



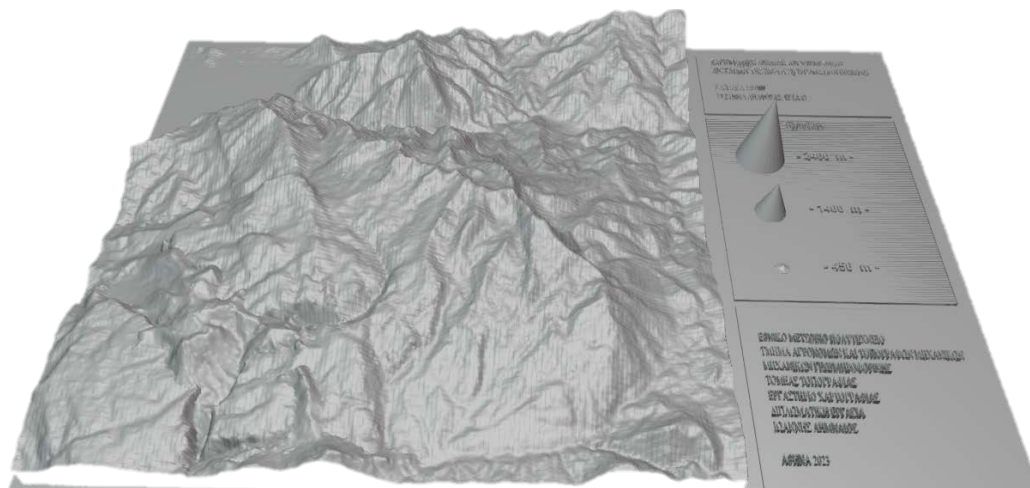
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ -
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ - ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ ΥΨΟΜΕΤΡΙΚΟΥ ΑΝΑΓΛΥΦΟΥ ΣΕ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ

Ιωάννης Γ. Λιμναίος

Επιβλέπων: **Μαρίνος Κάβουρας**, Καθηγητής Ε.Μ.Π.



DIPLOMA THESIS

Cartographic Rendering of Surface Relief in 3D Printing

Ioannis G. Limnaios

Supervisor: **Marinos Kavouras**, Professor NTUA

ΑΘΗΝΑ - ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2023/ATHENS - OCTOBER 2023

Ευχαριστίες

Κλείνοντας αυτό το μεγάλο κεφάλαιο της ζωής μου θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους εκείνους που συνέβαλαν στην ολοκλήρωση του.

Πρώτα απ' όλους, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Καθηγητή μου κ. Μαρίνο Κάβουρα, επιβλέποντα της Διπλωματικής μου Εργασίας. Τον ευχαριστώ που με ενέπνευσε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα, για την συνεχή καθοδήγηση και για την βοήθεια του σε όλα τα εμπόδια που μου εμφανίζονταν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Τίποτα όμως δεν θα ήταν το ίδιο αν στο πλευρό μου δεν ήταν ο Καθηγητής μου κ. Γιώργος Πανόπουλος. Είναι εκείνος που βοήθησε να γίνει πράξη όλη μου η προσπάθεια. Η συνεργατικότητα του ήταν υποδειγματική, αφού, όποτε τον χρειαζόμουνα ήταν πάντοτε διαθέσιμος, ενώ, η μεθοδικότητα του, οι γνώσεις του, το τεράστιο ενδιαφέρον του για το θέμα της εργασίας, αλλά πάνω απ' όλα οι πολύτιμες συμβουλές του, ήταν οι λόγοι που μου δίνανε θάρρος, να συνεχίζω να δουλεύω, ξεδιπλώνοντας τον καλύτερο εαυτό μου. Τον ευχαριστώ πολύ για όλα.

Στο τέλος των προπτυχιακών μου σπουδών οφείλω να αναγνωρίσω τη συμβολή όλων των καθηγητών μου στη διαμόρφωση γερών βάσεων στο αντικείμενο του Αγρονόμου και Τοπογράφου Μηχανικού-Μηχανικού Γεωπληροφορικής και στη καλλιέργεια της σκέψης του μηχανικού.

Αυτός ο κύκλος της ζωής μου έγινε πιο όμορφος χάρη στους φίλους μου, αυτούς που ήδη είχα πριν ξεκινήσει αυτό το όμορφο ταξίδι των προπτυχιακών μου σπουδών και αυτούς που απέκτησα στην πορεία του. Όλοι αυτοί οι άνθρωποι είναι οι μεγάλοι πρωταγωνιστές των φοιτητικών μου αναμνήσεων, εξαιρετικοί συνεργάτες, στηρίγματα στις δύσκολες στιγμές, αλλά και παρόντες σε όλες τις χαρές. Τους ευχαριστώ από τα βάθη της καρδιάς μου.

Καταληκτικά, το μεγαλύτερο ευχαριστώ θα ήθελα να το πω στους γονείς μου Γρηγόρη και Χρυσάνθη, αλλά και τη γιαγιά μου Ευαγγελία, οι οποίοι πάντα με στήριζαν και με πίστευαν όσο κανείς, προσπαθώντας να εξασφαλίσουν τις κατάλληλες συνθήκες για την πραγματοποίηση των σπουδών μου, χωρίς να μου λείπει τίποτα. Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα, την αδερφή μου Ταξιαρχούλα, που με παρότρυνε και μου έδωσε

την ιδέα να φοιτήσω σε αυτή τη σχολή, την οποία στη συνέχεια αγάπησα και δέθηκα ιδιαίτερα.

Σας ευχαριστώ όλους

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη.....	5
Abstract.....	7
1. Εισαγωγή.....	9
1.1 Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας.....	9
1.2 Δομή της Διπλωματικής Εργασίας.....	9
2. Γενικά Στοιχεία για την Τρισδιάστατη Εκτύπωση	11
2.1 Ιστορικά στοιχεία για τους τρισδιάστατους χάρτες.....	11
2.2 Χαρτογραφική έρευνα με έμφαση στους τρισδιάστατους χάρτες.....	12
2.3 Χαρακτηριστικά και στόχοι των τρισδιάστατων χαρτών.....	12
2.4 Διαδικασία σχεδιασμού των τρισδιάστατων χαρτών	14
2.5 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της τρισδιάστατης εκτύπωσης στην αναπαράσταση τοπογραφικών επιφανειών.....	16
2.5.1 Πλεονεκτήματα.....	16
2.5.2 Μειονεκτήματα.....	18
2.6 Εφαρμογές της τρισδιάστατης εκτύπωσης στη βιομηχανία	20
3. Συλλογή Δεδομένων - Δημιουργία Τρισδιάστατου Μοντέλου.....	25
3.1 Σύνοψη της τεχνικής διαδικασίας για τη δημιουργία του τρισδιάστατου μοντέλου	25
3.2 Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους (DTM).....	26
3.3 Ψηφιακά Μοντέλα Επιφανείας (DSM)	27
3.4 Δημιουργία Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους.....	27
3.5 Επιλογή δεδομένων από την ιστοσελίδα Copernicus.....	29
3.6 Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους SRTM.....	29
3.7 Το παγκόσμιο ψηφιακό μοντέλο εδάφους ASTER.....	30
3.8 Γενικά στοιχεία για την περιοχή μελέτης.....	31

3.9	Γεωαναφορά του DSM στο ΕΓΣΑ '87 και περικοπή στα όρια της περιοχής ...	32
3.10	Δημιουργία του 3D μοντέλου της περιοχής μελέτης	33
3.11	STL (Standard Tessellation Language).....	38
3.12	Προσθήκη χαρτογραφικών στοιχείων μέσω του Blender 3.6	39
3.12.1	Δημιουργία τρισδιάστατης βάσης.....	40
3.12.2	Δημιουργία τρισδιάστατου υπομνήματος υψομέτρου και λοιπών στοιχείων πλαισίου	41
3.13	Αξιολόγηση του τρισδιάστατου μοντέλου σε σχέση με το Google Earth.....	44
4.	Μέθοδοι και Υλικά Εκτύπωσης.....	49
4.1	Μέθοδοι Τρισδιάστατης Εκτύπωσης.....	49
4.2	Μέθοδος FDM (Fused Deposition Modeling).....	49
4.2.1	Πλεονεκτήματα Μεθόδου FDM	50
4.2.2	Μειονεκτήματα Μεθόδου FDM	51
4.2.3	Υλικά για τρισδιάστατη εκτύπωση FDM	53
4.2.4	Προβλήματα στη 3D εκτύπωση FDM και λύσεις	56
5.	Εκτέλεση της Τρισδιάστατης Εκτύπωσης	61
5.1	Χαρακτηριστικά του τρισδιάστατου εκτυπωτή Ultimaker S5	61
5.2	Ανάλυση των παραμέτρων των ρυθμίσεων εκτύπωσης της εφαρμογής UltiMaker Cura 5.4.0.....	62
5.3	Παραγωγή δοκιμαστικού μοντέλου.....	69
5.4	Αποτελέσματα τελικής εκτύπωσης	70
6.	Συμπεράσματα	75
6.1	Έλλειψη χαρτογραφικών στοιχείων στα STL που έχουν παραχθεί από το DEM to 3D του QGIS 3.22.11	75
6.2	Ύπαρξη μετρητικών προβλημάτων στο λογισμικό Blender 3.6 και έλλειψη χαρτογραφικών συμβόλων.....	76
6.3	Επιπρόσθετη επεξεργασία του αρχείου STL του Blender, στο πρόγραμμα Ultimaker Cura 5.4.0.....	77

6.4	Αξιολόγηση δοκιμίου που προέκυψε από τη τρισδιάστατη εκτύπωση.....	77
6.5	Ισοδιάσταση σύμφωνα με την οποία έχει εκτυπωθεί το μοντέλο	78
6.6	Αξιολόγηση μεθόδου εκτύπωσης FDM και υλικού PLA.....	78
6.7	Αστοχία στη κατασκευή του υπομνήματος κατά την πρώτη εκτύπωση	79
6.8	Σύγκριση τρισδιάστατα εκτυπωμένου χάρτη ανάγλυφου και δισδιάστατου χάρτη 79	
7.	Βιβλιογραφικές Αναφορές.....	83

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάδειξη της δυνατότητας προσομοίωσης του γεωγραφικού χώρου με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια και ρεαλισμό σε ένα τρισδιάστατο μοντέλο υψομετρικού ανάγλυφου.

Για την κατασκευή του μοντέλου, χρησιμοποιήθηκαν τα λογισμικά του QGIS και του Blender, προκειμένου να δημιουργηθεί το ψηφιακό μοντέλο τρισδιάστατης απεικόνισης (STL) του υψομετρικού ανάγλυφου, μέσω των υψομετρικών πληροφοριών ενός μοντέλου DSM της ιστοσελίδας Copernicus. Ωστόσο, το μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζεται, στην αξιοποίηση της τεχνολογίας της τρισδιάστατης εκτύπωσης με τη χρήση του εκτυπωτή Ultimaker S5 για τη δημιουργία φυσικών μοντέλων του υψομετρικού ανάγλυφου, προσφέροντας μια νέα διάσταση στην αναπαράσταση του γεωγραφικού χώρου. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει την οπτική και ψηφιακή εξέταση του ανάγλυφου, επιτρέποντας την επίλυση προβλημάτων και την λήψη αποφάσεων με βάση το φυσικό μοντέλο.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι η αυτή η Διπλωματική Εργασία ανοίγει τον δρόμο για περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη στον τομέα της χαρτογραφίας και της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Η συνδυασμένη χρήση GIS και 3D printing ανοίγει νέες προοπτικές για την αναπαράσταση και την επίλυση πρακτικών προβλημάτων σε ποικίλους τομείς, όπως η εκπαίδευση, η πολεοδομία, η γεωλογία κυρίως λόγω του ότι έχει τη δυνατότητα της ενεργοποίησης της αίσθησης της αφής στον χρήστη, πέρα από αυτή της όρασης, διευκολύνοντας τον στην καλύτερη αντίληψη του περιβάλλοντος που εξετάζει.

The aim of this thesis is to demonstrate the possibility of simulating the geographical space with as much accuracy and realism as possible in a three-dimensional elevation model.

For the construction of the model, the software of QGIS and Blender were used to create the digital 3D model of the elevation relief (STL) through the elevation information of a DSM model of the Copernicus website. However, the greatest interest is shown in the use of 3D printing technology using the Ultimaker S5 printer to create physical models of the elevation relief, offering a new dimension to the representation of geographical space. This approach allows visual and digital examination of the relief, enabling problem solving and decision making based on the physical model.

Finally, it is worth noting that this thesis paves the way for further research and development in the field of cartography and 3D printing. The combined use of GIS and 3D printing opens new perspectives for the representation and solution of practical problems in various fields such as education, urban planning, geology mainly due to the possibility of activating the sense of touch in the user, beyond that of vision, facilitating the user to better perceive the environment he/she is examining.

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας

Η σύγχρονη τεχνολογία έχει επιφέρει επαναστατικές αλλαγές στον τρόπο με τον οποίο αντιλαμβανόμαστε, αναπαριστούμε και αξιολογούμε το γεωγραφικό περιβάλλον. Η χρήση Γεωγραφικών Πληροφοριακών Συστημάτων (Geographic Information Systems - GIS) και τρισδιάστατων εκτυπώσεων (3D printing) αποτελεί μία από τις σημαντικότερες εξελίξεις στον τομέα της γεωγραφικής ανάλυσης και της αναπαράστασης του γεωγραφικού χώρου.

Σκοπός της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι η αξιολόγηση της χαρτογραφικής απόδοσης του υψομετρικού ανάγλυφου σε τρισδιάστατη εκτύπωση, μέσω των εργαλείων που χρησιμοποιήθηκαν για την πραγματοποίηση της, των προβλημάτων που εμφανίστηκαν στη πορεία, καθώς και των αποτελεσμάτων που προέκυψαν.

1.2 Δομή της Διπλωματικής Εργασίας

Εν περιλήψει, τα επιμέρους κεφάλαια που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της Διπλωματικής Εργασίας είναι τα εξής:

Στο **Κεφάλαιο 2** αναφέρονται κάποια γενικά στοιχεία που αφορούν τη τρισδιάστατη εκτύπωση στην χαρτογραφική απόδοση ανάγλυφου, όπως τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που παρουσιάζει, μια εισαγωγή για τη διαδικασία σχεδιασμού των 3D χαρτών σύμφωνα με βιβλιογραφικές πηγές και κάποια ιστορικά στοιχεία.

Στο **Κεφάλαιο 3** παρουσιάζεται αναλυτικά η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για τη κατασκευή του τρισδιάστατου μοντέλου του υψομετρικού ανάγλυφου, μέσω του εργαλείου DEM to 3D, του λογισμικού QGIS 3.22.11 χρησιμοποιώντας υψομετρικά δεδομένα από την ιστοσελίδα Copernicus. Ακόμη, πραγματοποιήθηκε επιπρόσθετη επεξεργασία του μοντέλου και η προσθήκη χαρτογραφικών στοιχείων στο λογισμικό του Blender 3.6, ενώ στο τέλος, πραγματοποιήθηκε αξιολόγηση του STL, συγκρίνοντας κάποιες περιοχές του, με τις αντίστοιχες στην ιστοσελίδα του Google Earth

Στο **Κεφάλαιο 4** περιγράφονται τα χαρακτηριστικά της μεθόδου και του υλικού που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση της τρισδιάστατης εκτύπωσης (FDM και PLA, αντίστοιχα). Ακόμη, γίνονται αναφορές για άλλα υλικά που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν (ABS), καθώς και ορισμένα τεχνικά προβλήματα που μπορεί να προκύψουν σε μια τρισδιάστατη εκτύπωση, αλλά και τους τρόπους αντιμετώπισής τους.

Στο **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του τρισδιάστατου εκτυπωτή Ultimaker S5 που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση της εκτύπωσης, καθώς και απαραίτητες ρυθμίσεις εκτύπωσης που έγιναν στο λογισμικό του Ultimaker Cura 5.4.0. Ακόμη, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του δοκιμίου που εκτυπώθηκε, αλλά και αυτά της τελικής εκτύπωσης.

Στο **Κεφάλαιο 6** συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα Εργασία, τα προβλήματα που προέκυψαν στη πορεία της, οι τρόποι επίλυσης τους, καθώς και τομείς πάνω στους οποίους μπορεί να γίνει σύγκριση μεταξύ της χρήσης ενός κλασσικού χάρτη ορθής προβολής και ενός τρισδιάστατα εκτυπωμένου χάρτη.

Κεφάλαιο 2

Γενικά Στοιχεία για την Τρισδιάστατη Εκτύπωση

2.1 Ιστορικά στοιχεία για τους τρισδιάστατους χάρτες

Η χαρτογράφηση της τοπογραφίας και των χαρακτηριστικών της μορφής του εδάφους, είναι από τους σημαντικότερους και παλαιότερους κλάδους της επιστήμης. Μερικοί από τους πρώτους χάρτες, που βρέθηκαν ως σπηλαιογραφίες στη σημερινή Τσεχική Δημοκρατία, χρησιμοποιούσαν διάφορα σχήματα για την αναπαράσταση λόφων, κοιλάδων και άλλων τοπογραφικών χαρακτηριστικών (Shears, Stocks Jr., Bagg, 2016).

Οι χαρτογράφοι ερευνούν εδώ και πολύ καιρό, τον τρόπο με τον οποίο θα χρησιμοποιήσουν καλύτερα δισδιάστατα μέσα για να αναπαραστήσουν με ακρίβεια τις γεωμορφές και άλλες τρισδιάστατα χαρακτηριστικά. Οι δύο πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι μέθοδοι περιλαμβάνουν τις ισοϋψείς καμπύλες και τη σκίαση αναγλύφου (Imhof, 1982). Οι τοπογραφικοί χάρτες χρησιμοποιούν τις ισοϋψείς καμπύλες για να αποδώσουν το υψόμετρο ενός σημείου, ενώ οι χάρτες ανάγλυφου χρησιμοποιούν μια μέθοδο που ονομάζεται "σκίαση λόφων" δημιουργώντας μια ψευδαίσθηση σκιών, που υποδηλώνουν τρισδιάστατα χαρακτηριστικά, άρα και τη τοπογραφία της επιφάνειας της γης σε εκείνη τη περιοχή (Shears, Stocks Jr., Bagg, 2016). Ωστόσο, οι τεχνικές αυτές απαιτούν σημαντική και παράλληλα υποκειμενική συμβολή από τον χαρτογράφο, ο οποίος πρέπει να πραγματοποιήσει τη γενίκευση που απαιτείται για να καταστεί δυνατή μια τέτοια αναπαράσταση (Tanaka, 1950, Monmonier, 1996). Αν και οι τεχνικές αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή χαρτών κατάλληλων για ανάλυση από έναν θεατή εκπαιδευμένο στην ερμηνεία, εξακολουθούν να μην εμπλέκουν τη σημαντική απτική αίσθηση που είναι τόσο σημαντική για την ευρύτερη κατανόηση από ένα ανθρώπινο κοινό (Harris et al., 2001- Jorntell et al., 2014).

Είναι δύσκολο να επισημάνουμε ένα συγκεκριμένο πρόσωπο ή οργανισμό που ξεκίνησε να χρησιμοποιεί την τρισδιάστατη εκτύπωση για χαρτογραφικά μοντέλα, καθώς πρόκειται για μια εξελισσόμενη τεχνολογία που έχει υιοθετηθεί από πολλά διαφορετικά άτομα και ιδρύματα σε όλο τον κόσμο. Ωστόσο, οι πρώτες αναφορές στη χρήση της

τρειςδιάστατης εκτύπωσης για τη χαρτογραφία μπορούν να εντοπιστούν στις αρχές της δεκαετίας του 2000, όταν ερευνητές και χαρτογράφοι άρχισαν να πειραματίζονται με την τεχνολογία και να αναπτύσσουν νέες τεχνικές για τη δημιουργία λεπτομερών και ακριβών μοντέλων. Ένας από τους πρωτοπόρους στον τομέα αυτό ήταν ο Michael P. Smith, γεωγράφος και χαρτογράφος στο Πολιτειακό Πανεπιστήμιο του Τέξας, ο οποίος ανέπτυξε μια μέθοδο για τη δημιουργία τρισδιάστατων εκτυπωμένων μοντέλων ποτάμιων συστημάτων με βάση ψηφιακά δεδομένα υψομέτρων. Έκτοτε, η τεχνολογία έχει εξελιχθεί και χρησιμοποιείται ευρύτερα στη χαρτογραφία, τη γεωγραφία και άλλους τομείς.

Σήμερα, τα τρισδιάστατα εκτυπωμένα χαρτογραφικά μοντέλα χρησιμοποιούνται για διάφορους σκοπούς, όπως η εκπαίδευση, η έρευνα και η οπτικοποίηση. Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να βοηθήσουν τους φοιτητές και τους ερευνητές να κατανοήσουν καλύτερα τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά και τις μεταξύ τους σχέσεις, καθώς και να παρέχουν οπτικά βοηθήματα για παρουσιάσεις και ενημέρωση του κοινού.

2.2 Χαρτογραφική έρευνα με έμφαση στους τρισδιάστατους χάρτες

Τα τελευταία χρόνια έχει γίνει σημαντική χαρτογραφική έρευνα, πάνω στους τρισδιάστατους χάρτες. Πολλοί φορείς παρέχουν τεχνικές λύσεις αποσκοπώντας τη δημιουργία τρισδιάστατων χαρτών και άλλων προοπτικών προβολών. Ειδικότερα, ασχολούνται με διαχείριση δεδομένων και λογισμικά αλγορίθμων με στόχο την μετατροπή αυτών των τρισδιάστατων μοντέλων σε προοπτικές απεικονίσεις. Ακόμη, υπάρχουν πολλά ερευνητικά προγράμματα που προωθούν τη θεματική διαδραστικότητα και τη χωρική πλοήγηση αυτών των διαδραστικών αναπαραστάσεων, όπως ο Άτλας της Ελβετίας. Ωστόσο, μέχρι τώρα, ο σχεδιασμός τρισδιάστατων χαρτών δεν αποτελούσε συνηθισμένο πεδίο έρευνας και αυτό λόγω, της ιδιαίτερης πολυπλοκότητας και της καινοτομίας που χαρακτηρίζει των μικρό αριθμό τρισδιάστατων χαρτών σε σχέση με άλλες δημοσιευμένες χαρτογραφικές αναπαραστάσεις (Haberling, Bar, Hurni, 2008).

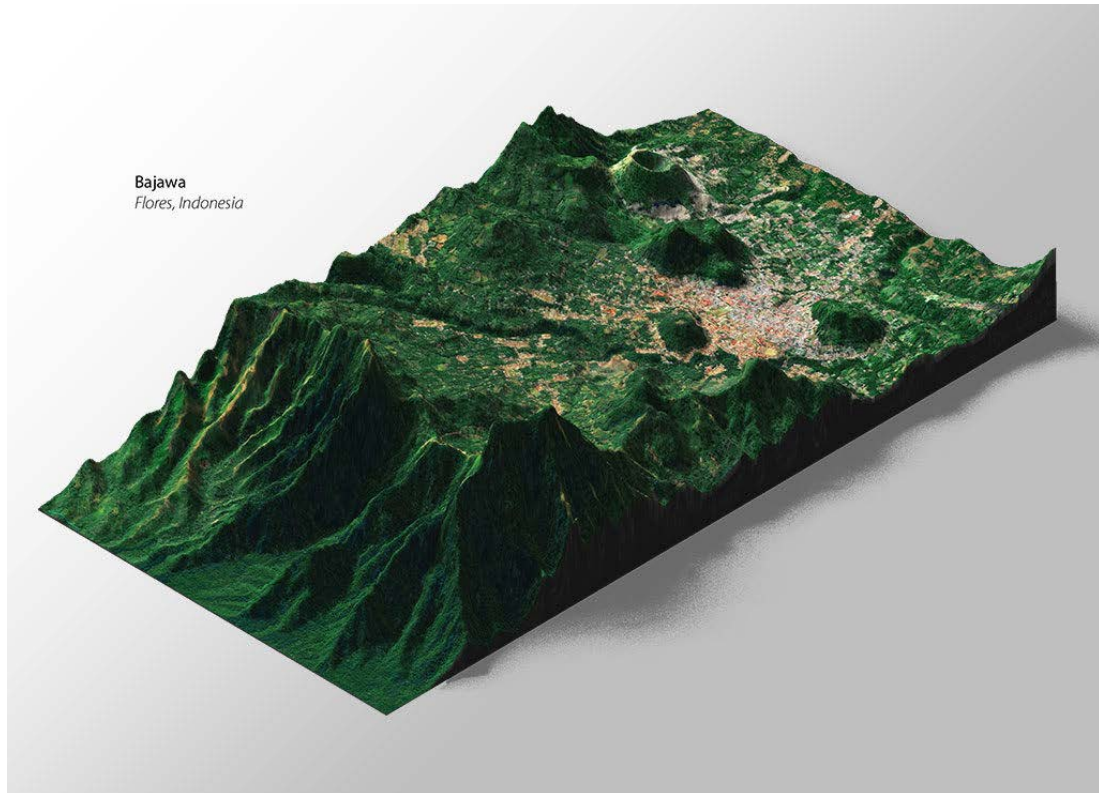
2.3 Χαρακτηριστικά και στόχοι των τρισδιάστατων χαρτών

Οι δυναμικοί τρισδιάστατοι χάρτες οθόνης (σε ψηφιακή μορφή) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για πολλούς σκοπούς ή εργασίες όπως η διδασκαλία, ο σχεδιασμός, η πλοήγηση, η ανάλυση και οι επιδείξεις (Buziek 2002). Συνήθως βασίζονται σε ένα

ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DTM), σε συνδυασμό με πρόσθετα γεωδεδομένα, τα οποία μπορεί να είναι μεμονωμένα ή συνδυασμένα επίπεδα (π.χ στρώματα δεδομένων raster, όπως ορθοφωτογραφίες ή δορυφορικές εικόνες, ραστεροποιημένοι χάρτες), θεματικοί χρωματισμοί (π.χ. χρωματισμός με βάση το υψόμετρο), διανυσματικά τρισδιάστατα αντικείμενα ή ετικέτες

Όπως μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτό, ένα προοπτικό σχέδιο προσελκύει τους θεατές μέσω της περιγραφικότητας του και της γραφικής του απεικόνισης. Αυτός ο τύπος αναπαράστασης αντιστοιχεί ιδανικά με τη φυσική στερεοσκοπική και προοπτική αντίληψη του περιβάλλοντος (Haberling, Bar, Hurni, 2008) . Επειδή αυτές οι αναπαραστάσεις χρησιμοποιούνται σπανιότερα από τον χάρτη που βρίσκεται σε ορθή προβολή, όπως μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτό, συναρπάζουν τους αναγνώστες. Ωστόσο, σε αντίθεση με έναν κλασικό χάρτη σε ορθή προβολή, οι αποστάσεις δεν μπορούν να μετρηθούν και κάθε μεμονωμένο αντικείμενο δεν μπορεί να τοποθετηθεί ακριβώς εντός της εικόνας σε αυτόν τον τύπο αναπαράστασης. Ωστόσο, προτείνεται η χρήση του όρου "χάρτης" εάν τα αντικείμενα που απεικονίζονται είναι γεωγραφικά αναφερόμενα σε ένα χαρτογραφικό μοντέλο, εάν το μοντέλο δεδομένων είναι γενικευμένο και αν η γραφική εμφάνιση των μεμονωμένων αντικειμένων ταξινομείται και συμβολίζεται από ένα υπόμνημα (Haberling, Bar, Hurni, 2008).

Σήμερα, μπορεί κανείς να συναντήσει τρισδιάστατους χάρτες σε πολλά σύγχρονα έντυπα και ψηφιακά μέσα. Ακόμη, μπορούμε να συναντήσουμε στατικούς τρισδιάστατους χάρτες σε εφημερίδες, πολιτικά ή τεχνικά περιοδικά και επιστημονικά περιοδικά και όπως φαίνεται καθιστούν πολύ ελκυστική την αναπαράσταση χωρικών κατανεμημένων φαινομένων σε καλά καθορισμένους γεωγραφικούς χώρους, συχνά με αναφορά σε χάρτη επισκόπησης (Haberling, Bar, Hurni, 2008).



Σχήμα 2.1: Το τρισδιάστατο ψηφιακό μοντέλο της πόλης Bajawa στην Ινδονησία (StackExchange)

2.4 Διαδικασία σχεδιασμού των τρισδιάστατων χαρτών

Για τον σχεδιασμό των τρισδιάστατων χαρτών πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν τρεις βασικοί παράμετροι: η εννοιολογική, η τεχνική και οι πτυχές του προϊόντος. Η εννοιολογική παράμετρος έχει σχέση με το πλαίσιο του χρήστη και το προσωπικό του περιβάλλον και συγκεκριμένα με τις δεξιότητες και τις ικανότητες του, όπως εκπαίδευση, γνώσεις, εμπειρία και χαρακτηριστικά της εφαρμογής που χρησιμοποιείται (όπως προσανατολισμός, πληροφορίες, ανάλυση) . Για την κατασκευή των τρισδιάστατων χαρτών, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα μεγάλο πλήθος γεωγραφικών δεδομένων που προέρχονται από Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών που καλύπτουν μεγάλες περιοχές του κόσμου. Για τη δημιουργία τρισδιάστατων χαρτών μπορούν να χρησιμοποιηθούν ορθοφωτογραφίες, δορυφορικές εικόνες ή σαρωμένα τοπογραφικά διαγράμματα και θεματικοί χάρτες. Το περιεχόμενο που προκύπτει από έναν τρισδιάστατο χάρτη μπορεί να

βασίζεται είτε σε δεδομένα raster, είτε σε δεδομένα vector, τα οποία προσφέρουν μεγαλύτερη ευελιξία και επιτρέπουν καλύτερη διαδραστική πρόσβαση.

Η επιλογή ενός προϊόντος οπτικοποίησης εξαρτάται κυρίως από τη διαθεσιμότητα των δεδομένων, τον επιδιωκόμενο σκοπό και τους περιορισμούς (π.χ. ολοκληρωμένη λειτουργικότητα, μέσα προβολής, δεξιότητες του συγγραφέα, κόστος, χρόνος- Haberling, Bar, Hurni, 2008).

Όσον αφορά τη γενική θεώρηση των πτυχών του προϊόντος, υπάρχουν ορισμένα σημεία στα οποία πρέπει να δώσουν βαρύτητα οι χρήστες και αυτά είναι τα εξής: το θεματικό περιεχόμενο, ο χειρισμός και η χρηστικότητα, η διαθεσιμότητα (συμπεριλαμβανομένου του κόστους) και φυσικά, η οπτική εμφάνιση και ο σχεδιασμός των τρισδιάστατων χαρτών. Εξάλλου, το τελικό αποτέλεσμα που είναι και η εμφάνιση του χάρτη, είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας για τη προσέλκυση χρηστών, ώστε να κάνει ευκολότερη τη μελέτη, αλλά και τη παροχή των πληροφοριών, είτε πρόκειται για έναν κλασσικό χάρτη δισδιάστατης μορφής, για έναν χάρτη τριών διαστάσεων. Όπως μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτό, όταν ένας τρισδιάστατος χάρτης διαθέτει υψηλή ανάλυση εικόνας, αλλά και πλούσια χρωματική παλέτα, τότε θα θεωρείται αρκετά ελκυστικός για τους χρήστες, οι οποίοι θα μπορούν να παρακολουθήσουν με μεγαλύτερη αφοσίωση, όλες τις λεπτομέρειες του μοντέλου (Haberling, Bar, Hurni, 2008).

Όπως συμβαίνει με τη διαδικασία δημιουργίας χαρτών γενικά, έτσι και ολόκληρη η ροή εργασίας της διαδικασίας σχεδιασμού 3D χαρτών μπορεί να χωριστεί σε τρία βασικά στάδια: μοντελοποίηση, συμβολοποίηση και οπτικοποίηση. Εδώ αξίζει να σημειώσουμε πώς κάθε βήμα είναι αλληλένδετο με το επόμενο ενώ όλη η διαδικασία είναι επαναληπτική, έτσι ώστε τόσο κάθε βήμα όσο και το σύνολο της διαδικασίας μπορούν να επαναληφθούν αρκετές φορές, εάν είναι απαραίτητο (Terribilini 2001). Αυτή η πτυχή της διαδικασίας σχεδιασμού μοιάζει αρκετά με εκείνη των κλασικών χαρτών.

2.5 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της τρισδιάστατης εκτύπωσης στην αναπαράσταση τοπογραφικών επιφανειών

2.5.1 Πλεονεκτήματα

Υψηλή ακρίβεια: Η τρισδιάστατη εκτύπωση επιτρέπει το σχεδιασμό και την εκτύπωση σύνθετων τοπογραφικών μοντέλων, αποδίδοντας τη λεπτομερή αναπαράσταση περίπλοκων γεωγραφικών χαρακτηριστικών του εδάφους, όπως οροσειρές, κοιλάδες και άλλα σύνθετα τοπία με υψηλό επίπεδο λεπτομέρειας.

Ταχύτητα στη κατασκευή: Μέσω της τρισδιάστατης εκτύπωσης υπάρχει η δυνατότητα κατασκευής τοπογραφικών μοντέλων μέσα σε λίγες ώρες. Το γεγονός αυτό, επιτρέπει την ταχύτερη ολοκλήρωση κάθε σταδίου, σε αντίθεση με τις συμβατικές μεθόδους κατασκευής με το χέρι, οι οποίες μπορεί να χρειαστούν εβδομάδες για τον ολοκλήρωση της δημιουργίας του προϊόντος, αφού, για την κατασκευή των περισσότερων φυσικών μοντέλων, ειδικά στον τομέα της αρχιτεκτονικής, όπου ασχολείται με την αναπαράσταση τοπίων, χρησιμοποιούνται υλικά, όπως ο πηλός, το χαρτόνι, το ξύλο και ο γύψος, ενώ, η συναρμολόγηση των μοντέλων πραγματοποιείται συνήθως κομμάτι-κομμάτι. Η διαδικασία αυτή τείνει να είναι χρονοβόρα. Επιπρόσθετα, δεδομένου ότι το τοπογραφικό έδαφος έχει πολύπλοκη γεωμετρία και είναι δύσκολο να παραχθεί με τέτοιες μεθόδους, προκύπτουν συχνά μεγάλες ανακρίβειες (Kim et al, 2021).

Εργαλείο για την εκπαιδευτική διαδικασία: Πλέον τα τρισδιάστατα εκτυπωμένα τοπογραφικά μοντέλα, έχουν αποκτήσει μεγάλη χρησιμότητα στην εκπαιδευτική διαδικασία, αποδεικνύοντας πώς μπορούν να ενισχύσουν την κατανόηση και την οπτικοποίηση σύνθετων γεωγραφικών εννοιών. Πιο συγκεκριμένα, έχει αποδειχθεί ότι η τρισδιάστατη εκτύπωση αποτελεί εξαιρετική μέθοδος για τη βελτίωση της κατανόησης των γεωλογικών σχηματισμών από τους μαθητές σε κλίμακα που δεν είναι εφικτή με τη χρήση μόνο τρισδιάστατων εικόνων, αλλά και των κλασικών χαρτών. Πράγματι, η τεχνολογία αυτή είναι χρήσιμη για τη βελτίωση της αίσθησης του χώρου λόγω των αποτελεσμάτων αφής και παρατήρησης που επιτυγχάνονται με την παραγωγή φυσικών μοντέλων (Kim et al, 2021).

Χρήση από άτομα με προβλήματα όρασης: Τα τρισδιάστατα εκτυπωμένα μοντέλα της επιφάνειας του εδάφους μπορούν να αποδειχθούν πολύ χρήσιμα για άτομα με προβλήματα όρασης. Δεδομένου ότι η αφή αποτελεί τον κύριο ή ακόμα και τον μοναδικό τρόπο με τον οποίο τα άτομα αυτά μπορούν να αλληλοεπιδράσουν με το περιβάλλον τους και να αποκτήσουν πληροφορίες για το έδαφος, φαίνεται ότι η εφαρμογή των τρισδιάστατων εκτυπωμένων μοντέλων του εδάφους, μπορεί να βοηθήσει κατά ένα βαθμό τη διδασκαλία και γενικότερα, τη καλύτερη κατανόηση της γεωγραφίας. Ειδικότερα, οι χρήστες με προβλήματα όρασης, μέσω της αφής μπορούν να αντιληφθούν και να συγκρίνουν χαρακτηριστικά του εδάφους, όπως οροσειρές, λόφους και γενικότερα τις περιοχές με χαμηλότερο ή μεγαλύτερο υψόμετρο, λόγω του ανάγλυφου που θα παρουσιάζει το μοντέλο, αλλά και τις χρήσεις γης που θα υπάρχουν στην εκάστοτε περιοχή, όπως λίμνες, ποτάμια, δάση, οδικό δίκτυο κλπ. Πρόκειται για ένα τομέα για τον οποίο έχουν πραγματοποιηθεί κάποιες μελέτες, ενώ μπορεί να αποτελέσει γόνιμο έδαφος για μεγαλύτερη έρευνα (Harding, Hasiuk, Wood, 2021).



Σχήμα 2.2: Η χρήση του τρισδιάστατου μοντέλου εδάφους στην εκπαίδευση (Dortmehl, 2016)

2.5.2 Μειονεκτήματα

Περιορισμοί Κλίμακας: Η τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί να είναι δυσκολότερη με πολύ μεγάλης κλίμακας ή εξαιρετικά λεπτομερή τοπογραφικά μοντέλα λόγω των περιορισμών στο μέγεθος του εκτυπωτή, την ανάλυση και τους περιορισμούς των υλικών μεγάλης κλίμακας. Η συγκεκριμένη τεχνολογία δεν μπορεί να υποστηρίξει τέτοιες περιπτώσεις λόγω περιορισμών κόστους και μεγέθους. Όπως αναφέρεται σε ορισμένες μελέτες, όσον αφορά τη ταχύτητα της τρισδιάστατης εκτύπωσης ο χρόνος που απαιτείται για την εκτύπωση ενός μοντέλου μεγάλης κλίμακας είναι ένας από τους περιορισμούς της, γεγονός που καθιστά δύσκολη την εφαρμογή της τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης στους περισσότερους τομείς (Gokhare, Shinde και Raut, 2017).

Χρωματισμός του μοντέλου: Τα προϊόντα που προκύπτουν από τις τρισδιάστατες εκτυπώσεις είναι μονόχρωμα. Γι' αυτόν τον λόγο, όταν κάποιο μοντέλο πρόκειται να παρουσιαστεί σε ένα συγκεκριμένο κοινό για κάποιο σκοπό, λόγου χάριν για εκπαιδευτική διαδικασία, όπως αναφέραμε προηγουμένως, τότε είναι πολύ πιθανό για τη καλύτερη κατανόηση του περιεχομένου και των χαρακτηριστικών του, να χρειάζεται να ζωγραφιστεί. Για παράδειγμα, όταν έχουμε μια περιοχή με λόφους, ποτάμια, λίμνες, οδικό δίκτυο, αστικό ιστό ή άλλες χρήσεις γης θα βοηθούσε πολύ για την ανάγνωση και την κατανόηση της γεωγραφίας της περιοχής, η χρήση διαφορετικών χρωμάτων για την ανάδειξη των χρήσεων αυτών. Ωστόσο, η διαδικασία αυτή έχει και αρκετά μειονεκτήματα.

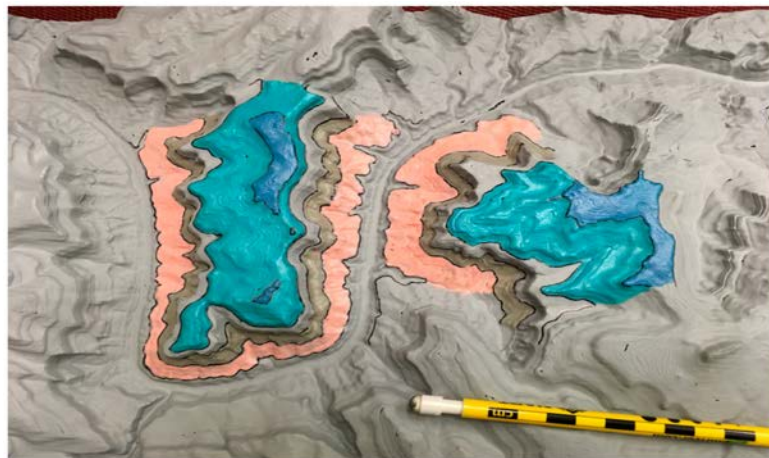
Ειδικότερα, τα πρώτο και πολύ σημαντικά είναι η απώλεια λεπτομέρειας. Όπως είδαμε στη παράγραφο 1.5.1, ένα από τα πλεονεκτήματα της τρισδιάστατης εκτύπωσης, είναι το υψηλό επίπεδο ακρίβειας για καλύτερη δυνατή αναπαράσταση των φυσικών χαρακτηριστικών του τοπίου. Όμως, όπως μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτό, η βαφή του μοντέλου ειδικά από παχιά στρώματα χρώματος, μπορεί να προκαλέσει την απώλεια αυτών των μικρών λεπτομερειών, αφού το χρώμα μπορεί να αποκρύψει τοπογραφικά χαρακτηριστικά που είχαν αποτυπωθεί κατά την εκτύπωση.

Ένα άλλο μειονέκτημα της βαφής είναι ότι μετά την πραγματοποίηση της πάνω στο μοντέλο αυτό στη συνέχεια θα χρειάζεται συνεχή συντήρηση με τη πάροδο του χρόνου. Πρόκειται για μια πολύ σημαντική παράμετρο, προκειμένου να διατηρηθεί σε καλή κατάσταση, αφού παράγοντες, όπως η έκθεση στο ηλιακό φως, η υγρασία και άλλοι

περιβαλλοντική παράγοντες ενδέχεται να προκαλέσουν το ξεθώριασμα ή τη φθορά του χρώματος.

Ακόμη, πρόκειται για μια χρονοβόρα διαδικασία, ειδικά για περιπτώσεις όπου απαιτείται υψηλό επίπεδο ρεαλισμού. Εκεί μπορεί να χρειαστεί να εφαρμοστούν πολλές στρώσεις χρώματος, ενδεχομένως να υπάρχει και χρόνος στεγνώματος μεταξύ των χρωματικών στρώσεων, γεγονός που προκαλεί την επιβράδυνση της εκπόνησης του έργου.

Επιπλέον, μία τέτοια διαδικασία χρειάζεται και κάποιες απαιτούμενες δεξιότητες πάνω στο τομέα της ζωγραφικής, από τα άτομα που έχουν την έχουν αναλάβει, ώστε να προκύψουν τα επιθυμητά αποτελέσματα. Εάν ο κατασκευαστής ή η ομάδα που ασχολείται με αυτό το κομμάτι, δεν διαθέτει αυτές τις τεχνικές, είναι πολύ πιθανό να υποβαθμιστεί η ποιότητα του προϊόντος.



Σχήμα 2.3: Η 3D εκτύπωση του Grand Canyon (πάνω εικόνα) παρουσιάζοντας μέσω χρωματισμών τους γεωλογικούς του σχηματισμούς και της δυτικής ακτής της Νότιας Αμερικής, αναδεικνύοντας την υψομετρική μεταβολή από τον πυθμένα της τάφρου των Άνδεων έως την κορυφή των βουνών των Άνδεων (Harding, Hasiuk, Wood, 2021).

Κόστος του τρισδιάστατου εκτυπωτή: Το κόστος αγοράς ενός τρισδιάστατου εκτυπωτή εξακολουθεί να είναι εφικτό από τον μέσο κάτοχο ενός σπιτιού. Ωστόσο, η τιμή του εξαρτάται από πολλούς και διαφορετικούς παράγοντες, η οποίοι μπορούν να την αυξήσουν σε μεγάλο βαθμό. Αρχικά, ανάλογα με τον τύπο του αντικειμένου που πρόκειται να εκτυπωθεί, ίσως χρειάζεται και διαφορετικός 3D εκτυπωτής. Ακριβώς το ίδιο ισχύει και για προϊόντα των οποίων οι εκτυπώσεις απαιτούν υψηλή ακρίβεια, επομένως, όπως μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτό, αυξάνεται αυτόματα και το κόστος του εκτυπωτή, αφού τα χαρακτηριστικά του και η ποιότητα των εξαρτημάτων του πρέπει να είναι υψηλή, ώστε να μπορεί να ανταπεξέλθει στις απαιτήσεις (Gokhare, Shinde και Raut, 2017). Ακόμη, παράγοντες όπως τα υλικά εκτύπωσης, αφού ορισμένοι εκτυπωτές μπορεί να χρησιμοποιούν κάποια συγκεκριμένα υλικά, όπως πολυμερή υψηλής απόδοσης, αλλά και η ταχύτητα της εκτύπωσης, μπορούν αυξήσουν αρκετά το κόστος αγοράς του εκτυπωτή.

2.6 Εφαρμογές της τρισδιάστατης εκτύπωσης στη βιομηχανία

Αεροδιαστημική βιομηχανία

Η τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης παρέχει απaráμιλλη ελευθερία σχεδιασμού σε εξαρτήματα και παραγωγή. Στην αεροδιαστημική βιομηχανία, η τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης έχει τη δυνατότητα κατασκευής ελαφρών εξαρτημάτων, βελτιωμένων και πολύπλοκων γεωμετριών, οι οποίες μπορούν να μειώσουν τις ενεργειακές απαιτήσεις και τους πόρους (Shahrubudina, Leea, R. Ramlana, 2019).

Αυτοκινητοβιομηχανία

Σήμερα, η τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης έχει αλλάξει ραγδαία το χώρο της βιομηχανίας για το σχεδιασμό, την ανάπτυξη και την κατασκευή νέων πραγμάτων. Στην αυτοκινητοβιομηχανία, η τεχνική της τρισδιάστατης εκτύπωσης έχει φέρει νέες λύσεις, επιτρέποντας τις ελαφρύτερες και πιο σύνθετες δομές σε γρήγορο χρόνο. Για παράδειγμα, η Local Motor είχε εκτυπώσει το πρώτο τρισδιάστατο εκτυπωμένο ηλεκτρικό αυτοκίνητο το 2014. Δεν είναι μόνο τα αυτοκίνητα, η Local Motors επέκτεινε επίσης το ευρύ φάσμα εφαρμογής της τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης κατασκευάζοντας ένα τρισδιάστατο

εκτυπωμένο λεωφορείο με την ονομασία OLLI. Το OLLI είναι ένα ηλεκτρικό, ανακυκλώσιμο και εξαιρετικά έξυπνο τρισδιάστατο εκτυπωμένο λεωφορείο, χωρίς οδηγό. Επιπλέον, η Ford είναι ο ηγέτης στη χρήση της τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης, την οποία εφαρμόζει για την παραγωγή πρωτοτύπων και εξαρτημάτων κινητήρα. Επιπρόσθετα, η BMW χρησιμοποιεί την τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης για την παραγωγή εργαλείων χειρός για δοκιμές και συναρμολόγηση αυτοκινήτων.

Κατά συνέπεια, με τη χρήση της τεχνολογίας 3D εκτύπωσης στην αυτοκινητοβιομηχανία η εταιρεία μπορεί να δοκιμάσει διάφορες εναλλακτικές λύσεις και να δώσει έμφαση στα στάδια βελτίωσης, προτρέποντας τον ιδανικό και αποτελεσματικό σχεδιασμό αυτοκινήτων. Παράλληλα, η τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης μπορεί να μειώσει τη σπατάλη και την κατανάλωση υλικών. Επιπλέον, μπορεί να μειώσει το κόστος και το χρόνο, επομένως, επιτρέπει τη δοκιμή νέων μοντέλων σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα (Shahrubudina, Leea, R. Ramlana, 2019).



Σχήμα 2.4: Το τρισδιάστατα εκτυπωμένο λεωφορείο OLLI, της Local Motors (ROAD TRAFFIC TECHNOLOGY, 2020)

Αρχιτεκτονική, οικοδομική και κατασκευαστική βιομηχανία

Στον κατασκευαστικό κλάδο, η τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτύπωση ολόκληρων κτιρίων ή μπορεί να δημιουργήσει κατασκευαστικά στοιχεία. Η εμφάνιση των Μοντέλων Δομικών Πληροφοριών (BIM) διευκολύνει την καλύτερη χρήση της τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης. Η μοντελοποίηση κτιριακών πληροφοριών είναι μια ψηφιακή αναπαράσταση των λειτουργικών και φυσικών χαρακτηριστικών η μπορεί να αναπαραστήσει μια τα χαρακτηριστικά των τρισδιάστατων κτιρίων. Μπορεί να αποτελέσει μια αξιόπιστη πηγή για τη λήψη αποφάσεων κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του, από τη στιγμή του σχεδιασμού του κτιρίου και της δόμησης του έως την κατεδάφιση του. Αυτή η καινοτόμος τεχνολογία θα υποστηρίξει την αποτελεσματικότερη μέθοδο για το σχεδιασμό, τη δημιουργία και τη συντήρηση του δομημένου περιβάλλοντος. Με την τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης, οι εταιρείες μπορούν να σχεδιάσουν και να δημιουργήσουν την οπτική του κτιρίου σε γρήγορο χρόνο και με λιγότερο κόστος, καθώς και να αποφύγουν τις καθυστερήσεις και να βοηθήσουν στον εντοπισμό των προβληματικών περιοχών (Shahrubudina, Leea, R. Ramlana, 2019).

Βιομηχανία υφασμάτων και μόδας

Με τη τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης στον κλάδο του λιανικού εμπορίου, άρχισαν να εμφανίζονται στην αγορά καταναλωτικά αγαθά, όπως τα τρισδιάστατα εκτυπωμένα παπούτσια, τα κοσμήματα και τα ρούχα. Για παράδειγμα, μεγάλες εταιρείες όπως η Nike, New Balance και Adidas προσπαθούν να αναπτύξουν τη μαζική παραγωγή τρισδιάστατων εκτυπωμένων παπουτσιών. Σήμερα, τρισδιάστατα εκτυπωμένα παπούτσια παράγονται για παπούτσια αθλητών, παπούτσια κατά παραγγελία και αθλητικά παπούτσια. Στη βιομηχανία της μόδας, με τη χρήση της τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης, μπορεί να σχεδιάσει και να παράγει ενδύματα με τη χρήση συστήματος πλέγματος και μπορεί επίσης να εκτυπώσει στολίδια για παραδοσιακά υφάσματα. Επιπλέον, η εφαρμογή της τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης δεν περιορίζεται μόνο στη κατασκευή υφασμάτων, αλλά μπορεί επίσης να εκτυπώσει δερμάτινα είδη και αξεσουάρ. Για παράδειγμα, κοσμήματα, ρολόγια κλπ (Shahrubudina, Leea, R. Ramlana, 2019).

Ηλεκτρική και ηλεκτρονική βιομηχανία

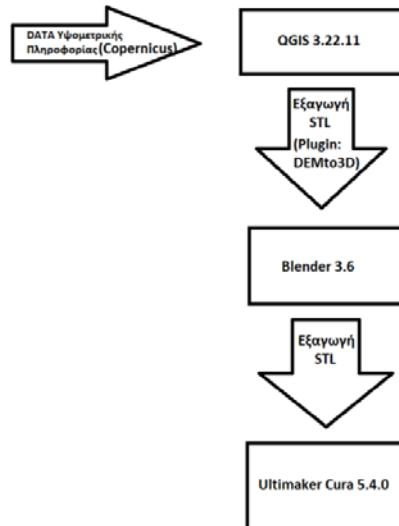
Καθώς η τρισδιάστατη εκτύπωση γίνεται όλο και πιο προσιτή στους τομείς των επιστημών, της τεχνολογίας και της κατασκευής, η κατασκευαστές αρχίζουν να βλέπουν τις δυνατότητές της να υλοποιούνται με κάθε είδους ενδιαφέροντες τρόπους. Σήμερα, διάφορες τρισδιάστατες εκτυπώσεις τεχνολογίες έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί ευρέως για δομικές ηλεκτρονικές συσκευές όπως ενεργά ηλεκτρονικά υλικά, ηλεκτρόδιο και συσκευές με μαζική προσαρμογή και προσαρμοστικό σχεδιασμό μέσω της ενσωμάτωσης των αγωγών σε 3D εκτυπωμένες συσκευές. Η διαδικασία παραγωγής για το τρισδιάστατο ηλεκτρόδιο με τη χρήση του Fused Deposition Modelling της τρισδιάστατης εκτύπωσης τεχνικής παρέχει χαμηλού κόστους και μια αποδοτική ως προς το χρόνο προσέγγιση για τη μαζική παραγωγή υλικών ηλεκτροδίων. Σε σύγκριση με εμπορικά ηλεκτρόδια, όπως τα ηλεκτρόδια αλουμινίου, χαλκού και άνθρακα, ο σχεδιασμός και η επιφάνεια του 3D ηλεκτροδίου μπορεί εύκολα να προσαρμοστεί ώστε να ταιριάζει σε μια συγκεκριμένη εφαρμογή. Επιπλέον, η διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης για το τρισδιάστατο ηλεκτρόδιο είναι πλήρως αυτοματοποιημένη, με υψηλό βαθμό ακρίβειας, κατέστησε δυνατή την ολοκλήρωση της διαδικασίας εκτύπωσης για 8 ηλεκτροδίων σε μόλις 30 λεπτά . Επιπλέον, τα ενεργά ηλεκτρονικά εξαρτήματα είναι οποιεσδήποτε ηλεκτρονικές συσκευές ή εξαρτήματα ικανά να ενισχύουν και να ελέγχουν τη ροή των ηλεκτρικών φορτίων. Εκτός αυτού, οι ενεργές συσκευές περιλαμβάνουν επίσης εκείνες που μπορούν να παράγουν ενέργεια. Παραδείγματα ενεργών ηλεκτρονικών εξαρτημάτων περιλαμβάνουν ανορθωτές ελεγχόμενους από πυρίτιο, τρανζίστορ, διόδους, λειτουργικά ενισχυτές, διόδους εκπομπής φωτός (LED), μπαταρίες και ούτω καθεξής. Αυτά τα εξαρτήματα απαιτούν συνήθως ιδιαίτερα περίπλοκα διαδικασίες κατασκευής σε σύγκριση με εκείνες που χρησιμοποιούνται για τα παθητικά εξαρτήματα λόγω των πολύπλοκων λειτουργιών τους. 3D τεχνολογία εκτύπωσης παρέχει πλεονεκτήματα για την επεξεργασία του προϊόντος μαζί με τα ηλεκτρονικά του. Με πολλαπλά υλικά τεχνολογία εκτύπωσης, η αποδοτικότητα του ηλεκτρονικού συστήματος μπορεί ενδεχομένως να υιοθετηθεί στη Βιομηχανική Επανάσταση 4.0 (Shahrubudina, Leea, R. Ramlana, 2019).

Κεφάλαιο 3

Συλλογή Δεδομένων - Δημιουργία Τρισδιάστατου Μοντέλου

3.1 Σύνοψη της τεχνικής διαδικασίας για τη δημιουργία του τρισδιάστατου μοντέλου

Για την εκπόνηση του τεχνικού τμήματος της εργασίας ακολουθήθηκαν τα εξής βήματα: έγινε εισαγωγή των δεδομένων (data) της υψομετρικής πληροφορίας (DSM) από την ιστοσελίδα του Copernicus, στο λογισμικό του QGIS 3.22.11. Σε αυτό το στάδιο μέσω του συγκεκριμένου λογισμικού, πραγματοποιήθηκε περικοπή του DSM το οποίο αφορούσε τον κεντρικό και νότιο Ελλαδικό χώρο και απομονώθηκε τη περιοχή μελέτης μας, η οποία είναι η οροσειρά της Πίνδου. Στη συνέχεια μέσω του εργαλείου DEM to 3D, του QGIS 3.22.11, πραγματοποιήθηκε η παραγωγή του αρχείου STL, το οποίο διαθέτει τη γεωμετρική πληροφορία του μοντέλου της περιοχής μελέτης. Αφού δημιουργήθηκε το αρχείο STL, εισήχθη στο λογισμικό του Blender 3.6, μέσω του οποίου προστέθηκαν περαιτέρω χαρτογραφικά στοιχεία στο μοντέλο. Καταληκτικά, μετά τη παραγωγή ενός νέου αρχείου STL, από το πρόγραμμα του Blender και της εισαγωγής αυτού στο πρόγραμμα του Ultimaker Cura 5.4.0, πραγματοποιήθηκε σύνδεση με τον εκτυπωτή Ultimaker S5 που βρίσκεται στο Εργαστήριο Χαρτογραφίας, της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών-Μηχανικών Γεωπληροφορικής, προκειμένου να επιτευχθεί η εκτύπωση του τρισδιάστατου χάρτη.



Σχήμα 3.1: Τα βήματα της διαδικασίας που ακολουθήθηκε για τη δημιουργία του 3D μοντέλου

3.2 Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους (DTM)

DTM (Digital Terrain Model)

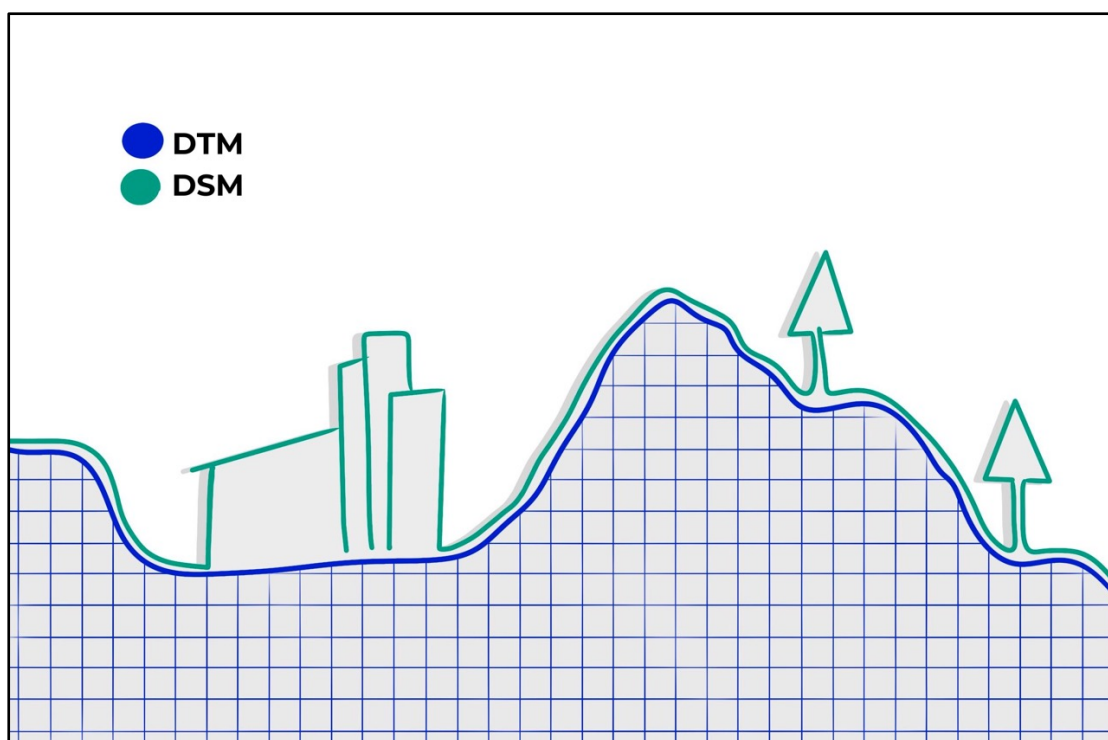
Ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DTM ή DEM) είναι μια τρισδιάστατη αναπαράσταση της γήινης επιφάνειας, η οποία αναπαρίσταται ως μια σειρά σημείων με καθορισμένο ύψος. Το μοντέλο εδάφους περιέχει πληροφορίες σχετικά με το ύψος χωρίς να λαμβάνει υπόψη τη βλάστηση, τα κτίρια και άλλα αντικείμενα. Πρόκειται, δηλαδή, για μία ψηφιακή αναπαράσταση τμήματος της Φυσικής Γήινης Επιφάνειας (ΦΓΕ). Σε ορισμένες χώρες, το ψηφιακό μοντέλο υψομέτρου είναι συνώνυμο του ψηφιακού μοντέλου εδάφους. Ωστόσο, το ψηφιακό μοντέλο εδάφους έχει ελαφρώς διαφορετική έννοια. Ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους είναι ένα σύνολο σημείων σε ένα τρισδιάστατο σύστημα αναφοράς (X,Y,Z), το οποίο προσεγγίζει τη πραγματική επιφάνεια (Ιωαννίδης, 2022).

Το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους είναι ένα πλήθος σημείων με γνωστές γεωδαιτικές συντεταγμένες και ένας κανόνας ορισμού του ύψους όλων των άλλων σημείων, τα οποία δεν περιλαμβάνονται στο πλήθος. Τα σημεία με γνωστές γεωδαιτικές συντεταγμένες ονομάζονται σημεία ελέγχου εδάφους (Ground Control Points-GCP). Ο κανόνας ορισμού ύψους ονομάζεται κανόνας παρεμβολής. Οι μέθοδοι δημιουργίας DTM διαφέρουν ανάλογα με τα συστήματα τοποθέτησης των GCP και τους αλγόριθμους παρεμβολής των διαστημάτων μεταξύ των GCP.

3.3 Ψηφιακά Μοντέλα Επιφανείας (DSM)

DSM (Digital Surface Models)

Ωστόσο, όπως θα δούμε και παρακάτω για την εκπόνηση της εργασίας χρησιμοποιήθηκε το EU-DEM (European Digital Elevation Model) v1.0 το οποίο είναι ένα Ψηφιακό Μοντέλο Επιφάνειας (DSM). Τα μοντέλα DSM αναπαριστούν όσο το δυνατόν περισσότερο τη πραγματική εικόνα όσο αυτό είναι εφικτό, προσομοιώνοντας τις επιφάνειες της βλάστησης και των ανθρωπογενών κατασκευών που βρίσκονται στο υψηλότερο σημείο (cloudeo, 2023).



Σχήμα 3.2: Τα βήματα της διαδικασίας που ακολουθήθηκε για τη δημιουργία του 3D μοντέλου (σχήμα από Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους: τι είναι, cloudeo)

3.4 Δημιουργία Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους

Για τη δημιουργία του ΨΜΕ είναι απαραίτητα τα εξής: α) Υψομετρικά δεδομένα για την περιοχή ενδιαφέροντος β) Χρήση μεθόδων για την εξαγωγή κάθε είδους πληροφορίας για το ανάγλυφο. Τα δεδομένα για το ανάγλυφο μπορούν να συλλεχθούν από: 1) τοπογραφικούς χάρτες, 2) γεωδαιτική έρευνα (επίγειες μετρήσεις) 3) στερεοαπόδοση 4) συστήματα Lidar 5) συστήματα SAR. Η κάθε μέθοδος έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της. Αναλυτικότερα:

Τοπογραφικοί Χάρτες: μέσω τις ψηφιοποίησης ισοϋψών, ωστόσο, θεωρούνται μη ακριβείς για τους εξής λόγους: 1) σφάλματα στις ισοϋψείς 2) σφάλματα ψηφιοποίησης 3) δυσμενή κατανομή σημείων

Επίγειες Μετρήσεις: μικρός αριθμός σημείων με μεγάλη ακρίβεια, των οποίων η μετρήσεις έχουν πραγματοποιηθεί, μέσω, σύγχρονων γεωδαιτικών σταθμών ή GPS.

Στερεοαπόδοση: ημιαυτόματη ή και πλήρως αυτόματη φωτογραμμετρική διαδικασία η οποία επιτυγχάνεται μεταξύ αεροφωτογραφιών ή δορυφορικών εικόνων.

Lidar: πρόκειται για οικονομική μέθοδο για μεγάλες περιοχές, με υψηλή ανάλυση μετρήσεων

SAR: πρόκειται για οικονομική μέθοδο για μεγάλες περιοχές, ωστόσο, υπολείπεται σε ακρίβεια.

Τρόποι Συλλογής Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους				
Μέθοδος	Ακρίβεια	Ταχύτητα	Κόστος	Πεδίο εφαρμογής
Τοπογραφικές μέθοδοι	Πολύ Υψηλή	Πολύ αργή	Πολύ υψηλό	Μικρές περιοχές
GPS	Υψηλή	Αργή	Υψηλό	Μικρές περιοχές
Εναέρια Φωτογρ.	Μέση με υψηλή	Γρήγορη	Χαμηλό	Μεγάλες περιοχές
Δορυφορική Φωτογρ.	Χαμηλή με μέση	Ταχύτατη	Χαμηλό	Πολύ μεγάλες περιοχές
SAR	Χαμηλή	Ταχύτατη	Χαμηλό	Πολύ μεγάλες περιοχές
LiDAR	Υψηλή	Γρήγορη	Υψηλό	Μεγάλες περιοχές
Ψηφιοποίηση χάρτη	Χαμηλή	Αργή	Υψηλό	Αδιάφορο
Σάρωση χάρτη	Χαμηλή	Γρήγορη	Χαμηλό	Αδιάφορο

Σχήμα 3.3: Μέθοδοι Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους (σχήμα από Ψηφιακά Μοντέλα Επιφανείας- Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους, 2022-2023)

Στην παραπάνω εικόνα απεικονίζεται ένας πίνακας, ο περιγράφει τις μεθόδους δημιουργίας ενός Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους, καθώς και επίπεδο τους σε ακρίβεια, ταχύτητα, κόστος και πεδίο εφαρμογής.

3.5 Επιλογή δεδομένων από την ιστοσελίδα Copernicus

Το EU-DEM (European Digital Elevation Model) v1.0 είναι ένα Ψηφιακό Μοντέλο Επιφάνειας (DSM) που αναπαριστά τη πρώτη επιφάνεια, όπως φωτίζεται από τους αισθητήρες. Πρόκειται, για ένα υβριδικό προϊόν, που βασίζεται σε δεδομένα SRTM και ASTER GDEM.

3.6 Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους SRTM

Η SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) είναι μια διεθνής διαστημική αποστολή, η οποία είχε ως βασικό αντικείμενο την δημιουργία ενός Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους με τη μέγιστη ακρίβεια που είχε επιτευχθεί μέχρι εκείνη την περίοδο. Το εγχείρημα πραγματοποιήθηκε τον Φεβρουάριο του 2000 και αντιπροσώπευσε την αποτελεσματική συνεργασία τεσσάρων φορέων: της αμερικανικής εθνικής υπηρεσίας αεροναυτικής και διαστήματος NASA (National Aeronautics and Space Administration), της αμερικανικής εθνικής υπηρεσίας διαχείρισης γεωγραφικών πληροφοριών NGA (National Geospatial - Intelligence Agency), του διαστημικού κέντρου της Γερμανίας DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) και της ιταλικής υπηρεσίας διαστήματος ASI (Agenzia Spaziale Italiana). Επομένως, αυτή η αποστολή αποτελεί ένα συλλογικό επίτευγμα που ενώνει τις προσπάθειες αυτών των υπηρεσιών (Καμπούρης, 2012).

Η διεθνής διαστημική αποστολή SRTM ήταν αυτή που εφάρμοσε πρώτη την τηλεπισκοπική μέθοδο InSAR (Interferometric SAR) χρησιμοποιώντας την παρατηρηθείσα διαφορά φάσεων από δύο ραντάρ, τα οποία βρισκόντουσαν σε απόσταση μεταξύ τους σύμφωνα με έναν μικρό λόγο βάσης προς ύψος (περίπου 0.0002) στην ίδια χρονική στιγμή. Ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημά της δορυφορικής αποστολής SRTM αποτελεί το γεγονός ότι τα ραντάρ της είχαν τη δυνατότητα να πραγματοποιούν μετρήσεις ακόμα και κατά την διάρκεια της νύχτας. Η αποστολή ολοκληρώθηκε μέσα σε διάστημα 11 ημερών και περιλάμβανε, εκτός από το εξαμελές ανθρώπινο δυναμικό, ένα διαμορφωμένο σύστημα από ραντάρ τεχνολογίας SAR. Η απογείωση έγινε στις 11

Φεβρουαρίου του 2000 με την βοήθεια του διαστημικού λεωφορείου Endeavour και ολοκληρώθηκε, με την προσγείωση στις 22 Φεβρουαρίου του 2000 (Καμπούρης, 2012).

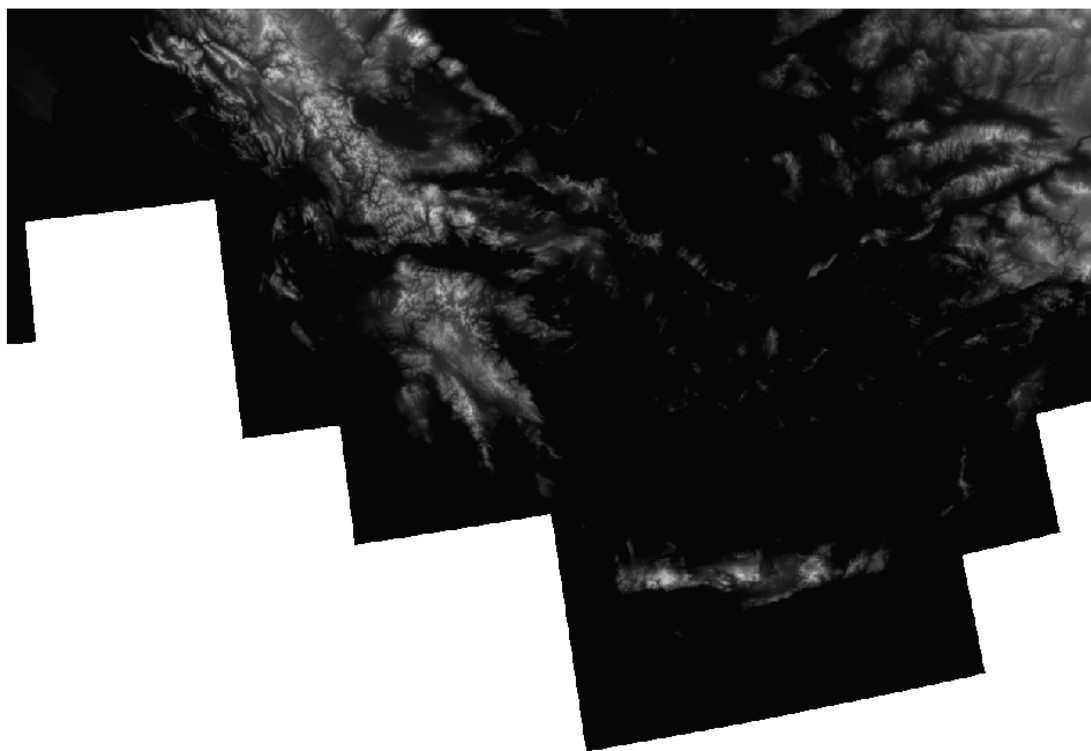
Η σχεδόν παγκόσμια κάλυψη του ψηφιακού μοντέλου εδάφους SRTM αντιστοιχεί στην περιοχή που περιλαμβάνεται ανάμεσα στους παράλληλους των 56°N και 60°B, καλύπτοντας το 80% της συνολικής επιφάνειας της Γης. Βάσει των σχετικών προδιαγραφών, τα υψομετρικά δεδομένα του ψηφιακού μοντέλου εδάφους SRTM κατανέμονται σε ένα κανναβικό πλέγμα διακριτικής ικανότητας 1×1 arcsec (περίπου 30×30 m) (Καμπούρης, 2012).

3.7 Το παγκόσμιο ψηφιακό μοντέλο εδάφους ASTER

Στις 29 Ιουνίου του 2009, ανακοινώθηκε η πρώτη απόδοση του παγκόσμιου ψηφιακού μοντέλου εδάφους ASTER. Αυτό το μοντέλο, γνωστό στη διεθνή βιβλιογραφία ως «ASTER GDEM», δημιουργήθηκε μέσω της επεξεργασίας των δεδομένων στερεοσκοπικών εικόνων του δορυφόρου ASTER, τα οποία συλλέχθηκαν από το ραδιόμετρο του διαστημικού σκάφους TERRA από τον Φεβρουάριο του 2000 και μετά. Αυτή η πρωτοποριακή ψηφιακή χαρτογράφηση αντιπροσωπεύει την πλέον πλήρη και ακριβή αναπαράσταση της επιφάνειας της Γης, καλύπτοντας το 99% της επιφάνειας της με ανάλυση 1x1 arcsec (30x30 μέτρα) και υψηλή διακριτική ικανότητα. Η αρχική έκδοση του παγκόσμιου ψηφιακού μοντέλου εδάφους ASTER προήλθε από τον συνδυασμό 1,3 εκατομμυρίων ανεξάρτητων, στερεοσκοπικών εικόνων που συλλέχθηκαν μέσω του ραδιομετρικού συστήματος ASTER. Πρόκειται για ένα μοντέλο, το οποίο καλύπτει όλη την επιφάνεια της Γης, από τον παράλληλο των 83°B έως τον παράλληλο των 83°N. Ωστόσο, παρά την μεγάλη ονομαστική, διακριτική ικανότητα του, πολλά σχόλια από την διεθνή βιβλιογραφία αλλά και κυρίως από τους ιθύνοντες του ASTER GEM, αναφέρουν ότι η πραγματική διακριτική ικανότητα του ASTER GDEM είναι ελαφρώς μικρότερη και σίγουρα όχι ισάξια της αντίστοιχης διακριτικής ικανότητας του SRTM DEM, που αξίζει να σημειωθεί ότι οι παγκόσμιες εκδόσεις του με διακριτική ικανότητα 3×3 arcsec προέκυψαν από επαναδειγματοληψία των αντίστοιχων εκδόσεων διακριτικής ικανότητας 1×1 arcsec με γενίκευση των υψομετρικών τιμών κατά τον μέσο όρο. Ακόμη, γίνεται λόγος για συστηματικές επιδράσεις εις βάρος του προϊόντος ενώ αναφέρεται επίσης ότι

παρόμοιοι πολιτικοί λόγοι που δεν επέτρεψαν την πλήρη έκδοση του SRTM με διακριτική ικανότητα 1×1 arcsec, στην ουσία ανάγκασαν σε εσκεμμένη υποβάθμιση της ποιότητας του ASTER GDEM. Μία αντιπροσωπευτική τιμή της διακριτικής του ικανότητας, που μπορεί να αποδοθεί με εμπειρικά κριτήρια, είναι 3-4 arcsec περίπου (Καμπούρης, 2012).

Το σύστημα χωρικής αναφοράς είναι γεωγραφικό, lat/lon με οριζόντιο δεδομένο ETRS89, ελλειψοειδές GRS80 και κατακόρυφο δεδομένο EVRS2000 με γεωειδές EGG08. Τα πλακίδια αυτά συγκεντρώθηκαν σε πλακίδια $5^\circ \times 5^\circ$, τα οποία προβάλλονται στο ETRS-LAEA (EPSG:3035) από το Κοινό Κέντρο Ερευνών (ΚΚΕ) της Ευρωπαϊκής Επιτροπής. Διαθέτει χωρική ανάλυση ίση με 25 m (Copernicus, 2016).



Σχήμα 3.4: Το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους από το Copernicus, στο λογισμικό του QGIS

3.8 Γενικά στοιχεία για την περιοχή μελέτης

Πρόκειται για μια περιοχή με έντονο ανάγλυφο και συνεχόμενες αλλαγές υψομέτρου, αφού περιλαμβάνει, τις πολύ υψηλές κορυφές του βουνού της Τύμφης, αλλά και χαμηλού υψομέτρου περιοχές, όπως το φαράγγι του Βίκου, τη χαράδρα του Αώου

ποταμού και ένα τμήμα με καλλιέργειες στο βορειοδυτικό τμήμα της περιοχής μελέτης, βόρεια του Αώου ποταμού και του χωριού Καλλιθέα του δήμου Κόνιτσας. Στη παρακάτω εικόνα, παρουσιάζεται η συγκεκριμένη περιοχή μέσω του χαρτογραφικού υποβάθρου του Google Satellite στο λογισμικό του QGIS.

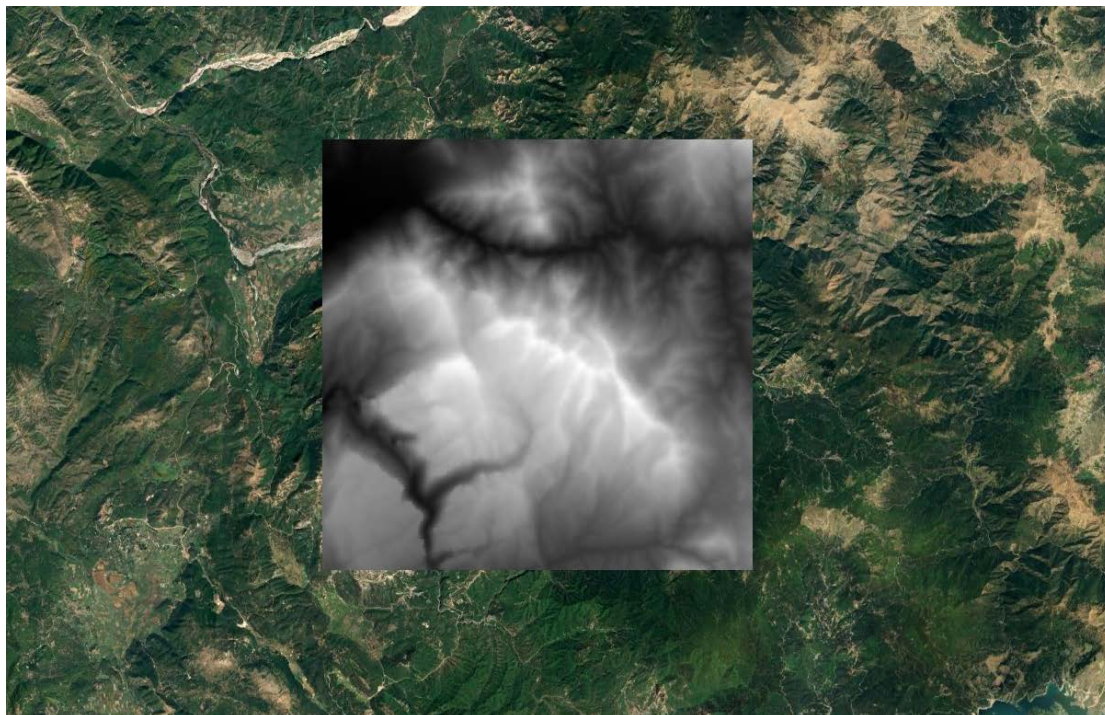


Σχήμα 3.5: Τα όρια της περιοχής μελέτης στο λογισμικό του QGIS με το χαρτογραφικό υπόβαθρο του Google Satellite

3.9 Γεωαναφορά του DSM στο ΕΓΣΑ '87 και περικοπή στα όρια της περιοχής

Αρχικά έγινε γεωαναφορά του DSM, μέσω του προγράμματος του QGIS, στο Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 1987 (ΕΓΣΑ '87). Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η περικοπή της περιοχής, που επρόκειτο να μετατραπεί σε τρισδιάστατη. Επιλέξαμε ως περιοχή μελέτης την οροσειρά της Πίνδου και συγκεκριμένα μια περιοχή 20x20 km, σύμφωνα με τις εξής συντεταγμένες από το λογισμικό του QGIS: $(x_1, y_1) = 217661.657 \text{ m}, 4419562.333 \text{ m}$ και $(x_2, y_2) = 237651.619 \text{ m}, 4439552.295 \text{ m}$. Πρόκειται για μια περιοχή με έντονο ανάγλυφο και συνεχόμενες αλλαγές υψομέτρου, αφού περιλαμβάνει, τις πολύ μεγάλου υψομέτρου κορυφές του βουνού τη Τύμφης, αλλά και χαμηλού υψομέτρου περιοχές, όπως το φαράγγι του Βίκου, τη χαράδρα του Αώου ποταμού και ένα τμήμα με καλλιέργειες στο βορειοδυτικό τμήμα της περιοχής μελέτης, μεταξύ των χωριών Καλλιθέας και Κλειδωνιάς, του δήμου Κόνιτσας. Η περικοπή της περιοχής αυτής,

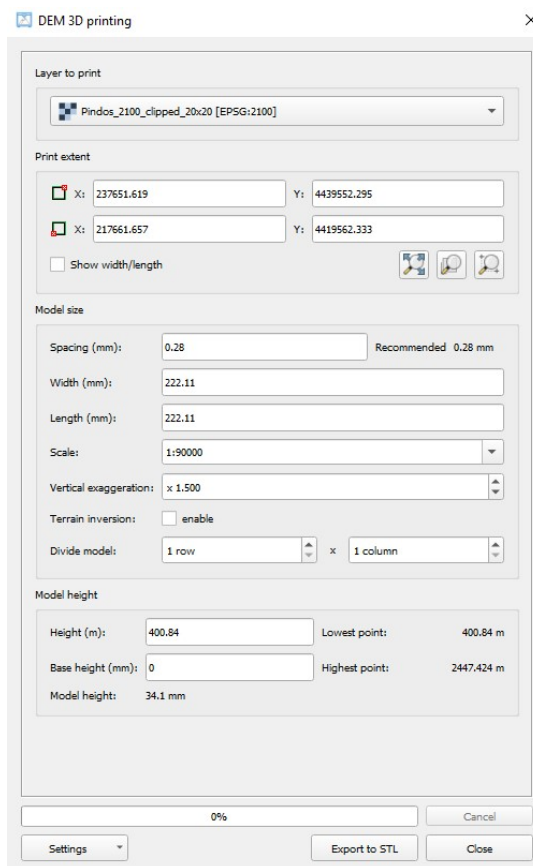
από το υπόλοιπο DSM έγινε ,μέσω, του εργαλείου Clip Raster by Extent του λογισμικού του QGIS 3.22.11. Οπότε, το DEM που προέκυψε από την αποκοπή είναι το εξής.



Σχήμα 3.6: Το DEM της περιοχής μελέτης μετά την περικοπή, μέσω του εργαλείου Clip Raster by Extent του λογισμικού του QGIS με το χαρτογραφικό υπόβαθρο του Google Satellite.

3.10 Δημιουργία του 3D μοντέλου της περιοχής μελέτης

Το επόμενο βήμα της διαδικασίας ήταν η δημιουργία του τρισδιάστατου-3D μοντέλου. Η πραγματοποίηση του έγινε μέσω, της χρήσης του εργαλείου DEM to 3D του QGIS 3.22.11. Το εργαλείο αυτό επεξεργάζεται ένα DEM μέσα σε μια καθορισμένη έκταση χάρτη, υπολογίζει την κλίμακα του μοντέλου με βάση τις διαστάσεις εκτύπωσης εξόδου που έχει ορίσει ο χρήστης, ενώ μέσω αυτού μπορεί να καθοριστεί το ύψος της κατακόρυφης βάσης και ο συντελεστής κατακόρυφης υπερβολής. Στη συνέχεια, παράγει αμέσως ένα αρχείο STL, τα χαρακτηριστικά του οποίου αναλύονται παρακάτω (υποενότητα 2.11), που είναι συμβατό με τον 3D εκτυπωτή και ουσιαστικά αποτελεί τον συνδετικό κρίκο μέσω του οποίου μεταφέρεται η γεωμετρική πληροφορία του μοντέλου από τον υπολογιστή στον εκτυπωτή, ώστε να πραγματοποιηθεί η παραγωγή του επιθυμητού προϊόντος.



Σχήμα 3.7: Το εργαλείο DEM to 3D του QGIS 3.22.11

Στη παραπάνω φωτογραφία βλέπουμε τις τιμές που δώσαμε σε κάθε μία από τις παραμέτρους. Παρακάτω, μπορούμε να δούμε σε τι εξυπηρετεί η κάθε μία από αυτές. Ειδικότερα:

Layer to print: μέσω αυτής της παραμέτρου επιλέγεται το θεματικό επίπεδο (layer), το οποίο περιέχει τα δεδομένα υψομέτρου, σύμφωνα με τα οποία πρόκειται να παραχθεί το αρχείο STL. Στη δική μας περίπτωση χρησιμοποιήθηκε ως θεματικό επίπεδο η περιοχή γύρω από την οροσειρά της Πίνδου, όπως διαμορφώθηκε μετά την περικοπή του DSM, που λήφθηκε από την ιστοσελίδα του Copernicus, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 2.5.

Print extent: αυτό το πεδίο ορίζει τα όρια της περιοχής, η οποία πρόκειται να εκτυπωθεί. Η περιοχή πρέπει να έχει ορθογώνιο σχήμα και ορίζεται από την κάτω αριστερή γωνία και την πάνω δεξιά γωνία της. Οι τιμές που συμπληρώνουν αυτά τα πεδία είναι οι συντεταγμένες στο σύστημα αναφοράς που έχει οριστεί. Πρέπει να σημειωθεί, ότι η καθορισμένη έκταση πρέπει να βρίσκεται εντός του επιλεγμένου θεματικού επιπέδου για εκτύπωση. Επομένως, στο κάθε πεδίο τοποθετήθηκαν οι συντεταγμένες που έχει το

θεματικό επίπεδο μετά την περικοπή. Σ' αυτό το σημείο πρέπει να επισημανθεί ότι το σύστημα αναφοράς που χρησιμοποιήθηκε ήταν το Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 1987- ΕΓΣΑ '87 (EPSG:2100 – GGRS87/Greek Grid, όπως είναι η ονομασία του στο λογισμικό του QGIS).

Spacing (mm): το πεδίο της απόστασης (spacing) αντιστοιχεί στον διαχωρισμό του πλέγματος των σημείων που ορίζουν το μοντέλο. Συνιστάται η χρήση μιας ελάχιστης τιμής 0.2mm, που όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση τόσο πιο γενικευμένο θα είναι το μοντέλο και έτσι θα αναπαριστώντα λιγότερες λεπτομέρειες πάνω σε αυτό. Μετά από δοκιμές καταλήξαμε ότι η κατάλληλη τιμή είναι 0.28 mm.

Width – Length (mm): τόσο η διάσταση του μήκους, όσο και η διάσταση του πλάτους εισάγονται σε χιλιοστά (mm) και αξίζει να σημειωθεί ότι σε περίπτωση που συμπληρωθεί κάποια από τις τιμές οι άλλες δύο υπολογίζονται αυτόματα, αφού πρόκειται για μια περιοχή όπου το πλάτος της είναι ίσο με το μήκος της. Για να υπολογιστούν οι διαστάσεις αυτές ακολουθήθηκε ο εξής τρόπος:

Γνωρίζουμε ότι:

Πλάτος περιοχής μελέτης: 20 km = 20000000 mm

Μήκος περιοχής μελέτης: 20 km= 20000000 mm

Συντελεστής Κλίμακας = (πραγματική απόσταση στην περιοχή μελέτης)/ (απόσταση στον εκτυπωτή)= 20000000 mm/240 mm \approx 90000

Επομένως έχουμε **Κλίμακα = 1: 90000** .

Αφού έχει υπολογιστεί η κλίμακα, μπορεί να υπολογιστούν και οι διαστάσεις του μοντέλου. Ειδικότερα:

Πλάτος Μοντέλου: 20000000 / 90000 = **222. 11 mm**

Μήκος Μοντέλου: 20000000 / 90000= **222. 11 mm**

Scale: η κλίμακα, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω υπολογίζεται αυτόματα από το λογισμικό του QGIS, έχοντας συμπληρώσει τα πεδία του μήκους και του πλάτους, τα οποία όπως υπολογίστηκε θα πάρουν την τιμή 222. 11 mm. Συνεπώς, η κλίμακα, όπως υπολογίζεται και από το πρόγραμμα είναι **1:90000**.

Vertical exaggeration: ο συντελεστής κατακόρυφης υπερβολής του εδάφους τροποποιεί την κατακόρυφη κλίμακα του μοντέλου, δηλαδή υπερβάλλει ή ομαλοποιεί τα χαρακτηριστικά του εδάφους. Είναι, δηλαδή, ένας συντελεστής που πολλαπλασιάζει το υψόμετρο των σημείων που σχηματίζουν το μοντέλο, αυξάνοντας ή μειώνοντας το ύψος του. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατό να εμφανιστούν οι σχετικές λεπτομέρειες του εδάφους ακόμη και σε περιοχές με όχι τόσο έντονο ανάγλυφο (Harding, Hasiuk, Wood, 2021). Έπειτα, από δοκιμές που έγιναν πάνω στο μοντέλο, προέκυψε ότι η ιδανικότερη τιμή του συντελεστή κατακόρυφης υπερβολής είναι ίση με 1.5.

Terrain Inversion: με αυτή την επιλογή συνίσταται η αντιστροφή του υψομέτρου των σημείων που συνθέτουν το μοντέλο. Τα χαμηλότερα σημεία θα μετατραπούν στα υψηλότερα και θα εκτυπωθούν στα ανώτερα στρώματα, ενώ τα υψηλότερα θα εκτυπωθούν στα χαμηλότερα. Δεν έγινε χρήση αυτής της παραμέτρου.

Divide model: με την επιλογή αυτή μπορούμε να μοιράσουμε το μοντέλο τόσο οριζόντια όσο και κάθετα. Δεν έγινε χρήση αυτής της παραμέτρου.

Height: Στο πεδίο αυτό βάζουμε τη τιμή του υψομέτρου από το οποίο θα ξεκινήσει το χτίσιμο του μοντέλου. Επιλέχθηκε ότι η κατάλληλη τιμή υψομέτρου είναι αυτή του Lowest Point = 400.84 m, όπως αναγράφεται στο παράθυρο του plugin του DEMto3D. Πρόκειται για το χαμηλότερο υψόμετρο της περιοχής μας, σύμφωνα με τα υψομετρικά δεδομένα του DEM, που χρησιμοποιήθηκε. Για την επιλογή του πραγματοποιήθηκαν δοκιμές, τόσο με χαμηλότερες τιμές από αυτό, όσο και με υψηλότερες. Λόγου χάριν, στη δοκιμή που έγινε με τιμή υψομέτρου 350 m, παρατηρήθηκε ότι το ανάγλυφο “βούλιαζε”, αποκρύπτοντας με αυτό τον τρόπο την πραγματική υψομετρική πληροφορία, μικραίνοντας με αυτόν τον τρόπο το ύψος των βουνών. Στον αντίποδα, δίνοντας μια τιμή υψομέτρου 450 m, παρατηρήθηκε ότι στο μοντέλο δημιουργείται μια βάση, δίνοντας του περισσότερο ύψος. Ωστόσο, λόγω του ότι θα δημιουργούνταν η βάση του μοντέλου στο λογισμικό του Blender, προτιμήθηκε να μην χρησιμοποιηθεί, κάποια τιμή υψομέτρου μεγαλύτερη των 400.84 m.

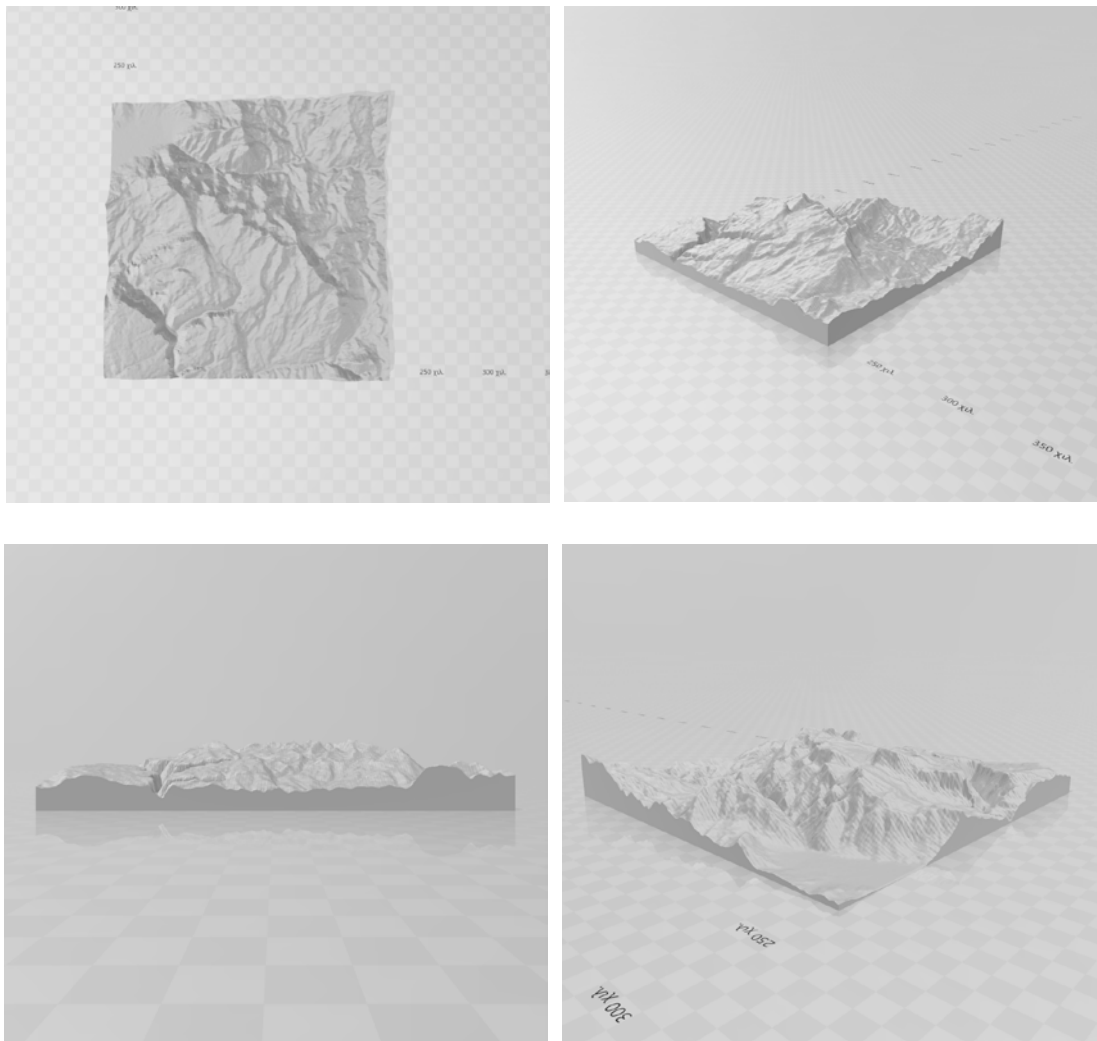
Base Height: Στο πεδίο αυτό βάζουμε τη τιμή του ύψους της βάσης, που μπορεί να έχει το μοντέλο κατά την κατασκευή του. Για τον λόγο που αναφέρθηκε στη προηγούμενη

παράγραφο, δηλαδή, ότι θα κατασκευαστεί μια βάση στο λογισμικό του Blender, αποφασίστηκε να δοθεί ύψος βάσης ίσο με μηδέν.

Model Height: ((Highest Point – Lowest Point)/90000) x 1.5 x 1000 = 34.1 mm

Αφού συμπληρώθηκαν οι απαραίτητες τιμές για τις παραμέτρους του εργαλείου του DEMto3D, το λογισμικό ήταν έτοιμο να δημιουργήσει το αρχείο STL, το οποίο περιέχει την γεωμετρική πληροφορία του τρισδιάστατου μοντέλου της περιοχής μελέτης μας και ουσιαστικά θα είναι το αρχείο, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί από τον 3D εκτυπωτή, ώστε να δημιουργηθεί το τελικό προϊόν.

Το αρχείο STL εισήχθη στο λογισμικό του 3D Builder, το οποίο είναι ένα πρόγραμμα αναπαραγωγής τρισδιάστατων μοντέλων της Microsoft και τα αποτελέσματα που προέκυψαν φαίνονται στις παρακάτω εικόνες.



Σχήμα 3.8: Το STL της περιοχής μελέτης στο 3D Builder

3.11 STL (Standard Tessellation Language)

Τα αρχεία STL αποθηκεύουν πληροφορίες σχετικά με τη μορφή της επιφάνειας ενός τρισδιάστατου αντικειμένου, περιγράφοντας αποκλειστικά και μόνο τη γεωμετρία αυτής, χωρίς να λαμβάνει υπόψιν του άλλες παραμέτρους, όπως χρώμα και υφή ή άλλα χαρακτηριστικά του μοντέλου. Το συγκεκριμένο είδος αρχείου δημιουργείται συνήθως από προγράμματα σχεδίασης μέσω του υπολογιστή (CAD), ως το τελικό προϊόν της διαδικασίας τρισδιάστατης μοντελοποίησης. Πρόκειται για την πιο διαδεδομένη μορφή αρχείου για τρισδιάστατες εκτυπώσεις και αποτελεί το εργαλείο επικοινωνίας μεταξύ του υπολογιστή και του τρισδιάστατου εκτυπωτή (All3DP, 2023).

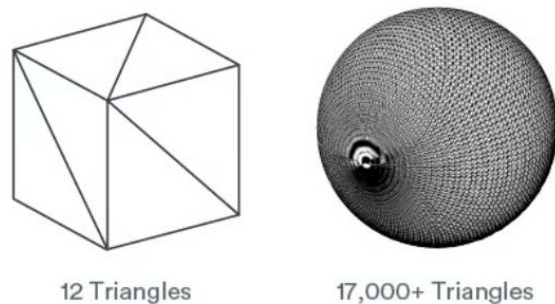
Η αρχή λειτουργίας των αρχείων STL είναι η κωδικοποίηση της γεωμετρίας της επιφάνειας ενός τρισδιάστατου αντικειμένου μέσω της δημιουργίας της ψηφιδωτής του απεικόνισης. Ουσιαστικά, γίνεται η τοποθέτηση μιας επιφάνειας με ένα ή περισσότερα γεωμετρικά σχήματα, απλά ή περίπλοκα, ώστε να εξαλείφονται επικαλύψεις ή κενά. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα, είναι ένας τοίχος ή ένα δάπεδο που έχουν καλυφθεί με πλακάκια (All3DP, 2023).

Η βασική ιδέα είναι οι ψηφίδες αυτές να έχουν το σχήμα μικροσκοπικών τριγώνων, που διαμορφώνουν την τρισδιάστατη εξωτερική επιφάνεια τρισδιάστατων μοντέλων, αποθηκεύοντας πληροφορίες σχετικά με τις όψεις σε ένα αρχείο. Όπως παρατηρούμε και στη παρακάτω εικόνα, δύο χαρακτηριστικά παραδείγματα αυτής της λειτουργίας είναι ένας απλός τρισδιάστατος κύβος, ο οποίος μπορεί να καλυφθεί από 12 τρίγωνα, αφού υπάρχουν δύο τρίγωνα ανά όψη και δεδομένου ότι ο κύβος έχει έξι όψεις, προκύπτουν 12 τρίγωνα συνολικά, αλλά και ένα τρισδιάστατο μοντέλο μια σφαίρας, η οποία μπορεί να καλυφθεί από πολλά μικρά τρίγωνα (All3DP, 2023).

Ωστόσο, όπως μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτό ένα αρχείο STL, κρύβει και πλεονεκτήματα αλλά και μειονεκτήματα. Το πιο σημαντικό μειονέκτημα είναι ότι δεν μπορεί να αποθηκεύσει πρόσθετες πληροφορίες όπως χρώμα ή υλικό. Μπορεί να αποθηκεύσει μόνο πληροφορίες σχετικά με τις κορυφές και το κανονικό διάνυσμα. Επομένως, για μια εκτύπωση με πολλαπλά χρώματα ή υλικά τότε η συγκεκριμένη μορφή αρχείου δεν είναι καλή επιλογή. Ακόμη, ένα άλλο μειονέκτημα των αρχείων STL, είναι το μέγεθος, αφού ο αριθμός των τριγώνων που μπορεί να χρειαστεί για την ομαλότητα των

καμπυλών επιφανειών μπορεί να είναι μεγάλος. Ακόμη, σε ένα αρχείο STL είναι αδύνατο να συμπεριληφθούν μεταδεδομένα, όπως πληροφορίες που έχουν σχέση με τη συγγραφή και τα πνευματικά δικαιώματα (All3DP, 2023).

Από την πλευρά των πλεονεκτημάτων, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι ο συγκεκριμένος τύπος αρχείου μπορεί να χρησιμοποιηθεί από σχεδόν όλους τους τρισδιάστατους εκτυπωτές, σε αντίθεση με τη αρχεία OBJ, VRML, AMF και 3MF, τα οποία στηρίζουν τη λειτουργία τους σε μια παρόμοια λογική, αλλά δεν υποστηρίζονται τόσο ευρέως. Επομένως, έχει δημιουργηθεί ένα τεράστιο δίκτυο παραγωγής τέτοιων αρχείων, αφού η βάση χρηστών που έχει επενδύσει σε μεγάλο βαθμό στη μορφή αυτή είναι πολύ μεγάλη. Ακόμη, ένα αρχείο STL είναι καλύτερο από ένα αρχείο OBJ, αφού είναι πιο απλό, οδηγώντας σε μικρότερα μεγέθη αρχείων, άρα και ταχύτερη επεξεργασία (All3DP, 2023).



Σχήμα 3.9: Η γεωμετρία του κύβου αναπαρίσταται τέλεια με 12 τρίγωνα, ενώ η σφαίρα πρέπει να προσεγγιστεί (σχήμα από All3DP, 2023)

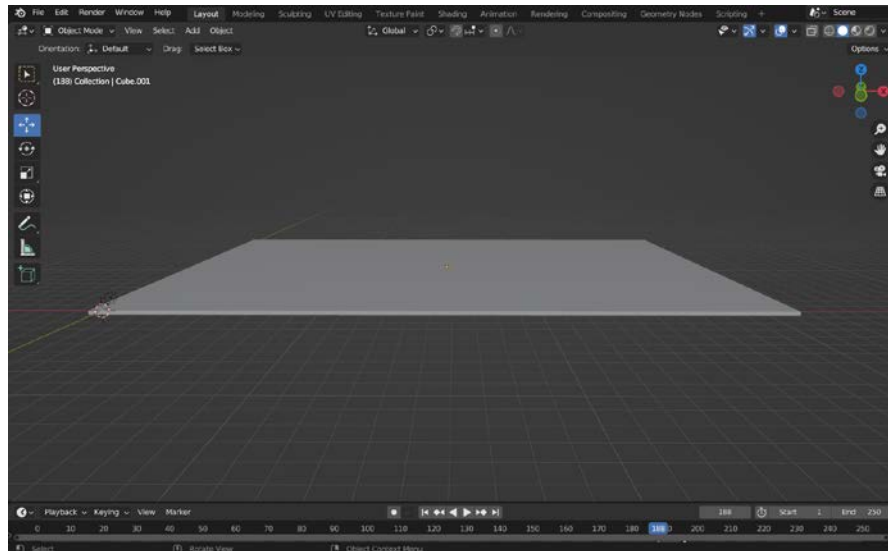
3.12 Προσθήκη χαρτογραφικών στοιχείων μέσω του Blender 3.6

Αμέσως μετά τη δημιουργία του 3D μοντέλου μέσω του QGIS, ένα κομμάτι της έρευνας που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, είναι η προσθήκη χαρτογραφικών χαρακτηριστικών σε αυτό, όπως για παράδειγμα στοιχείων πλαισίου, με κυριότερα, αυτά του τίτλου και του υπομνήματος. Γι' αυτό τον λόγο, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Blender 3.6. Το Blender είναι μια εφαρμογή 3D μοντελοποίησης, με μεγάλες δυνατότητες στο κομμάτι της σχεδίασης και της επεξεργασίας πολύπλοκων μοντέλων. Αρχικά, μέσω αυτού πραγματοποιήθηκε η δημιουργία μιας βάσης πάνω στην οποία θα τοποθετηθεί το

τρισδιάστατο μοντέλο, ενώ στη συνέχεια προστέθηκαν και χαρτογραφικά στοιχεία, που αναφέρθηκαν παραπάνω.

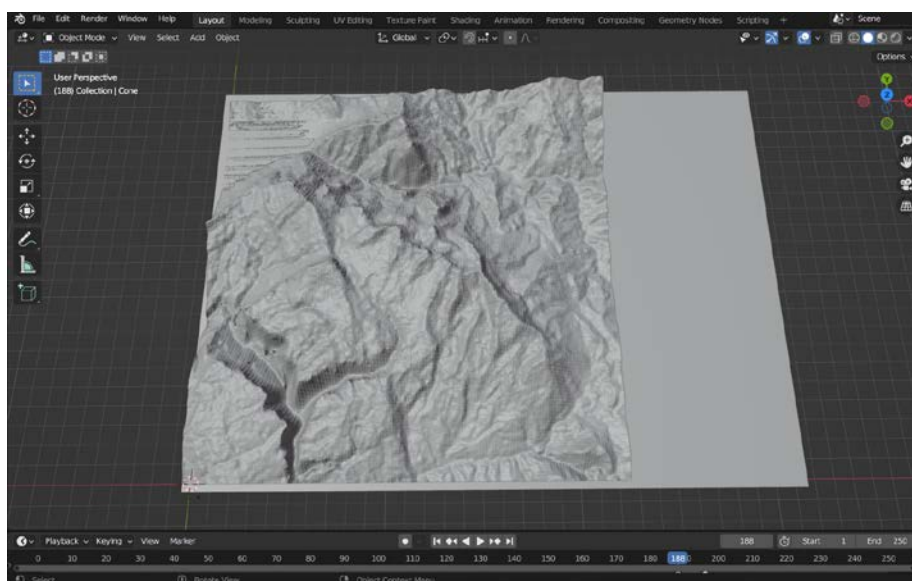
3.12.1 Δημιουργία τρισδιάστατης βάσης

Επιλέχθηκε να δημιουργηθεί μια βάση με διαστάσεις 320 x 232 x 2 mm, ώστε να χωρέσουν σε αυτό, τόσο το 3D μοντέλο της περιοχής, όσο και τα στοιχεία πλαισίου.



Σχήμα 3.10: Το μοντέλο της βάσης, όπου θα τοποθετηθεί από πάνω του το 3D μοντέλο της οροσειράς της Πίνδου.

Στην παρακάτω φωτογραφία απεικονίζεται η βάση μαζί με το τρισδιάστατο μοντέλο της περιοχής μελέτης.



Σχήμα 3.11: Το μοντέλο της βάσης μαζί με το 3D μοντέλο της οροσειράς της Πίνδου.

3.12.2 Δημιουργία τρισδιάστατου υπομνήματος υψομέτρου και λοιπών στοιχείων πλαισίου

Όπως αναφέρθηκε στο πρώτο κεφάλαιο οι τρισδιάστατα εκτυπωμένοι χάρτες έχουν το μειονέκτημα της μονόχρωμης εκτύπωσης. Ωστόσο, έχουν και το πλεονέκτημα ότι λόγω του ανάγλυφου τους μπορούν να αποδειχθούν πολύ χρήσιμα για άτομα που αντιμετωπίζουν προβλήματα όρασης, των οποίων ένας τρόπος ενίσχυσης των χωρικών τους δεξιοτήτων είναι η αφή. Λόγω, αυτών δύο παραγόντων, δημιουργήθηκε η ιδέα ότι ένα τρισδιάστατο υπόμνημα, από τη μία θα έλυνε το ζήτημα του χρώματος, αφού οι αλλαγές του υψομέτρου θα συμβολιζόταν μέσω τρισδιάστατων σχημάτων, ενώ ένας τέτοιος χάρτης θα μπορούσε να είναι εύχρηστος για όλους, ακόμα και για εκείνους που αντιμετωπίζουν προβλήματα όρασης, έχοντας τη δυνατότητα με τη βοήθεια του συγκεκριμένου υπομνήματος να αντιληφθούν και να εξετάσουν τα χαρακτηριστικά του εδάφους, καθώς και τις διαφορές του υψομέτρου που παρουσιάζονται μεταξύ των βουνών, δημιουργώντας στο μυαλό τους μια εικόνα, για το πως μπορεί να είναι το ανάγλυφο της οροσειράς της Πίνδου.

Το υπόμνημα αποτελείται από τρεις στον αριθμό κώνους, κάθε ένας από τους οποίους αντιστοιχεί και σε ένα υψόμετρο. Τα τρία υψόμετρα που επιλέχθηκαν είναι τα εξής: 450 m, 1400 m, 2400 m. Με τη δημιουργία του υπομνήματος, λοιπόν, το μοντέλο διαμορφώθηκε, έτσι όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.

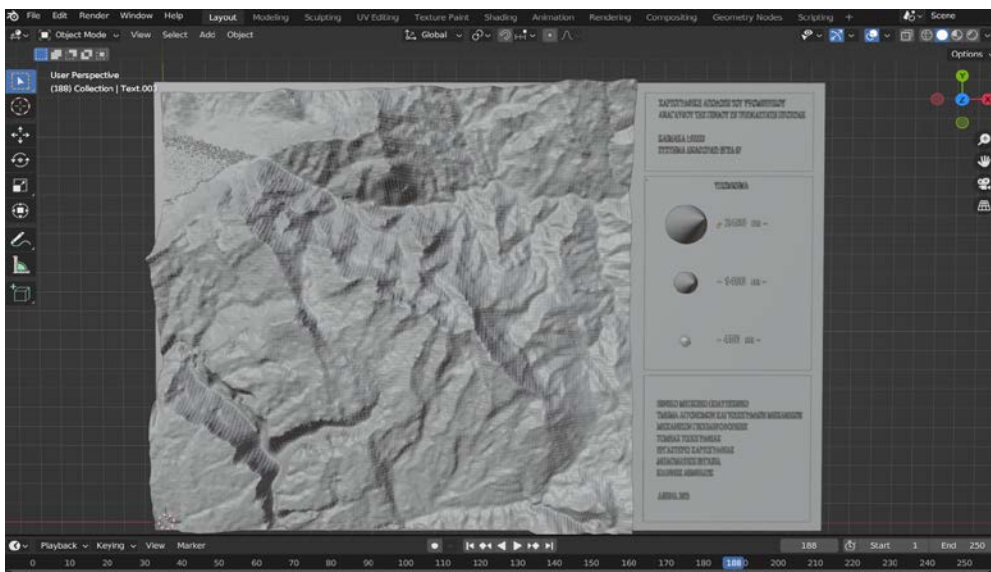


Σχήμα 3.12: Το 3D μοντέλο έτσι όπως έχει διαμορφωθεί με την προσθήκη του υπομνήματος

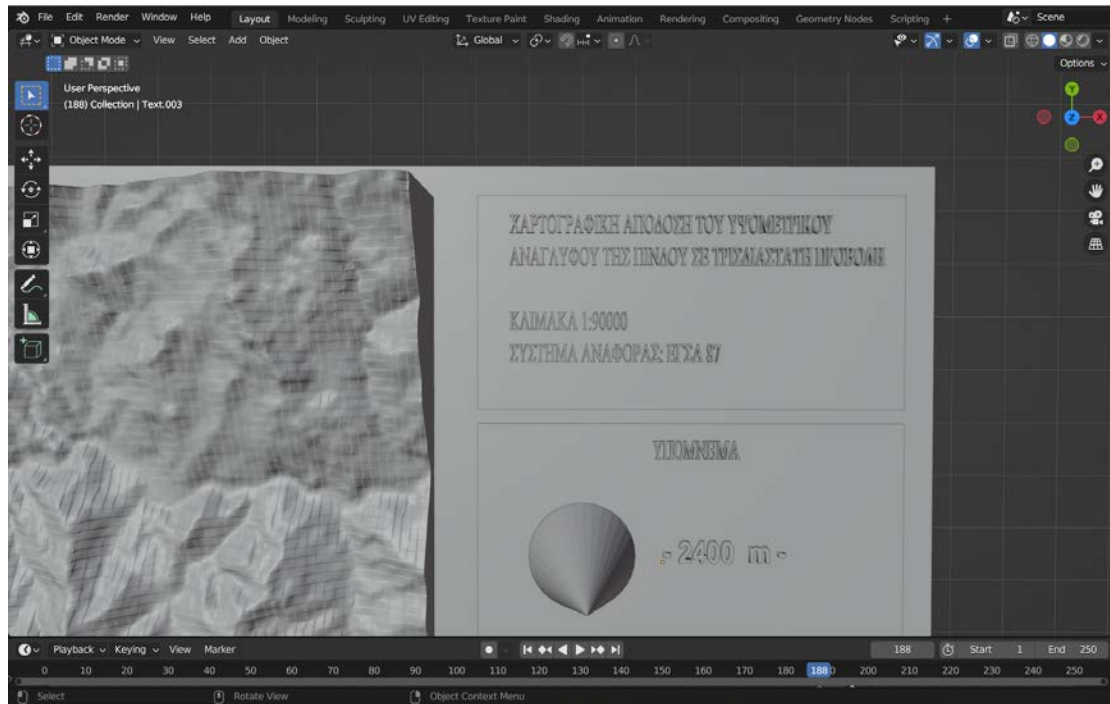


Σχήμα 3.13: Το 3D υπόμνημα του τρισδιάστατου χάρτη, με κάθε κόνο να αναπαριστά τα υψόμετρα 450 m, 1400 m, 2400 m (από κάτω προς τα επάνω, όπως φαίνεται στην εικόνα)

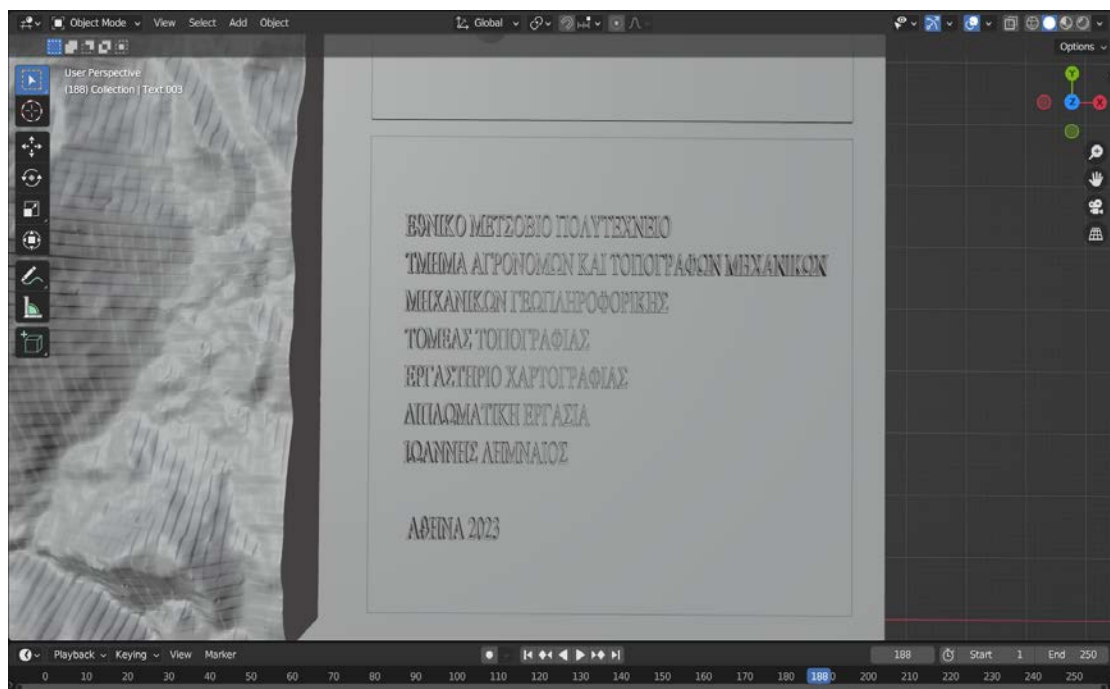
Ωστόσο, πέρα από το υπόμνημα, ήταν απαραίτητη η προσθήκη και άλλων στοιχείων πλαισίου όπως ο τίτλος, η κλίμακα και κάποια γενικά στοιχεία που αφορούν το μοντέλο. Τα στοιχεία πλαισίου είναι σημαντικά, διότι καθιστούν τον χάρτη πιο κατανοητό και πιο εύχρηστο για το κοινό, ώστε ο χρήστης να μπορεί να αντλήσει ευκολότερα τις πληροφορίες που χρειάζεται, χωρίς να αντιμετωπίζει δυσκολίες. Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται το πλαίσιο στοιχείων, όπως έχει διαμορφωθεί.



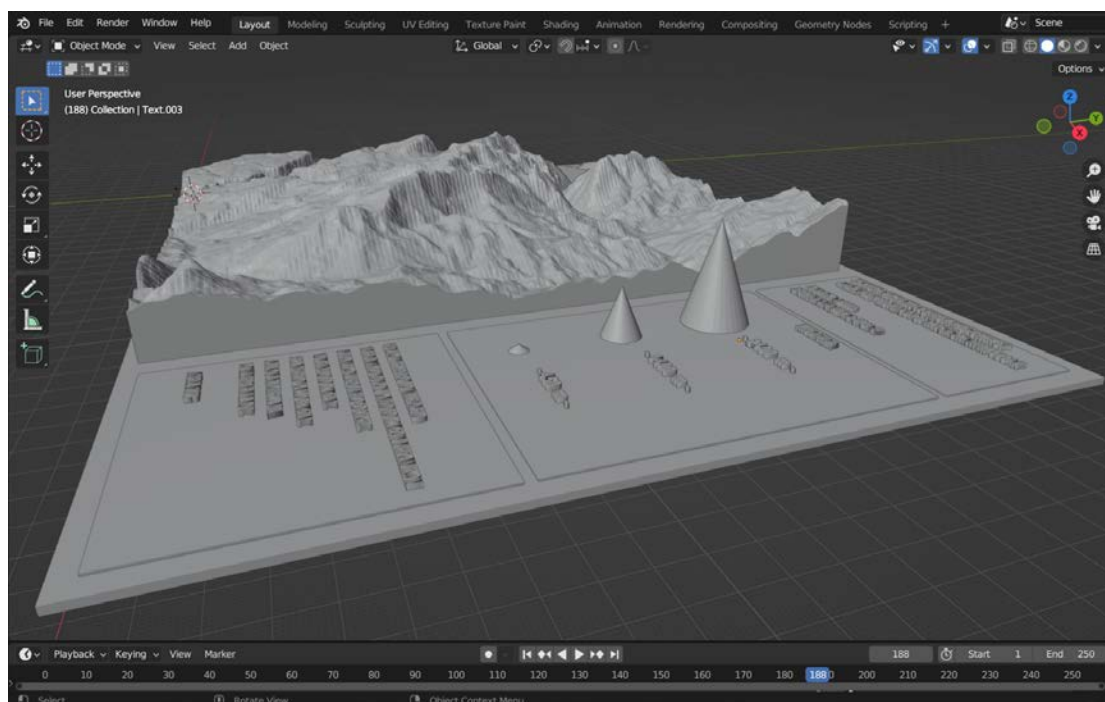
Σχήμα 3.14: Ο 3D χάρτης με τα στοιχεία πλαισίου



Σχήμα 3.15: Ο 3D χάρτης με τα στοιχεία πλαισίου (αναγράφονται ο τίτλος του χάρτη, η κλίμακα και το σύστημα αναφοράς)



Σχήμα 3.16: Ο 3D χάρτης με τα στοιχεία πλαισίου (αναγράφονται τα στοιχεία του εργαστηρίου και του ιδρύματος, όπου πραγματοποιήθηκε η 3D εκτύπωση, τα κατασκευαστή, καθώς και το έτος κατασκευής).



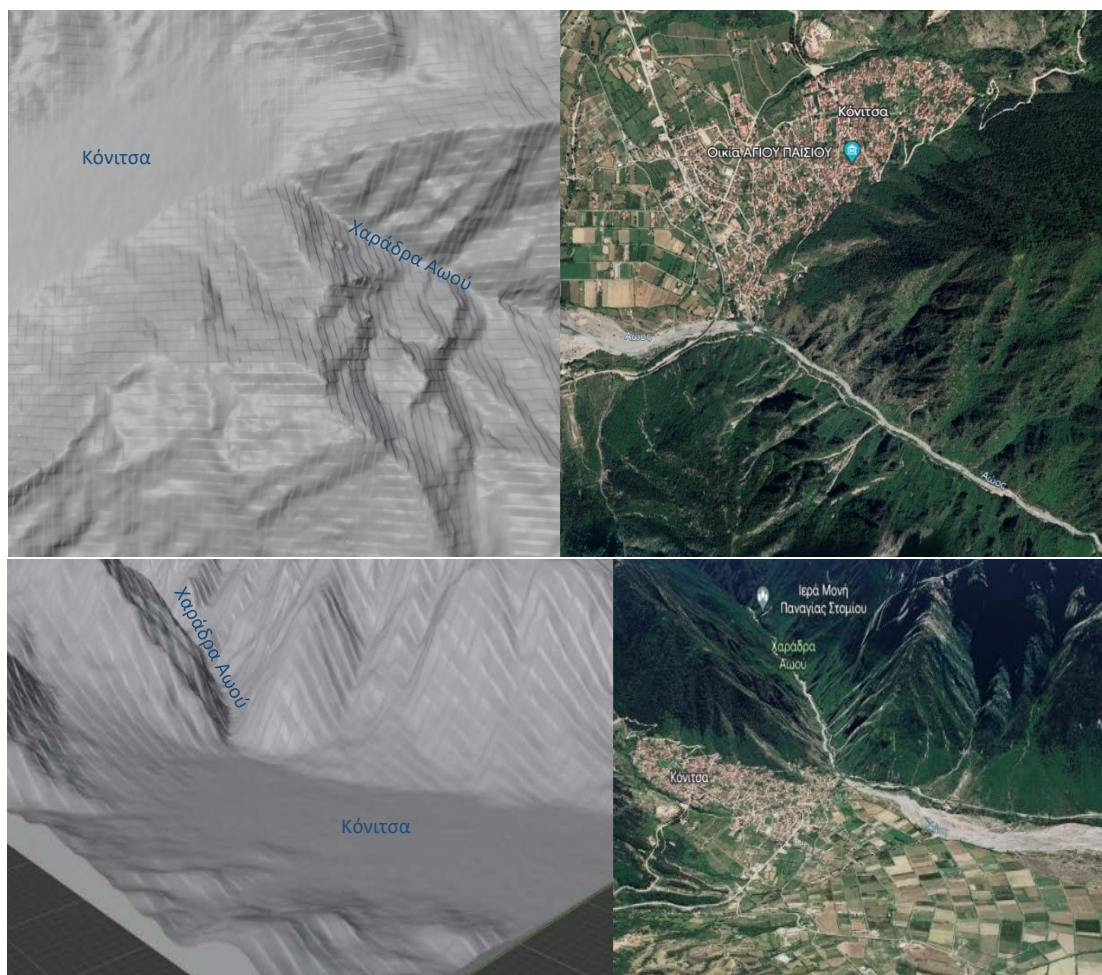
Σχήμα 3.17: Ο 3D χάρτης με τα στοιχεία πλαισίου και το 3D υπόμνημα από πλάγια λήψη.

3.13 Αξιολόγηση του τρισδιάστατου μοντέλου σε σχέση με το Google Earth

Αφού ολοκληρώθηκε η κατασκευή του μοντέλου, πραγματοποιήθηκε και η αξιολόγηση, κυρίως ως προς τη μορφολογία του εδάφους και αν τελικά το ανάγλυφο στο τρισδιάστατο μοντέλο που παρουσιάστηκε παραπάνω, έχει διαμορφωθεί σωστά. Επειδή, η αξιολόγηση που θα πραγματοποιηθεί θα είναι κυρίως οπτική, δηλαδή, πόσο σωστό φαίνεται στο μάτι ότι τα υψομετρικά χαρακτηριστικά του εδάφους του μοντέλου που έχει δημιουργηθεί, αντιστοιχούν με αυτά της πραγματικότητας, αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί η ιστοσελίδα του Google Earth.

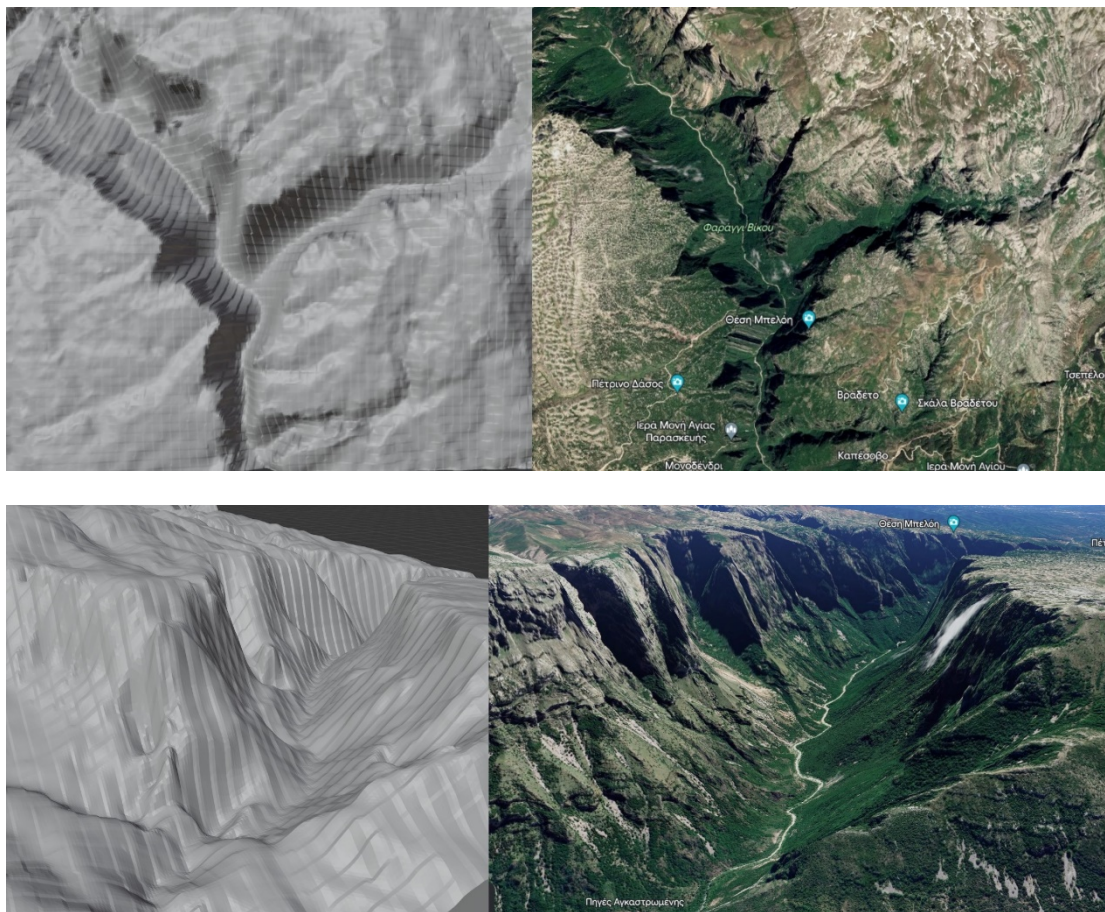
Αφού έγινε, εντοπίστηκε η περιοχή μελέτης και για την οποία κατασκευάστηκε το 3D μοντέλο. Αφού πραγματοποιήθηκε αυτό εντοπίστηκαν κάποια χαρακτηριστικά σημεία της περιοχής, τα οποία θα δούμε αν αποτυπώθηκαν με επιτυχία στο τρισδιάστατο μοντέλο που προέκυψε από το εργαλείο του DEM to 3D του προγράμματος του QGIS 3.22.11. Κάποια από τα σημεία αυτά τα οποία θα μπορούσαμε να ελέγξουμε είναι το φαράγγι του Βίκου, οι κορυφές της οροσειράς της Πίνδου, όπως η Τύμφη, αλλά και την κωμόπολη της Κόνιτσας με τις γύρω καλλιέργειες.

Στο παρακάτω σχήμα, παρουσιάζεται στο πάνω ζεύγος εικόνων η κομόπολη της Κόνιτσας, όπως παράχθηκε από το πρόγραμμα του QGIS (αριστερά), αλλά και στο πρόγραμμα του Google Earth (δεξιά) σε ορθή προβολή. Στο κάτω ζεύγος εικόνων βλέπουμε την ίδια περιοχή σε τρισδιάστατη προβολή. Όπως παρατηρούμε τα αποτελέσματα του 3D μοντέλου σε αυτή τη περιοχή μπορούν να θεωρηθούν ικανοποιητικά, αφού βλέπουμε ότι έχει δημιουργηθεί σωστά στο αρχείο STL, το σημείο όπου υπάρχουν καλλιέργειες και αποτυπώνεται ως η περιοχή με το χαμηλότερο υψόμετρο (λίγο μεγαλύτερο από 400 m), πράγμα που ισχύει και στην εφαρμογή του Google Earth, ενώ νότια αυτής παρατηρείται σταδιακή αύξηση υψομέτρου, αφού είναι οι πρόποδες των βουνών. Μάλιστα, αναμεσά τους έχει σχηματιστεί η χαράδρα του Αώου.



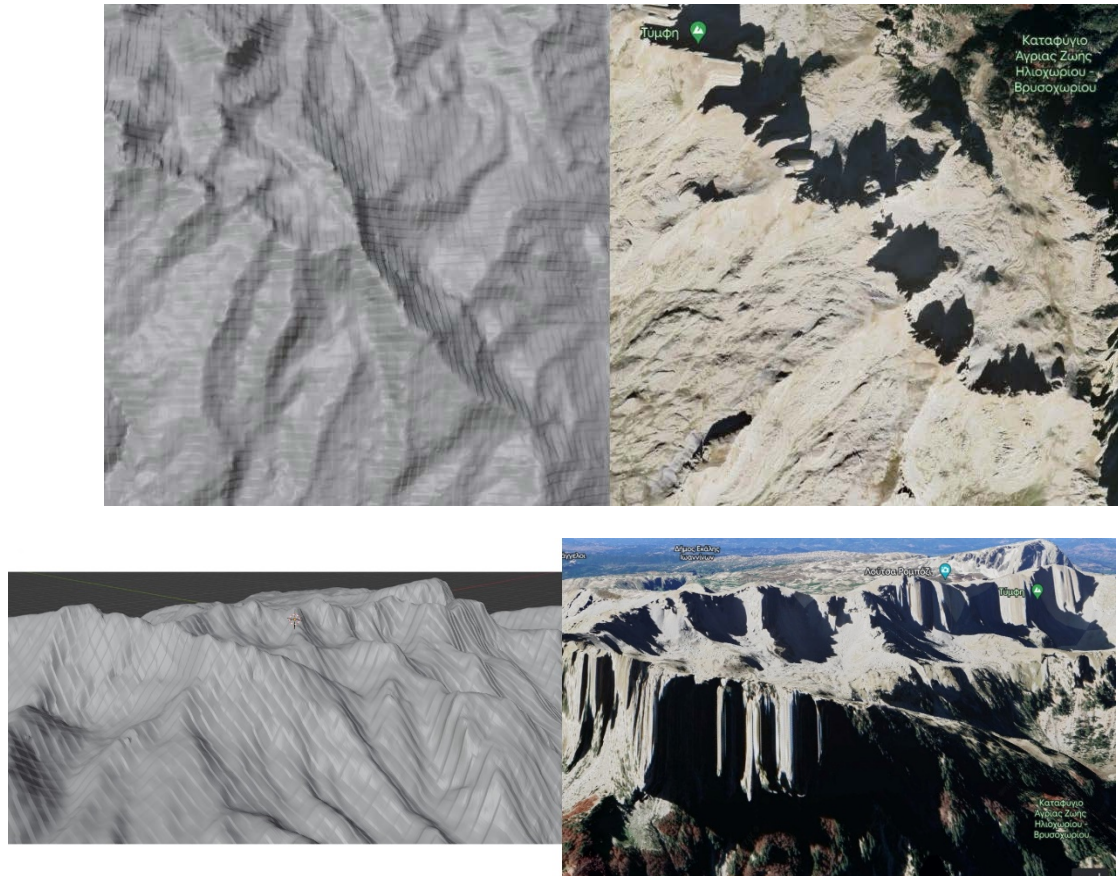
Σχήμα 3.18: Η απόδοση του υψομετρικού ανάγλυφου της Κόνιτσας και των γύρω βουνών, τόσο από το αρχείο STL, όσο και από το Google Earth, σε ορθή προβολή (πάνω σχήμα) και σε τρισδιάστατη προβολή (κάτω σχήμα).

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται το φαράγγι του Βίκου, το οποίο επίσης φαίνεται να έχει διαμορφωθεί σωστά στο αρχείο STL.



Σχήμα 3.19: Η απόδοση του υψομετρικού ανάγλυφου του φαραγγιού του Βίκου, τόσο από το αρχείο STL, όσο και από το Google Earth, σε ορθή προβολή (πάνω σχήμα) και σε τρισδιάστατη προβολή (κάτω σχήμα).

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται το βουνό της Τύμφης, που πρόκειται για τη μεγαλύτερη υψομετρική περιοχή του ανάγλυφου, το οποίο επίσης φαίνεται να έχει διαμορφωθεί σωστά στο αρχείο STL. Παρατηρώντας τη 3D απεικόνιση από την εφαρμογή του Google Earth φαίνεται ότι η μορφολογία του εδάφους, η οποία χαρακτηρίζεται από απότομους γκρεμούς και κορυφές μεγάλων υψομέτρων να έχει αποτυπωθεί σχεδόν πλήρως και με μεγάλη λεπτομέρεια στο αρχείο STL που έχει παραχθεί, ενώ από την ορθή προβολή φαίνεται πεντακάθαρα η κορυφογραμμή που σχηματίζουν οι διαδοχικές κορυφές και οι αυχένες (το χαμηλότερο σημείο της κορυφογραμμής, όπου περιλαμβάνεται ανάμεσα σε δύο κορυφές) της οροσειράς.



Σχήμα 3.20: Η απόδοση του υψομετρικού ανάγλυφου της κορυφής του βουνού της Τύμφης, τόσο από το αρχείο STL, όσο και από το Google Earth, σε ορθή προβολή (πάνω σχήμα) και σε τρισδιάστατη προβολή (κάτω σχήμα).

Κεφάλαιο 4

Μέθοδοι και Υλικά Εκτύπωσης

Αφού ολοκληρώθηκε η δημιουργία του αρχείου STL της χαρτογραφικής απόδοσης του υπομετρικού ανάγλυφου της οροσειράς της Πίνδου, ακολουθεί το τελευταίο στάδιο της τρισδιάστατη εκτύπωσης του μοντέλου. Ωστόσο, πριν από αυτό κρίθηκε απαραίτητο να αναλυθούν σε ένα κεφάλαιο, οι μέθοδοι τρισδιάστατης εκτύπωσης, καθώς και τα υλικά που χρησιμοποιούνται σε αυτές, ώστε να γίνει ευκολότερη η κατανόηση του τρόπου με τον οποίο λειτουργεί ένα τρισδιάστατος εκτυπωτής, καθώς και των χαρακτηριστικών των υλικών που καταναλώνει.

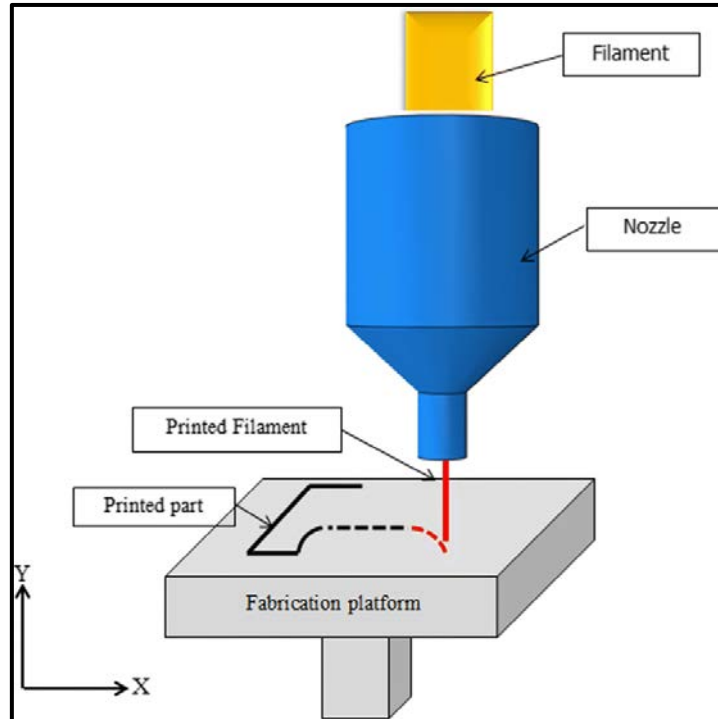
4.1 Μέθοδοι Τρισδιάστατης Εκτύπωσης

Οι τύποι τρισδιάστατης εκτύπωσης που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι οι εξής: η τεχνική της στερεολιθογραφίας SLA (Stereolithography), η τεχνολογία εκτύπωσης επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με χρήση λέιζερ SLS (Selective Laser Sintering), η επιλεκτική τήξη με λέιζερ SLM (Selective Laser Melting), η τεχνική της λιωμένης εναπόθεσης κατασκευής FDM (Fused Deposition Modeling), η τρισδιάστατη εκτύπωση χύτευσης (3DP) και άλλες παρόμοιες. Ανάμεσα σε αυτές τις μεθόδους, η διαδικασία κατασκευής που βασίζεται στην τεχνική της συντηγμένης εναπόθεσης (FDM) είναι η πιο διαδεδομένη και ευρέως χρησιμοποιούμενη (Haghsefat and Tingting, 2020).

4.2 Μέθοδος FDM (Fused Deposition Modeling)

Η τεχνολογία FDM είναι μια τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης που βασίζεται στην εξώθηση υλικού, μέσω ενός ακροφυσίου. Ειδικότερα, το ακροφύσιο παράγει το θερμοπλαστικό πολυμερές σε μορφή νήματος και το τοποθετεί σε διάφορα στρώματα, πάνω στη βάση κατασκευής του τρισδιάστατου εκτυπωτή. Η κεφαλή εκτύπωσης (ακροφύσιο) μετακινείται κατά την x, κατά την y και κατά την z διεύθυνση. Ο εξοπλισμός FDM έχει χαμηλό κόστος κατασκευής και είναι εύκολος στη λειτουργία. Αν και η ακρίβεια εκτύπωσης δεν είναι τόσο υψηλή, τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι φθηνά και η συντήρηση του εξοπλισμού είναι απλή γι' αυτό και προτιμάται από ένα ευρύ φάσμα χρηστών. Η τεχνολογία της διαδικασίας τύπου FDM βελτιώνεται συνεχώς και έχει

σημειωθεί μεγάλη πρόοδος όσον αφορά την ακρίβεια κατασκευής του εξοπλισμού και το λογισμικό ελέγχου. Ωστόσο, για τους χρήστες, πολλά προβλήματα συνεχίζουν να εμφανίζονται κατά τη χρήση. Παρακάτω αναλύονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της μεθόδου FDM, καθώς και τρόποι αντιμετώπισης των προβλημάτων που προκύπτουν κατά την εκτύπωση.



Σχήμα 4.1: Η σχηματική απεικόνιση της τεχνολογίας της τρισδιάστατης εκτύπωσης FDM (σχήμα από El Moumen, Tarfaoui, Lafdi, 2019)

4.2.1 Πλεονεκτήματα Μεθόδου FDM

Χαμηλό κόστος-Αποτελεσματικότητα

Η FDM αποτελεί μια από τις γνωστότερες επιλογές στον τομέα της τρισδιάστατης εκτύπωσης, κυρίως, λόγω του ότι πρόκειται ως μία από τις οικονομικότερες λύσεις. Ειδικά σε περιπτώσεις όπου απαιτείται η κατασκευή ενός αντικειμένου από μία μεμονωμένη μονάδα έως μία μικρή παρτίδα, η FDM αποτελεί την ιδανική επιλογή σε σύγκριση με πιο ακριβές μεθόδους όπως η SLA ή η SLS. Το επιπλέον πλεονέκτημα, απορρέει, από το γεγονός ότι τα υλικά κατασκευής είναι προσιτά και ευρέως διαθέσιμα, επιτρέποντας την

βελτιστοποίηση του σχεδιασμού, με λιγότερη οικονομική επιβάρυνση για τον χρήστη σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες.

Ταχύτητα στην εκτύπωση

Όσον αφορά τις ταχύτητες εκτύπωσης η διαδικασία FDM είναι αρκετά πιο γρήγορη σε σχέση με άλλες τεχνολογίες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η παραγωγή των νημάτων κατασκευής είναι μεγάλη, επομένως δεν υπάρχει πρόβλημα χρόνου στην εκτύπωση μεγάλων παρτίδων.

Εκτύπωση σε πλήρες χρώμα

Περισσότερα από 40 χρώματα είναι διαθέσιμα για τους εκτυπωτές FDM και ο αριθμός των χρωματικών επιλογών συνεχώς αυξάνεται. Το χρώμα του τελικού προϊόντος, είναι ακριβώς το χρώμα του νήματος που παράγεται από το ακροφύσιο. Εάν δεν επιτευχθεί το επιθυμητό χρώμα, διατίθενται επίσης μέθοδοι μεταγενέστερης επεξεργασίας, όπως η βαφή ή η ζωγραφική, με τις οποίες αποδίδεται η απαιτούμενη πληροφορία στο μοντέλο.

Λιγότερη σπατάλη υλικών

Δεδομένου ότι ο εκτυπωτής FDM εκτυπώνει μέσω της τήξης του νήματος και της στερεοποίησης του, δεν υπάρχει πιθανότητα σπατάλης, όπως στις μεθόδους MJF ή SLS, όπου γίνεται χρήση της σκόνης ή του υγρού και είναι επιρρεπής στη σπατάλη. Ακόμη, υπάρχει η πιθανότητα εξάλειψης των δομών στήριξης όταν το μοντέλο σχεδιάζεται προσεκτικά.

4.2.2 Μειονεκτήματα Μεθόδου FDM

Τραχύτητα στην επιφάνεια του εκτυπωμένου μοντέλου

Η ποιότητα της υφής στην επιφάνεια των μοντέλων που προκύπτουν από την τεχνική εκτύπωσης FDM δεν προσφέρει την ομαλότητα που επιτυγχάνουν τα αντίστοιχα εξαρτήματα που εκτυπώνονται με τη μέθοδο SLS ή Carbon DLS, όπου χρησιμοποιείται ρητίνη. Αυτό οφείλεται στον τρόπο λειτουργίας της FDM, κατά τον οποίο το λιωμένο πλαστικό στρώνεται σταδιακά στο επίπεδο του εξαρτήματος, με αποτέλεσμα να είναι εμφανή τα στρώματα και οι διακυμάνσεις στην επιφάνεια του προϊόντος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να παρουσιάζεται μια χαρακτηριστικά χοντρή υφή στην επιφάνεια του

αντικειμένου, λόγω της εν λόγω σκάλας. Επιπλέον, ο μηχανισμός που χρησιμοποιείται για την πρόσφυση των στρωμάτων μπορεί να καταστήσει τα εξαρτήματα που προκύπτουν από την FDM ανομοιόμορφα σε κάποιες περιπτώσεις. Ως αποτέλεσμα, είναι απαραίτητη μια μετέπειτα διαδικασία επεξεργασίας για να επιτευχθεί μια λεία επιφάνεια, η οποία όμως συνεπάγεται περαιτέρω δαπάνες.



Σχήμα 4.2: Οι ορατές γραμμές στρώσεων που είναι χαρακτηριστικό των προϊόντων εκτύπωσης FDM, ενώ τα συγκεκριμένα ενδέχεται να παρουσιάζουν ανακρίβειες όταν πρόκειται για την εκτύπωση περίπλοκων μοντέλων. Το παραπάνω προϊόν εκτυπώθηκε σε έναν βιομηχανικό εκτυπωτή FDM 3D Stratasys uPrint με διαλυτά στηρίγματα (σχήμα από formlabs)

Χαμηλότερη ακρίβεια σε σχέση με άλλες μεθόδους

Λόγω της φύσης του λιωμένου πλαστικού, η FDM αποκρύπτει μικρά χαρακτηριστικά και έχει τη χαμηλότερη ακρίβεια και ανάλυση σε σχέση με άλλες τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης και επομένως, δεν είναι κατάλληλη για μοντέλα με πολλές λεπτομέρειες. Σίγουρα αποτελεί μια αξιόπιστη επιλογή για την κατασκευή πρωτοτύπων όπου οι απαιτήσεις για την ύπαρξη των μικρών λεπτομερειών δεν έχουν τόση σημασία, ωστόσο σε περίπτωση, που στο εκτυπωμένο προϊόν είναι απαραίτητο το στοιχείο της ακρίβειας είναι προτιμότερο να αποφεύγεται η FDM.

4.2.3 Υλικά για τρισδιάστατη εκτύπωση FDM

PLA (Polylactic Acid)

Το PLA είναι το πολυμερές, με το οποίο πραγματοποιούνται οι ευκολότερες εκτυπώσεις, ενώ παρέχει και καλή οπτική ποιότητα. Πρόκειται για ένα άκαμπτο υλικό, το οποίο ωστόσο, είναι εύθραυστο. Είναι βιολογικής προέλευσης και ένας νέος τύπος βιοδιασπώμενου υλικού, το οποίο δεν μολύνει το περιβάλλον, έχει καλή αντοχή στην υπεριώδη ακτινοβολία και μπορεί να υποστεί μεταγενέστερη επεξεργασία με γυαλόχαρτο, αλλά και να βαφτεί με ακρυλικά χρώματα. Ακόμη, πρόκειται για ένα άοσμο υλικό. Από την άλλη πλευρά, το PLA έχει χαμηλή αντοχή στην υγρασία και δεν μπορεί να κολληθεί εύκολα. Η θερμοκρασία τήξης του είναι 145-160 °C, η θερμοκρασία εκτύπωσης του ακροφυσίου είναι 180 - 200 °C και η θερμοκρασία της πλάκας θέρμανσης είναι 60-70 °C (Haghsefat and Tingting, 2020).

Παρακάτω παρουσιάζεται οι δυνατότητες του PLA, ως προς τα εξής χαρακτηριστικά:

Ευκολία εκτύπωσης: έχει να κάνει με το πόσο εύκολη είναι η εκτύπωση χρησιμοποιώντας ένα συγκεκριμένο υλικό και εξετάζεται από παράγοντες όπως η ευκολία με την οποία προσκολλάται καλά σε διάφορα σημεία της βάσης εκτύπωσης, η ταχύτητα εκτύπωσης, η συχνότητα παραγωγής αποτυχημένων προϊόντων, η ακρίβεια ροής, καθώς και η ευκολία τροφοδοσίας του εκτυπωτή.

Μέγιστη πίεση: Η μέγιστη τάση που μπορεί να αντέξει ένα αντικείμενο σε κατάσταση εφελκυσμού.

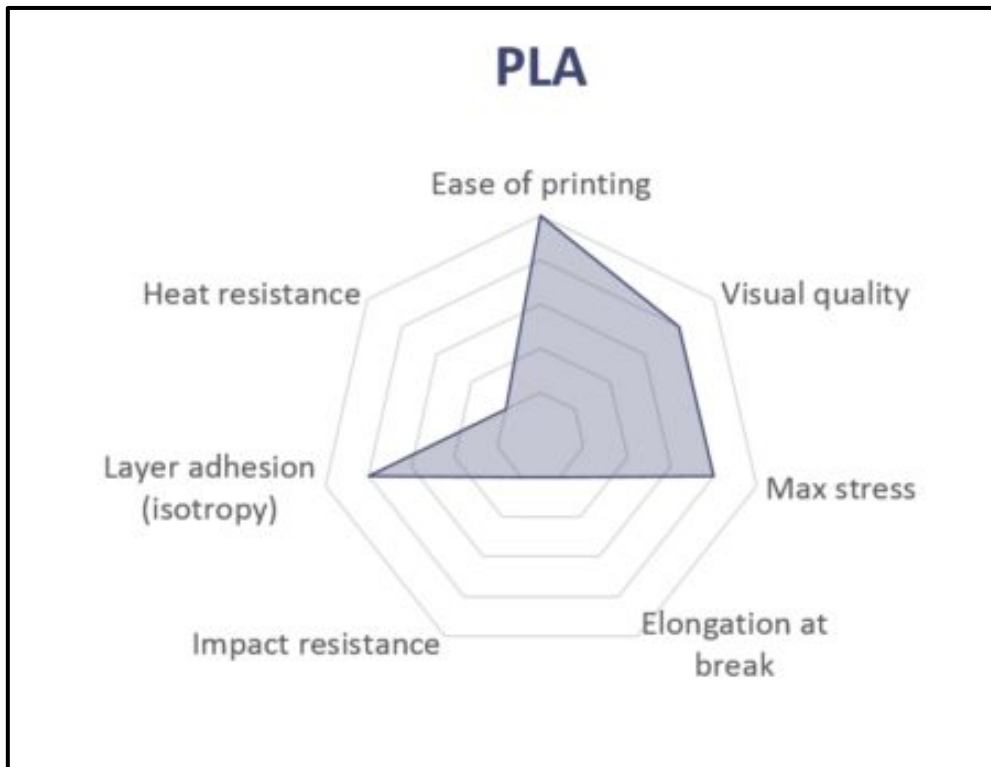
Επιμήκυνση κατά τη θραύση: Ο λόγος μεταξύ του αρχικού μήκους και του μεταβαλλόμενου μήκους μετά τη θραύση ενός αντικείμενου. Ονομάζεται επίσης παραμόρφωση θραύσης.

Αντοχή στην κρούση: Η απαιτούμενη ενέργεια για να σπάσει ένα αντικείμενο με μια ξαφνική κρούση.

Αντοχή στη θερμότητα: Η μέγιστη θερμοκρασία που μπορεί να αντέξει ένα αντικείμενο πριν μαλακώσει ή παραμορφωθεί.

Πρόσφυση στρώματος: Είναι το πόσο καλά προσκολλώνται τα στρώματα του υλικού μεταξύ τους. Όσο καλύτερη είναι η προσκόλληση των στρώσεων, τόσο πιο ισότροπο θα και καλά δομημένο θα είναι το μοντέλο.

Το παρακάτω διάγραμμα απεικονίζει τη συμπεριφορά του PLA στις παραπάνω παραμέτρους.

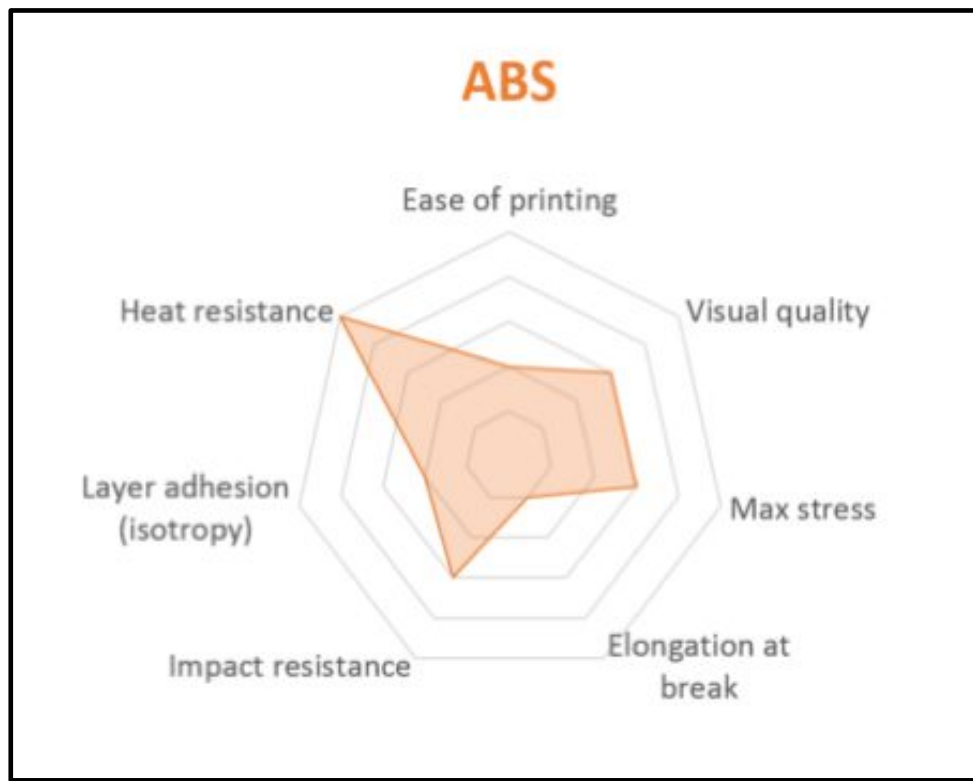


Σχήμα 4.3: Διάγραμμα που απεικονίζει τις ιδιότητες του PLA (σχήμα από HUBS)

ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene)

Το ABS, είναι ένα θερμοπλαστικό υλικό το οποίο βασίζεται στο πετρέλαιο και είναι γνωστό για τις εξαιρετικές μηχανικές του ιδιότητες, που το καθιστούν δημοφιλή επιλογή για διάφορες εφαρμογές στην τρισδιάστατη εκτύπωση και σε άλλες βιομηχανίες. Αποτελείται από τρία μονομερή, το ακρυλονιτρίλιο, το βουταδιένιο και το στυρένιο, τα οποία συμβάλλουν στο μοναδικό μείγμα χαρακτηριστικών του υλικού, συμπεριλαμβανομένης της αντοχής, της σκληρότητας και της θερμικής αντοχής. Το ABS έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως για την παραγωγή ποικίλων προϊόντων, όπως εξαρτήματα αυτοκινήτων, ηλεκτρονικά περιβλήματα και παιχνίδια όπως τα τουβλάκια LEGO. Το ABS

επιλέγεται συνήθως έναντι του PLA όταν απαιτείται υψηλότερη αντοχή στη θερμοκρασία και μεγαλύτερη ανθεκτικότητα. Έχει καλή αντοχή στην τριβή, μπορεί να υποστεί μεταγενέστερη επεξεργασία με ατμούς ακετόνης για γυαλιστερό φινίρισμα και μπορεί να υποστεί μεταγενέστερη επεξεργασία με γυαλόχαρτο και να βαφτεί με ακρυλικά. Το ABS είναι ευαίσθητο στην υπεριώδη ακτινοβολία και συνοδεύεται από υψηλές εκπομπές καπνών. Αναπτύσσει οσμή κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εκτύπωσης. Η εκτύπωση ABS ξεκινά με θερμοκρασία μαλάκυνσης 105 °C, η θερμοκρασία εκτύπωσης ακροφυσίου είναι 210 - 240 °C και η θερμοκρασία της πλάκας θέρμανσης είναι πάνω από 80 °C (Haghsefat and Tingting, 2020). Αντίστοιχα, το ABS έχει τις εξής δυνατότητες στα χαρακτηριστικά που αναλύσαμε προηγουμένως:



Σχήμα 4.4: Διάγραμμα που απεικονίζει τις ιδιότητες του ABS (σχήμα από HUBS)

Συμπεράσματα

Εν κατακλείδι, τόσο το ABS όσο και το PLA έχουν τα δικά του ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που τα καθιστούν κατάλληλα για διαφορετικά έργα τρισδιάστατης εκτύπωσης. Το ABS διαθέτει μεγαλύτερη μηχανική αντοχή, ανθεκτικότητα και αντίσταση

σε περιβαλλοντικούς παράγοντες, καθιστώντας το εξαιρετική επιλογή για εξαρτήματα που πρέπει να αντέχουν σε πιέσεις, χτυπήματα ή φθορά. Από την άλλη, το PLA προσφέρει μεγαλύτερη ευκολία κατά την εκτύπωση, καλύτερη ακρίβεια διαστάσεων και βιοδιασπασιμότητα, γεγονός που μπορεί να είναι επωφελές για έργα που απαιτούν ακρίβεια ή φιλικότητα προς το περιβάλλον. Όσον αφορά το κόστος σε γενικές γραμμές, το PLA είναι γνωστό ότι είναι ελαφρώς πιο προσιτό από το ABS. Αυτή η διαφορά τιμής μπορεί να αποδοθεί στο χαμηλότερο κόστος παραγωγής του PLA, το οποίο προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές.

Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι η τιμή των υλικών μπορεί να αυξομειώνεται λόγω παραγόντων της αγοράς και της ποιότητας του προϊόντος. Ενώ το PLA μπορεί να είναι πιο αποδοτικό από άποψη κόστους για ορισμένα έργα, η διαφορά τιμής μπορεί να μην είναι αρκετά σημαντική ώστε να αντισταθμίζει τα πλεονεκτήματα της χρήσης ABS, ειδικά όταν η αντοχή και η ανθεκτικότητα είναι κρίσιμοι παράγοντες. (Kahn, 2023)

Επομένως, για την επιλογή του κατάλληλου υλικού για ένα μοντέλο τρισδιάστατης εκτύπωσης, είναι σημαντικό να λαμβάνονται υπόψη παράγοντες όπως οι απαιτήσεις του έργου, το κόστος και η διαθεσιμότητα, καθώς και η μακροπρόθεσμη απόδοση. Αξιολογώντας προσεκτικά αυτούς τους παράγοντες, οι χρήστες θα είναι σε θέση να μπορέσουν να λάβουν τη καλύτερη δυνατή απόφαση για την επιλογή του υλικού που θα οδηγήσει σε ένα επιτυχημένο και υψηλής ποιότητας τελικό προϊόν.

4.2.4 Προβλήματα στη 3D εκτύπωση FDM και λύσεις

Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές FDM αντιμετωπίζουν συχνά πολλά προβλήματα κατά τη χρήση. Ορισμένα προκαλούνται από το ίδιο το μηχάνημα, άλλα προκύπτουν από τη φύση του υλικού, ωστόσο μπορούν να αναλυθούν, ώστε να βρεθούν οι κατάλληλες λύσεις για τη μείωση των επιπτώσεων, με απλές μεθόδους.

Συρρίκνωση υλικού

Τόσο το ABS, όσο και το PLA έχουν κάποιο βαθμό συρρίκνωσης, αλλά και για τα δύο υλικά είναι απαραίτητο ο ρυθμός συρρίκνωσης να είναι όσο το δυνατόν μικρότερος. Εάν είναι πολύ μεγάλος, είναι πιθανό να εμφανιστούν εσωτερικές τάσεις, οι οποίες μπορεί

να προκαλέσουν παραμόρφωση του μοντέλου, όπως τοπική στρέβλωση και ρωγμές μεταξύ των στρώσεων (Haghsefat and Tingting, 2020).

Το υλικό ABS έχει μεγαλύτερο ρυθμό συρρίκνωσης όταν είναι κρύο. Κατά την εκτύπωση, πρέπει να γίνεται χρήση θερμής πλάκας και κατάλληλη ρύθμιση της θερμοκρασίας. Όταν πραγματοποιείται εκτύπωση σε συγκεκριμένο χώρο, η διατήρηση μιας συγκεκριμένης θερμοκρασίας μπορεί να μειώσει το φαινόμενο της τοπικής ανύψωσης και των ρωγμών μεταξύ των στρωμάτων, ειδικά στην περίπτωση εκτύπωσης μεγάλων μοντέλων. Ακόμη, σε μια περίπτωση μακροχρόνιας εκτύπωσης, θα πρέπει να ληφθούν μέτρα για τη διατήρηση της θερμότητας. Επιπρόσθετα, κατά την εκτύπωση με υλικό ABS, το κάτω στρώμα του μοντέλου αποσπάται εύκολα από την πλατφόρμα εκτύπωσης, γεγονός που προκαλείται από τη φύση του υλικού ABS, το οποίο συστέλλεται από το κρύο (Haghsefat and Tingting, 2020).

Ο ρυθμός συρρίκνωσης του υλικού PLA είναι λίγο χαμηλότερος και οι απαιτήσεις του περιβάλλοντος εκτύπωσης δεν είναι τόσο αυστηρές. Μπορεί ακόμα να πραγματοποιηθεί σε ανοιχτό περιβάλλον, σε θερμοκρασία δωματίου, αλλά γενικά θα χρησιμοποιηθεί μια πλάκα θέρμανσης για να διασφαλιστεί ότι το κάτω στρώμα και η πλατφόρμα δεν θα διαχωριστούν (Haghsefat and Tingting, 2020).

Το πρόβλημα του σπασμένου νήματος

Το φαινόμενο του σπασμένου νήματος σχετίζεται με τη χρήση του εκάστοτε υλικού. Τόσο τα υλικά ABS όσο και τα υλικά PLA έχουν τη μορφή νημάτων και τυλίγονται σε ρολά για εκτυπωτές. Είναι επιρρεπή στο σπάσιμο κατά τη διάρκεια της κατασκευής του μοντέλου, η οποία σχετίζεται άμεσα με την αντοχή τους στην κάμψη. Η αντοχή κάμψης του υλικού ABS είναι ελαφρώς υψηλότερη και γενικά δεν είναι εύκολο να σπάσει το σύρμα, αλλά το υλικό PLA έχει μικρή αντοχή σε κάμψη και είναι πιθανό να σπάσει μετά από μια μικρή πρόσκρουση ή κάμψη.

Προκειμένου να αποφευχθεί η θραύση του σύρματος, είναι καλό να χρησιμοποιηθεί ένας κατάλληλος πλαστικός σωλήνας για να καλυφθεί το τμήμα του σύρματος ή να προστεθεί μια συσκευή σύρματος, ώστε να εξασφαλιστεί η ομαλή σχεδίαση. Επιπλέον, όταν το υλικό δεν χρησιμοποιείται για μεγάλο χρονικό διάστημα,

τότε αυτό θα πρέπει να προστατεύεται από την υγρασία, διότι επηρεάζει την αντοχή του, οπότε καλό θα ήταν να διατηρείται σφραγισμένο, ενώ θα πρέπει να αποφεύγονται και τυχόν προσκρούσεις (Haghsefat and Tingting, 2020). Υπάρχουν πλέον και αισθητήρες για διακοπές στο νήμα.

Φράξιμο ακροφυσίου

Τα υλικά ABS και PLA μπορούν να εξωθούνται ομαλά από το ακροφύσιο σε λιωμένη κατάσταση, όποτε έχουν καλύτερη ρευστότητα, αλλά διαθέτουν συγκεκριμένη πρόσφυση και ολκιμότητα. Η ρύθμιση του εξωθητή 3D εκτυπωτή σε λάθος θερμοκρασία μπορεί επίσης να οδηγήσει σε εμφράξεις. Από τη μία πλευρά, εάν η θερμοκρασία του ακροφυσίου είναι πολύ χαμηλή, το νήμα δεν θα λιώσει σωστά, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε συσσώρευση υλικού και πίεση στο εσωτερικό του ακροφυσίου. Από την άλλη πλευρά, εάν η θερμοκρασία εκτύπωσης είναι πολύ υψηλή, μπορεί να οδηγήσει σε ένα φαινόμενο που ονομάζεται ερπυσμός θερμότητας. Αυτό συμβαίνει όταν η θερμότητα από το ακροφύσιο επεκτείνεται μακρύτερα στον μηχανισμό εξώθησης, ο οποίος αρχίζει να λιώνει το νήμα πριν φτάσει στο θερμό άκρο. Εάν συμβεί αυτό, τα γρανάζια εξώθησης του τρισδιάστατου εκτυπωτή δεν θα είναι σε θέση να προωθήσουν σωστά το νήμα, οδηγώντας σε εμπλοκές (Boissonneault, 2022). Μια άλλη αιτία εμπλοκής ακροφυσίων είναι ο μη καθαρισμός του μεταξύ των μεταβάσεων υλικών. Λόγου χάριν, αν έχει προηγηθεί μια εκτύπωση ενός τρισδιάστατου μοντέλου από PLA και στη συνέχεια χρειάζεται να γίνει σε ABS, θα πρέπει πάντα να καθαρίζεται το ακροφύσιο ενδιάμεσα. Επιπρόσθετα, μία άλλη αιτία φραγής είναι τα σωματίδια σκόνης ή βρωμιάς που υπάρχουν στο περιβάλλον εκτύπωσης και μπορεί να κολλήσουν στο νήμα, εάν δεν αποθηκεύεται σωστά. Τα σωματίδια αυτά μεταφέρονται στη συνέχεια στο ακροφύσιο καθώς το νήμα τροφοδοτείται σε αυτό και εν τέλει καίγονται προκαλώντας συσσώρευση απανθρακωμένου υλικού και φράξιμο. Αυτός, επίσης, είναι ένας κίνδυνος εάν ο ίδιος ο εκτυπωτής 3D βρίσκεται σε ένα περιβάλλον με αρκετή σκόνη.

Υπάρχουν μερικές τεχνικές για τον καθαρισμό του ακροφυσίου μεταξύ των αλλαγών νήματος για την απομάκρυνση των υπολειμμάτων, οι οποίες παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω:

Τρίψιμο με ορειγάλκινη συρμάτινη βούρτσα: για να γίνει αποτελεσματικότερη η μέθοδος πρέπει πρώτα να θερμανθεί το ακροφύσιο πριν χρησιμοποιηθεί η βούρτσα, ώστε το νήμα να αφαιρεθεί ευκολότερα. Ακόμη, τα υπολείμματα νήματος μπορούν να καθαριστούν χρησιμοποιώντας ένα μαντηλάκι με οινόπνευμα.

Ακετόνη: μια συνηθισμένη μέθοδος για τον καθαρισμό του ακροφυσίου είναι η χρήση ενός διαλύτη όπως η ακετόνη. Ειδικά για το πολυμερές ABS η χρήση ακετόνης είναι πιο αποτελεσματική. Το PLA, από την πλευρά του, μπορεί να διαλυθεί χρησιμοποιώντας οξικό αιθυλεστέρα. Με αυτή τη μέθοδο, απλά το ακροφύσιο βυθίζεται στην ακετόνη ή το διαλύτη για μερικές ώρες. Στη συνέχεια θα είναι εύκολο να αφαιρεθεί ό,τι έχει απομείνει από τα σωματίδια νήματος που προκάλεσαν την απόφραξη.



Σχήμα 4.5: Φραγμένο ακροφύσιο από υψηλή θερμοκρασία ή μολυσμένο πολυμερές(σχήμα από Tess Boissonneault, 2022)

Κεφάλαιο 5

Εκτέλεση της Τρισδιάστατης Εκτύπωσης

Αφού στο Κεφάλαιο 4 έγινε ανάλυση των μεθόδων εκτύπωσης και των υλικών που χρησιμοποιούνται γι' αυτήν, σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εκτύπωσης, καθώς και οι απαραίτητες ρυθμίσεις που πραγματοποιήθηκαν στο πρόγραμμα του Ultimaker Cura 5.4.0, για την ορθή παραγωγή του μοντέλου, από τον εκτυπωτή Ultimaker S5.

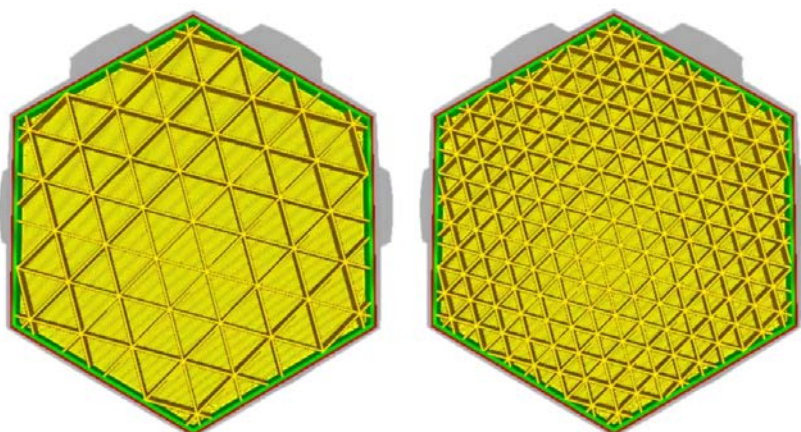
5.1 Χαρακτηριστικά του τρισδιάστατου εκτυπωτή Ultimaker S5

Πρόκειται για τον πιο προηγμένο τρισδιάστατο εκτυπωτή της εταιρείας Ultimaker, ο οποίος διαθέτει διπλή εξώθηση και μεγάλο όγκο κατασκευής, με βάση διαστάσεων 330 x 240 x 300 mm (13 x 9,5 x 11,8 ίντσες), αυξάνοντας έτσι το εύρος των πιθανών εφαρμογών του. Μάλιστα, η πλατφόρμα εκτύπωσης, πέρα από σπάνιες περιπτώσεις, δεν χρειάζεται χειροκίνητη οριζοντίωση. Ακόμη, το μηχάνημα είναι εξοπλισμένο με γυάλινες πόρτες, αυξάνοντας τη σταθερότητα της θερμοκρασίας, εσωτερικά του θαλάμου κατασκευής. Είναι σημαντικό να σημειωθεί πως ο αισθητήρας νήματος που διαθέτει ανιχνεύει τότε τελειώνει το νήμα και διακόπτει αυτόματα την εργασία εκτύπωσης, απαλλάσσοντας έτσι, τον χρήστη από τον έλεγχο πολύωρων εκτυπώσεων. Επιπρόσθετα, ο εκτυπωτής Ultimaker S5, μπορεί να υποστηρίξει μια μεγάλη ποικιλία υλικών της δικής μάρκας ή και διαφορετικής όπως: Tough PLA, PLA, Nylon, ABS, CPE, CPE+, Polycarbonate, TPU 95A, Polypropylene, PVA και Breakaway. Μπορεί να καταναλώσει οποιαδήποτε από το παραπάνω διαμέτρου μέχρι και 2,85 mm, ενώ η θερμοκρασία εξώθησης φτάνει μέχρι και τους 280 C. Για την εκτύπωση της χαρτογραφικής απόδοσης του υπομετρικού ανάγλυφου χρησιμοποιήθηκε PLA πολυμερές (ανάλυση ιδιοτήτων Κεφάλαιο 3) (3DUNIVERSE, 2023).

5.2 Ανάλυση των παραμέτρων των ρυθμίσεων εκτύπωσης της εφαρμογής UltiMaker Cura 5.4.0

Infill

Infill density: η πυκνότητα πλήρωσης καθορίζει την ποσότητα του πλαστικού που χρησιμοποιείται στο εσωτερικό της εκτύπωσης. Μια υψηλότερη πυκνότητα πλήρωσης σημαίνει ότι υπάρχει περισσότερο πλαστικό στο εσωτερικό του μοντέλου που προορίζεται για εκτύπωση, οδηγώντας σε ένα ανθεκτικότερο αντικείμενο. Μια πυκνότητα πλήρωσης γύρω στο 10-20% χρησιμοποιείται για μοντέλα με οπτικό σκοπό, ενώ υψηλότερες πυκνότητες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εξαρτήματα τελικής χρήσης (Ultimaker, 2022).



Σχήμα 5.1: Το μοντέλο αριστερά έχει μεγαλύτερη πυκνότητα πλήρωσης από το μοντέλο δεξιά (σχήμα από Ultimaker, 2022)

Για το μοντέλο του υψομετρικού ανάγλυφου η τιμή που χρησιμοποιήθηκε στη μεταβλητή Infill Density είναι 10%.

Infill Line Distance: αυτή η μεταβλητή ρυθμίζει την απόσταση κάθε γραμμής πλήρωσης και ουσιαστικά έχει την ίδια επίδραση με τη πυκνότητα πλήρωσης, όσον αφορά την ανθεκτικότητα του μοντέλου. Η τιμή που ορίστηκε ήταν 12 mm.

Infill pattern: μέσω του λογισμικού Ultimaker Cura, υπάρχει η δυνατότητα αλλαγής του μοτίβου της εκτυπωμένης δομής πλήρωσης, πράγμα που μπορεί να φανεί χρήσιμο σε κάποιες περιπτώσεις χρήσεις. Λόγου χάριν:

Strong 2D infills (Ισχυρές πληρώσεις 2D): Χρησιμοποιούνται για καθημερινές εκτυπώσεις.

Quick 2D infills (Γρήγορες πληρώσεις 2D): Χρησιμοποιούνται για γρήγορα αλλά αδύναμα μοντέλα

3D infills (Τρισδιάστατες πληρώσεις): Καθιστούν το αντικείμενο εξίσου ισχυρό προς όλες τις κατευθύνσεις.

3D concentric infills (Τρισδιάστατες ομόκεντρες πληρώσεις): Χρησιμοποιούνται για εύκαμπτα υλικά.

Κάθε επιλογή μοτίβου από της παρακάτω, αντιστοιχεί και για ένα από το παραπάνω είδη χρήσης που αναλύθηκαν προηγουμένως.

Grid: Strong 2D infill

Lines: Quick 2D infill

Triangles: Strong 2D infill

Tri-hexagon: Strong 2D infill

Cubic: Strong 3D infill

Cubic (subdivision): Strong 3D infill (εξοικονομεί υλικό σε σχέση με το Cubic)

Octet: Strong 3D infill

Quarter cubic: Strong 3D infill

Concentric: Flexible 3D infill

Zig-zag: Μια πλήρωση σε σχήμα πλέγματος, με συνεχή εκτύπωση σε μια διαγώνια κατεύθυνση

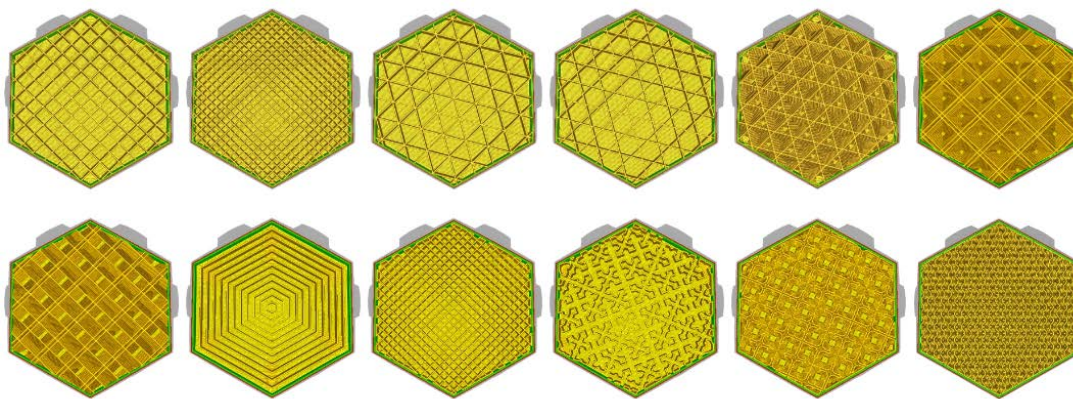
Cross: Flexible 3D infill

Cross 3D: Flexible 3D infill

Gyroid infill: Πλήρωση με αυξημένη αντοχή για το χαμηλότερο βάρος

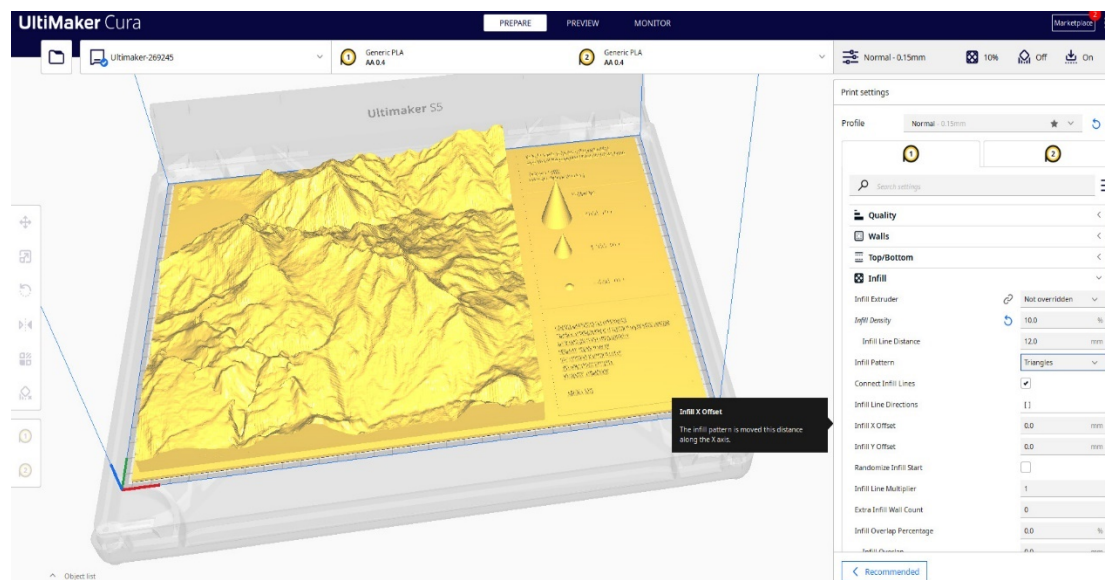
Lightning: Πλήρωση που εκτυπώνεται εξαιρετικά γρήγορα και υποστηρίζει μόνο τις άνω επιφάνειες.

Το μοτίβο που επιλέχθηκε ήταν το Triangles. Σε όλες τις υπόλοιπες μεταβλητές, δεν πραγματοποιήθηκε κάποια αλλαγή και χρησιμοποιήθηκαν οι προεπιλογές του λογισμικού Ultimaker Cura 5.4.0.



Σχήμα 5.2: Το μοτίβο πλήρωσης σύμφωνα με τη σειρά της παραπάνω λίστας (σχήμα από Ultimaker, 2022)

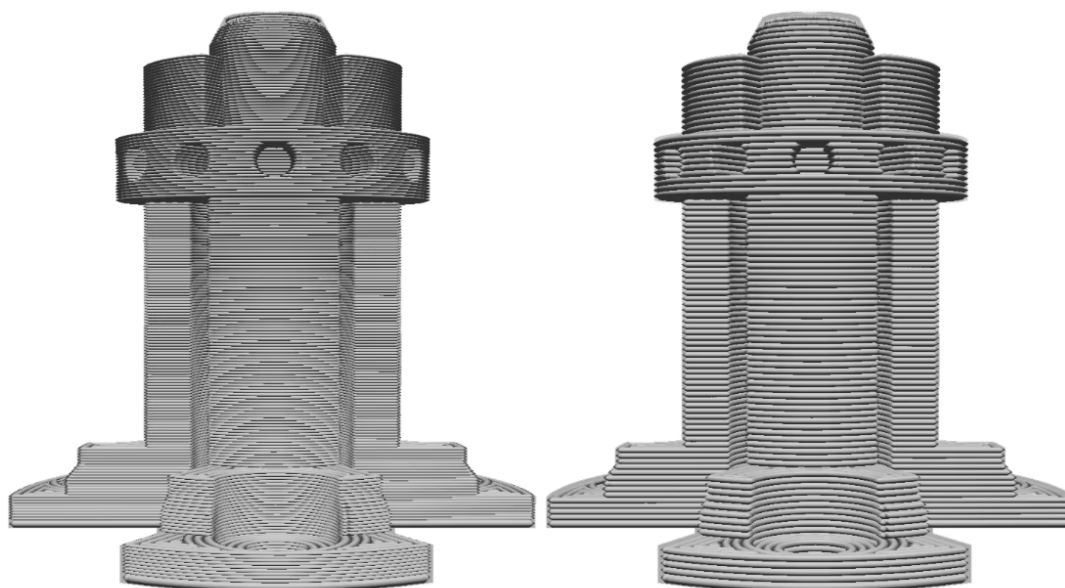
Στη παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται όλες οι ρυθμίσεις που πραγματοποιήθηκαν στη κατηγορία infill.



Σχήμα 5.3: Οι τιμές που επιλέχθηκαν για τις μεταβλητές της κατηγορίας Infill.

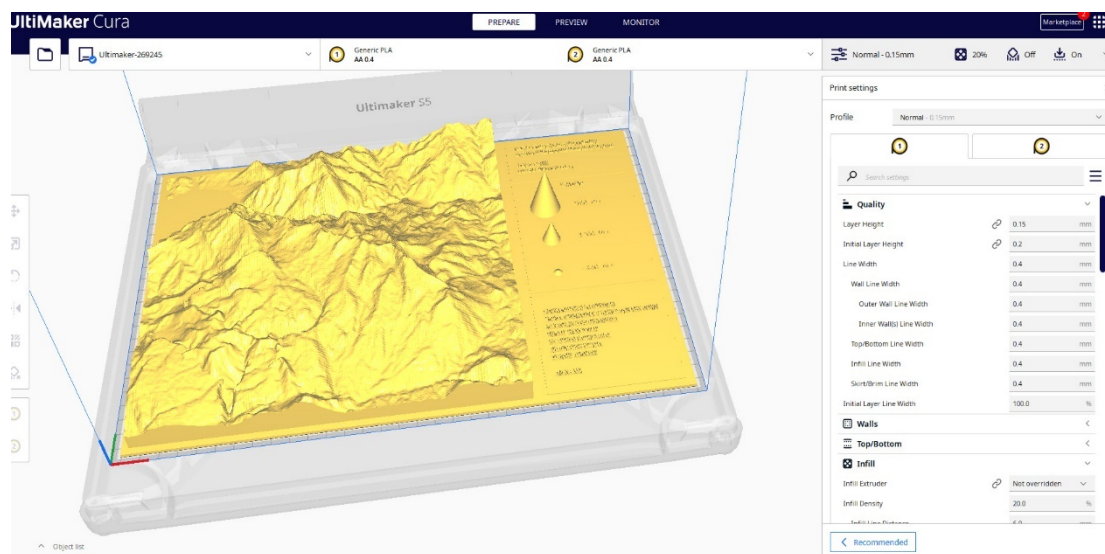
Quality

Layer Height: το ύψος στρώματος είναι το πάχος ενός εκτυπωμένου στρώματος σε χιλιοστά και πρόκειται μια από τις πιο συχνά μεταβαλλόμενες ρυθμίσεις. Συνήθως, τα λεπτότερα στρώματα αυξάνουν την οπτική ποιότητα, δίνουν μια πιο ομαλή επιφάνεια και προσφέρουν περισσότερες λεπτομέρειες. Στον αντίποδα, τα παχύτερα στρώματα μειώνουν σημαντικά τον χρόνο εκτύπωσης, ενώ μπορούν να προσφέρουν και καλύτερης ποιότητας προεξοχές (Ultimaker, 2023). Σε αυτή τη περίπτωση το ύψος στρώματος ρυθμίστηκε 0.15 mm.



Σχήμα 5.4: Το μοντέλο στα αριστερά έχει μικρότερο ύψος στρώματος από το μοντέλο στα δεξιά (σχήμα από Ultimaker, 2023)

Οι τιμές στις υπόλοιπες ρυθμίσεις είναι προεπιλογές του λογισμικού του Ultimaker Cura 5.4.0.



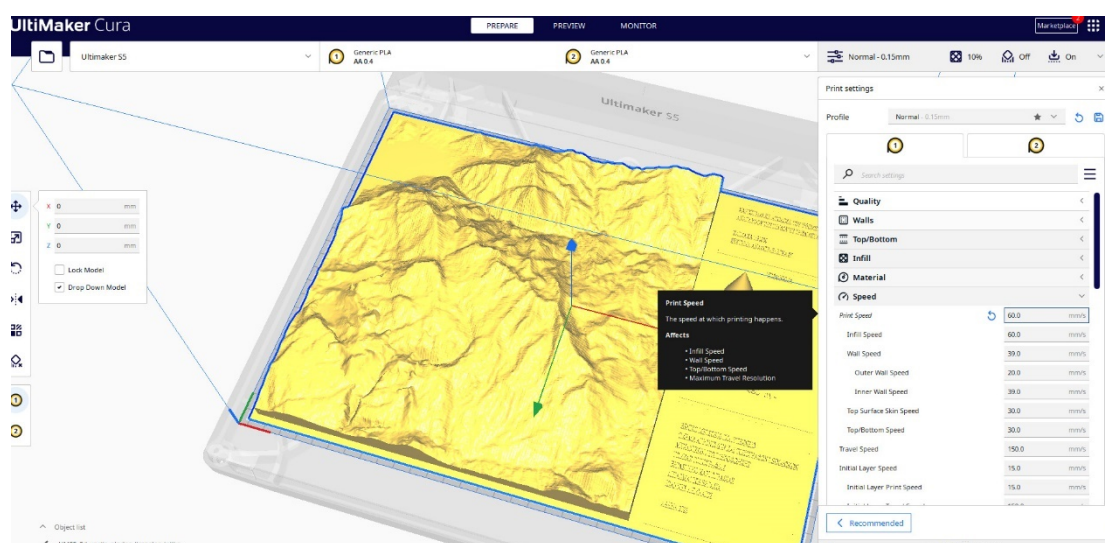
Σχήμα 5.5: Οι τιμές που επιλέχθηκαν για τις μεταβλητές της κατηγορίας Quality

Speed

Print speed: η ταχύτητα εκτύπωσης καθορίζει την ταχύτητα (σε mm/s) με την οποία κινείται η κεφαλή εκτύπωσης κατά την εκτύπωση. Με βάση αυτήν την ρύθμιση, το Ultimaker Cura υπολογίζει τη ροή εξώθησης. Μια υψηλότερη ταχύτητα εκτύπωσης οδηγεί σε μικρότερο χρόνο εκτύπωσης. Είναι σημαντικό να αναφερθεί, πως σε περίπτωση

αύξησης της ταχύτητας, ίσως είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθεί και αύξηση της θερμοκρασίας για να διασφαλιστεί ότι το νήμα λιώνει σωστά. Ακόμη, παρόλο που υπάρχει η δυνατότητα για την επιλογή μιας συνολικής ταχύτητας εκτύπωσης για την πλήρη εκτύπωση, είναι επίσης δυνατή η χρήση διαφορετικών ταχυτήτων εκτύπωσης για συγκεκριμένα τμήματα αυτής (Ultimaker, 2022). Η τιμή που επιλέχθηκε στη συγκεκριμένη μεταβλητή είναι 60 mm/s.

Οι τιμές στις υπόλοιπες ρυθμίσεις είναι προεπιλογές του λογισμικού του Ultimaker Cura 5.4.0 και ρυθμίζονται αυτόματα από το πρόγραμμα όταν ορίσω την μεταβλητή print speed.



Σχήμα 5.6: Οι τιμές που επιλέχθηκαν για τις μεταβλητές της κατηγορίας Speed

Build plate adhesion

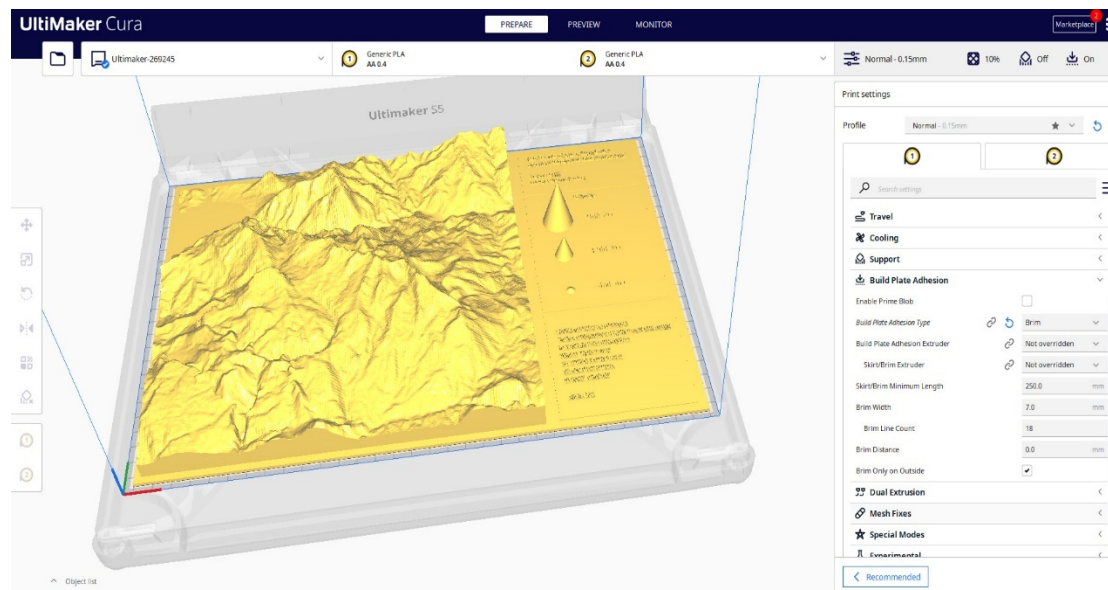
Build Plate Adhesion Type: υπάρχουν τρεις τύποι πρόσφυσης κατασκευής και αυτοί είναι οι εξής: Brim, Skirt και Raft.

Σε αυτή την περίπτωση ο τύπος που επιλέχθηκε ήταν το Brim. Με την επιλογή αυτή προστίθεται μια επίπεδη περιοχή ενός στρώματος γύρω από τη βάση του μοντέλου για να αποτραπούν τυχόν παραμορφώσεις. Η περιοχή αυτή είναι συνδεδεμένη με το μοντέλο και μεγαλώνει την περιοχή της κάτω επιφάνειας. Το σημαντικότερο, όμως, είναι πως αυξάνεται η πρόσφυση στην πλάκα κατασκευής και, έτσι σε περίπτωση στρέβλωσης οι γωνίες του μοντέλου είναι λιγότερο πιθανό να παραμορφωθούν, λόγω της «φόρμας» που είναι συνδεδεμένη σε αυτό (Ultimaker, 2023).

Skirt/Brim Minimum Length: είναι το μήκος σε χιλιοστά (mm), της ποσότητας νήματος που εξωθείται για τη δημιουργία τους στρώματος. Επιλέχθηκε η τιμή 250 mm.

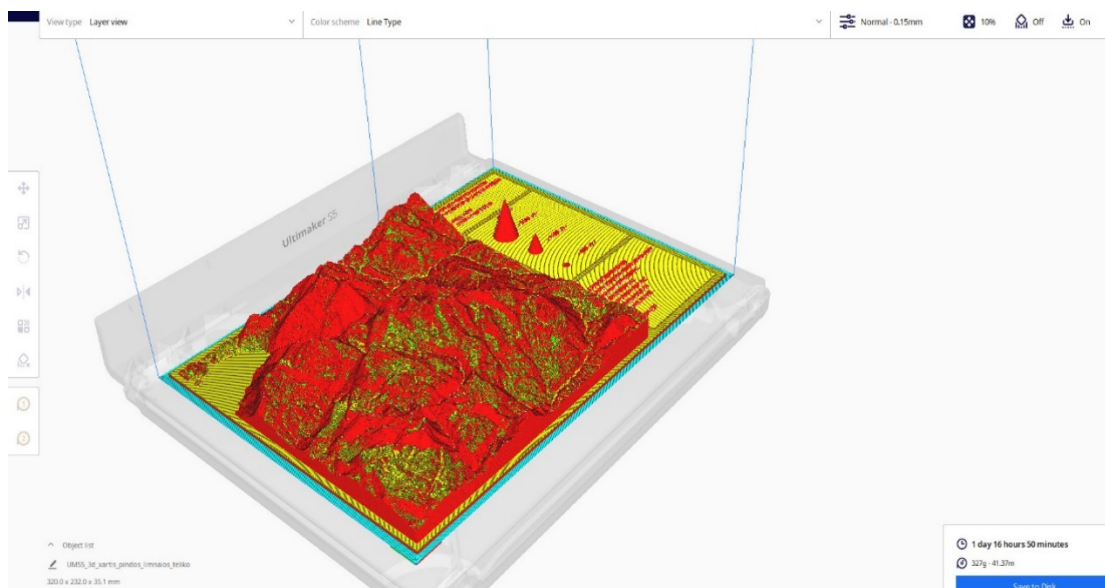
Brim Width: με αυτή την επιλογή καθορίζεται το πλάτος του στρώματος σε χιλιοστά (mm). Επιλέχθηκε η τιμή 7 mm.

Brim Line Count: το πλάτος του στρώματος σε πλήθος γραμμών. Ρυθμίστηκε στις 18 γραμμές.



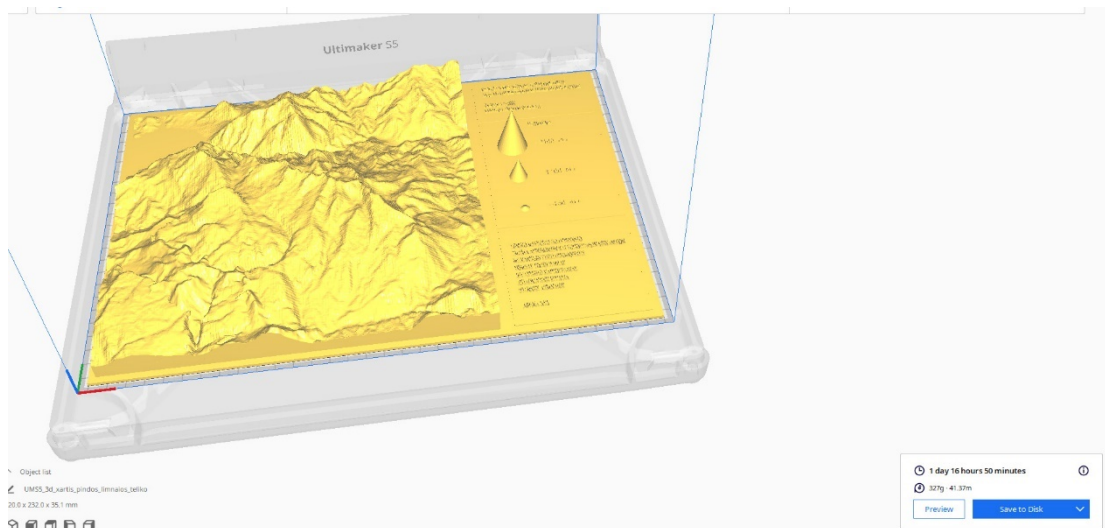
Σχήμα 5.7: Οι τιμές που επιλέχθηκαν για τις μεταβλητές της κατηγορίας *Build Plate Adhesion*

Αφού πραγματοποιήθηκαν οι απαραίτητες ρυθμίσεις στο λογισμικό του Ultimaker Cura 5.4.0, το επόμενο στάδιο ήταν ο τεμαχισμός (Slice), του μοντέλου. Ουσιαστικά με αυτή τη λειτουργία το πρόγραμμα διαχωρίζει το τρισδιάστατο μοντέλο σε λεπτά οριζόντια στρώματα, που μπορεί να κατανοήσει ο τρισδιάστατος εκτυπωτής. Κάθε στρώμα είναι μια διατομή του τρισδιάστατου μοντέλου.



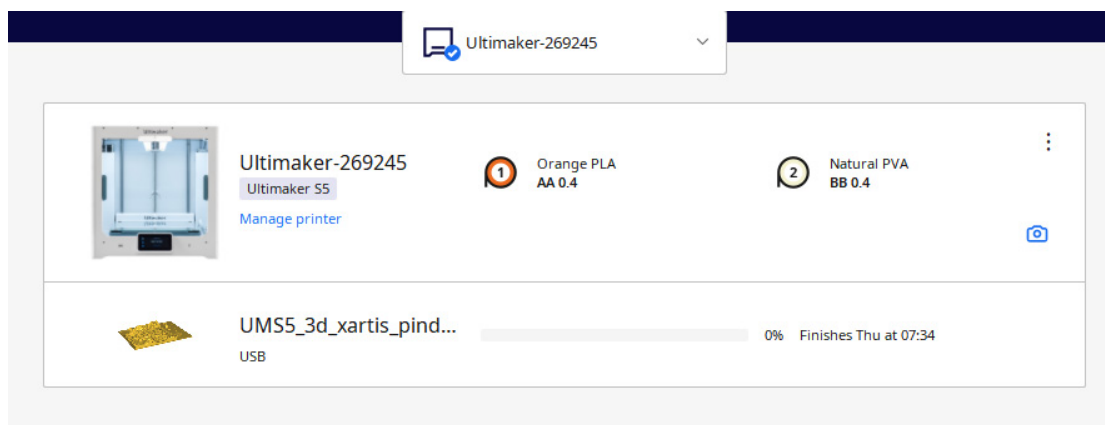
Σχήμα 5.8: Ο τεμαχισμός (slice) του μοντέλου

Αφού πραγματοποιηθεί η διαδικασία του τεμαχισμού το λογισμικό ενημερώνει τον χρήστη, για τον εκτιμώμενο χρόνο εκτύπωσης, καθώς και για το μήκος και βάρος του νήματος που θα χρειαστεί. Σε αυτή τη περίπτωση, ο χρόνος είναι μία (1) ημέρα, δεκαέξι ώρες (16) και πενήντα (50) λεπτά. Το βάρος του νήματος που απαιτείται είναι 327 g και το μήκος του 41.37 m.



Σχήμα 5.9: Ο χρόνος και η ποσότητα του υλικού που απαιτείται για την εκτύπωση

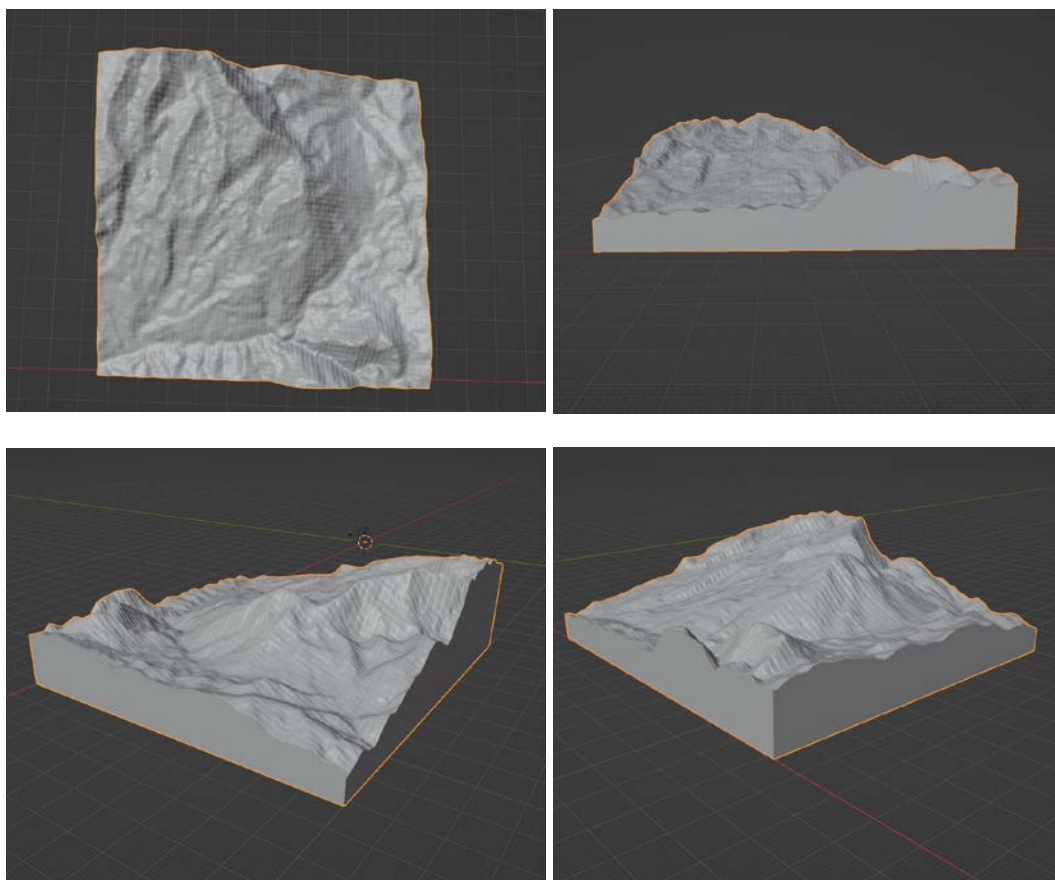
Τέλος στη παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η διαδικασία εκτύπωσης, η οποία είναι ακόμη σε αρχικό στάδιο (0%), ενώ το πρόγραμμα ενημερώνει για την ώρα και τη μέρα ολοκλήρωσης της εκτύπωσης.



Σχήμα 5.10: Η έναρξη της διαδικασίας εκτύπωσης του τρισδιάστατου χάρτη

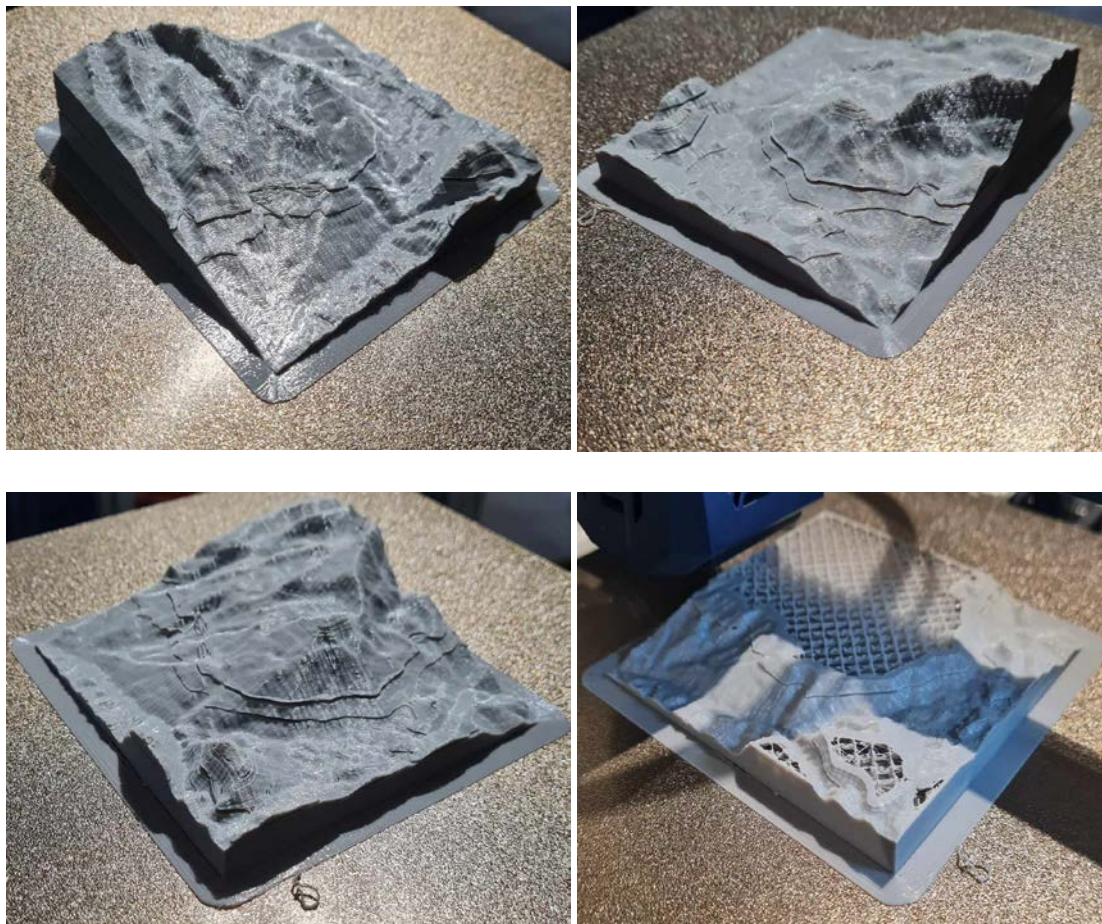
5.3 Παραγωγή δοκιμαστικού μοντέλου

Πριν πραγματοποιηθεί η τελική εκτύπωση του μοντέλου αποφασίστηκε να γίνει η περικοπή ενός τμήματος του χάρτη που περιλαμβάνει το ανάγλυφο, ώστε να γίνει μια δοκιμαστική εκτύπωση. Επομένως, επιλέχθηκε μια τυχαία περιοχή στο ανάγλυφο η οποία κάλυπτε το 1/4 της αρχικής. Για την περικοπή του κομματιού αυτού, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό του Blender. Το αποτέλεσμα που προέκυψε είναι το παρακάτω.



Σχήμα 5.11: Το δοκίμιο που επιλέχθηκε για εκτύπωση, από διάφορες οπτικές γωνίες

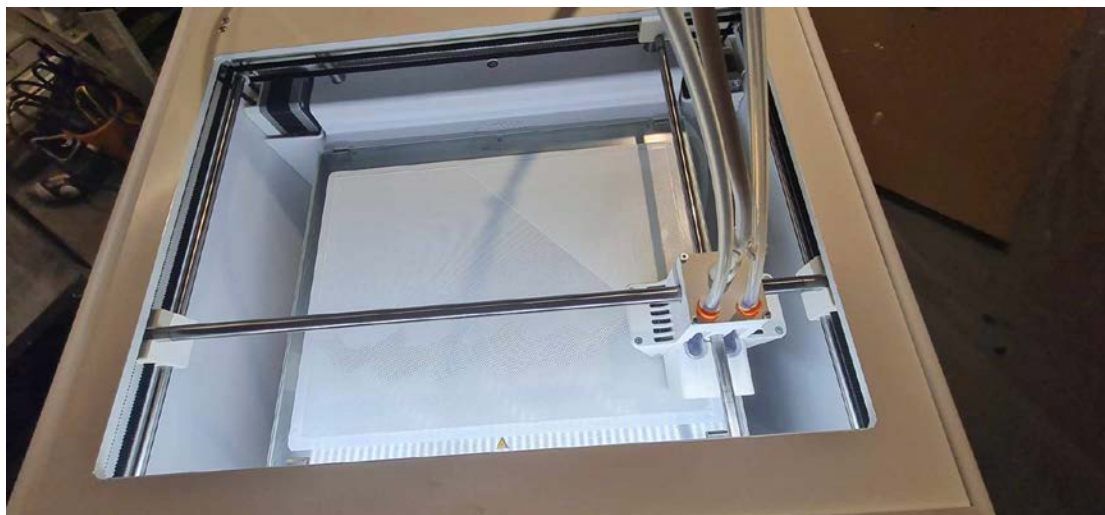
Οι ρυθμίσεις που έγιναν για την εκτύπωση του, ήταν οι ίδιες με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν για ολόκληρο το μοντέλο στο λογισμικό του Ultimaker Cura. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες.



Σχήμα 5.12: Η τρισδιάστατη εκτύπωση του δοκιμίου

5.4 Αποτελέσματα τελικής εκτύπωσης

Αφού πραγματοποιήθηκε η εκτύπωση του δοκιμίου, πραγματοποιήθηκε η εκτύπωση του τελικού χάρτη του υψομετρικού ανάγλυφου. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η εκτύπωση έγινε στον εκτυπωτή Ultimaker S5, με τη μέθοδο εκτύπωσης FDM, ενώ, το υλικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν το PLA άσπρου χρώματος. Παρακάτω παρουσιάζονται οι εικόνες με όλη την διαδικασία της εκτύπωσης, από την αρχή της, που είναι η κατασκευή της βάσης, όπου θα τοποθετηθεί το ανάγλυφο και τα στοιχεία πλαισίου, μέχρι τον τελικό χάρτη, του οποίου η εικόνα ήταν πολύ ικανοποιητική.



Σχήμα 5.13: Η κατασκευή της τρισδιάστατης βάσης του χάρτη υψομετρική ανάγλυφου στον Ultimaker S5



Σχήμα 5.14: Η κατασκευή της τρισδιάστατης βάσης του χάρτη υψομετρική ανάγλυφου στον Ultimaker S5 από πλάγια λήψη.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η μέθοδος εκτύπωσης FDM, κατασκευάζει το μοντέλο με στρώσεις πλαστικού, οι οποίες κολλάνε η μία πάνω στην άλλη (layer by layer). Όπως παρατηρείται ο Ultimaker S5 κατά την έναρξη της εκτύπωσης, σηκώνει την πλατφόρμα εκτύπωσης μέχρι το ύψος του ακροφύσιου, από το οποίο εξωθείται το λιωμένο πολυμερές και στη συνέχεια, αφού πραγματοποιήσει τη πρώτη στρώση πλαστικού, μειώνει το ύψος της πλατφόρμας κατά 0.15 mm, ώστε να πραγματοποιηθεί η επόμενη στρώση. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται, μέχρι να ολοκληρωθεί η εκτύπωση του χάρτη.

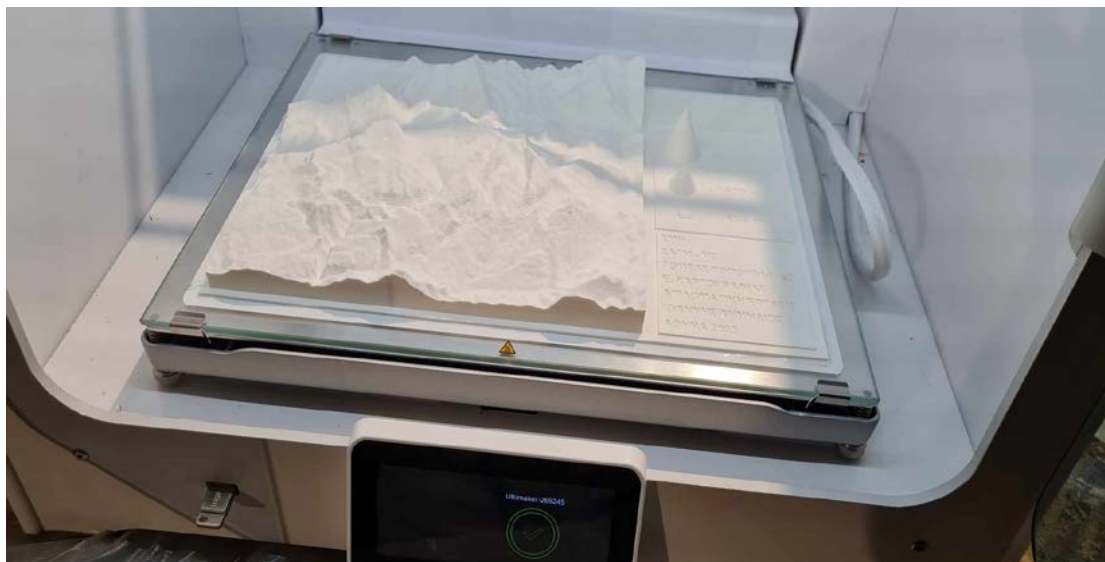


Σχήμα 5.15: Στάδιο από τη κατασκευή του τρισδιάστατου μοντέλου του υψομετρικού ανάγλυφου στον Ultimaker S5.



Σχήμα 5.16: Στάδιο από τη κατασκευή του τρισδιάστατου μοντέλου του υψομετρικού ανάγλυφου στον Ultimaker S5 από πλάγια όψη.

Στις παραπάνω εικόνες παρουσιάζεται το εσωτερικό του τρισδιάστατου ανάγλυφου, το οποίο όπως φαίνεται δεν είναι συμπαγές, αλλά αποτελείται από πολλά τρισδιάστατα τρίγωνα, λόγω του μοτίβου Triangles που επιλέχθηκε για τη πλήρωση του, στη παράγραφο 5.2.



Σχήμα 5.17: Ο τρισδιάστατα εκτυπωμένος χάρτης της απόδοσης του υψομετρικού ανάγλυφου της οροσειράς της Πίνδου στη τελική του μορφή στον Ultimaker S5



Σχήμα 5.18: Ο τρισδιάστατα εκτυπωμένος χάρτης της απόδοσης του υψομετρικού ανάγλυφου της οροσειράς της Πίνδου στη τελική του μορφή.

Το αποτέλεσμα είναι κάτι παραπάνω από ικανοποιητικό. Όπως παρατηρούμε όλα τα στοιχεία που προστέθηκαν στον χάρτη από το λογισμικό του Blender, έχουν εκτυπωθεί με πολύ μεγάλη επιτυχία, αφού τα γράμματα τόσο του τίτλου όσο και υπόλοιπων στοιχείων των πινακίδων, τα οποία επιλέχθηκαν να είναι τελικά χαραγμένα στη βάση και όχι ανάγλυφα (δίνεται εξήγηση στη παράγραφο 6.7), είναι πολύ ευανάγνωστα και ευδιάκριτα. Το τρισδιάστατο υπόμνημα με τους κώνους, όπου είχαν σχεδιαστεί να είναι ο καθένας από αυτούς, περίπου στο ίδιο ύψος με το μεγαλύτερο, το μέσο και μικρότερο υψόμετρο της

οροσειράς αντίστοιχα έχουν εκτυπωθεί ακριβώς όπως έπρεπε, αλλά και το ίδιο το ανάγλυφο της οροσειράς βλέπουμε ότι αποτελεί μια πολύ καλή προσομοίωση του πραγματικού γεωγραφικού χώρου, που ήταν και ένας από τους σημαντικότερους στόχους της εργασίας.



Σχήμα 5.19: Ο τρισδιάστατα εκτυπωμένος χάρτης της απόδοσης του υψομετρικού ανάγλυφου της οροσειράς της Πίνδου στη τελική του μορφή



Σχήμα 5.20: Ο τρισδιάστατα εκτυπωμένος χάρτης της απόδοσης του υψομετρικού ανάγλυφου της οροσειράς της Πίνδου στη τελική του μορφή από πλάγια λήψη

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα

Τα βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα εργασία σχετίζονται με:

- την ύπαρξη του εργαλείου DEM to 3D του λογισμικού του QGIS 3.22.11 το οποίο δημιουργεί αρχεία STL, ωστόσο, αυτά δεν διαθέτουν όλα τα απαραίτητα στοιχεία ενός χάρτη.
- το λογισμικό του Blender, το οποίο παρουσιάζει μετρητικά προβλήματα, ενώ δεν διαθέτει έτοιμα χαρτογραφικά σύμβολα.
- το αρχείο STL, όπως έχει διαμορφωθεί στο Blender, χρειάζεται επιπρόσθετη επεξεργασία στο λογισμικό Ultimaker Cura 5.4.0.
- τα αποτελέσματα εκτύπωσης της μεθόδου FDM, αλλά και της χρήσης του υλικού PLA
- την αξιολόγηση του δοκιμίου που προέκυψε από την τρισδιάστατη εκτύπωση.
- την ισοδιάσταση σύμφωνα με την οποία έχει εκτυπωθεί το ανάγλυφο
- τις αστοχίες στη κατασκευή του υπομνήματος κατά τη πρώτη εκτύπωση
- την σύγκριση ενός χάρτη ανάγλυφου τρισδιάστατης μορφής και ενός κλασσικού χάρτη ορθής προβολής εκτυπωμένο στο χαρτί

6.1 Έλλειψη χαρτογραφικών στοιχείων στα STL που έχουν παραχθεί από το DEM to 3D του QGIS 3.22.11

Ένα από τα μεγάλα ζητήματα της διπλωματικής εργασίας, ήταν αν το λογισμικό του QGIS, έχει τη δυνατότητα να δημιουργήσει ένα δικό του αρχείο STL, χωρίς να χρησιμοποιηθεί κάποιο άλλο πρόγραμμα για την παραγωγή του. Δηλαδή, μέρος της έρευνας ήταν, αν στο QGIS, υπήρχε μόνο η δυνατότητα απεικόνισης και περαιτέρω επεξεργασίας του υψομετρικού μοντέλου (DSM) ή αν υπήρχε και η δυνατότητα παραγωγής κάποιου αρχείου STL. Όπως αποδείχθηκε είναι δυνατή η παραγωγή αρχείου STL από το QGIS, με τη βοήθεια του εργαλείου DEM to 3D. Ωστόσο, το εργαλείο αυτό μπορεί να δημιουργήσει STL, το οποίο απεικονίζει μόνο την υψομετρική πληροφορία του ανάγλυφου, χωρίς τα απαραίτητα στοιχεία ενός χάρτη, όπως κλίμακα, τίτλος, υπόμνημα και στοιχεία του συντάκτη, ημερομηνία κατασκευής κλπ. Επομένως, θα ήταν πολύ

βοηθητικό να σχεδιαστεί ένα εργαλείο (plugin) στο QGIS, το οποίο θα μπορεί να δημιουργήσει ένα αρχείο STL με όλα τα στοιχεία του χάρτη (τόσο το περιεχόμενο που αφορά την υψομετρική πληροφορία, όσο και τα στοιχεία πλαισίου) και όχι μόνο το ανάγλυφο, όπως συμβαίνει στη προκειμένη περίπτωση.

6.2 Ύπαρξη μετρητικών προβλημάτων στο λογισμικό Blender 3.6 και έλλειψη χαρτογραφικών συμβόλων

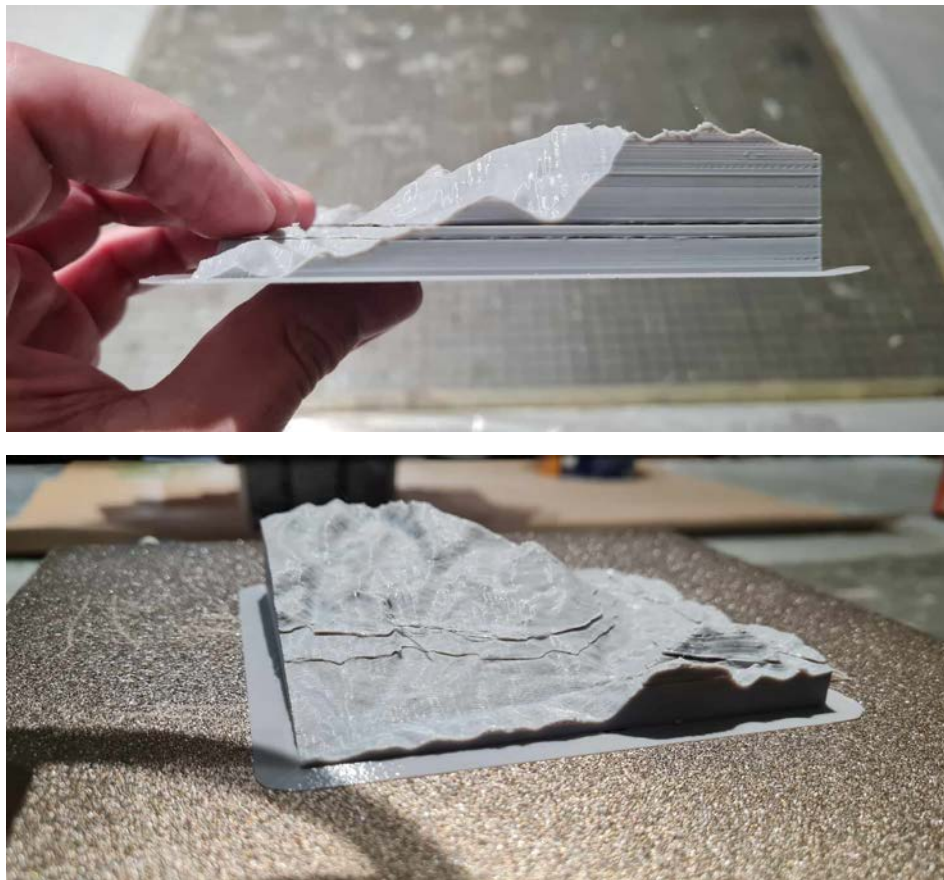
Όπως αναφέρθηκε στη παράγραφο 6.1 στο λογισμικό του QGIS 3.22.11 δεν ήταν δυνατή η δημιουργία του απαραίτητου υπομνήματος, οπότε έγινε χρήση του Blender 3.6. Ωστόσο, ανάμεσα σε αυτά τα δύο προγράμματα παρατηρήθηκε αναντιστοιχία στις μονάδες μέτρησης των αντικειμένων. Πιο συγκεκριμένα, οι μονάδες μέτρησης σύμφωνα με τις οποίες έγινε η εξαγωγή του αρχείου STL, από το QGIS, τόσο για το μήκος του, όσο για το πλάτος του και το ύψος του, ήταν σε χιλιοστά (mm). Ωστόσο, με τη μεταφορά του μοντέλου στο Blender παρατηρήθηκε ότι οι μονάδες που χρησιμοποιούσε δεν ήταν οι ίδιες, αλλά δεν ήταν σαφές με ποιο είδος λειτουργούσε. Το εργαλείο Distance, με το οποίο υπήρχε η δυνατότητα μέτρησης αποστάσεων πάνω στο μοντέλο, οι μονάδες που χρησιμοποιούσε ήταν τα μέτρα (m), ωστόσο σε αυτή την περίπτωση δεν υπήρχε αντιστοιχία της μετρούμενης περιοχής στο Blender, με τις διαστάσεις της περιοχής σε μέτρα, στη πραγματικότητα. Επομένως, το γεγονός αυτό δυσκόλευε τη κατασκευή των υπόλοιπων στοιχείων του χάρτη, όπως τη βάση, όπου θα τοποθετούνταν πάνω το τρισδιάστατο ανάγλυφο της Πίνδου ή τους κώνους του υπομνήματος, αφού δεν υπήρχε ξεκάθαρο συμπέρασμα για τις διαστάσεις των αντικειμένων αυτών σε σχέση με το STL που παράχθηκε από το QGIS, αλλά και με τις διαστάσεις της πλατφόρμας εκτύπωσης του Ultimaker S5. Για την επίλυση του χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Ultimaker Cura 5.4.0, στο οποίο μπορούσε να γίνει αναπαράσταση του μοντέλου με τις πραγματικές συντεταγμένες. Ακόμη, ένα άλλο μειονέκτημα του Blender είναι η έλλειψη έτοιμων χαρτογραφικών συμβόλων, κυρίως για τη δημιουργία του υπομνήματος, της κλίμακας, του βορρά ή χρήσεων γης (κτήρια, δασικές περιοχές, ποτάμια κλπ.). Συνεπώς, ο κατασκευαστής του τρισδιάστατου χάρτη, πρέπει να δημιουργήσει τα σύμβολα αυτά μέσω, τρισδιάστατων γεωμετρικών σχημάτων, πράγμα που είναι πολύ δύσκολο και χρονοβόρο.

6.3 Επιπρόσθετη επεξεργασία του αρχείου STL του Blender, στο πρόγραμμα Ultimaker Cura 5.4.0.

Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 5 και ειδικότερα στην εκτύπωση του δοκιμίου που έγινε αρχικά αλλά και στον τελικού μοντέλου στη συνέχεια, το STL, όπως έχει διαμορφωθεί στο Blender, πριν εκτυπωθεί, είναι απαραίτητο να περάσει από το πρόγραμμα του Ultimaker Cura 5.4.0, για περαιτέρω επεξεργασία και για κάποιες πρόσθετες ρυθμίσεις, οι οποίες έχουν να κάνουν με τη ποιότητα εκτύπωσης, τη ταχύτητα εκτύπωσης, τη πυκνότητα πλήρωσης και το τύπο πρόσφυσης της κατασκευής.

6.4 Αξιολόγηση δοκιμίου που προέκυψε από τη τρισδιάστατη εκτύπωση

Η τρισδιάστατη εκτύπωση του ανάγλυφου του δοκιμίου, που πραγματοποιήθηκε πριν την τελική είναι ικανοποιητική. Το μόνο πρόβλημα που εντοπίστηκε είναι μία μικρή μετατόπιση στρώματος (layer shift) στο μέσο περίπου της εκτύπωσης, η οποία αντιμετωπίζεται με μείωση της ταχύτητας εκτύπωσης.



Σχήμα 6.1: Το σφάλμα της μετατόπισης στρώματος (layer shift), που παρουσιάστηκε στο δοκίμιο.

6.5 Ισοδιάσταση σύμφωνα με την οποία έχει εκτυπωθεί το μοντέλο

Από τη στιγμή που ο χάρτης είναι υπό κλίμακα 1:90000, τότε αν γίνει εκτύπωση με ανάλυση (ρύθμιση του Quality από Ultimaker Cura 5.4.0) 0.15 mm, τότε η ισοδιάσταση που προκύπτει είναι 13.5 m. Η τιμή αυτή προκύπτει επειδή, 1 mm αντιστοιχεί με 90000 mm δηλαδή 90 m. Άρα τα 0.15 mm αντιστοιχούν σε 13.5 m. Στη προκειμένη περίπτωση, η τιμή της ανάλυσης είναι ίδια με τη τιμή της ισοδιάστασης, αφού η ανάλυση μας δείχνει κατά πόσο ένα layer είναι πάνω από το προηγούμενο. Είναι σημαντικό να σημειωθεί, ότι η συγκεκριμένη ισοδιάσταση- ανάλυση είναι αρκετά ικανοποιητική, αφού το DSM που λήφθηκε από το Copernicus είχε χωρική ανάλυση ίση με 25 m, άρα $13.5\text{ m} < 25\text{ m}$, επομένως είναι εντός ορίων.

6.6 Αξιολόγηση μεθόδου εκτύπωσης FDM και υλικού PLA

Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 4 η μέθοδος τρισδιάστατης εκτύπωσης που χρησιμοποιήθηκε ήταν η FDM, η οποία είναι φθηνότερη από τις άλλες μεθόδους εκτύπωσης, όπως η SLS ή SLA. Ακόμη, τα υλικά κατασκευής για το συγκεκριμένο τύπο εκτύπωσης, έχουν μεγαλύτερη διαθεσιμότητα και είναι πιο προσιτά για τον χρήστη. Ακόμη, η σχετικά υψηλή ταχύτητα εκτύπωσης ήταν ένα ακόμη πλεονέκτημα της μεθόδου FDM, σε σχέση με τις άλλες μεθόδους, αφού, ο χρόνος που χρειάστηκε για να πραγματοποιηθεί η παραγωγή του μοντέλου, ήταν ικανοποιητικός, αν λάβουμε βέβαια υπόψιν τον όγκο και γενικότερα το μέγεθος του. Βέβαια υπήρχαν και κάποια μειονεκτήματα που αφορούσαν τη μέθοδο αυτή, όπως η τραχύτητα στην επιφάνεια του εκτυπωμένου μοντέλου. Η μέθοδος FDM δεν προσφέρει την ίδια ομαλότητα στο μοντέλο, που επιτυγχάνει οι μέθοδος SLS, και αυτό διότι ο τρόπος λειτουργίας της FDM, βασίζεται στη κατασκευή του προϊόντος με στρώσεις ή μία επάνω στην άλλη, με αποτέλεσμα να είναι εμφανή τα στρώματα και οι διακυμάνσεις στην επιφάνεια του προϊόντος.

Ακόμη, η εκτύπωση του μοντέλου με τη χρήση του υλικού PLA, ήταν αρκετά ικανοποιητική, αφού δεν υπήρχαν μεγάλες απαιτήσεις ως προς την ανθεκτικότητα του υλικού, για να αντέχει σε πιέσεις, χτυπήματα ή άλλες φθορές, ενώ παρατηρήθηκε και ευκολία κατά την εκτύπωση του.

6.7 Αστοχία στη κατασκευή του υπομνήματος κατά την πρώτη εκτύπωση

Πριν τη τελική εκτύπωση του προϊόντος πραγματοποιήθηκε, μια ακόμη η οποία εμφάνισε κάποιες αστοχίες στο υπόμνημα. Ειδικότερα, τα γράμματα που είχαν κατασκευαστεί στις πινακίδες του μοντέλου μέσω του λογισμικού του Blender 3.6, είχαν ανάγλυφη μορφή (embossed), ωστόσο, με την εκτύπωση του, το αποτέλεσμα δεν ήταν καθόλου ικανοποιητικό. Τα γράμματα ήταν πολύ μικρά, ώστε να μην μπορούν να διαβαστούν, αλλά και το σχήμα τους ήταν παραμορφωμένο. Επομένως, αποφασίστηκε να γίνει αλλαγή του τρόπου γραφής από ανάγλυφη σε χαραγμένη (engraved) και αλλαγή μεγέθους και τύπου γραμματοσειράς. Μετά από αυτές τις ενέργειες, το αποτέλεσμα ήταν πολύ ικανοποιητικό.



Σχήμα 6.2: Το νέο υπόμνημα με τη χαραγμένου τύπου (engraved) γραφή

6.8 Σύγκριση τρισδιάστατα εκτυπωμένου χάρτη ανάγλυφου και δισδιάστατου χάρτη

Η σύγκριση ενός τρισδιάστατα εκτυπωμένου χάρτη ανάγλυφου, με τον αντίστοιχο χάρτη σε δισδιάστατη μορφή μπορεί να γίνει σε αρκετούς τομείς, όπως η αναπαράσταση των λεπτομερειών, η προσβασιμότητα, η απόδοση χρωμάτων, το κόστος των υλικών και ο απαιτούμενος χρόνος εκτύπωσης.

Όσον αφορά το κομμάτι των λεπτομερειών, ένα τρισδιάστατο ανάγλυφο μπορεί να απεικονίσει με μεγάλη λεπτομέρεια τα χαρακτηριστικά ενός αντικειμένου, μέσω της υψής και του σχήματος, κατανοώντας καλύτερα, την υψομετρία και γενικότερα τη μορφολογία του εδάφους της περιοχής μελέτης. Από την άλλη, ένας δισδιάστατος χάρτης εκτυπωμένος σε χαρτί, αφαιρεί αυτή τη δυνατότητα από τον χρήστη.

Στο κομμάτι της προσβασιμότητας, όπως αναφέρθηκε και στο δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας, ένας τρισδιάστατος χάρτης ανάγλυφου, μπορεί να αποδειχθεί εύχρηστος και για άτομα με προβλήματα όρασης, καθώς με τη βοήθεια της αφής μπορούν να σχηματίσουν μια εικόνα για το πως μπορεί να είναι το ανάγλυφο στη περιοχή μελέτης, άλλα και την ακρίβεια στο υψόμετρα των βουνών, λόγω του τρισδιάστατου ανάγλυφου. Κάτι τέτοιο, είναι δύσκολο να συμβεί σε έναν χάρτη που έχει εκτυπωθεί στο χαρτί.

Η απόδοση των χρωμάτων είναι ένας ακόμη σημαντικός τομέας πάνω στον οποίο μπορεί να γίνει σύγκριση, αφού στον τρισδιάστατο εκτυπωμένο χάρτη, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί χρώμα, διότι, αυτός ο τύπος εκτύπωσης είναι μονοχρωματική διαδικασία, επομένως, η απόδοση των χαρακτηριστικών του ανάγλυφου εξαρτάται από την υφή και το σχήμα της επιφάνειας. Στον αντίποδα, στον δισδιάστατο χάρτη, το χρώμα είναι ένας σημαντικός παράγοντας αναπαράστασης της υψομετρίας και των χαρακτηριστικών του εδάφους, το οποίο μπορεί να αποδοθεί, μέσω λογισμικού GIS, εξοικονομώντας, έτσι, χρήματα για υλικά βαφής, όπου, θα χρειαστούν για τον χρωματισμό του τρισδιάστατου μοντέλου, ενώ μπορεί να αποφευχθεί η πιθανότητα απόκρυψης λεπτομερειών του ανάγλυφου με τη βαφή.

Ένας ακόμη, σημαντικός παράγοντας είναι ο υπολογισμός αποστάσεων σημείων του χάρτη, μέσω της κλίμακας. Πρόκειται για μια διαδικασία που μπορεί να γίνει εύκολα σε έναν δισδιάστατο χάρτη, λόγω της επίπεδης επιφάνειας του χαρτιού, ωστόσο, σε έναν τρισδιάστατο χάρτη ανάγλυφου, λόγω της κεκλιμένης επιφάνειας και της τραχύτητας της, είτε λόγω μικρών λεπτομερειών του ανάγλυφου, είτε λόγω των πολλαπλών στρώσεων που είναι η μία πάνω στην άλλη, κάνουν τη διαδικασία πολύ δύσκολη, έως και αδύνατη.

Στο κομμάτι, του κόστους και του χρόνου εκτύπωσης, όπως μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτό και στις δύο περιπτώσεις, η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι αυτή που υστερεί. Ειδικότερα, το κόστος των υλικών που χρειάζονται για να πραγματοποιηθεί μια τρισδιάστατη εκτύπωση είναι πολύ υψηλότερο από αυτό της εκτύπωσης ενός κλασσικού χάρτη ορθής προβολής, ενώ ο χρόνος εκτύπωσης στη τρισδιάστατη μορφή είναι κατά πολύ μεγαλύτερος (μπορεί να πάρει και μέρες), από τον αντίστοιχο της δισδιάστατης (χρειάζεται μερικά λεπτά). Αν κάποιος προσθέσει και τα σφάλματα που μπορεί να προκύψουν κατά τη τρισδιάστατη εκτύπωση, αφού η προετοιμασία του μοντέλου είναι μια αρκετά σύνθετη

διαδικασία, που εξαρτάται από αρκετά λογισμικά και ρυθμίσεις παραμέτρων, τότε αυτό μπορεί να κοστίζει ακόμα περισσότερο, τόσο σε χρήματα, όσο και σε χρόνο.

Η επιλογή μεταξύ του τρισδιάστατου μοντέλου ανάγλυφου και του κλασσικού χάρτη ορθής προβολής, εξαρτάται από τον σκοπό της απεικόνισης. Αν στόχος της παρουσίασης του αντικειμένου, είναι η λεπτομέρειες των υψών και της υφής του ανάγλυφου, τότε η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι η καλύτερη επιλογή, αφού ο χάρτης της μορφής αυτής είναι περισσότερο εποπτικός, από έναν κλασσικό χάρτη και βοηθάει το κοινό να κατανοήσει καλύτερα και σε λιγότερο χρόνο, το θέμα μελέτης. Από την άλλη αν στόχος είναι μια απλά επιφανειακή αναπαράσταση του αντικειμένου με χρήση χρωμάτων η άλλων χαρτογραφικών συμβόλων, χωρίς υψηλό κόστος και σε σύντομο χρονικό διάστημα κατασκευής, τότε ένας δισδιάστατος χάρτης είναι αρκετός και εξίσου αποδοτικός.

Κεφάλαιο 7

Βιβλιογραφικές Αναφορές

Haberling C., Bar H., and Hurni L. (2008) ‘*Proposed Cartographic Design Principles for 3D Maps: A Contribution to an Extended Cartographic Theory*’, vol 43, pp. 175-188 [online]. Available at: <https://www.utpjournals.press/doi/abs/10.3138/carto.43.3.175>

Oswald C., Rinner C. and Robinson A. (2019) ‘ Applications of 3D Printing in Physical Geography Education and Urban Visualization’, vol 54, issue 4, pp.278-287 [online]. Available at: <https://utpjournals.press/doi/10.3138/cart.54.4.2018-0007>

Copernicus (2016) *European Digital Elevation Model (EU-DEM), version 1.0* [online]. Available at: <https://land.copernicus.eu/imagery-in-situ/eu-dem/eu-dem-v1-0-and-derived-products/eu-dem-v1.0?tab=metadata>

DEMto3D (2023) *Help* [online]. Available at: <https://demto3d.com/en/ayuda/>

HUBS (2023). *What’s the ideal filament for FDM 3D printing? 3D printing materials compared* [online]. Available at: <https://www.hubs.com/knowledge-base/fdm-3d-printing-materials-compared/>

Xometry Europe (2021) *Fused Deposition Modeling (FDM) 3D Printing: Technology Overview* [online]. Available at: <https://xometry.eu/en/fused-deposition-modeling-fdm-3d-printing-technology-overview/>

Mohammed K. (2023) *ABS vs. PLA: A Comprehensive Guide* [online]. Available at: <https://www.wevolver.com/article/abs-vs-pla-a-comprehensive-guide>

Suyeon K., Yeeun S., Jinsil P., Sang-Woo L. and Kyungjin A. (2021) ‘*Exploring the Potential of 3D Printing Technology in Landscape Design Process*’ [online]. Available at: <https://www.mdpi.com/2073-445X/10/3/259>

Haghsefat K. and Tingting L. (2020) ‘*FDM 3D Printing Technology and Its Fundamental Properties*’ [online], p.1-3. Available at: https://www.researchgate.net/publication/344768624_FDM_3D_Printing_Technology_and_Its_Fundamental_Properties

- Shears A., Stocks Jr L. and Bagg J. (2016) ‘*3D Printing Raised Relief/Topographic Maps: A Cartographically Sound Method*’ [online], p1-7, Mansfield University. Available at: https://www.researchgate.net/publication/297920659_3D_Printing_Raised_Relief_Topographic_Maps_A_Cartographically_Sound_Method
- Gokhare V., Shinde D. and Raut D., (2017) ‘A Review paper on 3D-Printing Aspects and Various Processes Used in the 3D-Printing’ [online], vol. 6, p.953-958. Available at: <https://www.ijert.org/research/a-review-paper-on-3d-printing-aspects-and-various-processes-used-in-the-3d-printing-IJERTV6IS060409.pdf>
- Ultimaker (2023) *Ultimaker Cura–Quality settings* [online]. Available at: <https://support.ultimaker.com/s/article/1667337576725>
- Ultimaker (2022) *Infill settings* [online]. Available at: <https://support.ultimaker.com/s/article/1667411002588>
- Ultimaker (2022) *Print Speed* [online]. Available at: <https://support.ultimaker.com/s/article/1667411313568>
- Ultimaker (2023) *Ultimaker Cura – Build plate adhesion settings* [online]. Available at: <https://support.ultimaker.com/s/article/1667417985477>
- 3DUNIVERSE (2023) *Ultimaker S5* [online]. Available at: <https://shop3duniverse.com/products/ultimaker-s5#v45754748993856>
- All3DP (2023) *What is an STL File? – The STL Format Simply Explained* [online]. Available at: <https://all3dp.com/1/stl-file-format-3d-printing/>
- TWI (2023) *WHAT ARE THE ADVANTAGES AND THE DISADVANTAGES OF 3D PRINTING?* [online]. Available at: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-3d-printing/pros-and-cons>
- Horowitz S. and Schultz P. (2013) ‘*Printing Space: Using 3D Printing of Digital Terrain Models in Geosciences Education and Research*’ [online], p.138-145. Available at: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.5408/13-031.1>
- Shahrubudin N., Lee T.C., Ramlan R. (2019) ‘*An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials and Applications*’ [online], p.1286-1296. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978919308169>
- Harding C., Hasiuk F. and Wood A. (2021) ‘*TouchTerrain-3D Printable Terrain Models*’ [online]. Available at: <https://www.mdpi.com/2220-9964/10/3/108>

El Moumen A., Mostapha T. and Khalid L. (2019) ‘*Modeling of the temperature and residual stress fields during 3D printing of polymer composites*’ [online]. Available at: https://www.researchgate.net/publication/333719097_Modelling_of_the_temperature_and_residual_stress_fields_during_3D_printing_of_polymer_composites

Cloudeo (2023) ‘Ψηφιακό μοντέλο εδάφους: τι είναι’ [online]. Available at: https://www.cloudeo.group/el_GR/blog/cloudeo-blog-space-1/12

formlabs (2023) ‘3D Printing Technology Comparison: FDM vs. SLA vs. SLS [online]. Available at: <https://formlabs.com/eu/blog/fdm-vs-sla-vs-sls-how-to-choose-the-right-3d-printing-technology/>

Dormehl L. (2016) ‘*3D-printed topographical maps could help bring classroom lessons to life*’ [online]. Available at: <https://www.digitaltrends.com/cool-tech/3d-printed-topographical-maps/>

ROAD TRAFFIC TECHNOLOGY (2020) Toronto to trial autonomous electric shuttles with Local Motors [online]. Available at: <https://www.roadtraffic-technology.com/news/toronto-to-trial-autonomous-electric-shuttles-with-local-motors/>

Ιωαννίδης X. (2022) *Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους (DTM) – Ψηφιακά Μοντέλα Επιφανείας (DSM)*, [Lecture] Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Καμπούρης Β. (2012) *Αξιολόγηση της ακρίβειας των παγκόσμιων ψηφιακών μοντέλων εδάφους ASTER και SRTM για τον Ελλαδικό χώρο με χρήση ετερογενών υψομετρικών δεδομένων*, MSc thesis, Θεσσαλονίκη: Πολυτεχνική Σχολή Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Available at: <http://ikee.lib.auth.gr/record/131401?ln=el>