



Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών (ΣΕΤ)

Σχεδιασμός Οπτικών Εφέ και Κινούμενης Εικόνας (ΣΟΚ)

Πτυχιακή / Διπλωματική Εργασία

Η Ιδιομορφία της Μπογιάς ως Συνεκτικό Παράδειγμα για τον
Χώρο των Καλλιτεχνικών Προσομοιώσεων : Η Περίπτωση του
Houdini

Αλέξανδρος Ζαμπέτας

Επιβλέπων καθηγητής/Επιβλέπουσα καθηγήτρια:

Σπυρίδων Σιάκας

Πάτρα, Ιούνιος 2026

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του/της φοιτητή/φοιτήτριας («συγγραφέας/δημιουργός») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίας στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.

Η Ιδιομορφία της Μπογιάς ως Συνεκτικό Μέσο για τον Χώρο των
Καλλιτεχνικών Προσομοιώσεων : Η Περίπτωση του Houdini

Αλέξανδρος Ζαμπέτας

Επιτροπή Επίβλεψης Πτυχιακής / Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής/Επιβλέπουσα

Καθηγήτρια:

Σπυρίδων Σιάκας

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής/Συν-

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια:

Κωνσταντίνος Τηλιγάδης

Πάτρα, Ιούνιος 2026

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η χρήση του λογισμικού “Houdini” για την δημιουργία ρεαλιστικών προσομοιώσεων μπογιιάς σε καμβά. Η χρήση των αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται στην σύγχρονη βιομηχανία των εφέ ταινιών και video games, καθώς και η δυνατότητα του λογισμικού να ενσωματώνει σπονδυλωτά όλα τα επιμέρους κομμάτια της παραγωγής μιας προσομοίωσης παρέχουν δυνατότητες και εργαλεία για τον σύγχρονο καλλιτέχνη τα οποία καθιστούν την επίτευξη και ενσωμάτωση πολύπλοκων συμπεριφορών και παραμέτρων, εύκολη. Έπειτα από έρευνα πάνω στα εν λόγω εργαλεία, εξετάστηκε η δυνατότητα τους για την παραγωγή της φυσιογνωμίας της ιδιαίτερης φύσης της μπογιιάς, της συμπεριφοράς της πάνω στο πινέλο και στον καμβά, καθώς και της χρήσης της από την πληθώρα εργαλείων και πλαισίων που το ίδιο το πρόγραμμα παρέχει για την επέκταση της σε ένα ενιαίο και συνοχικό σύστημα προσομοίωσης. Ως αποτέλεσμα παρατηρείτε και συγκρίνεται η φιλοσοφία του Houdini με έρευνες και πειραματισμούς που αναδύονται από την βιβλιογραφία και προτείνεται μια απλουστευμένη εφαρμογή των ευρυμάτων σε προσαρμοσμένο εργαλείο εντός του λογισμικού χάριν της αξιολόγησης των αναγκών και των εναλλακτικών του σύγχρονου καλλιτέχνη στο πεδίο των προσομοιώσεων.

Λέξεις – Κλειδιά

Houdini, Προσομοίωση, Ρευστοδυναμική

The Peculiarities of Paint as a Cohesive Media in the Field of Artistic Simulations : The Case of Houdini

Alexandros Zampetas

Supervising Committee:

Supervisor:

Spyridwn Siakas

Co-Supervisor:

Konstantinos Tiligadis

Abstract

This thesis examines the use of the software Houdini for the creation of realistic paint simulations on canvas. The use of the algorithms employed in the modern film visual effects and video game industries, together with the software's ability to modularly integrate all the individual components involved in the production of a simulation, provides capabilities and tools that make the implementation and integration of complex behaviors and parameters accessible to the contemporary artist. Following an investigation of these tools, their potential for reproducing the distinctive nature of paint, its behavior on the brush and the canvas, as well as their utilization through the wide range of tools and frameworks provided by the software itself for their extension into a unified and coherent simulation system, was examined. As a result, the philosophy of Houdini is observed and compared with research studies and experimental approaches emerging from the literature, and a simplified implementation of these findings is proposed through a custom tool within the software for the purpose of evaluating the needs and alternatives available to the contemporary artist in the field of simulation.

Keywords

Houdini, Simulation, Fluid Dynamics

Περιεχόμενα

Περίληψη	iv
Abstract	vi
Περιεχόμενα	vii
Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων	x
Συνοτομογραφίες & Ακρωνύμια	xi
1. Εισαγωγή στην Έρευνα	1
1.1 Βιβλιογραφική Επισκόπηση	Error! Bookmark not defined.
1.2 Δομή	Error! Bookmark not defined.
1.2 Στόχοι και Ερευνητικά Ερωτήματα	4
1.2 Μεθοδολογία	6
2. Ρεολογικές Ιδιότητες της Μπογιάς	Error! Bookmark not defined.
2.1 Νευτώνεια και Μη-Νευτώνεια Υγρα	8
2.2 Ιξώδες	8
2.3 Θιξοτροπία	9
2.4 Ιξωδοελαστικότητα (Viscoelasticity)	10
3. Αλγόριθμοι Προσομοίωσης Ρευστών	13
3.1 Lagrangian και Eulerian Μέθοδοι	14
3.1.1 Lagrangian ή Μέθοδοι Σωματιδίων	Error! Bookmark not defined.
3.1.2 Eulerian ή Μέθοδοι Πλεγμάτων	Error! Bookmark not defined.
3.2 Υβριδικές Μέθοδοι	15
3.2.1 Particle-in-Cell (PIC)	Error! Bookmark not defined.
3.2.2 Fluid Implicit Particle (FLIP)	Error! Bookmark not defined.
3.2.3 Material Point Method (MPM)	Error! Bookmark not defined.
4. Διάδραση Μεταξύ Μπογιάς, Καμβά και Πινέλου	20
4.1 Συγκρούσεις Στερεών με Στερεά	21
4.2 Εναπόθεση Μπογιάς	21
4.3 Συγκρούσεις Στερεών με Υγρά	22
5. Το Πλαίσιο Εργασίας του Houdini	23
5.1 SOPs και DOPs	25
5.1.1 Surface Operators (SOPs)	25

5.1.2 Dynamic Operators (DOPs).....	Error! Bookmark not defined.
5.2 Attributes και VOPs.....	27
5.2.1 Attributes.....	Error! Bookmark not defined.
5.2.2 Vector Operators (VOPs)	28
5.3 Επιλυτές (Solvers)	29
5.3.1 Επιλυτής FLIP (FLIP Solver)	Error! Bookmark not defined.
5.3.2 Μικρο-επιλυτές (Microsolvers)	Error! Bookmark not defined.
5.4 LOPs και USD	32
5.4.1 Universal Scene Description (USD)	Error! Bookmark not defined.
5.4.2 Lighting Operators (LOPs).....	Error! Bookmark not defined.
5.4.3 Solaris	33
5.5 TOPs και PDG	33
5.5.1 Procedural Dependency Graph (PDG).....	34
5.6 CHOPs και Ενσωμάτωση Σημάτων.....	35
5.6.1 Η Έννοια του Καναλιού	35
5.6.2 Επεξεργασία Σημάτων	36
5.6.3 Εισαγωγή Εξωτερικών Δεδομένων	36
5.7 COPs και Επεξεργασία Εικόνων	37
5.8 VEX και Python.....	38
5.9 Recipes, HDAs και HDK	39
6. Εφαρμογή.....	41
6.1 Vellum Hair με Προσαρμοσμένη Δυσκαμψία	42
6.2 Το Attribute “is_close”: Ανίχνευση Επαφής Μεταξύ Πινέλου και Καμβά	44
6.3 Το Attribute “load”: Μοντελοποίηση της Εξάντλησης της Μπογιάς στο Πινέλο ...	46
6.4 Προσαρμοσμένος Επιλυτής Paint Map.....	49
6.5 Προσαρμοσμένα Πεδία (Custom Fields)	51
6.5.1 Το Πεδίο Παραμόρφωσης (Strain Field).....	52
6.5.2 Young’s Modulus.....	Error! Bookmark not defined.
6.5.3 Alpha.....	55
6.5.4 Gamma	Error! Bookmark not defined.
6.5.5 Το Πεδίο nnf (Non-Newtonian Field).....	56

6.5.6 Το Πεδίο Gas-Field VOP	58
7. Συγκριτική Ανάλυση Μεθόδων με το Οικосύστημα “Houdini”	61
7.1 Το Houdini ως Ενιαίο Σύστημα Προσομοιώσεων	61
7.2 Διαδικαστική Λογική και Αρθρωτότητα (Proceduralism και Modularity).....	62
7.2.1 Επαναχρησιμοποίηση (Reusability)	63
7.2.2 Επεκτασιμότητα (Scalability)	63
7.2.3 Διαλειτουργικότητα (Interoperability)	64
7.3 Η Προοπτική του Καλλιτέχνη	65
7.4 Η Προοπτική της Βιομηχανίας.....	68
8. Συμπεράσματα.....	70
8.1 Συμπεράσματα της Έρευνας.....	70
8.2 Περιορισμοί στην Έρευνα.....	70
8.3 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα	73
Βιβλιογραφία.....	744

Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων

Εικόνα 1 Οι εξισώσεις Navier Stokes	13
Εικόνα 2 Παράδειγμα διαδικαστικής μοντελοποίησης στο Houdini	24
Εικόνα 3 Τα διάφορα δίκτυα κόμβων του Houdini	Error! Bookmark not defined.
Εικόνα 4 Το Geometry Spreadsheet	Error! Bookmark not defined.
Εικόνα 5 Η τελική πινελιά του προσαρμοσμένου επιλυτή	42
Εικόνα 6 Ο σκελετός του προσαρμοσμένου πινέλου	42
Εικόνα 7 Οι περιορισμοί Pin του πινέλου	Error! Bookmark not defined.
Εικόνα 8 Κώδικας για την μοντελοποίηση του πινέλου	43
Εικόνα 9 Η γεωμετρία του πινέλου	44
Εικόνα 10 Κώδικας για το attribute “is_close”	46
Εικόνα 11 Χάρτης is_close	46
Εικόνα 12 Ο προσαρμοσμένος επιλυτής του is_close attribute	Error! Bookmark not defined.
Εικόνα 13 Κώδικας για το “load” attribute	49
Εικόνα 14 Χάρτης load	49
Εικόνα 15 Ο προσαρμοσμένος επιλυτής “Paint map”	51
Εικόνα 16 Ο προσαρμοσμένος επιλυτής μη-Νευτώνειων ρευστών	Error! Bookmark not defined.
Εικόνα 17 Ο χάρτης του τανυστή παραμόρφωσης	54
Εικόνα 18 Σύγκριση τιμών Young’s modulus	Error! Bookmark not defined.
Εικόνα 19 Σύγκριση τιμών alpha	55
Εικόνα 20 Σύγκριση τιμών gamma	56
Εικόνα 21 Ο χάρτης του προσαρμοσμένου ιξώδους	57
Εικόνα 22 Η χρωματική παλέτα του χάρτη του ιξώδους	58
Εικόνα 23 Το δέντρο κόμβων του Gas Field VOP	59
Εικόνα 24 Ο χάρτης της προσαρμοσμένης πίεσης του ρευστού	60
Εικόνα 25 Η χρωματική παλέτα του χάρτη της πίεσης	60

Συντομογραφίες & Ακρωνύμια

FLIP	Fluid-Implicit Particle
PIC	Particle-in-Cell
APIC	Affine Particle-in-Cell
FEM	Finite Element Method
SPH	Smooth Particle Hydrodynamics
VEX	Vector Expression
HDA	Houdini Digital Asset
HDK	Houdini Development Kit
MAC	Marker-and-Cell
MPM	Material Point Method
USD	Universal Scene Description
SOP	Surface Operator
DOP	Dynamics Operator
TOP	Task Operator
CHOP	Channel Operator
LOP	Lighting Operator
SHOP	Shader Operator
COP	Compositing Operator
ROP	Rendering Operator
POP	Particle Operator
VOP	VEX Operator
RBD	Rigid Body Dynamics
PDG	Procedural Dependency Graph
NNF	Non-Newtonian Fluid
API	Application Programming Interface
RND	Research And Development
TD	Tool Developer

1. Εισαγωγή στην Έρευνα

Οι προσομοιώσεις διαφόρων φυσικών φαινομένων είναι ένα πεδίο ενδιαφέροντος τόσο για τον επιστημονικό όσο και για τον καλλιτεχνικό κλάδο.

Ο πολύπλοκος κόσμος των ρευστών έχει οδηγήσει σε μια πληθώρα μεθόδων που αποσκοπούν στον ρεαλισμό και την απλούστευση του προβλήματος, το οποίο μέχρι και σήμερα αποτελεί ένα από τα δυσκολότερα ως προς το υπολογιστικό κόστος και την ευαισθησία του σε απρόβλεπτες παραμέτρους, αλληλεπιδράσεις και φαινόμενα.

Τα συστήματα τα οποία ασχολούνται με υγρά διαθέτουν ένα ανεξάντλητο φάσμα ιδιαιτεροτήτων στις οποίες ανήκουν από τα πιο απλά φαινόμενα μηχανικής της ροής του νερού έως εξωτικά υγρά των οποίων οι ιδιότητες μεταβάλλονται και επηρεάζονται από την εσωτερική τους τριβή, την πίεση και την παραμόρφωση που τους ασκείται, την θερμοκρασία τους κ.ο.κ.

Υπό αυτά τα συστήματα γίνεται εμφανής η ανάγκη για μια συνοχή στην αντιμετώπιση των εν λόγω φαινομένων, όχι ως μεμονωμένες περιπτώσεις αλλά ως μεγαλύτερα συστήματα πολλαπλών προσεγγίσεων και εξαρτήσεων.

Επιλέχθηκε για αυτόν τον λόγο το μέσο της ζωγραφικής ως παράδειγμα που επιχειρεί να ρίξει φως πάνω στο πρόβλημα της περιπλοκότητας και της συνοχής που απαιτείται για ρεαλιστικά φαινόμενα κάποιας μαθησιακής σημασίας, και όχι περιπτώσεων σε κενό. Και επιλέχθηκε και το λογισμικό Houdini ως μια πρόταση προς την σωστή κατεύθυνση των συστημάτων προσομοίωσης.

Με γνώμονα την μαθησιακή και καλλιτεχνική σκοπιά επιχειρείται να παρουσιαστεί μία έρευνα πάνω σε προηγούμενες προσπάθειες που έχουν ασχοληθεί με το ζήτημα και να βγει ένα πόρισμα ως προς την γεφύρωση των επιστημονικών με τα πιο ευρύ μέσα έκφρασης και πειραματισμού.

1.1 Βιβλιογραφική Επισκόπηση

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση με στόχο την κατανόηση των φυσικών, υπολογιστικών και καλλιτεχνικών παραμέτρων που σχετίζονται με την ψηφιακή προσομοίωση της ζωγραφικής. Η ερευνητική διαδικασία περιέλαβε τη μελέτη ενός μεγάλου αριθμού

επιστημονικών δημοσιεύσεων που αφορούν την προσομοίωση μη-Νευτώνειων ρευστών, με ιδιαίτερη έμφαση σε υλικά που παρουσιάζουν σύνθετες ρεολογικές συμπεριφορές, όπως η μπογιά.

Ειδικότερα, εξετάστηκαν ερευνητικές εργασίες που πραγματεύονται τη μοντελοποίηση φαινομένων όπως η μεταβολή του ιξώδους, η θιξοτροπία, η ελαστοπλαστικότητα και η αλληλεπίδραση μεταξύ διαφορετικών φάσεων του υλικού. Παράλληλα, αναλύθηκαν σύγχρονες προσεγγίσεις που στοχεύουν στη βελτιστοποίηση των αλγορίθμων επίλυσης της ροής σύνθετων ρευστών, καθώς και τεχνικές που επιδιώκουν τη μείωση του υπολογιστικού κόστους χωρίς σημαντική απώλεια φυσικής πιστότητας. Η μελέτη αυτή κατέδειξε ότι η ακριβής προσομοίωση της ρεολογίας της μπογιάς αποτελεί ένα ιδιαίτερα απαιτητικό πρόβλημα, το οποίο απαιτεί την εξισορρόπηση μεταξύ επιστημονικής ακρίβειας, αριθμητικής σταθερότητας και διαδραστικότητας.

Επιπρόσθετα, διερευνήθηκαν ερευνητικές προσπάθειες που αφορούν την ανάπτυξη ψηφιακών εργαλείων ζωγραφικής σε τρισδιάστατα περιβάλλοντα. Οι εργασίες αυτές εξετάζουν ζητήματα όπως η αλληλεπίδραση μεταξύ πινέλου και καμβά, η μεταφορά και η συσσώρευση της μπογιάς στην επιφάνεια ζωγραφικής, η προσομοίωση ανάγλυφων πινελιών και η δημιουργία συστημάτων που επιτρέπουν υψηλό βαθμό καλλιτεχνικού ελέγχου. Μέσα από την ανάλυση της σχετικής βιβλιογραφίας αναδείχθηκαν τόσο οι δυνατότητες όσο και οι περιορισμοί των υφιστάμενων προσεγγίσεων, συμβάλλοντας στη διαμόρφωση της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε στην παρούσα εφαρμογή.

Παράλληλα με τη μελέτη της επιστημονικής βιβλιογραφίας, πραγματοποιήθηκε εκτενής διερεύνηση του λογισμικού Houdini, το οποίο επιλέχθηκε ως το βασικό περιβάλλον ανάπτυξης του προτεινόμενου συστήματος. Εξετάστηκε αναλυτικά η επίσημη τεκμηρίωση του λογισμικού, με έμφαση στους μηχανισμούς προσομοίωσης ρευστών, στην αρχιτεκτονική των δικτύων κόμβων, στη λειτουργία των επιλυτών, καθώς και στη χρήση γώσσεων προγραμματισμού για την ανάπτυξη εξατομικευμένων λύσεων.

Η διαδικασία αυτή συνέβαλε ουσιαστικά στην κατανόηση της διαδικαστικής φιλοσοφίας που διέπει το Houdini και στην αξιολόγηση της καταλληλότητάς του ως πλατφόρμας για την ανάπτυξη εργαλείων ψηφιακής ζωγραφικής.

Η συνδυαστική μελέτη της διεθνούς βιβλιογραφίας και της τεχνικής τεκμηρίωσης του Houdini αποτέλεσε καθοριστικό στάδιο της ερευνητικής διαδικασίας, καθώς επέτρεψε τη γεφύρωση της θεωρητικής γνώσης με την πρακτική υλοποίηση. Μέσα από αυτή τη διαδικασία κατέστη δυνατός ο πειραματισμός ενός προτεινόμενου συστήματος το οποίο

αξιοποιεί τις σύγχρονες εξελίξεις στον χώρο της προσομοίωσης ρευστών, προσαρμόζοντάς τις στις ιδιαίτερες απαιτήσεις της ψηφιακής ζωγραφικής και της καλλιτεχνικής δημιουργίας σε τρισδιάστατα περιβάλλοντα.

1.2 Δομή

Η παρούσα διπλωματική εργασία οργανώνεται σε έξι κύρια κεφάλαια, τα οποία ακολουθούν μία προοδευτική πορεία από τη θεωρητική θεμελίωση του προβλήματος έως την πρακτική υλοποίηση και την αξιολόγηση της προτεινόμενης μεθόδου.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βασικές φυσικές και ρεολογικές ιδιότητες της μπογιιάς, οι οποίες καθορίζουν τη συμπεριφορά της κατά τη διαδικασία της ζωγραφικής. Εξετάζονται έννοιες όπως το ιξώδες, η θιξοτροπία, η ελαστοπλαστικότητα, οι μη-Νευτώνειες συμπεριφορές, καθώς και ο ρόλος των χρωστικών ουσιών και των μηχανισμών ξήρανσης. Η ανάλυση αυτή είναι απαραίτητη, καθώς αναδεικνύει τις ιδιαιτερότητες της μπογιιάς ως σύνθετου υλικού και θέτει το θεωρητικό υπόβαθρο πάνω στο οποίο βασίζεται η ανάπτυξη των υπολογιστικών μοντέλων που ακολουθούν.

Στο τρίτο κεφάλαιο πραγματοποιείται μία εκτενής επισκόπηση των σημαντικότερων αλγορίθμων προσομοίωσης ρευστών που χρησιμοποιούνται τόσο στην επιστημονική υπολογιστική όσο και στη γραφική υπολογιστών. Αναλύονται οι Eulerian και Lagrangian προσεγγίσεις, καθώς και αντιπροσωπευτικές μέθοδοι όπως οι MPM, FLIP και PIC. Παράλληλα, παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα, οι περιορισμοί και τα πεδία εφαρμογής κάθε αλγορίθμου, με στόχο την κατανόηση των τεχνικών που μπορούν να αξιοποιηθούν για την προσομοίωση της συμπεριφοράς της μπογιιάς.

Στο τέταρτο κεφάλαιο εξετάζεται το πρόβλημα της αλληλεπίδρασης μεταξύ πινέλου, μπογιιάς και καμβά. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις μεθόδους που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία για την προσομοίωση της μεταφοράς χρώματος, της παραμόρφωσης των τριχών του πινέλου και της εναπόθεσης της μπογιιάς στην επιφάνεια ζωγραφικής. Μέσα από την ανάλυση των υφιστάμενων προσεγγίσεων αναδεικνύονται οι προκλήσεις που σχετίζονται με τη δημιουργία ρεαλιστικών αλλά ταυτόχρονα διαδραστικών συστημάτων ψηφιακής ζωγραφικής.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το περιβάλλον ανάπτυξης Houdini, το οποίο επιλέχθηκε ως πλατφόρμα υλοποίησης της έρευνας. Αναλύεται η διαδικαστική φιλοσοφία

του λογισμικού, η αρχιτεκτονική των SOP και DOP δικτύων, καθώς και βασικά εργαλεία όπως ο επιλυτής FLIP, οι μικρο-επιλυτές, η γλώσσα VEX και το υπόλοιπα συστήματα προγραμματισμού. Η κατανόηση των μηχανισμών αυτών είναι απαραίτητη για την ερμηνεία της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε κατά την ανάπτυξη του προτεινόμενου επιλυτή.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το πρακτικό μέρος της εργασίας και περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία σχεδιασμού και υλοποίησης του προτεινόμενου συστήματος μέσα στο Houdini. Ειδικότερα, παρουσιάζονται τα επιμέρους στάδια ανάπτυξης του προσαρμοσμένου επιλυτή, όπως η δημιουργία του μοντέλου πινέλου μέσω του επιλυτή Vellum, η ανάπτυξη των attributes επαφής και μεταφοράς μπογιιάς, η κατασκευή του paint map επιλυτή, η χρήση προσαρμοσμένων πεδίων και η τελική διαδικασία ανακατασκευής της πινελιάς. Το κεφάλαιο αυτό αποτυπώνει τον τρόπο με τον οποίο τα θεωρητικά στοιχεία που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια μεταφράστηκαν σε μία λειτουργική υπολογιστική υλοποίηση.

Τέλος, στο έβδομο κεφάλαιο πραγματοποιείται συγκριτική ανάλυση των μεθόδων και των προσεγγίσεων που εξετάστηκαν κατά τη διάρκεια της έρευνας. Αξιολογούνται τα πλεονεκτήματα του προτεινόμενου συστήματος, ενώ παράλληλα αναδεικνύεται η σημασία του Houdini ως περιβάλλοντος ανάπτυξης εργαλείων προσομοίωσης για εφαρμογές ψηφιακής ζωγραφικής. Εξετάζονται ζητήματα όπως η επεκτασιμότητα, η διαδικαστική αρχιτεκτονική, η ενσωμάτωση σε σύγχρονες διεργασίες της παραγωγής και η δυνατότητα αξιοποίησης του συστήματος τόσο από ερευνητές όσο και από επαγγελματίες καλλιτέχνες και studios οπτικών εφέ.

Η εργασία ολοκληρώνεται με τη διατύπωση των βασικών συμπερασμάτων που προέκυψαν από την έρευνα, καθώς και με την παρουσίαση πιθανών κατευθύνσεων για μελλοντική επέκταση και βελτίωση του προτεινόμενου συστήματος.

1.3 Στόχοι και ερευνητικά ερωτήματα

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της δυνατότητας ανάπτυξης ενός συστήματος ψηφιακής προσομοίωσης της μπογιιάς, το οποίο να συνδυάζει τη φυσική αξιοπιστία με την καλλιτεχνική ευελιξία και την πρακτική εφαρμοσιμότητα σε σύγχρονα περιβάλλοντα παραγωγής ψηφιακού περιεχομένου. Η έρευνα εστιάζει στην

κατανόηση των ιδιαίτερων ρεολογικών χαρακτηριστικών της μπογιιάς, καθώς και στον τρόπο με τον οποίο αυτά μπορούν να μεταφραστούν σε υπολογιστικά μοντέλα κατάλληλα για εφαρμογές ψηφιακής ζωγραφικής.

Παράλληλα, η εργασία αποσκοπεί στην καταγραφή και κριτική αξιολόγηση ορισμένων ερευνητικών προσπαθειών που έχουν πραγματοποιηθεί στον χώρο της ψηφιακής προσομοίωσης ζωγραφικών μέσων. Εξετάζονται οι τεχνικές και οι αλγοριθμικές προσεγγίσεις που έχουν προταθεί για την αναπαράσταση της συμπεριφοράς ιξωδών και μη-Νευτώνειων υγρών, καθώς και οι μέθοδοι που έχουν αξιοποιηθεί για τη δημιουργία διαδραστικών εργαλείων ζωγραφικής σε δισδιάστατα και τρισδιάστατα περιβάλλοντα.

Η εργασία επιδιώκει να εξετάσει κατά πόσο το Houdini μπορεί να λειτουργήσει όχι μόνο ως εργαλείο παραγωγής οπτικών εφέ, αλλά και ως πλατφόρμα έρευνας και ανάπτυξης νέων μεθόδων ψηφιακής ζωγραφικής.

Πέρα από την καθαρά τεχνική διάσταση, ιδιαίτερη σημασία αποδίδεται και στην καλλιτεχνική προσέγγιση του προβλήματος. Στόχος δεν είναι αποκλειστικά η επίτευξη της μέγιστης δυνατής φυσικής ακρίβειας, αλλά η ανάπτυξη ενός εργαλείου που να παρέχει ουσιαστικό δημιουργικό έλεγχο στον χρήστη. Η δυνατότητα παραμετροποίησης της συμπεριφοράς του πινέλου και της μπογιιάς, η διατήρηση της εκφραστικότητας της πινελιάς και η υποστήριξη διαφορετικών ζωγραφικών τεχνικών αποτελούν κρίσιμες παραμέτρους που λαμβάνονται υπόψη κατά τον σχεδιασμό του προτεινόμενου συστήματος.

Ταυτόχρονα, η εργασία εξετάζει την προοπτική αξιοποίησης ενός τέτοιου εργαλείου σε συνεργατικά και επαγγελματικά περιβάλλοντα παραγωγής. Η διαδικαστική φύση του Houdini, η δυνατότητα δημιουργίας επαναχρησιμοποιήσιμων εργαλείων και η συμβατότητα με σύγχρονα production pipelines καθιστούν ιδιαίτερα σημαντική τη διερεύνηση της καταλληλότητας της προτεινόμενης προσέγγισης για χρήση από ομάδες καλλιτεχνών, technical artists και studios οπτικών εφέ.

Συνεπώς, η παρούσα διπλωματική εργασία επιχειρεί να γεφυρώσει τρία διακριτά αλλά αλληλένδετα πεδία: τη φυσική και τη ρεολογία της μπογιιάς, την υπολογιστική προσομοίωση σύνθετων ρευστών και την ανάπτυξη καλλιτεχνικά προσανατολισμένων ψηφιακών εργαλείων. Μέσα από τη σύνθεση θεωρητικών γνώσεων, βιβλιογραφικών δεδομένων και πρακτικής υλοποίησης, επιδιώκεται η διερεύνηση μίας εναλλακτικής προσέγγισης στην ψηφιακή ζωγραφική, η οποία να συνδυάζει τη φυσική τεκμηρίωση με την ευελιξία και τις απαιτήσεις της σύγχρονης δημιουργικής διαδικασίας.

1.4 Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας διαμορφώθηκε σταδιακά μέσα από μία συνδυαστική προσέγγιση, η οποία περιλάμβανε βιβλιογραφική έρευνα, τεχνική διερεύνηση, παρατήρηση πραγματικών ζωγραφικών διαδικασιών, ανάπτυξη υπολογιστικών εργαλείων και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν. Η πολυπαραγοντική φύση του ερευνητικού αντικειμένου κατέστησε αναγκαία τη σύνθεση γνώσεων από τα πεδία της ρεολογίας, της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής, της γραφικής υπολογιστών και της ψηφιακής καλλιτεχνικής δημιουργίας.

Το πρώτο στάδιο της έρευνας περιλάμβανε τη συστηματική συλλογή και αξιολόγηση της σχετικής επιστημονικής βιβλιογραφίας. Η αναζήτηση πραγματοποιήθηκε κυρίως μέσω της πλατφόρμας Google Scholar, η οποία χρησιμοποιήθηκε ως βασικό εργαλείο εντοπισμού ακαδημαϊκών δημοσιεύσεων σχετικών με την προσομοίωση της μπογιιάς και τη μοντελοποίηση σύνθετων ρευστών. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε σε εργασίες που αφορούσαν τη φυσική περιγραφή μη-Νευτώνειων υλικών, τη ρεαλιστική αναπαράσταση της συμπεριφοράς παχύρρευστων μέσων, καθώς και την ανάπτυξη διαδραστικών συστημάτων ψηφιακής ζωγραφικής.

Κατά τη διάρκεια της βιβλιογραφικής ανασκόπησης πραγματοποιήθηκε κριτική αξιολόγηση των ερευνητικών προσεγγίσεων που εντοπίστηκαν, με στόχο την κατανόηση των πλεονεκτημάτων, των περιορισμών και των τεχνικών επιλογών που χαρακτηρίζουν κάθε μέθοδο.

Σε επόμενο στάδιο, η έρευνα επεκτάθηκε στη μελέτη των υπολογιστικών και αλγοριθμικών προσεγγίσεων της προσομοίωσης ρευστών, τόσο σε δισδιάστατα όσο και σε τρισδιάστατα περιβάλλοντα.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε εκτενής μελέτη του λογισμικού Houdini, το οποίο επιλέχθηκε ως περιβάλλον ανάπτυξης της πρακτικής υλοποίησης.

Με βάση τα δεδομένα που προέκυψαν από τα προηγούμενα στάδια, ακολούθησε η ανάπτυξη ενός πρωτότυπου συστήματος προσομοίωσης, το οποίο λειτούργησε ως proof of concept για τη διερεύνηση των κύριων ερευνητικών ερωτημάτων της εργασίας. Η υλοποίηση πραγματοποιήθηκε εξ ολοκλήρου στο περιβάλλον του Houdini και περιλάμβανε την ανάπτυξη ενός προσαρμοσμένου επιλυτή που συνδύαζε στοιχεία φυσικής προσομοίωσης και διαδικαστικών τεχνικών.

Τέλος, πραγματοποιήθηκε η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της έρευνας, τόσο ως προς τη λειτουργικότητα του αναπτυγμένου συστήματος όσο και ως προς την καταλληλότητά του για εφαρμογές ψηφιακής ζωγραφικής.

Συνολικά, η μεθοδολογία της παρούσας εργασίας συνδυάζει πρωτογενή επιστημονική πληροφόρηση, εκτενή βιβλιογραφική τεκμηρίωση, τεχνική διερεύνηση υπολογιστικών εργαλείων, ανάπτυξη πρωτότυπου συστήματος προσομοίωσης και συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Η συνθετική αυτή προσέγγιση κρίθηκε απαραίτητη προκειμένου να αντιμετωπιστεί αποτελεσματικά η πολυπλοκότητα του προβλήματος της ψηφιακής προσομοίωσης της μπογιάς και να διερευνηθεί η δυνατότητα ανάπτυξης εργαλείων που συνδυάζουν φυσική αξιοπιστία με καλλιτεχνική ευελιξία.

2. Ρεολογικές Ιδιότητες της Μπογιάς

Η κατανόηση της φυσικής συμπεριφοράς των υγρών αποτελεί θεμελιώδη προϋπόθεση για την ανάπτυξη ρεαλιστικών συστημάτων προσομοίωσης στη γραφική υπολογιστών. Από τη ροή του νερού έως τη συμπεριφορά σύνθετων υλικών όπως η μπογιά, η κέτσαπ και οι πολυμερικές πάστες, οι ιδιότητες των ρευστών καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο τα υλικά παραμορφώνονται και αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον τους. Η επιστήμη που μελετά τη μηχανική συμπεριφορά των ρευστών ονομάζεται ρεολογία, ενώ η μαθηματική περιγραφή της κίνησής τους αποτελεί αντικείμενο της ρευστοδυναμικής.

2.1 Νευτώνεια και Μη-Νευτώνεια Υγρά

Το βασικό χαρακτηριστικό ενός υγρού είναι η ικανότητά του να ρέει υπό την επίδραση διατμητικών τάσεων και να τείνει να παραμορφώνεται σταθερά όσο ασκείται σε αυτό κάποια δύναμη. (Gohokar, 2023) Εάν εφαρμοστεί μία εφαπτομενική δύναμη σε ένα στερεό, το υλικό θα αποκτήσει μία πεπερασμένη παραμόρφωση. Αντίθετα, ένα υγρό συνεχίζει να παραμορφώνεται όσο η δύναμη εξακολουθεί να δρα.

Η συμπεριφορά αυτή εκφράζεται μέσω της σχέσης μεταξύ τάσης και ρυθμού παραμόρφωσης.

Στα παραδοσιακά Νευτώνεια υγρά, το ιξώδες τους, δηλαδή ο δείκτης της ρευστότητας τους, δεν σχετίζεται με την πίεση που τους ασκείται. Ένα τέτοιο υγρό είναι το νερό. (Gohokar, 2023)

Αντίθετα, υγρά όπως είναι η μπογιά, μεταβάλλουν το ιξώδες τους ανάλογα με μια πληθώρα παραμέτρων των οποίων η διερεύνηση αποτελεί ανοιχτό πεδίο στην ακαδημαϊκή έρευνα.

2.2 Ιξώδες

Ως ιξώδες ορίζεται η αντίσταση ενός ρευστού στην παραμόρφωση που προκαλείται από διατμητικές τάσεις. Στην περίπτωση των χρωμάτων ζωγραφικής, το ιξώδες επηρεάζει άμεσα τον τρόπο με τον οποίο η μπογιά ρέει, μεταφέρεται από το πινέλο στον καμβά και διατηρεί το σχήμα της μετά την εναπόθεση.

Ωστόσο, οι περισσότερες καλλιτεχνικές μπογιές δεν ακολουθούν αυτή τη συμπεριφορά. Οι ελαιομπογιές και τα ακρυλικά χαρακτηρίζονται ως μη-Νευτώνεια ρευστά, καθώς το ιξώδες τους μεταβάλλεται ανάλογα με τις συνθήκες παραμόρφωσης. Όπως επισημαίνεται στο μοντέλο IMPaSTo, οι χρωστικές ουσίες αναμιγνύονται με ένα μέσο μεταφοράς, όπως το λινέλαιο ή πολυμερικά γαλακτώματα, δημιουργώντας πολύπλοκα συστήματα των οποίων οι ρεολογικές ιδιότητες εξαρτώνται από τον ρυθμό διάτμησης. (Baxter et al, 2004)

Η σημασία του ιξώδους στην ψηφιακή προσομοίωση έγκειται στο γεγονός ότι καθορίζει τη μορφολογία του ρευστού και κατ'επέκταση των πινελιών. Υλικά με χαμηλό ιξώδες τείνουν να εξαπλώνονται εύκολα στην επιφάνεια, δημιουργώντας λεπτές και ομοιόμορφες επιστρώσεις. Αντίθετα, υλικά υψηλού ιξώδους διατηρούν τον όγκο τους και επιτρέπουν την ανάπτυξη τεχνικών όπως το impasto, στις οποίες οι πινελιές αποκτούν έντονο ανάγλυφο χαρακτήρα.

Η ακριβής μοντελοποίηση του ιξώδους αποτελεί σημαντική πρόκληση για τα συστήματα προσομοίωσης. Η ανάπτυξη ενός διαδραστικού μοντέλου ικανού να αποδώσει το πλήρες φάσμα της φυσικής συμπεριφοράς αποτελεί σημαντική πρόκληση. Αντί της προσομοίωσης της συμπεριφοράς της μπογιιάς βάσει απολύτως ακριβών φυσικών μοντέλων, επιδιώκεται η ανάπτυξη προσεγγιστικών μεθόδων που αποτυπώνουν τους κυρίαρχους όρους του φαινομένου, ενσωματώνοντας παράλληλα ευρετικές τεχνικές για την αναπαράσταση των επιθυμητών εμπειρικών συμπεριφορών που δεν περιγράφονται επαρκώς από τα φυσικά μοντέλα. (Baxter et al, 2004)

Η υπολογιστική επίλυση του ιξώδους μειώνει σημαντικά την αποδοτικότητα αυτών των συστημάτων, και είναι τομέας μελέτης ως προς τον συμβιβασμό μεταξύ των διαφορετικών μεθόδων και της καλλιτεχνικής απόδοσης. (Winters, 2023)

Η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου ιξώδους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τους στόχους της εφαρμογής. Συστήματα που στοχεύουν στην επιστημονική ακρίβεια απαιτούν λεπτομερή περιγραφή των φυσικών φαινομένων, ενώ εφαρμογές ψηφιακής ζωγραφικής δίνουν μεγαλύτερη έμφαση στον καλλιτεχνικό έλεγχο και στη διαδραστικότητα.

2.3 Θιξοτροπία

Η θιξοτροπία είναι μία ιδιότητα των μη-Νευτώνειων υγρών που περιγράφει το φαινόμενο κατά το οποίο το ιξώδες ενός υλικού μειώνεται με την πάροδο του χρόνου όταν αυτό

υπόκειται σε συνεχή μηχανική καταπόνηση, ενώ επανέρχεται σταδιακά στην αρχική του τιμή όταν η καταπόνηση παύσει. Με άλλα λόγια, ένα θιξοτροπικό υλικό γίνεται πιο ρευστό όσο αναδεύεται ή αναμιγνύεται και ανακτά την αρχική του συνοχή όταν παραμένει ακίνητο. (Anton Paar, 2026)

Η συμπεριφορά αυτή παρατηρείται σε πληθώρα καθημερινών υλικών, όπως το κέτσαπ, ορισμένα καλλυντικά προϊόντα και οι βιομηχανικές βαφές.

Η θιξοτροπία διαφοροποιείται από άλλα μη-Νευτώνεια φαινόμενα, καθώς εξαρτάται όχι μόνο από το μέγεθος του ρυθμού διάτμησης αλλά και από τη χρονική διάρκεια εφαρμογής του. Έτσι, δύο ίδιες διατμητικές τάσεις μπορούν να προκαλέσουν διαφορετικές μεταβολές στο ιξώδες, ανάλογα με το χρονικό διάστημα κατά το οποίο ασκούνται. Η εξάρτηση αυτή καθιστά τη μαθηματική περιγραφή της θιξοτροπίας σημαντικά πιο πολύπλοκη σε σχέση με απλούστερα μοντέλα μη-Νευτώνειων ρευστών. (Gohokar, 2023)

Κατά την επαφή του πινέλου με τον καμβά, η μπογιά γίνεται προσωρινά πιο ρευστή, επιτρέποντας την ομαλή κατανομή της στην επιφάνεια. Ωστόσο, μόλις η κίνηση σταματήσει, η αύξηση του ιξώδους περιορίζει την περαιτέρω εξάπλωση του υλικού, διατηρώντας τις λεπτομέρειες και το ανάγλυφο της πινελιάς. Η ιδιότητα αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική σε τεχνικές όπως το *impasto*, όπου η τρισδιάστατη μορφή της μπογιάς αποτελεί αναπόσπαστο στοιχείο της αισθητικής του έργου.

Η βασικότερη δυσκολία στην προσομοίωση και τον υπολογισμό των μη-νευτώνειων υγρών και στερεών και συγκεκριμένα εμπειρικές ιδιότητες που αποκλίνουν από τα σταθερά συστήματα συμπεριφοράς, όπως η θιξοτροπία, έγκειται στο μεγάλο εύρος παραμέτρων και στην περιπλοκότητα των αλληλεπιδράσεων αυτών, η οποία απαιτεί πειραματισμό για την επίτευξη ρεαλιστικών προσομοιώσεων. (Derksen, 2010) Συνήθως αυτό έρχεται σε αντιπαράθεση με τον καλλιτεχνικό σχεδιασμό των προσομοιώσεων και εφαρμόζεται καλύτερα σε επιστημονικές έρευνες και πειράματα.

2.4 Ιξωδοελαστικότητα (Viscoelasticity)

Ορισμένες μπογιές έχουν την ικανότητα να παρουσιάζουν ταυτόχρονα ιδιότητες στερεών και ρευστών σωμάτων. Η συμπεριφορά αυτή περιγράφεται από την έννοια της ιξωδοελαστικότητας (*viscoelasticity*), η οποία αναφέρεται στην εξάρτηση της παραμόρφωσης ενός υλικού τόσο από τις ελαστικές όσο και από τις ιξώδεις ιδιότητές του.

Η συμπεριφορά των ιξωδοελαστικών υλικών μπορεί να κυμαίνεται από κυρίως ιξώδη έως κυρίως ελαστική, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις οι δύο αυτές συνιστώσες συνυπάρχουν με συγκρίσιμη ένταση. Η επικρατούσα συμπεριφορά εξαρτάται από το μέγεθος της εφαρμοζόμενης διατμητικής τάσης, καθώς και από τη χρονική κλίμακα κατά την οποία αυτή ασκείται στο υλικό. (Ohlsson, 2023)

Η συμπεριφορά αυτή είναι ιδιαίτερα εμφανής στις λαδομπογιές και στα ακρυλικά χρώματα. Κατά την εφαρμογή μιας πινελιάς, η μπογιά παραμορφώνεται ακολουθώντας την κίνηση του πινέλου, ενώ ταυτόχρονα αναπτύσσονται εσωτερικές τάσεις που αντιστέκονται στην παραμόρφωση. Όταν το πινέλο απομακρυνθεί, μέρος της παραμόρφωσης διατηρείται, επιτρέποντας τη δημιουργία ανάγλυφων μορφών, ενώ ένα άλλο μέρος εξομαλύνεται σταδιακά λόγω της ροής του υλικού.

Η προσομοίωση έντονα ιξωδοελαστικών υλικών παρουσιάζει σημαντικές υπολογιστικές προκλήσεις. Μία από αυτές αφορά τη δυσκολία αξιόπιστου υπολογισμού της παραμόρφωσης και των παραγώγων της σε ένα μέσο που δεν διαθέτει μόνιμη εσωτερική δομή. Μία ακόμη πρόκληση σχετίζεται με τη μεγάλη δυσκαμψία των διαφορικών εξισώσεων που διέπουν τη συμπεριφορά του συστήματος. (Barreiro et al, 2017)

Επιπρόσθετα η προσομοίωση ρευστών υψηλού ιξώδους αποτελεί ένα ιδιαίτερα απαιτητικό υπολογιστικό πρόβλημα, καθώς απαιτεί τη χρήση έμμεσων (implicit) διατυπώσεων για την αξιόπιστη επίλυση των αριθμητικά δύσκαμπτων διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν τη συμπεριφορά του συστήματος. Επιπλέον, λόγω της δυσκολίας υπολογισμού της παραμόρφωσης του ρευστού, τα αριθμητικά σφάλματα συσσώρευσης (numerical drift) οδηγούν σε αντιληπτή απώλεια των ιξωδοελαστικών χαρακτηριστικών του υλικού. (Barreiro et al, 2017)

Μάλιστα οι Barreiro et al προτείνουν την χρήση σωματιδιακών περιορισμών (constraints) για την επίλυση της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς των δεσμών των σωματιδίων. (Barreiro et al, 2017)

Το ίδιο ακολούθησαν και οι Clavet et al., οι οποίοι παρουσίασαν ένα σωματιδιακό μοντέλο ικανό να προσομοιώνει ιξωδοελαστικά ρευστά σε διαδραστικούς χρόνους εκτέλεσης. Η μέθοδος βασίζεται στην εισαγωγή προσωρινών ελαστικών δεσμών μεταξύ γειτονικών σωματιδίων, επιτρέποντας την αναπαραγωγή φαινομένων όπως η διατήρηση της συνοχής του υλικού και η ανάπτυξη ελαστικών παραμορφώσεων. Η προσέγγιση αυτή αποτέλεσε σημαντικό βήμα προς την προσομοίωση σύνθετων υλικών με χαρακτηριστικά τόσο στερεών όσο και ρευστών σωμάτων. (Clavet et al)

Η σημασία της ιξωδοελαστικότητας στη ζωγραφική γίνεται ιδιαίτερα εμφανής στις τεχνικές παχιάς εφαρμογής χρώματος. Σε τεχνικές *impasto*, οι πινελιές αποκτούν τρισδιάστατο χαρακτήρα και διατηρούν τις μορφές που δημιουργεί ο καλλιτέχνης. Η ικανότητα της μπογιιάς να «θυμάται» προσωρινά την παραμόρφωσή της οφείλεται ακριβώς στην παρουσία ελαστικών μηχανισμών στο εσωτερικό της δομής της.

3 Αλγόριθμοι Προσομοίωσης Ρευστών

Από τη μοντελοποίηση φυσικών φαινομένων μεγάλης κλίμακας έως τη δημιουργία οπτικών εφέ στον κινηματογράφο και την ανάπτυξη εργαλείων ψηφιακής ζωγραφικής, οι αλγόριθμοι προσομοίωσης ρευστών χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση υλικών των οποίων η μορφή μεταβάλλεται συνεχώς υπό την επίδραση εσωτερικών και εξωτερικών δυνάμεων.

Η μαθηματική περιγραφή της ροής των ρευστών βασίζεται στις εξισώσεις Navier–Stokes, οι οποίες εκφράζουν την αρχή διατήρησης της μάζας και της ορμής βάσει της επίλυσης μερικών διαφορικών εξισώσεων. (Bridson, 2018)

Στην εικόνα 1 φαίνονται οι εν λόγω εξισώσεις:

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} + \frac{1}{\rho} \nabla p = \vec{g} + \nu \nabla \cdot \nabla \vec{u},$$
$$\nabla \cdot \vec{u} = 0.$$

Εικόνα 1 : Η πρώτη εξίσωση (πάνω) Navier-Stokes που επιλύει την ορμή του υγρού. Η δεύτερη (κάτω) που επιλύει την μη-συμπίεσιμότητα.

Συγκεκριμένα, οι εξισώσεις αυτές προσπαθούν να βρουν την ορμή του υγρού, δηλαδή την κίνηση του βάσει των δυνάμεων που του ασκούνται εξωτερικά πχ. Βαρύτητα, ή εσωτερικά πχ. Πίεση, ιξώδες, (Bridson, 2018)

καθώς και να λύσουν το πρόβλημα της προϋπόθεσης ότι το υγρό είναι μη-συμπίεσιμο, δηλαδή κανένα σωματίδιο δεν χάνεται ή δεν δημιουργείται, και ο όγκος του υγρού παραμένει σταθερός. (Bridson, 2018)

Οι αλγόριθμοι προσομοίωσης ρευστών μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- Eulerian μέθοδοι, οι οποίες περιγράφουν τη ροή πάνω σε σταθερά πλέγματα στον χώρο (cells).
- Lagrangian μέθοδοι, οι οποίες παρακολουθούν την κίνηση σωματιδίων του υλικού σε διακριτό χρόνο (substeps).

- υβριδικές μέθοδοι, οι οποίες συνδυάζουν χαρακτηριστικά και των δύο προσεγγίσεων.

3.1 Lagrangian και Eulerian Μέθοδοι

Για την προσομοίωση των υγρών σε ψηφιακό περιβάλλον, οι κύριοι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι οι Eulerian μέθοδοι και οι Lagrangian μέθοδοι. Οι μέθοδοι αυτοί αποτελούν την βασική δομή κάθε μοντέλου προσομοίωσης της ροής των υγρών. (Price, 2006)

3.1.1 Lagrangian ή Particle-Based Μέθοδοι

Οι Lagrangian μέθοδοι, προσεγγίζουν τα υγρά ως το σύνολο των σωματιδίων τους, συγκεκριμένα υπολογίζουν τις δυνάμεις και τις ιδιότητες κάθε μεμονωμένου σωματιδίου. (Price, 2006)

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των Lagrangian μεθόδων είναι η φυσική αναπαράσταση των ελεύθερων επιφανειών. Επειδή το ρευστό περιγράφεται από τα ίδια τα σωματίδια που το αποτελούν, η επιφάνειά του προκύπτει αυτόματα από την κατανομή τους. Ωστόσο, οι Lagrangian προσεγγίσεις παρουσιάζουν και ορισμένα μειονεκτήματα. Ένα από αυτά είναι η ανάγκη εύρεσης των γειτονικών σωματιδίων. Καθώς κάθε σωματίδιο επηρεάζεται από τα γειτονικά του, το σύστημα πρέπει συνεχώς να υπολογίζει ποια σωματίδια βρίσκονται κοντά μεταξύ τους. Η διαδικασία αυτή μπορεί να γίνει ιδιαίτερα απαιτητική υπολογιστικά όταν ο αριθμός των σωματιδίων είναι πολύ μεγάλος.

Επιπλέον, η επίτευξη αριθμητικής σταθερότητας δεν είναι πάντοτε εύκολη. Σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να εμφανιστούν ανεπιθύμητες ταλαντώσεις, συσσωματώσεις σωματιδίων ή μη φυσικές συμπεριφορές, οι οποίες απαιτούν πρόσθετους μηχανισμούς διόρθωσης. (Engleson, 2011)

Σημειώνεται ότι οι You et al. Χρησιμοποίησαν μία παραλλαγή της Lagrangian μεθόδου SPH για να προσομοιάσουν ιξωδοελαστικά υγρά τροποποιώντας την εξίσωση Navier-Stokes. (You et al, 2013)

3.1.2 Eulerian ή Grid-Based Methods

Οι Eulerian μέθοδοι, γνωστοί και ως grid-based μέθοδοι, κάνουν χρήση ενός σταθερού πλέγματος κελιών πάνω στα οποία μεταφέρονται (advection) και υπολογίζονται (computation) οι διάφορες ιδιότητες των σωματιδίων του υγρού. Με αυτό τον τρόπο διασφαλίζεται η υπολογιστική σταθερότητα της προσομοίωσης. (Price, 2006)

Στις grid-based προσεγγίσεις, ο χώρος χωρίζεται σε ένα κανονικό πλέγμα δύο ή τριών διαστάσεων. Κάθε κελί του πλέγματος περιέχει πληροφορίες όπως:

- η πίεση,
- η πυκνότητα,
- η θερμοκρασία,
- η συγκέντρωση ουσιών,
- οι συνιστώσες της ταχύτητας του ρευστού.

Μειονέκτημα των Grid-Based μεθόδων είναι η απαλοιφή των ιδιοτήτων των σωματιδίων καθώς αυτές μεταφέρονται σε ένα σταθερό αριθμό κελιών τα οποία μπορούν να περιγράφουν και να υπολογίζουν ένα πλήθος σωματιδίων, καθιστώντας τα υπολογιστικά πανομοιότυπα (πολλά σωματίδια για ένα κελί). (Price, 2006)

Στην εργασία τους οι Goktekin et al. χρησιμοποίησαν μια Eulerian προσέγγιση για την επίτευξη ιξωδοελαστικών προσομοιώσεων προσθέτοντας στα μεταφερόμενα πεδία (advected fields) τον τανυστή της διατμητικής τάσης (stress tensor). (Goktekin et al, 2004)

3.2 Υβριδικές Μέθοδοι

Οι καθαρά Eulerian μέθοδοι προσφέρουν υψηλή αριθμητική σταθερότητα, παρουσιάζουν όμως ένα σημαντικό μειονέκτημα: τη διάχυση της ταχύτητας (*numerical dissipation*). Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, οι μικρές λεπτομέρειες της ροής εξομαλύνονται σταδιακά, οδηγώντας σε απώλεια κινητικής ενέργειας και σε λιγότερο δυναμικές συμπεριφορές.

Από την άλλη πλευρά, οι Lagrangian μέθοδοι, όπως η SPH, διατηρούν καλύτερα τις λεπτομέρειες της κίνησης, αλλά συχνά αντιμετωπίζουν προβλήματα σταθερότητας και απαιτούν πολύπλοκους μηχανισμούς για την επίλυση της πίεσης.

Η ανάπτυξη των μεθόδων Particle-In-Cell (PIC) και αργότερα των FLIP και APIC είχε ως στόχο τη γεφύρωση αυτών των δύο κόσμων.

3.2.1 Particle-In-Cell (PIC)

Η μέθοδος Particle-In-Cell (PIC) αποτέλεσε μία από τις πρώτες επιτυχημένες υβριδικές προσεγγίσεις για την προσομοίωση ρευστών και θεωρείται ο άμεσος πρόδρομος της μεθόδου FLIP. Η βασική της φιλοσοφία συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των σωματιδιακών και των πλεγματικών μεθόδων, αξιοποιώντας σωματίδια για τη μεταφορά της πληροφορίας του ρευστού και ένα Eulerian υπολογιστικό πλέγμα για την επίλυση των εξισώσεων της ροής. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται μεγαλύτερη αριθμητική σταθερότητα σε σχέση με τις καθαρά σωματιδιακές προσεγγίσεις, οι οποίες συχνά αντιμετωπίζουν δυσκολίες στην επίλυση της πίεσης και στη διατήρηση της συνοχής του υγρού. (Jiang et al, 2015)

Στη μέθοδο PIC, το ρευστό αναπαρίσταται από ένα σύνολο σωματιδίων τα οποία μεταφέρουν φυσικές ιδιότητες όπως η μάζα και η ταχύτητα. Κατά την έναρξη κάθε χρονικού βήματος, οι πληροφορίες αυτές μεταφέρονται από τα σωματίδια στο υπολογιστικό πλέγμα τύπου MAC (Marker-And-Cell), το οποίο χρησιμοποιείται για την αριθμητική επίλυση των εξισώσεων της δυναμικής των ρευστών. Αφού ολοκληρωθεί η μεταφορά των δεδομένων, ο επιλυτής εκτελεί τους απαραίτητους υπολογισμούς πάνω στο πλέγμα, όπως η εφαρμογή εξωτερικών δυνάμεων, η επίλυση της πίεσης και η επιβολή της συνθήκης μη-συμπιεστότητας.

Μετά την ολοκλήρωση των υπολογισμών, οι νέες ταχύτητες που προκύπτουν στο πλέγμα μεταφέρονται εκ νέου στα σωματίδια. Τα σωματίδια ενημερώνουν την κατάστασή τους με βάση τις τιμές αυτές και στη συνέχεια μετακινούνται στον χώρο σύμφωνα με τις νέες ταχύτητες. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται σε κάθε χρονικό βήμα, δημιουργώντας έναν συνεχή κύκλο ανταλλαγής πληροφορίας μεταξύ σωματιδίων και πλέγματος. (Jiang et al, 2015)

Η εισαγωγή της μεθόδου PIC αποτέλεσε σημαντική πρόοδο για την προσομοίωση ρευστών, καθώς επέτρεψε τη σταθερή επίλυση φαινομένων που ήταν δύσκολο να αντιμετωπιστούν με αμιγώς σωματιδιακές τεχνικές. Ωστόσο, η μέθοδος παρουσίαζε έναν σημαντικό περιορισμό, γνωστό ως αριθμητική διάχυση (numerical dissipation). Το πρόβλημα αυτό προέκυπτε επειδή, σε κάθε χρονικό βήμα, οι ταχύτητες των σωματιδίων αντικαθίσταντο πλήρως από τις εξομαλυμένες τιμές που υπολογίζονταν στο πλέγμα. Κατά συνέπεια, μέρος

της κινητικής ενέργειας του συστήματος χανόταν σταδιακά κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. (Jiang et al, 2015)

Η συνεχής αυτή εξομάλυνση είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση των λεπτομερειών της ροής και την απώλεια μικρής κλίμακας κινήσεων που συμβάλλουν στη φυσικότητα ενός ρευστού. Τα υγρά που προσομοιώνονταν με τη μέθοδο PIC εμφάνιζαν συχνά υπερβολικά ομαλή και «μαλακή» συμπεριφορά, χωρίς τις χαρακτηριστικές δίνες και τις λεπτές δυναμικές μεταβολές που παρατηρούνται σε πραγματικές ροές. Η ανάγκη αντιμετώπισης αυτού του προβλήματος οδήγησε στην ανάπτυξη της μεθόδου FLIP (Fluid Implicit Particle), η οποία διατηρεί τα πλεονεκτήματα της αρχιτεκτονικής PIC, μειώνοντας παράλληλα σημαντικά την αριθμητική διάχυση μέσω διαφορετικού τρόπου μεταφοράς των ταχυτήτων μεταξύ πλέγματος και σωματιδίων. (Jiang et al, 2015)

3.2.2 Fluid-Implicit Particle (FLIP)

Η μέθοδος Fluid-Implicit Particle (FLIP) αναπτύχθηκε ως εξέλιξη και βελτίωση της μεθόδου Particle-In-Cell (PIC), με κύριο στόχο την αντιμετώπιση του προβλήματος της αριθμητικής διάχυσης που χαρακτήριζε την προγενέστερη προσέγγιση. Διατηρώντας την ίδια υβριδική αρχιτεκτονική σωματιδίων και πλέγματος, η FLIP εισήγαγε έναν διαφορετικό τρόπο μεταφοράς της πληροφορίας μεταξύ των δύο αναπαραστάσεων, επιτρέποντας τη διατήρηση μεγαλύτερου μέρους της φυσικής δυναμικής του συστήματος.

Η βασική διαφορά μεταξύ PIC και FLIP εντοπίζεται στον τρόπο με τον οποίο ενημερώνονται οι ταχύτητες των σωματιδίων μετά την ολοκλήρωση των υπολογισμών στο πλέγμα. Στη μέθοδο PIC, οι ταχύτητες των σωματιδίων αντικαθίστανται πλήρως από τις νέες τιμές που υπολογίζονται στο Eulerian πλέγμα. Αντίθετα, στη FLIP τα σωματίδια δεν λαμβάνουν απευθείας τις νέες ταχύτητες του πλέγματος, αλλά μόνο τη μεταβολή της ταχύτητας που προέκυψε κατά τη διαδικασία επίλυσης. Με άλλα λόγια, το πλέγμα χρησιμοποιείται για να υπολογίσει πόσο μεταβλήθηκε η κατάσταση του συστήματος, ενώ τα ίδια τα σωματίδια διατηρούν την ιστορία της κίνησής τους και ενημερώνονται προσθετικά με βάση τη μεταβολή αυτή. (Jiang et al, 2015)

Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει τη διατήρηση πολύ μεγαλύτερου ποσοστού της κινητικής ενέργειας του συστήματος, καθώς αποφεύγεται η συνεχής εξομάλυνση των ταχυτήτων που παρατηρείται στη μέθοδο PIC. Ως αποτέλεσμα, η αριθμητική διάχυση μειώνεται σημαντικά και το ρευστό διατηρεί λεπτομέρειες της κίνησής του για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Οι

προσομοιώσεις που βασίζονται στη FLIP εμφανίζουν συνήθως πιο έντονες δίνες, μεγαλύτερη πολυπλοκότητα στη ροή και συνολικά πιο «ζωντανή» και φυσική συμπεριφορά. (Jiang et al, 2015)

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματά της, η μέθοδος FLIP δεν στερείται περιορισμών. Η αυξημένη διατήρηση της ενέργειας, η οποία αποτελεί το βασικό της πλεονέκτημα, συνοδεύεται από την εμφάνιση αριθμητικού θορύβου (*numerical noise*). Επειδή τα σωματίδια διατηρούν μεγάλο μέρος της κινητικής τους ιστορίας, μικρά αριθμητικά σφάλματα μπορούν να συσσωρευτούν με την πάροδο του χρόνου και να οδηγήσουν σε ανεπιθύμητες ταλαντώσεις ή ασταθείς τοπικές κινήσεις. Το φαινόμενο αυτό γίνεται ιδιαίτερα εμφανές σε περιοχές όπου το ρευστό βρίσκεται κοντά σε κατάσταση ισορροπίας ή όταν απαιτείται πολύ ομαλή συμπεριφορά της επιφάνειας. (Jiang et al, 2015)

Επιπλέον, η FLIP μπορεί να παρουσιάσει δυσκολίες στη διατήρηση ομαλών πεδίων ταχύτητας σε σύγκριση με την PIC, καθώς η μειωμένη διάχυση επιτρέπει τη διατήρηση μικρής κλίμακας διαταραχών που ενδέχεται να μην αντιστοιχούν πάντα σε φυσικά φαινόμενα. Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι προσομοιώσεις μπορεί να εμφανίζουν ανεπιθύμητες δονήσεις, διακυμάνσεις στην ταχύτητα ή θορυβώδεις επιφάνειες υγρού, οι οποίες απαιτούν πρόσθετες τεχνικές φιλτραρίσματος ή εξομάλυνσης. (Jiang et al, 2015)

3.2.3 Material Point Method (MPM)

Η Μέθοδος Υλικών Σημείων (Material Point Method – MPM) συνιστά μία υβριδική αριθμητική τεχνική Eulerian–Lagrangian, η οποία συνδυάζει τη χρήση κινούμενων υλικών σημείων με ένα σταθερό υπολογιστικό πλέγμα αναφοράς. Στο πλαίσιο της μεθόδου, το εξεταζόμενο υλικό αναπαρίσταται ως ένα σύνολο διακριτών υλικών σημείων που μεταφέρουν τις φυσικές του ιδιότητες, ενώ η εξέλιξη της κίνησης και των παραμορφώσεών τους υπολογίζεται σύμφωνα με τους νόμους της Νευτώνειας μηχανικής. Η MPM παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα στην προσομοίωση φαινομένων που χαρακτηρίζονται από εκτεταμένες μετατοπίσεις και μεγάλες παραμορφώσεις, όπου οι παραδοσιακές πλεγματικές μέθοδοι συχνά εμφανίζουν περιορισμούς. (Kumar, Kularathna, 2022)

Συγκριτικά με άλλες αριθμητικές προσεγγίσεις, η Μέθοδος Υλικών Σημείων (MPM) χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη πιο πολύπλοκων καταστατικών μοντέλων και αριθμητικών σχημάτων επίλυσης, γεγονός που της προσδίδει τη δυνατότητα αναπαράστασης ποικίλων

φυσικών διεργασιών. Εντούτοις, η επαναληπτική διαδικασία επίλυσης του συστήματος εξισώσεων που σχετίζεται με τον υπολογισμό της πίεσης, αν και αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη διασφάλιση της ακρίβειας της προσομοίωσης, συνιστά παράλληλα το κυριότερο εμπόδιο ως προς την υπολογιστική της απόδοση. Κατά συνέπεια, η διερεύνηση και ανάπτυξη αποδοτικότερων μεθόδων ταχείας επίλυσης του προβλήματος της πίεσης, με ταυτόχρονη διατήρηση υψηλού επιπέδου ακρίβειας, αποτελεί ζήτημα ιδιαίτερης ερευνητικής σημασίας. (Li et al, 2023)

Αν και οι υπάρχουσες μέθοδοι, όπως οι Particle-In-Cell (PIC), Fluid-Implicit-Particle (FLIP) και Material Point Method (MPM), έχουν αποδείξει την αποτελεσματικότητά τους στην προσομοίωση σύνθετων φυσικών φαινομένων, εξακολουθούν να παρουσιάζουν συγκεκριμένους περιορισμούς. Ειδικότερα, η κλασική μέθοδος PIC προσφέρει αυξημένη αριθμητική σταθερότητα, ωστόσο συνοδεύεται από σημαντική αριθμητική διάχυση, η οποία οδηγεί σε απώλεια κινητικής ενέργειας και εξομάλυνση των λεπτομερειών της ροής. Από την άλλη πλευρά, η μέθοδος FLIP αναπτύχθηκε με στόχο τη μείωση αυτής της διάχυσης, διατηρώντας καλύτερα την ενέργεια του συστήματος. Παρ' όλα αυτά, η μειωμένη απόσβεση καθιστά τη μέθοδο πιο ευαίσθητη στην εμφάνιση αριθμητικού θορύβου και ενδέχεται, υπό ορισμένες συνθήκες, να προκαλέσει προβλήματα αστάθειας κατά την προσομοίωση. (Jiang, 2015)

Κεφάλαιο 4 Διάδραση μεταξύ Μπογιάς, Καμβά και Πινέλου

Παρόλο που η μπογιά παραμένει το δυσκολότερο και πιο χρονοβόρο σύστημα που πρέπει να λυθεί για να επιτευχθεί η προσομοίωση, υπάρχει μια πληθώρα παραμέτρων που αλληλεπιδρούν με την μπογιά και ολοκληρώνουν το σύστημα.

Η μπογιά στην πραγματικότητα έχει την ιδιότητα να προσκολλάται στις τρίχες του πινέλου και λόγω της θιξοτροπικής της ιδιότητας, όπως αναλύθηκε παραπάνω, να εναποθέτεται στον καμβά όταν το πινέλο και η επιφάνεια της ασκούν πίεση.

Η συμπεριφορά της μπογιάς δεν περιορίζεται σε δύο διαστάσεις, καθώς η διαδικασία δημιουργίας μιας πινελιάς επηρεάζεται όχι μόνο από την οριζόντια κίνηση του πινέλου πάνω στην επιφάνεια του καμβά, αλλά και από τις κατακόρυφες μετατοπίσεις και τις δυνάμεις που ασκούνται σε αυτό. Ως ασυμπίεστο ρευστό, η μπογιά υπόκειται στην επίδραση εσωτερικών πεδίων πίεσης, τα οποία καθορίζουν την εξέλιξη της ροής της. Ειδικότερα, η εφαρμογή κατακόρυφης δύναμης από το πινέλο προκαλεί την ανάπτυξη διαφορών πίεσης στο εσωτερικό του υλικού, με αποτέλεσμα την κίνησή του προς περιοχές χαμηλότερης πίεσης, σύμφωνα με την κατεύθυνση της αρνητικής βαθμίδας του πεδίου πίεσης. (Baxter et al, 2004)

4.1 Το Πινέλο σαν Γεωμετρία

Η μοντελοποίηση του πινέλου είναι η πρώτη διεργασία που υλοποιείται στα πλαίσια του ενιαίου συστήματος προσομοίωσης. Η σύγχρονη έρευνα στον χώρο της ψηφιακής ζωγραφικής στρέφεται ολοένα και περισσότερο προς την αξιοποίηση τρισδιάστατων παραμορφώσιμων μοντέλων πινέλου, καθώς αυτά μπορούν να αποδώσουν με μεγαλύτερη πιστότητα τη δυναμική συμπεριφορά και τις σύνθετες παραμορφώσεις που προκύπτουν κατά την αλληλεπίδραση του πινέλου με την επιφάνεια ζωγραφικής. Ως αποτέλεσμα, καθίσταται δυνατή η δημιουργία πινελιών με αυξημένη ποικιλία μορφών και μεγαλύτερο βαθμό καλλιτεχνικού ελέγχου, συμβάλλοντας στην παραγωγή πιο ρεαλιστικών και εκφραστικών αποτελεσμάτων. (Chu et al, 2010)

Η μοντελοποίηση ενός εικονικού πινέλου προϋποθέτει τον καθορισμό τόσο της γεωμετρικής δομής της επιφάνειάς του όσο και ενός φυσικού μοντέλου ικανού να αναπαραστήσει τη δυναμική του συμπεριφορά. Για τον σκοπό αυτό, η επιφάνεια του

πινέλου περιγράφεται μέσω σημειακών δειγμάτων που φέρουν πληροφορίες σχετικά με την ποσότητα και τις ιδιότητες της μπογιάς. Τα δείγματα αυτά οργανώνονται γύρω από έναν σκελετό μάζας–ελατηρίων, ο οποίος λειτουργεί ως μηχανισμός προσομοίωσης των παραμορφώσεων και της κίνησης του πινέλου, επιτρέποντας την ρεαλιστική απόδοση της αλληλεπίδρασής του με τον καμβά. (Adams et al, 2004)

Παρόλο που, ως επί το πλείστον, το μοντέλο του πινέλου παραλείπεται από την τελική προσομοίωση για λόγους απόδοσης, η ύπαρξη ενός προσεγγιστικά ρεαλιστικού μέσου για την εναπόθεση και μετάθεση της μπογιάς, αλλά και για την οπτική διευκόλυνση του καλλιτέχνη, αποτελεί σημαντική προσθήκη σε ένα σύστημα εικαστικής προσομοίωσης.

4.2 Συγκρούσεις Στερεών με Στερεά

Καθώς το ενιαίο σύστημα κάνει χρήση γεωμετρικού πινέλου, η φυσική σύγκρουση μεταξύ αυτού και του καμβά παρέχει αναπόσπαστες πληροφορίες τόσο για την συμπεριφορά των τριχών όσο και για τις πιέσεις και την εναπόθεση των υγρών. Η διατήρηση μιας φυσικής αλληλεπίδρασης μεταξύ της ολότητας των colliders αποτελεί ένα σχετικά απλό αλλά σημαντικό βήμα.

Για τη διασφάλιση της ρεαλιστικής αλληλεπίδρασης μεταξύ του εικονικού πινέλου και της επιφάνειας ζωγραφικής, απαιτείται ο σκελετός του πινέλου να παραμένει πάντοτε εκτός του όγκου του αντικειμένου. Ως εκ τούτου, εφαρμόζεται διαδικασία ανίχνευσης συγκρούσεων σε κάθε σημείο μάζας του σκελετικού μοντέλου, ώστε να εντοπίζονται και να αποτρέπονται τυχόν διεισδύσεις στην επιφάνεια. (Adams et al, 2004)

4.3 Εναπόθεση Μπογιάς

Στα περισσότερα συστήματα που εξετάστηκαν, η τρισδιάστατη γεωμετρία του πινέλου αυτή καθ'αυτή δεν συμβάλλει στην εναπόθεση της μπογιάς στο σύστημα. Αντί αυτού, οι προσομοιασμένες τρίχες του πινέλου δημιουργούν ένα δισδιάστατο αποτύπωμα ανάλογα με την πίεση και την διείσδυση του πινέλου στον καμβά.

Η εναπόθεση χρώματος από το πινέλο στον καμβά προσεγγίζεται ως πρόβλημα προβολής μιας υφής πάνω σε δισδιάστατη επιφάνεια μέσω ορθογραφικής προβολής. Αν και η αξιοποίηση πολυεπίπεδων αναπαραστάσεων υφής (mir-maps) μπορεί να συμβάλει στη

διαχείριση διαφορών ανάλυσης μεταξύ πινέλου και καμβά, η συνεχής ενημέρωση των επιπέδων αυτών αυξάνει σημαντικά το υπολογιστικό κόστος. Επιπλέον, οι ισότροπες μέθοδοι φιλτραρίσματος που χρησιμοποιούνται από το mip-mapping δεν επαρκούν για την αντιμετώπιση των ανισότροπων παραμορφώσεων που προκύπτουν κατά την προβολή του πινέλου στην επιφάνεια ζωγραφικής. (Chu et al, 2010)

4.4 Συγκρούσεις Στερεών με Υγρά

Πέραν των συγκρούσεων των στατικών και δυναμικών στερεών, όπως είναι το πινέλο και ο καμβάς, παρατηρείται αλληλεπίδραση τόσο των ρευστών με την δυναμική γεωμετρία των τριχών του πινέλου όσο και με την στατική γεωμετρία του καμβά.

Η αλληλεπίδραση αυτή εντάσσει στο σύστημα την αμφίδρομη σχέση εναπόθεσης και συλλογής του ρευστού.

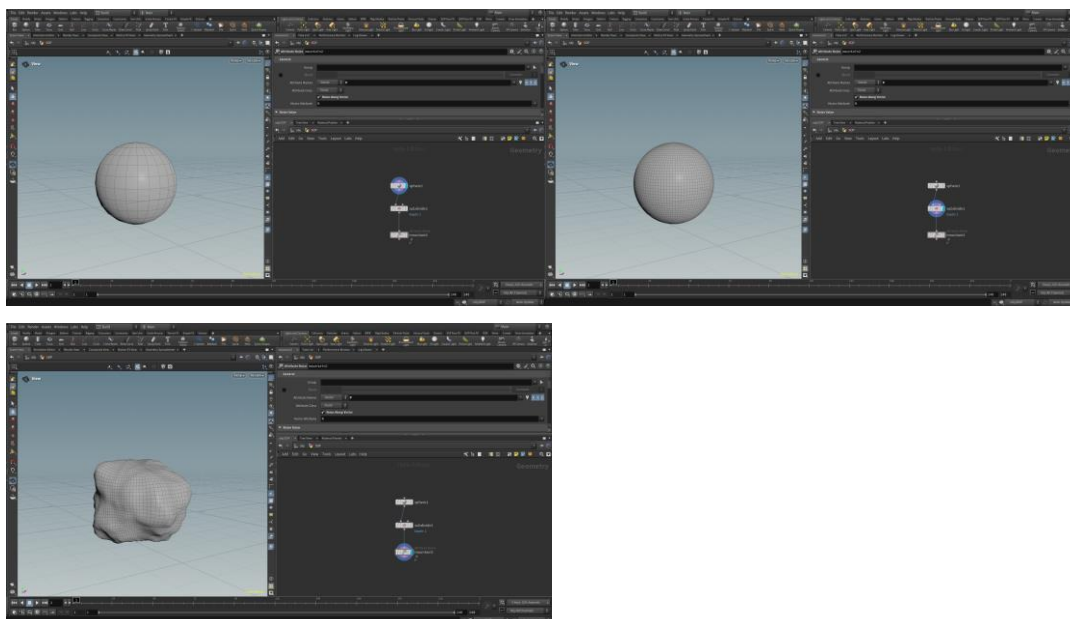
Η συλλογή της μπογιάς, δηλαδή η μεταφορά πληροφορίας από τον καμβά προς το τρισδιάστατο πινέλο, παρουσιάζει χαρακτηριστικά παρόμοια με εκείνα των τεχνικών shadow mapping και projective texturing. Λόγω της γεωμετρίας του πινέλου, ορισμένες περιοχές του υφίστανται σημαντικές παραμορφώσεις κατά την προβολή, ιδιαίτερα όταν η τοπική επιφάνεια είναι σχεδόν κάθετη στον καμβά. Στις περιοχές αυτές η διαθέσιμη δειγματοληπτική πυκνότητα είναι ανεπαρκής, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται προβλήματα υποδειγματοληψίας και απώλειας λεπτομερειών κατά την αναπαράσταση της μεταφοράς μπογιάς. (Chu et al, 2010)

Κεφάλαιο 5: Το Πλαίσιο Εργασίας του Houdini

Η ανάπτυξη σύγχρονων συστημάτων προσομοίωσης βασίζεται σε λογισμικά που προσφέρουν όχι μόνο υψηλή υπολογιστική ισχύ, αλλά και επαρκή ευελιξία ώστε να μπορούν να προσαρμοστούν στις απαιτήσεις διαφορετικών εφαρμογών. Στον χώρο των οπτικών εφέ και της διαδικαστικής μοντελοποίησης, ένα από τα σημαντικότερα εργαλεία είναι το Houdini, το οποίο έχει καθιερωθεί ως βιομηχανικό πρότυπο για την ανάπτυξη σύνθετων συστημάτων προσομοίωσης.

Το Houdini συγκαταλέγεται στα πλέον διαδεδομένα εμπορικά λογισμικά οπτικών εφέ, με εκτεταμένη εφαρμογή στη βιομηχανία του κινηματογράφου, στην ανάπτυξη βιντεοπαιχνιδιών και γενικότερα στον τομέα των γραφικών υπολογιστών. Η ευρεία υιοθέτησή του από κορυφαία στούντιο και εταιρείες, όπως οι Disney/Pixar, DreamWorks, Digital Domain, Framestore και Ubisoft, έχει συμβάλει στη διαμόρφωση μιας δραστήριας κοινότητας χρηστών και προγραμματιστών. Παράλληλα, η αναλυτική τεκμηρίωση και η συνεχής υποστήριξη από τη SideFX έχουν διευκολύνει τη διάδοση του λογισμικού και εκτός της βιομηχανίας ψυχαγωγίας, επιτρέποντας την αξιοποίησή του από ερευνητικούς οργανισμούς και ακαδημαϊκά ιδρύματα σε ποικίλα επιστημονικά πεδία. (Naiman et al, 2017)

Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά λογισμικά τρισδιάστατων γραφικών, όπου οι ενέργειες του χρήστη εφαρμόζονται καταστροφικά πάνω στη γεωμετρία, το Houdini οργανώνει τη δημιουργική διαδικασία ως ένα κατευθυνόμενο γράφημα κόμβων (node graph). Κάθε κόμβος εκτελεί μία συγκεκριμένη λειτουργία και παράγει δεδομένα τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν από επόμενους κόμβους, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.



Εικόνα 2 : Παράδειγμα διαδικαστικής μοντελοποίησης, όπου κάθε κόμβος αποτελεί μια συνέχεια της κατάστασης της γεωμετρίας.

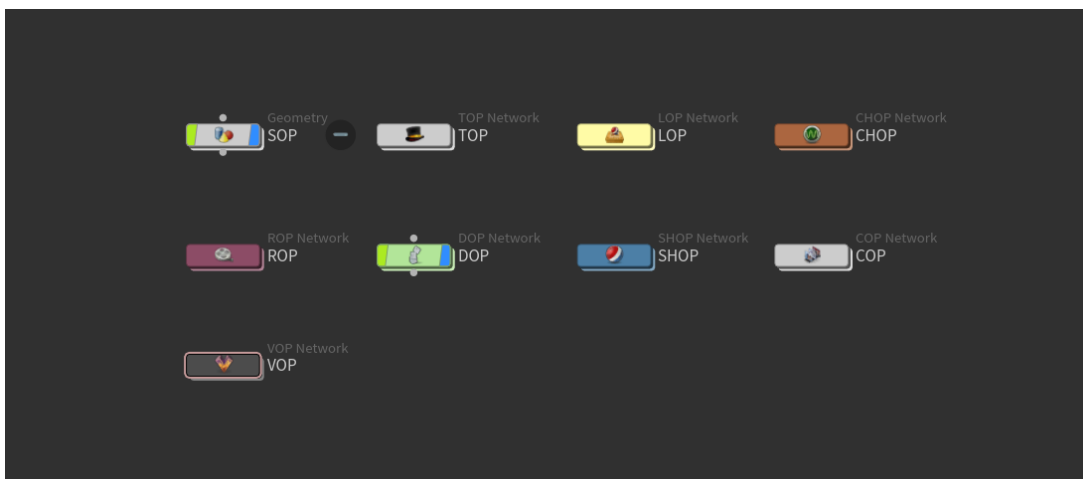
Η διαδικαστική φύση του Houdini το καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλο για ερευνητικές εφαρμογές, όπου η συνεχής προσαρμογή και ο πειραματισμός αποτελούν αναπόσπαστο μέρος της ανάπτυξης.

Το λογισμικό οργανώνεται σε ένα σύνολο εξειδικευμένων πλαισίων εργασίας (*contexts*), καθένα από τα οποία είναι υπεύθυνο για διαφορετικές κατηγορίες λειτουργιών.

Τα διάφορα contexts του Houdini όπως φαίνονται και στην Εικόνα 3:

- τα SOPs (Surface Operators) για την επεξεργασία γεωμετρίας,
- τα DOPs (Dynamic Operators) για την προσομοίωση φυσικών φαινομένων,
- τα LOPs (Lighting Operators) για τη διαχείριση σκηνών USD,
- τα COPs (Compositing Operators) για επεξεργασία εικόνας,
- τα VOPs (VEX Operators) για την ανάπτυξη διαδικαστικών δικτύων.
- τα CHOPs (Channel Operators) για την διαχείριση σημάτων
- τα TOPs (Task Operators) για τον αυτοματισμό των επιμέρους διεργασιών
- τα ROPs (Rendering Operators) για την τελική εμφύχωση της εικόνας
- τα SHOPs (Shading Operators) για την επεξεργασία των υφών των αντικειμένων

Η επικοινωνία μεταξύ των επιμέρους πλαισίων επιτρέπει τη δημιουργία σύνθετων pipelines που συνδυάζουν γεωμετρία, προσομοιώσεις και διαδικαστική λογική.



Εικόνα 3 : Τα διάφορα πλαίσια εργασίας του Houdini

Κάθε παράμετρος και κάθε εργαλείο του Houdini είναι ένας κόμβος και κατ επέκταση ένα δεδομένο (data). Ο χρήστης επιλέγει πως θα επικοινωνήσει, πως θα επεξεργαστεί και πως θα τροφοδοτήσει το κάθε δεδομένο δια μέσου των διαφορετικών contexts του προγράμματος.

5.1 SOP και DOP Networks

Τα δίκτυα κόμβων που απασχόλησαν περισσότερο την παρούσα εργασία είναι τα SOP Networks (Surface Operator Networks) και τα DOP Networks (Dynamic Operator Networks), τα οποία αποτελούν τη θεμελιώδη υποδομή για την επεξεργασία γεωμετρίας και την προσομοίωση δυναμικών συστημάτων αντίστοιχα.

Η κατανόηση της λειτουργίας και της αλληλεπίδρασης των δύο αυτών πλαισίων είναι ιδιαίτερα σημαντική για την παρούσα εργασία, καθώς ο προτεινόμενος solver αξιοποιεί στοιχεία και από τις δύο προσεγγίσεις.

5.1.1 Surface Operators (SOPs)

Τα **SOPs** αποτελούν το βασικό περιβάλλον επεξεργασίας γεωμετρίας στο Houdini. Κάθε SOP network είναι ένα αυτόνομο γράφημα επεξεργασίας τρισδιάστατης γεωμετρίας στο οποίο ο χρήστης έχει πλήρη δυνατότητα επεξεργασίας των δομικών στοιχείων ενός αντικειμένου (points, vertices, edges, primitives).

Σε αυτό το πλαίσιο εκτελούνται, κατά βάση, όλες οι γεωμετρικές μετατροπές, όπως είναι το extrude, το bevel, το subdivize κ.ο.κ. Και δημιουργείται η γεωμετρική βάση για κάθε

περαιτέρω μετατροπή από άλλα δίκτυα. Εδώ δημιουργούνται τα meshes, τα curves, τα volumes και τα particles που θα χρησιμοποιηθούν μετέπειτα σε κάθε δυναμικό πλαίσιο.

Η λειτουργία των SOPs είναι κατά βάση στατική. Κάθε κόμβος εκτελεί μία μετατροπή χωρίς να διατηρεί πληροφορία από προηγούμενα χρονικά βήματα.

Ωστόσο, μέσω του SOP Solver είναι δυνατή η εισαγωγή χρονικής μνήμης στο SOP πλαίσιο.

Ο SOP Solver επιτρέπει την πρόσβαση στην κατάσταση της γεωμετρίας από το προηγούμενο χρονικό βήμα και επιτρέπει στον χρήστη τον υπολογισμό πολύπλοκων συναρτήσεων και την προσομοίωση φυσικών φαινομένων.

Η δυνατότητα αυτή είναι καθοριστικής σημασίας για την ανάπτυξη των απαραίτητων στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν μετέπειτα από τον Dynamic Solver για το τελικό υγρό. (SideFX Documentation, 2026)

5.1.2 Dynamic Operators (DOPs)

Τα DOP Networks αποτελούν το πλαίσιο προσομοιώσεων του Houdini. Σε αντίθεση με τα SOPs, τα οποία επικεντρώνονται στην επεξεργασία γεωμετρίας, τα DOP Networks αποτελούν το περιβάλλον μέσα στο οποίο οργανώνονται και εκτελούνται οι δυναμικές προσομοιώσεις. Οι κόμβοι που τα συνθέτουν επιτρέπουν τη δημιουργία ή την εισαγωγή προσομοιούμενων αντικειμένων, την εφαρμογή δυνάμεων και περιορισμών, καθώς και τον ορισμό των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των επιμέρους στοιχείων του συστήματος. Παράλληλα, παρέχουν τη δυνατότητα διαμόρφωσης των κατάλληλων solvers, οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για την αριθμητική επίλυση και την εξέλιξη της προσομοίωσης σε κάθε χρονικό βήμα. (SideFX Documentation, 2026)

Στην αρχιτεκτονική των προσομοιώσεων του Houdini, τα αντικείμενα αποτελούν δομές οργάνωσης δεδομένων και όχι αυτόνομες οντότητες φυσικής προσομοίωσης. Ο ρόλος τους είναι να φιλοξενούν και να μεταφέρουν τα δεδομένα που απαιτούνται για την περιγραφή της κατάστασης του συστήματος, όπως γεωμετρικές, κινηματικές ή φυσικές ιδιότητες, πάνω στις οποίες δρουν οι επιλυτές και οι υπόλοιποι κόμβοι της προσομοίωσης. (SideFX Documentation, 2026)

Nodes Information		Global Geography		Group		View		Instruments		Attributes																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
Node	Information	P01	P02	P03	Instrument	Source	Substation	Substation	SPOT	WPI1	WPI2	WPI3	WPI4	WPI5	WPI6	WPI7	WPI8	WPI9	WPI10	WPI11	WPI12	WPI13	WPI14	WPI15	WPI16	WPI17	WPI18	WPI19	WPI20	WPI21	WPI22	WPI23	WPI24	WPI25	WPI26	WPI27	WPI28	WPI29	WPI30	WPI31	WPI32	WPI33	WPI34	WPI35	WPI36	WPI37	WPI38	WPI39	WPI40	WPI41	WPI42	WPI43	WPI44	WPI45	WPI46	WPI47	WPI48	WPI49	WPI50	WPI51	WPI52	WPI53	WPI54	WPI55	WPI56	WPI57	WPI58	WPI59	WPI60	WPI61	WPI62	WPI63	WPI64	WPI65	WPI66	WPI67	WPI68	WPI69	WPI70	WPI71	WPI72	WPI73	WPI74	WPI75	WPI76	WPI77	WPI78	WPI79	WPI80	WPI81	WPI82	WPI83	WPI84	WPI85	WPI86	WPI87	WPI88	WPI89	WPI90	WPI91	WPI92	WPI93	WPI94	WPI95	WPI96	WPI97	WPI98	WPI99	WPI100	WPI101	WPI102	WPI103	WPI104	WPI105	WPI106	WPI107	WPI108	WPI109	WPI110	WPI111	WPI112	WPI113	WPI114	WPI115	WPI116	WPI117	WPI118	WPI119	WPI120	WPI121	WPI122	WPI123	WPI124	WPI125	WPI126	WPI127	WPI128	WPI129	WPI130	WPI131	WPI132	WPI133	WPI134	WPI135	WPI136	WPI137	WPI138	WPI139	WPI140	WPI141	WPI142	WPI143	WPI144	WPI145	WPI146	WPI147	WPI148	WPI149	WPI150	WPI151	WPI152	WPI153	WPI154	WPI155	WPI156	WPI157	WPI158	WPI159	WPI160	WPI161	WPI162	WPI163	WPI164	WPI165	WPI166	WPI167	WPI168	WPI169	WPI170	WPI171	WPI172	WPI173	WPI174	WPI175	WPI176	WPI177	WPI178	WPI179	WPI180	WPI181	WPI182	WPI183	WPI184	WPI185	WPI186	WPI187	WPI188	WPI189	WPI190	WPI191	WPI192	WPI193	WPI194	WPI195	WPI196	WPI197	WPI198	WPI199	WPI200	WPI201	WPI202	WPI203	WPI204	WPI205	WPI206	WPI207	WPI208	WPI209	WPI210	WPI211	WPI212	WPI213	WPI214	WPI215	WPI216	WPI217	WPI218	WPI219	WPI220	WPI221	WPI222	WPI223	WPI224	WPI225	WPI226	WPI227	WPI228	WPI229	WPI230	WPI231	WPI232	WPI233	WPI234	WPI235	WPI236	WPI237	WPI238	WPI239	WPI240	WPI241	WPI242	WPI243	WPI244	WPI245	WPI246	WPI247	WPI248	WPI249	WPI250	WPI251	WPI252	WPI253	WPI254	WPI255	WPI256	WPI257	WPI258	WPI259	WPI260	WPI261	WPI262	WPI263	WPI264	WPI265	WPI266	WPI267	WPI268	WPI269	WPI270	WPI271	WPI272	WPI273	WPI274	WPI275	WPI276	WPI277	WPI278	WPI279	WPI280	WPI281	WPI282	WPI283	WPI284	WPI285	WPI286	WPI287	WPI288	WPI289	WPI290	WPI291	WPI292	WPI293	WPI294	WPI295	WPI296	WPI297	WPI298	WPI299	WPI300	WPI301	WPI302	WPI303	WPI304	WPI305	WPI306	WPI307	WPI308	WPI309	WPI310	WPI311	WPI312	WPI313	WPI314	WPI315	WPI316	WPI317	WPI318	WPI319	WPI320	WPI321	WPI322	WPI323	WPI324	WPI325	WPI326	WPI327	WPI328	WPI329	WPI330	WPI331	WPI332	WPI333	WPI334	WPI335	WPI336	WPI337	WPI338	WPI339	WPI340	WPI341	WPI342	WPI343	WPI344	WPI345	WPI346	WPI347	WPI348	WPI349	WPI350	WPI351	WPI352	WPI353	WPI354	WPI355	WPI356	WPI357	WPI358	WPI359	WPI360	WPI361	WPI362	WPI363	WPI364	WPI365	WPI366	WPI367	WPI368	WPI369	WPI370	WPI371	WPI372	WPI373	WPI374	WPI375	WPI376	WPI377	WPI378	WPI379	WPI380	WPI381	WPI382	WPI383	WPI384	WPI385	WPI386	WPI387	WPI388	WPI389	WPI390	WPI391	WPI392	WPI393	WPI394	WPI395	WPI396	WPI397	WPI398	WPI399	WPI400	WPI401	WPI402	WPI403	WPI404	WPI405	WPI406	WPI407	WPI408	WPI409	WPI410	WPI411	WPI412	WPI413	WPI414	WPI415	WPI416	WPI417	WPI418	WPI419	WPI420	WPI421	WPI422	WPI423	WPI424	WPI425	WPI426	WPI427	WPI428	WPI429	WPI430	WPI431	WPI432	WPI433	WPI434	WPI435	WPI436	WPI437	WPI438	WPI439	WPI440	WPI441	WPI442	WPI443	WPI444	WPI445	WPI446	WPI447	WPI448	WPI449	WPI450	WPI451	WPI452	WPI453	WPI454	WPI455	WPI456	WPI457	WPI458	WPI459	WPI460	WPI461	WPI462	WPI463	WPI464	WPI465	WPI466	WPI467	WPI468	WPI469	WPI470	WPI471	WPI472	WPI473	WPI474	WPI475	WPI476	WPI477	WPI478	WPI479	WPI480	WPI481	WPI482	WPI483	WPI484	WPI485	WPI486	WPI487	WPI488	WPI489	WPI490	WPI491	WPI492	WPI493	WPI494	WPI495	WPI496	WPI497	WPI498	WPI499	WPI500	WPI501	WPI502	WPI503	WPI504	WPI505	WPI506	WPI507	WPI508	WPI509	WPI510	WPI511	WPI512	WPI513	WPI514	WPI515	WPI516	WPI517	WPI518	WPI519	WPI520	WPI521	WPI522	WPI523	WPI524	WPI525	WPI526	WPI527	WPI528	WPI529	WPI530	WPI531	WPI532	WPI533	WPI534	WPI535	WPI536	WPI537	WPI538	WPI539	WPI540	WPI541	WPI542	WPI543	WPI544	WPI545	WPI546	WPI547	WPI548	WPI549	WPI550	WPI551	WPI552	WPI553	WPI554	WPI555	WPI556	WPI557	WPI558	WPI559	WPI560	WPI561	WPI562	WPI563	WPI564	WPI565	WPI566	WPI567	WPI568	WPI569	WPI570	WPI571	WPI572	WPI573	WPI574	WPI575	WPI576	WPI577	WPI578	WPI579	WPI580	WPI581	WPI582	WPI583	WPI584	WPI585	WPI586	WPI587	WPI588	WPI589	WPI590	WPI591	WPI592	WPI593	WPI594	WPI595	WPI596	WPI597	WPI598	WPI599	WPI600	WPI601	WPI602	WPI603	WPI604	WPI605	WPI606	WPI607	WPI608	WPI609	WPI610	WPI611	WPI612	WPI613	WPI614	WPI615	WPI616	WPI617	WPI618	WPI619	WPI620	WPI621	WPI622	WPI623	WPI624	WPI625	WPI626	WPI627	WPI628	WPI629	WPI630	WPI631	WPI632	WPI633	WPI634	WPI635	WPI636	WPI637	WPI638	WPI639	WPI640	WPI641	WPI642	WPI643	WPI644	WPI645	WPI646	WPI647	WPI648	WPI649	WPI650	WPI651	WPI652	WPI653	WPI654	WPI655	WPI656	WPI657	WPI658	WPI659	WPI660	WPI661	WPI662	WPI663	WPI664	WPI665	WPI666	WPI667	WPI668	WPI669	WPI670	WPI671	WPI672	WPI673	WPI674	WPI675	WPI676	WPI677	WPI678	WPI679	WPI680	WPI681	WPI682	WPI683	WPI684	WPI685	WPI686	WPI687	WPI688	WPI689	WPI690	WPI691	WPI692	WPI693	WPI694	WPI695	WPI696	WPI697	WPI698	WPI699	WPI700	WPI701	WPI702	WPI703	WPI704	WPI705	WPI706	WPI707	WPI708	WPI709	WPI710	WPI711	WPI712	WPI713	WPI714	WPI715	WPI716	WPI717	WPI718	WPI719	WPI720	WPI721	WPI722	WPI723	WPI724	WPI725	WPI726	WPI727	WPI728	WPI729	WPI730	WPI731	WPI732	WPI733	WPI734	WPI735	WPI736	WPI737	WPI738	WPI739	WPI740	WPI741	WPI742	WPI743	WPI744	WPI745	WPI746	WPI747	WPI748	WPI749	WPI750	WPI751	WPI752	WPI753	WPI754	WPI755	WPI756	WPI757	WPI758	WPI759	WPI760	WPI761	WPI762	WPI763	WPI764	WPI765	WPI766	WPI767	WPI768	WPI769	WPI770	WPI771	WPI772	WPI773	WPI774	WPI775	WPI776	WPI777	WPI778	WPI779	WPI780	WPI781	WPI782	WPI783	WPI784	WPI785	WPI786	WPI787	WPI788	WPI789	WPI790	WPI791	WPI792	WPI793	WPI794	WPI795	WPI796	WPI797	WPI798	WPI799	WPI800	WPI801	WPI802	WPI803	WPI804	WPI805	WPI806	WPI807	WPI808	WPI809	WPI810	WPI811	WPI812	WPI813	WPI814	WPI815	WPI816	WPI817	WPI818	WPI819	WPI820	WPI821	WPI822	WPI823	WPI824	WPI825	WPI826	WPI827	WPI828	WPI829	WPI830	WPI831	WPI832	WPI833	WPI834	WPI835	WPI836	WPI837	WPI838	WPI839	WPI840	WPI841	WPI842	WPI843	WPI844	WPI845	WPI846	WPI847	WPI848	WPI849	WPI850	WPI851	WPI852	WPI853	WPI854	WPI855	WPI856	WPI857	WPI858	WPI859	WPI860	WPI861	WPI862	WPI863	WPI864	WPI865	WPI866	WPI867	WPI868	WPI869	WPI870	WPI871	WPI872	WPI873	WPI874	WPI875	WPI876	WPI877	WPI878	WPI879	WPI880	WPI881	WPI882	WPI883	WPI884	WPI885	WPI886	WPI887	WPI888	WPI889	WPI890	WPI891	WPI892	WPI893	WPI894	WPI895	WPI896	WPI897	WPI898	WPI899	WPI900	WPI901	WPI902	WPI903	WPI904	WPI905	WPI906	WPI907	WPI908	WPI909	WPI910	WPI911	WPI912	WPI913	WPI914	WPI915	WPI916	WPI917	WPI918	WPI919	WPI920	WPI921	WPI922	WPI923	WPI924	WPI925	WPI926	WPI927	WPI928	WPI929	WPI930	WPI931	WPI932	WPI933	WPI934	WPI935	WPI936	WPI937	WPI938	WPI939	WPI940	WPI941	WPI942	WPI943	WPI944	WPI945	WPI946	WPI947	WPI948	WPI949	WPI950	WPI951	WPI952	WPI953	WPI954	WPI955	WPI956	WPI957	WPI958	WPI959	WPI960	WPI961	WPI962	WPI963	WPI964	WPI965	WPI966	WPI967	WPI968	WPI969	WPI970	WPI971	WPI972	WPI973	WPI974	WPI975	WPI976	WPI977	WPI978	WPI979	WPI980	WPI981	WPI982	WPI983	WPI984	WPI985	WPI986	WPI987	WPI988	WPI989	WPI990	WPI991	WPI992	WPI993	WPI994	WPI995	WPI996	WPI997	WPI998	WPI999	WPI1000	WPI1001	WPI1002	WPI1003	WPI1004	WPI1005	WPI1006	WPI1007	WPI1008	WPI1009	WPI1010	WPI1011	WPI1012	WPI1013	WPI1014	WPI1015	WPI1016	WPI1017	WPI1018	WPI1019	WPI1020	WPI1021	WPI1022	WPI1023	WPI1024	WPI1025	WPI1026	WPI1027	WPI1028	WPI1029	WPI1030	WPI1031	WPI1032	WPI1033	WPI1034	WPI1035	WPI1036	WPI1037	WPI1038	WPI1039	WPI1040	WPI1041	WPI1042	WPI1043	WPI1044	WPI1045	WPI1046	WPI1047	WPI1048	WPI1049	WPI1050	WPI1051	WPI1052	WPI1053	WPI1054	WPI1055	WPI1056	WPI1057	WPI1058	WPI1059	WPI1060	WPI1061	WPI1062	WPI1063	WPI1064	WPI1065	WPI1066	WPI1067	WPI1068	WPI1069	WPI1070	WPI1071	WPI1072	WPI1073	WPI1074	WPI1075	WPI1076	WPI1077	WPI1078	WPI1079	WPI1080	WPI1081	WPI1082	WPI1083	WPI1084	WPI1085	WPI1086	WPI1087	WPI1088	WPI1089	WPI1090	WPI1091	WPI1092	WPI1093	WPI1094	WPI1095	WPI1096	WPI1097	WPI1098	WPI1099	WPI1100	WPI1101	WPI1102	WPI1103	WPI1104	WPI1105	WPI1106	WPI1107	WPI1108	WPI1109	WPI1110	WPI1111	WPI1112	WPI1113	WPI1114	WPI1115	WPI1116	WPI1117	WPI1118	WPI1119	WPI1120	WPI1121	WPI1122	WPI1123	WPI1124	WPI1125	WPI1126	WPI1127	WPI1128	WPI1129	WPI1130	WPI1131	WPI1132	WPI1133	WPI1134	WPI1135	WPI1136	WPI1137	WPI1138	WPI1139	WPI1140	WPI1141	WPI1142	WPI1143	WPI1144	WPI1145	WPI1146	WPI1147	WPI1148	WPI1149	WPI1150	WPI1151	WPI1152	WPI1153	WPI1154	WPI1155	WPI1156	WPI1157	WPI1158	WPI1159	WPI1160	WPI1161	WPI1162	WPI1163	WPI1164	WPI1165	WPI1166	WPI1167	WPI1168	WPI1169	WPI1170	WPI1171	WPI1172	WPI1173	WPI1174	WPI1175	WPI1176	WPI1177	WPI1178	WPI1179	WPI1180	WPI1181	WPI1182	WPI1183	WPI1184	WPI1185	WPI1186	WPI1187	WPI1188	WPI1189	WPI1190	WPI1191	WPI1192	WPI1193	WPI1194	WPI1195	WPI1196	WPI1197	WPI1198	WPI1199	WPI1200	WPI1201	WPI1202	WPI1203	WPI1204	WPI1205	WPI1206	WPI1207	WPI1208	WPI1209	WPI1210	WPI1211	WPI1212

Η σημασία των attributes στο Houdini είναι ιδιαίτερα μεγάλη, καθώς αποτελούν το κύριο μέσο μέσω του οποίου μεταφέρονται δεδομένα από κόμβο σε κόμβο. Σε αντίθεση με άλλα λογισμικά όπου πολλές πληροφορίες αποθηκεύονται εσωτερικά σε συγκεκριμένα εργαλεία, στο Houdini τα περισσότερα δεδομένα παραμένουν προσβάσιμα και μπορούν να τροποποιηθούν οποιαδήποτε στιγμή μέσα στο δίκτυο.

Τα attributes δημιουργούνται, αποθηκεύονται και καλούνται από τον χρήστη σε οποιοδήποτε γεωμετρικό στοιχείο και σε οποιοδήποτε άλλο network εντός του προγράμματος. Για παράδειγμα, υπολογίζοντας το πάχος μιας γεωμετρίας μέσω ενός attribute στο γεωμετρικό επίπεδο των SOPs, ο χρήστης μπορεί να καλέσει το εν λόγω attribute στο Rendering, μετατρέποντας το σε δείκτη διάθλασης για ημιδιαφανή υλικά ή volumes.

Η δυνατότητα δημιουργίας και τροποποίησης τέτοιων δεδομένων επέτρεψε την ανάπτυξη ενός συστήματος που δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τους ενσωματωμένους μηχανισμούς του Houdini αλλά μπορεί να επεκταθεί σύμφωνα με τις απαιτήσεις της έρευνας.

5.2.2 Vector Operators (VOPs)

Παρόλο που τα attributes αποτελούν τον βασικό μηχανισμό αποθήκευσης πληροφορίας, απαιτείται ένας τρόπος επεξεργασίας και μετασχηματισμού των δεδομένων αυτών. Για τον σκοπό αυτό το Houdini παρέχει το σύστημα των Vector Operators (VOPs).

Τα VOPs αποτελούν ένα οπτικό περιβάλλον προγραμματισμού το οποίο επιτρέπει την ανάπτυξη αλγορίθμων μέσω ενός δικτύου κόμβων, χωρίς να απαιτείται άμεση συγγραφή κώδικα. (SideFX Documentation, 2026)

Κάθε κόμβος εκτελεί μία συγκεκριμένη λειτουργία και μπορεί να:

- διαβάσει attributes,
- εκτελεί μαθηματικές πράξεις,
- μετασχηματίζει δεδομένα,
- δημιουργεί νέα attributes,
- επεξεργάζεται διανύσματα και πίνακες.

Το αποτέλεσμα ενός κόμβου μπορεί να συνδεθεί με την είσοδο ενός άλλου κόμβου, επιτρέποντας τη δημιουργία σύνθετων διαδικασιών επεξεργασίας δεδομένων.

Η φιλοσοφία λειτουργίας των VOPs είναι αντίστοιχη με αυτή που συναντάται στα συστήματα κόμβων τύπου compositing. Αντί όμως να επεξεργάζονται αποκλειστικά

χρωματικές πληροφορίες, τα VOPs μπορούν να λειτουργήσουν πάνω σε οποιοδήποτε είδος δεδομένων. (SideFX Documentation, 2026)

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των VOPs είναι ότι στο παρασκήνιο μετατρέπονται σε κώδικα VEX (Vector Expression Language). Ο χρήστης επομένως αποκτά τα πλεονεκτήματα ενός συστήματος προγραμματισμού υψηλής απόδοσης χωρίς να απαιτείται απαραίτητα η συγγραφή κώδικα.

5.3 Επιλυτές (Solvers)

Ο Solver είναι ένας ιδιαίτερος κόμβος ο οποίος πυρηνικά αποτελεί μία συνάρτηση του χρόνου. Δηλαδή, έχει την δυνατότητα να αξιοποιεί σαν input την κατάσταση του συστήματος σε προηγούμενα καρέ και να υπολογίζει την μεταβολή της. Επιπλέον, ένας solver δεν περιορίζεται από το timeline αλλά μπορεί να εκτελείται και σε υπο-καρέ (subframes). Αυτό του δίνει την δυνατότητα να εκτελεί υπολογισμούς με μεγαλύτερη ακρίβεια. (SideFX Documentation, 2026)

Κάθε προσομοίωση είναι χτισμένη βάση των solvers. Η κατάσταση των σωματιδίων ή του πλέγματος είναι άρικτα συνδεδεμένη με την μνήμη των προηγούμενων θέσεων και δεδομένων στις εν λόγω θέσεις. Επίσης η σταθερότητα οποιουδήποτε υπολογιστικά φορτισμένου συστήματος εξαρτάται από τα υπο-καρέ του χρόνου, κατα βάση εξαιτίας της απρόβλεπτης φύσης των δυνάμεων και των παραμέτρων που αλλάζουν σε ραγδαίο βαθμό. Για παράδειγμα, αν από το καρέ 1 στο καρέ 2 ένα σωματίδιο, λόγω της μεγάλης ταχύτητάς του καταλήξει από μία μακρινή θέση σχετικά με την επιφάνεια ενός στερεού, σε μία θέση εντός του στερεού, ο υπολογισμός της σύγκρουσης τους δεν προλαβαίνει να εκτελεστεί εντός του χρόνου αυτού του ενός καρέ. Στην προκείμενη περίπτωση, η διαίρεση αυτού του καρέ σε υπο-καρέ είναι απαραίτητη για να εξομαλυνθεί η κίνηση και η ταχύτητα και να προλάβει το σύστημα να υλοποιήσει τις απαραίτητες πράξεις. (SideFX Documentation, 2026)

5.3.1 Επιλυτής FLIP (FLIP Solver)

Ο FLIP Solver (Fluid Implicit Particle Solver) αποτελεί έναν εξειδικευμένο επιλυτή προσομοίωσης ρευστών, σχεδιασμένο για την επίλυση των εξισώσεων Navier–Stokes μέσω

ενός υβριδικού μοντέλου που συνδυάζει σωματίδια και πλέγμα υπολογισμού. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η μέθοδος FLIP ανήκει στην κατηγορία των υβριδικών Eulerian–Lagrangian προσεγγίσεων, αξιοποιώντας τα πλεονεκτήματα τόσο των σωματιδιακών όσο και των πλεγματικών μεθόδων. Η αρχιτεκτονική αυτή επιτρέπει την αποτελεσματική προσομοίωση σύνθετων φαινομένων ροής, διατηρώντας παράλληλα υψηλό βαθμό σταθερότητας και ακρίβειας.

Παρότι ο FLIP Solver παρέχει στον χρήστη ένα εκτεταμένο σύνολο εργαλείων και παραμέτρων για τον έλεγχο της συμπεριφοράς του υγρού, ο βασικός του ρόλος παραμένει η αριθμητική επίλυση της κίνησης και της μεταβολής της ορμής του συστήματος. Σε κάθε χρονικό βήμα της προσομοίωσης, τα σωματίδια μεταφέρουν πληροφορίες όπως η θέση, η ταχύτητα και η μάζα τους, ενώ οι πληροφορίες αυτές προβάλλονται προσωρινά στο υπολογιστικό πλέγμα. Πάνω στο πλέγμα πραγματοποιούνται οι βασικοί υπολογισμοί που σχετίζονται με τη δυναμική του ρευστού, όπως η εφαρμογή δυνάμεων, η επίλυση της πίεσης και η επιβολή των φυσικών περιορισμών του συστήματος. (SideFX Documentation, 2026)

Κεντρικό στοιχείο της λειτουργίας του solver αποτελεί η συνεχής ανταλλαγή πληροφορίας μεταξύ των σωματιδίων και του πλέγματος. Η ορμή των σωματιδίων μεταφέρεται στα αντίστοιχα κελιά του πλέγματος, όπου δημιουργούνται τα πεδία (fields) που περιγράφουν τη συνολική κατάσταση του ρευστού. Στη συνέχεια, μετά την ολοκλήρωση των υπολογισμών στο πλέγμα, οι ενημερωμένες τιμές επιστρέφουν στα σωματίδια, τα οποία συνεχίζουν να μεταφέρουν την πληροφορία κατά την εξέλιξη της προσομοίωσης. Η διαδικασία αυτή επιτρέπει στο σύστημα να συνδυάζει τη λεπτομέρεια και την ακρίβεια των σωματιδίων με τη σταθερότητα που προσφέρει η επίλυση σε πλέγμα. (SideFX Documentation, 2026)

Ένας από τους σημαντικότερους υπολογισμούς που πραγματοποιούνται στο επίπεδο του πλέγματος είναι η επίλυση της μη-συμπίεστότητας του ρευστού. Για να διατηρηθεί η φυσική συμπεριφορά ενός ασυμπίεστου υγρού, όπως η μπογιά, ο solver υπολογίζει ένα πεδίο πίεσης το οποίο διορθώνει το πεδίο ταχυτήτων και εξασφαλίζει ότι ο όγκος του υγρού παραμένει πρακτικά σταθερός. Η διαδικασία αυτή αποτελεί τον πυρήνα της επίλυσης των εξισώσεων Navier–Stokes και είναι υπεύθυνη για τη ρεαλιστική αναπαράσταση της ροής, της αλληλεπίδρασης με εμπόδια και της συνολικής δυναμικής συμπεριφοράς του υγρού. (SideFX Documentation, 2026)

Κατά συνέπεια, ο FLIP Solver μπορεί να θεωρηθεί ως ένα σύστημα συνεχούς ανταλλαγής και επεξεργασίας πληροφορίας μεταξύ σωματιδίων και πεδίων πλέγματος, το οποίο επιλύει

τη μεταφορά ορμής, την επίδραση των εξωτερικών δυνάμεων και τους περιορισμούς μη-συμπίεστότητας. Η φιλοσοφία αυτή τον καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλο για την προσομοίωση πολύπλοκων ρευστών υψηλού ιξώδους, όπως οι καλλιτεχνικές μπογιές, όπου απαιτείται ταυτόχρονα διατήρηση λεπτομερειών, σταθερότητα και δυνατότητα ενσωμάτωσης πρόσθετων φυσικών μηχανισμών, όπως η ιξωδοελαστικότητα και οι μη-Νευτώνειες ιδιότητες.

5.3.2 Μικρο-επιλυτές (Microsolvers)

Στο πλαίσιο του περιβάλλοντος δυναμικών προσομοιώσεων του Houdini, οι microsolvers αποτελούν εξειδικευμένους κόμβους που επιτελούν επιμέρους υπολογιστικές λειτουργίες απαραίτητες για την επίλυση φυσικών φαινομένων. (SideFX Documentation, 2026)

Σε αντίθεση με τους ολοκληρωμένους επιλυτές, οι οποίοι συγκεντρώνουν πολλαπλές διαδικασίες σε μία ενιαία δομή, κάθε microsolver είναι υπεύθυνος για την εκτέλεση μιας συγκεκριμένης μαθηματικής πράξης ή σταδίου της προσομοίωσης. Η διαδικαστική σύνδεση και ο συνδυασμός διαφορετικών microsolvers επιτρέπουν τη δημιουργία πιο πολύπλοκων συστημάτων επίλυσης, όπως οι επιλύτες Smoke και Pyro του Houdini. Επιπλέον, ορισμένοι από αυτούς τους κόμβους είναι υλοποιημένοι ως Houdini Digital Assets (HDAs), δηλαδή ως επαναχρησιμοποιήσιμες διαδικαστικές δομές που ενσωματώνουν εσωτερικά δίκτυα απλούστερων microsolvers. (Claes, 2009)

Η δυνατότητα αυτή ανοίγει τον δρόμο για τη δημιουργία σύνθετων διαδικαστικών εργαλείων που συνδυάζουν διαφορετικές φυσικές προσεγγίσεις.

Η σημασία των microsolvers για την παρούσα εργασία έγκειται κυρίως στη φιλοσοφία σχεδιασμού που εισάγουν. Αντί η πολύπλοκη σχέση των ιδιοτήτων της μπογιάς να αντιμετωπίζεται ως ένα ενιαίο και αδιαφανές πρόβλημα με την χρήση μονολιθικού επιλυτή και μιας σειράς παραμέτρων, αποσυντίθεται σε μικρότερες, ανεξάρτητες διαδικασίες που μπορούν να σχεδιαστούν, να αξιολογηθούν και να βελτιστοποιηθούν ξεχωριστά.

Η προσέγγιση αυτή συμβάλλει σημαντικά στην ανάπτυξη ενός solver που είναι ταυτόχρονα ευέλικτος, επεκτάσιμος και καλλιτεχνικά ελεγχόμενος, χαρακτηριστικά που αποτελούν βασικούς στόχους της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

5.4 LOPs και USD

Τα τελευταία χρόνια, η αυξανόμενη πολυπλοκότητα των παραγωγών οπτικών εφέ, animation και τρισδιάστατου περιεχομένου οδήγησε στην ανάγκη ανάπτυξης νέων εργαλείων για τη διαχείριση μεγάλων σκηνών και τη συνεργασία πολλών χρηστών πάνω στα ίδια δεδομένα. Μία από τις σημαντικότερες εξελίξεις προς αυτή την κατεύθυνση ήταν η δημιουργία του Universal Scene Description (USD) από την Pixar, καθώς και η ενσωμάτωσή του στο Houdini μέσω του περιβάλλοντος LOPs (Lighting Operators).

Η κατανόηση των LOPs και του USD είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς αποτελούν τη σύγχρονη προσέγγιση της βιομηχανίας για τη διαχείριση σύνθετων σκηνών και αποτελούν βασικό στοιχείο των σύγχρονων production pipelines.

5.4.1 Universal Scene Description (USD)

Το **USD (Universal Scene Description)** είναι ένα ανοιχτό πλαίσιο περιγραφής και διαχείρισης τρισδιάστατων σκηνών που αναπτύχθηκε από την Pixar με σκοπό να αντιμετωπίσει τις ανάγκες μεγάλων παραγωγών animation. (Bolstad, 2019)

Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά αρχεία τρισδιάστατης γεωμετρίας, το USD δεν λειτουργεί απλώς ως μορφή αποθήκευσης δεδομένων. Αντίθετα, αποτελεί ένα ολοκληρωμένο σύστημα περιγραφής σκηνών. (SideFX Documentation, 2026)

Ουσιαστικά, το USD λειτουργεί ως μία ενιαία γλώσσα περιγραφής όλων των στοιχείων μιας παραγωγής. (SideFX Documentation, 2026)

Η βασική φιλοσοφία του συστήματος βασίζεται στην έννοια της σύνθεσης (composition). Μία σκηνή δεν χρειάζεται να αποθηκεύεται ως ένα ενιαίο αρχείο. Αντίθετα, μπορεί να δημιουργείται δυναμικά μέσω του συνδυασμού πολλών μικρότερων αρχείων και επιπέδων πληροφορίας. (Bolstad, 2019)

Κατά τη φόρτωση της σκηνής, το USD συνθέτει όλες αυτές τις πληροφορίες σε μία ενιαία αναπαράσταση.

Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει σε διαφορετικά τμήματα μιας παραγωγής να εργάζονται ταυτόχρονα πάνω στα ίδια assets χωρίς να δημιουργούνται συγκρούσεις μεταξύ των δεδομένων.

5.4.2 Lighting Operators (LOPs)

Στο Houdini, η επεξεργασία USD δεδομένων πραγματοποιείται μέσω των LOP Networks. Η ονομασία LOP προέρχεται από τον όρο Lighting Operators αν και στην πράξη οι LOPs χρησιμοποιούνται για πολύ περισσότερες λειτουργίες από τον φωτισμό.

Τα LOP Networks αποτελούν το διαδικαστικό περιβάλλον εργασίας του Houdini για τη δημιουργία και επεξεργασία USD σκηνών. (SideFX Documentation, 2026)

Όπως τα SOP Networks λειτουργούν πάνω σε γεωμετρία, έτσι και τα LOP Networks λειτουργούν πάνω σε USD δεδομένα. (SideFX Documentation, 2026)

Κάθε κόμβος τροποποιεί ή επεκτείνει τη σκηνή χωρίς να καταστρέφει τα δεδομένα που προηγήθηκαν.

Η φιλοσοφία αυτή είναι πλήρως συμβατή με το procedural workflow που χαρακτηρίζει το Houdini.

5.4.3 Solaris

Το περιβάλλον εργασίας των LOPs στο Houdini είναι γνωστό ως Solaris και αποτελεί ουσιαστικά το USD context του Houdini.

Η ανάπτυξη του Solaris αποτέλεσε μία από τις σημαντικότερες αλλαγές στις πρόσφατες εκδόσεις του Houdini, καθώς επέτρεψε στο λογισμικό να ενσωματωθεί πλήρως στα σύγχρονα USD pipelines της βιομηχανίας. (SideFX Documentation, 2026)

Μέσω του Solaris, μία σκηνή μπορεί να περιέχει δεδομένα που προέρχονται από:

- SOP Networks,
- simulations,
- εξωτερικά DCC εργαλεία,
- αρχεία USD άλλων εφαρμογών.

Η ενοποίηση αυτή επιτρέπει την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ διαφορετικών λογισμικών με σημαντικά μικρότερη απώλεια πληροφορίας.

5.5 TOPs και PDG

Καθώς οι σύγχρονες παραγωγές οπτικών εφέ και τρισδιάστατου περιεχομένου γίνονται ολοένα και πιο σύνθετες, η ανάγκη για αυτοματοποίηση διαδικασιών και αποτελεσματική

διαχείριση μεγάλου όγκου εργασιών αποκτά ιδιαίτερη σημασία. Για την αντιμετώπιση αυτών των απαιτήσεων, το Houdini εισάγει το σύστημα TOPs (Task Operators) και το πλαίσιο PDG (Procedural Dependency Graph), τα οποία επιτρέπουν τη διαδικαστική οργάνωση, διαχείριση και εκτέλεση πολύπλοκων workflows. (SideFX Documentation, 2026)

Σε αντίθεση με τα SOPs, τα οποία επεξεργάζονται γεωμετρία, ή τα DOPs, τα οποία διαχειρίζονται φυσικές προσομοιώσεις, τα TOPs δεν λειτουργούν άμεσα πάνω σε δεδομένα τρισδιάστατης σκηνής. Αντίθετα, λειτουργούν σε ένα υψηλότερο επίπεδο αφαίρεσης, διαχειριζόμενα εργασίες, εξαρτήσεις και ακολουθίες εκτέλεσης.

Με απλά λόγια, τα TOPs επιτρέπουν στο Houdini να οργανώνει και να αυτοματοποιεί σύνθετες διαδικασίες παραγωγής, όπως:

- εκτέλεση πολλαπλών simulations,
- δημιουργία παραλλαγών ενός asset,
- μαζικό rendering,
- επεξεργασία δεδομένων,
- παραγωγή cache αρχείων,
- αυτοματοποιημένες διαδικασίες pipeline.

Η φιλοσοφία αυτή μετατρέπει το Houdini από ένα απλό εργαλείο δημιουργίας περιεχομένου σε μία ολοκληρωμένη πλατφόρμα διαχείρισης παραγωγής.

5.5.1 Procedural Dependency Graph (PDG)

Στον πυρήνα των TOP Networks βρίσκεται το Procedural Dependency Graph (PDG).

Το PDG αποτελεί ένα σύστημα που περιγράφει τις σχέσεις εξάρτησης μεταξύ διαφορετικών εργασιών. Κάθε εργασία αναπαρίσταται ως ένας κόμβος στο γράφημα, ενώ οι συνδέσεις μεταξύ των κόμβων καθορίζουν τη σειρά με την οποία πρέπει να εκτελεστούν οι διαδικασίες. (SideFX Documentation, 2026)

Η βασική ιδέα είναι ότι μία εργασία μπορεί να ξεκινήσει μόνο όταν έχουν ολοκληρωθεί οι εργασίες από τις οποίες εξαρτάται.

Σε ένα παραδοσιακό workflow ο χρήστης θα έπρεπε να εκτελέσει τα παραπάνω βήματα χειροκίνητα. Με το PDG, οι εξαρτήσεις αυτές ορίζονται μία φορά και το σύστημα αναλαμβάνει αυτόματα τη διαχείριση της διαδικασίας.

Η προσέγγιση αυτή μειώνει σημαντικά τον χρόνο παραγωγής και περιορίζει την πιθανότητα ανθρώπινου λάθους.

5.6 CHOPs και Ενσωμάτωση Σημάτων

Ένα από τα λιγότερο γνωστά αλλά ιδιαίτερα ισχυρά περιβάλλοντα του Houdini είναι το σύστημα CHOPs (Channel Operators). Τα CHOPs έχουν σχεδιαστεί για την επεξεργασία χρονικά μεταβαλλόμενων δεδομένων και αποτελούν το αντίστοιχο των SOPs για σήματα και καμπύλες μεταβολής στο χρόνο. Παρόλο που αρχικά αναπτύχθηκαν κυρίως για εφαρμογές animation και motion processing, σήμερα χρησιμοποιούνται σε ένα ευρύ φάσμα διαδικασιών που περιλαμβάνουν ανάλυση δεδομένων, επεξεργασία αισθητήρων, procedural animation και σύνδεση εξωτερικών συστημάτων με το Houdini.

Η βασική φιλοσοφία των CHOPs είναι ότι κάθε πληροφορία που μεταβάλλεται χρονικά μπορεί να αναπαρασταθεί ως ένα ή περισσότερα κανάλια (channels). Ένα κανάλι αποτελεί ουσιαστικά μία ακολουθία τιμών οι οποίες αντιστοιχούν σε διαδοχικά χρονικά δείγματα. Με τον τρόπο αυτό, οποιαδήποτε μεταβλητή εξελίσσεται στον χρόνο μπορεί να αντιμετωπιστεί ως σήμα προς επεξεργασία. (SideFX Documentation, 2026)

Η αναπαράσταση αυτή επιτρέπει την εφαρμογή τεχνικών που προέρχονται από τον χώρο της ψηφιακής επεξεργασίας σημάτων και του animation πάνω σε οποιοδήποτε είδος δεδομένων.

5.6.1 Η έννοια του Καναλιού

Στα CHOPs, κάθε μεταβλητή αποθηκεύεται ως ένα channel. Ένα channel περιέχει μία σειρά δειγμάτων κατανεμημένων στον χρόνο, επιτρέποντας την παρακολούθηση της εξέλιξης μιας παραμέτρου από frame σε frame. (SideFX Documentation, 2026)

Για παράδειγμα, η κίνηση ενός αντικειμένου στον τρισδιάστατο χώρο μπορεί να αποθηκευτεί ως τρία ξεχωριστά κανάλια για τους τρεις άξονες του.

Τα κανάλια αυτά μπορούν στη συνέχεια να υποστούν επεξεργασία ανεξάρτητα ή συνδυαστικά, δημιουργώντας σύνθετες διαδικασίες ελέγχου κίνησης.

5.6.2 Επεξεργασία σημάτων

Η σημαντικότερη δυνατότητα των CHOPs είναι η επεξεργασία των καναλιών μέσω ειδικών κόμβων.

Οι λειτουργίες αυτές περιλαμβάνουν:

- φιλτράρισμα θορύβου,
- εξομάλυνση καμπυλών,
- καθυστέρηση σημάτων,
- ενίσχυση ή απόσβεση μεταβολών,
- ανάμειξη πολλαπλών καναλιών,
- μετασχηματισμό συχνοτήτων,
- επαναδειγματοληψία δεδομένων.

(SideFX Documentation, 2026)

Με τον τρόπο αυτό το Houdini μπορεί να αντιμετωπίσει μία χρονική ακολουθία τιμών ως μαθηματικό σήμα και να εφαρμόσει τεχνικές αντίστοιχες με αυτές που χρησιμοποιούνται στην επεξεργασία ήχου ή στη θεωρία ελέγχου. (SideFX Documentation, 2026)

Για παράδειγμα, εάν ένα animation παρουσιάζει ανεπιθύμητες απότομες κινήσεις, μπορεί να εφαρμοστεί φίλτρο εξομάλυνσης ώστε οι μεταβολές να γίνουν πιο φυσικές.

5.6.3 Εισαγωγή εξωτερικών δεδομένων

Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των CHOPs είναι η δυνατότητα εισαγωγής δεδομένων από εξωτερικές πηγές.

Τα δεδομένα αυτά μπορεί να προέρχονται από:

- αρχεία CSV,
- αρχεία motion capture,
- MIDI συσκευές,
- αισθητήρες,
- συστήματα παρακολούθησης κίνησης,
- εξωτερικά λογισμικά.

(SideFX Documentation, 2026)

Η δυνατότητα αυτή επιτρέπει στο Houdini να λειτουργεί ως κόμβος ενοποίησης δεδομένων από πολλαπλά συστήματα.

Σε εφαρμογές διαδραστικής τέχνης ή virtual production, η λειτουργία αυτή χρησιμοποιείται συχνά για τη σύνδεση πραγματικών συσκευών με διαδικαστικά συστήματα προσομοίωσης. Συμπερασματικά, τα CHOPs αποτελούν το εξειδικευμένο περιβάλλον επεξεργασίας χρονικά μεταβαλλόμενων δεδομένων του Houdini. Μέσω της διαχείρισης καναλιών και σημάτων, προσφέρουν τη δυνατότητα ανάλυσης, μετασχηματισμού και ενσωμάτωσης πληροφοριών που εξελίσσονται στον χρόνο. Η σύνδεσή τους με τα υπόλοιπα συστήματα του λογισμικού επιτρέπει τη δημιουργία προηγμένων διαδικαστικών workflows και διαδραστικών εφαρμογών, καθιστώντας τα ένα ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο τόσο για τεχνικούς καλλιτέχνες όσο και για ερευνητές που αναπτύσσουν σύνθετα συστήματα προσομοίωσης.

5.7 COPs και Επεξεργασία Εικόνων

Το περιβάλλον COPs (Compositing Operators) αποτελεί το σύστημα επεξεργασίας εικόνας του Houdini και χρησιμοποιείται για τη δημιουργία, τροποποίηση και ανάλυση δισδιάστατων δεδομένων. Αν και το Houdini είναι κυρίως γνωστό για τις δυνατότητές του στην τρισδιάστατη μοντελοποίηση και προσομοίωση, το COP context προσφέρει ένα πλήρες node-based περιβάλλον για εργασίες που σχετίζονται με εικόνες, textures, masks και compositing. (SideFX Documentation, 2026)

Η φιλοσοφία λειτουργίας των COPs ακολουθεί τη γενικότερη διαδικαστική προσέγγιση του Houdini. Αντί η επεξεργασία μιας εικόνας να πραγματοποιείται μέσω μιας σειράς καταστροφικών ενεργειών, κάθε μετασχηματισμός αναπαρίσταται ως ένας κόμβος μέσα σε ένα δίκτυο. Με τον τρόπο αυτό διατηρείται ολόκληρο το ιστορικό επεξεργασίας, επιτρέποντας την εύκολη τροποποίηση οποιουδήποτε σταδίου της διαδικασίας.

Τα COPs λειτουργούν πάνω σε δισδιάστατα δεδομένα, τα οποία συνήθως αντιστοιχούν σε:

- εικόνες raster,
- texture maps,
- height maps,
- masks,
- render passes,

- sequence εικόνων,
- procedural εικόνες.

(SideFX Documentation, 2026)

Η δυνατότητα αυτή επιτρέπει στο Houdini να καλύπτει όχι μόνο τις ανάγκες δημιουργίας γεωμετρίας και προσομοιώσεων αλλά και μέρος της διαδικασίας επεξεργασίας εικόνας που ακολουθεί.

Η node-based φύση του συστήματος επιτρέπει την εύκολη οργάνωση και επαναχρησιμοποίηση των διαδικασιών αυτών.

Συμπερασματικά, τα COPs (Compositing Operators) αποτελούν το σύστημα επεξεργασίας εικόνας του Houdini και προσφέρουν ένα πλήρως διαδικαστικό περιβάλλον για τη δημιουργία, ανάλυση και τροποποίηση δισδιάστατων δεδομένων. Μέσω της σύνδεσής τους με τα υπόλοιπα contexts του λογισμικού, επιτρέπουν την ανάπτυξη σύνθετων workflows που συνδυάζουν προσομοιώσεις, textures και compositing διαδικασίες, καθιστώντας τα ένα σημαντικό εργαλείο για εφαρμογές γραφικών υπολογιστών και ψηφιακής ζωγραφικής.

5.8 VEX και Python

Στον πυρήνα της αρχιτεκτονικής του Houdini και της ικανότητάς του να υποστηρίζει τη δημιουργία σύνθετων και υψηλής πολυπλοκότητας προσομοιώσεων βρίσκονται οι δύο γλώσσες προγραμματισμού που το λογισμικό διαθέτει στους χρήστες του. Η ύπαρξη αυτών των γλωσσών επιτρέπει την εκτεταμένη παραμετροποίηση των εργαλείων του προγράμματος, καθώς και την ανάπτυξη προσαρμοσμένων διαδικασιών που μπορούν να επεκτείνουν σημαντικά τις εγγενείς δυνατότητές του. Μέσω αυτών, ο χρήστης είναι σε θέση να ελέγχει με μεγαλύτερη ακρίβεια τη συμπεριφορά γεωμετρικών, φυσικών και διαδικαστικών συστημάτων, προσαρμόζοντας τη λειτουργία τους στις απαιτήσεις κάθε έργου.

Μία από τις σημαντικότερες γλώσσες που ενσωματώνονται στο Houdini είναι η VEX (Vector Expressions). Η VEX αποτελεί μια εξειδικευμένη γλώσσα προγραμματισμού, η οποία βασίζεται συντακτικά στη γλώσσα C και έχει σχεδιαστεί ειδικά για την αποδοτική επεξεργασία δεδομένων στο περιβάλλον του Houdini. Παρέχει ένα εκτεταμένο σύνολο ενσωματωμένων συναρτήσεων και εργαλείων που επιτρέπουν την επεξεργασία γεωμετρίας, χαρακτηριστικών (attributes), διανυσμάτων, όγκων, σωματιδίων και πολλών ακόμη τύπων

δεδομένων που χρησιμοποιούνται σε διαδικαστικές ροές εργασίας και προσομοιώσεις. (SideFX Documentation, 2026)

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της VEX είναι η ιδιαίτερα υψηλή υπολογιστική της απόδοση, η σχετική ευκολία εκμάθησης και χρήσης της, καθώς και η ευελιξία που προσφέρει στον προγραμματισμό σύνθετων λειτουργιών. Χάρη στη βελτιστοποιημένη υλοποίησή της, η VEX μπορεί να εκτελεί πολύπλοκους υπολογισμούς σε μεγάλο όγκο δεδομένων με εξαιρετική ταχύτητα, γεγονός που την καθιστά ιδανική για εφαρμογές που σχετίζονται με προσομοιώσεις, επεξεργασία γεωμετρίας και διαδικαστική παραγωγή περιεχομένου. Παράλληλα, η απλή σύνταξή της και η στενή ενσωμάτωσή της στο οικοσύστημα του Houdini επιτρέπουν στους χρήστες να αναπτύσσουν γρήγορα αποδοτικές λύσεις, διατηρώντας υψηλό βαθμό ελέγχου και προσαρμοστικότητας κατά τη δημιουργία σύνθετων ψηφιακών εφέ και φυσικών προσομοιώσεων. (SideFX Documentation, 2026)

Παράλληλα, η ύπαρξη της γλώσσας Python επιτρέπει λόγω της ευκολίας της στην γρήγορη ανάπτυξη πρωτότυπων εργαλείων καθώς και στον εκτενή πειραματισμό χάριν στο τεράστιο εύρος από βιβλιοθήκες που παρέχει.

5.9 Recipes, HDAs και HDK

Τέλος, το Houdini παρέχει στον χρήστη μια σειρά από ισχυρούς μηχανισμούς που έχουν σχεδιαστεί με σκοπό την επέκταση των δυνατοτήτων του λογισμικού και την ενίσχυση της διαδικαστικής φιλοσοφίας που το χαρακτηρίζει. Μέσω αυτών των εργαλείων καθίσταται δυνατή η αποτελεσματικότερη διαχείριση πολύπλοκων έργων, η τυποποίηση των διαδικασιών ανάπτυξης και η διευκόλυνση της συνεργασίας μεταξύ διαφορετικών χρηστών ή ομάδων παραγωγής.

Ένα από τα εργαλεία αυτά είναι τα Recipes, τα οποία λειτουργούν ως μηχανισμός αποθήκευσης, διαχείρισης και επαναχρησιμοποίησης παραμέτρων και ρυθμίσεων που σχετίζονται με τους κόμβους ενός συστήματος. Μέσω των Recipes, ο χρήστης μπορεί να διατηρεί προκαθορισμένα σύνολα τιμών και παραμέτρων, διασφαλίζοντας ότι οι ρυθμίσεις που χρησιμοποιούνται παραμένουν εντός αποδεκτών και λειτουργικά ορθών ορίων. Η δυνατότητα αυτή συμβάλλει στη μείωση των σφαλμάτων που μπορεί να προκύψουν από λανθασμένες τροποποιήσεις παραμέτρων και επιτρέπει τη διατήρηση της συνέπειας μεταξύ διαφορετικών εκδόσεων ενός έργου. (SideFX Documentation, 2026)

Παράλληλα, τα Recipes διευκολύνουν σημαντικά τον διαμοιρασμό ρυθμίσεων και δεδομένων μεταξύ διαφορετικών χρηστών, επιτρέποντας την εφαρμογή κοινών προτύπων εργασίας σε ολόκληρη την παραγωγική διαδικασία. Με τον τρόπο αυτό, ομάδες καλλιτεχνών και τεχνικών μπορούν να εργάζονται πάνω στα ίδια συστήματα χρησιμοποιώντας προκαθορισμένες και ελεγμένες παραμετροποιήσεις, γεγονός που συμβάλλει στη βελτίωση της συνεργασίας και της αναπαραγωγιμότητας των αποτελεσμάτων. (SideFX Documentation, 2026)

Επιπλέον, παρέχεται η δυνατότητα «κλειδώματος» ολόκληρων συνόλων παραμέτρων και τιμών, επιτρέποντας στους χρήστες να εναλλάσσονται γρήγορα μεταξύ διαφορετικών διαμορφώσεων χωρίς να απαιτείται η χειροκίνητη επαναρύθμιση κάθε επιμέρους στοιχείου. Η δυνατότητα αυτή καθιστά τη διαδικασία δοκιμών και αξιολόγησης διαφορετικών παραλλαγών ενός συστήματος σημαντικά ταχύτερη και αποτελεσματικότερη, ενώ παράλληλα ενισχύει τη σταθερότητα και την επαναληψιμότητα των διαδικαστικών ροών εργασίας που αναπτύσσονται στο περιβάλλον του Houdini.

Επιπρόσθετα, με το σύστημα των HDAs (Houdini Digital Assets) παρέχεται η δυνατότητα διαμοιρασμού όχι μόνο παραμέτρων αλλά ολόκληρων εργαλείων ολοκληρωμένων με προσαρμοσμένο περιβάλλον χρήστη τα οποία μπορούν να είναι δομημένα σαν πακέτα εργαλείων για κάθε χρήστη. (SideFX Documentation, 2026)

Τέλος, το προγραμματιστικό πλαίσιο του Houdini παρέχει ένα ολοκληρωμένο σύστημα API ημι-ανοιχτού τύπου, το οποίο δίνει τη δυνατότητα σε έμπειρους χρήστες να αλλάξουν και να επεκτείνουν οποιοδήποτε κομμάτι του λογισμικού ώστε να εξυπηρετεί καλύτερα τις ανάγκες τους. (SideFX Documentation, 2026)

Κεφάλαιο 6: Εφαρμογή

Στην παρούσα εργασία αξιοποιήθηκε το περιβάλλον του λογισμικού Houdini για την δημιουργία τριών custom solvers οι οποίοι αναλαμβάνουν την διαδικασία προσομοίωσης του πινέλου, της μπογιάς και του καμβά. Ο solver αντιμετωπίζει αυτές τις τρεις διεργασίες σαν ξεχωριστά κομμάτια και ασχολείται με αυτά στην αντίστοιχη σειρά. Αυτό επιτρέπει την υπολογιστική απλούστευση της προσομοίωσης καθώς και την εύκολη αλλαγή και μεταποίηση του καθενός κομματιού.

Επιπλέον, στόχος του διαχωρισμού αυτού αποτελεί και η εναλλαγή των επιμέρους solver με παραμετροποιήσιμα εργαλεία και την δημιουργία ενός framework που θα επιτρέπει σε μια ομάδα ή εναν καλλιτέχνη την συγγραφή εξειδικευμένων κόμβων για διαφορετικές μπογιές, πινέλα και καμβάδες.

Η προσέγγιση αυτή είναι ιδιαίτερα συμβατή με τη διαδικαστική φιλοσοφία του Houdini και διευκολύνει σημαντικά τον πειραματισμό κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης, καθώς επίσης δίνει και δυνατότητα καλλιτεχνικού ελέγχου.

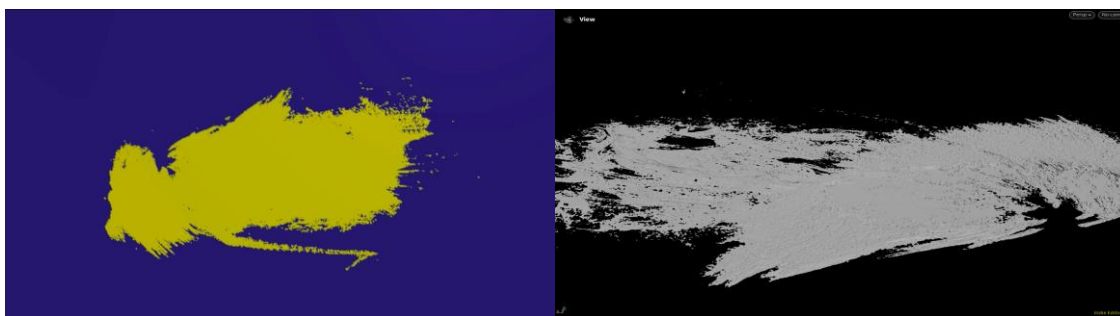
Ο χρήστης μπορεί να επηρεάσει παραμέτρους όπως:

- τη δυσκαμψία του πινέλου,
- την ποσότητα της διαθέσιμης μπογιάς,
- τον ρυθμό μεταφοράς χρώματος,
- την εξάπλωση της πινελιάς,
- την ρεολογική συμπεριφορά της μπογιάς και τα επιμέρους πεδία του ρευστού,
- τη συμπεριφορά του καμβά ως προς την απορρόφηση.

Η αρχιτεκτονική του solver μπορεί επομένως να θεωρηθεί ως μία υβριδική διαδικαστική προσέγγιση, η οποία συνδυάζει:

- φυσική προσομοίωση για το πινέλο,
- επιφανειακή αναπαράσταση για τη μπογιά,
- attribute-driven λογική για τη διαχείριση της αλληλεπίδρασης.

Στην εικόνα 5 φαίνεται το τελικό αποτέλεσμα αυτής της εφαρμογής.



Εικόνα 5 : Η τελική πινελιά μαζί με τα particles του ρευστού και τον paint map solver (αριστερά) και η αντίστοιχη πινελιά ως γεωμετρία (δεξιά)

6.1 Vellum Hair με προσαρμοσμένη δυσκαμψία

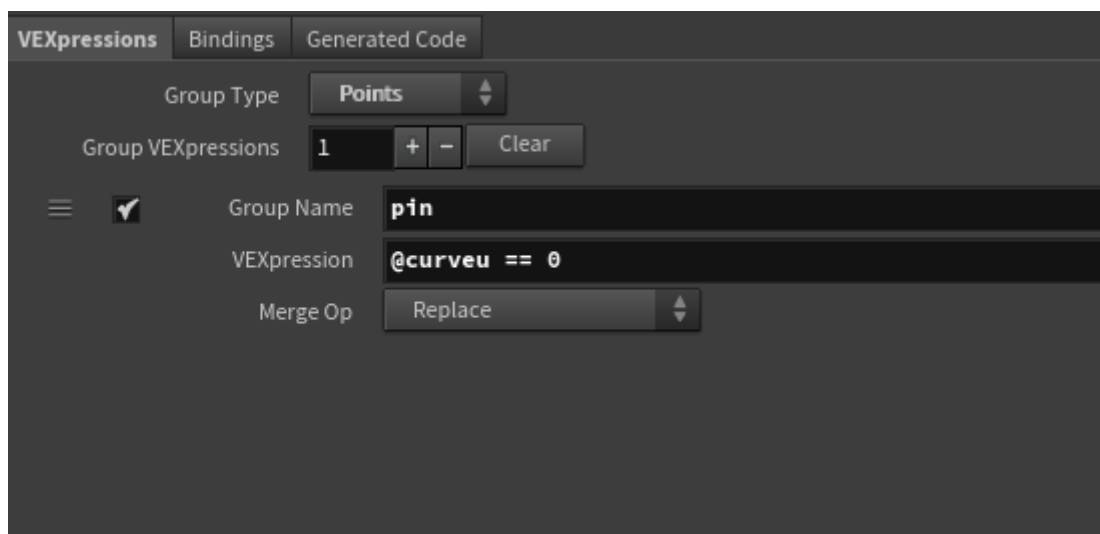
Στην παρούσα εργασία το πινέλο μοντελοποιείται ως ένα σύστημα Vellum Hair, ενός επιλυτή ρευστών που παρέχει το Houdini, το οποίο επιτρέπει την προσομοίωση παραμορφώσιμων τριχών με ελεγχόμενη δυσκαμψία.

Η επιλογή του Vellum βασίζεται στη δυνατότητά του να προσομοιώνει ινώδεις δομές μέσω της μεθοδολογίας Position-Based Dynamics (PBD). Κάθε τρίχα του πινέλου αναπαρίσταται ως μία γραμμή αποτελούμενη από διαδοχικά σημεία, όπως φαίνεται στην εικόνα 6:

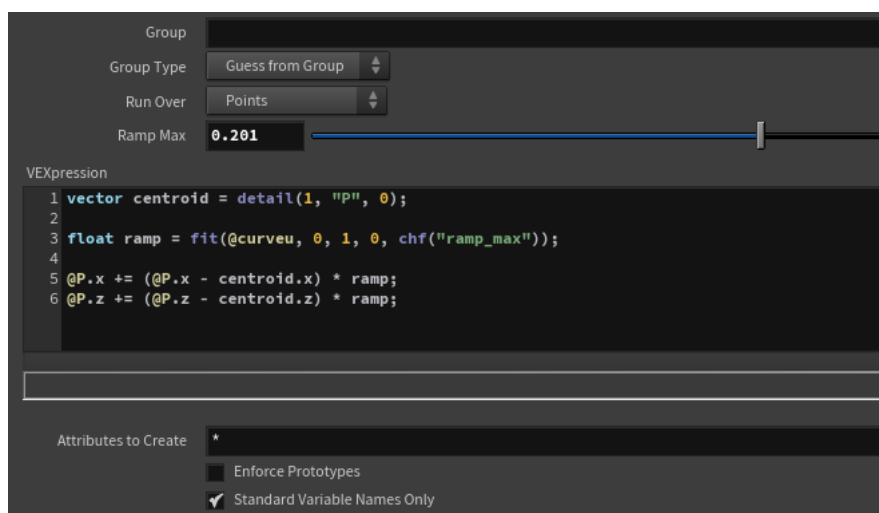
Μεταξύ των σημείων αυτών δημιουργούνται περιορισμοί μήκους και κάμψης, οι οποίοι καθορίζουν τη μηχανική συμπεριφορά του συστήματος.



Εικόνα 6 : Ο σκελετός του πινέλου



Εικόνα 7 : Τα pin constraints που ενώνουν την τρίχα με το πινέλο και μηδενίζουν την κίνηση της



Εικόνα 8 : Το “άνοιγμα” των τριγών του πινέλου χρησιμοποιώντας την γλώσσα VEX και το attribute “curveu” το οποίο προσδίδει τις τιμές 0 έως 1 κατα μήκος μιας γραμμής.

Η διαδικασία κατασκευής του πινέλου ξεκινά με τη δημιουργία ενός συνόλου καμπυλών (curves), οι οποίες τοποθετούνται γύρω από τον άξονα του πινέλου σύμφωνα με την επιθυμητή πυκνότητα και κρατιούνται από αυτόν χάρη σε περιορισμούς τύπου pin, όπως φαίνεται στην εικόνα 7. Η κατανομή αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί διαδικαστικά μέσω scattering πάνω σε μία επιφάνεια αναφοράς, επιτρέποντας τη δημιουργία διαφορετικών τύπων πινέλων βάση της διαδικαστικής μοντελοποίησης καθώς και του ελέγχου στην κατεύθυνση της γεωμετρίας, όπως φαίνεται στην εικόνα 8.

Κάθε καμπύλη μετατρέπεται σε Vellum Hair Constraint Geometry, μέσω του κόμβου Vellum Configure Hair. Στο στάδιο αυτό καθορίζονται οι βασικές μηχανικές ιδιότητες των τριχών.

Η συμπεριφορά του πινέλου εξαρτάται επίσης από τον αριθμό των τριχών που συμμετέχουν στην προσομοίωση. Η αύξηση της πυκνότητας των τριχών οδηγεί σε ομαλότερη επαφή με τον καμβά, ωστόσο συνοδεύεται από αυξημένο υπολογιστικό κόστος.

Κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης του συστήματος πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με διαφορετικές πυκνότητες, από απλά πινέλα με λίγες δεκάδες τρίχες έως πολύ πυκνά συστήματα αποτελούμενα από εκατοντάδες καμπύλες. Παρατηρήθηκε ότι η αύξηση της πυκνότητας βελτιώνει την ομοιομορφία της πινελιάς, αλλά πέρα από ένα συγκεκριμένο όριο οι οπτικές διαφορές γίνονται περιορισμένες σε σχέση με την αύξηση του υπολογιστικού κόστους.

Ένα ακόμη σημαντικό στοιχείο της προσομοίωσης αφορά τις συγκρούσεις μεταξύ των τριχών και του καμβά. Η επιφάνεια ζωγραφικής μετατρέπεται σε collider geometry και εισάγεται στο Vellum Solver μέσω collision constraints. Κατά την επαφή, οι τρίχες αποκρίνονται στις δυνάμεις αντίδρασης της επιφάνειας, οδηγώντας σε παραμορφώσεις που επηρεάζουν άμεσα το αποτύπωμα του πινέλου.

Παρατηρήθηκε ότι η χρυσή τομή στην ρεαλιστικότητα και την ταχύτητα προσομοίωσης επιτεύχθηκε με την χρήση μικρού ποσού αρχικών τριχών (guide hair) και τον μετέπειτα πολλαπλασιασμό τους ως interpolated hair curves, δηλαδή την τοποθέτηση τριχών που δεν προσομοιάζεται η κίνησή τους αλλά παραμορφώνονται βάση των μέσων τιμών τοποθεσίας (point position) των αρχικών guide curves. Αυτό είναι εφικτό λόγω της ομοιομορφίας του καμβά σαν επιφάνεια συγκρούσεων. Στην εικόνα 9 φαίνεται η τελική γεωμετρία.



Εικόνα 9 : Η γεωμετρία του πινέλου που χρησιμοποιήθηκε στην τελική προσομοίωση

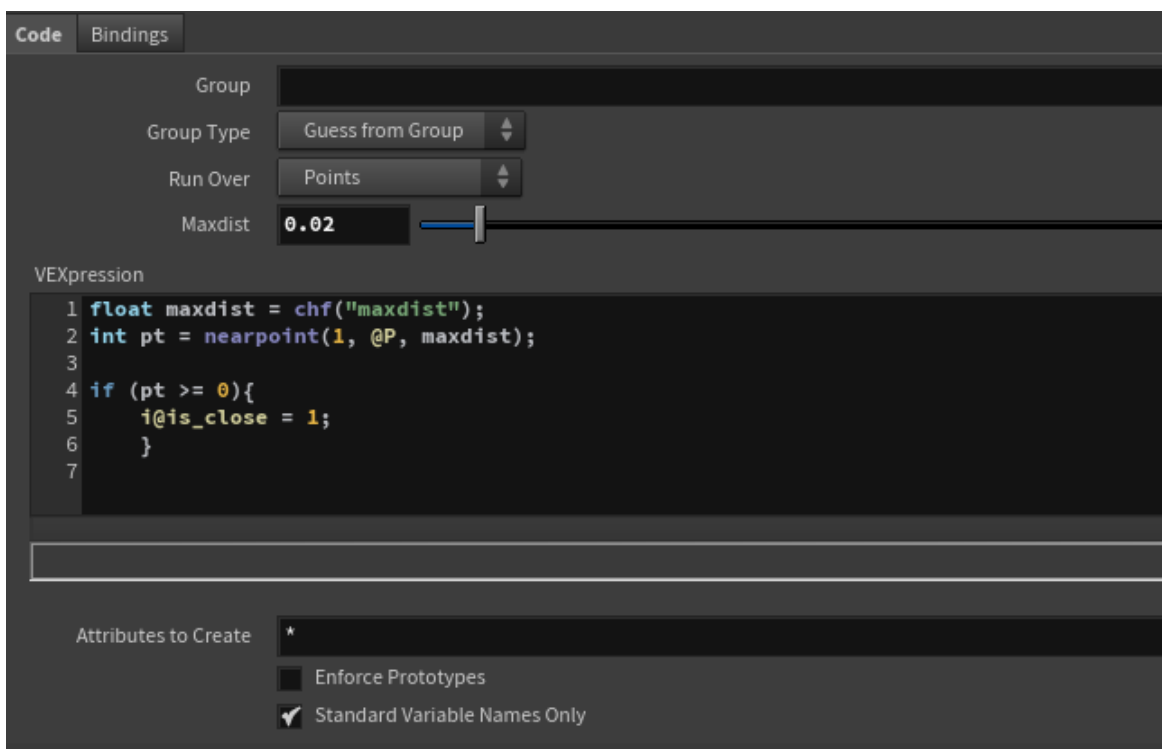
6.2 Το Attribute “is_close”: Ανίχνευση επαφής μεταξύ πινέλου και καμβά

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας υιοθετήθηκε μια προσέγγιση βασισμένη στη δημιουργία ενός προσαρμοσμένου attribute εγγύτητας, το οποίο ονομάστηκε “is_close”. Η ανάπτυξη του συγκεκριμένου μηχανισμού αποσκοπούσε στον αποτελεσματικό εντοπισμό των περιοχών του πινέλου που βρίσκονται σε άμεση επαφή ή σε πολύ μικρή απόσταση από την επιφάνεια ζωγραφικής, ώστε η μεταφορά μπογιάς να πραγματοποιείται μόνο στα σημεία όπου υφίσταται πραγματική αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο συστημάτων.

Η βασική λογική του attribute στηρίζεται στην αξιολόγηση κάθε σημείου που αποτελεί τις τρίχες του πινέλου ως προς την απόστασή του από την επιφάνεια του καμβά. Για κάθε σημείο υπολογίζεται η εγγύτητά του προς τη γεωμετρία της επιφάνειας ζωγραφικής και στη συνέχεια συγκρίνεται με μια προκαθορισμένη τιμή κατωφλίου. Όταν η απόσταση αυτή είναι μικρότερη από το επιλεγμένο όριο, το οποίο στην παρούσα υλοποίηση ορίστηκε στα δύο χιλιοστά, το σημείο χαρακτηρίζεται ως ενεργό. Ως ενεργά θεωρούνται τα σημεία που μπορούν να συμμετέχουν άμεσα στη διαδικασία μεταφοράς μπογιάς, επιτρέποντας έτσι την προσομοίωση της φυσικής επαφής μεταξύ πινέλου και καμβά.

Η συγκεκριμένη προσέγγιση παρουσιάζει το πλεονέκτημα ότι περιορίζει τους υπολογισμούς αποκλειστικά στα σημεία που βρίσκονται εντός της περιοχής αλληλεπίδρασης, αποφεύγοντας την επεξεργασία σημείων τα οποία δεν συμβάλλουν ουσιαστικά στο τελικό αποτέλεσμα. Με τον τρόπο αυτό βελτιώνεται η υπολογιστική αποδοτικότητα του συστήματος, ενώ παράλληλα διατηρείται υψηλός βαθμός ελέγχου ως προς την ακρίβεια της μεταφοράς της μπογιάς.

Η υλοποίηση του μηχανισμού πραγματοποιήθηκε σε επίπεδο SOPs (Surface Operators) με χρήση της γλώσσας VEX, όπως φαίνεται στην εικόνα 10, αξιοποιώντας τις δυνατότητες επεξεργασίας γεωμετρικών δεδομένων που παρέχει το Houdini. Ειδικότερα, για κάθε σημείο του πινέλου υπολογίζεται το πλησιέστερο σημείο της επιφάνειας του καμβά μέσω της συνάρτησης `nearpoint()`, η οποία επιστρέφει το σημείο της γεωμετρίας που βρίσκεται στη μικρότερη δυνατή απόσταση από το εξεταζόμενο στοιχείο. Η πληροφορία αυτή χρησιμοποιείται στη συνέχεια για τον υπολογισμό της πραγματικής απόστασης και την ενημέρωση του χάρτη του attribute “is_close”, όπως αυτός φαίνεται στην εικόνα 11, το οποίο αξιοποιείται μετέπειτα από τα υπόλοιπα μέσα της προσομοίωσης.



Εικόνα 10 : Η δημιουργία του “is_close” attribute με την χρήση της γλώσσας VEX.



Εικόνα 11 : Το “is_close” attribute map. (μώβ για τιμές 0, ρόζ για τιμές 1)

6.3 Το Attribute “load”: Μοντελοποίηση της εξάντλησης της μπογιάς στο πινέλο

Για την αναπαράσταση της διαδικασίας μεταφοράς και σταδιακής εξάντλησης της μπογιάς κατά τη διάρκεια της ζωγραφικής, αναπτύχθηκε ένας προσαρμοσμένος μηχανισμός διαχείρισης χρώματος βασισμένος στο attribute “load”. Το συγκεκριμένο attribute χρησιμοποιείται για την περιγραφή της διαθέσιμης ποσότητας μπογιάς που μεταφέρει κάθε σημείο των τριχών του πινέλου σε μία δεδομένη χρονική στιγμή. Με τον τρόπο αυτό, κάθε σημείο του πινέλου αποκτά τη δική του ανεξάρτητη κατάσταση φόρτισης χρώματος,

επιτρέποντας την ακριβέστερη προσομοίωση της φυσικής συμπεριφοράς ενός πραγματικού πινέλου.

Αρχικά, σε κάθε σημείο των τριχών αποδίδεται μία προκαθορισμένη τιμή του attribute load, η οποία αντιπροσωπεύει την αρχική ποσότητα μπογιιάς που είναι διαθέσιμη προς εναπόθεση στην επιφάνεια ζωγραφικής. Η τιμή αυτή δεν μεταβάλλεται συνεχώς, αλλά μειώνεται μόνο όταν το αντίστοιχο σημείο βρίσκεται σε ενεργή επαφή με τον καμβά. Ο έλεγχος της επαφής βασίζεται άμεσα στο attribute is_close, το οποίο παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα και χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των σημείων που βρίσκονται εντός της ζώνης αλληλεπίδρασης με την επιφάνεια ζωγραφικής.

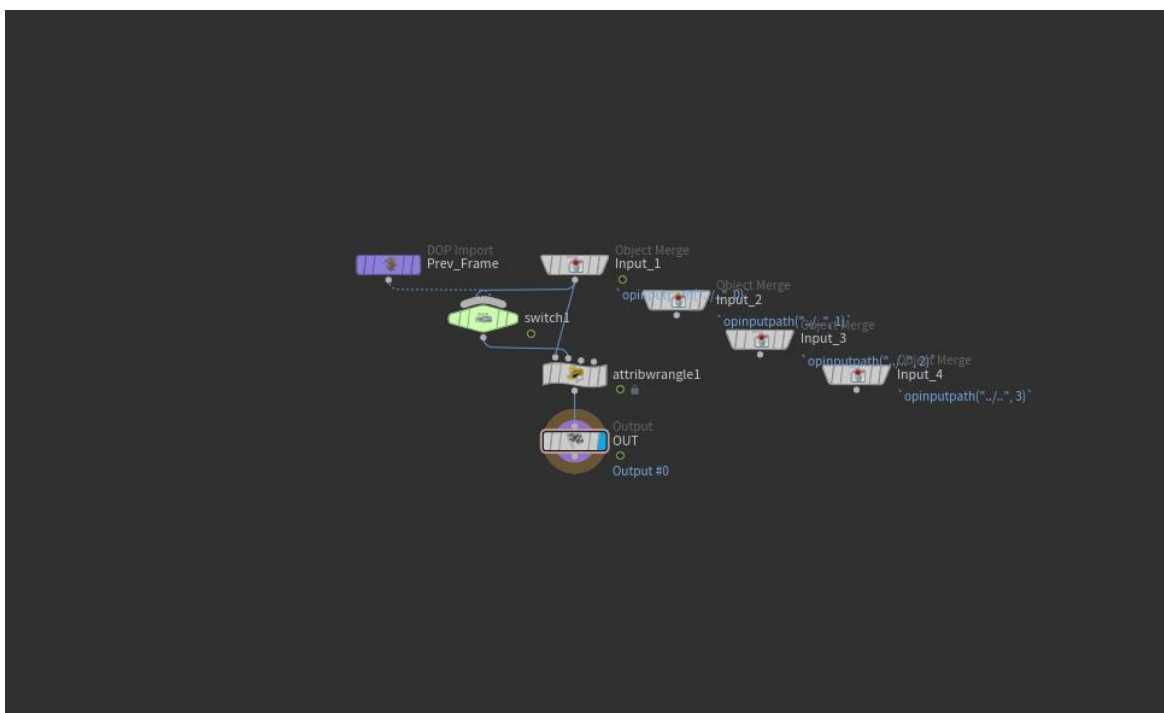
Προκειμένου να προσεγγιστεί με μεγαλύτερη πιστότητα η φυσική διαδικασία μεταφοράς μπογιιάς, αναπτύχθηκε επιπλέον ένας μηχανισμός επίλυσης που λαμβάνει υπόψη τη διάρκεια της επαφής μεταξύ πινέλου και καμβά. Συγκεκριμένα, ο μηχανισμός αξιοποιεί πληροφορίες από προηγούμενα χρονικά βήματα της προσομοίωσης, επιτρέποντας τη διατήρηση της κατάστασης κάθε σημείου στο χρόνο. Η προσέγγιση αυτή εισάγει έναν μηχανισμό ανάδρασης (feedback), σύμφωνα με τον οποίο η μεταφορά μπογιιάς δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τη στιγμιαία επαφή, αλλά και από το πόσο χρόνο παραμένει ένα σημείο σε επαφή με την επιφάνεια. Αυτό φαίνεται στην αλγοριθμική λογική που παρουσιάζεται στην εικόνα 13.

Ως αποτέλεσμα, η ποσότητα μπογιιάς που μεταφέρεται μπορεί να αυξάνεται προοδευτικά όσο παρατείνεται η διάρκεια της επαφής, προσομοιώνοντας τη συμπεριφορά που παρατηρείται κατά τη χρήση πραγματικών πινέλων. Η λειτουργία αυτή επιτρέπει την παραγωγή πιο φυσικών πινελιών, καθώς η εναπόθεση χρώματος γίνεται σταδιακά και όχι με απόλυτα σταθερό ρυθμό.

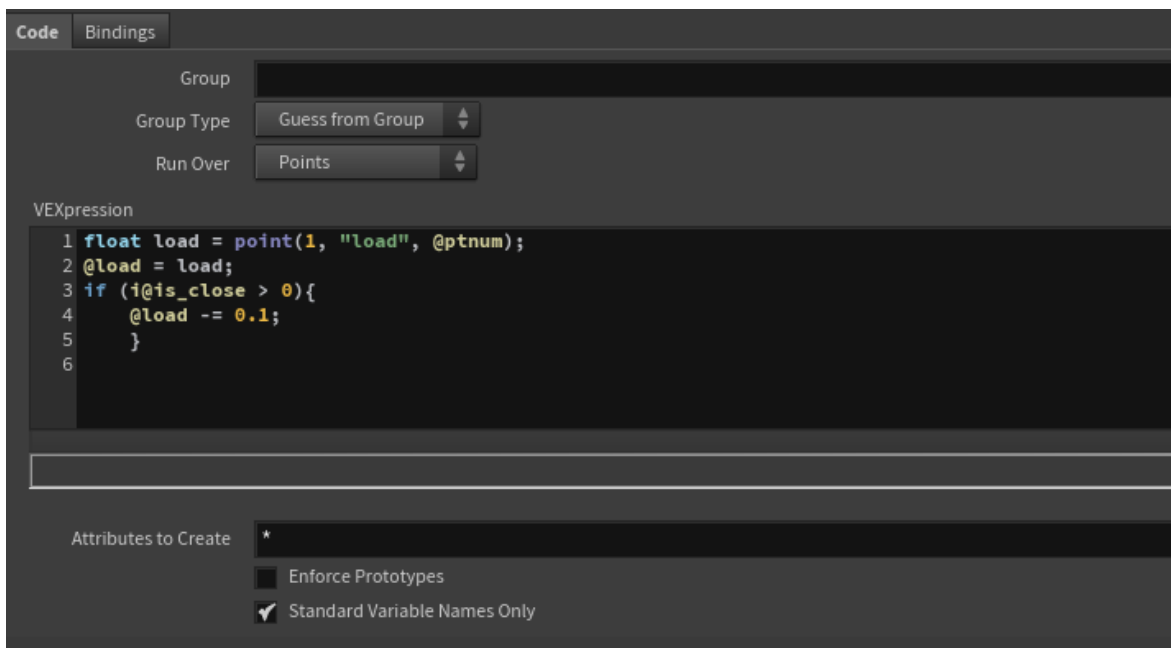
Η υλοποίηση του συστήματος πραγματοποιήθηκε μέσω ενός SOP Solver, ο οποίος παρέχει τη δυνατότητα διατήρησης και ενημέρωσης πληροφοριών μεταξύ διαδοχικών χρονικών βημάτων της προσομοίωσης. Η χρήση του συγκεκριμένου εργαλείου είναι απαραίτητη, καθώς το attribute load αποτελεί μια μεταβλητή κατάσταση που εξαρτάται από τον χρόνο και πρέπει να διατηρεί το ιστορικό των προηγούμενων αλληλεπιδράσεων. Χωρίς τη χρήση ενός μηχανισμού διατήρησης κατάστασης, κάθε χρονικό βήμα θα υπολογιζόταν ανεξάρτητα, γεγονός που θα καθιστούσε αδύνατη την προσομοίωση της σταδιακής κατανάλωσης της μπογιιάς. Αυτό φαίνεται στον προσαρμοσμένο επιλυτή στην εικόνα 12.

Η συγκεκριμένη προσέγγιση παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα ως προς τον ρεαλισμό της προσομοίωσης. Πρωτίστως, επιτρέπει την αναπαραγωγή του φαινομένου της

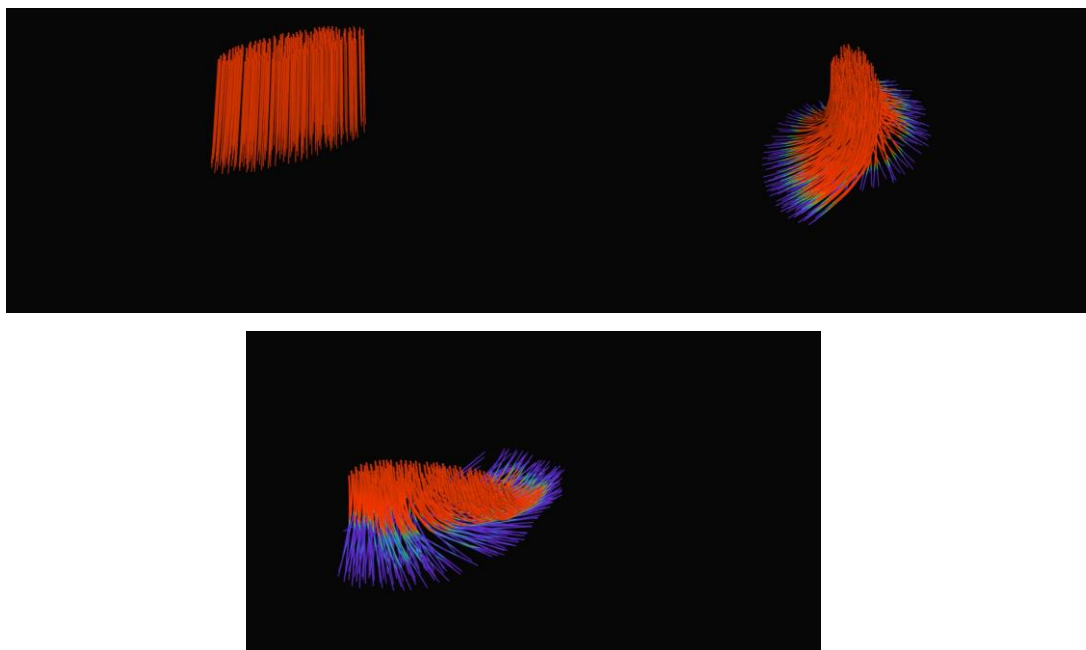
προοδευτικής εξάντλησης του πινέλου, κατά το οποίο η διαθέσιμη ποσότητα μπογιάς μειώνεται σταδιακά όσο το πινέλο συνεχίζει να αλληλεπιδρά με την επιφάνεια. Κατά συνέπεια, οι παραγόμενες πινελιές εμφανίζουν φυσική μεταβολή στην ένταση και την ποσότητα του χρώματος, προσεγγίζοντας περισσότερο τη συμπεριφορά που παρατηρείται στα παραδοσιακά μέσα ζωγραφικής. Επιπλέον, η χρονικά εξαρτώμενη λειτουργία του συστήματος παρέχει αυξημένο έλεγχο στη διαδικασία της εναπόθεσης χρώματος και δημιουργεί τις προϋποθέσεις για την ενσωμάτωση πιο σύνθετων μοντέλων μεταφοράς μπογιάς σε μελλοντικές επεκτάσεις της μεθοδολογίας. Ο χάρτης που δημιουργείται από την προσέγγιση αυτή παρουσιάζεται στην εικόνα 14.



Εικόνα 12 : Ο custom solver για την εναπόθεση μπογιάς. Με μώβ φαίνεται ο κόμβος της προηγούμενης κατάστασης του συστήματος, με άσπρο της τωρινής.



Εικόνα 13 : Η δημιουργία του load attribute και της λογικής του, με μια απλή χρονική αφαίρεση μέσω της γλώσσας VEX.



Εικόνα 14 : Το attribute load σε προσαρμοσμένο map πάνω στη γεωμετρία. Με μώβ η μπογιά έχει περάσει στον καμβά πλήρως, με κόκκινο η μπογιά είναι ακόμα πάνω στο πινέλο.

6.4 Προσαρμοσμένος Επιλυτής Paint Map

Ο Paint Map Solver αποτελεί το τμήμα του συστήματος που είναι υπεύθυνο για την καταγραφή και την επεξεργασία της αλληλεπίδρασης μεταξύ των σωματιδίων μπογιάς που

παράγονται από την προσομοίωση FLIP και της επιφάνειας ζωγραφικής. Ο κύριος ρόλος του είναι να εντοπίζει τα σημεία στα οποία το υγρό έρχεται σε επαφή με τον καμβά και να μετατρέπει αυτή την πληροφορία σε δεδομένα εναπόθεσης χρώματος, δημιουργώντας έτσι μια αναπαράσταση της πινελιάς που προκύπτει από την κίνηση του πινέλου.

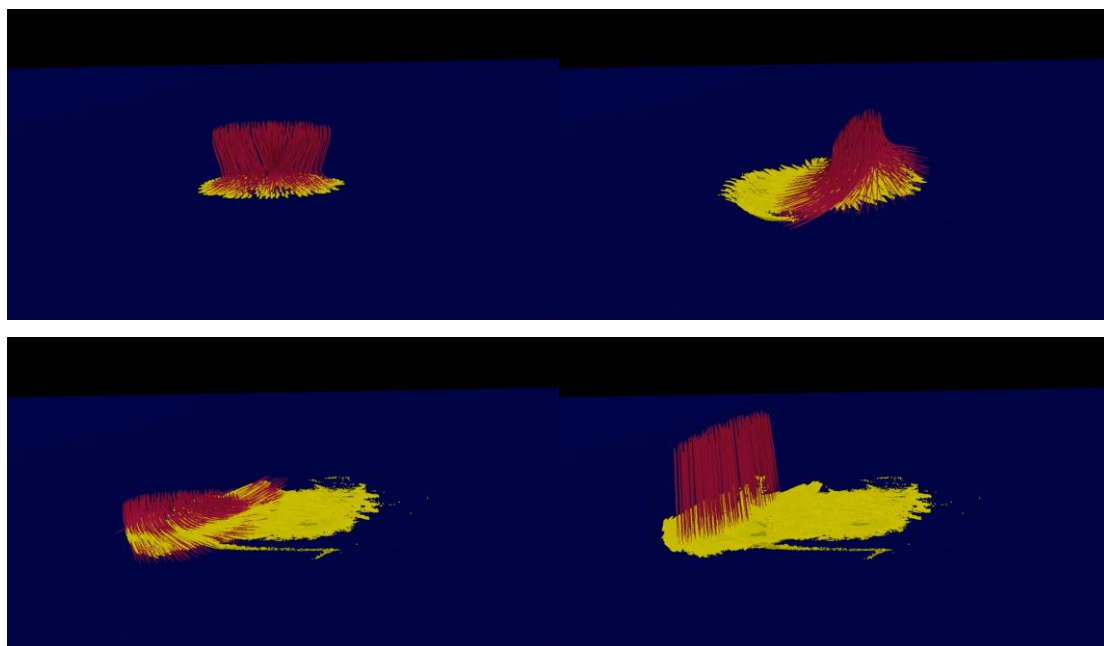
Για την υλοποίηση του μηχανισμού χρησιμοποιήθηκε εκ νέου η μεθοδολογία υπολογισμού απόστασης που παρουσιάστηκε στην ενότητα του attribute “is_close”. Μέσω του ίδιου συστήματος ελέγχου εγγύτητας, κάθε σωματίδιο της προσομοίωσης αξιολογείται ως προς την απόστασή του από την επιφάνεια του καμβά. Όταν ένα σωματίδιο βρεθεί εντός της προκαθορισμένης ζώνης αλληλεπίδρασης, θεωρείται ότι έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια και ενεργοποιείται η διαδικασία μεταφοράς χρώματος.

Η προσέγγιση αυτή μπορεί να θεωρηθεί ως μία πρόμη μορφή solver ξήρανσης ή απορρόφησης, καθώς κάθε υγρό σωματίδιο που έρχεται σε επαφή με την απορροφητική επιφάνεια του καμβά συνεισφέρει στην εναπόθεση χρώματος. Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας επιλέχθηκε ένα απλοποιημένο μοντέλο πλήρους απορροφητικότητας, σύμφωνα με το οποίο κάθε σωματίδιο αποδίδει τη μέγιστη δυνατή ποσότητα χρώματος στον Paint Map Solver κατά τη στιγμή της επαφής του με την επιφάνεια. Με τον τρόπο αυτό, η παραγόμενη paint map λειτουργεί ως αποτύπωση της κίνησης και της κατανομής του υγρού πάνω στον καμβά, επιτρέποντας την οπτικοποίηση της διαδρομής που ακολουθεί η μπογιά κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Αξίζει να σημειωθεί ότι το ίδιο το υγρό σύστημα δεν περιγράφει το σύνολο της ποσότητας μπογιάς που βρίσκεται πάνω στην επιφάνεια, αλλά κυρίως τις περιοχές στις οποίες η συγκέντρωση ή η πυκνότητα του υγρού είναι αρκετά υψηλή ώστε να επηρεάζεται από την κίνηση του πινέλου και να συμμετέχει ενεργά στη ροή. Κατά συνέπεια, ο paint map δεν αναπαριστά μόνο την παρουσία χρώματος, αλλά κυρίως την ενεργή δυναμική συμπεριφορά της μπογιάς καθώς αυτή μεταφέρεται και ανακατανέμεται πάνω στον καμβά. Όπως φαίνεται στην εικόνα 15.

Παράλληλα, η υλοποίηση του Paint Map Solver αναδεικνύει ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά της αρχιτεκτονικής του Houdini, δηλαδή τον έντονα αρθρωτό και επαναχρησιμοποιήσιμο χαρακτήρα των διαδικαστικών συστημάτων του. Η δομή του συγκεκριμένου solver είναι ουσιαστικά πανομοιότυπη με εκείνη του solver που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του attribute “is_close”, διαφοροποιούμενη μόνο ως προς τα δεδομένα που επεξεργάζεται και τον τελικό σκοπό της λειτουργίας του. Το γεγονός αυτό υπογραμμίζει την αρθρωτή φιλοσοφία του Houdini, σύμφωνα με την οποία σύνθετα

συστήματα μπορούν να κατασκευαστούν μέσω της επαναχρησιμοποίησης απλών και ανεξάρτητων λειτουργικών μονάδων. Η δυνατότητα αυτή όχι μόνο επιταχύνει την ανάπτυξη νέων εργαλείων, αλλά συμβάλλει και στη διατήρηση μιας σαφούς και επεκτάσιμης δομής του συνολικού συστήματος προσομοίωσης.



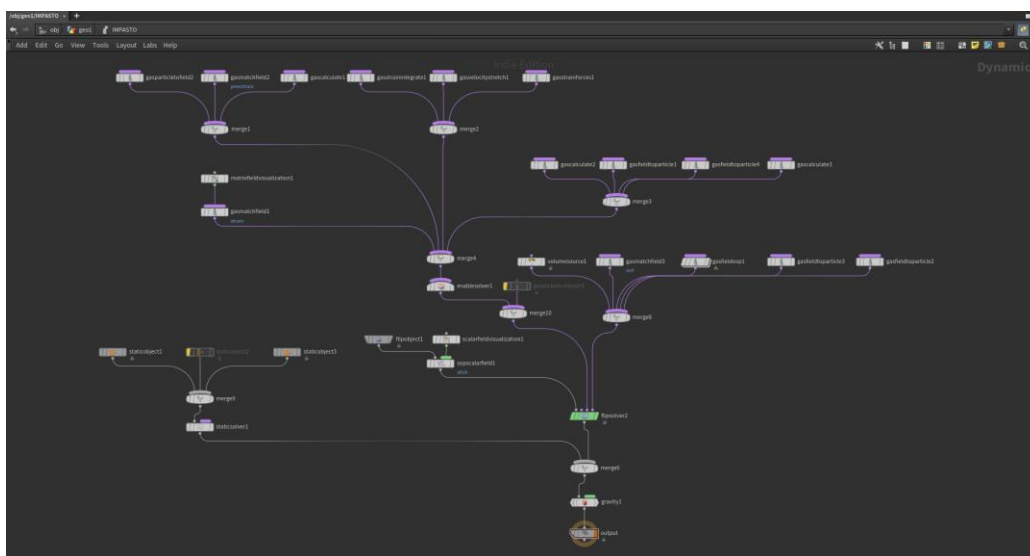
Εικόνα 15 : Ο paint map solver που καταγράφει τις τοποθεσίες που ακούμπησαν τα particles του ρευστού.

6.5 Προσαρμοσμένα Πεδία (Custom Fields)

Στην παρούσα εργασία επιχειρήθηκε η επέκταση του FLIP Solver με την ανάπτυξη δύο προσαρμοσμένων πεδίων:

- το πεδίο strain, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την περιγραφή ελαστικών παραμορφώσεων, και τον υπολογισμό του τανυστή της παραμόρφωσης
- το πεδίο nnf (Non-Newtonian Fluid), το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την τροποποίηση του ιξώδους ως συνάρτηση της πίεσης.

Τα πεδία αυτά φαίνονται, ως ολοκληρωμένο σύστημα, στην εικόνα 16.



Εικόνα 16 : Το δυναμικό δίκτυο κόμβων του custom FLIP solver που αναλαμβάνει την λογική του ρευστού.

6.5.1 Το Πεδίο Παραμόρφωσης (Strain Field)

Στο πλαίσιο της προσομοίωσης ιξωδοελαστικών υλικών, ο Gas Strain Forces microsolver χρησιμοποιείται για τη μετατροπή της πληροφορίας παραμόρφωσης σε πεδίο δυνάμεων επαναφοράς. Το strain field αποθηκεύεται την τοπική απόκλιση του υλικού από την κατάσταση ισορροπίας του μέσω του Gas Strain Integrate και ο solver υπολογίζει δυνάμεις οι οποίες αντιδρούν στις παραμορφώσεις αυτές. Η διαδικασία αυτή προσομοιώνει τη φυσική τάση των ελαστικών και ιξωδοελαστικών υλικών να επανέρχονται στο αρχικό τους σχήμα μετά την άσκηση εξωτερικών φορτίων. Στην περίπτωση της προσομοίωσης μπογιάς υψηλού ιξώδους, η χρήση τέτοιων δυνάμεων συμβάλλει στη διατήρηση της συνοχής του υλικού και στην αναπαράσταση φαινομένων όπως η ελαστική επαναφορά και η αντίσταση στην παραμόρφωση.

Το strain field αποθηκεύεται ως συμμετρικός τανυστής παραμόρφωσης, ο οποίος στην υλοποίηση του Houdini αναπαρίσταται ως πίνακας 3x3. Όπως αυτός φαίνεται στην εικόνα 17.

Τα στοιχεία του πίνακα περιγράφουν τον βαθμό παραμόρφωσης του υλικού κατά μήκος και μεταξύ των τριών χωρικών αξόνων.

Ο microsolver Gas Strain Forces χρησιμοποιεί το πεδίο αυτό για να δημιουργήσει δυνάμεις επαναφοράς που αντιστέκονται στην παραμόρφωση του υλικού. Η συμπεριφορά του ελέγχεται κυρίως από τρεις παραμέτρους:

- Young's Modulus,

- Alpha,
- Gamma.

Επιπλέον χρησιμοποιήθηκε ο Gas Strain Integrate microsolver ο οποίος αποτελεί τον μηχανισμό που είναι υπεύθυνος για την ενημέρωση και εξέλιξη του πεδίου παραμόρφωσης (strain field) κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Η λειτουργία του βασίζεται στην ανάλυση του πεδίου ταχυτήτων του ρευστού, από το οποίο εξάγονται οι τοπικές διατμητικές παραμορφώσεις (shear deformations) που αναπτύσσονται καθώς το υλικό κινείται και αλληλεπιδρά με το περιβάλλον του.

Πιο συγκεκριμένα, ο solver εξετάζει τις διατμήσεις που περιέχονται στο πεδίο ταχυτήτων και υπολογίζει την παραμόρφωση που αυτές προκαλούν στο υλικό. Η πληροφορία αυτή ενσωματώνεται στη συνέχεια στο υπάρχον strain field, επιτρέποντας τη συσσώρευση των παραμορφώσεων με την πάροδο του χρόνου. Με τον τρόπο αυτό, το σύστημα αποκτά τη δυνατότητα να «θυμάται» τις μηχανικές καταπονήσεις που έχει υποστεί το υλικό κατά τα προηγούμενα χρονικά βήματα της προσομοίωσης.

Παράλληλα, το strain field δεν παραμένει σταθερό επ' αόριστον. Αντίθετα, η τιμή του μειώνεται σταδιακά με την πάροδο του χρόνου μέσω μιας διαδικασίας χαλάρωσης (relaxation), η οποία προσομοιώνει τη φυσική συμπεριφορά της πλαστικής ροής (plastic flow). Η διαδικασία αυτή αναπαριστά την τάση ορισμένων υλικών να χάνουν σταδιακά μέρος της αποθηκευμένης παραμόρφωσης και να προσαρμόζονται στη νέα τους μορφή, αντί να επιστρέφουν πλήρως στην αρχική κατάσταση ισορροπίας.

Στο πλαίσιο της προσομοίωσης παχύρρευστων και ιξωδοελαστικών υλικών, όπως η μπογιά, η λειτουργία αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική. Η συνεχής ενημέρωση του strain field επιτρέπει την καταγραφή της ελαστικής συνιστώσας της παραμόρφωσης, ενώ η σταδιακή χαλάρωσή του αναπαριστά την πλαστική συμπεριφορά του υλικού. Ως αποτέλεσμα, η προσομοίωση μπορεί να αποδώσει πιο ρεαλιστικά φαινόμενα όπως η διατήρηση του σχήματος μιας πινελιάς, η αργή παραμόρφωση του υλικού υπό συνεχή καταπόνηση και η σταδιακή απώλεια της ελαστικής μνήμης της μπογιάς.

Η συνεργασία του Gas Strain Integrate DOP με τον Gas Strain Forces DOP αποτελεί τον βασικό μηχανισμό μέσω του οποίου επιτυγχάνεται η προσομοίωση της ιξωδοελαστικότητας. Ο πρώτος ενημερώνει και διαχειρίζεται το πεδίο παραμόρφωσης, ενώ ο δεύτερος μετατρέπει την αποθηκευμένη παραμόρφωση σε δυνάμεις επαναφοράς. Ο συνδυασμός των δύο αυτών microsolvers επιτρέπει την αναπαράσταση της

χαρακτηριστικής συμπεριφοράς υλικών που εμφανίζουν ταυτόχρονα ιδιότητες ρευστού και ελαστικού σώματος, όπως συμβαίνει στις περισσότερες κατηγορίες καλλιτεχνικής μπογιάς υψηλού ιξώδους.



Εικόνα 17 : Ο τανυστής παραμόρφωσης σε προσαρμοσμένο map πάνω στα particles όπου κάθε χρώμα αποτελεί αναπαράσταση του διδυνάστατου πίνακα της παραμόρφωσης.

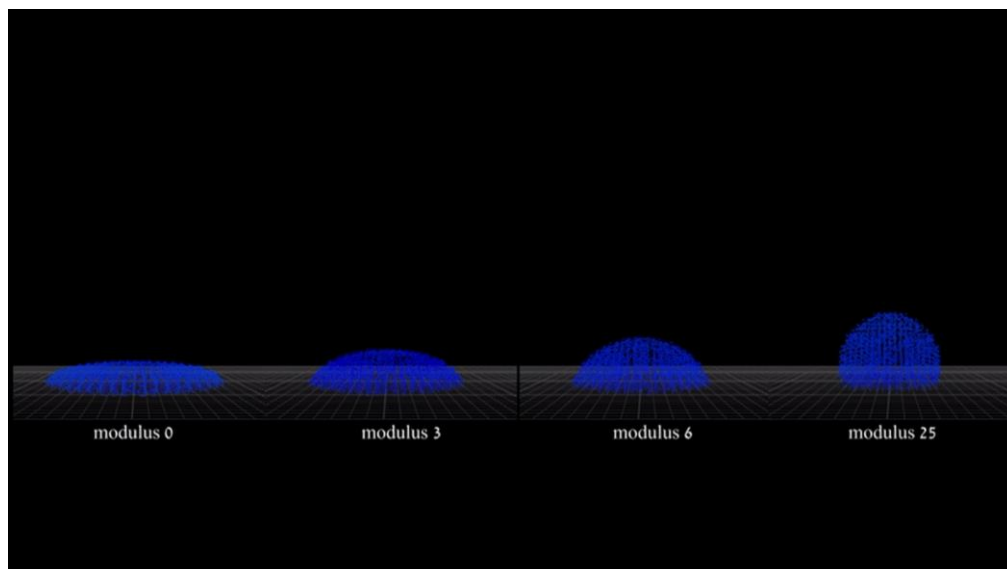
6.5.2 Young's Modulus

Το μέτρο ελαστικότητας Young καθορίζει τη δυσκαμψία του υλικού.

Μεγαλύτερες τιμές του Young's Modulus οδηγούν σε:

- ισχυρότερες δυνάμεις επαναφοράς,
- αυξημένη διατήρηση του σχήματος,
- πιο "παχύρρευστη" συμπεριφορά.

Αντίθετα, μικρότερες τιμές οδηγούν σε μεγαλύτερη παραμόρφωση και πιο ρευστή κίνηση. Όπως φαίνεται στην εικόνα 18.



Εικόνα 18 : Η επίδραση της παραμέτρου Young's modulus στην πτώση τέλει σφαίρας υγρού
(Karusuz, 2017)

6.5.3 Alpha

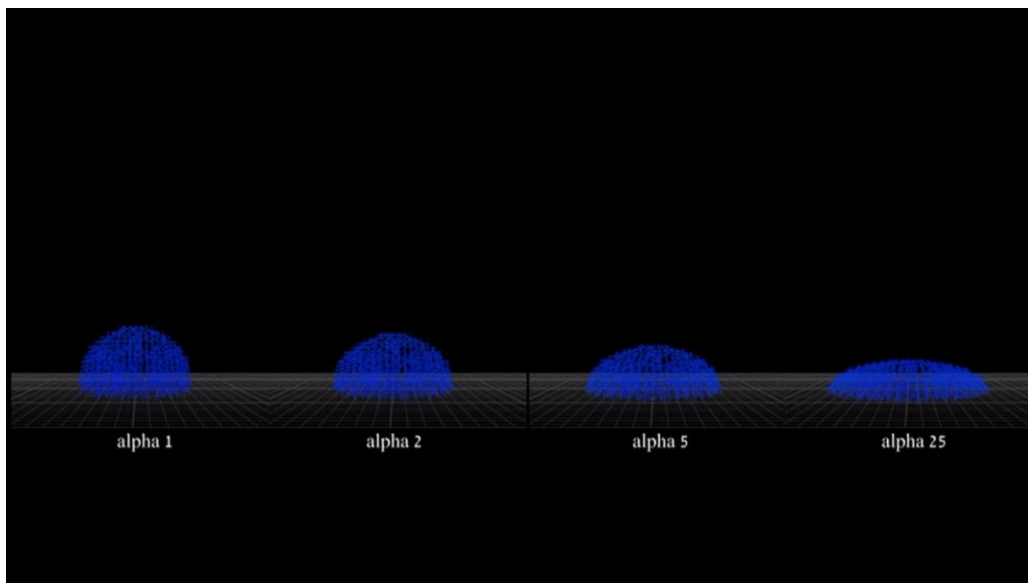
Η παράμετρος Alpha ελέγχει τον ρυθμό με τον οποίο συσσωρεύεται η παραμόρφωση μέσα στο πεδίο strain.

Πρακτικά, καθορίζει πόσο εύκολα το υλικό αποκτά "μνήμη" της προηγούμενης κατάστασής του.

Μεγάλες τιμές alpha οδηγούν σε:

- ταχύτερη ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων,
- ισχυρότερη ελαστική συμπεριφορά.

Όπως φαίνεται στην εικόνα 19.



Εικόνα 19 : Η επίδραση της παραμέτρου alpha στην πτώση τέλει σφαίρας υγρού (Karusuz, 2017)

6.5.4 Gamma

Η παράμετρος Gamma ελέγχει τον ρυθμό αποσύνθεσης του strain field.

Με άλλα λόγια, καθορίζει πόσο γρήγορα το υλικό "ξεχνά" τις προηγούμενες παραμορφώσεις.

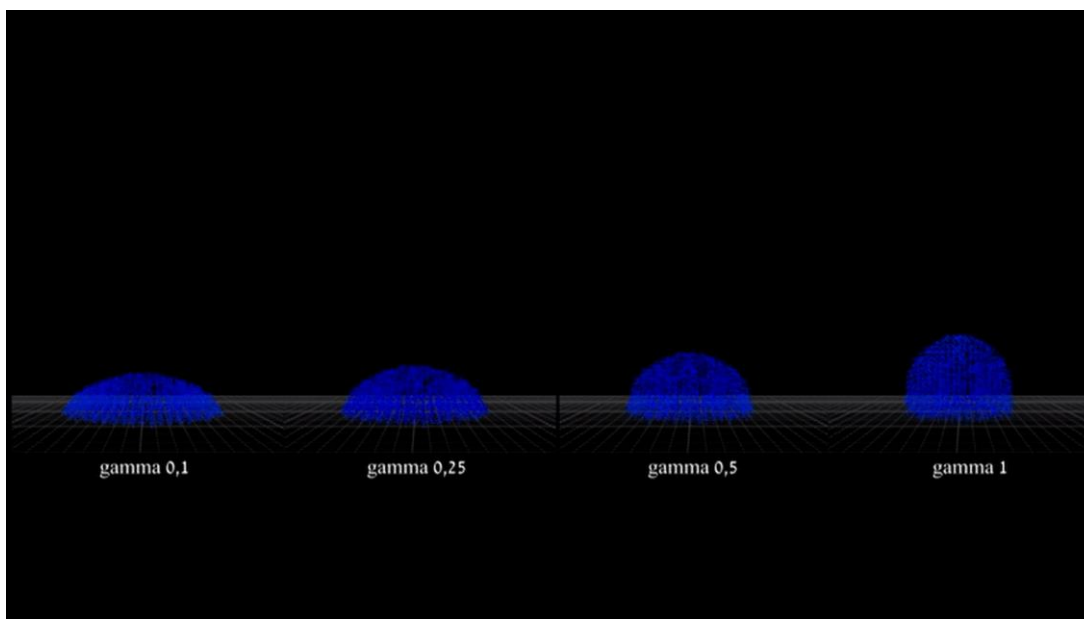
Μικρές τιμές gamma οδηγούν σε:

- μεγαλύτερη χρονική διατήρηση της παραμόρφωσης,
- συμπεριφορά παρόμοια με παχύρρευστες πάστες.

Μεγάλες τιμές gamma οδηγούν σε:

- ταχύτερη χαλάρωση,
- πιο ρευστή συμπεριφορά.

Όπως φαίνεται στην εικόνα 20.



Εικόνα 20 : Η επίδραση της παραμέτρου gamma στην πτώση τέλει σφαίρας υγρού (Karusuz, 2017)

6.5.5 Το Πεδίο nnf (Non-Newtonian Field)

Πέρα από την αναπαράσταση των ιξωδοελαστικών χαρακτηριστικών του υλικού, διερευνήθηκε επίσης η δυνατότητα προσομοίωσης μη-Νευτώνειων συμπεριφορών μέσω της δυναμικής μεταβολής του ιξώδους κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Η προσέγγιση αυτή βασίζεται στην παρατήρηση ότι πολλά πραγματικά υλικά, όπως οι παχύρρευστες καλλιτεχνικές μπογιές, δεν εμφανίζουν σταθερό ιξώδες αλλά μεταβάλλουν τη ρεολογική τους συμπεριφορά ανάλογα με τις συνθήκες καταπόνησης που επικρατούν στο σύστημα.

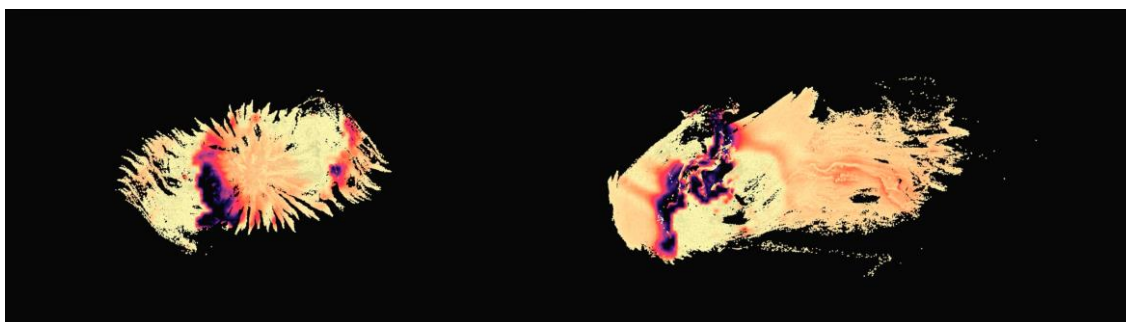
Για την υλοποίηση του μηχανισμού αναπτύχθηκε ένα προσαρμοσμένο πεδίο δεδομένων με την ονομασία nnf, το οποίο λειτουργεί ως συντελεστής τροποποίησης του πεδίου ιξώδους της προσομοίωσης (όπως αυτό φαίνεται στην εικόνα 21 και 22). Το πεδίο αυτό εισάγει μια επιπλέον βαθμίδα ελέγχου στη συμπεριφορά του υγρού, επιτρέποντας την τοπική και χρονικά μεταβαλλόμενη προσαρμογή των ρεολογικών ιδιοτήτων του υλικού.

Η βασική φιλοσοφία της μεθόδου είναι ότι το ιξώδες δεν αντιμετωπίζεται ως μια σταθερή παράμετρος, αλλά ως ένα μέγεθος που εξελίσσεται δυναμικά σε συνάρτηση με την

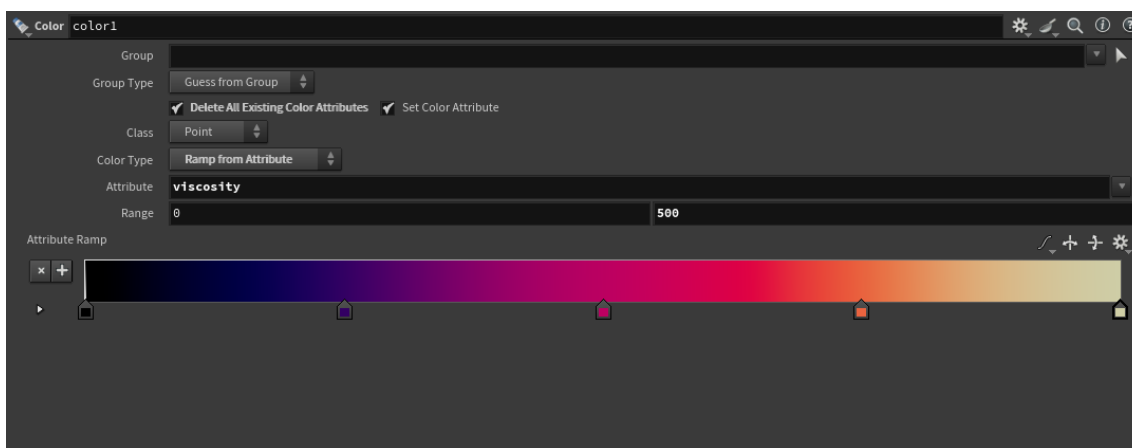
κατάσταση του συστήματος. Ειδικότερα, η τιμή του πεδίου ιξώδους επηρεάζεται από την πίεση (pressure field) που αναπτύσσεται στο εσωτερικό του ρευστού κατά τη διάρκεια της αλληλεπίδρασης με το πινέλο, τον καμβά και τις υπόλοιπες δυνάμεις της προσομοίωσης. Καθώς μεταβάλλεται η κατανομή της πίεσης, μεταβάλλεται αντίστοιχα και η αντίσταση του υλικού στη ροή, δημιουργώντας μια συμπεριφορά που προσεγγίζει περισσότερο τα χαρακτηριστικά πραγματικών μη-Νευτώνειων υλικών.

Η προσέγγιση αυτή παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την προσομοίωση καλλιτεχνικών μέσων υψηλού ιξώδους, καθώς επιτρέπει την εμφάνιση διαφορετικών συμπεριφορών ανάλογα με τις συνθήκες φόρτισης. Περιοχές του υγρού που υφίστανται υψηλές πιέσεις μπορούν να αποκτήσουν διαφορετικά χαρακτηριστικά ροής σε σχέση με περιοχές χαμηλότερης καταπόνησης, δημιουργώντας πιο σύνθετες και ρεαλιστικές δυναμικές αλληλεπιδράσεις. Με τον τρόπο αυτό, η προσομοίωση απομακρύνεται από το απλοποιημένο μοντέλο σταθερού ιξώδους και αποκτά τη δυνατότητα αναπαράστασης φαινομένων που συναντώνται σε πραγματικά μη-Νευτώνεια υλικά.

Παράλληλα, η χρήση ενός ανεξάρτητου πεδίου ελέγχου, όπως το η_{nf} , ενισχύει την παραμετροποιησιμότητα του συστήματος και επιτρέπει την εύκολη προσαρμογή της συμπεριφοράς του υλικού χωρίς να απαιτείται τροποποίηση της βασικής δομής του solver. Η προσέγγιση αυτή αξιοποιεί τη διαδικαστική αρχιτεκτονική του Houdini, επιτρέποντας την ενσωμάτωση επιπρόσθετων φυσικών μηχανισμών μέσω της διασύνδεσης απλών και ανεξάρτητων πεδίων δεδομένων, τα οποία μπορούν να επηρεάζουν δυναμικά τις ιδιότητες της προσομοίωσης.



Εικόνα 21 : Το τελικό ιξώδες μετά τον υπολογισμό της θιζοτροπίας σε προσαρμοσμένο map



Εικόνα 22 : Η χρωματική παλέτα που αναπαριστά τις τιμές των περιοχών του.

6.5.6 Το Πεδίο Gas-Field VOP

Η υλοποίηση του μηχανισμού της μεταβολής του ιξώδους πραγματοποιήθηκε στο περιβάλλον των δυναμικών προσομοιώσεων του Houdini, μέσω ενός Gas Field VOP ενσωματωμένου στο DOP Network. Η επιλογή του συγκεκριμένου εργαλείου επέτρεψε την άμεση πρόσβαση και επεξεργασία των πεδίων (fields) της προσομοίωσης κατά τη διάρκεια της επίλυσης, παρέχοντας τη δυνατότητα δυναμικής τροποποίησης των φυσικών ιδιοτήτων του υγρού σε κάθε χρονικό βήμα.

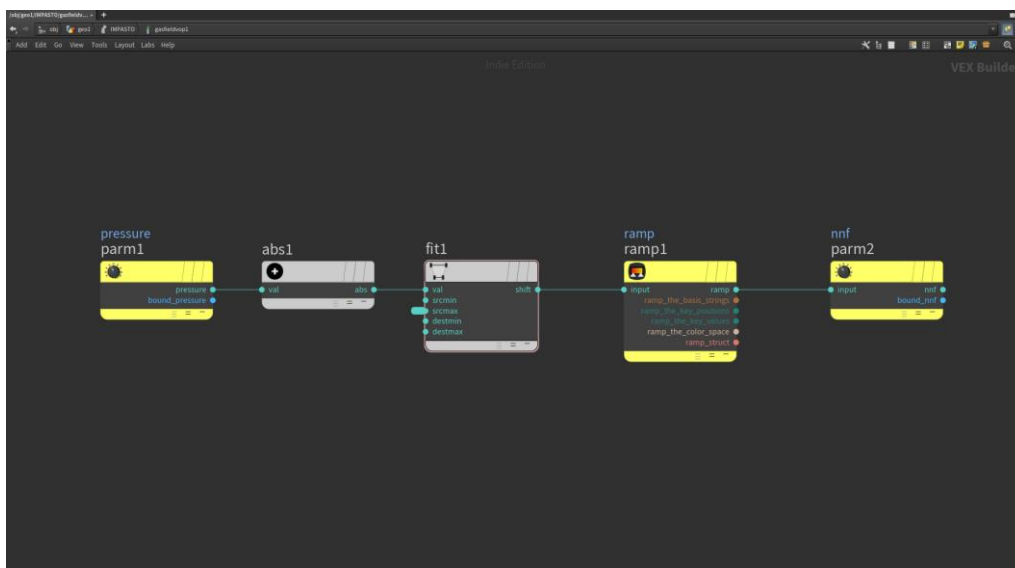
Η διαδικασία ξεκινούσε με την ανάγνωση του πεδίου πίεσης (pressure field), το οποίο αποτελεί μία από τις βασικές ποσότητες που υπολογίζονται κατά την επίλυση της μη-συμπιεστότητας του FLIP Solver. Το πεδίο αυτό περιέχει πληροφορίες σχετικά με την κατανομή της πίεσης στο εσωτερικό του ρευστού και χρησιμοποιήθηκε ως η κύρια παράμετρος ελέγχου της μεταβολής του ιξώδους.

Στη συνέχεια πραγματοποιείται κανονικοποίηση των τιμών πίεσης, ώστε τα δεδομένα να μεταφερθούν σε ένα εύρος τιμών κατάλληλο για περαιτέρω επεξεργασία. Η διαδικασία αυτή ήταν απαραίτητη, καθώς οι πραγματικές τιμές πίεσης μπορεί να παρουσιάζουν σημαντικές αποκλίσεις κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, γεγονός που θα μπορούσε να οδηγήσει σε ανεπιθύμητες ή ασταθείς μεταβολές των φυσικών ιδιοτήτων του συστήματος. Μέσω της κανονικοποίησης επιτυγχανόταν η μετατροπή των δεδομένων σε μια ελεγχόμενη και προβλέψιμη μορφή, διευκολύνοντας την εφαρμογή πρόσθετων υπολογισμών.

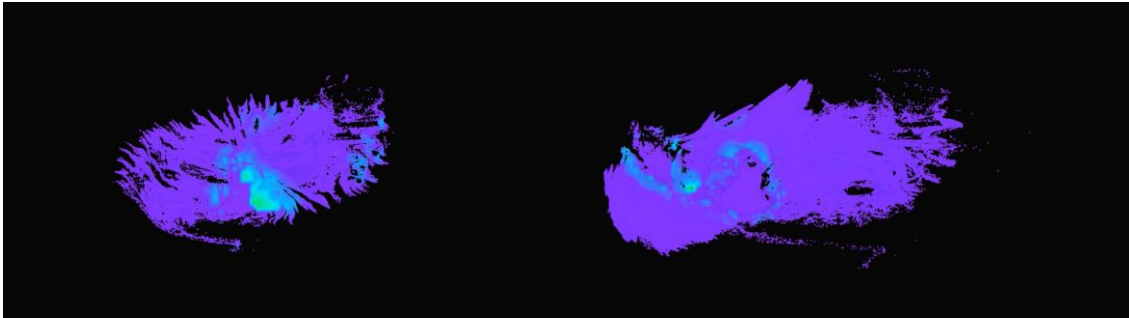
Ακολουθώς υπολογιζόταν η τιμή του προσαρμοσμένου συντελεστή η_{nf} , ο οποίος βασιζόταν στον ρυθμό μεταβολής της πίεσης και χρησιμοποιούνταν ως παράγοντας ελέγχου της συμπεριφοράς του υλικού. Οι προκύπτουσες τιμές επαναχарτογραφούνταν σε ένα εύρος

από 0 έως 1, λειτουργώντας ως πολλαπλασιαστής (multiplier) που μπορούσε να εφαρμοστεί με ασφάλεια και συνέπεια πάνω στις υπάρχουσες τιμές του ιξώδους. Η διαδικασία αυτή επέτρεπε τη δημιουργία ενός ομαλού μηχανισμού προσαρμογής, αποφεύγοντας απότομες μεταβολές που θα μπορούσαν να επηρεάσουν αρνητικά τη σταθερότητα της προσομοίωσης. Στο τελικό στάδιο, ο συντελεστής *nnf* χρησιμοποιούνταν για τον πολλαπλασιασμό του υπάρχοντος attribute ιξώδους (viscosity attribute), μεταβάλλοντας δυναμικά τις τιμές του σε τοπικό επίπεδο. Με τον τρόπο αυτό, κάθε περιοχή του ρευστού μπορούσε να αποκτήσει διαφορετική αντίσταση στη ροή ανάλογα με τις συνθήκες πίεσης που επικρατούσαν στο συγκεκριμένο σημείο και τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Το δίκτυο φαίνεται στην εικόνα 23, 24 και 25.

Το αποτέλεσμα της διαδικασίας ήταν η δημιουργία ενός δυναμικού πεδίου ιξώδους, το οποίο δεν παρέμενε σταθερό κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης αλλά εξελισσόταν συνεχώς σύμφωνα με την κατάσταση του συστήματος. Η προσέγγιση αυτή επέτρεψε την προσομοίωση πιο σύνθετων ρεολογικών συμπεριφορών και προσέδωσε στο υλικό μεγαλύτερο βαθμό προσαρμοστικότητας, προσεγγίζοντας με μεγαλύτερη πιστότητα τη συμπεριφορά πραγματικών μη-Νευτώνειων χρωστικών μέσων. Παράλληλα, ανέδειξε τη δυνατότητα του Houdini να επεκτείνει τις βασικές λειτουργίες των ενσωματωμένων solvers μέσω της αξιοποίησης προσαρμοσμένων πεδίων και διαδικαστικών δικτύων επεξεργασίας δεδομένων.



Εικόνα 23 : Το δέντρο κόμβων του δικτύου Gas Field VOP όπου εκφράζεται η λογική της μεταβολής του ιξώδους και η θιζοτροπική συμπεριφορά του.



Εικόνα 24 : Το πεδίο της πίεσης του ρευστού σε προσαρμοσμένο map



Εικόνα 25 : Η χρωματική παλέτα που περιγράφει τις τιμές του.

Κεφάλαιο 7: Συγκριτική Ανάλυση Μεθόδων με το Οικοσύστημα “Houdini”

Στην παρούσα εργασία εξετάστηκαν οι ιδιότητες των μη-Νευτώνειων υγρών και αναφέρθηκαν αποσπασματικά ορισμένες προσεγγίσεις γύρω από την επίλυση τους. Επιχειρήθηκε η χρήση του λογισμικού “Houdini” για την συγκέντρωση και επίλυση του προβλήματος της καλλιτεχνικής έκφρασης μέσω αυτών των μέσων και αναζητήθηκε μια χρυσή τομή ανάμεσα στην πολυπλοκότητα και την πιστότητα των προσομοιώσεων της μπογιιάς. Τα αποτελέσματα της αναζήτησης αυτής, συνδιαστικά με τα δεδομένα που παρουσιάστηκαν παραπάνω έχουν σαν στόχο την σύγκριση των περιβαλλόντων και την πρόταση του “Houdini” ως εργαλείο συγκεντρωτικό και επεκτάσιμο όσον αφορά τις προσομοιώσεις ρευστών και όχι μόνο. Έτσι, θα ακολουθήσει ανάλυση των κύριων προτερημάτων του λογισμικού των οποίων η σημασία ευελπιστάται να έχει γίνει φανερή έως τώρα.

7.1 Το Houdini ως Ενιαίο Σύστημα Προσομοιώσεων

Το κυριότερο και σημαντικότερο πλεονέκτημα του λογισμικού “Houdini” είναι η συνεκτικότητα του, τόσο στον τρόπο με τον οποίο διαχειρίζεται τα εσωτερικά όσο και τα εξωτερικά δεδομένα. Συγκεκριμένα, η επικοινωνία όλων των επιμέρους κομματιών του, όπως είναι τα attributes, ή τα διάφορα states μια γεωμετρίας ή μιας προσομοίωσης, παρέχουν στον χρήστη ευελιξία στην κατανόηση, την τροποποίηση και την συγγραφή ενός εργαλείου το οποίο θα παρέχει πλήρη έλεγχο των φυσικών παραμέτρων οποιουδήποτε συστήματος, ανεξαρτήτως της πολυπλοκότητας του.

Στην περίπτωση των ερευνών που παρατηρήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας, η δημιουργία πρωτότυπων εργαλείων προσομοίωσης, πέραν της έλλειψης διαθεσιμότητας, εξυπηρετεί στον απόλυτο έλεγχο των αποτελεσμάτων και του περιβάλλοντος της προσομοίωσης, παρόλα αυτά παρατηρείται ότι η συνεκτικότητα των εργαλείων αυτών παραμένει χαμηλή. Αυτό παρατηρείται και λόγω των διαφορετικών μεθόδων που ακολουθούν, αλλά και λόγω της αδυναμίας τους να ανταλλάσσουν δεδομένα μεταξύ τους. Έτσι, κάνουμε λόγο για μεμονωμένους πειραματισμούς και κώδικες και όχι για ένα ενιαίο σύστημα συγκερασμού δεδομένων και προσεγγίσεων. Στην περίπτωση αυτή, το Houdini,

παρόλο που δεν πρόκειται για λογισμικό ανοιχτού κώδικα, μπορεί να λειτουργήσει σαν ερευνητικό πλαίσιο, καθώς παρέχει στον εκάστοτε ερευνητή ή καλλιτέχνη, ένα ήδη ολοκληρωμένο μαύρο κουτί και μία robust αρχιτεκτονική που μπορεί να τροποποιηθεί εις βάθος, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε έρευνας.

Για παράδειγμα, μέσω της χρήσης του περιβάλλοντος της VEX, των microsolver και της επέκτασης του HDK με την χρήση χαμηλού επιπέδου γλωσσών προγραμματισμού, όπως η C++, ο χρήστης μπορεί να μεταφέρει την οποιαδήποτε μεθοδολογία και αλγόριθμο στο περιβάλλον του λογισμικού και να την αξιοποιήσει από οποιοδήποτε άλλο υπάρχον εργαλείο ή κόμβο.

Σημαντικό είναι επίσης να σημειωθεί ότι το λογισμικό παρέχεται δωρεάν με περιορισμένες δυνατότητες εξαγωγής εικόνων καθώς και με αυξημένες δυνατότητες σε φοιτητές και εκπαιδευτικούς οργανισμούς.

7.2 Διαδικαστική λογική και αρθρωτότητα (proceduralism and modularity)

Εξίσου σημαντικό πλεονεκτήματα του Houdini ως περιβάλλον ανάπτυξης συστημάτων προσομοίωσης είναι η έντονα διαδικαστική (procedural) φιλοσοφία που διέπει την αρχιτεκτονική του.

Το Houdini διακρίνεται μεταξύ των εμπορικών εργαλείων οπτικών εφέ λόγω του ότι το μοντέλο ανάπτυξης σκηνών που υιοθετεί είναι σχεδιασμένο ώστε να είναι αρθρωτό, διαδικαστικό και εύκολα τροποποιήσιμο σε οποιοδήποτε στάδιο της παραγωγικής διαδικασίας. Η διαδικαστική αυτή προσέγγιση εκφράζεται μέσω δικτύων κόμβων τελεστών (operator nodes), οι οποίοι επηρεάζουν τη γεωμετρία, τα υλικά σκίασης, τη διαδικασία απόδοσης εικόνας και άλλα στοιχεία της σκηνής. Η λογική των δικτύων αυτών είναι οικεία στους επιστήμονες δεδομένων, καθώς αποτελεί γραφική αναπαράσταση της ροής πληροφορίας μέσα από διαδοχικά υπολογιστικά στάδια. (Naiman et al, 2017)

Η προσέγγιση αυτή οδηγεί φυσικά στην ανάπτυξη αρθρωτών (modular) συστημάτων, στα οποία τα επιμέρους τμήματα λειτουργούν σχετικά ανεξάρτητα μεταξύ τους. Η έννοια της modularity αποτελεί θεμελιώδες χαρακτηριστικό της παρούσας εργασίας, καθώς ο προτεινόμενος solver σχεδιάστηκε εξ αρχής ως ένα σύνολο διακριτών διαδικασιών που επικοινωνούν μέσω κοινών δεδομένων και attributes.

Η έξοδος ενός κόμβου μπορεί να τροφοδοτήσει πολλούς διαφορετικούς κόμβους, επιτρέποντας την ανάπτυξη σύνθετων δικτύων επεξεργασίας χωρίς απώλεια ευελιξίας.

Στις έρευνες που εξετάστηκαν δεν παρατηρήθηκε η χρήση αρθρωτών ή διαδικαστικών μέσων. Τα περισσότερα εργαλεία αποσκοπούσαν στην υλοποίηση μιας λειτουργίας ενώ πολλά δημιουργήθηκαν με την λογική της ένταξης τους σε μεγαλύτερα εργαλεία.

7.2.1 Επαναχρησιμοποίηση (reusability)

Το Houdini παρέχει στον χρήστη την ευκολία της επαναχρησιμοποίησης τόσο δικτύων όσο και κόμβων ή κώδικα. Η ίδια η αρχιτεκτονική του είναι χτισμένη γύρω από την διαχείριση των στοιχείων του με την χρήση διαδικαστικής λογικής, υπό αυτή την έννοια κάθε επιμέρους κομμάτι δεν είναι εξαρτώμενο από προδιαγεγραμμένους ορισμούς και είναι ανοιχτό σε επεξεργασία από οποιαδήποτε λογική η οποία συνδέεται με τα στοιχεία και τα δεδομένα του. Για παράδειγμα, κάθε γεωμετρία έχει το attribute “Position”, ένας κώδικας ή ένας κόμβος ο οποίος μεταβάλλει το Position θα δουλέψει εξίσου σε ένα mesh όσο και σε ένα point, σε μια σφαίρα ή σε έναν χαρακτήρα με σκελετό.

Επιπλέον, το Houdini παρέχει ένα σύστημα από εργαλεία συγγραφής εργαλείων, με την χρήση των HDAs, των Recipes και του HDK.

Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να δημιουργηθεί μια βιβλιοθήκη εργαλείων που είναι πάντα έτοιμα προς χρήση και διαμοιρασμό. Επιπλέον, με την δυνατότητα επέκτασης του προγράμματος μέσω του ανοιχτού τύπου που δεν χρειάζεται να είναι βασισμένα στο ίδιο το λογισμικό, δηλαδή μπορούν να είναι ανεξάρτητα και να συνδέονται αυτούσια μέσω των κόμβων του Houdini.

7.2.2 Επεκτασιμότητα (scalability)

Η προσθήκη νέας λειτουργικότητας δεν απαιτεί ανασχεδιασμό ολόκληρου του συστήματος. Πέρα από το φιλικό προς τους προγραμματιστές περιβάλλον κόμβων, το Houdini παρέχει τη δυνατότητα ανάπτυξης προσαρμοσμένων λειτουργιών μέσω της εγγενούς

βελτιστοποιημένης γλώσσας VEX, η οποία παρουσιάζει συντακτικές ομοιότητες με τη γλώσσα C, καθώς και μέσω της χρήσης Python. Παράλληλα, προσφέρει επιπρόσθετους μηχανισμούς επέκτασης των δυνατοτήτων του λογισμικού, όπως τα εξωτερικά digital assets και το Houdini Development Kit (HDK) που βασίζεται στη γλώσσα C++. (Naiman et al, 2017)

Μέσω του Houdini Engine, του προγραμματιστικού του περιβάλλοντος (API) και του Houdini Development Kit (HDK), το λογισμικό μπορεί να συνεργαστεί με εξωτερικές εφαρμογές, διαδικασίες και προσαρμοσμένα εργαλεία, επιτρέποντας την αμφίδρομη ανταλλαγή δεδομένων. Η αρχιτεκτονική αυτή καθιστά δυνατή την ενσωμάτωση εξειδικευμένων ροών εργασίας και την αξιοποίηση προσαρμοσμένων λύσεων, οι οποίες λειτουργούν συμπληρωματικά προς τις εγγενείς δυνατότητες και τα διαδικαστικά συστήματα του Houdini.

Στις έρευνες που αναλύθηκαν, παρατηρήθηκε σημαντικό έλλειμμα επεκτασιμότητας, μιας και οι περισσότερες προσεγγίσεις αποσκοπούσαν στην επίτευξη ενός τελικού συστήματος συγκεκριμένου εύρους και δυνατοτήτων, χωρίς να δίνεται δυνατότητα για προσθήκη νέων δυνατοτήτων.

Προγενέστερες ερευνητικές εργασίες στον τομέα της ψηφιακής ζωγραφικής έχουν επικεντρωθεί κυρίως στην αναπαράσταση συγκεκριμένων κατηγοριών ζωγραφικών εφέ. Οι περισσότερες από αυτές τις προσεγγίσεις μελέτησαν και προσομοίωσαν μεμονωμένα φαινόμενα, αντιμετωπίζοντας κάθε τύπο εφέ ως ένα ανεξάρτητο πρόβλημα. Ωστόσο, στην πραγματικότητα τα οπτικά χαρακτηριστικά μιας ζωγραφικής επιφάνειας προκύπτουν από την αλληλεπίδραση πολλών σύνθετων φυσικών διεργασιών, οι οποίες λαμβάνουν χώρα ταυτόχρονα και επηρεάζουν η μία την άλλη. (You et al, 2013)

7.2.3 Διαλειτουργικότητα (interoperability)

το Houdini υποστηρίζει πολλαπλούς τύπους δεδομένων, παρέχοντας λειτουργίες που απουσιάζουν από τα περισσότερα λογισμικά κινούμενων σχεδίων, όπως έτοιμους κόμβους για την εισαγωγή δεδομένων από πίνακες και εύκολους μηχανισμούς μετατροπής μεταξύ διαφορετικών μορφών δεδομένων, διευκολύνοντας έτσι τη σύγκριση οπτικοποιήσεων που προέρχονται από ετερογενή σύνολα δεδομένων.

Η δυνατότητα αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική σε ερευνητικά πλαίσια, όπου οι απαιτήσεις μεταβάλλονται συνεχώς κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης. (Naiman et al, 2017)

Στις έρευνες που αναλύθηκαν παρατηρήθηκε έλλειψη στην εισαγωγή και εξαγωγή δεδομένων από και προς τα συστήματα. Παρόλο που μια τέτοια λειτουργία θα ήταν σχετικά εύκολη στην υλοποίηση της, δεν αποτελεί δεδομένο προς ανάπτυξη. Εξαίρεση σε αυτό, παρατηρείται μεμονωμένα σε συστήματα όπως το “IMPaSTo” όπου η διαχείριση και η αλληλεπίδραση με την τρισδιάστατη μπογιά στο συγκεκριμένο σύστημα πραγματοποιείται μέσω ενός τρισδιάστατου εικονικού πινέλου, το οποίο επιτρέπει στον χρήστη να επεμβαίνει άμεσα και φυσικά στη διαδικασία ζωγραφικής. Παραθέτεται ένα παράδειγμα διαλειτουργικότητας το οποίο συνδέεται με το houdini στον βαθμό που είναι επιτεύξιμο από το ίδιο :

Ο χειρισμός του πινέλου μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε μέσω μιας γραφίδας πέντε βαθμών ελευθερίας (5 Degrees of Freedom – 5DOF) με δυνατότητα ανίχνευσης κλίσης, είτε μέσω μιας απτικής συσκευής έξι βαθμών ελευθερίας (6 Degrees of Freedom – 6DOF), η οποία παρέχει ακόμη μεγαλύτερο έλεγχο της θέσης και του προσανατολισμού του εργαλείου στον τρισδιάστατο χώρο. (Baxter et al, 2004)

7.3 Η προοπτική του καλλιτέχνη

Η καλλιτεχνική καθοδήγηση (art direction) προσομοιώσεων ρευστών και αερίων αποτελεί μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις στον χώρο των οπτικών εφέ και της ψηφιακής προσομοίωσης. Παρόλο που οι φυσικά βασισμένες προσομοιώσεις καπνού, φωτιάς και άλλων ρευστών φαινομένων μπορούν να παράγουν ιδιαίτερα ρεαλιστικά αποτελέσματα, η αυστηρή συμμόρφωσή τους με τους φυσικούς νόμους συχνά περιορίζει τον βαθμό ελέγχου που διαθέτει ο καλλιτέχνης πάνω στο τελικό αποτέλεσμα. Στην παραγωγή κινηματογραφικών και οπτικών εφέ, δεν είναι πάντοτε επιθυμητή η απόλυτα φυσική συμπεριφορά ενός φαινομένου. Αντίθετα, πολλές φορές οι δημιουργικές απαιτήσεις μιας σκηνής επιβάλλουν συμπεριφορές που δεν είναι φυσικά εφικτές, καθιστώντας αναγκαία την ύπαρξη εργαλείων που επιτρέπουν τον άμεσο έλεγχο της κίνησης και της εξέλιξης του φαινομένου.

Στο δισδιάστατο περιβάλλον, η διαδικασία αυτή είναι σχετικά απλή, καθώς ο καλλιτέχνης μπορεί να σχεδιάσει απευθείας πάνω σε μια επιφάνεια περιοχές που καθορίζουν την κατανομή ιδιοτήτων όπως η πυκνότητα, το χρώμα ή άλλες φυσικές παράμετροι. Αντίθετα,

σε ένα τρισδιάστατο πεδίο προσομοίωσης η περιγραφή τέτοιων καλλιτεχνικών παρεμβάσεων γίνεται σημαντικά πιο σύνθετη, καθώς οι επιθυμητές μεταβολές πρέπει να οριστούν μέσα σε έναν τρισδιάστατο χώρο και να ενσωματωθούν δυναμικά στην εξέλιξη της προσομοίωσης.

Πέρα από την κίνηση, σημαντικό ρόλο διαδραματίζει και η οπτική εμφάνιση του φαινομένου. Σε πολλές περιπτώσεις προκύπτει η ανάγκη συνδυασμού διαφορετικών τύπων καπνού ή αερίων με ξεχωριστές οπτικές και φυσικές ιδιότητες. Για παράδειγμα, δύο αέρια διαφορετικού χρώματος ενδέχεται να δημιουργούν μια νέα χρωματική απόχρωση όταν αναμειγνύονται. Η συμπεριφορά αυτή γίνεται ακόμη πιο σύνθετη όταν οι οπτικές ιδιότητες συνδέονται άμεσα με τις φυσικές ιδιότητες του συστήματος. Ένα αέριο μπορεί να είναι εύφλεκτο ενώ ένα άλλο όχι, ή η ανάμειξή τους να δημιουργεί νέες ιδιότητες που δεν υπήρχαν αρχικά, προσομοιώνοντας φαινόμενα παρόμοια με χημικές αντιδράσεις.

Η αλληλεξάρτηση μεταξύ της οπτικής εμφάνισης και της φυσικής συμπεριφοράς αυξάνει σημαντικά την πολυπλοκότητα των απαιτούμενων εργαλείων προσομοίωσης. Ως αποτέλεσμα, η ανάπτυξη συστημάτων που επιτρέπουν τον ταυτόχρονο έλεγχο τόσο της δυναμικής συμπεριφοράς όσο και των οπτικών χαρακτηριστικών ενός φαινομένου αποκτά ιδιαίτερη σημασία για τις ανάγκες της παραγωγής οπτικών εφέ. Μέσα σε αυτό το πλαίσιο, η φιλοσοφία του Houdini εστιάζει στην ανάπτυξη μιας διαδικασίας εργασίας και ενός συνόλου εργαλείων που επιτρέπουν αυξημένο βαθμό καλλιτεχνικού ελέγχου πάνω στην προσομοίωση, παρέχοντας τη δυνατότητα διαμόρφωσης τόσο της κίνησης όσο και της εμφάνισης των προσομοιωμένων φαινομένων σύμφωνα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε παραγωγής. (Claes, 2009)

Για τον καλλιτέχνη, η ευελιξία και ο έλεγχος είναι συχνά σημαντικότεροι από την απόλυτη φυσική ακρίβεια. Η αξιολόγηση ενός συστήματος ψηφιακής ζωγραφικής δεν μπορεί να περιορίζεται αποκλειστικά σε τεχνικά κριτήρια, όπως η φυσική ακρίβεια ή η υπολογιστική αποδοτικότητα. Στην πράξη, η επιτυχία ενός τέτοιου εργαλείου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το κατά πόσο μπορεί να ενσωματωθεί ομαλά στη δημιουργική διαδικασία του καλλιτέχνη. Η ευκολία χρήσης, η δυνατότητα παραμετροποίησης και η ευελιξία επέκτασης αποτελούν επομένως εξίσου σημαντικά χαρακτηριστικά.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, ο σχεδιασμός του προτεινόμενου solver πραγματοποιήθηκε με γνώμονα όχι μόνο τις απαιτήσεις της φυσικής προσομοίωσης, αλλά και τις ανάγκες του τελικού χρήστη. Η διαδικαστική φύση του Houdini επέτρεψε την

ανάπτυξη ενός συστήματος το οποίο παραμένει τεχνικά σύνθετο στο εσωτερικό του, ενώ ταυτόχρονα μπορεί να παρουσιαστεί στον καλλιτέχνη ως ένα απλό και εύχρηστο εργαλείο. Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της προτεινόμενης προσέγγισης είναι ότι ο καλλιτέχνης δεν είναι υποχρεωμένος να κατανοήσει τις λεπτομέρειες των υποκείμενων αλγορίθμων. Όλες οι παράμετροι μπορούν να εκτεθούν μέσω ενός απλοποιημένου περιβάλλοντος χειρισμού, επιτρέποντας την τροποποίηση της συμπεριφοράς του εργαλείου χωρίς την ανάγκη επεξεργασίας του ίδιου του δικτύου κόμβων.

Η διαδικαστική αρχιτεκτονική του Houdini επιτρέπει τη δημιουργία διαφορετικών επιπέδων αφαίρεσης. Οι τεχνικοί χρήστες μπορούν να έχουν πρόσβαση στο πλήρες δίκτυο και να επεκτείνουν το σύστημα, ενώ οι καλλιτέχνες μπορούν να αλληλεπιδρούν αποκλειστικά με τις παραμέτρους που είναι σχετικές με τη δημιουργική διαδικασία.

Το χαρακτηριστικό αυτό συνδέεται άμεσα με την έννοια του καλλιτεχνικού ελέγχου. Σε πολλές φυσικές προσομοιώσεις, η επίτευξη ενός επιθυμητού αποτελέσματος απαιτεί εκτεταμένες δοκιμές και προσαρμογές παραμέτρων των οποίων η επίδραση δεν είναι πάντοτε προφανής. Αντίθετα, ο προτεινόμενος solver οργανώθηκε με τρόπο ώστε οι περισσότερες παράμετροι να αντιστοιχούν σε έννοιες οικείες στους απλούς χρήστες.

Η αντιστοίχιση αυτή μεταξύ φυσικών ιδιοτήτων και ψηφιακών παραμέτρων συμβάλλει στη δημιουργία ενός εργαλείου που είναι πιο διαισθητικό στη χρήση.

Ένα επιπλέον πλεονέκτημα της προτεινόμενης προσέγγισης είναι η δυνατότητα εύκολης επέκτασης από τον ίδιο τον καλλιτέχνη ή τον technical artist. Η modular δομή του solver επιτρέπει την αντικατάσταση ή τροποποίηση επιμέρους τμημάτων χωρίς να απαιτείται επανασχεδιασμός ολόκληρου του συστήματος.

Για παράδειγμα, ένας χρήστης μπορεί να δημιουργήσει έναν νέο τύπο πινέλου αλλάζοντας μόνο το Vellum setup, να προσθέσει διαφορετικά μοντέλα ξήρανσης, να τροποποιήσει τον μηχανισμό μεταφοράς μπογιάς, ή να αλλάξει τις ρεολογικές ιδιότητες της μπογιάς αυτής καθ' αυτής χρησιμοποιώντας έτοιμα πακέτα ή εκτελώντας πειραματισμούς με τις τιμές.

Η δυνατότητα αυτή ενισχύεται περαιτέρω μέσω της χρήσης των Houdini Digital Assets (HDAs). Η μετατροπή του solver σε HDA επιτρέπει τη διανομή του ως αυτόνομου εργαλείου, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διαφορετικά projects χωρίς να απαιτείται πρόσβαση στην εσωτερική υλοποίηση.

Από εκπαιδευτική σκοπιά, το χαρακτηριστικό αυτό είναι επίσης σημαντικό. Οι χρήστες μπορούν να εξερευνούν σταδιακά τη λειτουργία του συστήματος, ξεκινώντας από την απλή

χρήση του και προχωρώντας, εφόσον το επιθυμούν, στη βαθύτερη κατανόηση των διαδικασιών που το συνθέτουν.

Παρόλα αυτά, η χρήση του Houdini παρουσιάζει και ορισμένες προκλήσεις. Η πολυπλοκότητα του περιβάλλοντος και η μεγάλη ελευθερία που προσφέρει μπορεί αρχικά να λειτουργήσουν αποτρεπτικά για καλλιτέχνες χωρίς τεχνικό υπόβαθρο. Η καμπύλη εκμάθησης του λογισμικού είναι σημαντικά πιο απότομη σε σύγκριση με περισσότερο εξειδικευμένες εφαρμογές ψηφιακής ζωγραφικής.

Ωστόσο, η ανάπτυξη εργαλείων υψηλότερου επιπέδου αφαίρεσης μπορεί να περιορίσει σημαντικά το πρόβλημα αυτό. Στην περίπτωση της παρούσας εργασίας, ο τελικός στόχος δεν είναι η έκθεση του χρήστη σε όλες τις λεπτομέρειες του solver, αλλά η δημιουργία ενός εργαλείου το οποίο συνδυάζει την ισχύ του Houdini με μία περισσότερο καλλιτεχνικά προσανατολισμένη διεπαφή.

Η διάκριση μεταξύ καλλιτέχνη και technical artist αποκτά ιδιαίτερη σημασία στο σύγχρονο περιβάλλον παραγωγής. Οι technical artists λειτουργούν συχνά ως ενδιάμεσοι μεταξύ των δημιουργικών και των τεχνικών ομάδων, αναπτύσσοντας εργαλεία που επιτρέπουν στους καλλιτέχνες να εργάζονται αποτελεσματικά χωρίς να απαιτείται βαθιά γνώση των υποκείμενων τεχνολογιών.

Συνεπώς, από την προοπτική του καλλιτέχνη, το σημαντικότερο πλεονέκτημα της προτεινόμενης μεθόδου δεν είναι η απόλυτη φυσική ακρίβεια, αλλά η δυνατότητα δημιουργίας ενός εργαλείου που είναι ταυτόχρονα εκφραστικό, παραμετροποιήσιμο και επεκτάσιμο.

Η αξιολόγηση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς αναδεικνύει ότι η επιτυχία ενός συστήματος ψηφιακής ζωγραφικής εξαρτάται όχι μόνο από την ποιότητα της προσομοίωσης, αλλά και από την ικανότητά του να ενσωματώνεται αποτελεσματικά στις πραγματικές συνθήκες παραγωγής.

7.4 Η Προοπτική της Βιομηχανίας

Η αξιολόγηση ενός συστήματος ψηφιακής ζωγραφικής δεν περιορίζεται αποκλειστικά στην ποιότητα των αποτελεσμάτων που παράγει ή στον βαθμό φυσικού ρεαλισμού που επιτυγχάνει. Στο πλαίσιο της σύγχρονης βιομηχανίας οπτικών εφέ και animation, ιδιαίτερη σημασία αποκτά η δυνατότητα ενός εργαλείου να ενσωματωθεί αποτελεσματικά σε υπάρχοντα production pipelines, να υποστηρίξει τη συνεργασία πολλών χρηστών και να προσαρμοστεί στις συνεχώς μεταβαλλόμενες απαιτήσεις μεγάλων παραγωγών.

Η διαδικαστική φύση του Houdini προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα προς αυτή την κατεύθυνση. Σε αντίθεση με εργαλεία που έχουν σχεδιαστεί ως αυτόνομες εφαρμογές ζωγραφικής, το προτεινόμενο σύστημα αναπτύχθηκε μέσα σε ένα περιβάλλον το οποίο χρησιμοποιείται ήδη ευρέως στη βιομηχανία κινηματογραφικών εφέ και αποτελεί αναπόσπαστο μέρος πολλών σύγχρονων pipelines.

Η modular αρχιτεκτονική που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα συμβάλλει επίσης στη δημιουργία συστημάτων που μπορούν να συντηρηθούν και να επεκταθούν από διαφορετικές ομάδες ανάπτυξης. Για παράδειγμα ένας TD μπορεί να επεκτείνει τα χαρακτηριστικά του solver, οι pipeline developers μπορούν να ενσωματώσουν το εργαλείο σε αυτοματοποιημένες διαδικασίες και οι καλλιτέχνες μπορούν να χρησιμοποιήσουν το εργαλείο χωρίς να απαιτείται πρόσβαση στην εσωτερική υλοποίηση, όλα αυτά μέσα στο ίδιο λογισμικό.

Η διάκριση αυτή ευθυγραμμίζεται με τη δομή των περισσότερων σύγχρονων studios, όπου η ανάπτυξη εργαλείων και η καλλιτεχνική παραγωγή πραγματοποιούνται από εξειδικευμένες ομάδες.

Επιπλέον, η αυτόματη ενσωμάτωση των προσομοιώσεων που παρέχει το Houdini στο οικοσύστημα του USD, αποτελεί ένα ισχυρό και μοναδικό προβάδισμα για τα studios που ακολουθούν τις σύγχρονες τεχνικές διάρθρωσης της παραγωγής ειδικών εφφέ.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, ένα studio ή μια ομάδα θα μπορούσε να διατηρεί και να εξελίσσει τον solver, ανάλογα με τις ανάγκες μιας παραγωγής, καταλήγοντας μετά από μια πληθώρα προσθηκών και iterations σε ένα in-house εργαλείο με μεγάλες δυνατότητες, αξιοπιστία και χρησιμότητα.

Παρόλα αυτά, η ενσωμάτωση σε production environments συνοδεύεται και από ορισμένες προκλήσεις. Η εξάρτηση από εξειδικευμένες διαδικασίες εγγενής στο Houdini μπορεί να περιορίσει τη φορητότητα του εργαλείου προς άλλα λογισμικά, ενώ η υψηλή

παραμετροποίηση απαιτεί την ανάπτυξη κατάλληλων interfaces ώστε να αποφεύγεται η έκθεση των χρηστών σε περιττή πολυπλοκότητα.

Ωστόσο, τα προβλήματα αυτά είναι σε μεγάλο βαθμό κοινά σε όλα τα εξειδικευμένα εργαλεία παραγωγής και μπορούν να αντιμετωπιστούν μέσω κατάλληλου σχεδιασμού του pipeline και συγγραφής εξειδικευμένων μεταφραστών των δεδομένων, καθώς αυτοί υποστηρίζονται από την επεκτασιμότητα του Houdini, εξ'ορισμού.

Κεφάλαιο 8: Συμπεράσματα

8.1 Συμπεράσματα της Έρευνας

Η παρούσα έρευνα, αφού εξέτασε περιπτώσεις της βιβλιογραφίας, καθώς και του πλαισίου, εντός του λογισμικού “Houdini”, και αφού αποπειράθηκε να μεταφέρει και να συνεχίσει, με σκοπό την βελτίωση και την απόδοση προς όφελος του καλλιτέχνη και του εν δυνάμει ερευνητή, τον πειραματισμό περί των φαινομένων της ζωγραφικής με παχύρρευστη μπογιά, και την μεταφορά αυτής στο ψηφιακό περιβάλλον, καταλήγει, δια μέσω της σύγκρισης και της αναφοράς, στο συμπέρασμα, ότι το Houdini αποτελεί ισχυρό υποψήφιο μέσο για την ανάπτυξη παρόμοιων συστημάτων, και υπόσχεται την βελτίωση τους ως προς την διαχείριση καλλιτεχνικών και παραγωγικών συνιστωσών.

Πιο συγκεκριμένα, και βάση των παραδειγμάτων που παρατέθηκαν, συμπεραίνεται ότι :

- Η διαδικασία προσομοίωσης μη-Νευτώνειων υγρών και ολοκληρωμένων καλλιτεχνικών συστημάτων είναι ένα πεδίο προς διερεύνηση με αρκετές δυσκολίες
- Οι αλγόριθμοι και τα εργαλεία που ασχολούνται με την επίλυση των ζητημάτων αυτών είναι περιστασιακά και αποτελούνται από πειραματικά στοιχεία, απλουστεύσεις και μεμονωμένες εφαρμογές σε κλειστά συστήματα
- Το Houdini αποτελεί ένα ιδιαίτερα εκλεπτυσμένο περιβάλλον με ανεξάντλητες δυνατότητες και εφαρμογές
- Στα πλαίσια μίας καλλιτεχνικής προσέγγισης, δίνεται δια μέσου του Houdini η δυνατότητα της βέλτιστης γεφύρωσης τόσο των επιστημονικών όσο και των χρηστικών εφαρμογών των παραπάνω πολυάριθμων και πολύπλευρων διεργασιών

8.2 Περιορισμοί στην Έρευνα

Η παρούσα εργασία επικεντρώθηκε κυρίως στη μελέτη, την ανάλυση και την παρουσίαση της γενικής μεθοδολογίας που ακολουθείται στον χώρο των προσομοιώσεων ρευστών συστημάτων, καθώς και στην καταγραφή των βασικών προκλήσεων και προβληματισμών που συνοδεύουν την ανάπτυξη τέτοιων προσεγγίσεων. Στόχος της δεν ήταν η εξαντλητική διερεύνηση όλων των μαθηματικών, φυσικών και υπολογιστικών πτυχών που διέπουν τα σύγχρονα συστήματα προσομοίωσης, αλλά η κατανόηση των θεμελιωδών αρχών πάνω στις οποίες αυτά βασίζονται και η αξιολόγηση της εφαρμογής τους στο πλαίσιο της ψηφιακής προσομοίωσης μπογιάς.

Για τον λόγο αυτό, η ανάλυση περιορίστηκε στα βασικά χαρακτηριστικά των αλγορίθμων, των επιλυτών και των λογισμικών που χρησιμοποιούνται στον συγκεκριμένο επιστημονικό τομέα. Παρότι παρουσιάστηκαν έννοιες όπως οι εξισώσεις Navier–Stokes, οι υβριδικές μέθοδοι προσομοίωσης και οι τεχνικές αναπαράστασης ιξωδοελαστικών υλικών, δεν επιχειρήθηκε εις βάθος μαθηματική ή αριθμητική διερεύνηση των επιμέρους αλγοριθμικών μηχανισμών. Αντίθετα, δόθηκε έμφαση στην κατανόηση του τρόπου με τον οποίο οι τεχνολογίες αυτές αξιοποιούνται στην πράξη και ενσωματώνονται σε σύγχρονα περιβάλλοντα προσομοίωσης, όπως το Houdini.

Παράλληλα, πραγματοποιήθηκε ανασκόπηση σημαντικών ερευνητικών προσπαθειών που έχουν συμβάλει στην εξέλιξη του πεδίου της ψηφιακής ζωγραφικής και των φυσικά βασισμένων προσομοιώσεων. Ωστόσο, η αναφορά στις εργασίες αυτές είχε κυρίως ενημερωτικό και συγκριτικό χαρακτήρα και δεν επεκτάθηκε σε πλήρη ανάλυση των επιμέρους μεθοδολογιών τους. Η έμφαση δόθηκε κυρίως στις γενικές κατευθύνσεις της έρευνας, στα προβλήματα που επιχειρούν να επιλύσουν οι διάφορες προσεγγίσεις και στις διαφορετικές φιλοσοφίες σχεδιασμού που έχουν προταθεί κατά καιρούς για την προσομοίωση της συμπεριφοράς της μπογιάς.

Ιδιαίτερη βαρύτητα δόθηκε επίσης στην παρουσίαση και τεκμηρίωση του συστήματος που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της εργασίας, καθώς και στην ανάδειξη πιθανών κατευθύνσεων για μελλοντική έρευνα. Η ανάπτυξη του συστήματος λειτούργησε κυρίως ως μέσο διερεύνησης και αξιολόγησης συγκεκριμένων τεχνικών και όχι ως προσπάθεια δημιουργίας ενός πλήρως ολοκληρωμένου εργαλείου παραγωγικής χρήσης. Ως εκ τούτου, η πρακτική εφαρμογή επικεντρώθηκε στην υλοποίηση και δοκιμή επιμέρους μηχανισμών, όπως η μεταφορά μπογιάς, η διαχείριση του ιξώδους, η ιξωδοελαστικότητα και η αλληλεπίδραση μεταξύ πινέλου και καμβά, μέσα από αντιπροσωπευτικά παραδείγματα λειτουργίας.

Κατά συνέπεια, τα αποτελέσματα της εργασίας θα πρέπει να θεωρηθούν ως μια διερευνητική προσέγγιση που αναδεικνύει τις δυνατότητες και τις προοπτικές της χρήσης του Houdini για την προσομοίωση καλλιτεχνικών υλικών και όχι ως μια τελική ή πλήρως ολοκληρωμένη λύση. Παρά τους περιορισμούς αυτούς, η εργασία θέτει τις βάσεις για περαιτέρω ανάπτυξη και βελτίωση του συστήματος, ανοίγοντας τον δρόμο για μελλοντικές έρευνες που θα μπορούσαν να ενσωματώσουν πιο σύνθετα φυσικά μοντέλα, πιο εξελιγμένους μηχανισμούς αλληλεπίδρασης και μεγαλύτερο βαθμό καλλιτεχνικού ελέγχου.

8.3 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Η παρούσα εργασία ανέδειξε μια σειρά από τεχνικές και μεθοδολογίες που μπορούν να αποτελέσουν τη βάση για την ανάπτυξη πιο ολοκληρωμένων συστημάτων προσομοίωσης μπογιιάς στο μέλλον. Με βάση τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη βιβλιογραφική έρευνα και την πειραματική υλοποίηση που παρουσιάστηκε, διαφαίνεται η δυνατότητα δημιουργίας ενός πιο ολοκληρωμένου και λειτουργικά ενοποιημένου εργαλείου εντός του περιβάλλοντος του Houdini, το οποίο θα μπορούσε να αναπαριστά με μεγαλύτερη πιστότητα τις φυσικές και καλλιτεχνικές ιδιότητες της ζωγραφικής διαδικασίας.

Μία από τις σημαντικότερες κατευθύνσεις μελλοντικής ανάπτυξης αφορά τη συνένωση των επιμέρους ερευνητικών προσεγγίσεων που παρουσιάζονται στη διεθνή βιβλιογραφία σε ένα ενιαίο σύστημα. Παρότι οι περισσότερες υπάρχουσες εργασίες επικεντρώνονται σε συγκεκριμένες πτυχές του προβλήματος, όπως η συμπεριφορά του πινέλου, η μεταφορά χρωστικής, η προσομοίωση ιξωδοελαστικών ιδιοτήτων ή η απορρόφηση από το υπόστρωμα, η σύγχρονη υπολογιστική ισχύς και η διαδικαστική αρχιτεκτονική του Houdini καθιστούν πλέον εφικτή την ενοποίηση αυτών των επιμέρους μηχανισμών σε ένα κοινό πλαίσιο λειτουργίας. Η ανάπτυξη ενός τέτοιου συστήματος θα επέτρεπε τη συνεργασία πολλαπλών αλγορίθμων, εργαλείων και εξειδικευμένων solvers, δημιουργώντας μια πιο ολοκληρωμένη αναπαράσταση της συμπεριφοράς της μπογιιάς.

Παράλληλα, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περαιτέρω ανάπτυξη του μοντέλου του καμβά και η ενσωμάτωση φυσικών χαρακτηριστικών που σχετίζονται με τη δομή και τις ιδιότητες της επιφάνειας ζωγραφικής. Στην παρούσα εργασία ο καμβάς αντιμετωπίστηκε κυρίως ως επιφάνεια αλληλεπίδρασης και εναπόθεσης χρώματος. Ωστόσο, σε πραγματικές συνθήκες, η συμπεριφορά της μπογιιάς επηρεάζεται σημαντικά από παράγοντες όπως η τραχύτητα της επιφάνειας, η πορώδης δομή του υλικού, η απορροφητικότητα και οι ιδιότητες διάχυσης του διαλύτη στο εσωτερικό του υποστρώματος.

Η ενσωμάτωση τέτοιων χαρακτηριστικών σε ένα μελλοντικό σύστημα θα μπορούσε να επιτρέψει την προσομοίωση φαινομένων όπως η απορρόφηση του υγρού από τον καμβά, η διάχυση της χρωστικής στο εσωτερικό του υλικού, η δημιουργία ανομοιομορφιών λόγω της υφής της επιφάνειας και η διαφοροποίηση της συμπεριφοράς μεταξύ διαφορετικών τύπων καμβά ή χαρτιού. Με τον τρόπο αυτό θα καθίστατο δυνατή η παραγωγή αποτελεσμάτων με υψηλότερο βαθμό φυσικού ρεαλισμού και μεγαλύτερη οπτική πιστότητα.

Επιπλέον, η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου συστήματος θα μπορούσε να συνδυάσει τις υπάρχουσες τεχνικές προσομοίωσης ρευστών με μοντέλα χρωστικών ουσιών, μηχανισμούς ανάμειξης χρωμάτων και προηγμένες μεθόδους απεικόνισης της επιφάνειας της μπογιιάς. Η ενοποίηση όλων αυτών των στοιχείων σε μια ενιαία διαδικαστική ροή εργασίας θα επέτρεπε τη δημιουργία ενός εξειδικευμένου εργαλείου ψηφιακής ζωγραφικής, ικανού να προσεγγίζει με μεγαλύτερη ακρίβεια τη συμπεριφορά πραγματικών καλλιτεχνικών μέσων.

Συνολικά, τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας υποδεικνύουν ότι η ανάπτυξη ενός τέτοιου συστήματος αποτελεί πλέον έναν ρεαλιστικό και τεχνικά εφικτό στόχο. Η ευελιξία της αρχιτεκτονικής του Houdini, σε συνδυασμό με τη δυνατότητα επέκτασης των ενσωματωμένων solvers μέσω προσαρμοσμένων πεδίων, microsolvers και διαδικαστικών εργαλείων, δημιουργεί ένα ιδιαίτερα κατάλληλο περιβάλλον για τη μελλοντική διερεύνηση και υλοποίηση προηγμένων συστημάτων προσομοίωσης μπογιιάς και ψηφιακής ζωγραφικής.

Βιβλιογραφία

Ακολουθούν οι βιβλιογραφικές αναφορές (πηγές) της Εργασίας.

Vishal Gohokar, (2023). Basics of Newtonian and Non-Newtonian Fluids, 30-33. (16 Ιούνιος 2026) Ανακτήθηκε από <https://www.aarf.asia/current/2023/Jul/NsJQwWoZRjuLN9.pdf>

William Baxter, Jeremy D. Wendt, Ming C Lin. (2004). IMPaSTo: a realistic, interactive model for paint, 1. <https://doi.org/10.1145/987657.987665>

Simon Clavet, Philippe Beaudoin, and Pierre Poulin, (2005). Particle-based Viscoelastic Fluid Simulation, 5. <https://doi.org/10.1145/1073368.1073400>

Daniel Winters, (2023). Mixed Viscosity Methods for Accelerated Viscous Fluid Simulation, 1. (16 Ιούνιος 2026) Ανακτήθηκε από https://uwaterloo.ca/computational-mathematics/sites/default/files/uploads/documents/daniel_winters_research_project_vf.pdf

James F. Price, (2006), Lagrangian and Eulerian Representations of Fluid Flow: Kinematics and the Equations of Motion, 25-35. (19 Ιούνιος 2026) Ανακτήθηκε από <https://www.whoi.edu/science/PO/people/jprice/class/ELreps.pdf>

Robert Bridson, (2018). Fluid Simulation for Computer Graphics, 3-4, 12. <https://doi.org/10.1201/b10635>

J.J. Derksen, (2010). Simulations of thixotropic liquids, 2. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2010.09.042>

Anton Paar, (2026). Basics of Thixotropy, (18 Ιούνιος 2026) Ανακτήθηκε από <https://wiki.anton-paar.com/en/basics-of-thixotropy/>

Gabriel Ohlsson, (2023). What is a Viscoelastic Material?, (18 Ιούνιος 2026) Ανακτήθηκε από <https://www.biolinscientific.com/blog/what-is-a-viscoelastic-material>

Hector Barreiro, Ignacio Garcia-Fernandez, Ivan Alduan, Miguel A. Otaduy (2017). Conformation Constraints for Efficient Viscoelastic Fluid Simulation, 1-2. <https://doi.org/10.1145/3130800.3130854>

Peter Claes, (2009), Controlling Fluid Simulations with Custom Fields in Houdini, 8-9. (19 Ιούνιος 2026) Ανακτήθηκε από <https://nccastaff.bournemouth.ac.uk/jmacey/MastersProject/MSc09/Claes/thesis/PeterClaesThesis.pdf>

Jin Li, Yang Gao, Ju Dai, Shuai Li, Aimin Hao, Hong Qin (2023). MPMNet: A Data-driven MPM Framework for Dynamic Fluid-solid Interaction, 1-5. <https://doi.org/10.1109/tvcg.2023.3272156>

Dan Engleson. (2011), Fluid Simulation Using Implicit Particles, 2. (19 Ιούνιος 2026) Ανακτήθηκε από <https://www.danengleson.com/images/portfolio/FLIP/rapport.pdf>

Mi You, Taekwon Jang, Seunghoon Cha, Jihwan Kim and Junyong Noh (2013). Realistic paint simulation based on fluidity, diffusion, and absorption, 4. <https://doi.org/10.1002/cav.1500>

Tolga G. Goktekin, Adam W. Bargteil, James F. O'Brien, (2004), A Method for Animating Viscoelastic Fluids, 463-468. <https://doi.org/10.1145/1186562.1015746>

Bart Adams, Martin Wicke, Philip Dutré, Markus Gross, Mark Pauly, Matthias Teschner, (2004), Interactive 3D Painting on Point-Sampled Objects, 1-5. (19 Ιούνιος 2026)

Ανακτήθηκε από https://geometry.stanford.edu/lgl_2024/papers/awdgpt-i3dppso-04/awdgpt-i3dppso-04.pdf

Krishna Kumar, Shyamini Kularathna, (2022), An introduction to the Material Point Method. (19 Ιούνιος 2026) Ανακτήθηκε από <https://www.geoelements.org/LearnMPM/mpm.html>

Mark A. Bolstad, (2019), Large-Scale Cinematic Visualization using Universal Scene Description, 1-2. <https://doi.org/10.1109/ldav48142.2019.8944362>

Chenfanfu Jiang, (2017), The Material Point Method for the Physics-Based Simulation of Solids and Fluids. (19 Ιούνιος 2026) Ανακτήθηκε από <https://web.cs.ucla.edu/~dt/theses/jiang-thesis.pdf>

Chenfanfu Jiang, Craig Schroeder, Andrew Selle, Joseph Teran, Alexey Stomakhin, (2015), The Affine Particle-In-Cell Method, 1-3. <https://doi.org/10.1145/2766996>

J. P. Naiman¹, Kalina Borkiewicz², and A. J. Christensen, (2017), Houdini for Astrophysical Visualization, 1-2. <https://doi.org/10.1088/1538-3873/aa51b3>

SideFX Documentation, (2026). (19 Ιούνιος 2026) Ανακτήθηκε από <https://www.sidefx.com/docs/>

Ceyhan Kapusuz, (2017), Non-Newtonian and Viscoelastic Fluids. (19 Ιούνιος 2026) Ανακτήθηκε από <https://ceyhankapusuz.com/2017/01/27/non-newtonian-and-viscoelastic-fluids/>

Nelson Chu, William Baxter, Li-Yi Wei, Naga Govindaraju (2010). Detail-Preserving Paint Modeling for 3D Brushes, 27-30. <https://doi.org/10.1145/1809939.1809943>

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης.