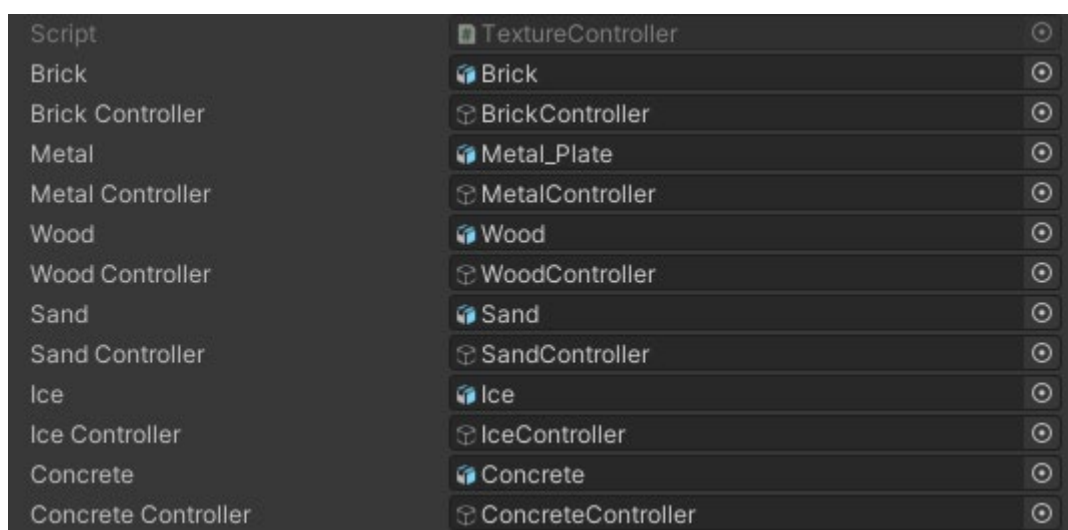
αλληλεπίδραση της πέννας με τις υφές δεν χρειάστηκε να κάνω κάποια επεξεργασία στον κώδικα από αυτά τα Scripts και ο κώδικας που γράψαμε αφορούσε κυρίως το πώς λειτουργούσε η εφαρμογή κατά τη διάρκεια της έρευνας.

Στον κώδικα που έγραψα εγώ στην αρχή χρειαζόμουν μια λειτουργία στην οποία θα μπορούσα με το πάτημα από τα βελάκια να εναλλάσσω τις διαθέσιμες υφές που έχει η εφαρμογή.

```
public GameObject Brick;
public GameObject BrickController;
public GameObject Metal;
public GameObject MetalController;
public GameObject Wood;
public GameObject WoodController;
public GameObject Sand;
public GameObject SandController;
public GameObject Ice;
public GameObject IceController;
public GameObject Concrete;
public GameObject ConcreteController;
```

Εικόνα 4.29 Αρχικοποίηση των υφών και των χειρίστων τους

Οπότε το πρώτο βήμα ήταν να δημιουργήσω μέσα στον κώδικα τα αντικείμενα ως Public αντικείμενα στο Script και να μπορέσω να βάλω στις θέσεις που θα εμφανιστούν την κάθε υφή όπως φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 4.30 Εισαγωγή των αντικειμένων στις αρχικοποιημένες μεταβλητές

Έπειτα έθεσα ένα Counter ως Private διότι δεν υπήρχε η ανάγκη να φαίνεται στο Script μου το οποίο είχε τη λειτουργία να αναγνωρίζει τις υφές ως νούμερα δηλαδή για παράδειγμα το νούμερο μηδέν είναι το τούβλο.

```
private int Counter = 0;
```

Εικόνα 4.31 Αρχικοποίηση του μετρητή

Έπειτα ορίζω ότι το δεξί βέλος στο πληκτρολόγιο θα απενεργοποιεί όλες τις υφές και θα αυξάνει το Counter κατά ένα όμως αν αυτό πάει στο έξι που τόσες είναι και οι υφές τότε ο αριθμός θα επιστρέψει στο μηδέν.

```
if (Input.GetKeyDown(KeyCode.RightArrow))
{
    Brick.SetActive(false);
    BrickController.SetActive(false);
    Metal.SetActive(false);
    MetalController.SetActive(false);
    Wood.SetActive(false);
    WoodController.SetActive(false);
    Sand.SetActive(false);
    SandController.SetActive(false);
    Ice.SetActive(false);
    IceController.SetActive(false);
    Concrete.SetActive(false);
    ConcreteController.SetActive(false);
    Counter++;
    if (Counter == 6) Counter = 0;
}
```

Εικόνα 4.32 Λειτουργία αλλαγής υφών

Έφτιαξα την ίδια λειτουργία και για το αριστερό βελάκι του πληκτρολογίου αλλά αντίθετα έτσι ώστε να μπορεί ο χρήστης να πάει και στις δύο κατευθύνσεις.

```
if (Input.GetKeyDown(KeyCode.LeftArrow))
{
    Brick.SetActive(false);
    BrickController.SetActive(false);
    Metal.SetActive(false);
    MetalController.SetActive(false);
    Wood.SetActive(false);
    WoodController.SetActive(false);
    Sand.SetActive(false);
    SandController.SetActive(false);
    Ice.SetActive(false);
    IceController.SetActive(false);
    Concrete.SetActive(false);
    ConcreteController.SetActive(false);
    Counter--;
    if (Counter == -1) Counter = 5;
}
```

Εικόνα 4.33 Λειτουργία αλλαγής υφών προς την άλλη κατεύθυνση

Τώρα που το Script μπορεί να αναγνωρίσει την κάθε υφή ως αριθμό μέσω της μεταβλητής Counter μένει μόνο να ορίσω την κάθε υφή να εμφανίζεται ανάλογα με τον αριθμό που έχει την δεδομένη στιγμή το Counter.

```

if (Counter == 0)
{
    Brick.SetActive(true);
    BrickController.SetActive(true);
}
if (Counter == 1)
{
    Metal.SetActive(true);
    MetalController.SetActive(true);
}
if (Counter == 2)
{
    Wood.SetActive(true);
    WoodController.SetActive(true);
}
if (Counter == 3)
{
    Sand.SetActive(true);
    SandController.SetActive(true);
}
if (Counter == 4)
{
    Ice.SetActive(true);
    IceController.SetActive(true);
}
if (Counter == 5)
{
    Concrete.SetActive(true);
    ConcreteController.SetActive(true);
}

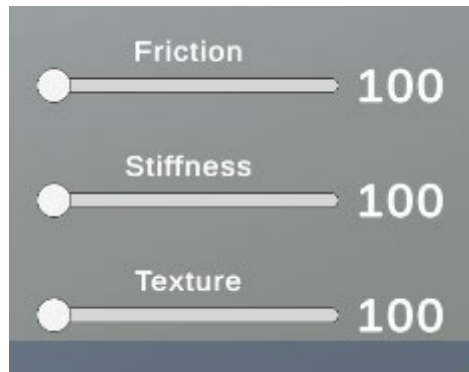
```

Εικόνα 4.34 Αλλαγή υφών με βάση τον μετρητή

Με αυτόν τον τρόπο έχουμε ένα ολοκληρωμένο σύστημα αλλαγής των υφών με την χρήση από τα βελάκια του πληκτρολογίου.

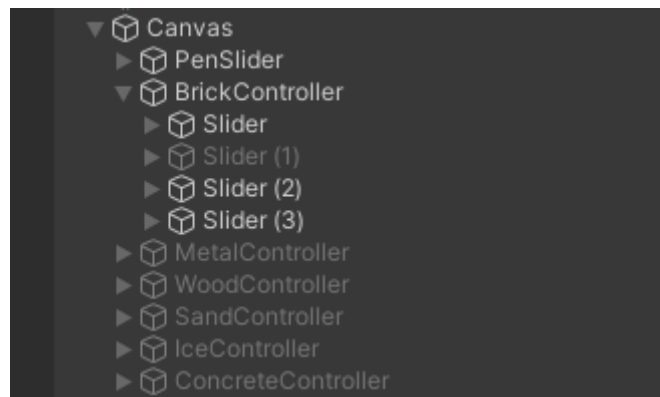
Έπειτα αυτό που χρειαζόταν η εφαρμογή ήταν μια λειτουργία με την οποία θα μπορούσα να αλλάξω τις τιμές της κάθε υφής εύκολα από την οθόνη που έβλεπε ο χρήστης.

Στην αρχή έβαλα Sliders πάνω στην οθόνη τα οποία θα αντιστοιχούσαν στην κάθε ρύθμιση που θα θέλαμε να αλλάξουμε.



Εικόνα 4.35 Το UI από τα Sliders

Αυτά τα Slider είναι πάντα διαφορετικά για την κάθε υφή και εμφανίζονται και εξαφανίζονται ανάλογα με την υφή που είναι εκείνη την στιγμή ορατή.



Εικόνα 4.36 Τα Sliders μέσα στην ιεραρχία κάτω από τον κάθε χειριστή

Όπως φαίνεται η κάθε διαφορετική υφή έχει τα δικά της Sliders.

Μέσα στο Script η λογική που χρησιμοποιείται είναι παρόμοια με προηγουμένως που είχαμε ένα Counter για να αποφασίζει σε ποια υφή αναφέρεται ο κάθε αριθμός. Έτσι και εδώ χρησιμοποιείται μια μεταβλητή που λέγεται Chooser και ανάλογα με τον αριθμό που έχει αυτή η μεταβλητή το Script αποφασίζει τι είδους Slider είναι το κάθε Slider.

```
private void Start()
{
    if (Chooser == 0) StartFriction = HapticObject.hFrictionS;
    if (Chooser == 2) StartStiffness = HapticObject.hStiffness;
    if (Chooser == 3) StartTexture = HapticObject.gameObject.transform.localScale.z / 100;
    if (Chooser == 4) StartViscosity = HapticObject.hViscosity;

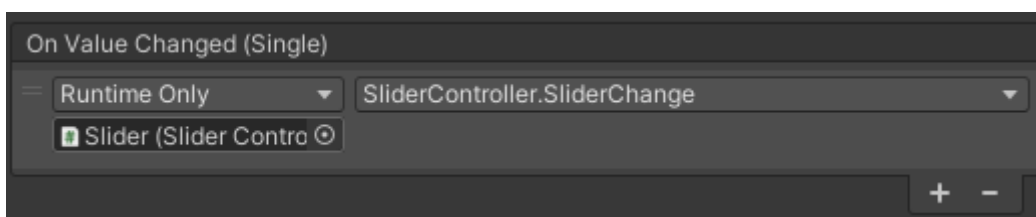
    if (Chooser == 0) MainSlider.value = HapticObject.hFrictionS;
    if (Chooser == 1) MainSlider.value = HapticObject.hFrictionD;
    if (Chooser == 2) MainSlider.value = HapticObject.hStiffness;
    if (Chooser == 3) MainSlider.value = HapticObject.gameObject.transform.localScale.z/100;
    if (Chooser == 4) MainSlider.value = HapticObject.hViscosity;
    if (Chooser == 5) MainSlider.value = HapticObject.hDamping;
    if (Chooser == 6) MainSlider.value = ((Pen.gameObject.transform.localScale.x - 0.02f) * 5000f)/100;
}
```

Εικόνα 4.37 Αρχικοποίηση των Sliders μέσω κώδικα

Έτσι στην αρχή αποθηκεύονται οι αρχικές τιμές που έχουν οι μεταβλητές που ξεκινάει η εφαρμογή (αυτό συμβαίνει για το παιχνίδι που έχει η εφαρμογή και θα εξηγηθεί η λειτουργία αυτή παρακάτω) και έπειτα για το κάθε είδος μεταβλητής μπαίνει η αντίστοιχη τιμή, τις περισσότερες φορές χρησιμοποιείται η τιμή κατευθείαν από το Haptic Script αλλά έχουμε και κάποιες ιδιαίτερες περιπτώσεις ως τις δούμε αναλυτικά. :

- Chooser == 0 είναι η στατική τριβή που έχει το αντικείμενο.
- Chooser == 1 είναι η δυναμική τριβή που έχει το αντικείμενο.
- Chooser == 2 είναι η σκληρότητα που έχει το αντικείμενο.
- Chooser == 3 είναι μια από τις ιδιαίτερες περιπτώσεις η όποια αναφέρεται στο ανάγλυφο της υφής και ο τρόπος με τον οποίο βάζουμε την τιμή στην μεταβλητή είναι από το αντικείμενο που είναι εφαρμοσμένο το Script να πάρουμε το μέγεθος του στον άξονα του Z και να το διαιρέσουμε κατά 100 για να το κάνουμε δεκαδικό αριθμό.
- Chooser == 4 αναφέρεται στο Viscosity η αλλιώς πόσο πηχτό είναι ένα αντικείμενο όταν η πένα θα μπει μέσα σε αυτό.
- Chooser == 5 αναφέρεται στο Damping αυτή είναι μια μεταβλητή που τελικά δεν χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή.
- Chooser == 6 αυτή η μεταβλητή αναφέρεται στο μέγεθος που έχει η πένα στην άκρη της. Ο τρόπος με τον οποίο παίρνουμε αυτή την τιμή είναι λίγο πιο περίπλοκος από τους προηγούμενους. Για αρχή παίρνουμε κατευθείαν το μέγεθος του αντικείμενου στον άξονα του X και αφαιρούμε από αυτό 0.02 αυτός ο αριθμός εξασφαλίζει ότι το μέγεθος της πέννας δεν θα πέσει κάτω από τα 0.02 έπειτα αυτή η τιμή πολλαπλασιάζεται με το πέντε χιλιάδες έτσι ώστε να μετατρέψουμε τον αριθμό που πήραμε σε ποσοστό τις εκατό και τέλος το διαιρούμε με το 100 για να γίνει δεκαδικός αριθμός για να εφαρμόσει στο Slider το οποίο λειτουργεί με αριθμούς από το μηδέν έως το ένα.

Για να λειτουργήσουν τα Slider που έφτιαξα θα πρέπει να βάλω επάνω τους ένα Event στο οποίο θα αντιδρούν και θα κάνουν μια δράση στην περίπτωση που εκπληρωθούν οι συνθήκες του Event. Σε αυτή την περίπτωση το έβαλα να αντιδράει σε περίπτωση αλλαγής της τιμής του Slider.



Εικόνα 4.38 Η λειτουργία του Slider σε περίπτωση αλλαγής της τιμής του

Εφόσον κληθεί το Event ενεργοποιείται η συνάρτηση SliderChange η οποία στην αρχή παίρνει την καινούργια τιμή του Slider και το πολλαπλασιάζει επί τις 100 έπειτα αυτό στέλνεται κατευθείαν στο κείμενο του Slider για να εμφανιστεί ως τιμή στην οθόνη που βλέπει ο χρήστης.

Έπειτα το Script που ορίζει τις ρυθμίσεις στις υφές παίρνει τα καινούργια δεδομένα και τα εφαρμόζει στις υφές με παρόμοιο τρόπο όπως έθεσε στην αρχή τις ρυθμίσεις αρχικά στα Sliders.

```

public void SliderChange()
{
    Value = MainSlider.value * 100;
    SliderText.text = Value.ToString("0.0");

    if(Chooser == 0)
    {
        HapticObject.hFrictionS = MainSlider.value;
        HapticObject.hFrictionD = MainSlider.value;
    }
    if(Chooser == 1) HapticObject.hFrictionD = MainSlider.value;
    if(Chooser == 2) HapticObject.hStiffness = MainSlider.value;
    if(Chooser == 3) HapticObject.gameObject.transform.localScale = new Vector3(HapticObject.
    if(Chooser == 3)
    {
        if (HapticObject.gameObject.transform.localScale.z == 0) HapticObject.gameObject.tran
    }
    if (Chooser == 4) HapticObject.hViscosity = MainSlider.value;
    if (Chooser == 5) HapticObject.hDamping = MainSlider.value;
    if (Chooser == 6) Pen.gameObject.transform.localScale = new Vector3((MainSlider.value * 6
}

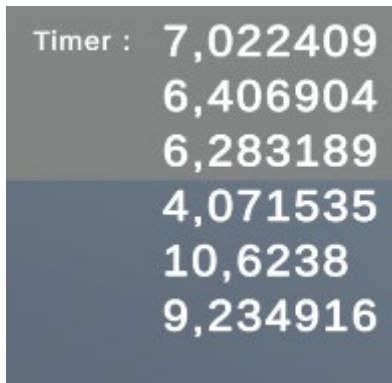
```

Εικόνα 4.39 Ο κώδικας ο οποίος ενεργοποιείτε σε περίπτωση αλλαγής τιμής

Όπως και προηγουμένως χρησιμοποιείται πάλι ο Chooser για να αναγνωρίσει το Script ποια μεταβλητή πρέπει να αλλάξει. Στις περισσότερες περιπτώσεις απλά παίρνω την τιμή του Slider και την βάζω κατευθείαν στο Haptic Script αλλά πάλι υπάρχουν κάποιες ιδιαίτερες περιπτώσεις. Στην περίπτωση του ανάγλυφου ακολουθούνται οι ίδιες τεχνικές για να εφαρμόσουμε τις καινούργιες ρυθμίσεις από το Slider στο αντικείμενο.

Ο κώδικας που αναλύθηκε έως τώρα ήταν υπεύθυνος για την αλλαγή των υφών μπροστά και πίσω και για να ρυθμίζει τις υφές ανάλογα με τις τιμές που έχουν τα Sliders. Οπότε αυτός ο κώδικας αφορά το πρώτο κομμάτι του πειράματος που έχει να κάνει με την προτίμηση των χρηστών όσον αφορά τις ρυθμίσεις των υφών. Έπειτα θα αναλυθεί ο κώδικας που αφορά το παιχνίδι που χρησιμοποιήθηκε για να γίνει η αναγνώριση των υφών από τους χρήστες με κλειστά τα μάτια.

Ο τρόπος με τον οποίο λειτουργεί το παιχνίδι είναι να πατάει ο διαχειριστής το κουμπί ένα και έπειτα να ξεκινάει να μετράει ο χρόνος αναγνώρισης για την κάθε υφή. Όταν ο χρήστης τελειώσει με μια υφή ο διαχειριστής πατάει το κουμπί δύο και αλλάζει η υφή σε μια τυχαία επόμενη αυτό επαναλαμβάνεται για όλες τις υφές.



Timer : 7,022409
6,406904
6,283189
4,071535
10,6238
9,234916

Εικόνα 4.40 Τα χρονόμετρα της κάθε υφής στο παιχνίδι αναγνώρισης

Μέσα στον κώδικα όταν ο χρήστης θα πατήσει το κουμπί ένα θα γίνουν μερικά πράγματα. Για αρχή η μεταβλητή για την εκκίνηση του παιχνιδιού StartGame θα γίνει αληθής και οι χρόνοι αναγνώρισης θα γίνουν όλοι μηδέν σε περίπτωση που το παιχνίδι πραγματοποιήθηκε προηγουμένως και έχουν κρατηθεί οι προηγούμενες τιμές. Έπειτα η μεταβλητή του χρόνου θα γίνει επίσης μηδέν και οι επαναλήψεις θα πάνε στο ένα σε αυτό το στάδιο επίσης θα απενεργοποιηθούν όλες οι υφές.

```
if (Input.GetKeyDown(KeyCode.Alpha1) && StartGame == false)
{
    StartGame = true;
    Timer.SetActive(true);
    Seconds1.text = "0";
    Seconds2.text = "0";
    Seconds3.text = "0";
    Seconds4.text = "0";
    Seconds5.text = "0";
    Seconds6.text = "0";
    SecondsFloat = 0;
    Repetition = 1;
    ShownBrick = false;
    ShownMetal = false;
    ShownWood = false;
    ShownSand = false;
    ShownIce = false;
    ShownConcrete = false;
    StartRoutine = true;
}
```

Εικόνα 4.41 Η λειτουργία έναρξης παιχνιδιού στον κώδικα

Έπειτα θα κληθεί η συνάρτηση ChooseNumber() η οποία επιλέγει έναν τυχαίο αριθμό για το Counter από το μηδέν έως το πέντε και αυτός ο αριθμός έπειτα περνάει έναν έλεγχο αν τυχόν ο αριθμός που επέλεξε και αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη υφή η οποία έχει ξαναεμφανιστεί τότε σε αυτή την περίπτωση η συνάρτηση καλεί ξανά τον εαυτό της αλλάζοντας έτσι πάλι το Counter. Αυτό συμβαίνει για να αποφευχθεί η πιθανότητα να εμφανιστεί η ίδια υφή πάνω από μία φορά.

```
private void ChooseNumber()
{
    Counter = Random.Range(0, 6);
    if((ShownBrick == true && Counter == 0)||
        (ShownMetal == true && Counter == 1)||
        (ShownWood == true && Counter == 2)||
        (ShownSand == true && Counter == 3)||
        (ShownIce == true && Counter == 4)||
        (ShownConcrete == true && Counter == 5))
    {
        ChooseNumber();
    }
}
```

Εικόνα 4.42 Η συνάρτηση επιλογής τυχαίου αριθμού

Τέλος ανάλογα με τον αριθμό που επέλεξε η συνάρτηση για το Counter εμφανίζεται η κατάλληλη υφή.

```
if (Counter == 0) ShownBrick = true;
if (Counter == 1) ShownMetal = true;
if (Counter == 2) ShownWood = true;
if (Counter == 3) ShownSand = true;
if (Counter == 4) ShownIce = true;
if (Counter == 5) ShownConcrete = true;
```

Εικόνα 4.43 Επιλογή υφής με βάση την τιμή του τυχαίου αριθμού

Για τη ροή του παιχνιδιού ο διαχειριστής πατάει το κουμπί δύο για να συνεχιστεί η εμφάνιση των επόμενων υφών, αφού ο χρήστης αναγνωρίσει επιτυχώς ή ανεπιτυχώς την υφή. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται έξι φορές. Η λειτουργία στον κώδικα γίνεται ελέγχοντας για αρχή αν έχει ξεκινήσει η διαδικασία του παιχνιδιού με μια μεταβλητή StartGame και έπειτα, εφόσον ο διαχειριστής πατήσει το κουμπί δύο, καλείται η συνάρτηση NextTexture(). Επίσης, ένας μετρητής κρατά τα δευτερόλεπτα που έχουν περάσει και τέλος ο κώδικας ελέγχει σε ποια επανάληψη βρίσκεται το παιχνίδι, έτσι ώστε να τοποθετήσει τα δευτερόλεπτα που έχουν περάσει στο κατάλληλο πλαίσιο χρόνου.

```

if(StartGame == true)
{
    if (Input.GetKeyDown(KeyCode.Alpha2))
    {
        NextTexture();
    }

    SecondsFloat += Time.deltaTime;

    if (Repetition == 1) Seconds1.text = SecondsFloat.ToString();
    if (Repetition == 2) Seconds2.text = SecondsFloat.ToString();
    if (Repetition == 3) Seconds3.text = SecondsFloat.ToString();
    if (Repetition == 4) Seconds4.text = SecondsFloat.ToString();
    if (Repetition == 5) Seconds5.text = SecondsFloat.ToString();
    if (Repetition == 6) Seconds6.text = SecondsFloat.ToString();
}

```

Εικόνα 4.44 Η λειτουργία έναρξης του παιχνιδιού

Αφού κληθεί η συνάρτηση NextTexture(), για αρχή ο κώδικας ελέγχει αν οι επαναλήψεις που έχουν γίνει μέχρι τώρα είναι λιγότερες από έξι, για να μην ξεπεραστούν οι διαθέσιμες υφές που υπάρχουν στην εφαρμογή. Έπειτα αυξάνει τις επαναλήψεις κατά ένα, μηδενίζει τον μετρητή των δευτερολέπτων για να μετρήσει τον χρόνο αναγνώρισης στη καινούργια υφή και απενεργοποιεί τα οπτικά στοιχεία από τις υφές, ώστε να επιλεγεί μια καινούργια υφή κατά τύχη και να εμφανιστεί καλώντας τη συνάρτηση ChooseNumber(), της οποίας η λειτουργία μπορεί να φανεί παραπάνω. Τέλος, ελέγχει ποια υφή η συνάρτηση ChooseNumber() αποφάσισε να εμφανίσει, έτσι ώστε να τσεκάρει ότι αυτή η υφή εμφανίστηκε και δεν θα πρέπει να ξαναεμφανιστεί στο συγκεκριμένο παιχνίδι.

```

private void NextTexture()
{
    if (Repetition < 6)
    {
        Repetition += 1;
        SecondsFloat = 0;
        StartRoutine = true;

        Brick.SetActive(false);
        BrickController.SetActive(false);
        Metal.SetActive(false);
        MetalController.SetActive(false);
        Wood.SetActive(false);
        WoodController.SetActive(false);
        Sand.SetActive(false);
        SandController.SetActive(false);
        Ice.SetActive(false);
        IceController.SetActive(false);
        Concrete.SetActive(false);
        ConcreteController.SetActive(false);

        ChooseNumber();

        if (Counter == 0) ShownBrick = true;
        if (Counter == 1) ShownMetal = true;
        if (Counter == 2) ShownWood = true;
        if (Counter == 3) ShownSand = true;
        if (Counter == 4) ShownIce = true;
        if (Counter == 5) ShownConcrete = true;
    }
}

```

Εικόνα 4.45 Η λειτουργία αλλαγής υφών κατά την διάρκεια παιχνιδιού

Αν τυχόν οι επαναλήψεις είναι περισσότερες από 6 και κληθεί η συνάρτηση η μεταβλητή του παιχνιδιού σταματάει το παιχνίδι και οι επαναλήψεις γίνονται πάλι μηδέν για να ξεκινήσει ξανά το παιχνίδι από την αρχή εφόσον επιθυμήσει ο διαχειριστής.

```
else if (Repetition >= 6)
{
    StartGame = false;
    Repetition = 0;
    StartRoutine = false;
}
```

Εικόνα 4.46 Έλεγχος τέλος του παιχνιδιού

4.5 Επίλογος

Το Unity 3D είναι ένα εξεταστικά ισχυρό εργαλείο για την ανάπτυξη διαδραστικών εφαρμογών προσφέροντας δυνατότητες που επιτρέπουν την ενσωμάτωση γραφικών υψηλής ποιότητας, φυσικών αλληλεπιδράσεων και προγραμματιστικών δυνατοτήτων. Η ύπαρξη και χρήση του Unity Plugin Haptics Direct ήταν πολύ σημαντικό και χρήσιμο για την δημιουργία της εφαρμογής. Το πρόγραμμα Unity σε συνδυασμό με την γλώσσα προγραμματισμού C# οδήγησε στην υλοποίηση υφών αποτελεσματικά και με πολύ καλή ποιότητα. Συνολικά το Unity απέδειξε ένα πολύ καλό εργαλείο για ανάπτυξη εφαρμογών στον χώρο της εικονικής πραγματικότητας.

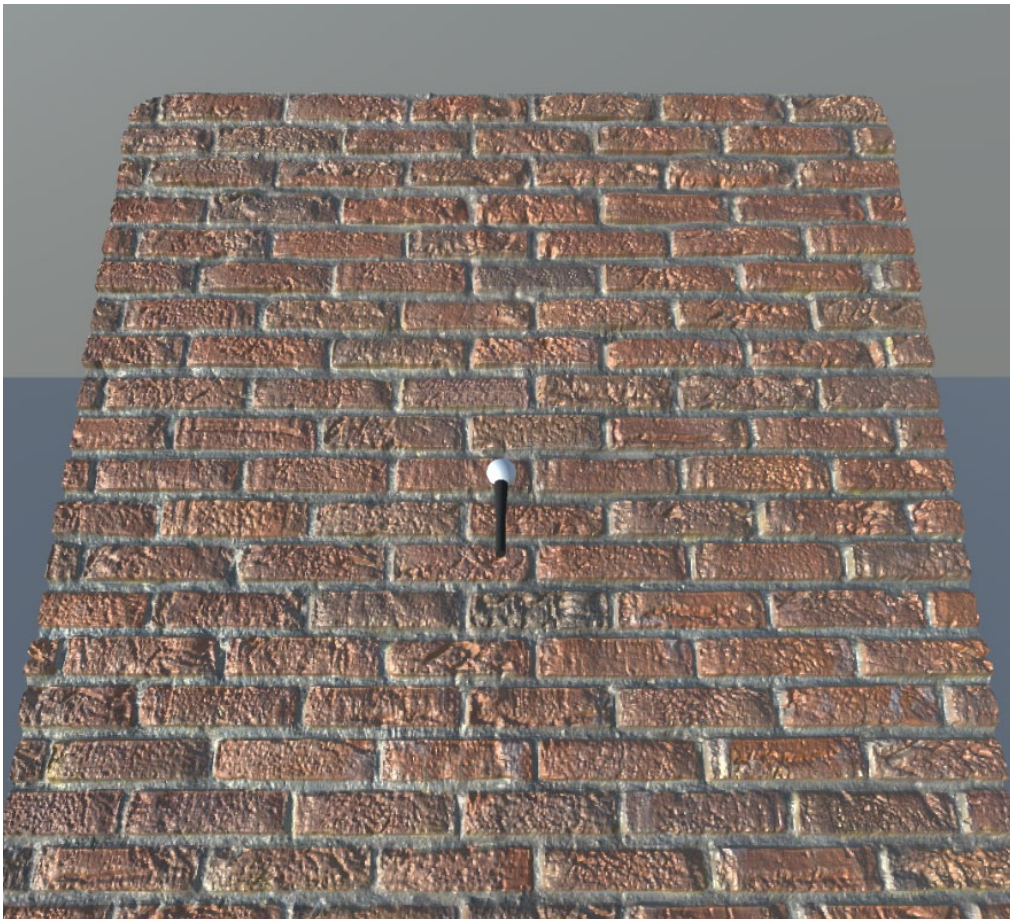
Κεφάλαιο 5^ο : Σχεδιασμός και Υλοποίηση Υφών

5.1 Επιλογή Υλικών

Για τις ανάγκες της εφαρμογής επιλέχθηκαν συνολικά έξι διαφορετικές υφές κάθε μία από αυτές επιλέχθηκε με συγκεκριμένα κριτήρια έτσι ώστε να έχει ως τελικό στόχο να προσφέρει διαφορετικές προκλήσεις στην αίσθηση της αφής μέσω της συσκευής Touch. Οι υφές αυτές είναι : τούβλο, μέταλλο, ξύλο, άμμος, πάγος και τσιμέντο.

1. Τούβλο

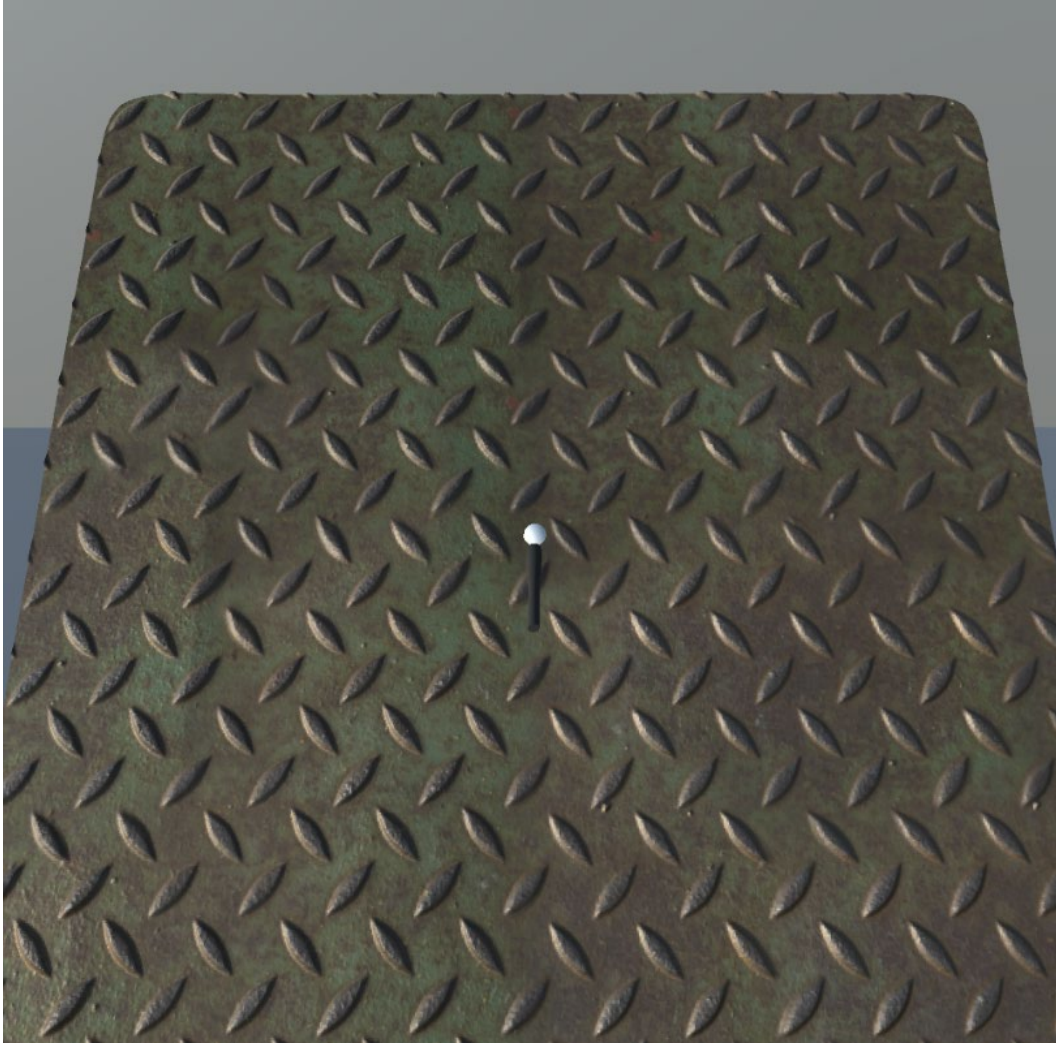
Η υφή του τούβλου επιλέχθηκε λόγω του αναγνωρίσιμου χαρακτηριστικού μοτίβου που έχει. Το παραλληλόγραμμο μοτίβο που ακολουθεί ένας τοίχος από τούβλα μαζί με τα φαγώματα και τις ανωμαλίες που έχουν στην επιφάνεια συνθέτουν μια υφή με πολύ έντονη γεωμετρική ταυτότητα. Ιδανικό για μια εφαρμογή σαν τη δικιά μας που χρειάζεται η απτική αναγνώριση και αξιολόγηση μέσω της αφής.



Εικόνα 5.1 Η υφή του τούβλου

2. Μέταλλο

Το μέταλλο χρησιμοποιήθηκε στη μορφή του μεταλλικού δαπέδου το οποίο διαθέτει ένα χαρακτηριστικό μοτίβο με εξογκώματα. Η λεία αλλά ταυτόχρονα ανάγλυφη επιφάνεια του μετάλλου προσφέρει έναν ιδιαίτερο συνδυασμό μεταξύ σκληρής γεωμετρίας με λεία αίσθηση.



Εικόνα 5.2 Η υφή του μετάλλου

3. Ξύλο

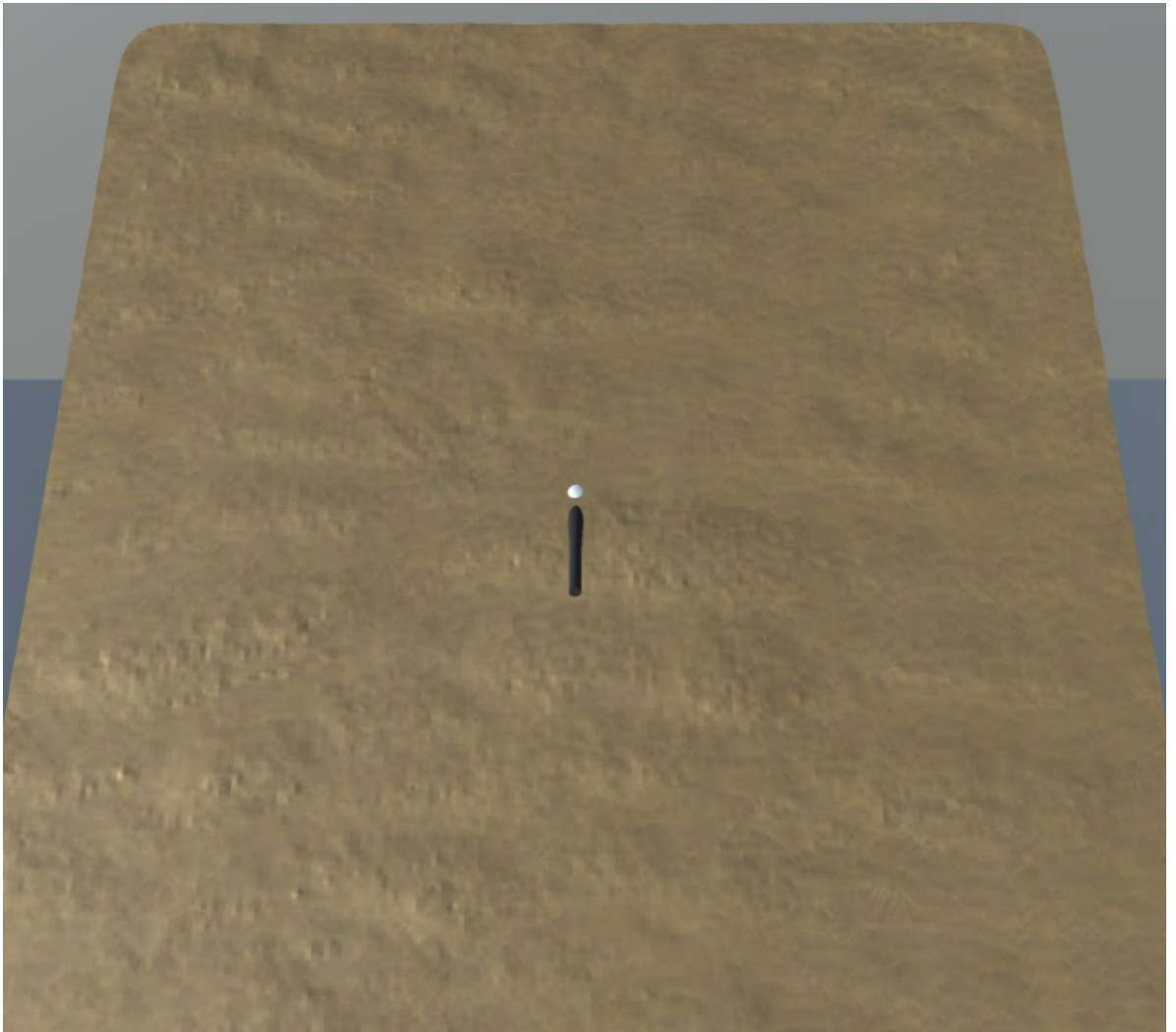
Το ξύλο χρησιμοποιήθηκε στη μορφή μιας επιφάνειας γραφείου και επιλέχθηκε όχι τόσο για το γεωμετρικό του ανάγλυφο το οποίο είναι από τη φύση του περιορισμένο αλλά για να λειτουργήσει ως μια υφή αναγνώρισης. Οι χρήστες καλούνται να αναγνωρίσουν μια επιφάνεια η οποία στηρίζεται περισσότερο στις παραμέτρους σκληρότητας και τριβής σε συνδυασμό με το περιορισμένο ανάγλυφο που δίνει την αίσθηση του ξύλου παρά σε έντονη γεωμετρική διαμόρφωση.



Εικόνα 5.3 Η υφή του ξύλου

4. Άμμος

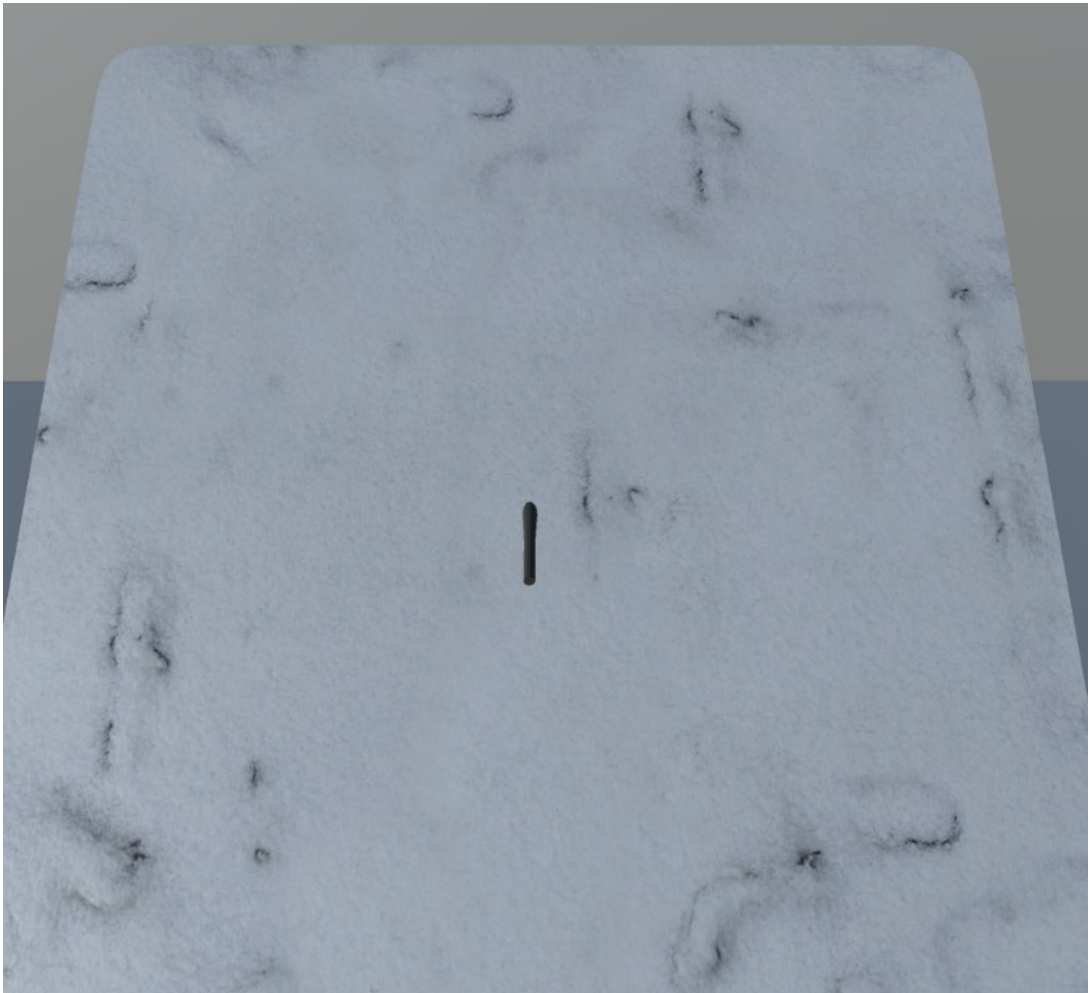
Η άμμος ήταν μια ιδιαίτερη περίπτωση στην εφαρμογή καθώς ήταν η μοναδική υφή η οποία έκανε χρήση της παραμέτρου Viscosity. Αυτή η παράμετρος είναι η πυκνότητα που έχει μια υφή που δεν είναι συμπαγής δηλαδή η άμμος είχε την ιδιότητα να μπορεί να βυθίζεται η πένα μέσα στην υφή δίνοντας μια εντελώς διαφορετική αίσθηση.



Εικόνα 5.4 Η υφή της άμμου

5. Πάγος

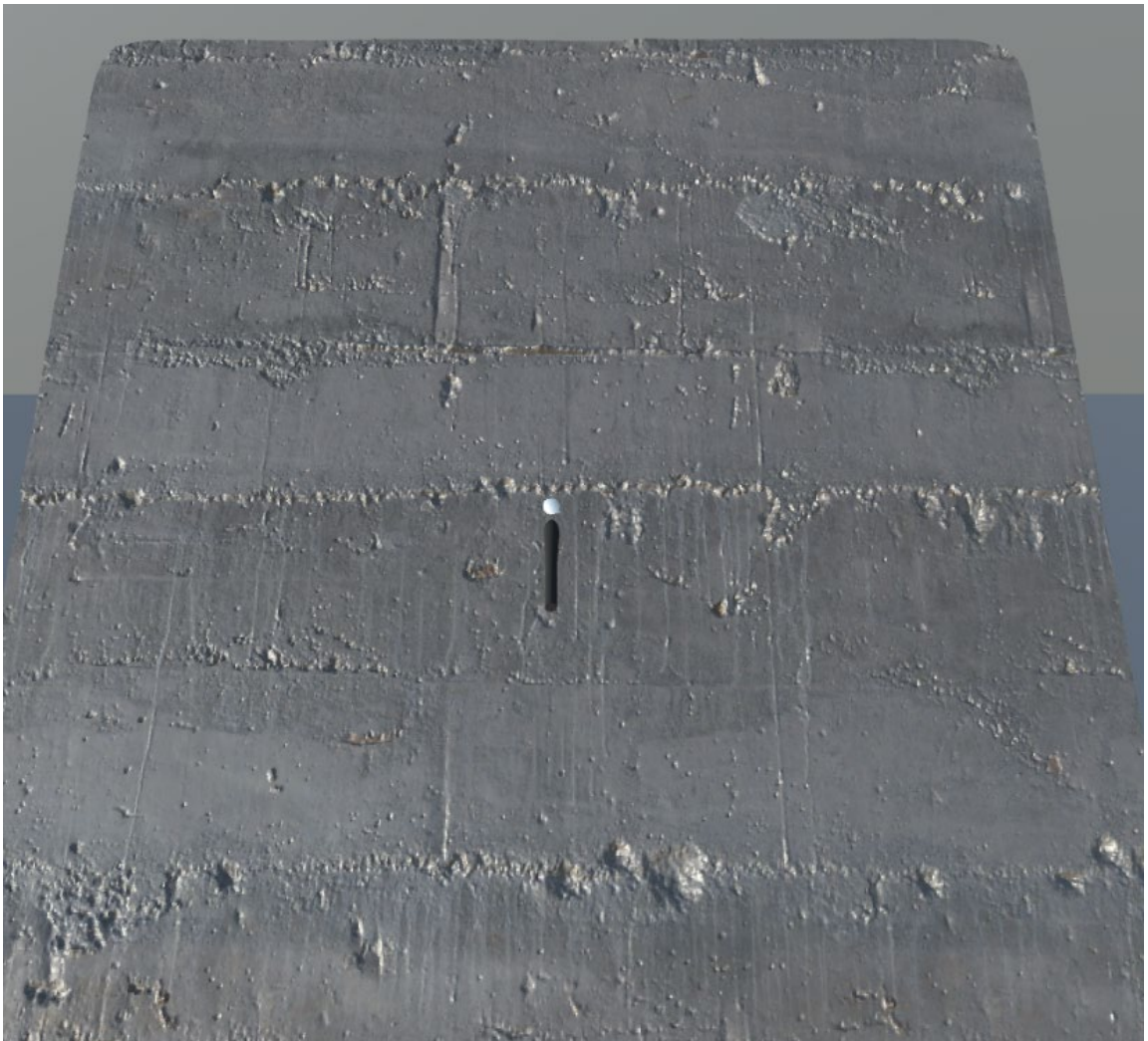
Ο πάγος επιλέχθηκε ως μια υφή με εντελώς λεία επιφάνεια χωρίς να έχει μεγάλη σημασία το ανάγλυφό του. Λειτουργεί ως ανταγωνιστής του ξύλου για να φανεί αν μπορούν οι χρήστες να διακρίνουν τη διαφορά μεταξύ υφών όχι βασισμένοι στο ανάγλυφο αλλά στις ρυθμίσεις σκληρότητας και τριβής.



Εικόνα 5.5 Η υφή του πάγου

6. Τσιμέντο

Τέλος το τσιμέντο αποτελεί μια ενδιαφέρουσα υφή καθώς, παρότι έχει έντονο γεωμετρικό ανάγλυφο αυτό δεν ακολουθεί κάποιο συγκεκριμένο επαναλαμβανόμενο μοτίβο. Αντίθετα στην επιφάνεια αυτής της υφής ο χρήστης θα διακρίνει τυχαίες αυξομειώσεις άλλοτε πιο φαγωμένο άλλοτε πιο ανασηκωμένο κάνοντας έτσι δύσκολο τον εντοπισμό της υφής βάσει κάποιου γεωμετρικού μοτίβου που επαναλαμβάνεται, όπως στο τούβλο ή στο μέταλλο.



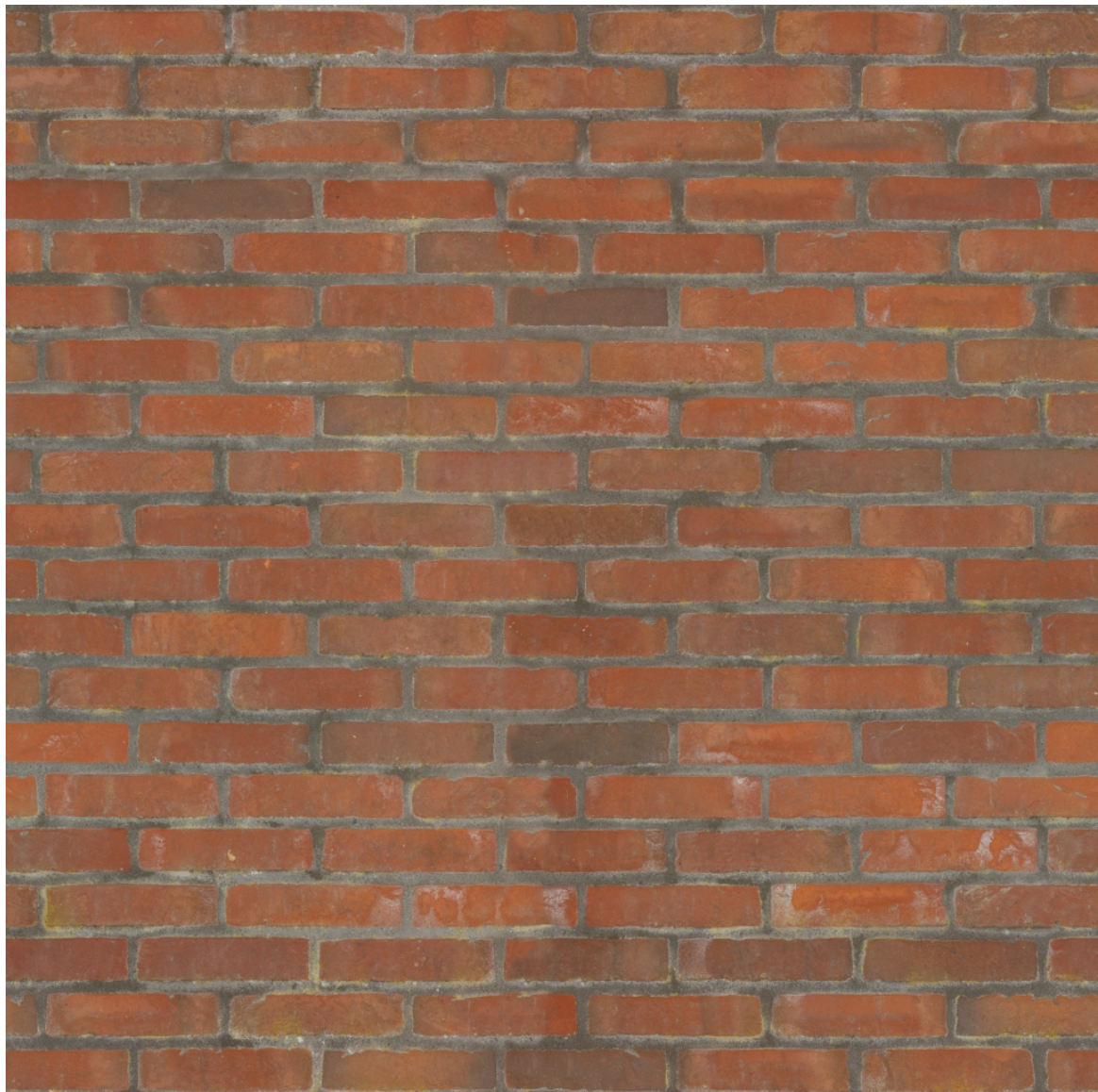
Εικόνα 5.6 Η υφή του τσιμέντου

5.2 Χαρτογράφηση Υφών

Για τη δημιουργία ρεαλιστικών υφών στον εικονικό χώρο της εφαρμογής χρησιμοποιήθηκαν δυο βασικά είδη χαρτογράφησης της υφής αυτά είναι: το Diffuse Map και το Displacement Map. Και τα δυο αποτελούν βασικά εργαλεία στον τρισδιάστατο μοντελισμό. Στην εφαρμογή χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Blender για τη δημιουργία των υφών μέσω αυτών των εργαλείων καθώς το Blender μπορεί να αξιοποιήσει αυτές τις τεχνικές.

Diffuse Map

Το Diffuse Map στην ουσία είναι η βασική εικόνα που εφαρμόζεται πάνω στην επιφάνεια ενός αντικείμενου και εμφανίζει το χρώμα που θα έχει αυτό το αντικείμενο οπτικά. Θα μπορούσε πιο απλά να περιγραφεί ως μια φωτογραφία η οποία δεν περιέχει βάθος ή ανάγλυφο αλλά είναι αποκλειστικά και μόνο πως θα φαίνεται στο μάτι. Ένα παράδειγμα από Diffuse Map είναι μια φωτογραφία τούχου από τούβλα σαν αυτή που χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία της υφής των τούβλων στην εφαρμογή.



Εικόνα 5.7 Το Diffuse Map του τούβλου

Displacement Map

Το Displacement Map χρησιμοποιείται αποκλειστικά για να δημιουργήσει τις γεωμετρικές μεταβολές που βρίσκονται στην επιφάνεια ενός μοντέλου. Πρόκειται για μια εικόνα με αποχρώσεις του γκρι όπου οι πιο φωτεινές περιοχές ανασηκώνουν την επιφάνεια ενώ οι πιο σκοτεινές την βυθίζουν. Έτσι το Blender μπορεί να χρησιμοποιήσει αυτές τις πληροφορίες από αυτήν την φωτογραφία για να μεταβάλει τη γεωμετρία μιας επιφάνειας με τέτοιο τρόπο που θα δώσει την αίσθηση από το αντικείμενο που θέλουμε να προσομοιώσουμε. Παρακάτω μπορεί να φανεί ξεκάθαρα στο Displacement Map του τούβλου ποιες περιοχές έχουμε ανασηκωμένες και ποιες πιο βυθισμένες.



Εικόνα 5.8 Το Displacement Map του τούβλου

Η σωστή συνδυαστική χρήση αυτών των δυο χαρτογραφήσεων επέτρεψε στη δημιουργία υφών που φαίνονται ρεαλιστικές στο μάτι καθώς χρησιμοποιήθηκαν φωτογραφίες στις χαρτογραφήσεις από την πραγματική ζωή και επίσης προσφέρουν και ρεαλιστική απτική αναπαράσταση καθώς χρησιμοποιήθηκαν Displacement Maps που είχαν μεγάλη ακρίβεια. Η κάθε υφή στην εφαρμογή

συνοδευόταν από ένα Diffuse Map και ένα Displacement Map τα οποία δημιουργήθηκαν στο περιβάλλον του Blender και έπειτα ενσωματώθηκαν στο Unity όπου δημιουργήθηκε η εφαρμογή.

Πηγή Υλικών

Όλες οι χαρτογραφήσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τις υφές προέρχονται από τον ιστότοπο Polyhaven.com [21] πρόκειται για μια διαδικτυακή πλατφόρμα που προσφέρει δωρεάν υψηλής ποιότητας Textures κάτω από την άδεια Creative Commons Zero (CC0). Αυτό σημαίνει πως το περιεχόμενο που βρίσκεται σε αυτή την ιστοσελίδα είναι πλήρως ελεύθερο για χρήση για οποιονδήποτε σκοπό χωρίς να έχει περιορισμούς πνευματικών δικαιωμάτων. Η ποιότητα και η ελευθερία χρήσης των Textures που προσέφερε η ιστοσελίδα Polyhaven ήταν πολύ σημαντική για την απόδοση ρεαλιστικών υφών στην εφαρμογή.

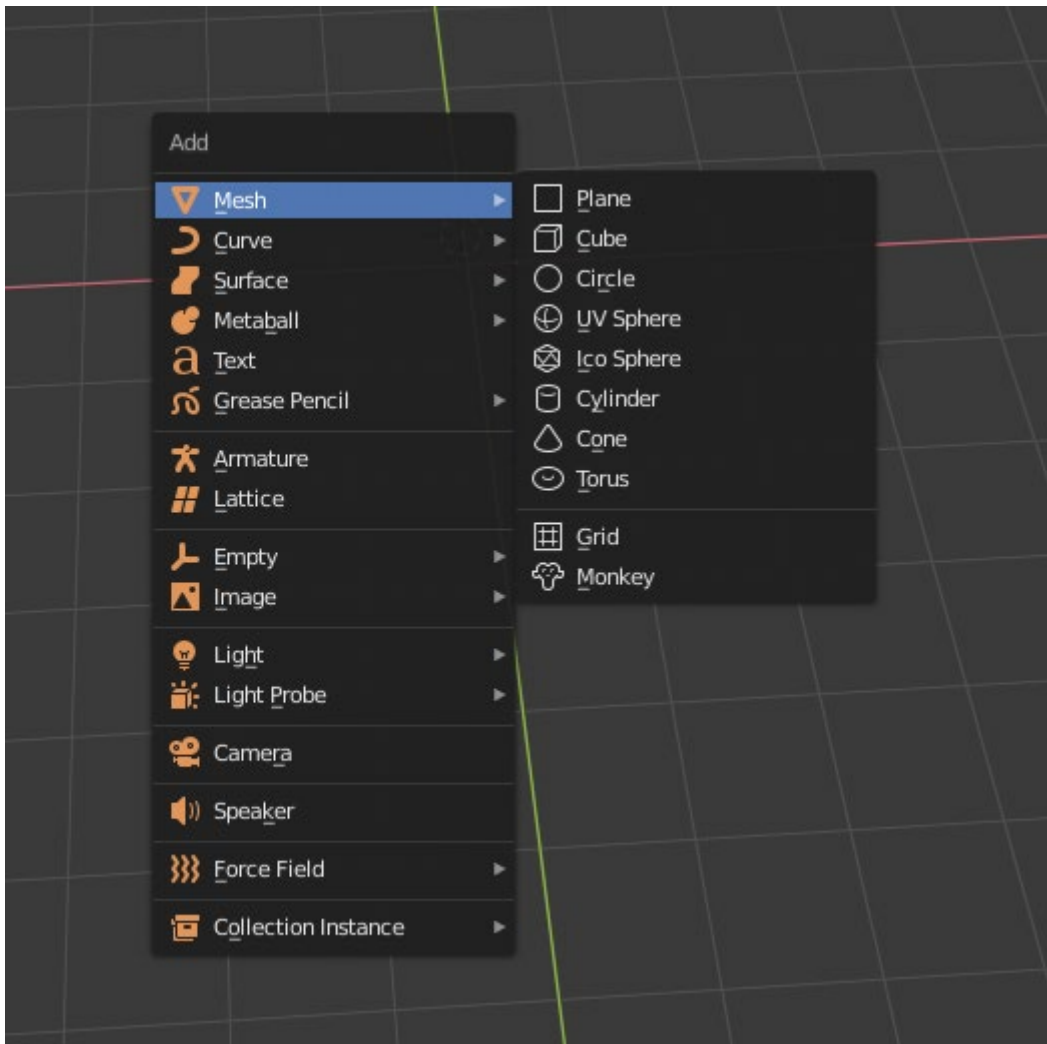
5.3 Δημιουργία Υφών στο Blender

Όπως προαναφέρθηκε για τη δημιουργία των υφών χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Blender. Το Blender είναι ένα λογισμικό ανοιχτού κώδικα που χρησιμοποιείται για διάφορες μορφές τρισδιάστατης δημιουργίας όπως είναι η μοντελοποίηση, υφές, animation, οπτικά εφέ και πολλά άλλα. Η δημοτικότητα αυτού του λογισμικού οφείλεται στο γεγονός ότι είναι ανοιχτού κώδικα και έχει μεγάλη προσβασιμότητα στους χρήστες που θέλουν να μάθουν να το χρησιμοποιούν με πάρα πολλούς οδηγούς χρήσης και δημιουργίας που βρίσκονται στο διαδίκτυο, επίσης το γεγονός ότι το λογισμικό είναι δωρεάν προς τη χρήση του είναι πολύ σημαντικό. Σε αυτό το λογισμικό είχα προηγούμενη εμπειρία σε δικά μου προσωπικά Project και ήταν και ο λόγος που το επέλεξα για αυτή την εφαρμογή.

Το Blender υποστηρίζει πολλαπλές τεχνικές τρισδιάστατου μοντελισμού όπως είναι το Sculpting, Polygonal Modeling και πολλές άλλες. Επίσης διαθέτει Shader Editor που επιτρέπει στον χρήστη να δημιουργήσει και να διαχειριστεί πολύ εύκολα Textures αυτά τα εργαλεία μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περίπτωση που ο χρήστης θέλει να δημιουργήσει δικά του μοντέλα και υφές εξολοκλήρου καινούργια. Το σύστημα που έχει το Blender βασισμένο στα Nodes το κάνει πολύ εύκολο να πειραματιστεί ο χρήστης με δικά του Textures.

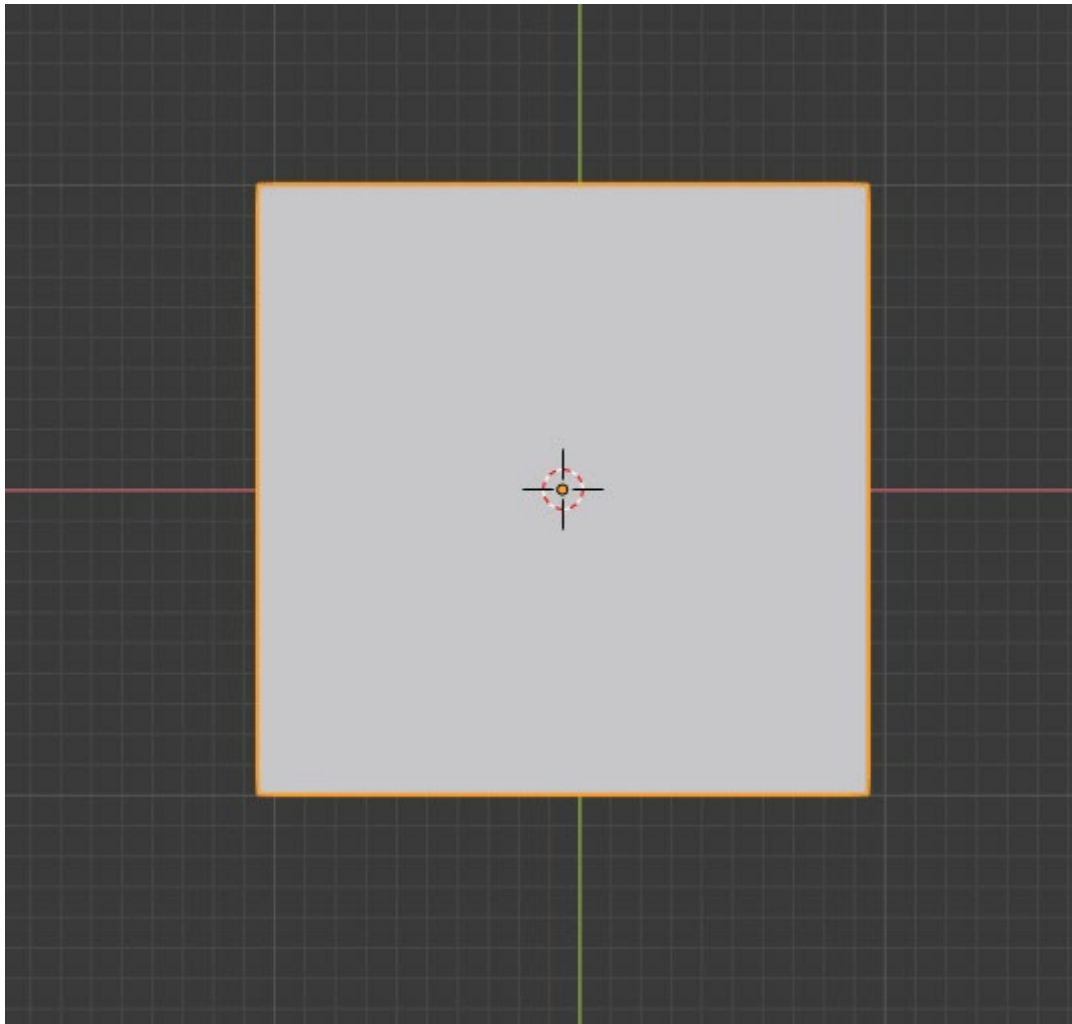
Για τη δημιουργία των υφών που χρησιμοποιούνται στην εφαρμογή ακολουθήθηκε μια διαδικασία στο Blender όπως περιγράφεται παρακάτω:

Για το πρώτο βήμα της δημιουργίας των υφών πρέπει στην αρχή να δημιουργήσουμε ένα καινούργιο αντικείμενο στην συγκεκριμένη περίπτωση ένα Plane διότι είναι το σχήμα που βολεύει για τις υφές που θα χρησιμοποιήσουμε. Πατώντας τα πλήκτρα Shift + A στο Blender εμφανίζεται ένα μενού όπου μπορούμε να επιλέξουμε τον τύπο του αντικειμένου που θα δημιουργηθεί στην σκηνή μας, αυτό θα εμφανισθεί στο κέντρο εκεί που βρίσκεται και ο τρισδιάστατος κέρσορας του Blender.



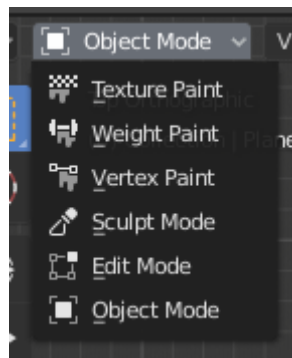
Εικόνα 5.9 Μενού δημιουργίας αντικειμένων στο Blender

Στη συνέχεια μέσα από αυτό το μενού θα επιλέξουμε την επιλογή Plane και θα εμφανισθεί ένα καινούργιο αντικείμενο στη μορφή του Plane δηλαδή μιας απλής τετράγωνης επιφάνειας.



Εικόνα 5.10 Δημιουργία του αντικείμενου Plane στο Blender

Το Blender διαθέτει διάφορες μορφές με τις οποίες μπορούμε να δούμε ένα αντικείμενο. Αυτή τη στιγμή βρισκόμαστε στη μορφή Object Mode. Όμως θέλουμε να μπορέσουμε να μπούμε σε μια μορφή η οποία θα μας επιτρέψει να τροποποιήσουμε το αντικείμενό μας με σκοπό να το διαιρέσουμε σε κομμάτια έτσι ώστε να έχει μεγαλύτερη λεπτομέρεια. Αυτό μπορούμε να το κάνουμε με την επιλογή Edit Mode που βρίσκεται σαν επιλογή σε ένα μενού πάνω αριστερά στην οθόνη.



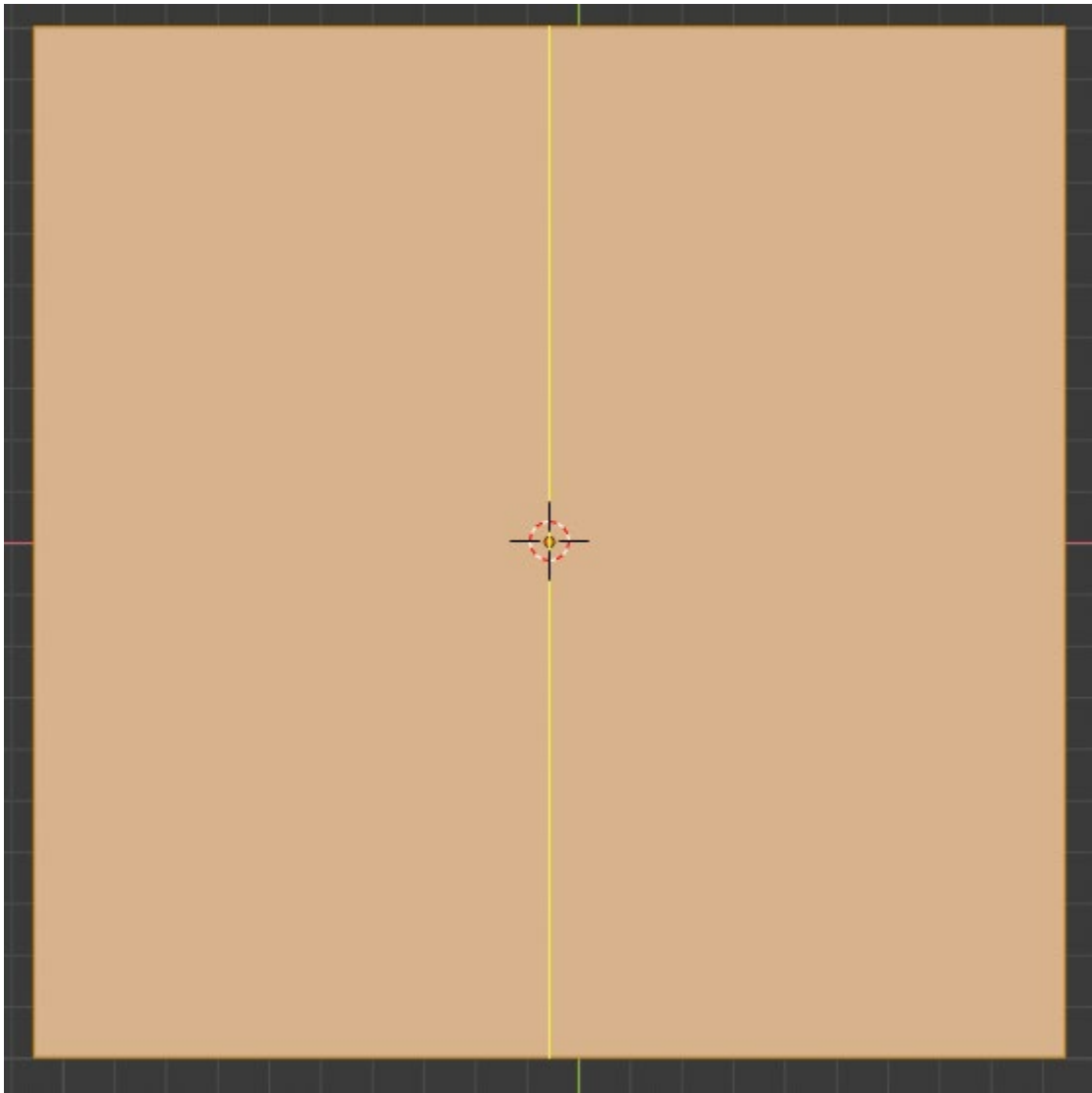
Εικόνα 5.11 Οι διαφορετικές μορφές θέασης των αντικειμένων στο Blender

Αφού πατήσουμε αυτή την επιλογή μπορούμε να παρατηρήσουμε κάποιες διαφορές στην οθόνη μας. Δίπλα από το μενού πλέον μπορούμε να δούμε ότι μπορούμε να επιλέξουμε στο αντικείμενό μας τα Vertices, Edges και Faces αυτά είναι τα κομμάτια από τα οποία αποτελείται ένα αντικείμενο. Ένα Face αποτελείται από τέσσερα Vertices και ένα Edge από δυο Vertices. Επίσης μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι είχαμε αλλαγή στις επιλογές τροποποίησης που μπορούμε να κάνουμε.



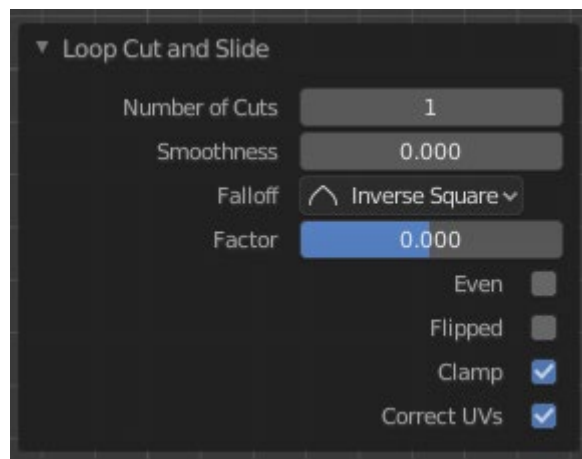
Εικόνα 5.12 Οι διαφορετικές επιλογές τροποποίησης αντικειμένων στο Blender

Αυτές εδώ είναι όλες επιλογές με τις οποίες μπορούμε να τροποποιήσουμε το αντικείμενο που έχουμε δημιουργήσει. Σε αυτή την περίπτωση θα χρησιμοποιήσουμε την πέμπτη επιλογή που είναι το Split αυτό θα μας επιτρέψει να διαιρέσουμε το αντικείμενό μας σε πολλά κομμάτια. Αφού πατήσουμε την επιλογή Split και πάμε τον κέρσορα πάνω στο αντικείμενο θα εμφανισθεί μια κίτρινη γραμμή που μας δείχνει που θα εφαρμοσθεί το Split.



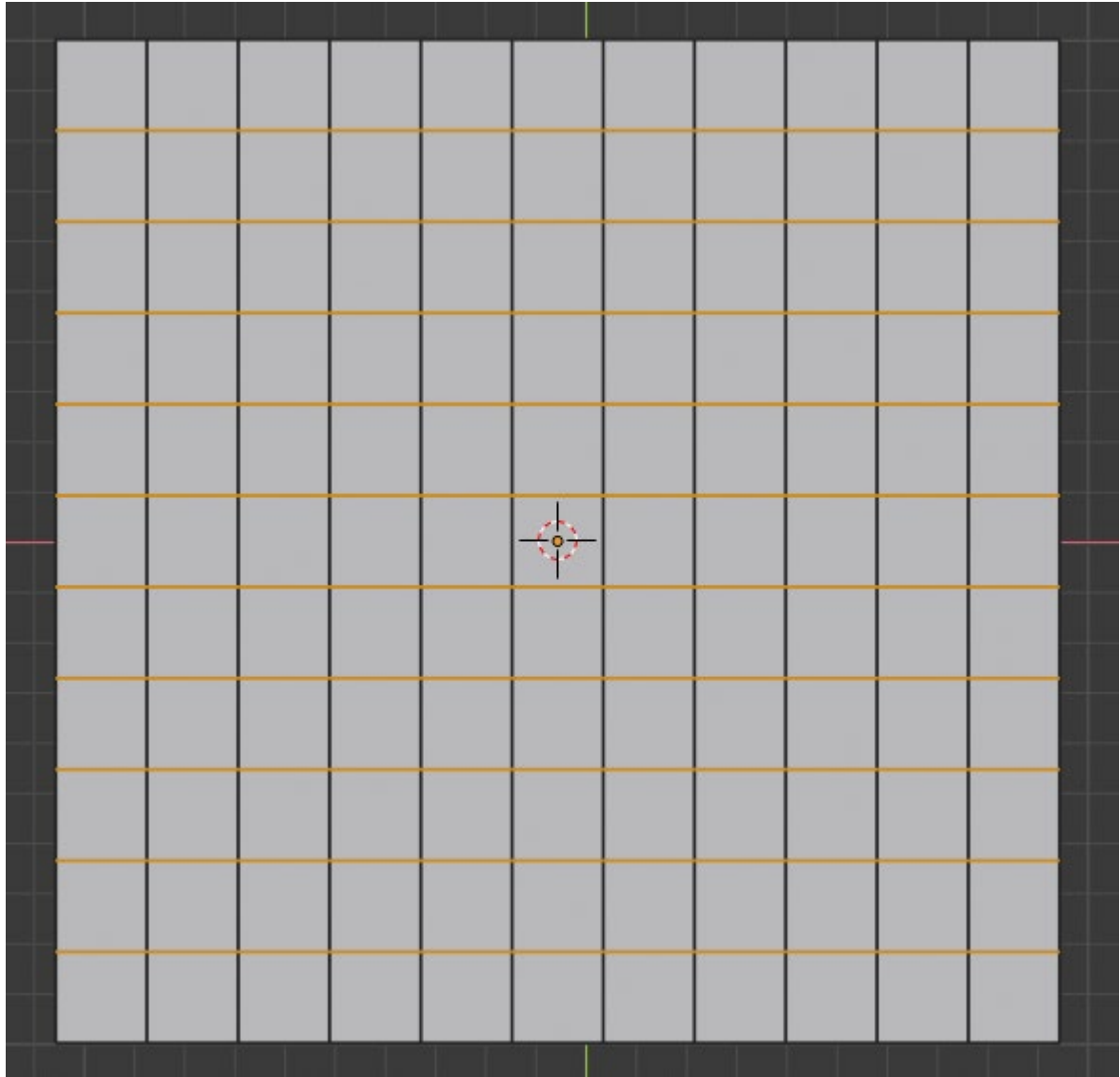
Εικόνα 5.13 Εφαρμογή της τροποποίησης Split στο αντικείμενο

Αφού πατήσουμε το αντικείμενό μας για να εφαρμοσθεί η τροποποίηση θα μπορέσουμε να δούμε κάτω αριστερά ότι βγήκε ένα καινούργιο μενού με διάφορες επιλογές που μπορούμε να κάνουμε στην τροποποίηση που πάμε να εφαρμόσουμε στο αντικείμενο.



Εικόνα 5.14 Διαφοροποιήσεις που μπορούν να γίνουν στην τροποποίηση Split

Σε αυτό το μενού έχουμε διάφορες επιλογές που μπορούμε να κάνουμε αλλά αυτή που μας ενδιαφέρει στην περίπτωση μας είναι ο αριθμός των κοπών που θα γίνει στο αντικείμενο ή με άλλα λόγια το Number of Cuts το οποίο θα το βάλουμε στο δέκα. Αυτή τη διαδικασία την κάναμε στο αντικείμενό μας κάθετα τώρα την ίδια διαδικασία θα ακολουθήσουμε ξανά αλλά αυτή τη φορά οριζόντια στο αντικείμενο. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα το αντικείμενό μας που ήταν πριν ένα μεγάλο τετράγωνο να διαιρεθεί σε μικρότερα τετράγωνα όπως φαίνεται εδώ.

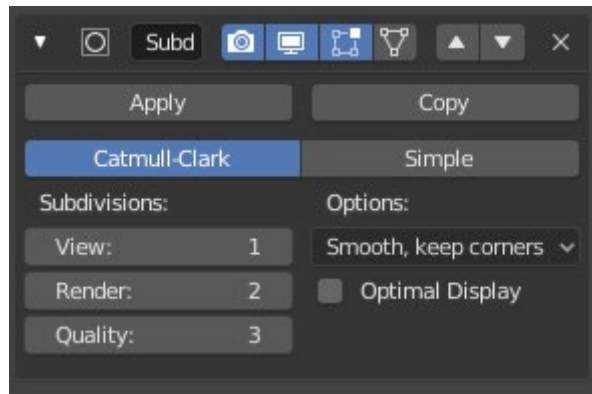


Εικόνα 5.15 Το αντικείμενο χωρισμένο σε κομμάτια μετά την τροποποίηση Split

Ο σκοπός αυτής της ενέργειας είναι η υφή να εμφανισθεί ως πιο λεπτομερής όταν θα βάλουμε και τα υπόλοιπα φίλτρα που χρειάζεται για να δημιουργήσουμε την υφή.

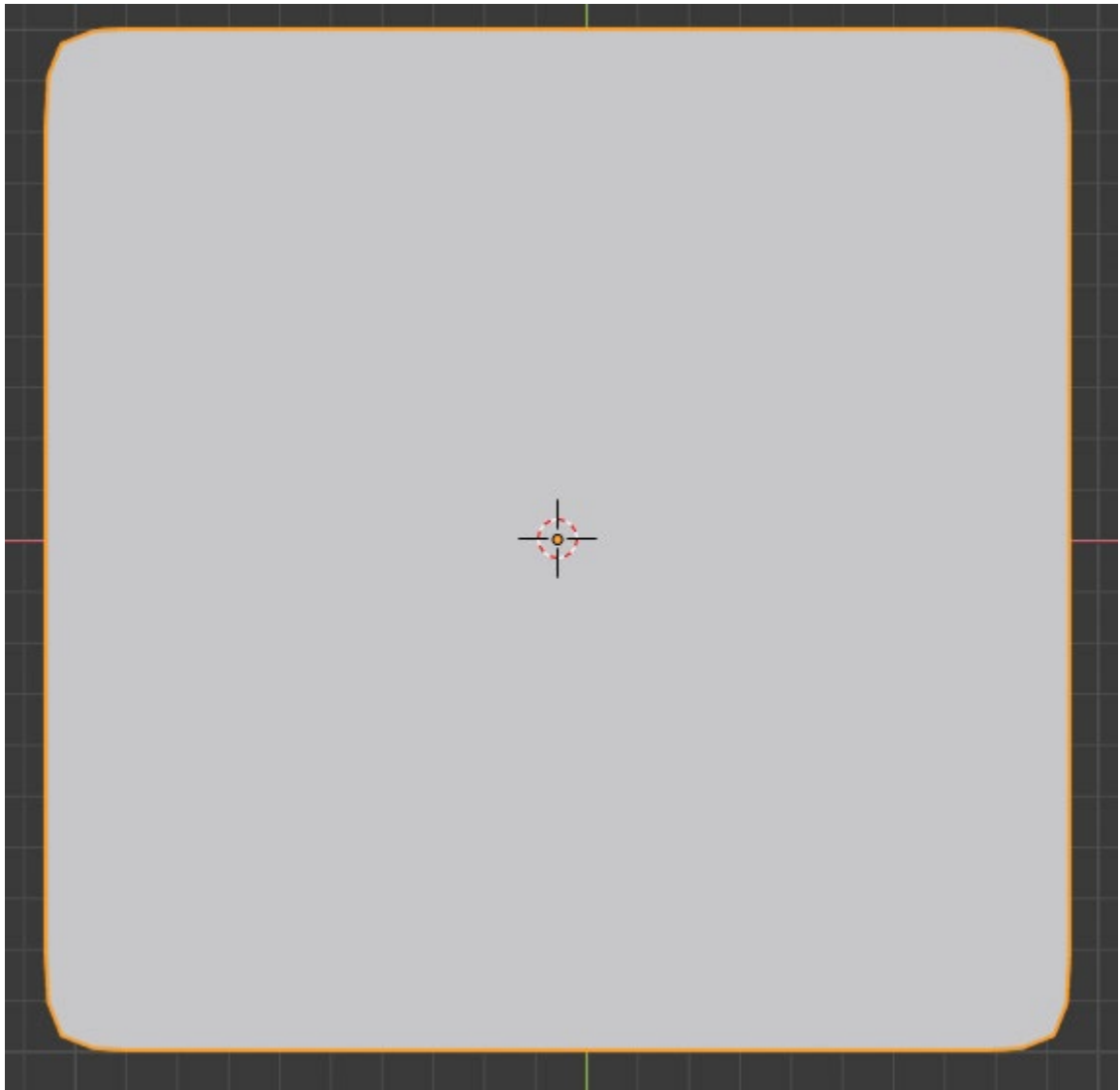
Ένα από τα εργαλεία που προσφέρει το Blender είναι να μπορούμε να βάζουμε Modifier στα αντικείμενα που δημιουργούμε. Αυτά τα Modifier αλλάζουν το αντικείμενο με διάφορους τρόπους. Το πρώτο Modifier που θα βάλουμε στο αντικείμενό μας είναι αυτό που ονομάζεται Subdivision Surface. Αυτό το Modifier δίνει την αίσθηση ενός λείου αντικειμένου σε σχέση με το τετραγωνισμένο αντικείμενο που είχαμε πριν ο τρόπος με τον οποίο δουλεύει είναι να διαιρεί τα Faces που υπάρχουν ήδη δηλαδή όλα τα μικρά κουτάκια που δημιουργήσαμε πριν στο Edit Mode

και να τα κάνει πολλά περισσότερα με σκοπό να κάνει λεία την επιφάνεια. Στο παράθυρο που μπορούμε να τροποποιήσουμε το Modifier που μόλις προσθέσαμε μπορούμε να δούμε ότι έχουμε διάφορες επιλογές που μπορούμε να αλλάξουμε.



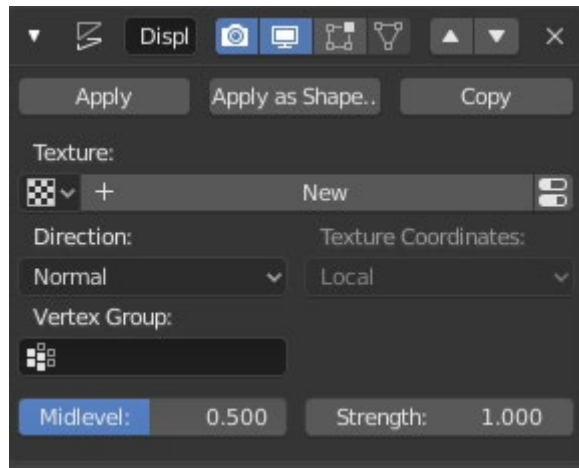
Εικόνα 5.16 Το Modifier Subdivision Surface

Αφού βάλουμε αυτό το Modifier στο αντικείμενο δεν μπορούμε να παρατηρήσουμε μεγάλη διαφορά από πριν παρά μόνο ότι οι γωνίες του αντικειμένου είναι πλέον πιο ομαλές. Αυτό όμως θα αλλάξει όταν προσθέσουμε και το επόμενο Modifier.



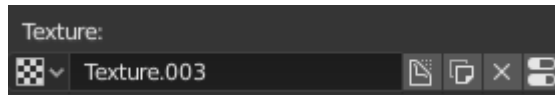
Εικόνα 5.17 Το αντικείμενο μετά την εφαρμογή του Subdivision Surface

Στην συνέχεια στο αντικείμενο μας θα προσθέσουμε το Modifier που ονομάζεται Displace. Αυτό το Modifier είναι υπεύθυνο για να δέχεται το Displacement Map που έχουμε για την υφή μας και να μεταφέρει τις πληροφορίες που θα πάρει από αυτό το Displacement Map στο αντικείμενο μας με αποτέλεσμα να φτιάχνει ένα τρισδιάστατο αντικείμενο που στην επιφάνεια του θα έχουμε την γεωμετρία που αντιστοιχεί στα φωτεινά και σκοτεινά κομμάτια που έχει το Map.



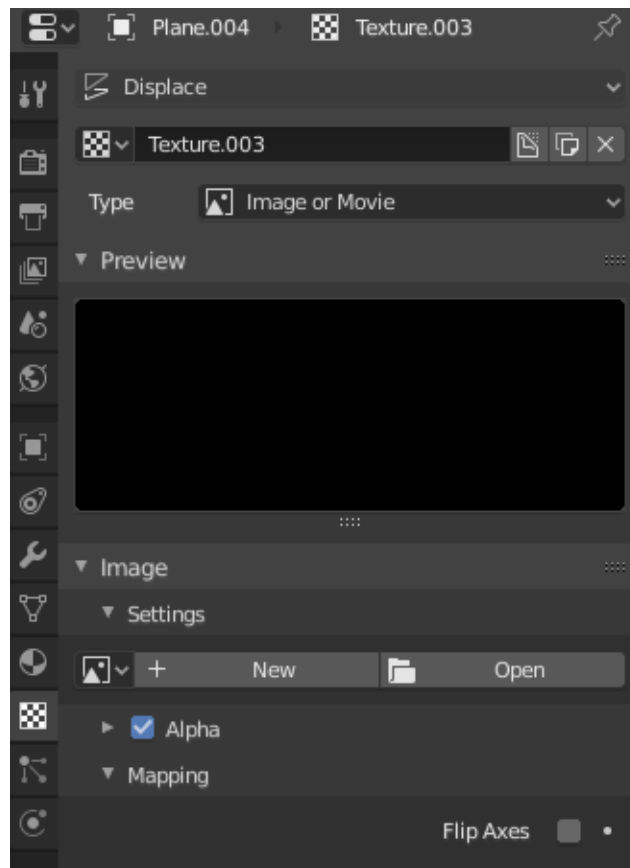
Εικόνα 5.18 Το Modifier Displace

Αφού πατήσουμε New στο πλαίσιο του Texture του Modifier θα δημιουργηθεί αυτόματα ένα καινούργιο Texture στο συγκεκριμένο παράδειγμα ένα Texture που ονομάζεται Texture.003.



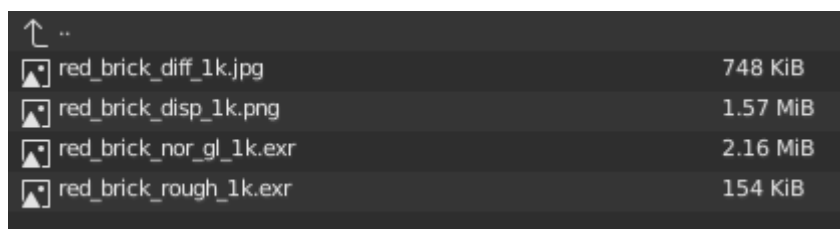
Εικόνα 5.19 Η δημιουργία του καινούργιου Texture από το Displace Modifier

Αυτή τη στιγμή το Blender εμφανίζει το μενού των Modifiers αφού εκεί επιλέξαμε να βρισκόμαστε για να επεξεργαστούμε τα Modifiers. Αφού δημιουργήσαμε το καινούργιο Texture θα πατήσουμε το μενού των Texture για να μπορέσουμε να επεξεργαστούμε το Texture που δημιουργήθηκε.



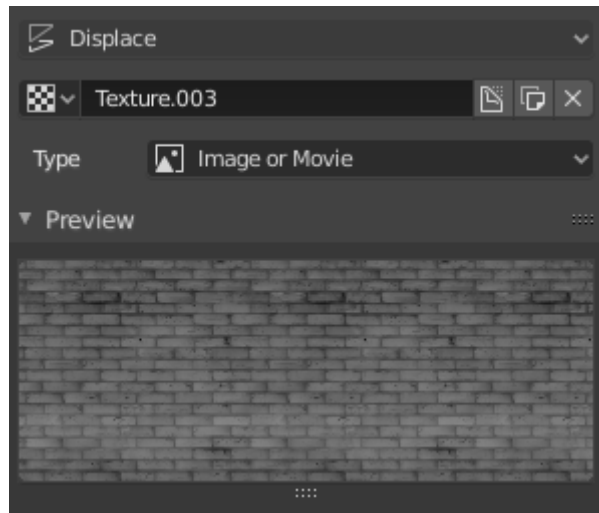
Εικόνα 5.20 Προβολή του προσωρινού κενού Texture

Σε αυτό το μενού μπορούμε να δούμε ότι το Texture αυτή τη στιγμή δεν ακολουθεί κανένα μοτίβο από το μαύρο πλαίσιο που φαίνεται στο μενού. Μπορούμε να πατήσουμε Open και να χρησιμοποιήσουμε το Displacement Map που κατεβάσαμε από το Polyhaven.com ως το μοτίβο που θα ακολουθεί το Texture μας.



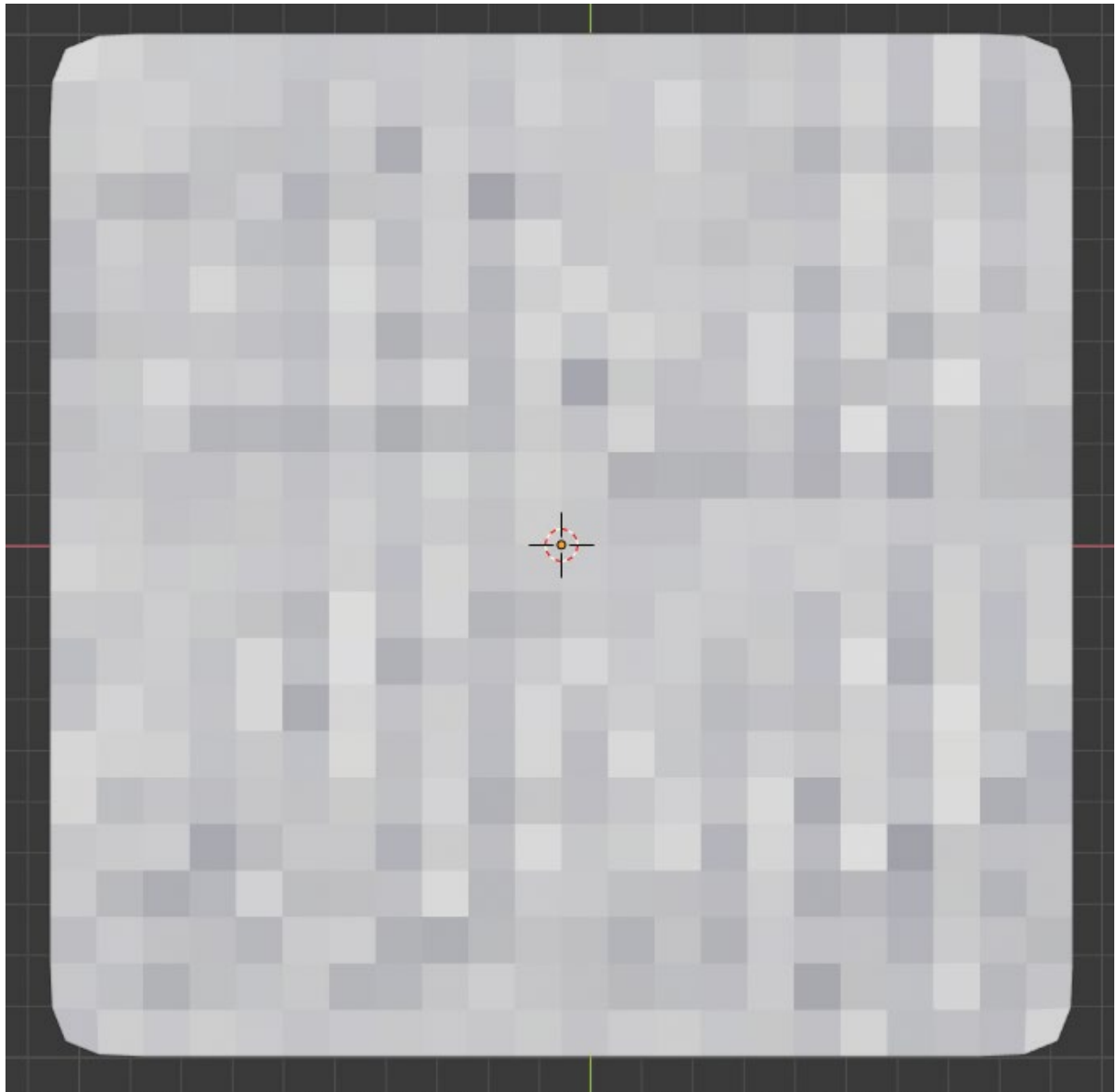
Εικόνα 5.21 Προβολή του Displacement Map στον φάκελο

Από αυτό το αρχείο θα πατήσουμε το red_brick_disp_1k.png και θα δούμε ότι πλέον το Displacement Map έχει εφαρμοσθεί στο Texture μας.



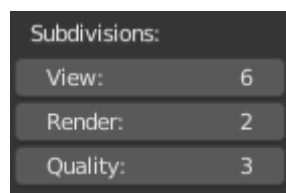
Εικόνα 5.22 Αλλαγή του Modifier μετά την εφαρμογή του Displacement Map

Αν προσέξουμε το αντικείμενό μας όμως δεν θα ανταποκρινόταν στο Displacement Map που το βάλαμε παρότι μπορούμε να παρατηρήσουμε κάποια αλλαγή.



Εικόνα 5.23 Αλλαγή του αντικείμενου μετά την εφαρμογή του Displace Modifier

Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι θα πρέπει να αλλάξουμε κάποιες ρυθμίσεις στα Modifier μας για να μπορέσουμε να αποτυπώσουμε την υφή με την λεπτομέρεια που θα θέλαμε. Για αρχή θα πρέπει να επιστρέψουμε στο Subdivision Surface και να αλλάξουμε τον αριθμό των Views από ένα στον αριθμό έξι. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα να έχουμε μεγαλύτερη λεπτομέρεια στα Faces που βρίσκονται πάνω στο αντικείμενό μας.



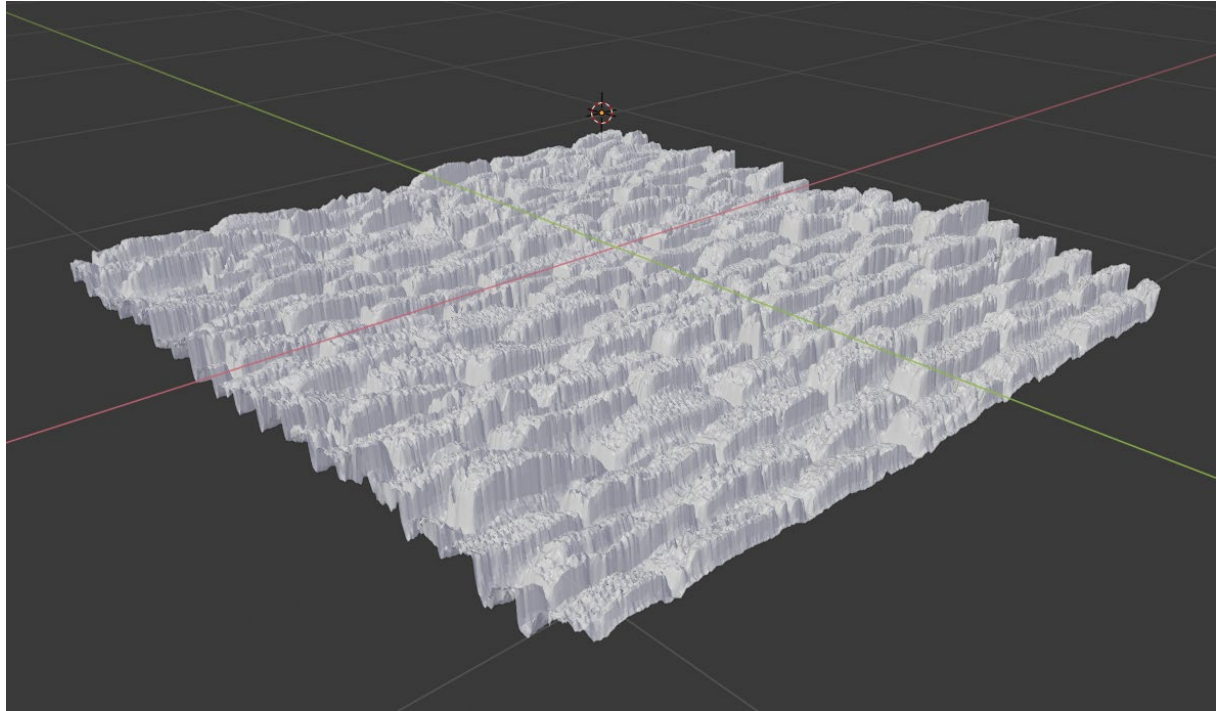
Εικόνα 5.24 Αλλαγή των View για μεγαλύτερη λεπτομέρεια

Κατευθείαν μετά από αυτή την αλλαγή μπορούμε να παρατηρήσουμε διαφορά στο αντικείμενό μας. Με το ανάγλυφο της υφής που θέλουμε να πετύχουμε να έχει πολύ μεγαλύτερη λεπτομέρεια από ότι πριν.



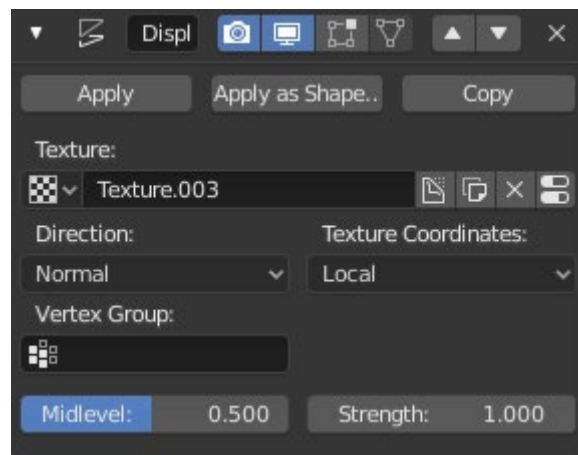
Εικόνα 5.25 Το αντικείμενο με λεπτομέρεια μετά την εφαρμογή των Modifier

Όταν αλλάξουμε όμως οπτική στο Blender μπορούμε να δούμε ότι παρότι η υφή ακολουθεί το ανάγλυφο που επιθυμούμε η γεωμετρία που έχει είναι πολύ πιο έντονη από ότι θα επιθυμούσαμε όπως φαίνεται στην παρακάτω φωτογραφία.



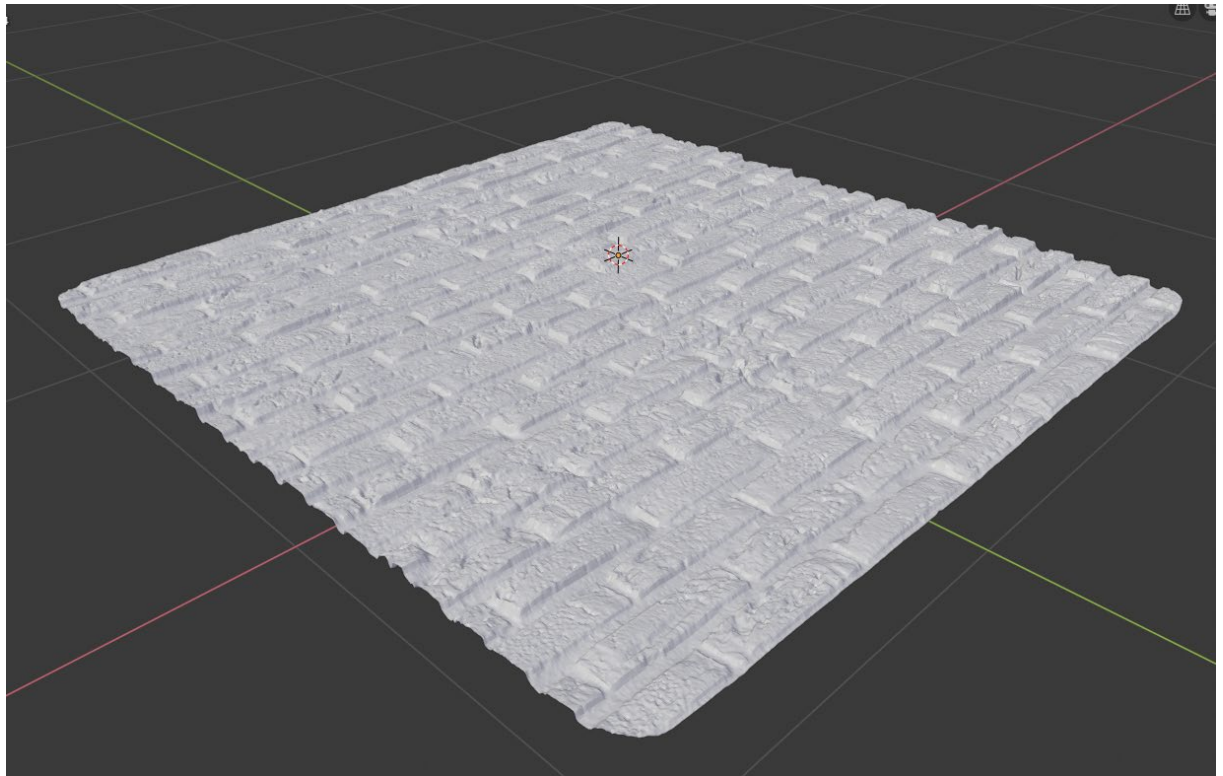
Εικόνα 5.26 Το αντικείμενο με μεγαλύτερο από το θεμιτό Strength

Αυτό μπορεί να διορθωθεί αν επιστρέψουμε στο Modifier Displace και αλλάξουμε το Strength που ακολουθεί το Displacement Map που βάλουμε στο Modifier. Στην αρχή το Strength παίρνει αυτόματα την τιμή 1 αλλά αυτή είναι πολύ μεγάλη και για να έχουμε ένα πιο ρεαλιστικό αποτέλεσμα θα πρέπει να την μειώσουμε σε μια αρκετά μικρότερη όπως είναι η τιμή 0.25.



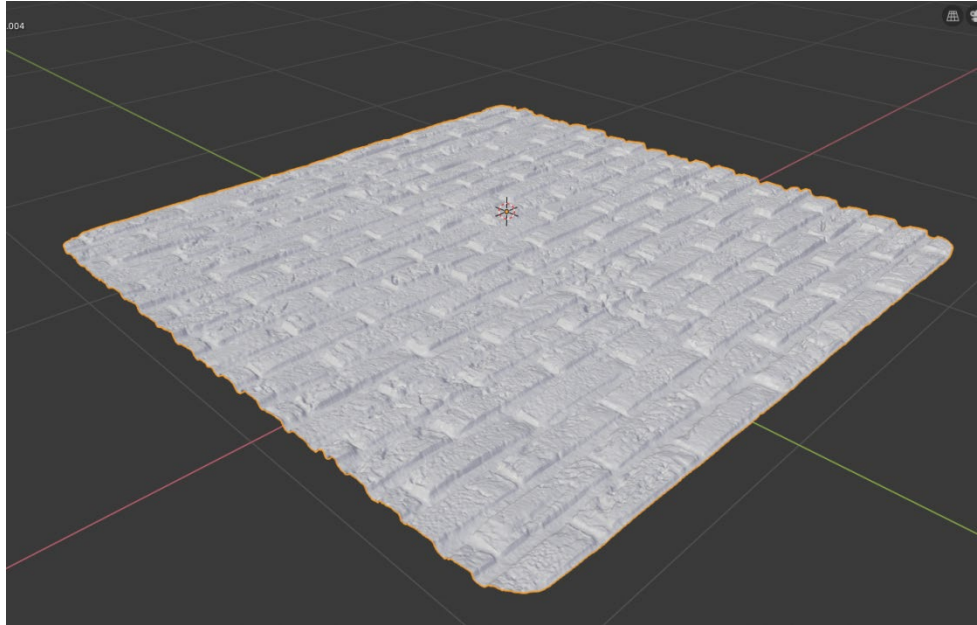
Εικόνα 5.27 Μενού αλλαγής Strength

Κατευθείαν μετά την αλλαγή του Strength από 1 σε 0.25 μπορούμε να δούμε ότι πλέον η υφή δεν έχει το περίεργο σχήμα που ακολουθούσε πριν με μεγάλες διαφορές μεταξύ των ψηλών και χαμηλών σημείων της υφής.



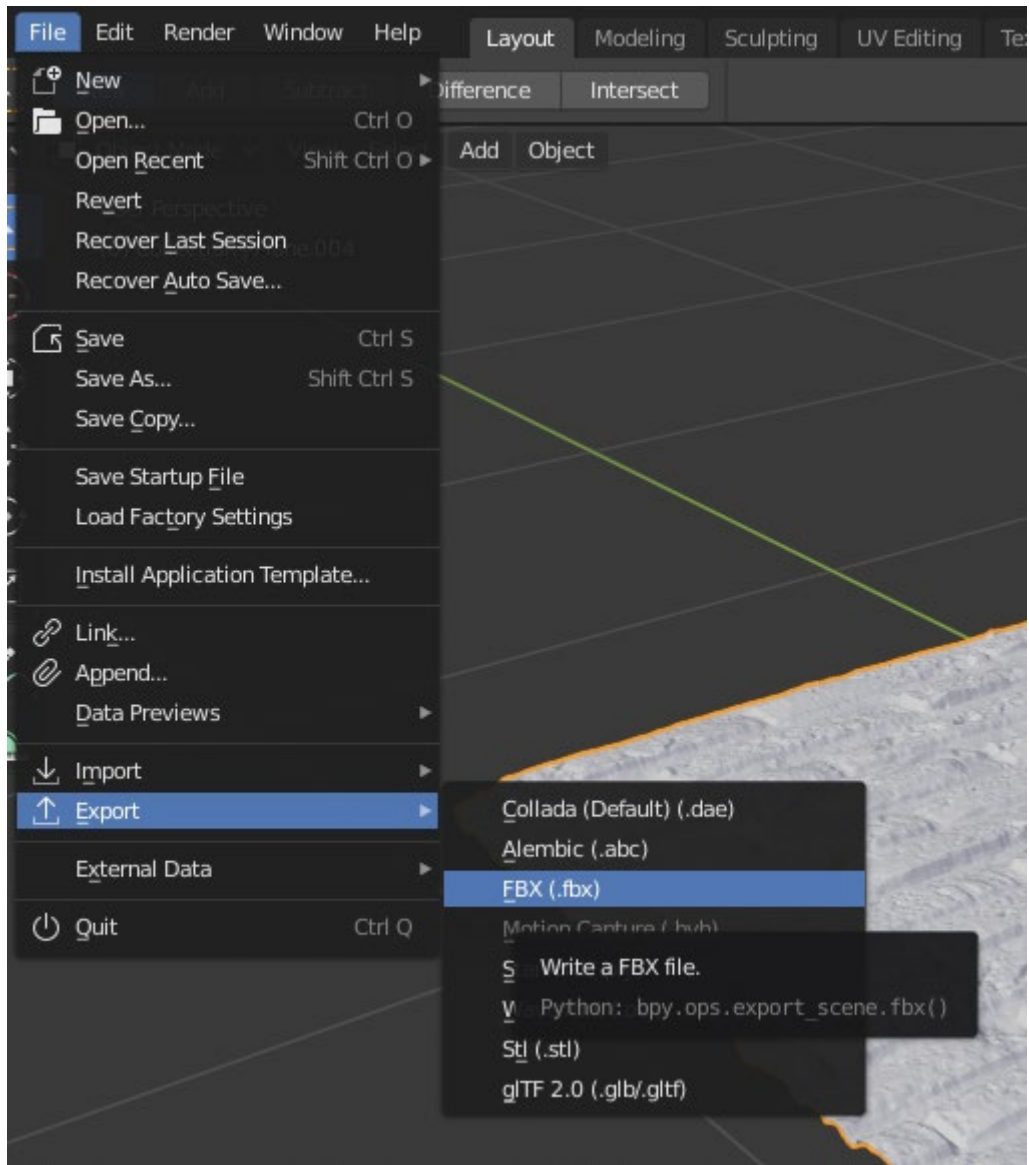
Εικόνα 5.28 Το αντικείμενο μετά την αλλαγή του Strength

Αυτή είναι η διαδικασία που ακολουθήθηκε για όλες τις υφές της εφαρμογής απλώς χρησιμοποιώντας διαφορετικά Displacement Maps για την κάθε υφή. Αφού τελειώσαμε με τη διαδικασία δημιουργίας της υφής στο Blender θα χρειαστεί να ακολουθήσουμε τη διαδικασία του Export από το Blender για να μπορέσουμε να περάσουμε την υφή στο Unity. Αυτή η διαδικασία ξεκινάει επιλέγοντας την υφή που μόλις δημιουργήσαμε αυτό το βήμα είναι σημαντικό σε περίπτωση που έχουμε και τις υπόλοιπες υφές στην ίδια σκηνή στο Blender για να μην γίνουν Export όλα τα αντικείμενα που φτιάξαμε αλλά μόνο η υφή η οποία μας ενδιαφέρει. Αν έγινε επιτυχώς η επιλογή της υφής θα φαίνεται μια πορτοκαλί γραμμή γύρω από το αντικείμενο.



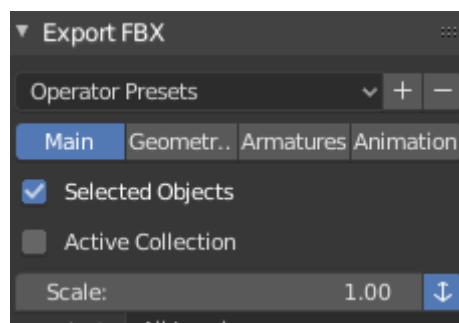
Εικόνα 5.29 Το αντικείμενο Επιλεγμένο

Στη συνέχεια στο πάνω και δεξιά κομμάτι του μενού του Blender μπορούμε να βρούμε την επιλογή File από την οποία μπορούμε να επιλέξουμε το Export και τέλος το είδος του αρχείου που επιθυμούμε να βγάλουμε το οποίο είναι το .fbx αυτή η μορφή αρχείου είναι ένα 3D Format που χρησιμοποιείται για ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ διαφορετικών προγραμμάτων 3D όπως είναι δηλαδή το Blender και το Unity, η ονομασία αυτού προέρχεται από το Filmbox.



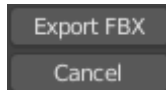
Εικόνα 5.30 Τρόπος εξαγωγής του αντικείμενου από το Blender

Μετά την επιλογή του τύπου του αρχείου που θα χρησιμοποιήσουμε για το Export θα οδηγηθούμε σε ένα καινούργιο μενού το οποίο θα μας βάλει να επιλέξουμε σε ποιο φάκελο θα θέλαμε να αποθηκεύσουμε το αρχείο .fbx που θα δημιουργήσουμε σε αυτό το μενού είναι σημαντικό να επιλέξουμε την επιλογή Selected Objects για να γίνει Export μόνο το αντικείμενο το οποίο επιλέξαμε.



Εικόνα 5.31 Εξαγωγή μόνο επιλεγμένων αντικειμένων

Αφού επιλέξουμε τον φάκελο της επιλογής μας θα πρέπει να πατήσουμε το κουμπί Export FBX για να τελειώσει η διαδικασία του Export.



Εικόνα 5.32 Τελικό κουμπί εξαγωγής

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι το αντικείμενο που μόλις έγινε Export παρότι έχει την γεωμετρική πληροφορία πάνω του δεν θα περάσει χρωματική πληροφορία στο Unity αυτό μπορεί εύκολα να επιλυθεί αν χρησιμοποιηθεί ένα καινούργιο Material στο ίδιο το Unity στο οποίο θα χρησιμοποιηθεί το Diffuse Map της υφής που θέλουμε να προσομοιώσουμε μέσα στο Material και μετά μπορεί να γίνει Apply το Material πάνω στο αντικείμενο που κάναμε Export από το Blender και το αντικείμενο θα έχει κανονικά χρώμα η διαδικασία αυτή έχει εξηγηθεί αναλυτικά σε προηγούμενο κεφάλαιο. Τέλος όλη η παραπάνω διαδικασία θα επαναληφθεί για όλες τις υφές που θέλουμε να φτιάξουμε με τα αντίστοιχα Diffuse Maps για την κάθε υφή.

5.4 Επίλογος

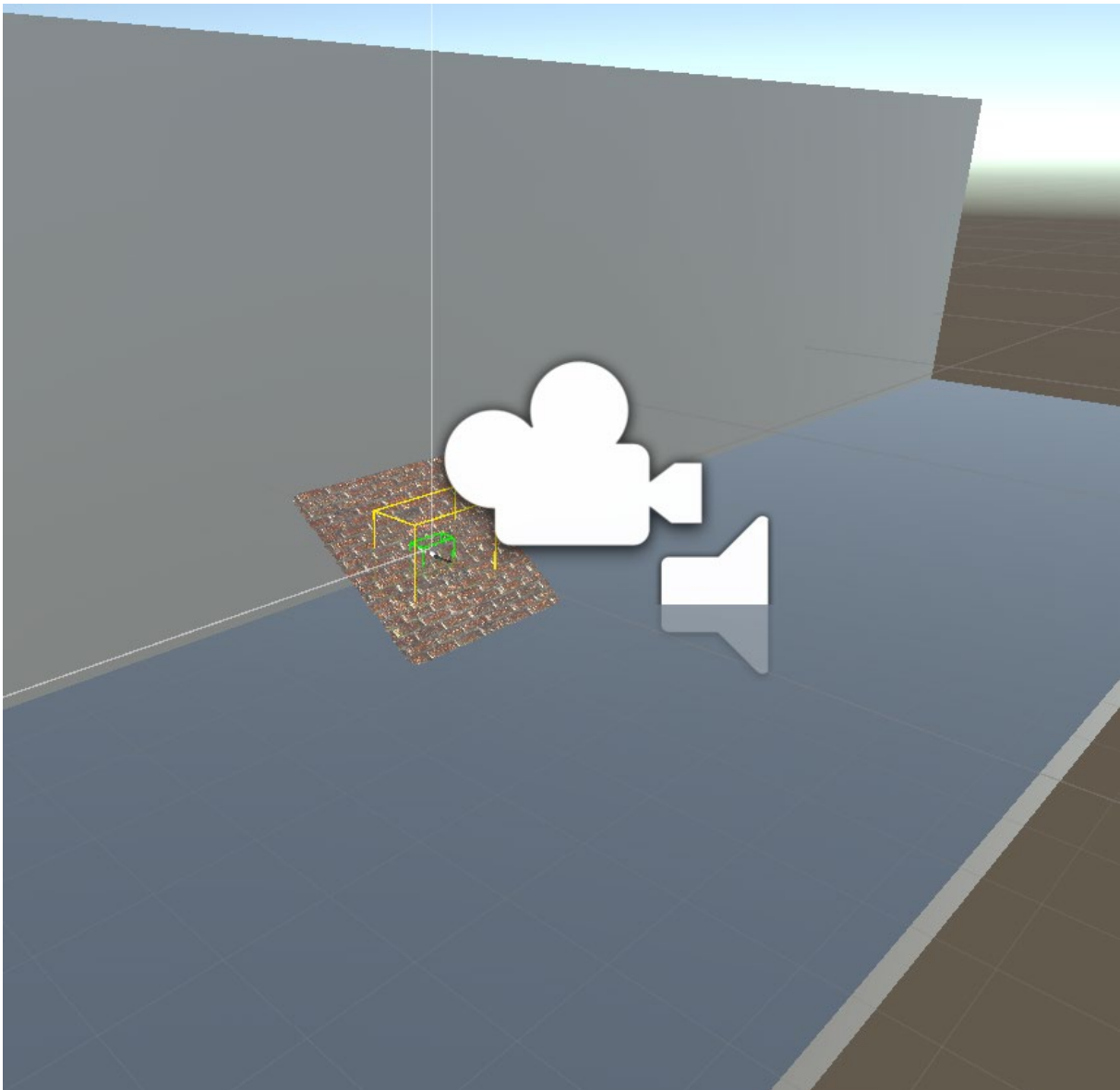
Ο σχεδιασμός και η υλοποίηση των υφών αποτελούν κρίσιμο κομμάτι για τη δημιουργία ρεαλιστικού περιβάλλοντος ικανού να προσομοιώσει ικανοποιητικά την πραγματικότητα. Η μέθοδος για την καλύτερη προσομοίωση αυτών των υφών ήταν αυτή της χαρτογράφησης όπου επιλέγονται ρεαλιστικές εικόνες από υφές που στην συνέχεια παίρνουν γεωμετρικό σχήμα. Το εργαλείο Blender αποδείχθηκε πολύ ικανό για την δημιουργία των υφών με αυτή την μέθοδο.

Κεφάλαιο 6^ο : Διεπαφή και Χρήση της Εφαρμογής

6.1 Σχεδιασμός UI/UX

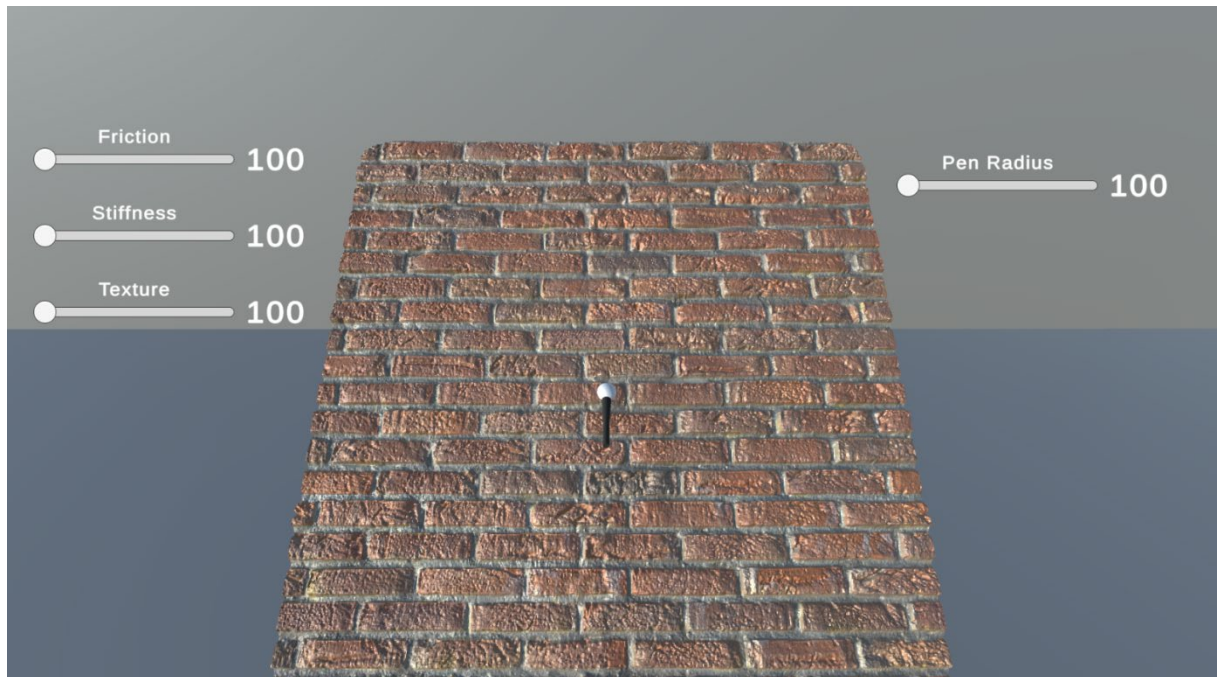
Για τη δημιουργία της εφαρμογής στο κομμάτι του UI/UX ακολουθήθηκε ένα πλάνο που είχε σαν κεντρικό στόχο τη λειτουργία της εφαρμογής. Αυτό σημαίνει πως έγινε προσπάθεια έτσι ώστε το UI να είναι όσο πιο απλό γίνεται για να το κατανοεί εύκολα ο χρήστης χωρίς πολλές επεξηγήσεις και το UX όσο πιο εύκολο γινόταν για τον χρήστη έτσι ώστε η εμπειρία του να έχει μια ομαλή ροή χωρίς κολλήματα που θα έκαναν τον χρήστη να χάσει το ενδιαφέρον του.

Το UI της εφαρμογής ακολουθεί ένα απλό Design το Background της σκηνής αποτελείται από δύο άσπρα αντικείμενα που φτιάχνουν μια γωνία.



Εικόνα 6.1 Η σκηνή αξιολόγησης των υφών

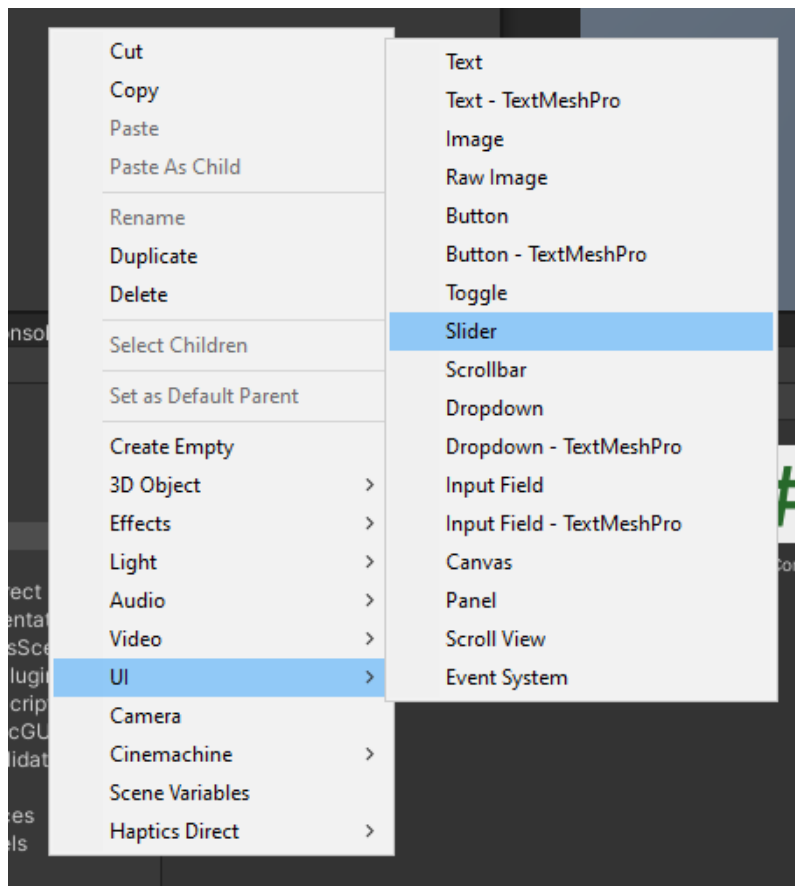
Τα στοιχεία του UI πάνω στην σκηνή αποτελούνται από μπάρες κύλισης ή αλλιώς όπως ονομάζονται και στο Unity Sliders. Αυτά τα Sliders αποτελούν τον τρόπο με τον οποίο αλλάζουν οι ρυθμίσεις των υφών στην εφαρμογή.



Εικόνα 6.2 Η όψη παιχνιδιού της αξιολόγησης των υφών

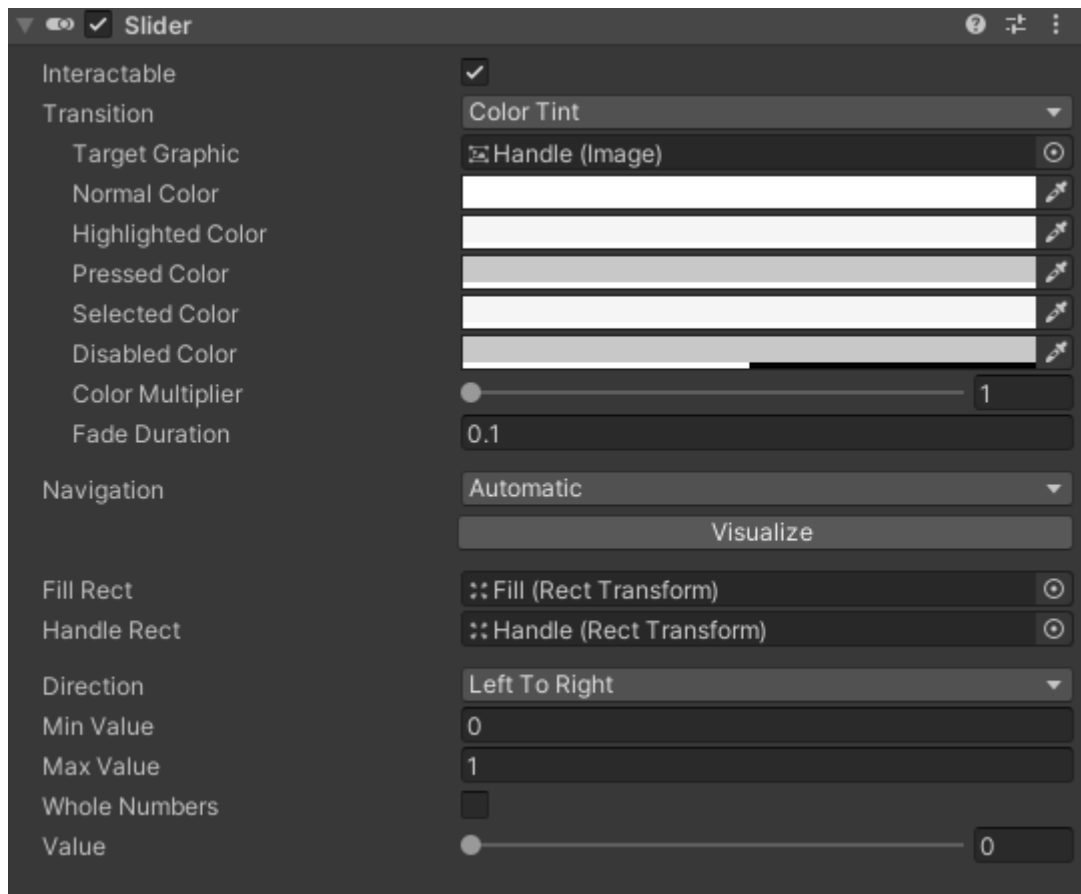
Τα αριστερά Sliders αφορούν τις ρυθμίσεις που έχει στην προκείμενη περίπτωση το τούβλο και στα δεξιά το μόνο Slider που μένει αφορά το μέγεθος που έχει η πένα που αλληλεπιδρά με την υφή.

Η δημιουργία αυτών των Sliders είναι μια απλή διαδικασία μέσω του Unity και γίνεται κάνοντας δεξιά κλικ στην ιεραρχία της σκηνής και έπειτα πηγαίνοντας στην επιλογή UI όπου έπειτα μπορούμε να επιλέξουμε την επιλογή Slider.



Εικόνα 6.3 Δημιουργία των Sliders

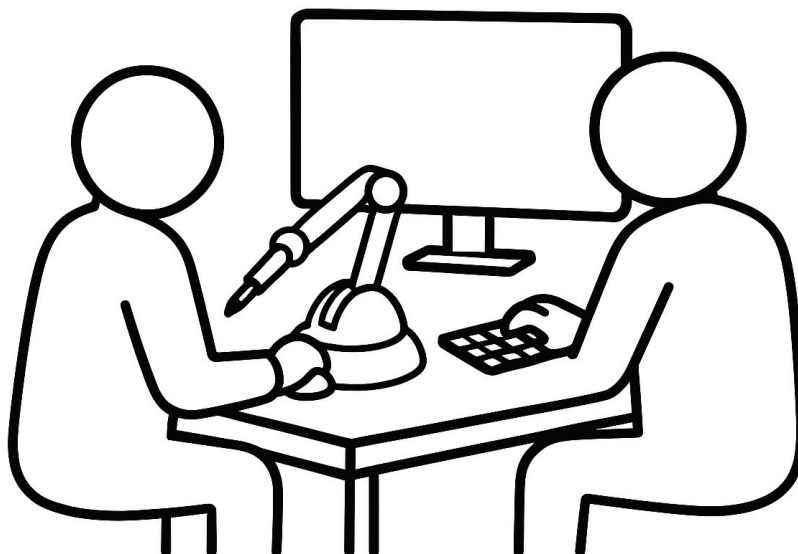
Έπειτα από αυτό θα δημιουργηθεί αυτόματα το συστατικό Slider όπου μπορούμε να το χρησιμοποιήσουμε μέσω του κώδικα.



Εικόνα 6.4 Όψη του συστατικού Slider

Στο κομμάτι του User Experience της εφαρμογής ήταν σημαντικό ο χρήστης να επικεντρώνεται μόνο στην επαφή που έχει με το αντικείμενο οπότε ο χρήστης δεν είχε επαφή με την εφαρμογή πέρα από τη συσκευή Touch την οποία διαχειριζόταν μόνο αυτός και οπτική επαφή με την οθόνη όλες οι ενέργειες αλλαγής υφών και εκκίνησης του παιχνιδιού γίνονταν από τον διαχειριστή της εφαρμογής. Με βάση τα σχόλια που έκαναν οι χρήστες μετά από τη χρήση της εφαρμογής αυτή η επιλογή είχε ως αποτέλεσμα η διαδικασία αξιολόγησης των υφών να γίνεται πολύ ομαλά και γρήγορα και ευχάριστα καθώς πολλοί χρήστες επισήμαναν ότι ήταν μια πολύ ιδιαίτερη εμπειρία.

Ο τρόπος με τον οποίο γινόταν το στήσιμο έτσι ώστε να γίνει η δοκιμή της εφαρμογής γινόταν όπως φαίνεται παρακάτω με τον χρήστη να βρίσκεται στα αριστερά της εικόνας και τον διαχειριστή της εφαρμογής να βρίσκεται στα δεξιά χειριζόμενος την εφαρμογή.



Εικόνα 6.5 Τρόπος τοποθέτησης του χρηστή και του διαχειριστή κατά την αξιολόγηση των υφών

6.2 Σενάριο Αξιολόγησης Υφών

Για την εύκολη ροή της αξιολόγησης δημιουργήθηκε ένα σενάριο που ακολουθούταν στη δοκιμή του κάθε χρήστη. Αφού καθίσει ο χρήστης και ξεκινήσει η εφαρμογή το πρώτο βήμα είναι στην αρχή ο χρήστης να χρησιμοποιήσει λίγο τη συσκευή στην πρώτη υφή που εμφανίζεται που είναι αυτή του τούβλου έτσι ώστε να εξοικειωθεί με τη συσκευή και να καταλάβει πόση πίεση πρέπει να βάλει και πώς πρέπει να την κουνάει οριζόντια και κάθετα σε συνεργασία με την εικόνα που φαίνεται στην οθόνη για να επιστραφεί η απτική αίσθηση αγνοώντας στην αρχή τα Sliders που υπάρχουν στα στοιχεία του UI.

Στη συνέχεια αφού πλέον ο χρήστης έχει εξοικειωθεί με τη συσκευή Touch γινόταν η επεξήγηση στο πώς το κάθε Slider επηρεάζει την αίσθηση της υφής. Δηλαδή για παράδειγμα για το πρώτο Slider που ήταν το Friction εξηγούταν προφορικά στον χρήστη ότι αυτό το Slider είναι η τριβή που έχει η επιφάνεια της υφής που σημαίνει ότι μια χαμηλότερη τιμή από αυτό το Slider κάνει την υφή πιο λεία και μια υψηλότερη πιο τραχεία, αυτό όμως επηρεάζει μόνο την επιφάνεια της υφής δηλαδή η υφή κρατάει κάποια αίσθηση τριβής λόγω της γεωμετρίας. Έπειτα το Slider του Stiffness αυτή η επιλογή είναι το πόσο σκληρό είναι ένα αντικείμενο εξηγούταν στον χρήστη ότι η επίδραση που έχει αυτή η ρύθμιση στην υφή είναι το πόση αντίσταση φέρνει το υλικό όταν αυτό το πιέξεις με την πένα, επίσης όταν γινόταν μεταφορά της πέννας στην υφή με μια τιμή μεγάλη στη σκληρότητα οι γωνίες και η γεωμετρία γίνονταν πολύ πιο έντονη αντίθετα με μια χαμηλή τιμή ήταν πιο μαλακά τα στοιχεία της κάνοντας πιο εύκολη τη μεταφορά της πέννας. Το επόμενο Slider του Texture είναι ένα από τις πιο σημαντικές ρυθμίσεις που μπορεί να έχει μια υφή διότι αφορά τη γεωμετρία που έχει το αντικείμενο. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι μια χαμηλή τιμή κάνει το αντικείμενο ένα ισχίο τετράγωνο με λεία επιφάνεια ενώ μια μεγαλύτερη τιμή κάνει αυτή τη γεωμετρία πολύ πιο έντονη. Τέλος υπήρχε και το Slider του Viscosity αυτό ήταν μια επιλογή που είχε αποκλειστικά μόνο η υφή

της άμμου. Η λειτουργία αυτής της ρύθμισης ήταν να κάνει πυκτό το περιεχόμενο της υφής δηλαδή όταν ο χρήστης έβαζε την πένα μέσα στην υφή της άμμου και την μετέφερε θα ασκούσαν μια πίεση στην πένα που θα ήταν διαφορετική από την επιφανειακή τριβή του αντικειμένου. Για όλες αυτές τις ρυθμίσεις γινόταν μια δοκιμή για παράδειγμα στην αρχή βάζαμε μια χαμηλή τιμή στο Slider του Friction και λέγαμε τον χρήστη να δοκιμάσει την υφή και έπειτα ανεβάζαμε πολύ αυτό το Slider και λέγαμε ξανά τον χρήστη να την δοκιμάσει έτσι ώστε να καταλάβει τι κάνει η κάθε μια ρύθμιση πιο αποδοτικά. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβανόταν για όλες τις διαθέσιμες ρυθμίσεις έτσι ώστε ο χρήστης να έχει μια καλή κατανόηση για το πώς δουλεύει η κάθε μια ρύθμιση. Στη συνέχεια ζητούνταν από τον χρήστη με βάση τη δική του προσωπική εμπειρία αν οι ρυθμίσεις που έχει η υφή αντιστοιχούν κατά τη γνώμη του στην υφή που προσπαθεί η εφαρμογή να προσομοιώσει από τον πραγματικό κόσμο. Αφού αλληλεπιδρούσε αρκετά ο χρήστης με την υφή ενημέρωνε τον διαχειριστή αν θα ήθελε να αλλάξει κάποια από τις ρυθμίσεις της εκάστοτε υφής για να πλησιάζει πιο πολύ κατά τη γνώμη του στην πραγματική υφή.

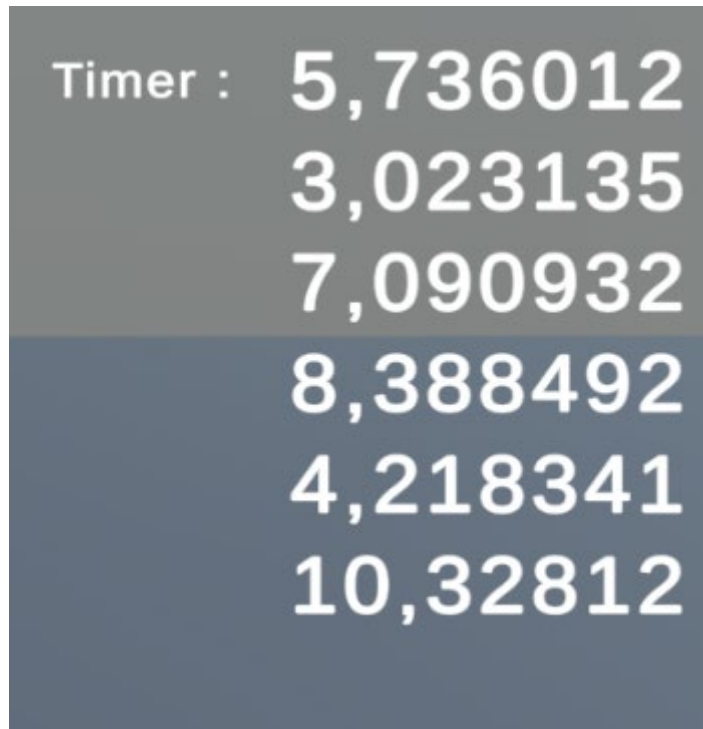
6.3 Σενάριο Παιχνιδιού

Το πρώτο κομμάτι της δοκιμής της εφαρμογής ήταν η αξιολόγηση των υφών. Αφού τελειώσει αυτό το κομμάτι προχωράμε στο παιχνίδι της εφαρμογής που όπως και η αξιολόγηση δημιουργήθηκε ένα σενάριο που ακολουθείται για τη διευκόλυνση της διαδικασίας.

Το πρώτο βήμα για την εκκίνηση του παιχνιδιού ήταν η εξήγηση της διαδικασίας στον χρήστη. Δηλαδή εξηγούταν ότι πλέον ο χρήστης θα έχει επαφή με την εφαρμογή μόνο μέσω της συσκευής Touch και ότι πλέον δεν θα μπορούσε να δει στην οθόνη για να διαπιστώσει με ποια υφή αλληλεπιδρά. Οι κανόνες του παιχνιδιού είναι ότι οι έξι υφές που έχει η εφαρμογή θα βγουν με τυχαία σειρά και ο χρήστης έχει όσο χρόνο χρειάζεται να αλληλεπιδράσει στα τυφλά με την υφή που έχει βγει και να μαντέψει ποια αυτή είναι. Επίσης εξηγούταν στον χρήστη ότι οι ρυθμίσεις οι οποίες θα έχουν οι υφές θα είναι αυτές που είχαν στην αρχή οι υφές πριν ο χρήστης επιλέξει τις δικές του και ότι καμία υφή δεν μπορούσε να εμφανιστεί δύο φορές στη σειρά, η κάθε υφή που θα βγαίνει στη σειρά είναι μοναδική.

Ένας ακόμα κανόνας του παιχνιδιού ήταν ότι παρότι ο χρήστης δεν μπορεί να αλλάξει την απάντησή του αφού την έχει επιλέξει μπορεί να χρησιμοποιήσει κάποια απάντηση που χρησιμοποίησε προηγουμένως σε περίπτωση που θεωρεί ότι έκανε λάθος. Δηλαδή αν για παράδειγμα στην πρώτη υφή απάντησε ότι είναι η υφή του τούβλου αλλά φτάνοντας στην τρίτη υφή διαπιστώσει ότι αυτή είναι η υφή του τούβλου και έκανε λάθος στην πρώτη μπορεί να ξανά επιλέξει την υφή του τούβλου όμως η πρώτη του απάντηση θα παραμείνει λάθος.

Αφού έχουν εξηγηθεί όλοι οι κανόνες του παιχνιδιού στον χρήστη στη συνέχεια ο διαχειριστής ενεργοποιούσε το παιχνίδι με το πλήκτρο ένα και άλλαζε τις υφές όταν ο χρήστης επιθυμούσε με το πλήκτρο δύο. Με την ενεργοποίηση του παιχνιδιού ξεκινούσε και η καταγραφή του χρόνου που ο χρήστης ξόδεψε για να μαντέψει την κάθε υφή. Η καταγραφή του χρόνου γινόταν μέσα από την εφαρμογή με πλαίσια για την καταγραφή χρόνου κάθε υφής όπως φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 6.6 Οι χρονομετρητές των υφών κατά την διαδικασία του παιχνιδιού

Μετά το τέλος του παιχνιδιού γινόταν καταγραφή κάποιων στατιστικών που ήταν σημαντικά για την διαπίστωση του πόσο ρεαλιστικές είναι οι υφές με τις ρυθμίσεις που είχαν κατά τη διάρκεια του παιχνιδιού και αν χρειάζονται κάποια αλλαγή. Αυτές οι καταγραφές ήταν:

- Ποιες υφές ο χρήστης μάντεψε σωστά και ποιες λάθος
- Σε περίπτωση λάθους με ποια άλλη υφή μπέρδεψε αυτή που έπρεπε να μαντέψει σωστά
- Τον χρόνο που ξόδεψε σε κάθε υφή

Στο τέλος της διαδικασίας ζητούνταν και από τον χρήστη να συμπληρώσει εθελοντικά ένα σύντομο ερωτηματολόγιο για την εμπειρία του στη διαδικασία.

6.4 Επίλογος

Συμπερασματικά είδαμε σε αυτό το κεφάλαιο ποιος ήταν ο στόχος του UI και τον λόγο που δομήθηκε με αυτό τον τρόπο έτσι ώστε να ακολουθεί την ομαλή λειτουργία κατά την ερευνά. Στη συνέχεια ακολουθεί η εξήγηση του σεναρίου που ακλουθήσαμε κατά την αξιολόγηση της εφαρμογής στην ερευνά και πως αυτό βοήθησε στην ευκολία κατανόησης και χρήσης της εφαρμογής από τους χρηστές. Τέλος είδαμε και την δομή του σεναρίου του παιχνιδιού όπου οι χρηστές προσπαθούσαν να μαντέψουν τις υφές που εμφανιζόντουσαν στην οθόνη χωρίς αυτοί να έχουν την δυνατότητα να δουν την οθόνη όποτε ήταν μόνο με την αίσθηση της αφής η προσπάθεια τους να μαντέψουν τις υφές.

Κεφάλαιο 7^ο : Μεθοδολογία Αξιολόγησης και Αποτελέσματα

7.1 Καταγραφή Δεδομένων

Η διαδικασία που εξηγήθηκε παραπάνω πραγματοποιήθηκε επαναληπτικά σε διάφορους χρήστες με σκοπό να ολοκληρωθεί μια έρευνα. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν δύο διαφορετικές έρευνες για τη διπλωματική εργασία με συνολική συμμετοχή 47 ατόμων. Στην πρώτη έρευνα πήραν μέρος 16 άτομα και στη δεύτερη πήραν μέρος 31 άτομα.

Στο πρώτο κομμάτι της αξιολόγησης όπου ο χρήστης ερχόταν σε επαφή με τις υφές οπτικά και απτικά ήταν σημαντική η καταγραφή των ρυθμίσεων της κάθε υφής με την οποία ερχόταν σε επαφή ο χρήστης και αυτή γινόταν σε ένα έγγραφο ειδικά διαμορφωμένο για τη γρήγορη καταγραφή αυτών των δεδομένων. Αυτό το έγγραφο είχε στις στήλες προετοιμασμένα τα ονόματα από τις ρυθμίσεις που έχουν οι υφές και στις γραμμές τα ονόματα από τις ίδιες τις υφές για να μπορεί γρήγορα ο χειριστής να καταγράψει τα δεδομένα χωρίς να μπαίνει στη διαδικασία να γράψει εκείνη τη στιγμή σε ποια υφή ή σε ποια συγκεκριμένη ρύθμιση μπαίνει ο αριθμός. Το έγγραφο το οποίο χρησιμοποιήθηκε φαίνεται παρακάτω.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1		Τούβλο	Μέταλλο	Ξύλο	Άμμος	Πάγος	Τσιμέντο		Τούβλο	Μέταλλο	Ξύλο	Άμμος	Πάγος	Τσιμέντο
2	Friction							Friction						
3	Stiffness							Stiffness						
4	Texture							Texture						
5	Viscosity							Viscosity						
6														
7	Friction							Friction						
8	Stiffness							Stiffness						
9	Texture							Texture						
10	Viscosity							Viscosity						
11														
12	Friction							Friction						
13	Stiffness							Stiffness						
14	Texture							Texture						
15	Viscosity							Viscosity						
16														
17	Friction							Friction						
18	Stiffness							Stiffness						
19	Texture							Texture						
20	Viscosity							Viscosity						
21														
22	Friction							Friction						
23	Stiffness							Stiffness						
24	Texture							Texture						
25	Viscosity							Viscosity						
26														
27	Friction							Friction						
28	Stiffness							Stiffness						
29	Texture							Texture						
30	Viscosity							Viscosity						

Εικόνα 7.1 Το φύλλο καταγραφής δεδομένων κατά την αξιολόγηση των υφών

Μια διαφοροποίηση που υπάρχει μεταξύ της πρώτης και της δεύτερης έρευνας ήταν ότι στην πρώτη έρευνα δεν καταγράφονταν οι ακριβείς αριθμοί που επέλεγε ο χρήστης αλλά αν αυτός ο αριθμός ήταν μεγαλύτερος ή μικρότερος από τον αρχικό αριθμό καθώς η διαφοροποίηση μεταξύ των τιμών ήταν 5-20 μονάδες που δεν ήταν ένα μεγάλο ποσοστό με βάση το διαθέσιμο εύρος που ήταν 0 έως 100.

Στο δεύτερο κομμάτι της έρευνας που ήταν αυτό του παιχνιδιού όπου ο χρήστης προσπαθούσε να μαντέψει σωστά την υφή με την οποία έρχεται σε επαφή χωρίς να την βλέπει οπτικά έγινε καταγραφή

των δεδομένων του παιχνιδιού. Συγκεκριμένα ο διαχειριστής κρατούσε σαν δεδομένα τον χρόνο τον οποίο ο χρήστης ξόδεψε στην κάθε υφή, ποιες βρήκε σωστά και ποιες λάθος και σε περίπτωση λάθους με ποια υφή μπερδεύτηκε. Και για την καταγραφή αυτών των δεδομένων δημιουργήθηκε ένα ειδικό έγγραφο για την εύκολη καταγραφή το οποίο στις στήλες του έχει τα ονόματα από τις υφές και στις σειρές είχε απλά τους αριθμούς από τους χρήστες για εύκολη αναγνώριση όπως φαίνεται παρακάτω.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
2	Τούβλο													
3	Μέταλλο													
4	Ξύλο													
5	Άμμος													
6	Πάγος													
7	Τσιμέντο													
8														
9	Τούβλο													
10	Μέταλλο													
11	Ξύλο													
12	Άμμος													
13	Πάγος													
14	Τσιμέντο													
15														
16	Τούβλο													
17	Μέταλλο													
18	Ξύλο													
19	Άμμος													
20	Πάγος													
21	Τσιμέντο													
22														
23	Τούβλο													
24	Μέταλλο													
25	Ξύλο													
26	Άμμος													
27	Πάγος													
28	Τσιμέντο													

Εικόνα 7.2 Φύλλο καταγραφής δεδομένων κατά την διαδικασία του παιχνιδιού

7.2 Βελτιστοποίηση των Ρυθμίσεων

Ένας στόχος κατά τη διάρκεια της έρευνας που γινόταν με την εφαρμογή ήταν και η βελτιστοποίηση των ρυθμίσεων που έχουν οι υφές για να πλησιάσουν όσο πιο πολύ γίνεται την πραγματικότητα. Οι πρώτες ρυθμίσεις που είχαν οι υφές ήταν επιλεγμένες από εμένα με βάση τη δική μου κρίση του τι πλησιάζει όσο περισσότερο γίνεται την πραγματικότητα. Μετά την πρώτη έρευνα στην οποία πήραν μέρος 16 άτομα οι ρυθμίσεις άλλαξαν με βάση τα στατιστικά που τραβήχτηκαν από αυτούς τους χρήστες.

Οι πρώτες ρυθμίσεις που είχαν οι υφές ήταν:

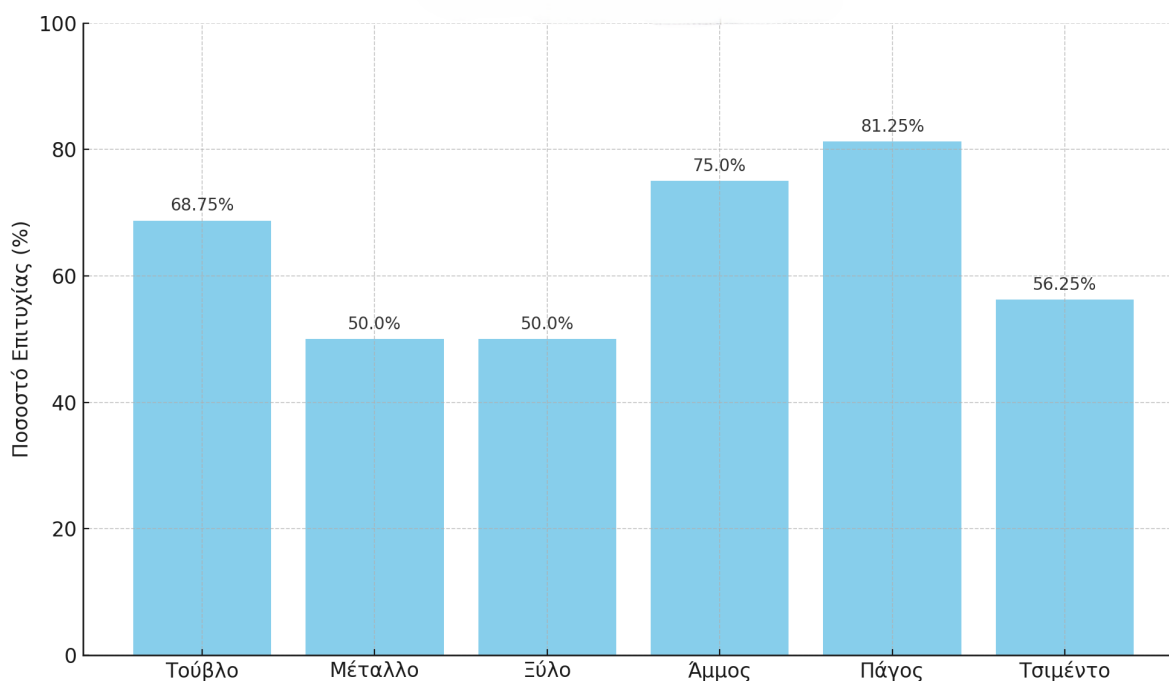
- Τούβλο Friction: 39, Stiffness: 47, Texture: 40
- Μέταλλο Friction: 25, Stiffness: 50, Texture: 20
- Ξύλο Friction: 10, Stiffness: 40, Texture: 80
- Άμμος Friction: 6, Stiffness: 7, Texture: 13, Viscosity: 72

- Πάγος Friction: 0, Stiffness: 20, Texture: 40
- Τσιμέντο Friction: 30, Stiffness: 39, Texture: 40

Με τις πρώτες ρυθμίσεις στην πρώτη ερευνά τα ποσοστά επιτυχίας πηγαίνουν ως εξής:

Υφή	Έρευνα 1 (%)
Τούβλο	68.75
Μέταλλο	50.00
Ξύλο	50.00
Άμμος	75.00
Πάγος	81.25
Τσιμέντο	56.25

Τα αποτελέσματα μπορούν να φάνουν και στο παρακάτω διάγραμμα.



Εικόνα 7.3 Ποσοστά Επιτυχίας 1^{ης} Ερευνάς

Από αυτά τα στατιστικά μπορούμε να βγάλουμε κάποια συμπεράσματα. Υφές με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά όπως είναι ο πάγος που έχει χαμηλή σκληρότητα και είναι πολύ λείος, καθώς και η άμμος η οποία είναι η μόνη υφή που συμπεριλαμβάνει τη ρύθμιση του Viscosity που διαφοροποιεί την υφή από τις υπόλοιπες, έχουν μεγαλύτερα ποσοστά επιτυχίας. Αυτό σημαίνει ότι υφές με πιο παρόμοιες ρυθμίσεις τριβής και σκληρότητας αλλά διαφορετικού ανάγλυφου δεν είχαν πολύ μεγάλη επιτυχή αναγνώριση, με διαφορά του τούβλου η οποία έχει ένα ιδιαίτερο μοτίβο από τα τούβλα και τον τρόπο που είναι στοιβαγμένα. Αυτό μπορεί να οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι οι ρυθμίσεις οι οποίες μπήκαν στην αρχή δεν είναι ιδανικές για την αναγνώριση των υφών.

Με τα καινούργια στατιστικά που πήρα από την πρώτη έρευνα άλλαξα τις ρυθμίσεις των υφών με βάση την προτίμηση των χρηστών. Ο τρόπος με τον οποίο βγήκαν οι καινούργιες ρυθμίσεις για τις υφές ήταν να γίνει ένας πίνακας βαθμών με την επιθυμία να αλλάξει μια ρύθμιση από την κάθε υφή προς τα πάνω ή προς τα κάτω. Με βάση αυτόν τον πίνακα και τα προσωπικά σχόλια των χρηστών έγινε η επιλογή να αλλάξουν οι ρυθμίσεις σε συγκεκριμένες τιμές. Ο πίνακας με τους μέσους όρους επιθυμίας των χρηστών φαίνεται παρακάτω.

	Τούβλο	Μέταλλο	Ξύλο	Άμμος	Πάγος	Τσιμέντο
Friction	4	-2	6	2		-2
Stiffness	4	4	4		-1	3
Texture	2	6			1	2
Viscosity				-2		

Εικόνα 7.4 Βοηθητικός πίνακας βελτίωσης των ρυθμίσεων των υφών

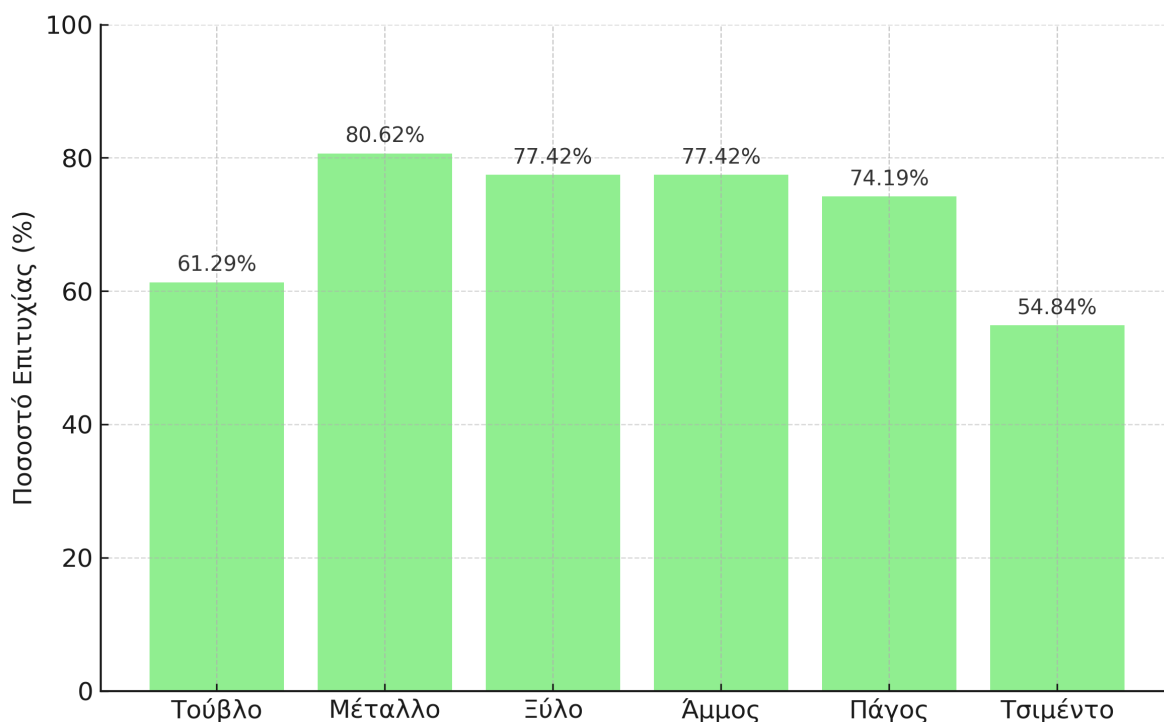
Έτσι με αυτόν τον πίνακα και τα προσωπικά σχόλια των χρηστών βγήκαν οι έξι καινούργιες ρυθμίσεις:

- Τούβλο Friction: 50, Stiffness: 58, Texture: 45
- Μέταλλο Friction: 18, Stiffness: 62, Texture: 35
- Ξύλο Friction: 18, Stiffness: 55, Texture: 80
- Άμμος Friction: 8, Stiffness: 3, Texture: 7, Viscosity: 60
- Πάγος Friction: 0, Stiffness: 15, Texture: 50
- Τσιμέντο Friction: 42, Stiffness: 55, Texture: 50

Με βάση τις καινούργιες ρυθμίσεις υπήρχαν και καινούργια ποσοστά επιτυχίας για την κάθε υφή όπως φαίνονται παρακάτω.

Υφή	Έρευνα 2 (%)
Τούβλο	61.29
Μέταλλο	80.62
Ξύλο	77.42
Άμμος	77.42
Πάγος	74.19
Τσιμέντο	54.84

Τα αποτελέσματα μπορούν επίσης να φάνουν από το παρακάτω διάγραμμα.



Εικόνα 7.5 Ποσοστά Επιτυχίας 2^{ης} Ερευνάς

Στη δεύτερη έρευνα μπορούμε να δούμε πως κάποιες υφές είχαν σημαντικά καλύτερα ποσοστά αναγνωσιμότητας σε σχέση με την προηγούμενη έρευνα. Αυτό μπορεί να οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι η μέθοδος που ακολουθήθηκε για την αλλαγή των ρυθμίσεων που έχουν οι υφές ήταν θετική για την εύρεση ιδανικότερων ρυθμίσεων για τις υφές. Αναλυτικά υπήρξαν οι εξής αλλαγές στα ποσοστά:

Υφή	Έρευνα 1 (%)	Έρευνα 2 (%)	Διαφορά (%)
Τούβλο	68.75	61.29	-7.46
Μέταλλο	50.00	80.62	+30.62
Ξύλο	50.00	77.42	+27.42
Άμμος	75.00	77.42	+2.42
Πάγος	81.25	74.19	-7.06
Τσιμέντο	56.25	54.84	-1.41

Με βάση τα στατιστικά μπορούμε να πούμε ότι το μέταλλο και το ξύλο τα οποία είχαν +27.42% αύξηση ποσοστού επιτυχίας σε σχέση με την προηγούμενη έρευνα είχαν μεγάλη βελτίωση δείχνοντας ότι οι αλλαγές που είχαν στις ρυθμίσεις είχαν σαφές θετικό αντίκτυπο στην αναγνωρισιμότητα. Μπορούμε επίσης να διακρίνουμε μια μικρή βελτίωση +2.42% στην υφή της άμμου η οποία είχε ήδη από την προηγούμενη έρευνα υψηλό ποσοστό επιτυχίας και το γεγονός ότι παρέμεινε ψηλά δείχνει ότι η υφή ήταν καλά σχεδιασμένη και διατηρήθηκε - βελτιώθηκε ελαφρώς. Τέλος μπορούμε να παρατηρήσουμε μια μικρή υποχώρηση στο τούβλο το τσιμέντο και τον πάγο αν και δεν ήταν μεγάλες οι αλλαγές στα ποσοστά αυτές οι πτώσεις ίσως υποδεικνύουν ότι οι αλλαγές στις υφές δεν ωφέλησαν. Ειδικά το τούβλο και ο πάγος τα οποία είχαν και τη μεγαλύτερη πτώση.

Παρότι υπήρξαν μερικές πτώσεις σε ποσοστά που προηγουμένως ήταν καλύτερα, η μεγάλη άνοδος σε υφές οι οποίες προηγουμένως είχαν πρόβλημα με την αναγνωρισιμότητα σηματοδοτούν ότι οι αλλαγές που έγιναν ήταν θετικές. Αυτό γίνεται ακόμα πιο ξεκάθαρο όταν δούμε τα ποσοστά επιτυχίας συνολικά και όχι μόνο μεμονωμένα στην κάθε υφή.

Η συνολική απόδοση βελτιώθηκε με τις καινούργιες ρυθμίσεις με τους μέσους όρους επιτυχίας να είναι:

- Έρευνα 1: $(68.75 + 50 + 50 + 75 + 81.25 + 56.25) / 6 = 63.54\%$
- Έρευνα 2: $(61.29 + 80.62 + 77.42 + 77.42 + 74.19 + 54.84) / 6 \approx 70.96\%$

Όποτε υπήρξε συνολική βελτίωση κατά 7.39 ποσοστιαίες μονάδες αρά οι βελτιώσεις στις υφές είχαν γενικά θετική επίδραση ειδικά σε υφές που είχαν αρχικά χαμηλές επιδόσεις.

7.3 Διαγράμματα Σύγχυσης

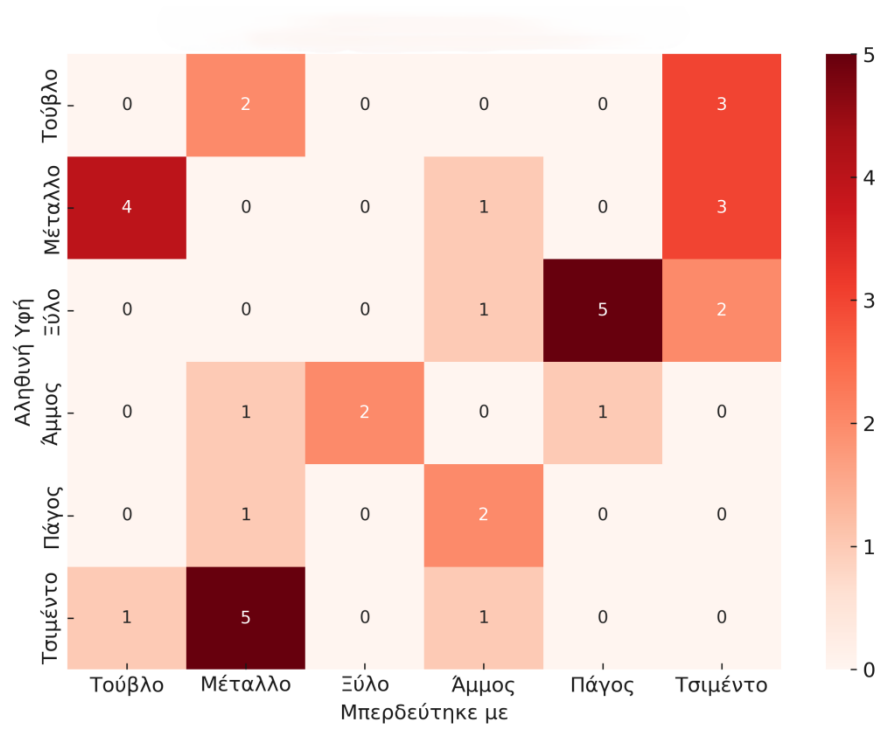
Τα διαγράμματα σύγχυσης (confusion matrices) αποτελούν μια σημαντική μέθοδο αξιολόγησης σε πειράματα ταξινόμησης και αναγνώρισης καθώς αποτυπώνουν σε μορφή πίνακα τη συσχέτιση μεταξύ των πραγματικών κατηγοριών και των κατηγοριών που προβλέφθηκαν ή αναγνωρίστηκαν από τους συμμετέχοντες. Η κύρια χρησιμότητά τους έχει να κάνει με το γεγονός ότι παρέχουν λεπτομερή πληροφόρηση όχι μόνο για την ακρίβεια συνολικά αλλά και για το πώς κατανέμονται τα λάθη δηλαδή ποιες κατηγορίες συγχέονται μεταξύ τους.

Συγκεκριμένα η διαγώνιος του πίνακα αντιπροσωπεύει τα σωστά αποτελέσματα ενώ τα στοιχεία εκτός της διαγώνιου καταγράφουν τις περιπτώσεις όπου μια υφή αναγνωρίστηκε λανθασμένα ως κάποια άλλη. Έτσι το διάγραμμα σύγχυσης δίνει μια σαφή εικόνα για τις δυνατές και αδύναμες περιοχές του συστήματος επιτρέποντας την κατανόηση των μοτίβων στα λάθη.

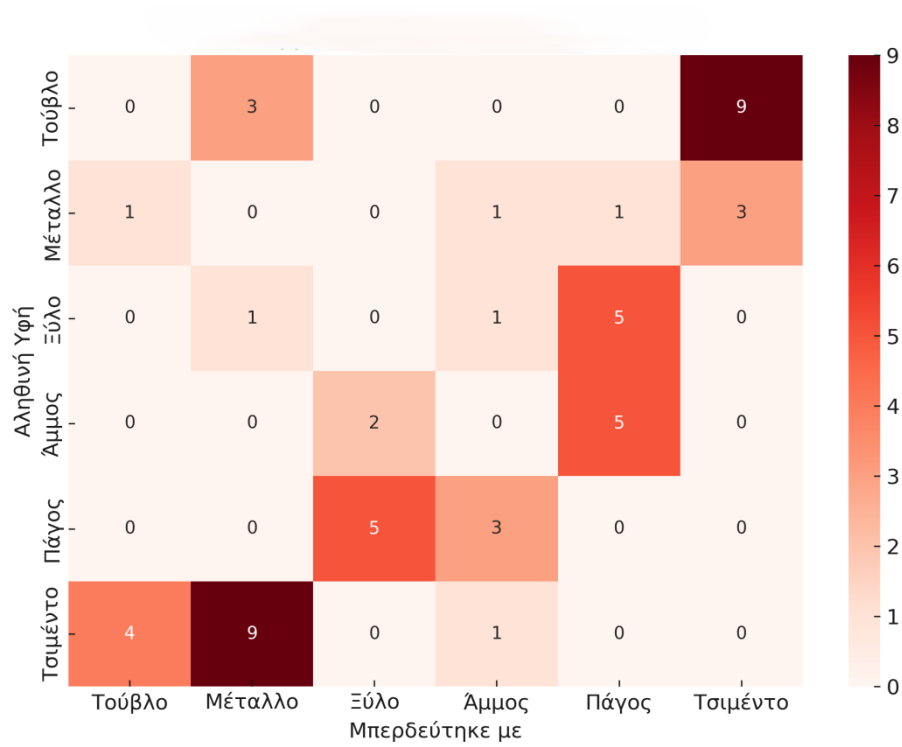
Στην περίπτωση της παρούσας μελέτης τα διαγράμματα σύγχυσης έδειξαν ότι με τις νέες ρυθμίσεις οι αναγνώρισεις παρουσίασαν πολύ μικρότερη διασκόρπιση και τα λάθη είναι πιο συγκεντρωμένα κάτι που σημαίνει ότι το μοντέλο και οι ρυθμίσεις απτικότητας βελτίωσαν τη διακριτότητα των υφών. Παρόλα αυτά εντοπίστηκαν ορισμένες συστηματικές συγχύσεις όπως:

- Το τσιμέντο που συχνά αναγνωρίστηκε ως μέταλλο.
- Το τούβλο που σε πολλές περιπτώσεις μπερδεύτηκε με το τσιμέντο.

Τα παραπάνω αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι ενώ η συνολική απόδοση είναι βελτιωμένη απαιτείται περαιτέρω ρύθμιση παραμέτρων όπως η σκληρότητα (stiffness), η τριβή (friction) ή η λεπτομέρεια του displacement mapping ώστε να ενισχυθεί η ακρίβεια διάκρισης σε αυτές τις προβληματικές υφές. Παρακάτω μπορούμε να δούμε αναλυτικά αυτά τα διαγράμματα και τα αποτελέσματα τους.



Εικόνα 7.6 Διάγραμμα Σύγκρισης 1^{ης} Ερευνάς



Εικόνα 7.7 Διάγραμμα Σύγκρισης 2^{ης} Ερευνάς

Υλικό	Πρώτη Έρευνα	Δεύτερη Έρευνα
Τούβλο	Μέταλλο 12,5% (2/16), Τσιμέντο 18,8% (3/16)	Μέταλλο 9,7% (3/31), Τσιμέντο 29,0% (9/31)
Μέταλλο	Τούβλο 25% (4/16), Άμμος 6,3% (1/16), Τσιμέντο 18,8% (3/16)	Τούβλο 3,2% (1/31), Άμμος 3,2% (1/31), Πάγος 3,2% (1/31), Τσιμέντο 9,7% (3/31)
Ξύλο	Πάγος 31,3% (5/16), Τσιμέντο 12,5% (2/16), Άμμος 6,3% (1/16)	Πάγος 16,1% (5/31), Μέταλλο 3,2% (1/31), Άμμος 3,2% (1/31)
Άμμος	Ξύλο 12,5% (2/16), Μέταλλο 6,3% (1/16), Πάγος 6,3% (1/16)	Ξύλο 6,5% (2/31), Πάγος 16,1% (5/31)
Πάγος	Άμμος 12,5% (2/16), Μέταλλο 6,3% (1/16)	Ξύλο 16,1% (5/31), Άμμος 9,7% (3/31)
Τσιμέντο	Μέταλλο 31,3% (5/16), Τούβλο 6,3% (1/16), Άμμος 6,3% (1/16)	Μέταλλο 29,0% (9/31), Τούβλο 12,9% (4/31)

Με βάση λοιπόν τα παραπάνω δεδομένα μπορούμε να βγάλουμε κάποια συμπεράσματα για την κάθε υφή και τα αποτελέσματα που είχαν οι διαφορετικές ρυθμίσεις πάνω στη σύγκυση που είχαν με άλλες υφές στην κάθε έρευνα.

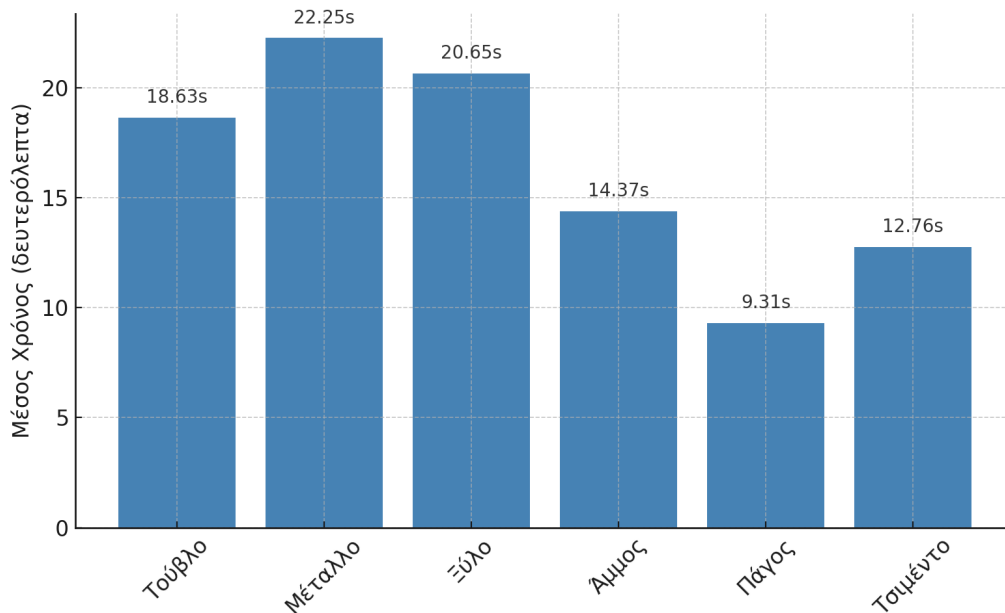
1. Τούβλο: Η σύγκυση που είχε το τούβλο με το τσιμέντο σχεδόν διπλασιάστηκε, κάτι που είναι αρνητικό για την αναγνωρισιμότητα των υφών αλλά λογικό, διότι η υφή του τούβλου και του τσιμέντου μοιάζουν στην πραγματική ζωή και όσο πιο κοντά φτάνουμε σε αυτές είναι λογικό να ανεβαίνει και η σύγκυση μεταξύ τους.
2. Μέταλλο: Στο μέταλλο είχαμε πολύ καλά αποτελέσματα από την πρώτη έρευνα, όπου τα λάθη ήταν στο 50%, πλέον έφτασαν να είναι λιγότερο από 20%.
3. Ξύλο: Στο ξύλο υπήρχε επίσης πολύ μεγάλη βελτίωση, η δεύτερη μεγαλύτερη από τις υφές. Παραμένει όμως η σύγκυση που έχει με τον πάγο λόγω του ότι και οι δύο αυτές επιφάνειες είναι λείες.
4. Άμμος: Στην άμμο αυξήθηκε η σύγκυση με τον πάγο, κάτι που πιθανόν οφείλεται στη χαμηλή σκληρότητα που έχουν οι δύο αυτές υφές.
5. Πάγος: Ο πάγος ήταν μια υφή που η αναγνωσιμότητά του έπεσε ελάχιστα, αλλά χωρίς αυτή η πτώση να είναι αρκετά μεγάλη για να θεωρηθεί σημαντική μείωση αναγνωρισιμότητας, και παραμένει η λογική σύγκυση του με το ξύλο σαν λείες επιφάνειες.
6. Τσιμέντο: Το τσιμέντο είχε μια πολύ μικρή πτώση, αλλά η αναγνωρισιμότητα του ήταν ήδη χαμηλά, κάτι που σημαίνει ότι αυτή η υφή χρειάζεται παραμετροποίηση.

Συνολικά μπορούμε να πούμε ότι στη δεύτερη έρευνα, με τις καινούργιες ρυθμίσεις, οι υφές ακολουθούν ένα πιο αναμενόμενο μοτίβο. Αυτό σημαίνει ότι υφές που περιμέναμε ότι θα μπερδευτούν μεταξύ τους μπερδεύονται, χωρίς να υπάρχει και σύγκυση με άλλες που θα φαινόταν περίεργο, καθώς δεν έχουν καθόλου ίδια χαρακτηριστικά, όπως ας πούμε το τούβλο και η άμμος.

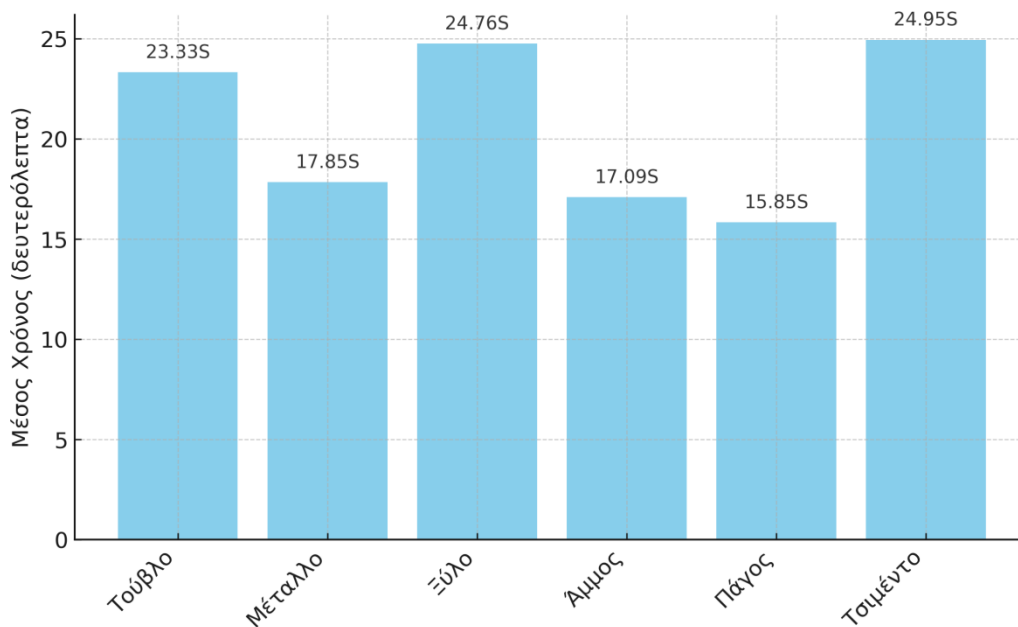
7.4 Μέσος Χρόνος Επιτυχίας

Ο μέσος χρόνος επιτυχίας αποτυπώνει τον χρόνο που χρειάστηκε ο κάθε χρήστης για να αναγνωρίσει με επιτυχία την κάθε υφή. Αυτό αποτελεί έναν σημαντικό δείκτη αξιολόγησης για την συγκεκριμένη εφαρμογή, αφού ο μέσος χρόνος παρέχει πληροφορίες σχετικά με την αμεσότητα και την ευκολία της διάκρισης της κάθε υφής, που είναι διαφορετικό από τα προηγούμενα στατιστικά που εστίαζαν κυρίως στην ακρίβεια και στα λάθη της αναγνώρισης.

Η σύγκριση των μέσων χρόνων μεταξύ της πρώτης και της δεύτερης έρευνας επιτρέπει να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα των αλλαγών που έγιναν στις ρυθμίσεις των υφών ανάμεσα στις δύο έρευνες. Έτσι μπορούμε να παρατηρήσουμε σε ποιες περιπτώσεις υπήρχε βελτίωση και σε ποιες υφές παραμένουν δύσκολες.



Εικόνα 7.8 Διάγραμμα Μέσου Χρόνου Επιτυχίας 1^{ης} Ερευνας



Εικόνα 7.9 Διάγραμμα Μέσου Χρόνου Επιτυχίας 1^{ης} Ερευνας

Υφή	Έρευνα 1 (Μ.Ο.)	Έρευνα 2 (Μ.Ο.)	Μεταβολή (δευτ.)	Μεταβολή %
Τούβλο	18.63 s	23.33 s	+4.70 s	+25.2%
Μέταλλο	22.25 s	17.85 s	-4.40 s	-19.8%
Ξύλο	20.65 s	24.76 s	+4.11 s	+19.9%
Άμμος	14.37 s	17.09 s	+2.72 s	+18.9%
Πάγος	9.31 s	15.85 s	+6.54 s	+70.2%
Τσιμέντο	12.76 s	24.95 s	+12.19 s	+95.5%

Με βάση λοιπόν τα παραπάνω δεδομένα μπορούμε να βγάλουμε κάποια συμπεράσματα για την κάθε υφή και τα αποτελέσματα που είχαν οι διαφορετικές ρυθμίσεις πάνω στον χρόνο που ξόδεψε ο κάθε χρήστης πάνω στην κάθε υφή.

1. Τούβλο

Ο χρόνος αυξήθηκε κατά +25% πράγμα που δείχνει ότι στη δεύτερη έρευνα οι συμμετέχοντες αφιέρωσαν περισσότερη ώρα για να βεβαιωθούν για την επιλογή τους. Αυτό συμβαδίζει με το ότι υπήρχαν ακόμα συγχύσεις με το τσιμέντο αλλά η προσοχή οδήγησε σε περισσότερες σωστές απαντήσεις.

2. Μέταλλο

Εδώ έχουμε τη μεγάλη βελτίωση: -20% στον χρόνο αναγνώρισης. Αυτό σημαίνει ότι οι συμμετέχοντες πλέον ξεχώριζαν πιο γρήγορα το μέταλλο από τις υπόλοιπες υφές γεγονός που δείχνει καλύτερη παραμετροποίηση και ξεκάθαρο απτικό αποτύπωμα.

3. Ξύλο

Ο χρόνος αυξήθηκε +20% κάτι που φανερώνει μεγαλύτερη δυσκολία. Ωστόσο λόγω της βελτίωσης στα ποσοστά αναγνώρισης ερμηνεύεται ως πιο προσεκτική διαδικασία αναγνώρισης. Το ξύλο έχει μικρό γεωμετρικό ανάγλυφο άρα οι χρήστες έπρεπε να βασιστούν περισσότερο σε παραμέτρους σκληρότητας και τριβής πράγμα που απαιτεί περισσότερο χρόνο.

4. Άμμος

Επίσης παρατηρείται αύξηση χρόνου +19%. Η άμμος είναι μοναδική λόγω της παραμέτρου viscosity οπότε η μεγαλύτερη διάρκεια υποδηλώνει ότι οι χρήστες δοκίμασαν περισσότερο την είσοδο της πέννας στην υφή ώστε να σιγουρευτούν. Αυτός ο περισσότερος χρόνος ίσως να οδήγησε και στα αυξημένα ποσοστά.

5. Πάγος

Εδώ έχουμε μεγάλη αύξηση χρόνου +70%. Ο πάγος, λόγω της λειότητας μπορεί να μπερδεύτηκε με το ξύλο. Η αύξηση δείχνει ότι οι χρήστες δίσταζαν και έπρεπε να πειραματιστούν αρκετά. Ωστόσο η συνολική ακρίβεια στη δεύτερη έρευνα ήταν χειρότερη άρα η καθυστέρηση δεν έφερε πιο σίγουρες απαντήσεις.

6. Τσιμέντο

Σχεδόν διπλάσιος χρόνος +95%. Το τσιμέντο δεν έχει επαναλαμβανόμενο μοτίβο και συχνά μπερδεύεται με το τούβλο ή το μέταλλο. Οι χρήστες αφιέρωσαν πολύ περισσότερο χρόνο ώστε να το

διαχωρίσουν. Παρόλα αυτά η αναγνώριση έπεσε κατά πολύ λίγο κάτι που σημαίνει ότι το τσιμέντο χρειάζεται αλλαγές.

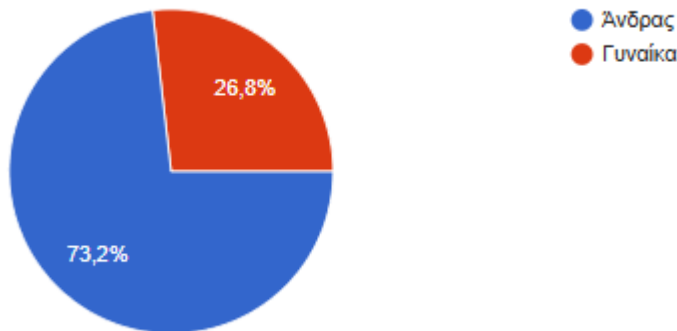
Συνολικά ο περισσότερος χρόνος σε κάποιες περιπτώσεις οδήγησε σε καλύτερα ποσοστά αναγνώρισης και σε άλλες περιπτώσεις δεν βοήθησε στην καλύτερη αναγνώριση των υφών.

7.5 Αξιολόγηση Εφαρμογής

Στο τέλος της διαδικασίας της αξιολόγησης των ρυθμίσεων και του παιχνιδιού ζητήθηκε από τους χρηστές αν θα ήθελαν εθελοντικά να αξιολογήσουν την εμπειρία που είχαν με την εφαρμογή. Από τους 47 συνολικούς χρηστές οι 41 συμπληρώσαν την αξιολόγηση της εφαρμογής. Τα αποτελέσματα που βγήκαν από την αξιολόγηση είναι τα εξής:

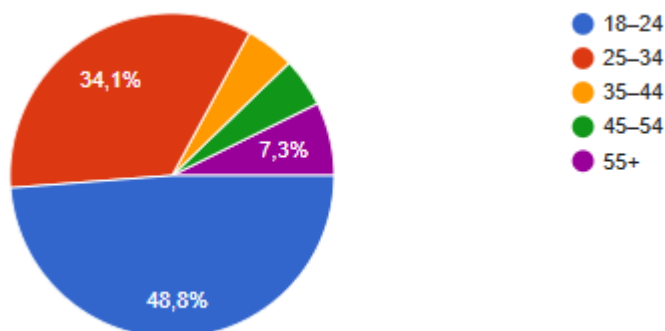
Ποιο είναι το φύλο σας;

- Άνδρας: 73.2%
- Γυναίκα: 26.8%



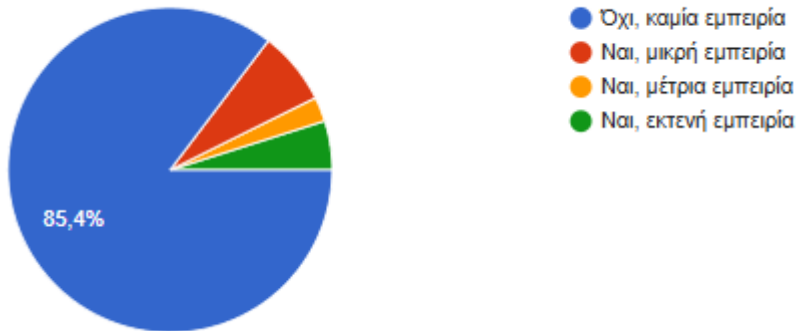
Ποια είναι η ηλικία σας;

- 18-24: 48.8%
- 25-34: 34.1%
- 35-44: 4.9%
- 45-54: 4.9%
- 55+: 7.3%



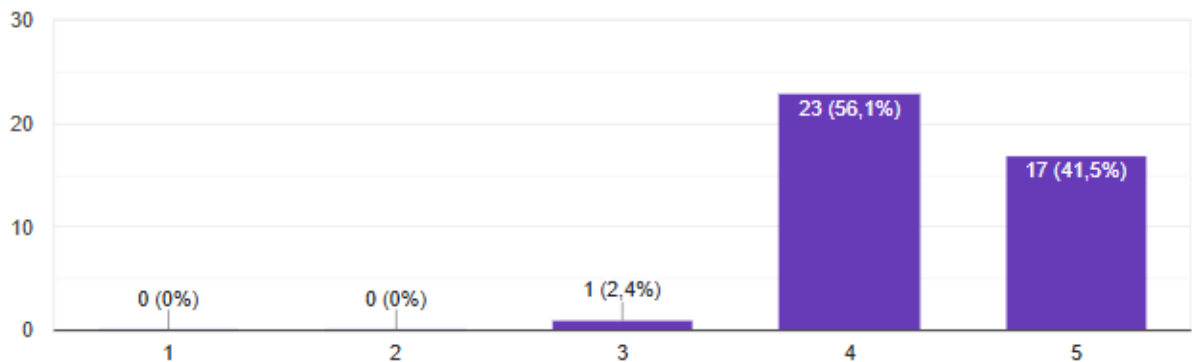
Έχετε ξαναχρησιμοποιήσει συσκευές απτικής ανάδρασης;

- Όχι, καμία εμπειρία: 85.4%
- Ναι, μικρή εμπειρία: 7.3%
- Ναι, μετρία εμπειρία: 2.4%
- Ναι, εκτενή εμπειρία: 4.9%

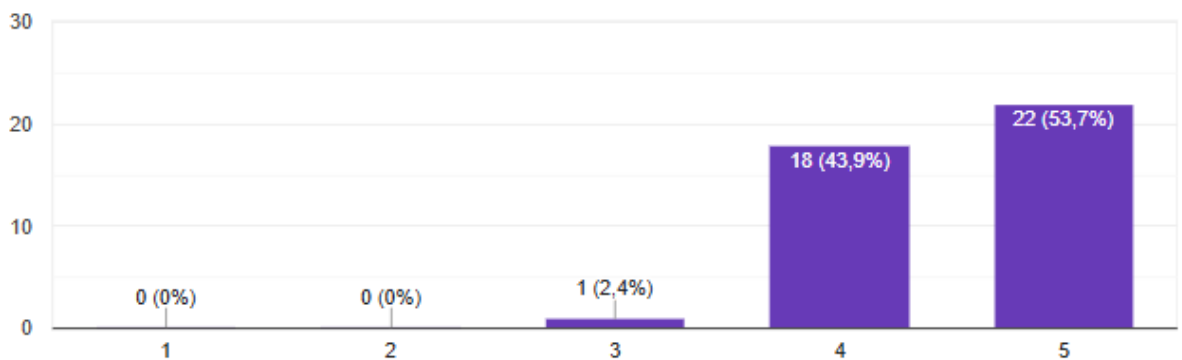


Στην συνέχεια έγιναν οκτώ ερωτήσεις που αφορούσαν την εμπειρία των χρηστών με την εφαρμογή:

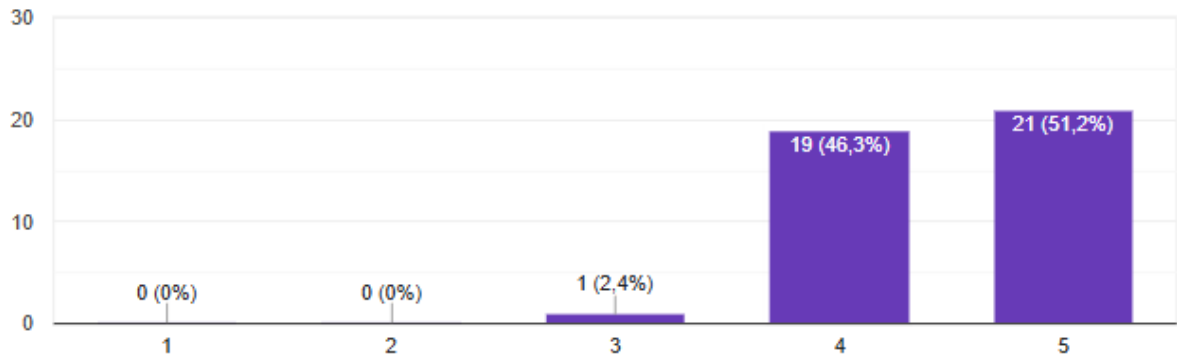
1. Η εφαρμογή σας φάνηκε **δυσλειτουργική** ή **υποστηρικτική**;



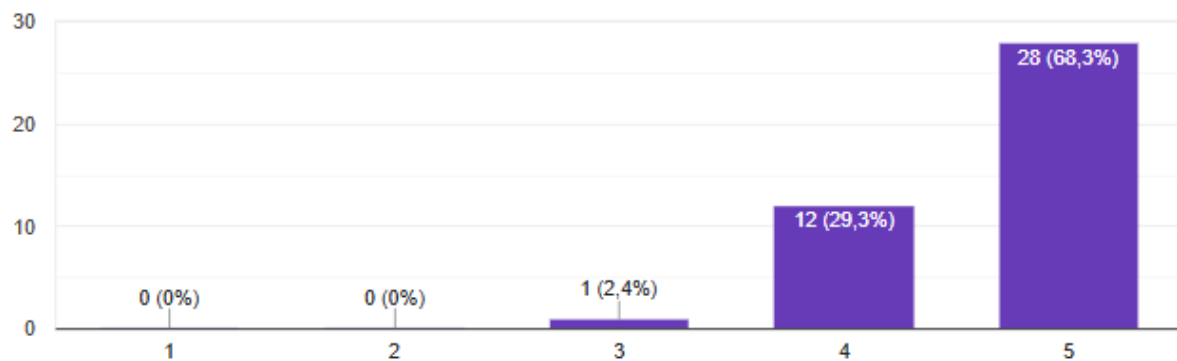
2. Η αλληλεπίδραση με τα υλικά ήταν **περίπλοκη** ή **εύκολη**;



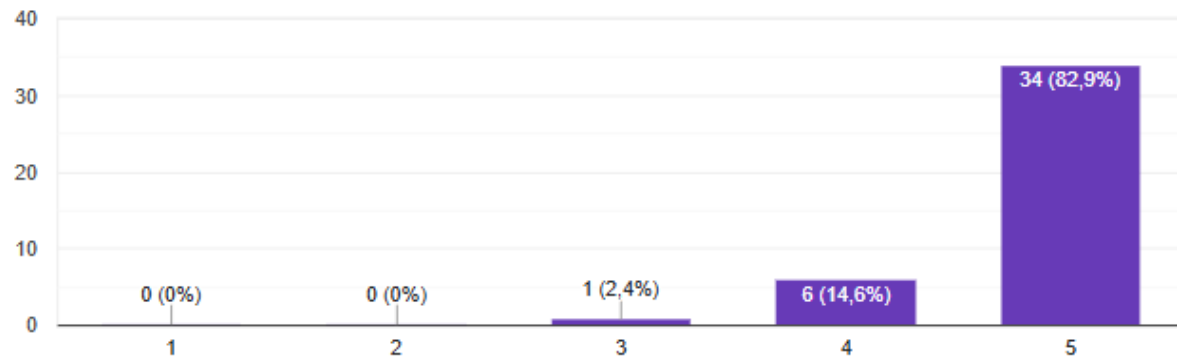
3. Η εφαρμογή σας φάνηκε **ανεπαρκής** ή **επαρκής** όσον αφορά την απτική προσομοίωση;



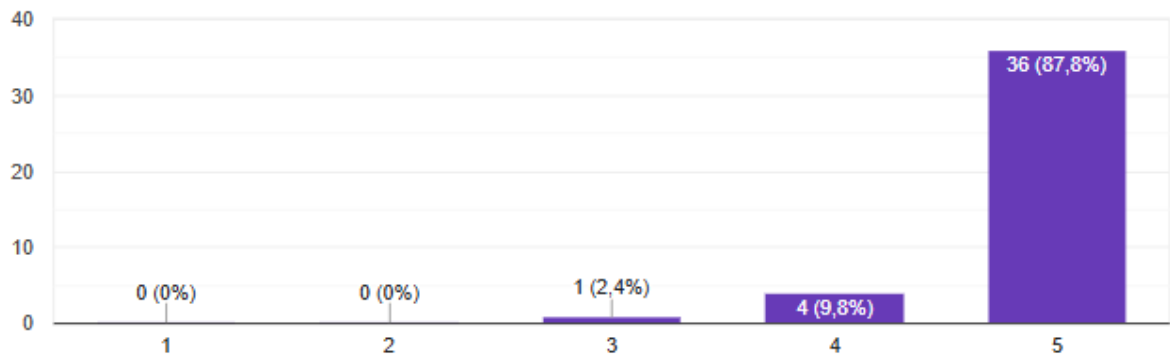
4. Η εμπειρία σας ήταν **μπερδεμένη ή σαφής;**



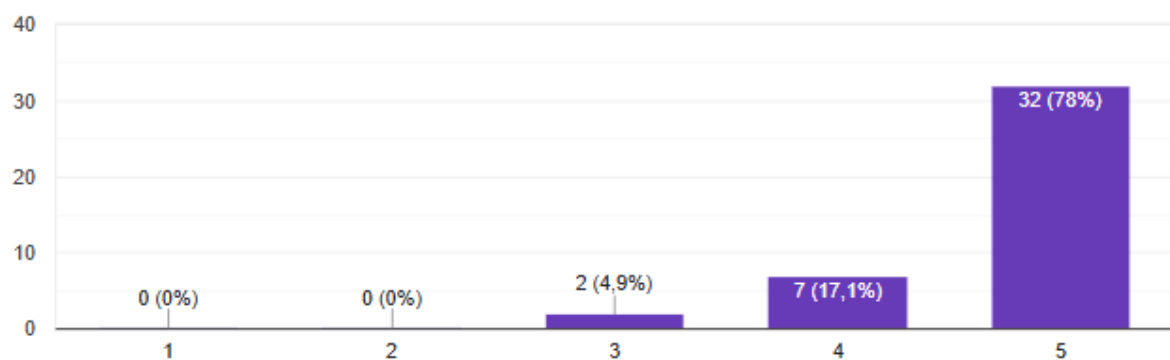
5. Βρήκατε τη χρήση της εφαρμογής **βαρετή ή συναρπαστική;**



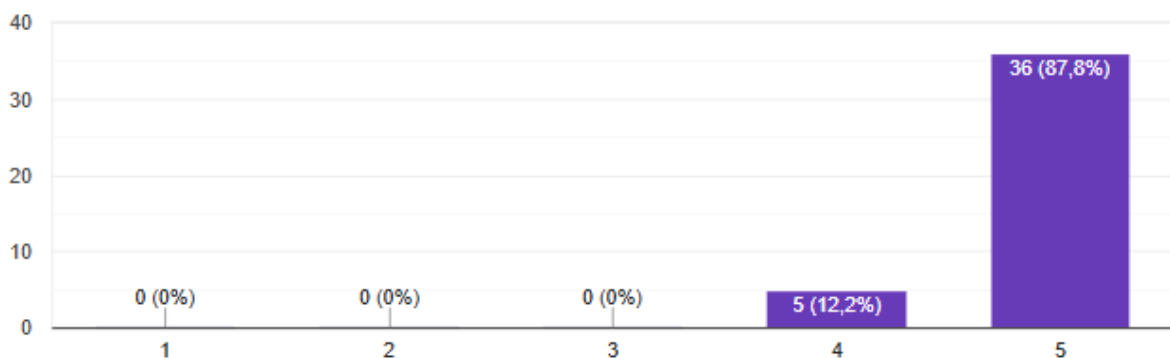
6. Η απτική εμπειρία ήταν **αδιάφορη ή ενδιαφέρουσα;**



7. Η τεχνολογική υλοποίηση ήταν **συμβατική** ή **εφευρετική**;



8. Συνολικά, η προσέγγιση της εφαρμογής ήταν **συνηθισμένη** ή **πρωτοπόρα**;



7.6 Επίλογος

Συμπερασματικά με βάση τα στατιστικά στοιχεία που συλλέχθηκαν από τους χρήστες που δοκίμασαν την εφαρμογή η εμπειρία τους αξιολογείται ως ιδιαίτερα θετική. Τα δεδομένα δείχνουν υψηλά ποσοστά ικανοποίησης και θετικής αλληλεπίδρασης με τις λειτουργίες της εφαρμογής υποδεικνύοντας ότι οι χρήστες όχι μόνο κατάφεραν να ολοκληρώσουν με επιτυχία τις ενέργειες που χρειάστηκαν και στο κομμάτι της αξιολόγησης και στο κομμάτι του παιχνιδιού αλλά και ότι η συνολική εμπειρία χρήσης στα κομμάτια αυτά ήταν ευχάριστη. Τα αποτελέσματα αυτά ενισχύουν την εκτίμηση ότι η εφαρμογή ανταποκρίνεται αποτελεσματικά στις ανάγκες των χρηστών και προσφέρει μία θετική εμπειρία χρήσης.

Κεφάλαιο 8^ο : Σύγκριση Δυο Επιφανειών σε 3D Objects με Ελεύθερη Περιήγηση

8.1 Δημιουργία της σκηνής

Για την εφαρμογή δημιουργήθηκε και μια άλλη σκηνή η οποία έχει διαφορετική λειτουργικότητα από την προηγούμενη. Σε αυτήν οι υφές που είχαν ήδη χρησιμοποιηθεί προηγουμένως εφαρμόζονται πλέον σε πιο σύνθετα γεωμετρικά αντικείμενα ώστε να δούμε πως θα αντιδράσουν οι υφές σε αυτά τα καινούρια αντικείμενα. Η σκηνή είναι οργανωμένη έτσι ώστε η κάθε υφή να εμφανίζεται με δύο εκδοχές. Στα αριστερά βρίσκεται το αντικείμενο με την πλήρη γεωμετρική υφή σε συνδυασμό με τις ρυθμίσεις της τριβής και σκληρότητας και στα δεξιά υπάρχει το αντίστοιχο αντικείμενο αλλά αυτή τη φορά έχει μόνο τις ρυθμίσεις χωρίς τη γεωμετρική υφή.

Με αυτόν τον τρόπο ο χρήστης μπορεί να συγκρίνει άμεσα την αίσθηση που προσφέρει η γεωμετρία σε κάθε υφή σε σχέση με τις υπόλοιπες ρυθμίσεις

Η πλοήγηση στον χώρο αυτό γίνεται με τα πλήκτρα W, A, S, D επίσης η στροφή του παίκτη γίνεται με τα πλήκτρα Q, E έτσι ώστε ο χρήστης να μπορεί να έχει το δεξί του χέρι πάντα στη συσκευή Touch. Με το πλήκτρο F ο χρήστης μπορεί να πλησιάσει πολύ κοντά στο αντικείμενο κλειδώνοντας την κάμερα για μια πιο λεπτομερή παρατήρηση της υφής. Επιπλέον με το πλήκτρο G δίνεται η δυνατότητα αλλαγής του τρέχοντος αντικειμένου στο διπλά έτσι ώστε να μπορεί ο χρήστης εύκολα να συγκρίνει τα δύο αντικείμενα.



Εικόνα 8.1 Όψη κατά την πλοήγηση του παίκτη στην σκηνή

8.2 Δημιουργία των αντικειμένων

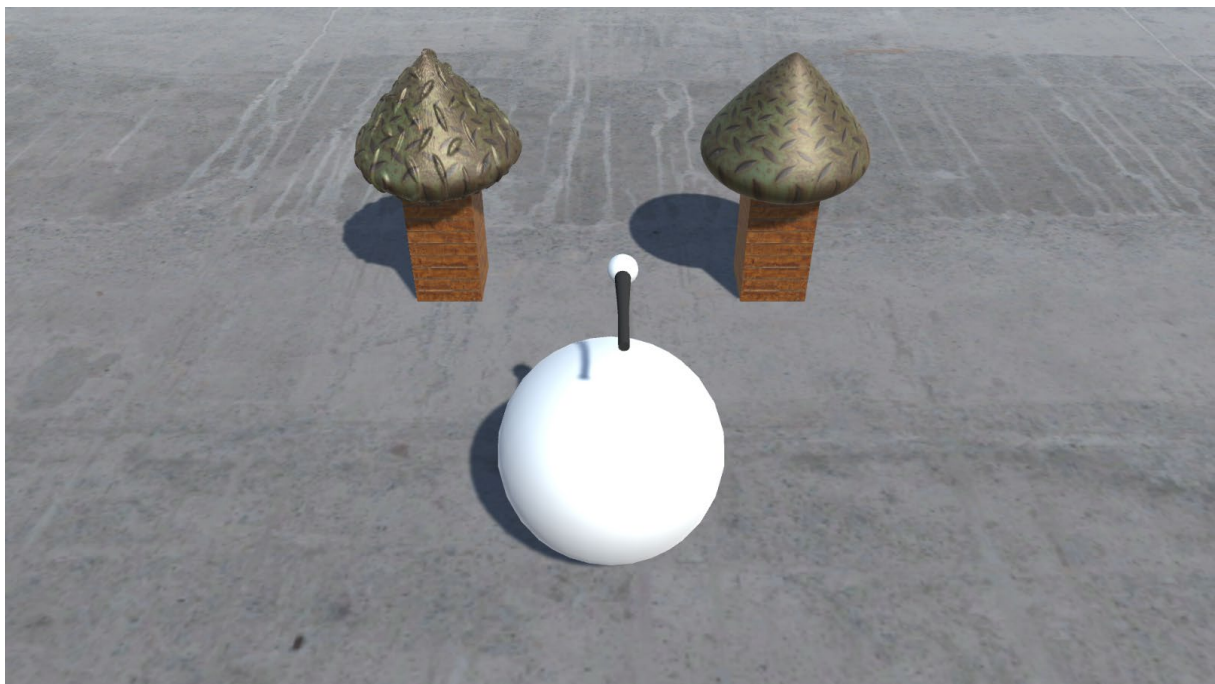
Για τα αντικείμενα χρησιμοποιήθηκαν οι χρωματισμοί και η γεωμετρία που χρησιμοποιήθηκε και για τις απλές επιφάνειες της προηγούμενης σκηνής αλλά σε νέα γεωμετρικά σχήματα. Έτσι τα νέα αντικείμενα για την κάθε υφή είναι ως εξής:

1. Το αντικείμενο του τούβλου



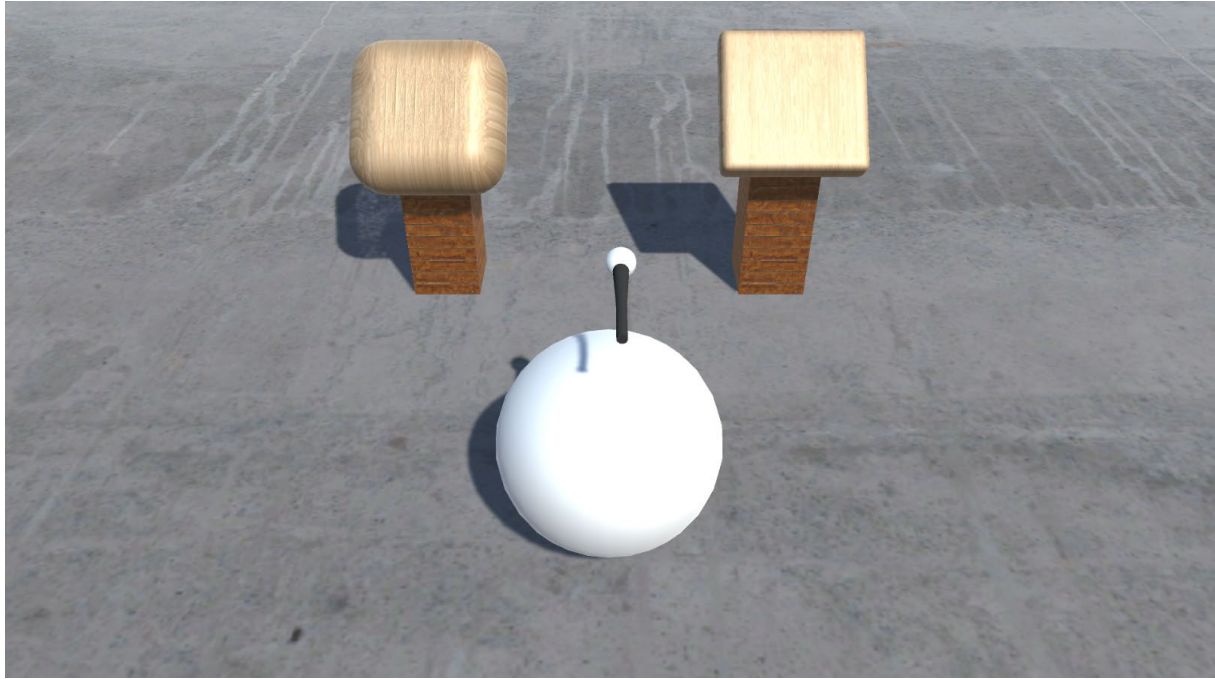
Εικόνα 8.2 Το αντικείμενο του τούβλου

2. Το αντικείμενο του μέταλλου



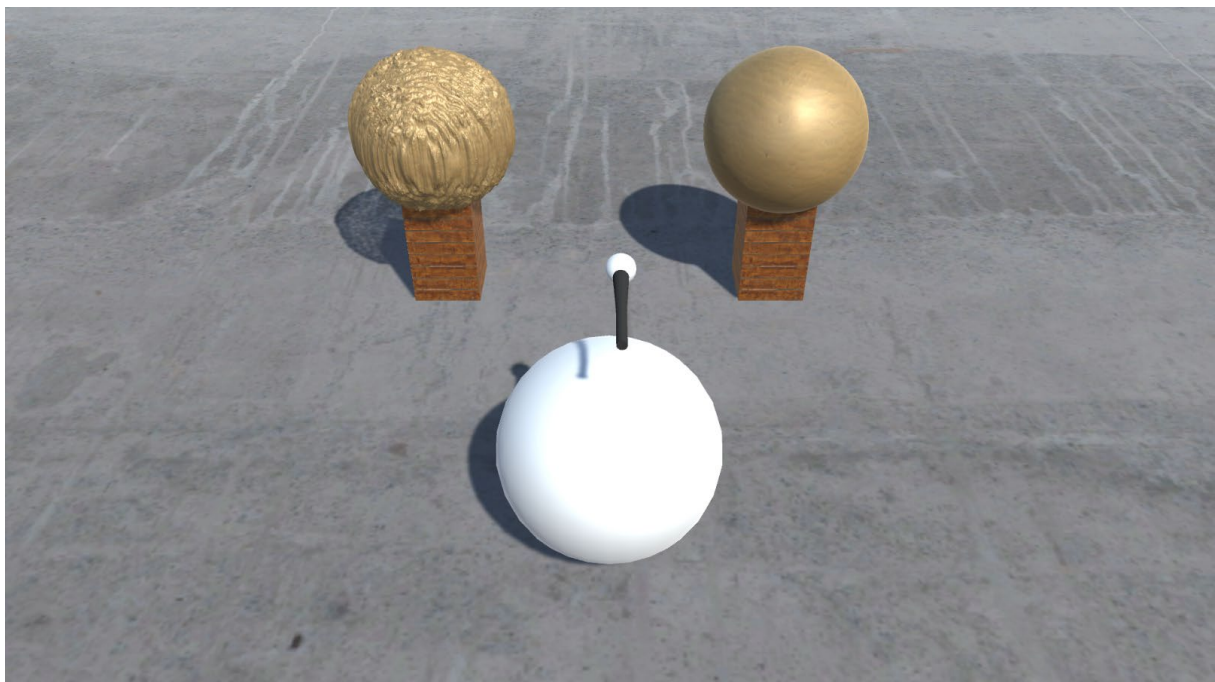
Εικόνα 8.3 Το αντικείμενο του μέταλλου

3. Το αντικείμενο του ξύλου



Εικόνα 8.4 Το αντικείμενο του ξύλου

4. Το αντικείμενο της άμμου



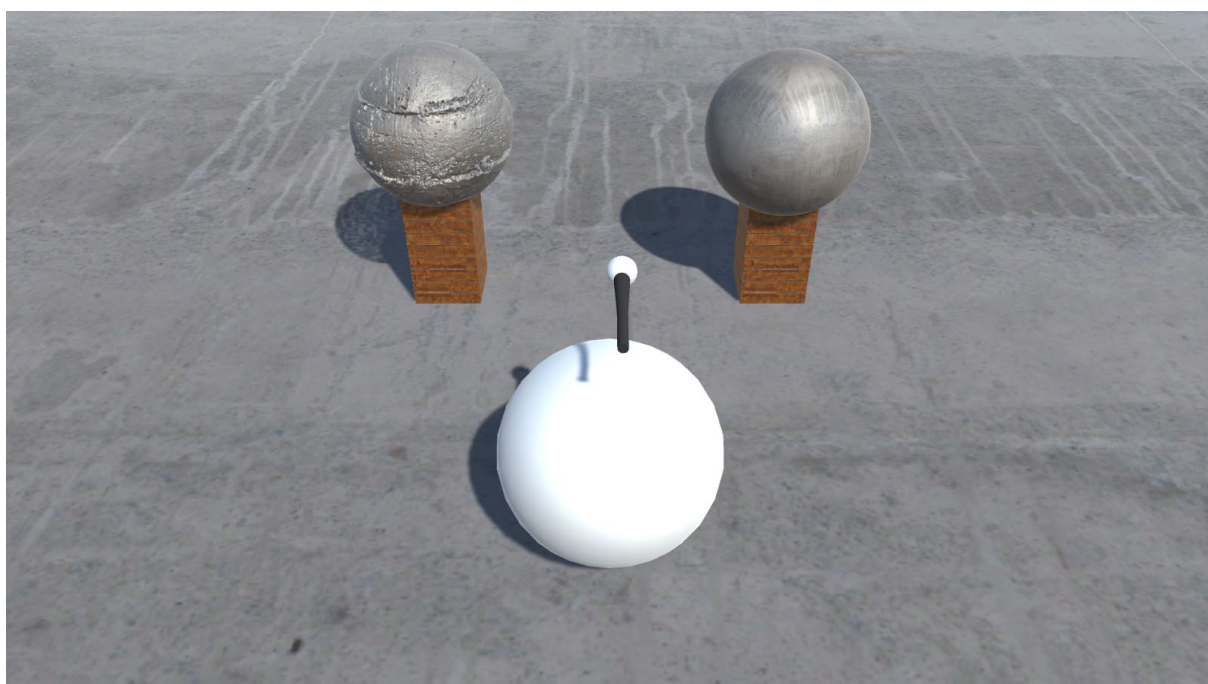
Εικόνα 8.5 Το αντικείμενο της άμμου

5. Το αντικείμενο του πάγου



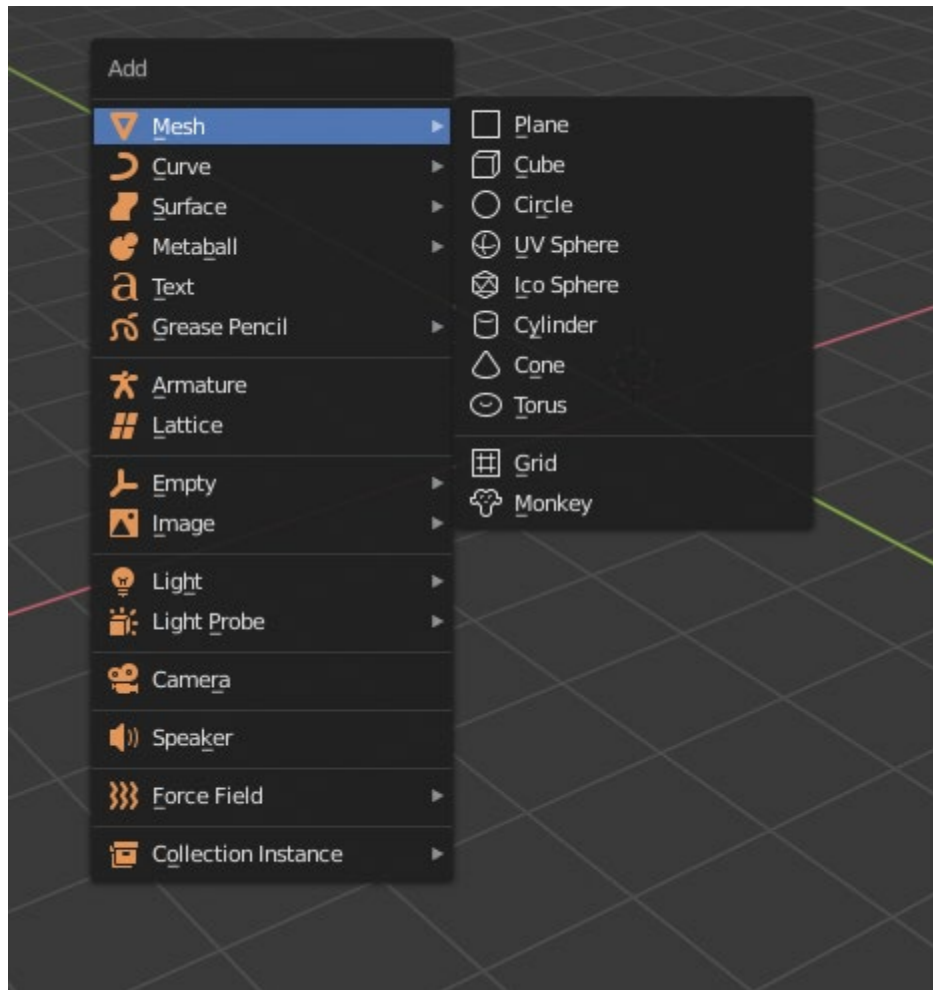
8.6 Το αντικείμενο του πάγου

6. Το αντικείμενο του τσιμέντου



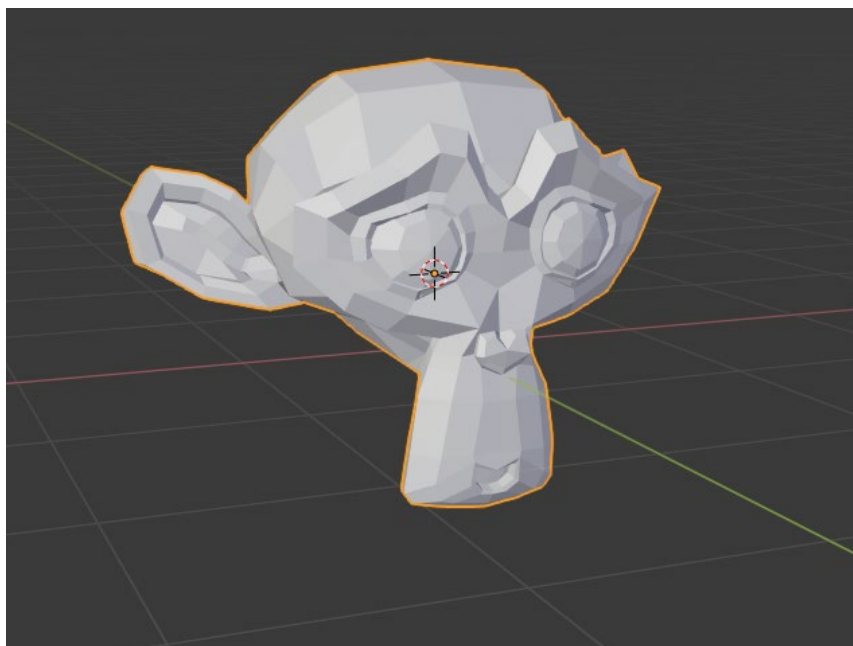
8.7 Το αντικείμενο του τσιμέντου

Η γεωμετρία αυτών των καινούριων αντικειμένων δημιουργήθηκε μέσω του Blender. Μέσα από το Blender είναι πολύ εύκολη η δημιουργία καινούριων γεωμετρικών σχημάτων. Πατώντας τα πλήκτρα Shift + A ανοίγεται ένα μενού στο Blender όπου επιλέγοντας την κατηγορία Mesh μπορούμε να δημιουργήσουμε απλά σχήματα.



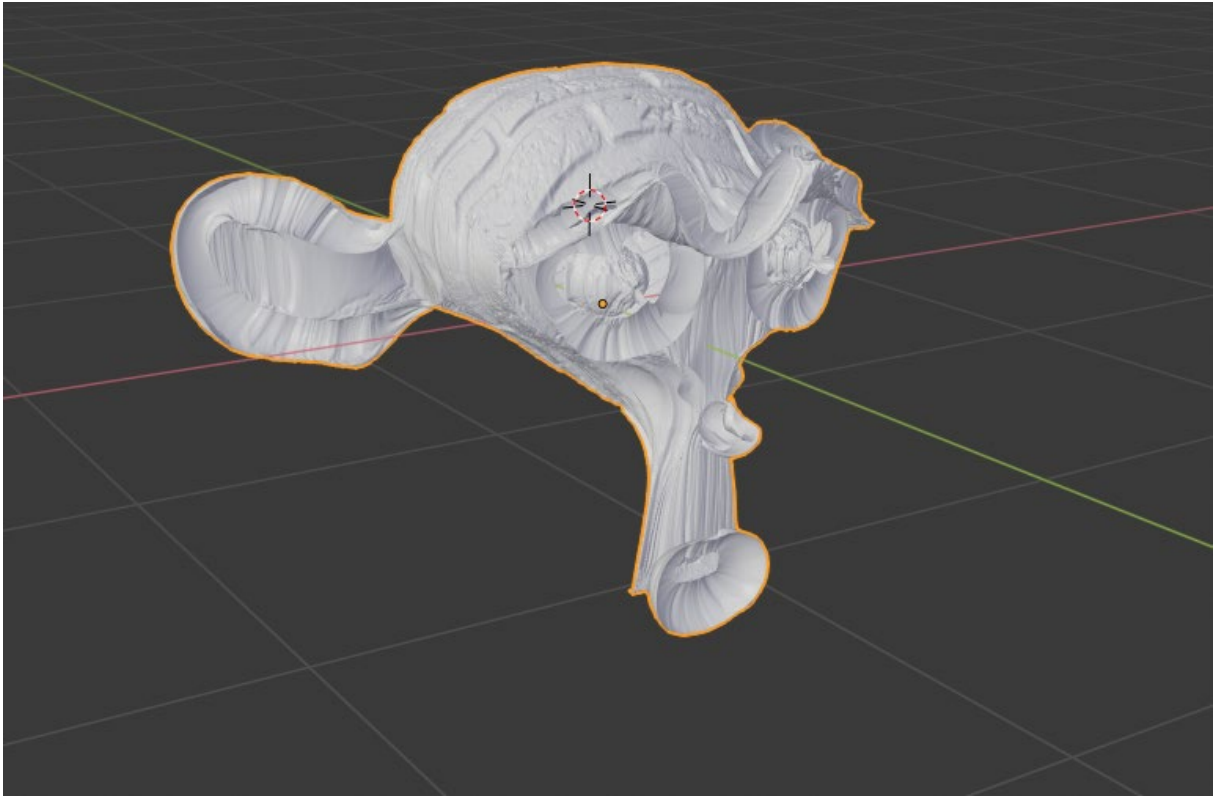
Εικόνα 8.8 Μενού δημιουργίας αντικειμένων

Πατώντας κάποια από τις διαθέσιμες επιλογές όπως είναι για παράδειγμα το Monkey μπορούμε να φτιάξουμε ένα καινούργιο αντικείμενο.



Εικόνα 8.9 Πρόσφατα δημιουργημένο αντικείμενο Monkey

Εφαρμόζοντας την ίδια μέθοδο εφαρμογής της γεωμετρικής υφής πάνω στο καινούριο αντικείμενο με πριν μπορούμε να αλλάξουμε την επιφάνεια του αντικειμένου σε αυτήν που επιθυμούμε. Στην περίπτωση του αντικειμένου Monkey να δώσουμε την υφή του τούβλου.



Εικόνα 8.10 Το αντικείμενο Monkey με τα Modifiers

Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε και για τις υπόλοιπες υφές για να δημιουργηθούν και τα έξι καινούργια αντικείμενα.

8.3 Κίνηση του παίκτη

Για τη λειτουργία της σκηνής δημιούργησα ένα καινούριο Script το οποίο ονόμασα Third Person Movement. Για την πλοήγηση του παίκτη μέσα στον ελεύθερο χώρο επέλεξα να διαφοροποιώ απευθείας το Transform Component που έχει ο παίκτης κάθε φορά που επέλεγε το αντίστοιχο πλήκτρο.

```

#region Movement
if (Input.GetKey("q"))
{
    transform.Rotate(0f, -speed * Time.deltaTime * 16, 0f);
}

if (Input.GetKey("e"))
{
    transform.Rotate(0f, speed * Time.deltaTime * 16, 0f);
}

if (Input.GetKey("a"))
{
    gameObject.transform.position += -transform.right * speed / 2 * Time.deltaTime;
}

if (Input.GetKey("d"))
{
    gameObject.transform.position += transform.right * speed / 2 * Time.deltaTime;
}

if (Input.GetKey("w"))
{
    gameObject.transform.position += transform.forward * speed * Time.deltaTime;
}

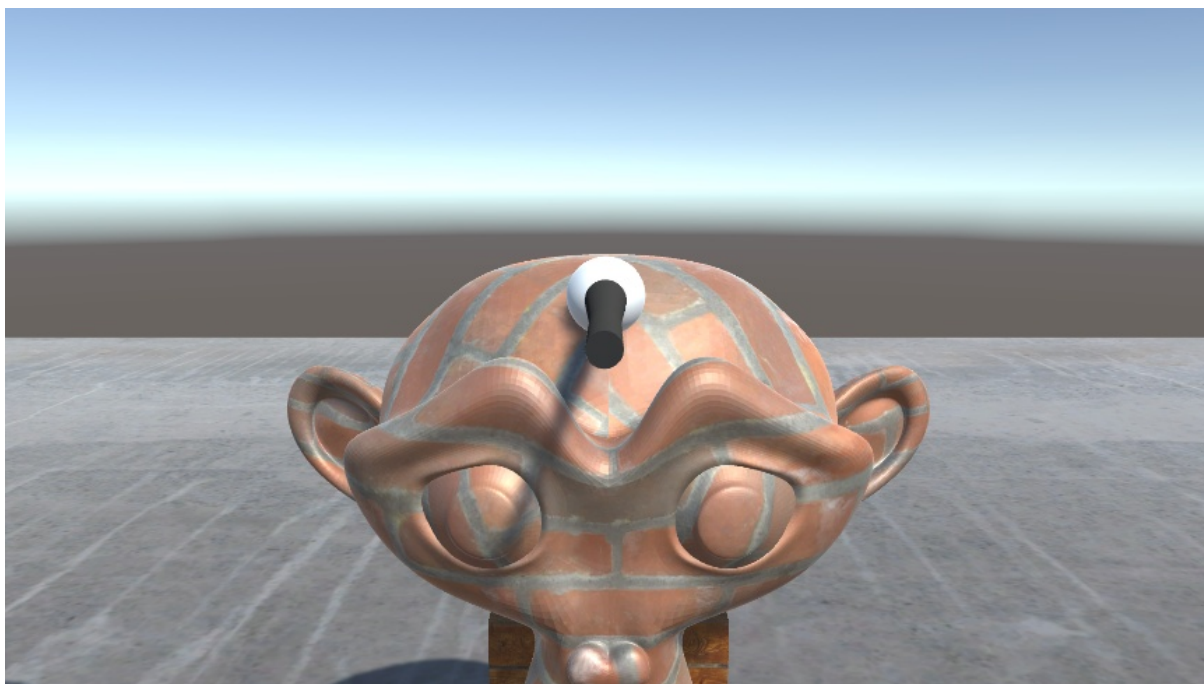
if (Input.GetKey("s"))
{
    gameObject.transform.position += -transform.forward * speed * Time.deltaTime;
}
#endregion

```

Εικόνα 8.11 Κώδικας πλοήγησης του παίκτη στον ελεύθερο χώρο

Οπότε για παράδειγμα όταν ο χρήστης πιάσει το κουμπί “q” χρησιμοποιώ τη λειτουργία transform.Rotate με μια συγκεκριμένη ταχύτητα έτσι ώστε ο παίκτης να στρίβει και όταν ο χρήστης πιάσει για παράδειγμα το κουμπί “a” τότε προσθέτω στο Transform του παίκτη το κατάλληλο ποσό έτσι ώστε να περπατήσει προς την κατάλληλη κατεύθυνση σε αυτή την περίπτωση στα αριστερά.7.4 Εστίαση στα αντικείμενα

Για την καλύτερη αλληλεπίδραση με τις υφές αναπτύχθηκε και μια λειτουργία εστίασης του παίκτη πάνω στα αντικείμενα.



Εικόνα 8.12 Όψη εστίασης στην σκηνή

Αυτή η λειτουργία ενεργοποιείτε πατώντας το κουμπί “f”. Στον κώδικα ελέγχεται συνεχώς η απόσταση του παίκτη από αυτά τα δυο αντικείμενα που είναι διαθέσιμα στον χώρο.

```
Distance1 = Vector3.Distance(Disabler1.transform.position, transform.position);
```

Εικόνα 8.13 Κώδικας καταγραφής απόστασης παίκτη

Εφόσον η απόσταση είναι αρκετά κοντινή και πατηθεί το κουμπί, τότε ξεκινάει μια διαδικασία που κλειδώνει τις κινήσεις του παίκτη και ενεργοποιείται μια καινούρια κάμερα η οποία είναι κλειδωμένη πάνω στο αντικείμενο που εστιάζει ο παίκτης.

```
if (Disabler1Check == false && Distance1 < 1f && Input.GetKeyDown(KeyCode.F) && Disabler2Check == false)
{
    PlayerDisabler.SetActive(false);
    Disabler1.SetActive(true);
    StartCoroutine(Disabler1True());
}
```

Εικόνα 8.14 Κώδικας ενεργοποίησης όψης εστίασης

Για τις κάμερες χρησιμοποιήθηκε το πολύ χρήσιμο πακέτο Cinemachine όπου επιτρέπει τη χρήση πολλών καμερών μαζί και με την απενεργοποίηση μιας και έπειτα την ενεργοποίηση μιας δεύτερης κάνει αυτόματα μια ομαλή μετάβαση από την πρώτη κάμερα στη δεύτερη δίνοντας έτσι ένα ωραίο εφέ μεταφοράς της όψης από την ελεύθερη στην εστιασμένη.

Εφόσον ο χρήστης βρίσκεται σε αυτή την εστιασμένη όψη μπορεί πατώντας το κουμπί “g” να μεταβεί στο διπλά αντικείμενο με την ίδια λογική που εφαρμόστηκε για την εστίαση στο αντικείμενο.

```

if (Disabler1Check == true && Input.GetKeyDown("g"))
{
    Disabler1.SetActive(false);
    StartCoroutine(Disabler1False());
    PlayerDisabler.SetActive(false);
    Disabler2.SetActive(true);
    StartCoroutine(Disabler2True());
}

```

Εικόνα 8.15 Κώδικας αλλαγής εστίασης μεταξύ αντικειμένων

8.4 Αλλαγή των αντικειμένων

Για την αλλαγή των αντικειμένων αρχικοποίησα τα αντικείμενα στο καινούργιο Script που δημιούργησα ώστε να μπορώ να αναφερθώ σε αυτά μέσα στον κώδικα.

Brick	Monkey_Brick	⊙
Brick Plain	Monkey_Plain	⊙
Metal	Diamond_metalt	⊙
Metal Plain	DiamondPlain	⊙
Wood	Plane_wood	⊙
Wood Plain	Plane_Plain	⊙
Sand	Sphere_Sand	⊙
Sand Plain	Sphere_Plain	⊙
Ice	Torus_Ice	⊙
Ice Plain	Torus_Plain	⊙
Concrete	Concrete_Sphere	⊙
Concrete Plain	Sphere_Plain (1)	⊙

Εικόνα 8.16 Εισαγωγή των αντικειμένων στο Script

```
public GameObject Brick;  
public GameObject BrickPlain;  
public GameObject Metal;  
public GameObject MetalPlain;  
public GameObject Wood;  
public GameObject WoodPlain;  
public GameObject Sand;  
public GameObject SandPlain;  
public GameObject Ice;  
public GameObject IcePlain;  
public GameObject Concrete;  
public GameObject ConcretePlain;
```

Εικόνα 8.17 Αρχικοποίηση των αντικειμένων στον κώδικα

Και έπειτα έθεσα ότι με το πάτημα των κουμπιών από το 1 έως το 6 θα αλλάζουν οι υφές για να μπορεί εύκολα ο χρήστης να διαχειρίζεται τα αντικείμενα.

```

#region Materials
if (Input.GetKeyDown(KeyCode.Alpha1))
{
    Brick.SetActive(true);
    BrickPlain.SetActive(true);
    Metal.SetActive(false);
    MetalPlain.SetActive(false);
    Wood.SetActive(false);
    WoodPlain.SetActive(false);
    Sand.SetActive(false);
    SandPlain.SetActive(false);
    Ice.SetActive(false);
    IcePlain.SetActive(false);
    Concrete.SetActive(false);
    ConcretePlain.SetActive(false);
}
if (Input.GetKeyDown(KeyCode.Alpha2)) ...
if (Input.GetKeyDown(KeyCode.Alpha3)) ...
if (Input.GetKeyDown(KeyCode.Alpha4)) ...
if (Input.GetKeyDown(KeyCode.Alpha5)) ...
if (Input.GetKeyDown(KeyCode.Alpha6)) ...
#endregion

```

Εικόνα 8.18 Κώδικας αλλαγής αντικειμένων στην σκηνή

8.5 Επίλογος

Η ανάπτυξη αυτής της νέας σκηνής ήταν ένα χρήσιμο εργαλείο για την καλύτερη αξιολόγηση των υφών. Μέσα από αυτήν τη διάταξη ο χρήστης είχε τη δυνατότητα να καταλάβει σε βάθος τη διαφορά της γεωμετρικής υφής και των ρυθμίσεων της τριβής και της σκληρότητας. Η ελεύθερη πλοήγηση στον χώρο σε συνδυασμό με την εστίαση πάνω στο αντικείμενο είναι ένα πρακτικό εργαλείο για την έρευνα των υφών σφαιρικά χωρίς τον περιορισμό αλληλεπίδρασης με το αντικείμενο μέσω κάποιας συγκεκριμένης οπτικής γωνίας. Συνολικά αυτή η σκηνή ήταν μια θετική προσθήκη συνολικά στην εφαρμογή.

Κεφάλαιο 9^ο : Συμπεράσματα

9.1 Συνοπτικά Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο <<Δημιουργία απτικών διεπαφών σε τρισδιάστατα αντικείμενα στο Unity για εφαρμογές εικονικής πραγματικότητας>> είχε ως βασικό στόχο την ανάπτυξη υφών στον ψηφιακό κόσμο οι οποίες προσπαθούσαν να προσομοιώσουν όσο δυνατόν πιο κοντά τις αντίστοιχες υφές του πραγματικού κόσμου.

Για την ανάπτυξη της εφαρμογής χρησιμοποιήθηκαν τα εργαλεία Unity και Blender τα οποία προσέφεραν ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον δημιουργίας και πειραματισμού. Και τα δύο αυτά εργαλεία αποδείχθηκαν ιδιαίτερα αποτελεσματικά για τις ανάγκες αυτής της εφαρμογής καλύπτοντας πλήρως τις απαιτήσεις του έργου και επιτρέποντας τη δημιουργία ρεαλιστικών υφών με μεγάλο βαθμό λεπτομέρειας.

Για την ανάπτυξη των υφών χρησιμοποιήθηκε αρχικά το Blender που μέσα από τα Displacement και Diffuse Maps που χρησιμοποιήθηκαν από την ιστοσελίδα Polyhaven.com μπόρεσα να δημιουργήσω τρισδιάστατες υφές με πολύ μεγάλο βαθμό λεπτομέρειας. Για τη λειτουργικότητα της εφαρμογής χρησιμοποιήθηκε το Unity3D Game Engine ένα εργαλείο που συνδυάζεται με τη γλώσσα προγραμματισμού C# για την ανάπτυξη των Scripts. Το Unity αποδείχτηκε πολύ αποτελεσματικό στη δημιουργία της εφαρμογής και στο κομμάτι της εισαγωγής των υφών από το Blender και στην ανάπτυξη της λειτουργικότητας του παιχνιδιού έτσι ώστε να μπορέσω να δημιουργήσω τα δύο κομμάτια της εφαρμογής αυτό της αξιολόγησης και το δεύτερο της έρευνας. Επίσης το Unity διαθέτει το Plugin Haptics Direct που έκανε πολύ εύκολη τη σύνδεση της εφαρμογής με τη συσκευή Touch. Τέλος για την απτική διεπαφή μεταξύ των ψηφιακών υφών και των χρηστών χρησιμοποιήθηκε η συσκευή Touch η οποία ήταν πολύ αποτελεσματική για τις ανάγκες της εφαρμογής και έδινε την αίσθηση της αφής στους χρήστες που τη χρησιμοποιούσαν με πολύ μεγάλη λεπτομέρεια.

Η αξιολόγηση των υφών και της εφαρμογής πραγματοποιήθηκε μέσω δύο ερευνών στις οποίες συμμετείχαν συνολικά 47 άτομα. Για την πρώτη έρευνα χρησιμοποιήθηκαν ρυθμίσεις οι οποίες αποφασίστηκαν από εμένα και μετά την αξιολόγηση κρατήθηκαν πολύτιμα στατιστικά και παρατηρήσεις για τη βελτιστοποίηση των ρυθμίσεων των υφών. Οπότε στη δεύτερη έρευνα καταγράφηκε ξεκάθαρη βελτίωση στα συνολικά ποσοστά αναγνώρισης των υφών στις συνθήκες του παιχνιδιού της εφαρμογής όπου οι χρήστες δεν είχαν οπτική επαφή με την οθόνη παρά μόνο με την αφή.

Συγκεκριμένα υπήρξε σαφής βελτίωση στη συνολική απόδοση με τον μέσο όρο επιτυχίας να αυξάνεται από 63,54% στην πρώτη έρευνα σε 70,96% στη δεύτερη γεγονός που δείχνει ότι οι αλλαγές που έγιναν με τα συμπεράσματα που βγήκαν από την πρώτη έρευνα ήταν θετικές για την καλύτερευση των υφών. Σημαντικές βελτιώσεις παρατηρήθηκαν στο μέταλλο (+30,62%) και το ξύλο (+27,42%) που σημαίνει ότι οι υφές αυτές προσομοίωσαν στη δεύτερη έρευνα πολύ καλύτερα την πραγματικότητα, μικρή βελτίωση επίσης παρατηρήθηκε στην άμμο η οποία είχε ήδη υψηλό ποσοστό αναγνωρισιμότητας και κρατήθηκε ψηλά. Οι υπόλοιπες υφές κατέγραψαν μικρή πτώση με τη μεγαλύτερη πτώση να φτάνει το -7,46% ποσοστό μικρό σε σχέση με τις αυξήσεις που έγιναν, ακόμα πιο σημαντικό είναι όμως ότι στα διαγράμματα σύγχυσης μπορούμε να δούμε πολύ μικρότερη διασκόρπιση των υφών οι οποίες μπερδεύονταν με άλλες. Αυτό σημαίνει ότι οι υφές μπερδεύονταν συνήθως με τις ίδιες υφές π.χ. η υφή του πάγου μπερδευόταν συχνά με την υφή του ξύλου κάτι που

είναι λογικό αφού και οι δύο αυτές οι επιφάνειες έχουν λεία αίσθηση. Παρότι λοιπόν δεν μπορούμε να δούμε μέσα από τα διαγράμματα σύγκρισης άμεση βελτίωση των υφών το γεγονός ότι οι υφές μπερδεύονταν με υφές τις οποίες έμοιαζαν μεταξύ τους πολύ περισσότερο είναι πολύ θετικό αποτέλεσμα στο πόσο ρεαλιστικές είναι αυτές οι υφές.

Ο μέσος χρόνος αναγνώρισης από την πρώτη στη δεύτερη έρευνα αυξήθηκε σημαντικά με τη μόνη εξαίρεση να είναι το μέταλλο το οποίο μειώθηκε κατά -19,8%. Στις υφές του τούβλου, ξύλου και άμμου παρατηρήθηκε μέτρια αύξηση χρόνου ανάμεσα στο +18-25% κάτι που δεν φαίνεται να είχε ιδιαίτερη επιρροή στο αποτέλεσμα αφού το ξύλο αυξήθηκε σημαντικά ενώ το τούβλο μειώθηκε ελαφρά και η άμμος αυξήθηκε ελαφρά. Στην περίπτωση του τσιμέντου είχαμε μια πολύ μεγάλη αύξηση χρόνου +95,5% κάτι που οδήγησε σε πτώση αναγνωρισιμότητας ίδιο μοτίβο ακολουθεί και ο πάγος με αύξηση +70,2% και μικρή μείωση του ποσοστού αναγνωρισιμότητας οπότε ο έξτρα χρόνος που ξόδεψαν οι χρήστες σε αυτές τις υφές στη δεύτερη έρευνα δεν φαίνεται να έφερε καλύτερα αποτελέσματα στην αναγνωρισιμότητα των υφών.

Όσο αναφορά για την εμπειρία των χρηστών η πλειονότητα των συμμετεχόντων δήλωσε έντονο ενθουσιασμό καθώς για τους περισσότερους ήταν η πρώτη φορά που χρησιμοποιούσαν κάποια απτική συσκευή. Η διαδικασία προσαρμογής των χρηστών στη χρήση της συσκευής ήταν αρκετά εύκολη με τις δυσκολίες να περιορίζονται στο πόση πίεση πρέπει να ασκήσουν στη συσκευή για να αισθανθούν αποτελεσματικά την υφή κάτι που ξεπεράστηκε εύκολα με λίγη εξοικείωση. Και στα δύο κομμάτια της έρευνας της αξιολόγησης και παραμετροποίησης των υφών και του παιχνιδιού η εμπειρία των χρηστών αξιολογήθηκε με βάση τη φόρμα ως ιδιαίτερα ευχάριστη και ενδιαφέρουσα. Καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας η οποία διήρκεσε κατά μέσο όρο 10 – 15 λεπτά οι χρήστες ήταν προσηλωμένοι στην αλληλεπίδρασή τους με την εφαρμογή χωρίς να δείξουν σημάδια κούρασης, δυσκολίας ή κόπωσης. Από τα δεδομένα που συλλέχθηκαν συμπεραίνουμε ότι η συνολική εμπειρία αλληλεπίδρασης που είχαν οι χρήστες χαρακτηρίζεται πολύ θετική με μεγάλο ενδιαφέρον από αυτούς προς την εφαρμογή. Οπότε οι χρήστες όχι μόνο κατάφεραν όλοι να ολοκληρώσουν με επιτυχία τις ενέργειες που απαιτούνταν από τα δύο στάδια της έρευνας αλλά το έκαναν με ικανοποίηση και μεγάλο ενδιαφέρον.

Συνολικά η εφαρμογή κατάφερε να επιτύχει τον αρχικό της στόχο που ήταν η ανάπτυξη ρεαλιστικών υφών μέσα σε ένα εικονικό περιβάλλον αλλά και μιας μεθοδολογίας σχεδιασμού και βελτίωσης υφών μέσω διαδοχικών δοκιμών.

9.2 Προτάσεις για Μελλοντική Εξέλιξη

Για την ανάπτυξη της εφαρμογής χρησιμοποιήθηκε η συσκευή Touch η οποία ήταν το μέσο μέσα από το οποίο ο χρήστης ερχόταν σε επαφή απτικά με τις ψηφιακές υφές. Ωστόσο για τον συγκεκριμένο σκοπό της διπλωματικής εργασίας θα ήταν πιο αποδοτική η χρήση μιας συσκευής που εφαρμόζει σε ολόκληρο το χέρι όπως για παράδειγμα το TeslaGlove. Ο λόγος είναι ότι η συσκευή Touch προσφέρει την απτική αίσθηση στον χρήστη μέσω του στυλό που βρίσκεται στο άκρο της και όχι άμεσα στα δάχτυλα του χρήστη σαν να πιάνει με τα ίδια του τα χέρια την υφή. Έτσι η απτική εμπειρία που έχει ο χρήστης με τις ψηφιακές υφές γίνεται μέσω ενός αντικειμένου ενώ με συσκευές πλήρους κάλυψης του χεριού θα μπορούσε να επιτευχθεί πιο ολοκληρωμένα και ρεαλιστικά η αίσθηση. Επιπλέον στη μέθοδο αξιολόγησης των υφών ζητήθηκε από τους χρήστες να προτείνουν οι ίδιοι εκείνη τη στιγμή τις τροποποιήσεις που θα πραγματοποιούνταν στις ρυθμίσεις των υφών σύμφωνα με τις προτιμήσεις τους ώστε να προσδιοριστούν οι βέλτιστες παράμετροι για κάθε υφή. Ωστόσο

παρατηρήθηκε ότι ορισμένοι χρήστες δεν επιθυμούσαν να αφιερώσουν αρκετό χρόνο στη διαδικασία αυτή έτσι ώστε να δοκιμάσουν πολλές εναλλακτικές ρυθμίσεων στην κάθε υφή για να καταλήξουν στην καλύτερη δυνατή. Για τον λόγο αυτό μελλοντικά θα ήταν καλύτερο η αξιολόγηση να μετατραπεί σε μια παιγνιδοποιημένη διαδικασία. Συγκεκριμένα ο χρήστης θα μπορούσε να δοκιμάζει προκαθορισμένα σετ ρυθμίσεων π.χ. 2-3 διαφορετικές παραλλαγές ανά υφή και να επιλέγει την πιο ικανοποιητική. Με αυτόν τον τρόπο η διαδικασία θα γινόταν πιο απλή και ευχάριστη ενώ παράλληλα θα συνέβαλε στη συλλογή πιο αξιόπιστων δεδομένων.

Βιβλιογραφία

Βιβλία

[1] M. A. Goodale and Z. W. Pylyshyn, *Vision and Action: The Control of Grasping*, Norwood, NJ, USA: Ablex Publishing, 1990.

Journal Articles

[2] D. Wang, Y. Guo, S. Liu, Y. Zhang, W. Xu, and J. Xiao, "Haptic display for virtual reality: progress and challenges," *Virtual Reality & Intelligent Hardware*, vol. 1, no. 2, pp. 136–162, Apr. 2019, doi: 10.3724/SP.J.2096-5796.2019.0008.

[3] A. Adilkhanov, M. Rubagotti and Z. Kappasov, "Haptic Devices: Wearability-Based Taxonomy and Literature Review," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 91923-91947, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3202986. keywords: {Haptic interfaces;Taxonomy;Wearable computers;Exoskeletons;Virtual environments;Tactile sensors;Virtual reality;Haptic devices;virtual reality interfaces;kinesthetic feedback;tactile feedback;haptic illusions}.

[6] Hodaya Dahan et al., "Construction of a haptic-based virtual reality evaluation of discrimination of stiffness and texture," *Cogent Engineering*, vol. 9, no. 1, July 2022.

[7] Negin Heravi, Heather Culbertson, Allison M. Okamura, and Jeannette Bohg, "Development and Evaluation of a Learning-Based Model for Real-Time Haptic Texture Rendering," *IEEE Transactions on Haptics*, p. 99, March 2024.

[12] Nikolaos Tzimos, George Voutsakelis, Sotirios Kontogiannis, and Georgios Kokkonis, "Evaluation of Haptic Textures for Tangible Interfaces for the Tactile Internet," *Electronics*, vol. 13, no. 18, p. 3775, September 2024, <https://doi.org/10.3390/electronics13183775>.

[13] Konstantinos Papadopoulos, Eleni Koustriava, Evangelia Georgoula, and Vaia Kalpia, "3D haptic texture discrimination in individuals with and without visual impairments using a force feedback device," *Universal Access in the Information Society*(Springer), vol. 24, no. 3, pp. 2433-2446, February 2025, DOI:10.1007/s10209-025-01202-w.

[14] Conrado Ruiz Jr et al., "Bridging realities: training visuo-haptic object recognition models for robots using 3D virtual simulations," *The Visual Computer*, vol. 40, no. 7, pp. 4661- 4673, May 2024, DOI:10.1007/s00371-024-03455-7.

[16] Alessandro Martinelli, Davide Fabiocchi, Francesca Picchio, Hermes Giberti, and Marco Carnevale, "Design of an Environment for Virtual Training Based on Digital Reconstruction: From Real Vegetation to Its Tactile Simulation," *Designs*, vol. 9, no. 2, p. 32, March 2025, <https://doi.org/10.3390/designs9020032>.

Paper In Conference Proceedings

[8] Negin Heravi, Wenzhen Yuan, Allison M. Okamura, and Jeannette Bohg, "Learning an Action-Conditional Model for Haptic Texture Generation," in *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Paris,France, 2020.

[15] Guanqun Cao et al., "Vis2Hap: Vision-based Haptic Rendering by Cross-modal Generation," in *2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, London, United Kingdom, January 2023, DOI: 10.1109/ICRA48891.2023.10160373.

[17] Anthony Bazelle, Hugo Pourrier-Nunez, Maxime Rignault, and Michael Chang, "Simulation of different materials texture in virtual reality through haptic gloves," in SA '18: SIGGRAPH Asia 2018, Tokyo, Japan, 2018, <https://doi.org/10.1145/3283289.3283370>.

Internet Sites

[4] HTC, "VIVE Focus Series. All-in-One VR Solution," _VIVE_. [Online]. Available: <https://www.vive.com/us/product/>.

[18] 3D Systems, "Touch Haptic Device," 3D Systems. [Online]. Available: <https://www.3dsystems.com/haptics-devices/touch>

[19] 3D Systems, "Haptic Device Drivers," 3D Systems. [Online]. Available: https://support.3dsystems.com/s/article/Haptic-Device-Drivers?language=en_US

[20] 3D Systems, "Haptics Direct for Unity V1," Unity Asset Store. [Online]. Available: <https://assetstore.unity.com/packages/tools/integration/haptics-direct-for-unity-v1-197034>

[21] Poly Haven, "Textures," Poly Haven. [Online]. Διαθέσιμο: <https://polyhaven.com/textures>

Preprints

[9] Muhammad Haris Khan et al., "HapticVLM: VLM-Driven Texture Recognition Aimed at Intelligent Haptic Interaction," arXiv, May 2025, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2505.02569>.

[10] Shaoyu Cai et al., "ViboPneumo: A Vibratory-Pneumatic Finger-Worn Haptic Device for Altering Perceived Texture Roughness in Mixed Reality," arXiv, March 2024, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2403.05182>.

[11] Ana Sanz Cozcolluela and Yasemin Vardar, "Generating Multimodal Textures with a Soft Hydro-Pneumatic Haptic Ring," arXiv, March 2025, DOI:10.2139/ssrn.5170637.