



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΑΝΘΡΩΠΙΣΤΙΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΠΑΙΔΑΓΩΓΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΔΗΜΟΤΙΚΗΣ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΕΠΙΣΤΗΜΕΣ ΤΗΣ ΑΓΩΓΗΣ –ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΝΕΩΝ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
«ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΠΕΔΙΟΥ ΤΗΣ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΤΩΝ
ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΕΚΤΥΠΩΤΩΝ ΣΤΗΝ ΠΡΩΤΟΒΑΘΜΙΑ
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ.»

Γεωργία Λαγοπάτη

ΡΟΔΟΣ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2023

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΑΝΘΡΩΠΙΣΤΙΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΠΑΙΔΑΓΩΓΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΔΗΜΟΤΙΚΗΣ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΕΠΙΣΤΗΜΕΣ ΤΗΣ ΑΓΩΓΗΣ –ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΝΕΩΝ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΓΕΩΡΓΙΑ ΛΑΓΟΠΑΤΗ

A. M.: 4132021013

Ανασκόπηση πεδίου της εκπαιδευτικής χρήσης των τρισδιάστατων
εκτυπωτών στην πρωτοβάθμια εκπαίδευση.

A scoping review for the educational use of 3d printing in pre – primary
and primary education.

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ

ΦΩΚΙΔΗΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ, ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

ΣΟΦΟΣ (ΛΟΪΖΟΣ) ΑΛΙΒΙΖΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΚΩΣΤΑΣ ΑΠΟΣΤΟΛΟΣ, ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ
ΠΑΙΔΑΓΩΓΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΔΗΜΟΤΙΚΗΣ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΕΠΙΣΤΗΜΕΣ ΤΗΣ ΑΓΩΓΗΣ - ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΝΕΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*Ανασκόπηση πεδίου της εκπαιδευτικής χρήσης των τρισδιάστατων εκτυπωτών στην
πρωτοβάθμια εκπαίδευση*




*

*A scoring review for the educational use of 3D Printing in Pre – primary and Primary
education*

ΛΑΓΟΠΑΤΗ ΓΕΩΡΓΙΑ

Επιβλέπων: Φωκίδης Εμμανουήλ, Αναπληρωτής Καθηγητής ΠΤΔΕ Παν. Αιγαίου

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή στις 12 Οκτωβρίου 2023

1. Φωκίδης Εμμανουήλ, Αναπληρωτής Καθηγητής ΠΤΔΕ Παν. Αιγαίου	
2. Κώστας Απόστολος, Επίκουρος Καθηγητής ΠΤΔΕ Παν. Αιγαίου	
3. Σοφός Αλιβίζος, Καθηγητής ΠΤΔΕ Παν. Αιγαίου	

ΡΟΔΟΣ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2023

Δηλώνω υπεύθυνα ότι είμαι συγγραφέας αυτής της πρωτότυπης μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας, ότι έχω αναφέρει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες και ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά ειδικά για το συγκεκριμένο Π.Μ.Σ.

Λαγοπάτη Γεωργία

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας την παρούσα διπλωματική εργασία θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου, κ. Φωκίδα Εμμανουήλ, που μου έδωσε τη δυνατότητα να πραγματοποιήσω αυτήν την εργασία, για την άριστη συνεργασία που είχαμε όλο αυτό το διάστημα, την υπομονή που έδειξε και τις συμβουλές που μου έδωσε, καθώς χωρίς αυτές δε θα μπορούσα να την είχα ολοκληρώσει.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή, κ. Σοφό (Λοΐζο) Αλιβίζο, και το μέλος Ε.ΔΙ.Π., κ. Κώστα Απόστολο, για τη συμμετοχή τους στην τριμελή επιτροπή.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου για την στήριξή τους, καθώς χωρίς την ψυχολογική συμπαράσταση των οποίων δε θα μπορούσα να την ολοκληρώσω.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	5
Κατάλογος Εικόνων	8
Κατάλογος Πινάκων.....	8
Κατάλογος Σχημάτων	9
Περίληψη	10
Εισαγωγή.....	11
ΜΕΡΟΣ Α: Θεωρητικό μέρος 1. Η τεχνολογία των τρισδιάστατων εκτυπωτών.....	13
1.1 Ιστορικό υπόβαθρο.....	13
1.2 Κατηγοριοποίηση και τρόποι λειτουργίας τρισδιάστατων εκτυπωτών	17
1.2.1 Τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης	20
1.2.1.1 Στερεολιθογραφία - Stereo lithography (SL).....	20
1.2.1.2 Επιλεκτική Σύντηξη με λέιζερ - Selective Laser sintering (SLS).....	21
1.2.1.3 Επιλεκτική Τήξη με λέιζερ - Selective Laser Melting (SLM).....	22
1.2.1.4 Τήξη με δέσμη ηλεκτρονίων - Electron Beam Melting (EBM).....	23
1.2.1.5 Συγκόλληση επάλληλων φύλλων με λέιζερ - Laminated Object Manufacturing (LOM).....	23
1.2.1.6 Κατασκευή μοντέλων μέσω εναπόθεσης / σύντηξης διαδοχικών στρώσεων - Fused Deposition Modeling (FDM).....	24
1.2.2 Υλικά τρισδιάστατης εκτύπωσης	25
1.3 Εφαρμογές τρισδιάστατης εκτύπωσης.....	27
1.3.1 Αεροναυπηγική.....	27
1.3.2 Αυτοκινητοβιομηχανία.....	28
1.3.3 Βιομηχανία τροφίμων	29
1.3.4 Ιατρική	30
1.3.5 Κατασκευαστικός τομέας	31
1.3.6 Ηλεκτρική ενέργεια.....	32
1.3.7 Βιομηχανία της μόδας	32
2. Η εκπαιδευτική χρήση των τρισδιάστατων εκτυπωτών	34
2.1 Πεδία εκπαιδευτικής εφαρμογής.....	34
2.1.1 Σχολική εκπαίδευση	34
2.1.2 Πανεπιστημιακή Εκπαίδευση	36
2.1.3 Ειδική Αγωγή.....	37
2.1.4 Βιβλιοθήκες.....	38
2.2 Θεωρίες μάθησης συνδεδεμένες με τους τρισδιάστατους εκτυπωτές.....	39
2.2.1 Η θεωρία της Εμπλαισιωμένης ή Εγκαθιδρυμένης Μάθησης (Situated Learning)...	40

2.2.2 Η Βιωματική Μάθηση (Experiential Learning).....	41
2.2.3 Η θεωρία της Κριτικής Κατασκευής (Critical Making)	42
2.2.4 Ο Κονστρουκτιονισμός (Constructionism)	43
2.2.5 Η Αυτοκατευθυνόμενη Μάθηση (Self-Directed Learning).....	44
2.3 Σχετικές έρευνες	46
2.3.1 Ειδικές γνωστικές δεξιότητες	47
2.3.2 Γενικές γνωστικές δεξιότητες	50
3. Μέθοδος Έρευνας.....	54
3.1 Σκοπός και Ερευνητικά Ερωτήματα	54
3.2 Μέθοδος Ανασκόπησης	54
3.2.1 Είδη Ανασκοπήσεων	54
3.2.2 Σύγκριση Ανασκοπήσεων.....	56
3.3 Ερευνητικός Σχεδιασμός.....	57
4. Ανάλυση αποτελεσμάτων (ανάλυση, οργάνωση και ταξινόμηση δεδομένων).....	63
4.1 Ανάλυση ποσοτικών δεδομένων έρευνας	63
4.2 Ανάλυση ποιοτικών δεδομένων έρευνας	75
4.3 Αξιοπιστία άρθρων	78
5. Συζήτηση.....	85
6 Συμπεράσματα	97
Βιβλιογραφία	98

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1.1 Πρώτος τρισδιάστατος εκτυπωτής

Εικόνα 1.1.2 Urbee

Εικόνα 1.1.3 Τρισδιάστατα εκτυπωμένο κτίριο

Εικόνα 1.2.1.1 Φωτοπολυμερισμός

Εικόνα 1.2.1.3 Επιλεκτική τήξη με λέιζερ

Εικόνα 1.2.1.4 Τήξη με δέσμη ηλεκτρονίων

Εικόνα 1.2.1.5 Συγκόλληση επάλληλων φύλλων με λέιζερ

Εικόνα 1.3.2 Τρισδιάστατα εκτυπωμένο λεωφορείο

Εικόνα 1.3.3 Τρισδιάστατη εκτύπωση τροφίμων

Εικόνα 1.3.4 Δημιουργία μοντέλου

Εικόνα 1.3.7 Τρισδιάστατα εκτυπωμένα κοσμήματα

Εικόνα 2.2.1 GribFab βοηθητικό χέρι

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3.3.1 Λέξεις-κλειδιά αναζήτησης

Πίνακας 3.3.2 Κατηγορίες πληροφοριών

Πίνακας 4.1.1 Ερευνητικά άρθρα

Πίνακας 4.1.2 Έτος δημοσίευσης

Πίνακας 4.1.3 Είδος δημοσίευσης

Πίνακας 4.1.4 Χώρα διεξαγωγής

Πίνακας 4.1.5 Μέθοδος έρευνας

Πίνακας 4.1.6 Τύποι μεθόδου

Πίνακας 4.1.7 Αριθμός ομάδων

Πίνακας 4.1.8 Είδος ομάδας στόχου

Πίνακας 4.1.9 Μέγεθος δείγματος

Πίνακας 4.1.10 Βαθμίδα εκπαίδευσης

Πίνακας 4.1.11 Διάρκεια παρέμβασης

Πίνακας 4.1.12 Γνωστικό αντικείμενο

Πίνακας 4.1.13 Εξοπλισμός

Πίνακας 4.1.14 Λογισμικά

Πίνακας 4.1.15 Εργαλεία συλλογής δεδομένων

Πίνακας 4.2.1 Γενικός σκοπός ερευνών

Πίνακας 4.2.2 Κατηγορίες ερευνητικών ερωτημάτων

Πίνακας 4.2.3 Είδος αποτελεσμάτων

Πίνακας 4.2.4 Αποτελέσματα βάσει συχνότερων ερευνητικών ερωτημάτων

Πίνακας 4.2.5 Είδος σχεδιασμού έρευνας άρθρων με θετικά αποτελέσματα

Πίνακας 4.2.6 Αρνητικά αποτελέσματα – αιτίες

Πίνακας 4.2.7 Ουδέτερα αποτελέσματα – αιτίες

Πίνακας 4.3.1 Αξιόπιστα άρθρα

Πίνακας 4.3.2 Σύνοψη αξιόπιστων άρθρων

Πίνακας 4.3.3 Ερευνητικά ερωτήματα αξιόπιστων άρθρων

Πίνακας 4.3.4 Αποτελέσματα αξιόπιστων άρθρων

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 3.3.1 PRISMA

Περίληψη

Στη βιβλιογραφία η εκπαιδευτική χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης στον χώρο της Πρωτοβάθμιας Εκπαίδευσης και της Ειδικής Αγωγής φαίνεται ότι δεν έχει διερευνηθεί αρκετά. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το κόστος αγοράς του εξοπλισμού που υποστηρίζει την τεχνολογία αυτή ήταν απαγορευτικό, με αποτέλεσμα η έρευνα να περιορίζεται σε επίπεδο Τριτοβάθμιας Εκπαίδευσης και σε έρευνες με περιορισμένο αριθμό δείγματος. Η παρούσα έρευνα εξήγαγε ορισμένα ενδιαφέροντα συμπεράσματα σχετικά με την εκπαιδευτική χρήση της τεχνολογίας αυτής αναφορικά με τη μάθηση. Φάνηκε ότι βοηθά στην ενίσχυση της μαθησιακής διαδικασίας, στην κατάκτηση δεξιοτήτων και στη δημιουργία θετικών συναισθημάτων σε μαθητές Πρωτοβάθμιας Εκπαίδευσης. Ωστόσο, το δείγμα των περισσότερων άρθρων ήταν μικρό με αποτέλεσμα τα συμπεράσματα να υπόκεινται σε περιορισμούς.

Λέξεις-Κλειδιά: Τρισδιάστατη εκτύπωση, 3D εκτυπωτής, Πρωτοβάθμια Εκπαίδευση, Γενική Αγωγή, Ειδική Αγωγή

Abstract

In the literature, the educational use of 3D printing in the field of Primary Education and Special Education seems not to have been investigated enough. This is due to the fact that the cost of purchasing the equipment which supports this technology was prohibitive, with the result that research is limited to the Higher Education level and to research with a limited sample size. The present research drew some interesting conclusions about the educational use of this technology in relation to learning. It has been shown to help enhance the learning process, acquire skills and create positive emotions in Primary School students. However, the sample size of most articles was small, so the conclusions are subject to limitations.

Keywords: 3D printing, 3D printer, Primary Education, Typical Education, Special Education

Εισαγωγή

Η συζήτηση σχετικά με τα πλεονεκτήματα ή μη της εκπαιδευτικής τεχνολογίας σε σχέση με τα συμβατικά μέσα είναι διαρκής. Ταυτόχρονα, ολοένα και νεότερα τεχνολογικά μέσα προκύπτουν προσφέροντας νέες εκπαιδευτικές προοπτικές. Το σκεπτικό που οδήγησε στην επιλογή του συγκεκριμένου θέματος βασίζεται σε δύο άξονες. Ο πρώτος σχετίζεται με την αλλαγή στον τρόπο που αντιλαμβανόμαστε πλέον τη μάθηση. Στη σημερινή εποχή γίνεται λόγος για μαθησιακές εμπειρίες που παρέχουν γνώσεις, αλλά συγχρόνως εμπεριέχουν αλληλεπίδραση, η οποία επιτρέπει την ανανέωση των αντιλήψεων, των στάσεων όπου λαμβάνει χώρα η μάθηση. Ο δεύτερος άξονας είναι η ίδια η τρισδιάστατη εκτύπωση, η οποία επιτρέπει στο άτομο να δώσει τρισδιάστατη υπόσταση στα δισδιάστατα σχέδιά του.

Η τεχνολογία αυτή βρίσκει ήδη εκπαιδευτική χρήση στην Τριτοβάθμια Εκπαίδευση και φαίνεται ότι θα συνεχίσει να αξιοποιείται μακροπρόθεσμα σε ακόμη μεγαλύτερο βαθμό και σε μικρότερες βαθμίδες εκπαίδευσης. Αυτό γιατί οι μαθησιακές εμπειρίες που προσφέρει ξεπερνούν κατά πολύ τη συμβατική διδασκαλία.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι η τρισδιάστατη εκτύπωση βρίσκει εφαρμογή σε πολλούς και διαφορετικούς τομείς, η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει την εκπαιδευτική της χρήση στην Πρωτοβάθμια Εκπαίδευση μέσα από μια ανασκόπηση πεδίου κατηγοριοποιώντας και αναλύοντας τις έρευνες που χρησιμοποιούν αυτό το μέσο και σχετίζονται με τη μάθηση.

Βασικό ερευνητικό ερώτημα

Μπορεί μία τεχνολογία αιχμής όπως οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές να χρησιμοποιηθεί ως εκπαιδευτικό μέσο σε δομές πρωτοβάθμιας εκπαίδευσης;

Δευτερεύοντα ερευνητικά ερωτήματα

- Ποιο είναι το γνωστικό πεδίο των παρεμβάσεων του 3D Printing στην Πρωτοβάθμια Εκπαίδευση τόσο για μαθητές όσο και για εκπαιδευτικούς;
- Για ποιες ηλικιακές ομάδες μαθητών πρωτοβάθμιας εκπαίδευσης έχουν γίνει παρεμβάσεις με τη χρήση του 3D Printing;

- Ποια είναι τα μαθησιακά αποτελέσματα της εκπαιδευτικής χρήσης του 3D Printing στην Πρωτοβάθμια Εκπαίδευση σε επίπεδο γενικής κι ειδικής εκπαίδευσης;
- Ποιες είναι οι απόψεις των μαθητών και των εκπαιδευτικών για τη μάθηση μέσω του 3D Printing;

Μεθοδολογική προσέγγιση

Πρόκειται για μια ανασκόπηση πεδίου που εστιάζει σε συγκεκριμένο ηλικιακό δείγμα. Γίνεται μια ανάλυση πεδίου ενδιαφέροντος (scoping analysis), συγκεκριμένα, μια οργάνωση της υπάρχουσας βιβλιογραφίας με βάση τη φύση του πεδίου, δηλαδή του θέματος που διερευνάται, το οποίο είναι η εκπαιδευτική χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Έγινε συλλογή κι ανάλυση ποσοτικών και ποιοτικών δεδομένων.

Μερικές λέξεις-κλειδιά με τις οποίες αναζητήθηκαν οι έρευνες της εργασίας είναι οι εξής: «3D printing», «3D printer», «Primary Education». Η γλώσσα αναζήτησης των άρθρων ήταν η αγγλική. Η αναζήτηση έγινε σε διαδικτυακές μηχανές αναζήτησης (ενδεικτικά, Google Scholar, ERIC, LearnTechLib, Scopus).

Ακόμη, η έρευνα περιλαμβάνει ένα διάγραμμα ροής τύπου PRISMA (Moher, Liberati, Tetzlaff, & Altman, 2009), το οποίο παρουσιάζει τα αριθμητικά δεδομένα από την αναζήτηση των άρθρων, την αφαίρεση των διπλότυπων, τον αρχικό διαχωρισμό αυτών, τα άρθρα που κρίθηκαν κατάλληλα, εκείνα που εξαιρέθηκαν και τέλος τα άρθρα που συγκεντρώθηκαν για την περαιτέρω ανάλυση.

Μετά την παράθεση του θεωρητικού μέρους της εργασίας ακολουθεί η ανάλυση των δεδομένων από τα τελικώς επιλεγμένα άρθρα μέσω του PRISMA και η συζήτηση των ευρημάτων. Στο τέλος, εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με την εκπαιδευτική χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης.

ΜΕΡΟΣ Α: Θεωρητικό μέρος

1. Η τεχνολογία των τρισδιάστατων εκτυπωτών

Η παραγωγή αποτελεί μια σύνθετη διαδικασία και προκύπτει μέσα από την υλοποίηση μιας ιδέας και τη μετατροπή της σε απτό αντικείμενο. Στην ιστορία της βιομηχανικής παραγωγής ειδικοί επαγγελματίες και τεχνικοί συνεργάζονται συνδυάζοντας την επιστημονική τους γνώση και τις τεχνικές τους δεξιότητες, ώστε να αποκτήσει μια ιδέα υλική υπόσταση.

Παραδοσιακά, τα μέσα που αξιοποιούνται στην παραγωγική διαδικασία είναι εργαλεία και μηχανήματα. Η πρόοδος της τεχνολογίας έχει βοηθήσει στην εξέλιξη όλων αυτών προσφέροντας περισσότερα αυτοματοποιημένα συστήματα βασισμένα κατά κύριο λόγο στη ρομποτική τεχνολογία. Μια από αυτές τις τεχνολογίες που έχει αρχίσει να χρησιμοποιείται ολοένα και περισσότερο τα τελευταία χρόνια είναι η τρισδιάστατη εκτύπωση (3D printing), μέσω της οποίας είναι εφικτή η απευθείας παραγωγή ενός τρισδιάστατου αντικειμένου από ένα ψηφιακό αρχείο.

1.1 Ιστορικό υπόβαθρο

Η τρισδιάστατη εκτύπωση αποτελεί μια νέα και ραγδαίως εξελισσόμενη τεχνολογία, μέσω της οποίας πραγματοποιείται η κατασκευή τρισδιάστατων αντικειμένων με τη διαδοχική πρόσθεση στρώσεων υλικού δίνοντας έτσι μια νέα διάσταση στον τομέα της προσθετικής κατασκευής (Lee et al., 2017). Αυτή η μορφή προσθετικής κατασκευής γίνεται με τη χρήση των τρισδιάστατων εκτυπωτών, οι οποίοι επιτρέπουν την παραγωγή φυσικών, πρωτότυπων αντικειμένων, καθώς κι αντιγράφων. Επίσης, σε αρκετές περιπτώσεις αξιοποιούνται για την παραγωγή μεμονωμένων εξαρτημάτων.

Παράλληλα, ποικιλία εντοπίζεται και στον τύπο του υλικού που αξιοποιείται κατά την τρισδιάστατη εκτύπωση. Ορισμένα από τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι το πολυμερές πλαστικό, το ξύλο, το μέταλλο κι όλα αυτά σε μια εξίσου μεγάλη ποικιλία χρωμάτων (Ngo et al., 2018). Ωστόσο, εκτός από είδος του υλικού και τα χρώματα ποικιλομορφία εντοπίζεται και σε άλλα χαρακτηριστικά, όπως η ανθεκτικότητα, η ελαστικότητα κι η όψη.

Με την τρισδιάστατη εκτύπωση πρακτικά μπορεί να δημιουργηθεί από το μηδέν ή/και να αναπαραχθεί ένα αντικείμενο ανεξαρτήτως μεγέθους ή/και πολυπλοκότητας. Αυτό σε συνδυασμό με τα προηγούμενα στοιχεία που αναφέρθηκαν, καθώς και το χαμηλό κόστος καθιστούν την τεχνολογία των τρισδιάστατων εκτυπωτών αρκετά ελκυστική για τον παραγωγικό τομέα.

Η τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης βασίζεται σε τρεις διαδικαστικές φάσεις. Η πρώτη φάση είναι εκείνη του σχεδιασμού, κατά την οποία απαιτείται η χρήση ενός λογισμικού για 3D σχεδιασμό. Τα λογισμικά αυτά είναι γνωστά ως Computer Aided Design – Σχεδιασμός με Υπολογιστή (CAD) και μέσω αυτών είναι εφικτός ο ολοκληρωμένος σχεδιασμός ενός τρισδιάστατου αντικειμένου (Horváth & Vroom, 2015). Η αμέσως επόμενη φάση είναι εκείνη της εκτύπωσης του αντικειμένου που έχει σχεδιαστεί με τη βοήθεια του λογισμικού. Ο τρισδιάστατος εκτυπωτής ακολουθώντας τις οδηγίες που του δίνονται εκτυπώνει σε τρισδιάστατη πλέον μορφή το σχεδιασμένο αντικείμενο αξιοποιώντας την πρώτη ύλη που του έχει δοθεί. Η τελευταία φάση είναι η βελτιστοποίηση του παραγόμενου προϊόντος, κατά την οποία ο δημιουργός έχει τη δυνατότητα να κάνει παρεμβάσεις, ώστε να τελειοποιήσει το τελικό αποτέλεσμα.

Οι απαρχές της τρισδιάστατης εκτύπωσης χρονολογούνται στις αρχές της δεκαετίας του '80. Μια πρώτη απόπειρα ανάπτυξης της Ταχείας Ανάπτυξης Πρωτοτύπων (Rapid Prototyping) χρονολογείται στα 1981, όπου ο Dr. Kodama έκανε μια δημοσίευση σχετικά με τις διαδικασίες μιας καινοτόμου τεχνολογίας για την εποχή ταχείας δημιουργίας πρωτοτύπων (Su & Al'Aref, 2018). Ο Kodama είναι ο πρώτος που περιέγραψε την στρώμα προς στρώμα προσέγγιση δημιουργίας πρωτοτύπων με έρευνα βασισμένη στη μέθοδο της στερεολιθογραφίας (Hartings & Ahmed, 2019). Ωστόσο, δεν έλαβε δίπλωμα ευρεσιτεχνίας, καθώς δεν είχε προλάβει τις προθεσμίες αιτήσεων.

Αργότερα ο Hull το 1982 αναρωτήθηκε αν θα ήταν δυνατό να τοποθετήσει λεπτές στρώσεις χιλιάδων πλαστικών ινών το ένα πάνω στο άλλο και με τη βοήθεια του φωτός να κόψει το σχήμα που θα ήθελε φτιάχνοντας με τον τρόπο αυτό ένα τρισδιάστατο αντικείμενο (Su & Al'Aref, 2018). Μετά από έναν χρόνο πειραματισμών, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.1, ο Hull δημιούργησε ένα σύστημα κατά το οποίο μια εστιασμένη ακτίνα υπεριώδους ακτινοβολίας καθοδηγούμενη από εντολές μέσω υπολογιστή έπεφτε σε έναν κάδο με φωτοπολυμερές υγρό στερεοποιώντας το υγρό σε συγκεκριμένα σημεία κάθε φορά.



Εικόνα 1.1.1 Πρώτος τρισδιάστατος εκτυπωτής

Ο Hull εξαιτίας αυτής της εφεύρεσής του κέρδισε δίπλωμα ευρεσιτεχνίας το 1983, όπου και κατασκεύασε την πρώτη μηχανή στερεολιθογραφίας (Gokhare et al., 2017). Η ευρεσιτεχνία του ονομάστηκε στερεολιθογραφία, καθώς η τεχνολογία αυτή δεν περιοριζόταν αποκλειστικά στα υγρά στοιχεία, αλλά ήταν ικανή να στερεοποιήσει κάθε υλικό ή να μεταβάλει τη φυσική κατάσταση. Επίσης, ο ίδιος ίδρυσε και την 3D Systems Corporation στα 1986, μια από τις μεγαλύτερες οργανώσεις στον χώρο της τρισδιάστατης εκτύπωσης, και δημιούργησε τον πρώτο 3D εκτυπωτή, τον SLA-1.

Το 1988 ο Deckard του Πανεπιστημίου του Τέξας εισήγαγε την τεχνολογία της Επιλεκτικής Σύντηξης με λέιζερ (Selective Laser Sintering). Ουσιαστικά, πρόκειται για μια διαδικασία εντοπισμού και στερεοποίησης στρωμάτων πολυμερών σκόνης. Έναν χρόνο μετά ιδρύθηκε η Stratasys με ιδρυτή τον Scott Crump, ο οποίος ανέπτυξε την πιο γνωστή τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης, την κατασκευή μοντέλων μέσω εναπόθεσης / σύντηξης διαδοχικών στρώσεων (Fused Deposition Modeling). Μάλιστα, στα 1991 η εταιρεία αυτή κυκλοφόρησε και τρισδιάστατο εκτυπωτή που λειτουργούσε με αυτήν την τεχνολογία με αποτέλεσμα η Stratasys να γίνεται επίσημα ο πρώτος ανταγωνιστής της 3D Systems. Βέβαια, οι εκτυπωτές ακολουθούσαν μια εντελώς διαφορετική μέθοδο λειτουργίας. Στα 1992 η DTM Inc κυκλοφόρησε τον πρώτο τρισδιάστατο εκτυπωτή SLS.

Περί τα τέλη του 1992 υπήρχαν ουσιαστικά 3D εκτυπωτές που λειτουργούσαν με τις τρεις δημοφιλέστερες μεθόδους τρισδιάστατης πλαστικής εκτύπωσης που

αξιοποιούνται μέχρι και σήμερα. Φυσικά, τα μηχανήματα εκείνης της εποχής ήταν πολύ μεγαλύτερα κι ακριβότερα σε σχέση με τα σημερινά.

Σημείο σταθμός της τρισδιάστατης εκτύπωσης αποτέλεσε το έτος 2000, όπου και η ZCorp κυκλοφόρησε τον πρώτο έγχρωμο τρισδιάστατο εκτυπωτή, ενώ το 2002 για πρώτη φορά δημιουργήθηκε ένα τρισδιάστατο μικροσκοπικό ανθρώπινο νεφρό στο Ινστιτούτο Αναγεννητικής Ιατρικής του Wake Forest. Αυτή η εξέλιξη ήταν ιδιαίτερα σημαντική, καθώς θα μπορούσε να επηρεάσει θετικά το πεδίο των μεταμοσχεύσεων.

Κατά την περίοδο 2004-2005 ο Dr. Bowyer, λέκτορας του Πανεπιστημίου του Μπαθ, έχοντας ως πηγή έμπνευσης όλες τις προηγούμενες ανακαλύψεις στον χώρο της τρισδιάστατης εκτύπωσης, συνέλαβε την ιδέα της αυτό-αναπαραγωγής των τρισδιάστατων εκτυπωτών. Με τον τρόπο αυτό δημιουργήθηκε ένα νέο κίνημα, γνωστό ως Replicating Rapid Prototyper (RepRap). Πρόκειται για ένα έργο ανοιχτού κώδικα, το οποίο ενίσχυσε τον εκδημοκρατισμό της τρισδιάστατης εκτύπωσης παρέχοντας τη δυνατότητα χρήσης της σε χαμηλό κόστος παγκοσμίως.

Με την ίδρυση της ExOne (2005) εισάγεται μια νέα τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης, η Binder Jetting, η οποία επιτρέπει την εκτύπωση τρισδιάστατων αντικειμένων με περίπλοκα γεωμετρικά σχέδια από μέταλλο. Μέχρι το 2009, όπου και θεωρείται η «εφηβική περίοδος» της τρισδιάστατης εκτύπωσης, δημιουργήθηκαν οι συνθήκες, ώστε το 3D Printing να μπορεί να αξιοποιείται ακόμα και στο σπίτι, καθώς μειώθηκε σημαντικά το κόστος αγοράς τους κι αυξήθηκε η ευκολία στη χρήση τους. Φυσικά, οι τεχνολογικές και τεχνικές γνώσεις ήταν απαραίτητο να υπάρχουν, ώστε να γίνει χρήση του τρισδιάστατου εκτυπωτή.

Ιδιαίτερο έτος για την τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης αποτελεί το 2011. Αυτό γιατί εκείνη την περίοδο η εταιρεία i. materialize παρουσιάζει ως τρισδιάστατα εκτυπώσιμα υλικά το χρυσό και το ασήμι. Επίσης, η Kor Ecologic παρουσίασε το πρώτο τρισδιάστατα εκτυπωμένο αυτοκίνητο, γνωστό ως Urbee, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.2.



Εικόνα 1.1.2 Urbee

Παράλληλα, την περίοδο μεταξύ 2015-2019 σημειώνεται μία ραγδαία εξέλιξη της τρισδιάστατης εκτύπωσης στον χώρο της βιομηχανίας της οικοδομής. Στο χρονικό αυτό διάστημα εμφανίζονται στην αγορά εταιρείες, οι οποίες αξιοποιούν την τεχνολογία αυτή για την κατασκευή ολόκληρων οικοδομών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η Aris Cor, η οποία το 2018 παρέδωσε ένα ολόκληρο σπίτι μέσα σε 24 ώρες αξιοποιώντας την τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης (Holt et al., 2019). Το 2019, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.3, χτίστηκε το μεγαλύτερο σε διαστάσεις τρισδιάστατα εκτυπωμένο κτίριο σε όλο τον κόσμο στο Ντουμπάι.



Εικόνα 1.1.3 Τρισδιάστατα εκτυπωμένο κτίριο

1.2 Κατηγοριοποίηση και τρόποι λειτουργίας τρισδιάστατων εκτυπωτών

Από τη σταδιακή εξέλιξη αυτής της τεχνολογίας έχουν προκύψει διαφορετικοί τύποι λειτουργίας της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Αυτή η ποικιλομορφία στους τύπους τρισδιάστατης εκτύπωσης έχει επηρεάσει τα είδη τρισδιάστατων εκτυπωτών, καθώς και τα υλικά που αξιοποιούνται κατά την εκτύπωση.

Ένας συνηθισμένος βασικός διαχωρισμός των συστημάτων τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι:

- Συστήματα ελεγχόμενης εναπόθεσης υλικού, όπου μέσω της διαδικασίας του ψεκασμού ή της εξώθησης το υλικό τοποθετείται ανά στρώσεις με τη χρήση σύριγγας, ακροφυσίου ή ψεκαστικού μηχανισμού (Diegel, 2014).
- Συστήματα ελεγχόμενης συσσωμάτωσης υλικού, το οποίο είναι αποθηκευμένο σε δεξαμενές είτε σε μορφή σκόνης είτε ως ρευστό (Diegel, 2014).

Σύμφωνα με το ASTM οι τεχνολογίες της προσθετικής κατασκευής (additive manufacturing) χωρίζονται σε επτά ομάδες:

- Εκτόξευση συνδετικών (Binder Jetting)
- Κατευθυνόμενη εναπόθεση ενέργειας (Directed Energy Deposition)
- Εξώθηση υλικού (Material Extrusion)
- Εκτόξευση υλικού (Material Jetting)
- Σύντηξη σκόνης σε κλίνη (Powder Bed Fusion)
- Ελασματοποίηση σε φύλλα (Sheet Lamination)
- Φωτοπολυμερισμός (Vat Polymerisation)

Η Εκτόξευση Συνδετικού υλικού αποτελεί μια ταχεία διαδικασία παραγωγής πρωτοτύπων και τρισδιάστατης εκτύπωσης, η οποία επιτυγχάνεται μέσα από την εφαρμογή ενός υγρού συνδετικού παράγοντα για την ενοποίηση σωματιδίων σκόνης (Holzmann et al., 2017). Η τεχνολογία αυτή είναι από τις πιο απλές, οικονομικές και γρήγορες, καθώς αυτό που χρειάζεται να επιτευχθεί είναι η προσκόλληση σωματιδίων σκόνης. Τα υλικά που μπορούν να αξιοποιηθούν είναι πολυμερή, κεραμικά, μέταλλα και άμμος, η οποία μάλιστα απαιτεί και τη λιγότερη δυνατή επεξεργασία.

Από την άλλη μεριά η κατευθυνόμενη Εναπόθεση Ενέργειας (Directed Energy Deposition) αποτελεί μια πιο σύνθετη διαδικασία, η οποία χρησιμοποιείται για την επισκευή υπάρχοντος υλικού ή για την προσθήκη υλικού σε εξαρτήματα (Tofail et al., 2018). Στη συγκεκριμένη διαδικασία το ακροφύσιο γίνεται να τοποθετηθεί σε πολλές και διαφορετικές κατευθύνσεις, γεγονός που επιτρέπει την παραγωγή ενός καλής ποιότητας αντικειμένου με σημαντικό βαθμό ακρίβειας. Το βασικότερο υλικό που αξιοποιείται είναι το μέταλλο.

Η τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης βασίζεται και σε μία ακόμη μέθοδο, εκείνη της Εξώθησης Υλικού (Material Extrusion). Πρόκειται για μια μέθοδο που επιτρέπει την εκτύπωση πολλαπλών υλικών, καθώς και την πολύχρωμη εκτύπωση πλαστικών, τροφίμων ή/και ζωντανών κυττάρων (Stansbury et al., 2016). Τα θετικά

στοιχεία που συγκεντρώνει η μέθοδος αυτή είναι το χαμηλό κόστος παραγωγής κι η δημιουργία πλήρως λειτουργικών εξαρτημάτων.

Παράλληλα, υπάρχει κι η διαδικασία της Εκτόξευσης Υλικού (Materials Jetting). Η διαδικασία αυτή οδηγεί στην παραγωγή αντικειμένων πολύ λείας επιφάνειας κι υψηλής ακρίβειας στην εκτύπωση, διότι η εκτύπωση πραγματοποιείται μέσω ειδικής κεφαλής που επιτρέπει την επιλεκτική διοχέτευση ανά σταγονίδιο ενός φωτοευαίσθητου υλικού, το οποίο στερεοποιείται μέσω υπεριώδους ακτινοβολίας (Tofail et al., 2018). Τα υλικά που μπορούν να αξιοποιηθούν σε μια τέτοιου τύπου τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι πολυμερή, κεραμικά, βιολογικά ή υβριδικά.

Μία εξίσου γνωστή διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι η Σύντηξη Σκόνης σε Κλίνη (Powder Bed Fusion), η οποία περιλαμβάνει τρεις επιμέρους τεχνολογίες εκτύπωσης:

- Τήξη δέσμης ηλεκτρονίων (Electron Beam Melting), κατά την οποία η δέσμη ηλεκτρονίων ενισχύει την πηγή ενέργειας για τη θέρμανση του υλικού εκτύπωσης (Ventola, 2014).
- Επιλεκτική Πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ (Selective Laser Sintering), κατά την οποία αξιοποιείται λέιζερ υψηλής ισχύος για τη σύντηξη σκόνης, μέσω της οποίας είναι δυνατό να παραχθούν μεταλλικά, πλαστικά και κεραμικά τρισδιάστατα αντικείμενα (Ventola, 2014).
- Επιλεκτική Θερμική Πυροσυσσωμάτωση (Selective Heat Sintering), κατά την οποία μια θερμική κεφαλή εκτύπωσης βοηθά στο να λιώσει η θερμοπλαστική σκόνη που χρησιμοποιείται ως υλικό εκτύπωσης (Ventola, 2014).

Μια ακόμη κατηγορία της τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι η Ελασματοποίηση Φύλλων (Sheet Lamination). Πρόκειται για μια διαδικασία κατά την οποία το υλικό κατανέμεται ανά φύλλα, τα οποία συγκολλώνται, ώστε να παραχθεί το τρισδιάστατο αντικείμενο. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται στην:

- Συγκόλληση επάλληλων φύλλων με λέιζερ (Laminated Object Manufacturing), μέσω της οποίας διαδικασία επιτυγχάνεται η κατασκευή αντικειμένων με περίπλοκα γεωμετρικά σχέδια στο λιγότερο δυνατό χρόνο και με χαμηλό κόστος (Vijayavenkataraman et al., 2017).
- Κατασκευή Πρόσθετων Υπερήχων (Ultrasound Additive Manufacturing), μια πρωτότυπη διαδικασία μέσω της οποίας ο ήχος χρησιμοποιείται ως το μέσο για τη συγκόλληση στρωμάτων αλουμινίου (Vijayavenkataraman et al., 2017).

Η Ελασματοποίηση Φύλλων παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα, όπως:

- Χαμηλό κόστος παραγωγής
- Έγχρωμες εκτυπώσεις
- Ευκολία στη διαχείριση του υλικού
- Χρήση ανακυκλώσιμων υλικών

Η τελευταία μέθοδος τρισδιάστατης εκτύπωσης, η οποία αποτελεί και την πιο διαδεδομένη στον χώρο της βιομηχανικής παραγωγής, είναι ο Φωτοπολυμερισμός (Vat Polymerism) όπου φωτοαντιδραστικά πολυμερή υλικά σκληραίνουν υπό την επίδραση λέιζερ, φωτός ή υπεριώδους ακτινοβολίας (Low et al., 2017). Δυο τεχνολογίες που ακολουθούν τη διαδικασία του φωτοπολυμερισμού είναι:

- Στερεολιθογραφία (Stereolithography)
- Ψηφιακή Επεξεργασία Φωτός (Digital Light Processing)

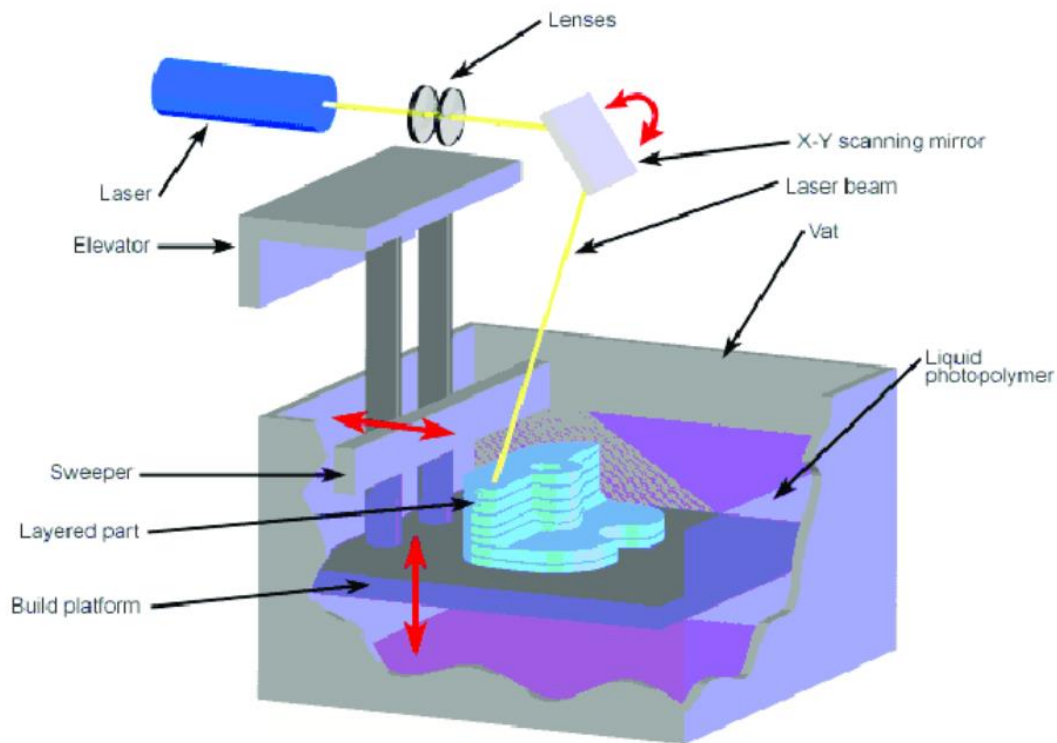
Στον φωτοπολυμερισμό τα αξιοποιούμενα υλικά αρχικά βρίσκονται σε υγρή μορφή και σκληραίνουν με την επίδραση του φωτός. Ο φωτοπολυμερισμός ως διαδικασία προτιμάται για την κατασκευή πιο ποιοτικών τρισδιάστατων αντικειμένων που έχουν πολλές και περίπλοκες λεπτομέρειες.

1.2.1 Τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται ορισμένες βασικές τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης που χρησιμοποιούνται στον χώρο της βιομηχανίας κι αποτελούν μια επιπλέον κατηγοριοποίηση της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Ωστόσο, η λογική λειτουργίας τους βασίζεται στις παραπάνω διαδικασίες που περιγράφηκαν.

1.2.1.1 Στερεολιθογραφία - Stereo lithography (SL)

Η στερεολιθογραφία βασίζεται στην τεχνική του φωτοπολυμερισμού. Πρόκειται για μια διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης κατά την οποία, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.4, μια ακτίνα λέιζερ ελεγχόμενη από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή κατασκευάζει το 3D αντικείμενο μέσα σε μια δεξαμενή ενός φωτοπολυμερούς υγρού (Manapat et al., 2017).



Εικόνα 1.2.1.1 Φωτοπολυμερισμός

Τα πολυμερή υλικά υγρής μορφής στερεοποιούνται επιλεκτικά μέσα από την έκθεσή τους σε ακτίνες λέιζερ υπεριώδους ακτινοβολίας (UV). Παράλληλα, υπάρχει κι η μικρο-στερεολιθογραφία (PμSL), η οποία βασίζεται στην ίδια λογική με τη διαφορά ότι το μοντέλο σχεδίασης τεμαχίζεται αρχικά σε 2D ψηφιακά μοτίβα, τα οποία στη συνέχεια περνούν μέσα από έναν μειωτικό φακό, ο οποίος προβάλλει τις 2D εικόνες πάνω στην επιφάνεια ρητίνης κι εκεί η υπεριώδης ακτινοβολία ενεργοποιεί τον φωτοπολυμερισμό δημιουργώντας στρώμα – στρώμα το αντικείμενο (Ge et al., 2020).

1.2.1.2 Επιλεκτική Σύντηξη με λέιζερ - Selective Laser sintering (SLS)

Η επιλεκτική σύντηξη με λέιζερ (SLS), όπως προδίδει κι η ονομασία, αφορά μια τεχνική τρισδιάστατης εκτύπωσης που αξιοποιεί το λέιζερ για τον σχηματισμό των 3D αντικειμένων. Με τη βοήθεια λέιζερ, στρώματα κόκκων κονιοποιημένου υλικού συγκολλώνται, ώστε να δημιουργηθεί ένα στέρεο τριών διαστάσεων αντικείμενο (Fina et al., 2017). Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας το αντικείμενο είναι πολύ ζεστό κι αυτός είναι ο λόγος που χρειάζεται λίγο χρόνο πριν αφαιρεθεί από τη συσκευή εκτύπωσης. Η τεχνική αυτή φαίνεται να παρουσιάζει τα εξής θετικά σημεία (Fina et al., 2017):

- Ακρίβεια κατά την εκτύπωση.
- Υψηλή ταχύτητα εκτύπωσης.

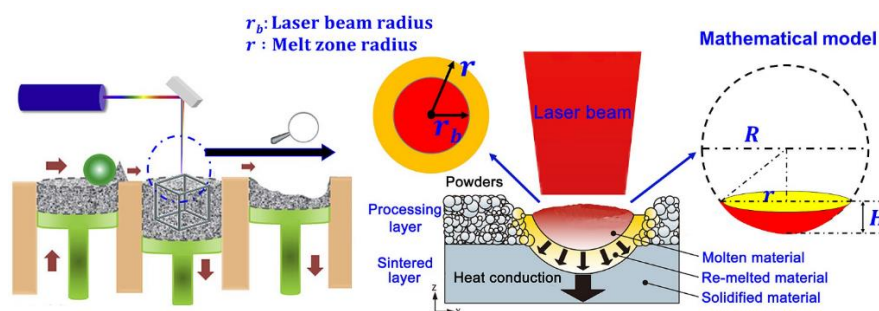
- Αποφυγή οργανικών διαλυτών.

Ωστόσο, εντοπίζονται κι ορισμένα μειονεκτήματα (Fina et al., 2017):

- Λείζερ υψηλής ενέργειας.
- Χρήση ενός υλικού ανά εκτύπωση, γεγονός που περιορίζει την εκτύπωση περίπλοκων γεωμετριών και σχεδίων.

1.2.1.3 Επιλεκτική Τήξη με λέιζερ - Selective Laser Melting (SLM)

Η τεχνική της επιλεκτικής τήξης με λέιζερ (SLM) είναι σχετικά παρόμοια με την SLS, με τη διαφορά ότι η ακτίνα λέιζερ που αξιοποιείται στην τεχνική SLM είναι ικανή να μετατρέψει οποιοδήποτε υλικό σε σκόνη χωρίς περαιτέρω επεξεργασία (Yap et al., 2015). Όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.5, οι κόκκοι σκόνης συνενώνονται στρώμα – στρώμα με τη βοήθεια του λέιζερ, ώστε να παραχθεί το αντικείμενο μέσα από μια επαναλαμβανόμενη διαδικασία.



Εικόνα 1.2.1.3 Επιλεκτική τήξη με λέιζερ

Στα πλεονεκτήματα της τεχνικής αυτής αναφέρονται τα εξής (Yap et al., 2015):

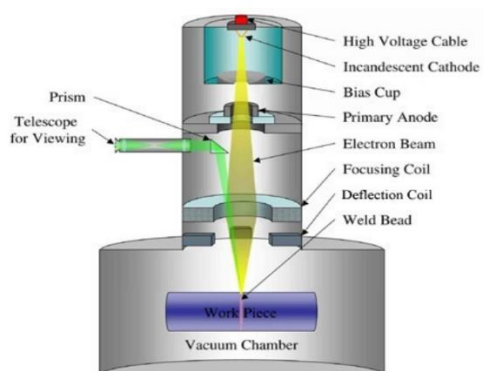
- Δημιουργία σύνθετων γεωμετριών.
- Ποικιλία μετάλλων.
- Παραγωγή πολλαπλών μερών ταυτόχρονα.
- Υψηλή ταχύτητα παραγωγής.

Στα μειονεκτημά της συγκαταλέγονται τα εξής (Yap et al., 2015):

- Παραγωγή σκληρού φινιρίσματος επιφανειών.
- Εξειδικευμένες γνώσεις σχεδιασμού.
- Υψηλό κόστος.

1.2.1.4 Τήξη με δέσμη ηλεκτρονίων - Electron Beam Melting (EBM)

Κατά την τήξη με δέσμη ηλεκτρονίων η τρισδιάστατη εκτύπωση γίνεται με την τήξη μεταλλικής σκόνης μέσω ηλεκτρονίων. Συγκριτικά με τις προηγούμενες τεχνικές η συγκεκριμένη διαφοροποιείται τόσο ως προς την πηγή ενέργειας όσο κι ως προς το υλικό. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.6, στην τεχνική αυτή πηγή ενέργειας είναι μια δέσμη ηλεκτρονίων, ενώ το υλικό που αξιοποιείται είναι το μέταλλο (Murr et al., 2012). Κυρίως χρησιμοποιούνται κράματα τιτανίου, ενώ η χρήση πλαστικών ή κεραμικών δεν είναι εφικτή, καθώς απαιτείται η χρήση ενός ηλεκτρικά αγώγιμου υλικού.

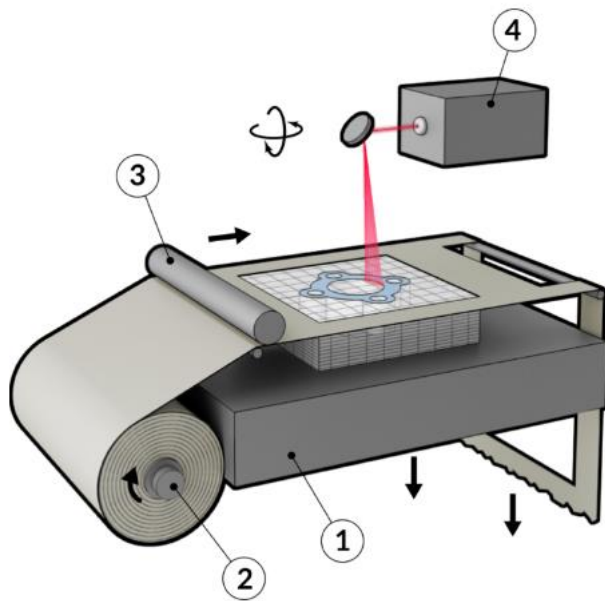


Εικόνα 1.2.1.4 Τήξη με δέσμη ηλεκτρονίων

Για την τρισδιάστατη εκτύπωση μέσω της τεχνικής αυτής απαιτούνται πηγή εκροής δέσμης ηλεκτρονίων, ένα δοχείο σκόνης, ένας επανακατασκευαστής σκόνης και μια θερμαινόμενη επιφάνεια κατασκευής. Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό είναι η απαραίτητη παρουσία κενού κατά την εκτύπωση, καθώς διαφορετικά τα ηλεκτρόνια που εκπέμπονται από την πηγή αλληλεπιδρούν με μόρια του αέρα (Murr et al., 2012).

1.2.1.5 Συγκόλληση επάλληλων φύλλων με λέιζερ - Laminated Object Manufacturing (LOM)

Η συγκόλληση επάλληλων φύλλων με τη χρήση λέιζερ αναφέρεται σε μια διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης που, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.7, φύλλα πλαστικού ή/και χαρτιού ελασματοποιούνται μέσω της θερμότητας και της πίεσης και σε επόμενο στάδιο τεμαχίζονται με τη χρήση λέιζερ, ώστε να σχηματιστεί το επιδιωκόμενο σχήμα (Dermeik & Travitzky, 2020). Η τεχνική αυτή είναι από τις πιο οικονομικές και γρήγορες αναφορικά με την παραγωγή τρισδιάστατων πρωτοτύπων.



Εικόνα 1.2.1.5 Συγκόλληση επάλληλων φύλλων με λέιζερ

Κατά την παραγωγή του τρισδιάστατου αντικειμένου ένας κύλινδρος που εκπέμπει θερμότητα διαπερνά το φύλλο υλικού, τήκεται με τη χρήση κόλλας και πιέζει το φύλλο πάνω στην πλατφόρμα κατασκευής. Με τη βοήθεια του λέιζερ, το οποίο ρυθμίζεται μέσω υπολογιστή, κόβεται το επιδιωκόμενο σχήμα. Ταυτόχρονα, το λέιζερ τέμνει και το περιττό υλικό, γεγονός που εξυπηρετεί στην αφαίρεση του πλεονάσματος υλικού αφότου ολοκληρωθεί η εκτύπωση του αντικειμένου.

1.2.1.6 Κατασκευή μοντέλων μέσω εναπόθεσης / σύντηξης διαδοχικών στρώσεων - Fused Deposition Modeling (FDM)

Η τεχνική αυτή γίνεται με τη χρήση εκτυπωτών που διαθέτουν πολλαπλά ακροφύσια, τα οποία είναι τοποθετημένα πάνω σε θερμαινόμενες κεφαλές και μέσω των οποίων επιτυγχάνεται η αλληπάλληλη εναπόθεση ινών υλικού (Daminabo et al., 2020). Οι ίνες του υλικού τοποθετούνται στα ακροφύσια κι η εναπόθεση γίνεται πάνω σε μια θερμαινόμενη πλατφόρμα. Τα υλικά που αξιοποιούνται ποικίλλουν. Ωστόσο, τα συνηθέστερα είναι το ABS, το νάιλον, καθώς και ποικιλίες υλικών με βάση το ξύλο ή το πλαστικό (Salentijn et al., 2017).

Στα δυνατά σημεία της τεχνικής αυτής συγκαταλέγονται τα εξής (Salentijn et al., 2017):

- Μικρό κόστος παραγωγής.

- Υψηλή ταχύτητα εκτύπωσης, καθώς το υλικό δε χρειάζεται να μετασχηματιστεί σε σκόνη.
- Ευελιξία, λόγω της ποικιλίας των υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Στα αδύναμα σημεία εντοπίζονται τα εξής (Salentijn et al., 2017):
- Η χρήση μόνο υλικών ανθεκτικών στη θερμότητα.
- Η δημιουργία του νήματος ινών, δημιουργώντας ένα επιπλέον στάδιο στην εκτύπωση.

1.2.2 Υλικά τρισδιάστατης εκτύπωσης

Όπως σε κάθε διαδικασία της βιομηχανικής παραγωγής έτσι και στο πεδίο της τρισδιάστατης εκτύπωσης τα χρησιμοποιούμενα υλικά πρέπει να πληρούν σταθερές προδιαγραφές και να εξασφαλίζουν υψηλή ποιότητα κι αντοχή στον χρόνο. Αν κι η τρισδιάστατη εκτύπωση αποτελεί μια καινοτόμα διαδικασία στον χώρο της παραγωγής, υπάρχει διαθέσιμο ένα ευρύ φάσμα υλικών κατασκευής που μπορεί να βρει εφαρμογή σε αυτήν την παραγωγική διαδικασία, όπως θα αναλυθεί και παρακάτω.

Μια ευρέως χρησιμοποιημένη κατηγορία υλικών στον χώρο της τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι τα μέταλλα. Οι εξαιρετικές φυσικές τους ιδιότητες είναι που τα καθιστούν περιζήτητα για την εκτύπωση ανθρωπίνων οργάνων κι αεροδιαστημικών μερών. Τα κύρια μεταλλικά κράματα που αξιοποιούνται στην τρισδιάστατη εκτύπωση είναι:

- Κράματα αλουμινίου, με κύρια εφαρμογή στην ελασματοποίηση φύλλων (Martin et al., 2017).
- Κράματα με βάση το κοβάλτιο, κατάλληλο για τον χώρο της οδοντιατρικής λόγω υψηλής ακαμψίας, ικανότητας ανάκτησης κι επιμήκυνσης (Hitzler et al., 2017).
- Κράματα με βάση το νικέλιο, κυρίως για το πεδίο της αεροδιαστημικής λόγω υψηλής ανεκτικότητας στη διάβρωση κι αντοχής έως 1200° C (Horst et al., 2018).
- Ανοξειδωτοι χάλυβες
- Κράματα τιτανίου, κυρίως για το πεδίο της αεροδιαστημικής και της βιοϊατρικής μηχανικής λόγω ολκιμότητας, υψηλής αντοχής στην οξείδωση και στις υψηλές τάσεις (Uhlmann et al., 2015· Trevisan et al., 2018).

Μια εξίσου πολυχρησιμοποιημένη κατηγορία υλικών αποτελούν τα πολυμερή και τα πλαστικά, καθώς έχουν χαμηλό κόστος παραγωγής, μικρό βάρος κι ευελιξία στην

επεξεργασία (Wang et al., 2017). Τα πολυμερή υλικά αξιοποιούνται με τη μορφή θερμοπλαστικών νημάτων κατασκευασμένων από (Camirero et al., 2018):

- Πολυγαλακτικό Οξύ
- Ακρυλονιτρίλιο – Βουταδιένιο – Στυρένιο
- Πολυπροπυλένιο
- Πολυαιθυλένιο

Τα πολυμερή υλικά βρίσκουν κυρίως εφαρμογή ως βιοϋλικά για την παραγωγή ιατροτεχνολογικών προϊόντων. Ένα παράδειγμα αποτελούν τα ορθοπεδικά εμφυτεύματα (Hitzler et al., 2018).

Μια ακόμη γνωστή κατηγορία υλικών που αξιοποιούνται στην τρισδιάστατη εκτύπωση είναι τα κεραμικά και το σκυρόδεμα, τα οποία μπορούν να εκτυπώσουν τρισδιάστατα μοντέλα χωρίς τον φόβο δημιουργίας μεγάλων πόρων ή ρωγμών λόγω της βελτιστοποίησης των παραμέτρων και του ελέγχου των μηχανικών τους ιδιοτήτων (Baltassarre et al., 2017). Τα κεραμικά παρουσιάζουν μεγάλη ανθεκτικότητα κι αντοχή στη φωτιά. Επίσης, λόγω της ρευστής τους κατάστασης πριν την πήξη είναι κατάλληλα για την κατασκευή τρισδιάστατων αντικειμένων οποιασδήποτε γεωμετρίας κι ως εκ τούτου αξιοποιούνται σε μεγάλο βαθμό στην οδοντιατρική και την αεροδιαστημική (Owen et al., 2018).

Οι βασικές κατηγορίες κεραμικών που χρησιμοποιούνται στην τρισδιάστατη εκτύπωση είναι οι εξής:

- Το οξειδίο του αργίλου ή αλουμίνα (Zocca et al., 2018)
- Τα βιοενεργά γυαλιά (Gmeiner et al., 2015)
- Το ζirkόνιο (Shahrubudin et al., 2019)

Μία ακόμη κατηγορία υλικών που έφεραν επανάσταση στον χώρο της τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι τα σύνθετα υλικά κυρίως εξαιτίας του χαμηλού βάρους τους, της ευελιξίας τους και των προσαρμοστικών τους χαρακτηριστικών. Στην ταξινόμια των σύνθετων υλικών ανήκουν τα εξής:

- Σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες άνθρακα, τα οποία παρουσιάζουν υψηλή αντοχή στη διάβρωση κι ειδική ακαμψία (Hao et al., 2018).
- Σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες γυαλιού, τα οποία προσφέρουν υψηλή απόδοση και χαμηλό κόστος παραγωγής (Liu et al., 2015).

Επίσης, μια κατηγορία υλικών τρισδιάστατης εκτύπωσης, η οποία παρουσιάζει αρκετό ενδιαφέρον, είναι τα «έξυπνα» υλικά. Τα υλικά αυτά χαρακτηρίζονται έτσι,

καθώς έχουν τη δυνατότητα να αλλάζουν ορισμένες ιδιότητές τους, όπως το σχήμα τους, τη γεωμετρία τους, την ακαμψία τους μέσα από την επίδραση εξωτερικών παραγόντων, όπως οι συνθήκες θερμοκρασίας ή το νερό (Lee et al., 2017). Τα υλικά αυτά είναι γνωστά στην αγορά ως κράματα μνήμης σχήματος, όπως τα κράματα με βάση το νικέλιο-τιτάνιο, τα κράματα με βάση το σίδηρο και τα κράματα με βάση τον χαλκό (Yang et al., 2016).

Μια τελευταία κατηγορία υλικών που θα αναφερθεί είναι τα υλικά που χρησιμοποιούνται σε ιδιαίτερες περιστάσεις τρισδιάστατης εκτύπωσης. Μία από αυτές είναι το φαγητό. Η παραγωγή τρισδιάστατων αντικειμένων αξιοποιώντας φαγώσιμα υλικά, όπως σοκολάτα, καραμέλα, κρέας, μακαρόνια κι άλλα, φαίνεται πως είναι εφικτή (Liu et al., 2019). Μάλιστα, μέσω της τρισδιάστατης εκτύπωσης στον χώρο της γαστρονομίας τα φαγώσιμα υλικά διατηρούν τα θρεπτικά τους συστατικά, καθώς και τη γεύση τους (Singh & Raghav, 2018). Ένα ακόμη ιδιαίτερο υλικό είναι η σεληνιακή σκόνη, η οποία δύναται να δημιουργήσει εξαρτήματα πολλαπλών στρωμάτων (Goulas & Friel, 2016). Τέλος, ένα ακόμη ειδικό υλικό τρισδιάστατης εκτύπωσης αποτελεί το ύφασμα, το οποίο αξιοποιείται στην κατασκευή τρισδιάστατων ενδυμάτων ή/και κοσμημάτων (Dilberoglu et al., 2016).

1.3 Εφαρμογές τρισδιάστατης εκτύπωσης

Η τρισδιάστατη εκτύπωση παρά το γεγονός ότι αποτελεί μια καινοτόμα τεχνολογία έχει ήδη αρχίσει να αξιοποιείται στη βιομηχανική παραγωγή από επαγγελματίες διαφορετικών κλάδων. Από την αυτοκινητοβιομηχανία και την αρχιτεκτονική μέχρι την ένδυση και τα τρόφιμα η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει βρει ήδη εφαρμογή παράγοντας πρωτότυπα αντικείμενα κι εξαρτήματα. Μελλοντικά αναμένεται να διαδραματίσει μεγαλύτερο ρόλο στον χώρο της βιομηχανίας.

1.3.1 Αεροναυπηγική

Ο κλάδος της αεροναυπηγικής ήταν ένας από τους πρώτους που επιχείρησε να αξιοποιήσει τις δυνατότητες της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Στην αεροναυπηγική βιομηχανία η τρισδιάστατη εκτύπωση συνεισφέρει στην παραγωγή εξαρτημάτων που παρουσιάζουν μεγάλη ανθεκτικότητα και μικρότερο βάρος (Joshi & Sheikh, 2015). Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι ελαχιστοποιείται η αντίσταση του αέρα κι ως εκ τούτου

μειώνονται τα απαιτούμενα καύσιμα ανά πτήση. Παράλληλα, η μείωση των απαιτούμενων καυσίμων σημαίνει και περιορισμός εκπομπών ρύπων, γεγονός που συμβάλει στον περιορισμό των περιβαλλοντικών προβλημάτων.

Επίσης, στον τομέα της αεροναυπηγικής η συνηθέστερη ανάγκη είναι η παραγωγή ανταλλακτικών κι εξαρτημάτων, όπως οι κινητήρες, τα οποία έχουν υψηλό κόστος. Σε αυτό η τρισδιάστατη εκτύπωση συνδράμει σημαντικά, καθώς προσφέρει τη δυνατότητα παραγωγής αντίστοιχων εξαρτημάτων κι ανταλλακτικών σε σύντομο χρόνο και μικρότερο κόστος καταναλώνοντας και τη λιγότερη δυνατή ενέργεια (Wang et al., 2019). Το βασικότερο υλικό που χρησιμοποιείται για την τρισδιάστατη εκτύπωση των εξαρτημάτων είναι τα κράματα με βάση το νικέλιο λόγω του μεγάλου βαθμού ανθεκτικότητας στον χρόνο και της αντοχής στη διάβρωση (Uriondo et al., 2015).

1.3.2 Αυτοκινητοβιομηχανία

Στον χώρο της αυτοκινητοβιομηχανίας η τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης βρίσκει μεγάλη εφαρμογή λόγω του χαμηλού κόστους των παραγόμενων υλικών, μερών κι εξαρτημάτων και του σύντομου χρόνου της παραγωγής αυτών (Maghnani, 2015). Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές διαδικασίες παραγωγής τα 3D πρωτότυπα παράγονται με τη μικρότερη δυνατή κατανάλωση και σπατάλη υλικών. Επιπλέον, η τρισδιάστατη εκτύπωση επιτρέπει στις αυτοκινητοβιομηχανίες να εξετάσουν εναλλακτικές προσεγγίσεις για τη βελτιστοποίηση της παραγωγής.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η εταιρεία Ford, η οποία αξιοποιεί τη 3D εκτύπωση για την παραγωγή πρωτότυπων κι εξαρτημάτων κινητήρα (Sreehitha, 2017). Άλλο ένα παράδειγμα αποτελεί η εταιρεία AUDI, η οποία σε συνεργασία με την SLM Solution Group AG παράγουν ανταλλακτικά οχημάτων (Maghnani, 2015). Τέλος, αξίζει να αναφερθεί η περίπτωση OLLI. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.8, πρόκειται για ένα τρισδιάστατα εκτυπωμένο λεωφορείο, το οποίο είναι ανακυκλώσιμο, ηλεκτρικό και κινείται χωρίς οδηγό (Shahrubudin et al., 2019).



Εικόνα 1.3.2 Τρισδιάστατα εκτυπωμένο λεωφορείο

1.3.3 Βιομηχανία τροφίμων

Εξαιτίας της αυξανόμενης ανάγκης παραγωγής συγκεκριμένων διατροφικών σκευασμάτων για ομάδες ατόμων με εξειδικευμένες διατροφικές ανάγκες, όπως οι αθλητές, τα μωρά, οι έγκυες, οι οποίες απαιτούν διαφορετικές συγκεντρώσεις θρεπτικών συστατικών, ενίσχυση των υγιεινών συστατικών κι απόρριψη των περιττών συστατικών, η τρισδιάστατη εκτύπωση άρχισε να βρίσκει εφαρμογή και σε αυτόν τον κλάδο (Dankar et al., 2018).

Η ανάπτυξη εξατομικευμένων τροφίμων απαιτεί λεπτομερή σχεδιασμό. Σε αυτό η τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί να συνεισφέρει δεδομένου ότι, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.9, επιτρέπει την εκτύπωση τροφίμων μέσω εναπόθεσης διαδοχικών και λεπτών στρωμάτων υλικού που προέρχονται απευθείας από τα δεδομένα σχεδιασμού με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή (Liu et al., 2019). Με την τρισδιάστατη εκτύπωση συνδυασμός υλικών αναμειγνύονται δημιουργώντας περίπλοκες δομές και σχήματα (Liu et al., 2017).



Εικόνα 1.3.3 Τρισδιάστατη εκτύπωση τροφίμων

1.3.4 Ιατρική

Ένας τομέας στον οποίο η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει αξιοποιηθεί σε μεγάλο βαθμό είναι εκείνος της ιατρικής. Ήδη έχει χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή δέρματος (Pouchet et al., 2017), για την παρασκευή φαρμάκων (Norman et al., 2017), για τη δημιουργία οστών και χόνδρων (De Mori et al., 2018), για την κατασκευή ιστών κι οργάνων (Liu et al., 2016), καθώς και για τη δημιουργία μοντέλων για εκπαιδευτική χρήση, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.10.



Εικόνα 1.3.4 Δημιουργία μοντέλου

Η εφαρμογή της τρισδιάστατης εκτύπωσης στον χώρο της ιατρικής δίνει τη δυνατότητα παραγωγής βιοϊατρικών προϊόντων που προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα όπως τα εξής:

- Παραγωγή δέρματος σε χαμηλό κόστος, το οποίο μπορεί να αξιοποιηθεί για τη δοκιμή φαρμακευτικών, καλλυντικών και χημικών προϊόντων, με αποτέλεσμα ο ερευνητής να έχει πιο ακριβή αποτελέσματα χρησιμοποιώντας δέρμα αντίστοιχο του ανθρώπου (Yan et al., 2018).
- Παραγωγή φαρμάκων πολύπλοκων δοσολογιών με μεγάλο βαθμό αποτελεσματικότητας (Ventola, 2014).
- Παραγωγή χόνδρων κι οστών για την αποκατάσταση μετά από τραύμα ή ασθένεια (Bogue, 2013).
- Παραγωγή οργάνων που προσομοιώνουν προβλήματα και παθήσεις που μπορεί να προκληθούν από ατυχήματα, ασθένειες ή γενετικές ανωμαλίες, ώστε να αξιοποιηθούν στην έρευνα.
- Σχηματισμός ελεγχόμενων μοντέλων καρκινικών ιστών για την ενίσχυση της έρευνας σε αυτό το πεδίο.
- Δημιουργία μοντέλων που προσομοιάζουν την πραγματική κατάσταση ενός ασθενικού ατόμου, ώστε να επιτυγχάνονται εκπαιδευτικές πρακτικές.

1.3.5 Κατασκευαστικός τομέας

Στον κλάδο της κατασκευής η τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί να αποτελέσει μια τεχνική διαδικασία με παράγωγα φιλικά προς το περιβάλλον και με απεριόριστες επιλογές κατασκευής οποιασδήποτε γεωμετρικής πολυπλοκότητας. Η εφαρμογή της μπορεί να κυμανθεί από την παραγωγή κατασκευαστικών στοιχείων μέχρι και την εξολοκλήρου κατασκευή ενός κτιρίου.

Η Μοντελοποίηση Πληροφοριών Κτιρίου (Building Information Modelling), η οποία αναφέρεται στην ψηφιακή αναπαράσταση των δομών ενός κτιρίου, συνδέεται άμεσα με τις δυνατότητες που παρέχει η τρισδιάστατη εκτύπωση, καθώς μέσω του 3D Printing μπορεί να ενισχυθεί η μέθοδος σχεδιασμού κι ο εντοπισμός πιθανών προβληματικών πτυχών μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο τον χρόνο υλοποίησης ενός έργου κι αυξάνοντας τον βαθμό αποτελεσματικότητας (Sakin & Kiroglu, 2017). Επίσης, οι κατασκευαστές έχουν τη δυνατότητα της γρήγορης κατασκευής μακέτας ενός κτιρίου,

μέσω της οποίας οι ενδιαφερόμενοι πελάτες θα μπορούν να κάνουν προτάσεις αλλαγών ή βελτίωσης, ώστε να παραχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα (Hager et al., 2016).

1.3.6 Ηλεκτρική ενέργεια

Δεδομένης της έντονης παρουσίας της τρισδιάστατης εκτύπωσης στον χώρο των επιστημών οι κατασκευαστές εξετάζουν ολοένα και περισσότερο τις δυνατότητες του 3D Printing σε ποικίλους τομείς επεκτείνοντας έτσι το εύρος της εφαρμογής αυτής της νέας τεχνολογίας. Μέχρι σήμερα η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει αξιοποιηθεί ακόμη και για την κατασκευή ηλεκτρονικών δομών κι ηλεκτροδίων (Foo et al., 2018).

Η διαδικασία παραγωγής ενός 3D ηλεκτροδίου μέσω του Fused Deposition Modeling (FDM) προσφέρει τη δυνατότητα κατασκευής ηλεκτροδίων χαμηλού κόστους κι υψηλής ανθεκτικότητας στον χρόνο. Μάλιστα, σε αντίθεση με τα ηλεκτρόδια του εμπορίου, τα 3D εκτυπωμένα ηλεκτρόδια μπορούν να σχεδιαστούν με μεγαλύτερη ακρίβεια προσαρμογής για τις συσκευές στις οποίες θα αξιοποιηθούν (Saengchairat et al., 2017).

1.3.7 Βιομηχανία της μόδας

Ο συνδυασμός της τρισδιάστατης εκτύπωσης με τη μόδα μπορεί σε μια πρώτη ανάγνωση να φαντάζει δύσκολος. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια αρχίζει να γίνεται καθημερινή πρακτική στη βιομηχανία της ένδυσης και της υπόδυσης. Ήδη εταιρείες όπως η Nike, η New Balance κι η Adidas κατασκευάζουν αθλητικά παπούτσια αξιοποιώντας την τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης (Vanderploeg et al., 2017).

Επίσης, στην παραγωγή ρούχων η τρισδιάστατη εκτύπωση συνεισφέρει σε σημαντικό βαθμό δίνοντας τη δυνατότητα παραγωγής ενδυμάτων χωρίς την ανάγκη σχεδιασμού των ρούχων σε καλούπια (Kim & Kang, 2015). Παράλληλα, για τις ανάγκες παραγωγής ενδυμάτων η τρισδιάστατη εκτύπωση γίνεται μέσα από την χρήση ειδικών συστημάτων πλεξίματος, τα οποία είναι ικανά να παράγουν ακόμα και στολίδια για παραδοσιακές φορεσιές (Shahrubudin et al., 2019).

Ακόμη, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.11, η τρισδιάστατη εκτύπωση χρησιμοποιείται και για την κατασκευή κοσμημάτων κι αξεσουάρ συνδυαστικά με τις παραδοσιακές τεχνικές. Οι κοσμηματοπώλες χρησιμοποιούν προγράμματα CAD για τον

ψηφιακό σχεδιασμό των κοσμημάτων κι έναν 3D εκτυπωτή, μέσω του οποίου παράγονται τα σχέδια, τα οποία στη συνέχεια θα ακολουθήσουν την παραδοσιακή διαδικασία χύτευσης (Yap & Yeong, 2014).



Εικόνα 1.3.7 Τρισδιάστατα εκτυπωμένα κοσμήματα

Ένα θετικό σημείο της αξιοποίησης αυτής της τεχνολογίας στη βιομηχανία της μόδας είναι κυρίως η δυνατότητα εξατομικευμένου σχεδιασμού ανάλογα με τις ανάγκες και τις προτιμήσεις του καταναλωτή. Παράλληλα, μέσω της τρισδιάστατης εκτύπωσης μπορούν να παραχθούν πολλά προϊόντα σε σύντομο χρόνο και χαμηλό κόστος παραγωγής (Attaran, 2017).

2. Η εκπαιδευτική χρήση των τρισδιάστατων εκτυπωτών

Ένας τομέας εφαρμογής της τρισδιάστατης εκτύπωσης αποτελεί κι η εκπαίδευση. Η χρήση της καινοτόμου αυτής τεχνολογίας στον εκπαιδευτικό τομέα είναι μια προσέγγιση που ακολουθείται τα τελευταία χρόνια σε συγκεκριμένα πεδία της διδακτικής πρακτικής. Όπως θα παρουσιαστεί και στις επόμενες ενότητες, η δημιουργία πρωτοτύπων μέσω της χρήσης τρισδιάστατων εκτυπωτών είναι μια πρακτική με εκπαιδευτικές προεκτάσεις σε διάφορες βαθμίδες εκπαίδευσης, η οποία φαίνεται να βοηθά στην επίτευξη των μαθησιακών στόχων και στην ανάπτυξη δεξιοτήτων.

2.1 Πεδία εκπαιδευτικής εφαρμογής

2.1.1 Σχολική εκπαίδευση

Το γεγονός ότι οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές αρχίζουν να έχουν χαμηλό κόστος με την πάροδο των χρόνων επιτρέπει την ένταξή τους και στο σχολικό περιβάλλον στο πλαίσιο εφαρμογής μιας πολλά υποσχόμενης καινοτόμου τεχνολογίας (Buehler et al., 2016). Η τρισδιάστατη εκτύπωση φαίνεται πως εφαρμόζεται στο ευρύ φάσμα της σχολικής εκπαίδευσης ξεκινώντας από την πρωτοβάθμια και περνώντας στη δευτεροβάθμια (Ford & Minshall, 2018). Ωστόσο, περισσότερα δεδομένα αναφορικά με την εφαρμογή της τρισδιάστατης εκτύπωσης στα σχολεία προκύπτουν από σχέδια μαθήματος σε επίπεδο Γυμνασίου και Λυκείου (Pearson & Dubé, 2022).

Οι δραστηριότητες που δημιουργούνται για τη σχολική εκπαίδευση έχουν ως βάση την προώθηση της ενεργητικής και της παθητικής ενσωμάτωσης της χρήσης της τρισδιάστατης εκτύπωσης (Ford & Minshall, 2018). Ουσιαστικά, αυτό σημαίνει ότι τα σχέδια μαθήματος που εμπλέκουν ενεργητικά την τρισδιάστατη εκτύπωση στη μαθησιακή διαδικασία στοχεύουν στη διδασκαλία δεξιοτήτων χρήσης της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Από την άλλη, η παθητική εμπλοκή της τρισδιάστατης εκτύπωσης στην εκπαιδευτική πρακτική αναφέρεται στην υποστήριξη της διδασκαλίας άλλων μαθημάτων μέσω της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Στη δεύτερη περίπτωση πάλι αναπτύσσονται

δεξιότητες χρήσης των τρισδιάστατων εκτυπωτών, χωρίς όμως αυτό να αποτελεί τον αυτοσκοπό του μαθήματος.

Οι εκπαιδευτικοί δημοτικής εκπαίδευσης, αν κι επιθυμούν να εντάξουν την τρισδιάστατη εκτύπωση στη διδακτική τους πρακτική, φαίνεται να δυσκολεύονται ως προς τον τρόπο με τον οποίο θα το πραγματοποιήσουν. Για τον λόγο έχουν σχεδιαστεί διδακτικά σενάρια για το Δημοτικό και το Γυμνάσιο βασισμένα σε πιλοτικά προγράμματα που είχαν εφαρμοστεί σε μαθητές Λυκείου. Τα κυριότερα μαθήματα στα οποία η τρισδιάστατη εκτύπωση ενσωματώνεται ως αντικείμενο ή μέσο διδασκαλίας σε επίπεδο πρωτοβάθμιας και δευτεροβάθμιας εκπαίδευσης είναι η φυσική και τα μαθηματικά (Bull et al., 2014), η χημεία (Perna & Wiedmer, 2020), η βιολογία (Hansen et al., 2020) και το STEM (Arvanitidi et al., 2019).

Αναφορικά με το μάθημα της φυσικής έχουν εφαρμοστεί για ερευνητικές ανάγκες μαθήματα για τη διδασκαλία σύνθετων συστημάτων, όπως το αναπνευστικό, σε μαθητές γυμνασίου και λυκείου με την ενσωμάτωση της τρισδιάστατης εκτύπωσης για τον σχεδιασμό και την παραγωγή πνευμόνων, με αποτέλεσμα οι μαθητές να μάθουν σε μεγαλύτερο βαθμό τη δομή και τη λειτουργία τους σε σχέση με την παραδοσιακή μέθοδο (Hmelo et al., 2000). Επίσης, άλλο ένα παράδειγμα διδακτικής πρακτικής αποτελεί η δημιουργία συστημάτων συναγερμού για την κατανόηση της μεταφοράς ενέργειας και των ηλεκτρικών κυκλωμάτων, όπου και πάλι οι μαθητές που αξιοποίησαν την τρισδιάστατη εκτύπωση ως μέσο πέτυχαν μεγαλύτερα μαθησιακά αποτελέσματα (Silk et al., 2009).

Για το μάθημα των μαθηματικών η τρισδιάστατη εκτύπωση συνδυαστικά με τα CAD εργαλεία σχεδιασμού φαίνεται να πετυχαίνει σημαντικά μαθησιακά αποτελέσματα στη διδασκαλία των σχημάτων, της κλίμακας και στην ανάπτυξη χωροταξικών δεξιοτήτων μέσα από την κατασκευή τρισδιάστατων στερεών σωμάτων και δωματίων σπιτιού σε μικρογραφία (Hmelo et al., 2000·Burghardt et al., 2010). Παράλληλα, για το μάθημα της χημείας η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει αξιοποιηθεί για τη διδασκαλία των μοριακών μοντέλων στη Δευτεροβάθμια Εκπαίδευση, μέσω της δημιουργίας των αντίστοιχων πρωτοτύπων από τους μαθητές (Perna & Wiedmer, 2020). Επίσης, η τρισδιάστατη εκτύπωση χρησιμοποιείται κι ως μέσο για τη δημιουργία εργαστηριακών οργάνων για τον εξοπλισμό των εργαστηρίων.

Στον τομέα της βιολογίας τόσο για τους μαθητές της Πρωτοβάθμιας όσο και της Δευτεροβάθμιας Εκπαίδευσης οι διδακτικές πρακτικές που έχουν εφαρμοστεί αξιοποιώντας τις δυνατότητες της τρισδιάστατης εκτύπωσης επικεντρώνονται στη

διδασκαλία της ανθρώπινης ανατομίας, όπως η μελέτη των οστών, των δοντιών, των οργάνων, και της μοριακής βιολογίας, όπως η μελέτη των πρωτεϊνών και των σύνθετων μοριακών δομών. Στον τομέα του STEM οι περισσότερες εφαρμογές έχουν γίνει με μαθητές Λυκείου και με κύριο στόχο την καλλιέργεια χωροταξικών δεξιοτήτων, της δημιουργικότητας και των ικανοτήτων επίλυσης προβλήματος με δραστηριότητες που σχετίζονται με τη μηχανική (Ford & Minshall, 2018).

2.1.2 Πανεπιστημιακή Εκπαίδευση

Η υιοθέτηση της τρισδιάστατης εκτύπωσης στα Πανεπιστήμια φαίνεται να είναι μεγαλύτερη συγκριτικά με άλλους χώρους εκπαίδευσης (Ford & Minshall, 2018). Στον χώρο της πανεπιστημιακής εκπαίδευσης η τρισδιάστατη εκτύπωση αξιοποιείται ως αυτόνομο μάθημα, ως μέσο για την απόκτηση ακαδημαϊκών γνώσεων κι ως μέσο για την παραγωγή δοκιμαστικών μοντέλων.

Σε αρκετά Πανεπιστήμια οι φοιτητές καλούνται στο πλαίσιο μαθημάτων μηχανικής να δημιουργήσουν οι ίδιοι τρισδιάστατους εκτυπωτές (Junk & Matt, 2015). Επίσης, στους τομείς των φυσικών επιστημών η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει ενσωματωθεί για την παραγωγή μοντέλων που αξιοποιούνται στα εργαστηριακά μαθήματα ως μέσα για την κατανόηση εννοιών (Bagley & Galpin, 2015). Παρομοίως, χρησιμοποιείται και για την παραγωγή δοκιμαστικών μοντέλων που αξιοποιούνται σε πειράματα. Σε αυτό το πλαίσιο οι φοιτητές πειραματίζονται και με τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιούνται στην τρισδιάστατη εκτύπωση. Για τα προγράμματα σπουδών μηχανικής φαίνεται ότι τα πολυμερή τρισδιάστατα εκτυπωμένα αντικείμενα είναι πιο αποτελεσματικά.

Επιπλέον, η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει γίνει ιδιαίτερα δημοφιλές εκπαιδευτικό εργαλείο για τη διδασκαλία μαθημάτων ρομποτικής, καθώς αποτελεί ένα χαμηλού κόστους μέσο για την κατασκευή ρομποτικών μερών (Ford & Minshall, 2018). Οι φοιτητές μπορούν να δημιουργήσουν ρομπότ μέσω λογισμικών ανοιχτού κώδικα, να κάνουν τροποποιήσεις και να διαμοιράσουν τα σχέδιά τους στην εκπαιδευτική κοινότητα. Τα μαθήματα αυτά οργανώνονται ως μάθηση βάσει έργου (project-based learning) και διαπερνούν ένα μεγάλο εύρος μαθημάτων των προγραμμάτων σπουδών των

πανεπιστημιακών ιδρυμάτων ανά τον κόσμο (Ford & Minshall, 2018). Η ανάγκη για την ανάπτυξη δεξιοτήτων του 21^{ου} αιώνα έχει οδηγήσει τα Πανεπιστήμια να ενσωματώσουν την τρισδιάστατη εκτύπωση στα προγράμματα σπουδών τους. Ένα παράδειγμα αποτελεί το Πανεπιστήμιο της Βόρειας Γεωργίας, το «Systems», το οποίο αξιοποιεί την τρισδιάστατη εκτύπωση στο μάθημα γραφικών, ώστε οι φοιτητές να αναπτύξουν δεξιότητες μοντελοποίησης, σάρωσης και ταχείας παραγωγής πρωτοτύπων.

Στα περισσότερα Πανεπιστήμια τα μαθήματα τρισδιάστατης εκτύπωσης επικεντρώνονται στον σχεδιασμό και στη βασική μοντελοποίηση μέσω λογισμικών CAD, στην ταχεία προτυποποίηση και την παραγωγή ολοκληρωμένων προϊόντων (Ford & Minshall, 2018). Τα μαθήματα αυτά βοηθούν τους φοιτητές να αναπτύξουν δεξιότητες μηχανικής κατεργασίας κάνοντας συνδέσεις με άλλα μαθήματα, όπως τα μαθηματικά.

2.1.3 Ειδική Αγωγή

Στον χώρο της Ειδικής Αγωγής η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει χρησιμοποιηθεί για την εφαρμογή δραστηριοτήτων σε άτομα με οπτικές, κινητικές και γνωστικές δυσκολίες, ώστε να αναπτύξουν γνώσεις και δεξιότητες (Ford & Minshall, 2018). Σε αρκετές περιπτώσεις η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει βοηθήσει στην ανάπτυξη συστημάτων για την ενίσχυση της εμπλοκής των μαθητών με οπτικές, κινητικές και γνωστικές δυσκολίες σε δραστηριότητες STEM (Buehler et al., 2016).

Ωστόσο, η κυριότερη συνδρομή της τρισδιάστατης εκτύπωσης στον χώρο της Ειδικής Αγωγής συνδέεται με τη δημιουργία τεχνουργημάτων, τα οποία αξιοποιούνται ως μέσα υποστηρικτικής τεχνολογίας για τους μαθητές με αναπηρίες (Horowitz & Schultz, 2014). Με τον τρόπο αυτό δίνεται και σε αυτούς τους μαθητές η δυνατότητα να εκπαιδευτούν σε ένα μαθητικό έργο σε πραγματικές συνθήκες ξεπερνώντας τα εμπόδια που οι δυσκολίες του μπορεί να προκαλούν. Ορισμένα παραδείγματα αποτελούν οι απτικές ιστορίες για μαθητές με οπτικές αναπηρίες και προβλήματα όρασης (Ford & Minshall, 2018).

Βέβαια, αξίζει να σημειωθεί ότι η εφαρμογή της τρισδιάστατης εκτύπωσης σε μαθητές με αναπηρίες δεν είναι εύκολη υπόθεση. Αυτό συμβαίνει λόγω του γεγονότος ότι οι μαθητές χρειάζονται πολύ χρόνο, ώστε να εκπαιδευτούν στην χρήση των

λογισμικών σχεδιασμού CAD, με αποτέλεσμα να χάνουν γρήγορα το ενδιαφέρον τους (Buehler et al., 2016).

2.1.4 Βιβλιοθήκες

Ένα ακόμα πεδίο στο οποίο η τρισδιάστατη εκτύπωση βρίσκει εφαρμογή είναι οι βιβλιοθήκες, πρακτική που εντάσσεται στο πλαίσιο της μη τυπικής εκπαίδευσης σε αντίθεση με τα πεδία που αναφέρθηκαν στις προηγούμενες ενότητες του κεφαλαίου. Οι βιβλιοθήκες, στις οποίες εντοπίζεται η εφαρμογή της τεχνολογίας της τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι οι εκείνες των σχολείων, οι βιβλιοθήκες των πανεπιστημίων (Bengtson & Bunnnett, 2012), καθώς κι εκείνες που δεν στεγάζονται εντός κάποιας εκπαιδευτικής δομής (Finley, 2016).

Οι βιβλιοθήκες λειτουργούν ως χώροι που επιτρέπουν τον διαμοιρασμό ιδεών και γνώσεων μεταξύ των χρηστών των βιβλιοθηκών, των βιβλιοθηκονόμων και των εκπαιδευτών παρέχοντας ελεύθερη πρόσβαση στο ευρύ κοινό (Nowlan, 2015). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα τελευταία χρόνια οι βιβλιοθήκες να αντιμετωπίζονται ως δημιουργικοί χώροι, όπου νέες ψηφιακές τεχνολογίες, όπως η τρισδιάστατη εκτύπωση μπορούν να αξιοποιούνται (Prato & Britton, 2015) προωθώντας έτσι τη δημιουργικότητα και τον πειραματισμό.

Στις πανεπιστημιακές βιβλιοθήκες φοιτητές διαφορετικών τμημάτων πειραματίζονται αξιοποιώντας την τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης στο πλαίσιο της μη τυπικής εκπαίδευσης (Herron & Kaneshiro, 2017). Σε αυτό το πλαίσιο οργανώνονται workshops για φοιτητές που προσανατολίζονται στον σχεδιασμό, καθώς και για ερευνητές τρισδιάστατης οπτικής απεικόνισης (Purpur et al., 2016). Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το πιλοτικό πρόγραμμα τρισδιάστατης εκτύπωσης και σάρωσης προσβάσιμο σε φοιτητές ανεξαρτήτως κατεύθυνσης του Πανεπιστημίου Dalhousie (Groenendyk & Gallant, 2013). Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές και σαρωτές που αξιοποιήθηκαν είχαν χαμηλό κόστος. Οι βιβλιοθηκονόμοι θεώρησαν ότι πέρα από τα workshops, που είναι ωφέλιμα για τους φοιτητές, η τρισδιάστατη σάρωση κι εκτύπωση θα βοηθήσει στο να μπορέσουν να δημιουργήσουν ένα ψηφιακό και μη αρχείο πολιτιστικών αντικειμένων προσβάσιμο σε φοιτητές και καθηγητές (Groenendyk & Gallant, 2013).

Ο ρόλος των βιβλιοθηκονόμων κρίνεται καίριος, καθώς είναι εκείνοι που θα κληθούν να χειριστούν και να συντηρούν τα μηχανήματα που υποστηρίζουν την τρισδιάστατη εκτύπωση. Αυτό συνεπάγεται ότι θα χρειαστεί να εκπαιδευτούν προτού αυτή η νέα τεχνολογία εισαχθεί στη βιβλιοθήκη της ευθύνης τους (Ford & Minshall, 2018). Επιπλέον, ο ρόλος τους έχει κι εκπαιδευτικό χαρακτήρα, καθώς καλούνται να παρέχουν υποστήριξη στους εκπαιδευτικούς σχολείων, οι οποίοι επιθυμούν να εντάξουν στη διδασκαλία τους προγράμματα τρισδιάστατης εκτύπωσης χωρίς οι ίδιοι να έχουν αντίστοιχη γνώση ή κατάρτιση (Plemmons, 2014). Ένα αντίστοιχο παράδειγμα αποτελεί μια συνεργασία που έλαβε χώρα στο LaGuardia Community College μεταξύ ενός βιβλιοθηκονόμου κι ενός εκπαιδευτικού, οι οποίοι ανέπτυξαν ένα τρισδιάστατο μοντέλο για τη διδασκαλία μαθήματος βιολογίας (Letnikova & Xu, 2017).

2.2 Θεωρίες μάθησης συνδεδεμένες με τους τρισδιάστατους εκτυπωτές

Η τρισδιάστατη εκτύπωση, όπως φάνηκε από τις παραπάνω ενότητες, αξιοποιείται σε πολλά και διαφορετικά εκπαιδευτικά περιβάλλοντα. Ωστόσο, η κατανόηση του τρόπου με τον οποίο η νέα αυτή τεχνολογία μπορεί να επηρεάσει τη μάθηση απαιτεί τη μελέτη των θεωριών μάθησης που έχουν αξιοποιηθεί μέχρι τώρα για τη διερεύνηση της εκπαιδευτικής χρήσης της τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Οι θεωρίες μάθησης που έχουν αξιοποιηθεί από τους ερευνητές για την εκπαιδευτική αξιοποίηση της τρισδιάστατης εκπαίδευσης είναι (Pearson & Dubé, 2022):

- Η θεωρία της Εμπλαισιωμένης ή Εγκαθιδρυμένης Μάθησης (Situated Learning)
- Η Βιωματική Μάθηση (Experiential Learning)
- Η θεωρία της Κριτικής Συγκρότησης (Critical Making)
- Ο Κονστρουκτιβισμός (Constructionism)
- Η Αυτοκατευθυνόμενη Μάθηση (Self-Directed Learning)

Όλες οι παραπάνω θεωρίες μάθησης αξιοποιήθηκαν ως βάση για την ανάλυση του τρόπου με τον οποίο η τρισδιάστατη εκτύπωση βοηθά στην κατάκτηση γνώσης από τους μαθητές. Καθεμιά θεωρία προσφέρει μια διαφορετική οπτική, αλλά σε όλες τονίζεται η μετασχηματιστική αξία της τρισδιάστατης εκτύπωσης, την οποία αντιμετωπίζουν ως μέσο για τη δημιουργία νοήματος (Pearson & Dubé, 2022).

2.2.1 Η θεωρία της Εμπλαισιωμένης ή Εγκαθιδρυμένης Μάθησης (Situated Learning)

Η τρισδιάστατη εκτύπωση δίνει τη δυνατότητα να δημιουργηθεί ένα αντικείμενο από τους μαθητές και στη συνέχεια αυτό να αξιοποιηθεί σε ένα πραγματικό πλαίσιο. Αυτός είναι κι ο λόγος που η τρισδιάστατη εκτύπωση συνδέεται με τη θεωρία της Εμπλαισιωμένης Μάθησης (Situated Learning). Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή η μάθηση επιτυγχάνεται μέσα σε ένα πλαίσιο ρεαλιστικών συνθηκών ζωής, το οποίο βοηθά τους μαθητές να αποκτήσουν γνώσεις και συγχρόνως να κατανοούν τη χρησιμότητα αυτών μέσω της άμεσης αίσθησης του σκοπού που αυτές εξυπηρετούν (Kolb & Kolb, 2005).

Οι συνθήκες πραγματικών καταστάσεων, στις οποίες εμπλέκονται οι μαθητές κατά την εφαρμογή της τρισδιάστατης εκτύπωσης, είναι οι διαδικασίες σχεδιασμού και δημιουργίας των αντικειμένων, μέσα από τις οποίες οι μαθητές επηρεάζουν το πώς και το τι μαθαίνουν κάνοντας τις απαραίτητες προσθήκες κι αφαιρέσεις μερών των παραγόμενων αντικειμένων, ώστε αυτά να ικανοποιούν τις ανάγκες για τις οποίες δημιουργούνται (Pearson & Dubé, 2022).

Στην Εικόνα 2.1 απεικονίζεται ένα αντίστοιχο παράδειγμα, όπου εργοθεραπευτές βοήθησαν στη δημιουργία ενός βοηθητικού χεριού με τη χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης για μαθητές με δυσκολίες στη λεπτή κινητικότητα με τέτοια ακρίβεια στον σχεδιασμό, ώστε να ικανοποιούνται πλήρως οι ανάγκες των μαθητών (Buehler et al., 2016). Ουσιαστικά, οι εργοθεραπευτές χρησιμοποίησαν την τρισδιάστατη εκτύπωση ως μέσο για την επίτευξη των μαθησιακών τους στόχων δημιουργώντας ένα εργαλείο που ικανοποιεί πραγματικές ανάγκες.



Εικόνα 2.2.1 GribFab βοηθητικό χέρι

Κεντρική θέση στη θεωρία της Εμπλαισιωμένης Μάθησης είναι η δημιουργία κοινότητας που προωθεί τον διαμοιρασμό της γνώσης και τη συνεργασία των μελών για την κατάκτησή της. Αυτό το πλαίσιο είναι που δημιουργείται στα εκπαιδευτικά περιβάλλοντα, όπου η τρισδιάστατη εκτύπωση λαμβάνει χώρα. Μάλιστα, φαίνεται πως το γεγονός ότι η μάθηση γίνεται μέσα από ένα περιβάλλον προσανατολισμένο στην κοινότητα παραγκωνίζοντας τη δασκαλοκεντρική διδασκαλία αποτελεί και βασικό πλεονέκτημα της εκπαιδευτικής χρήσης της τρισδιάστατης εκτύπωσης (Cohen et al., 2017).

2.2.2 Η Βιωματική Μάθηση (Experiential Learning)

Η Βιωματική Μάθηση (Experiential Learning) αποτελεί μια ακόμη θεωρία μάθησης, η οποία έχει χρησιμοποιηθεί για να ερμηνευθεί ο τρόπος με τον οποίο η τρισδιάστατη εκτύπωση εμπλέκει τους μαθητές στη μαθησιακή διαδικασία (Hsiao et al., 2019-Pantazis & Prianolou, 2017). Η βάση αυτής της θεωρίας μάθησης είναι η αλληλεπίδραση του ατόμου με το περιβάλλον, το οποίο ωθεί το άτομο να προβληματιστεί, να σκεφτεί και να δράσει σχεδιάζοντας και δοκιμάζοντας (Kolb & Kolb, 2005). Πιο συγκεκριμένα, οι εμπλεκόμενοι μαθητές λειτουργούν σε ένα πλαίσιο πραγματικών συνθηκών που εμπεριέχει μια κυκλική πορεία στοχασμού, παρατήρησης και ενεργητικού πειραματισμού. Η εφαρμογή αυτής της θεωρίας κατά την εκπαιδευτική χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης περιλαμβάνει αυτήν την κυκλική βιωματική πορεία συνδυαστικά με τη δημιουργία αντικείμενων σε πραγματικές συνθήκες.

Η δημιουργία ρεαλιστικών αντικειμένων, καθώς κι η κυκλική πορεία σχεδιασμού, εντοπίζονται στις διαδικασίες της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Σύμφωνα έρευνα που διεξήχθη σε μαθητές γυμνασίου υλοποιώντας ένα πρόγραμμα τρισδιάστατης εκτύπωσης βασισμένο στο μοντέλο της βιωματικής μάθησης διαπιστώθηκε ότι οι μαθητές που δημιούργησαν τον ανεμόμυλο με τη βοήθεια της τρισδιάστατης εκτύπωσης είχαν κατανοήσει σε μεγαλύτερο βαθμό τις επιστημονικές έννοιες που συνδέονται με τη λειτουργία του ανεμόμυλου σε σχέση με τους μαθητές στους οποίους αξιοποιήθηκε η παραδοσιακή διδασκαλία (Hsiao et al., 2019).

Με τον τρισδιάστατο εκτυπωτή να διευκολύνει τη διαδικασία της παραγωγής του ανεμόμυλου, οι μαθητές είχαν περισσότερο χρόνο και διαθέσιμους νοητικούς πόρους να αφιερώσουν στην κατανόηση της λειτουργίας του ανεμόμυλου. Επίσης, οι μαθητές είχαν τη δυνατότητα να δημιουργήσουν εξατομικευμένα σχέδια.

Σύμφωνα με την έρευνα των Pantazis & Prianolou (2017), εντοπίστηκε ότι το στοιχείο του προβληματισμού αποτελεί σημαντικό εργαλείο για την ενθάρρυνση της μάθησης μέσω της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Οι μαθητές έπρεπε να σκεφτούν τον τρόπο με τον οποίο το παραγόμενο τρισδιάστατο αντικείμενο θα μπορούσε να αξιοποιηθεί από άτομα με προβλήματα όρασης και να εκτελέσουν τις απαραίτητες αλλαγές, ώστε να γίνει αυτό εφικτό.

2.2.3 Η θεωρία της Κριτικής Κατασκευής (Critical Making)

Η θεωρία της Κριτικής Κατασκευής συνδυάζει την κριτική σκέψη με την κατασκευή κι αποτελεί έναν σύγχρονο τρόπο για την περιγραφή της εκπαιδευτικής εφαρμογής της τρισδιάστατης εκτύπωσης (Ratto, 2011). Πρόκειται για μια θεωρία μάθησης, η οποία έχοντας ως βάση τη δημιουργική συνεργασία που παρά την παραγωγή δίνει έμφαση στις κοινωνικές διαστάσεις της αποκτηθείσας γνώσης και στην ικανότητα επίλυσης προβλημάτων της καθημερινότητας.

Στη μελέτη των Ratto & Ree (2012) οι συμμετέχοντες, αμέσως μετά την κατασκευή ενός μενταγιόν, ανέδειξαν ζητήματα νομιμότητας σχετικά με τον διαδικτυακό διαμοιρασμό των πληροφοριών που αξιοποιούνται κατά τον ψηφιακό σχεδιασμό των αντικειμένων και ανέπτυξαν προβληματισμούς σχετικά με το κατά πόσο αυτή η τεχνολογία μπορεί να ενισχύσει τον υπερκαταναλωτισμό. Από το παραπάνω παράδειγμα φαίνεται πως η εφαρμογή μιας διδακτικής πρακτικής τρισδιάστατης εκτύπωσης στο πλαίσιο της Κριτικής Κατασκευής εστιάζει στη διαδικασία, στην εννοιολογική κατανόηση, στον προβληματισμό και την κριτική σκέψη, ενώ το 3D εκτυπωμένο αντικείμενο δεν είναι ο αυτοσκοπός.

Κατά τη διάρκεια ενός σχεδίου διδασκαλίας βασισμένου στην Κριτική Κατασκευή, οι μαθητές δημιουργούν μια κοινωνική ομάδα και συλλειτουργούν σε ένα περιβάλλον κοινής χρήσης, με στόχο την ανάπτυξη της ικανότητας επίλυσης

προβλημάτων και την κριτική προσέγγιση των γνώσεων που προκύπτουν (Ratto & Ree, 2012). Βασικό χαρακτηριστικό της τρισδιάστατης εκτύπωσης που υποστηρίζει τις αρχές της Κριτικής Κατασκευής είναι η χρήση ανοιχτού κώδικα για τον σχεδιασμό των αντικειμένων, καθώς επιτρέπεται ο σχεδιασμός κι η κατασκευή αντικειμένων και στη συνέχεια ο διαμοιρασμός αυτών των σχεδίων σε άλλα μέλη, τα οποία μπορούν να προτείνουν βελτιωτικές αλλαγές δημιουργώντας με αυτόν τον τρόπο μια κοινότητα ανταλλαγής ιδεών (Schelly et al., 2015).

Η μάθηση συντελείται μέσω της συνεργασίας και της κριτικής σκέψης με τους μαθητές να αυτοκατευθύνουν και να αυτοπαρακολουθούν τις διαδικασίες παραγωγής της τρισδιάστατης εκτύπωσης, ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό μαθησιακό αποτέλεσμα (Liu et al., 2020). Σε αυτό το σημείο η Κριτική Κατασκευή μοιράζεται κοινά στοιχεία με την Αυτοκατευθυνόμενη μάθηση, καθώς κι οι δυο προσεγγίσεις εστιάζουν στη διαμόρφωση ενός περιβάλλοντος που υποστηρίζει τους μαθησιακούς στόχους κι ωθεί τους μαθητές να αναλάβουν μεγαλύτερη ευθύνη για την κατάκτηση της γνώσης (Pearson & Dubé, 2022).

2.2.4 Ο Κονστρουκτιονισμός (Constructionism)

Μια ακόμη θεωρία μάθησης που αξιολογείται κατά την εφαρμογή εκπαιδευτικών δράσεων τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι ο Κονστρουκτιονισμός (Constructionism). Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή μάθησης η γνώση κατασκευάζεται από τους μαθητές μέσω της πρακτικής εφαρμογής κι αυτός είναι κι ο λόγος που φαίνεται να είναι η πιο συχνά αναφερόμενη θεωρία μάθησης για την τρισδιάστατη εκτύπωση (Pearson & Dubé, 2022).

Η θεωρία αυτή προήλθε από τον Papert (1972a), ο οποίος ήθελε να μετατρέψει τη διδασκαλία των μαθηματικών σε μάθημα τέχνης αξιοποιώντας τη διαδικασία της οικοδόμησης παρά της απομνημόνευσης κι εφαρμόζοντας μια μαθητοκεντρική προσέγγιση. Επιπλέον, ο Papert (1972a) πίστευε ότι μέσω της ενσωμάτωσης της εκπαιδευτικής τεχνολογίας στη διδακτική πρακτική οι μαθητές θα αποκτούσαν μεγαλύτερη αυτοπεποίθηση κατακτώντας τις γνώσεις μέσα από τη δημιουργία. Έτσι, με τις δυνατότητες που του πρόσφερε η τεχνολογία της εποχής του διαμόρφωσε κατάλληλα μαθησιακά πλαίσια, στα οποία οι μαθητές γίνονταν οι ίδιοι δημιουργοί.

Παρά το γεγονός ότι το μεγαλύτερο μέρος του έργου του αφορούσε στον προγραμματισμό ηλεκτρονικών υπολογιστών, ο Papert θεωρείται ως ο θεμελιωτής της εισαγωγής της τρισδιάστατης εκτύπωσης στην εκπαιδευτική διαδικασία ζητώντας από τους μαθητές του να δημιουργήσουν γεωμετρικά σχήματα μέσα από την συναρμολόγηση μερών τους (Papert, 1972). Η διαδικασία συναρμολόγησης εξαρτημάτων για τη δημιουργία ενός μοντέλου αποτέλεσε αντικείμενο συζητήσεων σε κύκλους επιστημόνων αναφορικά με τον βαθμό που αυτή η διαδικασία βοηθά σημαντικά έναν εκπαιδευόμενο να κατανοήσει τον τρόπο με τον οποίο σχηματίζεται μια δομή (Hoyles & Noss, 1987). Αυτή ακριβώς η πορεία δημιουργίας νοήματος μέσα από την κατασκευή ακολουθείται και κατά τον σχεδιασμό ενός αντικειμένου με λογισμικό τρισδιάστατης εκτύπωσης (Smith, 2018).

Μια άλλη διάσταση του κονστρουκτιονισμού, η οποία συμβαδίζει με τις διαδικασίες της τρισδιάστατης εκτύπωσης, είναι η παροχή ευκαιριών αναστοχασμού μέσω της διαρκούς κυκλικής διαδικασίας διόρθωσης σφαλμάτων κι ανακατασκευής (Papert, 1972). Η συνεχής εναλλαγή από τη συμβολική αναπαράσταση στην οθόνη των δυο διαστάσεων ενός αντικειμένου στο τρισδιάστατο αντικείμενο δίνει την ευκαιρία στους μαθητές να αποκτήσουν δυο διαφορετικούς τρόπους σκέψης (Smith, 2018). Σε μελέτη του ο Smith (2018) ώθησε ομάδα μαθητών του να μετατρέψουν μια δισδιάστατη εικόνα σε ένα τρισδιάστατο αντικείμενο ιχνηλατώντας την με στρώματα θερμής κόλλας αξιοποιώντας πρακτικά τη διαδικασία της διαστρωμάτωσης που εφαρμόζεται κατά την τρισδιάστατη εκτύπωση.

2.2.5 Η Αυτοκατευθυνόμενη Μάθηση (Self-Directed Learning)

Ένα τελευταίο πλαίσιο που φαίνεται εξίσου κατάλληλο για την εκπαιδευτική εφαρμογή της τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι η Αυτοκατευθυνόμενη Μάθηση (Self-Directed Learning) (Pearson & Dubé, 2022). Σε ένα τέτοιου τύπου εκπαιδευτικό πλαίσιο οι μαθητές έχουν ενεργό ρόλο στην επιλογή του τι και πώς μαθαίνουν, συμπεριλαμβανομένων και των στρατηγικών και των μεθόδων που θα αξιοποιήσουν κατά τη μαθησιακή διαδικασία (Tekkol & Demirel, 2018) παρακολουθώντας ταυτόχρονα την πρόοδό τους αναφορικά με τα μαθησιακά αποτελέσματα που πετυχαίνουν (Garrison, 1997).

Σύμφωνα με το μοντέλο του Garrison (1997) υπάρχουν τρεις βασικές διαδικασίες που επηρεάζουν τη μάθηση:

- Η αυτοδιαχείριση, η οποία περιλαμβάνει την εφαρμογή στρατηγικών για τον προσανατολισμό των ενεργειών στον τιθέμενο στόχο και την αναζήτηση πρόσθετων πόρων, ώστε να ολοκληρωθεί μια εργασία.
- Η αυτοπαρακολούθηση, η οποία αναφέρεται στην επίγνωση και την αξιολόγηση των γνωστικών στρατηγικών που αξιοποιούνται από τον ίδιο τον μαθητή.
- Τα κίνητρα, τα οποία πρέπει να είναι εγγενή, καθώς αυτά είναι πιο ισχυρά, ώστε να κινητοποιήσουν τη μάθηση και να τη σωστή διαμεσολάβηση μεταξύ αυτοδιαχείρισης κι αυτοπαρακολούθησης.

Στο πλαίσιο της αυτοκατευθυνόμενης μάθησης οι μαθητές εμπλέκονται σε δραστηριότητες που τους ωθούν να αυτοκατευθύνουν τη συμπεριφορά τους, με τέτοιο τρόπο που θα τους βοηθήσει να απαντήσουν στα ερωτήματα που τους δίνονται ή που σκέφτονται οι ίδιοι (Pearson & Dubé, 2022). Στην έρευνα των Shelly et al. (2015) οι δάσκαλοι συμμετείχαν σε ένα πρόγραμμα εφαρμογής της τρισδιάστατης εκτύπωσης μέσα στις τάξεις τους βασισμένο στο μοντέλο της αυτοκατευθυνόμενης μάθησης. Οι εκπαιδευτικοί συνεργάστηκαν σε ένα αυτορρυθμιστικό περιβάλλον μάθησης, στο οποίο κατάφεραν να σχεδιάσουν, να κάνουν τροποποιήσεις και τελικά να εκτυπώσουν τα σχέδιά τους. Κατά τη διάρκεια της κατάρτισής τους έπρεπε να παρακολουθούν τον τρόπο με τον οποίο κατακτούσαν τη νέα γνώση χειρισμού των τρισδιάστατων εκτυπωτών και της διαχείρισης του υλικού.

Το μοντέλο αυτό, αν και βασίζεται στην αυτοκαθοδήγηση από το ίδιο το άτομο, εφαρμόζεται στο πλαίσιο της ομάδας εργασίας ενσωματώνοντας τόσο εσωτερικά (άτομο) όσο κι εξωτερικά (περιβάλλον) χαρακτηριστικά (Loyens et al., 2008). Η σχέση μεταξύ αυτών των χαρακτηριστικών είναι αμφίδρομη, καθώς ο μαθητής επηρεάζει κι επηρεάζεται από το κοινωνικό περιβάλλον κατά τη διάρκεια της μαθησιακής διαδικασίας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα πτυχές του περιβάλλοντος, όπως οι διαθέσιμοι πόροι, η κουλτούρα, ο ρόλος των εκπαιδευτικών, να ενθαρρύνουν ή να αποτελέσουν τροχοπέδη για συγκεκριμένα χαρακτηριστικά των μαθητών (Garrison, 1997).

Τα παραπάνω στοιχεία φαίνεται να επιβεβαιώνονται από την έρευνα των Novak & Wisdom (2018), η οποία ασχολήθηκε με το άγχος των εκπαιδευτικών σχετικά με τη διδασκαλία των φυσικών επιστημών. Οι εκπαιδευτικοί συμμετείχαν σε ένα πρόγραμμα τρισδιάστατης εκτύπωσης με δραστηριότητες βασισμένες στην έρευνα και τη συνεργασία σε ένα περιβάλλον δομημένο με τις αρχές της αυτοκατευθυνόμενης

μάθησης. Οι διαδικασίες σχεδιασμού και κατασκευής αντικειμένων βοήθησε τους εκπαιδευτικούς να εργαστούν αυτοκατευθύνοντας τη μάθησή τους τεκμηριώνοντας κι επιβεβαιώνοντας τις γνώσεις που απέκτησαν μέσα από τα κτισμένα αντικείμενά τους που παρήχθησαν κατά τη διάρκεια του μαθήματος (Novak & Wisdom, 2018). Η διαδικασία αυτή αύξησε το αίσθημα της αυτοπεποίθησης ως προς τον χειρισμό αυτής της τεχνολογίας κι ως προς τη διδασκαλία των φυσικών επιστημών μέσα από την αξιοποίηση αυτής της τεχνολογίας.

Παράλληλα, η αυτοκατευθυνόμενη μάθηση υποστηρίζει ένα ακόμη χαρακτηριστικό που συνδέεται άμεσα με την τρισδιάστατη εκτύπωση κι αυτό είναι ο κριτικός στοχασμός (Gureckis & Markant, 2012). Ο κριτικός στοχασμός αναφέρεται στην επανεκτίμηση των προηγούμενων γνώσεων και πεποιθήσεων γύρω από μια γνωστική περιοχή. Αυτό το στοιχείο συνεπάγεται ότι οι μαθητές χρησιμοποιούν την προϋπάρχουσα γνώση τους για να δημιουργήσουν τη νέα γνώση. Η αμφισβήτηση της πρότερης γνώσης αποτελεί βασικό στοιχείο της γνωστικής ανάπτυξης (Ackermann, 2001). Το παραπάνω στοιχείο εντοπίζεται και στην τρισδιάστατη εκτύπωση, δεδομένου ότι ο σχεδιασμός απαιτεί τη δημιουργία υποθέσεων αναφορικά με την καλύτερη δυνατή κατασκευή του αντικειμένου και τέλος τηρείται μια φάση κριτικής αξιολόγησης του δομημένου αντικειμένου, μέσα από την οποία προκύπτουν δεδομένα σχετικά με την επαλήθευση ή μη των υποθέσεων (Ratto, 2011).

Συνοψίζοντας, θα μπορούσε κανείς να ισχυριστεί ότι η εκπαιδευτική χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης μπορεί να ευδοκιμήσει σε ένα περιβάλλον αυτοκατευθυνόμενης μάθησης. Αυτό γιατί επιτρέπει στους εκπαιδευόμενους να ορίζουν την πορεία της μάθησης, να ελέγχουν τις διαδικασίες σχεδιασμού και παραγωγής πρωτοτύπων και να αξιολογούν τις επιλογές τους βάσει του τελικού αποτελέσματος (Pearson & Dubé, 2022).

2.3 Σχετικές έρευνες

Το γεγονός ότι η τρισδιάστατη εκτύπωση εστιάζει στον σχεδιασμό και την παραγωγή ενός φυσικού αντικειμένου αναπτύσσοντας την ίδια στιγμή δεξιότητες του 21^{ου} αιώνα είναι που την καθιστά ένα χρήσιμο εκπαιδευτικό εργαλείο. Παρακάτω θα αναλυθούν οι γνωστικές δεξιότητες που έχουν αναπτύξει μαθητές, φοιτητές κι

εκπαιδευτικοί μέσα από την ενασχόλησή τους με δραστηριότητες που είχαν ως μέσο εκπαίδευσης την τρισδιάστατη εκτύπωση. Οι δεξιότητες αυτές χωρίζονται σε ειδικές και γενικές, με τις πρώτες να αφορούν γνώσεις που σχετίζονται με τη λειτουργία της τρισδιάστατης εκτύπωσης και τις δεύτερες να αφορούν σε γενικότερες δεξιότητες.

2.3.1 Ειδικές γνωστικές δεξιότητες

Μέσα από τη μελέτη ερευνών που έχουν γίνει οι ειδικές γνωστικές δεξιότητες που αναπτύσσονται μέσω της αξιοποίησης της τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι η γνώση της διαδικασίας του σχεδιασμού, η γνώση του δομημένου αντικειμένου κι απόκτηση γνώσεων που εμπεριέχονται στο αναλυτικό πρόγραμμα σπουδών. Η πρώτη από αυτές τις δεξιότητες αναπτύσσεται από τη στιγμή που οι μαθητές συμμετέχουν σε δραστηριότητες που κινητοποιούν τη σχεδιαστική σκέψη. Πολλαπλές μελέτες αναφέρουν πως η εμπλοκή των μαθητών με δραστηριότητες τρισδιάστατης εκτύπωσης βοήθησε στο να αναπτύξουν σε μεγάλο βαθμό τη σχεδιαστική σκέψη (Loy, 2014· Trust & Maloy, 2017· Trust et al., 2018).

Μέσα από τη συνεχή εναλλαγή μεταξύ του ψηφιακού σχεδιασμού ενός αντικειμένου με τη βοήθεια κατάλληλου λογισμικού και της φυσικής δημιουργίας ενός απτού αντικειμένου, η τρισδιάστατη εκτύπωση δημιουργεί προκλήσεις στον τρόπο με τον οποίο οι άνθρωποι αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, καθώς και στον τρόπο με τον οποίο κατανοούν τη σχέση ανάμεσα στον ψηφιακό και τον πραγματικό κόσμο (Loy, 2014). Στις περισσότερες μελέτες οι ερευνητές έβαζαν τους μαθητές να σχεδιάσουν πρώτα 2D αντικείμενα, δηλαδή απλά σχέδια, στη συνέχεια να τα μετατρέψουν σε τρισδιάστατα σχέδια χρησιμοποιώντας θερμή κόλλα, έπειτα να δημιουργήσουν ένα ψηφιακό μοντέλο σχεδιάζοντας με κατάλληλο λογισμικό ή σαρώνοντας και στο τέλος να εκτυπώσουν το τρισδιάστατο αντικείμενο (Cook et al., 2015· Huang & Lin, 2017· Smith, 2018).

Αυτή η διαδικασία πολλαπλών βημάτων μπορεί να αξιοποιηθεί και με μαθητές Δημοτικού (Cook et al., 2015· Smith, 2018), καθώς και σε φοιτητές (Huang & Lin, 2017). Μέσα από αυτή τη διαδικασία υποστηρίζεται πως οι εκπαιδευόμενοι μπορούν να αναπτύξουν δεξιότητες οπτικοποίησης σχημάτων σε συνάρτηση με την πραγματική ζωή βελτιώνοντας την ικανότητά τους να προβλέπουν το πώς θα πρέπει να σχεδιάσουν το

αντικείμενο που καλούνται να δημιουργήσουν, ώστε να είναι λειτουργικό (Huang & Lin., 2017· Smith, 2018).

Σε σχέση με τη σχεδίαση σε χαρτί, ο σχεδιασμός που συντελείται στο πλαίσιο εφαρμογής της τρισδιάστατης εκτύπωσης φαίνεται να προσφέρει περισσότερα πλεονεκτήματα στους μαθητές. Σύμφωνα με μελέτη που βασίστηκε σε συνεντεύξεις εκπαιδευτικών σχετικά με τις απόψεις τους για την εκπαιδευτική χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης φάνηκε ότι οι μαθητές έπρεπε να σκεφτούν πιο δημιουργικά κατά τον σχεδιασμό της τρισδιάστατης εκτύπωσης, καθώς το λογισμικό σχεδιασμού (το Tinkercad εν προκειμένω) παρείχε μόνο βασικά γεωμετρικά σχήματα, τα οποία οι μαθητές έπρεπε να συνδυάσουν με τον κατάλληλο τρόπο, ώστε να δημιουργήσουν το ζητούμενο σύνθετο αντικείμενο (Trust & Maloy, 2017). Σε άλλη έρευνα που αξιοποιήθηκε το ίδιο λογισμικό οι μαθητές μπήκαν στη διαδικασία να συμπιέζουν τα βασικά κυλινδρικά σχήματα, ώστε να καταλήξουν στο επιθυμητό αποτέλεσμα (Smith, 2018).

Επίσης, ο σχεδιασμός στην τρισδιάστατη εκτύπωση είναι μια περίπλοκη διαδικασία, καθώς απαιτεί από τους μαθητές να σχεδιάσουν κάθε πλευρά του αντικειμένου, η λεγόμενη 360° σχεδίαση, η οποία υποστηρίζει τη σύνθετη σκέψη. Αυτός ίσως είναι κι ο λόγος που τα σχέδια των μαθητών που αξιοποίησαν την τρισδιάστατη εκτύπωση χαρακτηρίζονται ως πιο περίπλοκα και σύνθετα σε σχέση με εκείνα που έγιναν χειροποίητα (Chien & Chu, 2017· Greenhalgh, 2016). Σε μελέτη όπου οι μαθητές κλήθηκαν να σχεδιάσουν και να εκτυπώσουν καρέκλες, οι ίδιοι ανέφεραν ότι η τεχνολογία αυτή τους προσέφερε περισσότερες δυνατότητες πειραματισμού με σχήματα και καμπύλες (Greenhalgh, 2016). Ταυτόχρονα, ο ψηφιακός σχεδιασμός κάνει αναμφισβήτητα ευκολότερη τη μετατροπή του σχεδίου σε από αντικείμενο.

Πέρα από τον σχεδιασμό, όμως, εξίσου σημαντικό μαθησιακό αποτέλεσμα αποτελεί και το ίδιο το αντικείμενο που προκύπτει από την τρισδιάστατη εκτύπωση (Pearson & Dubé, 2022). Τα αντικείμενα που εκτυπώνονται μέσω της τρισδιάστατης εκτύπωσης παρέχουν εκπαιδευτική υποστήριξη στους μαθητές δίνοντάς τους ως μια απτική πληροφορία τις επιστημονικές έννοιες που πραγματεύονται (Horowitz & Schultz, 2014· Hsiao et al., 2018).

Ακόμα και σε ένα πιο απλό επίπεδο, η αποθήκευση των τρισδιάστατα εκτυπωμένων αντικειμένων μπορεί να οδηγήσει σε περαιτέρω πειραματισμούς, προβληματισμούς, όπως η μελέτη εναλλακτικών πιθανών σχεδίων ή υλικών για την παραγωγή των ίδιων αντικειμένων (Martin et al., 2014). Επιπλέον, οι εμπλεκόμενοι σε

τέτοιου τύπου κατασκευές πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τις διαστάσεις του αντικειμένου που θα δημιουργήσουν και τις απτικές ιδιότητες που θα πρέπει αυτό να έχει, ώστε να αντιπροσωπεύει τις πραγματικές συνθήκες. Τα παραπάνω είναι ιδιαίτερα αισθητά στην περίπτωση της εφαρμογής της τρισδιάστατης εκτύπωσης στο πλαίσιο της Ειδικής Αγωγής (Pearson & Dubé, 2022). Στη μελέτη των Kostakis et al. (2015) που αφορούσε τη δημιουργία αντικειμένων για τυφλούς, οι δημιουργοί έπρεπε να λάβουν υπόψη ότι το πώς θα «οπτικοποιήσει» το αντικείμενο ένα άτομο με προβλήματα όρασης μέσω των απτικών ιδιοτήτων που αυτό θα του προσφέρει.

Οι Stone et al. (2020) υποστηρίζουν ότι τα τρισδιάστατα εκτυπωμένα αντικείμενα καταλήγουν σε καλύτερα μαθησιακά αποτελέσματα για τους μαθητές με προβλήματα όρασης και τους τυφλούς. Αυτό γιατί φαίνεται πως αυτά τα αντικείμενα προσφέρουν πιο πλούσιες και ρεαλιστικές απτικές πληροφορίες, ειδικά για περιπτώσεις περίπλοκων σχεδίων. Επιπροσθέτως, οι ίδιοι ερευνητές ισχυρίζονται ότι οι διαδικτυακοί πόροι ανοικτού κώδικα επιτρέπουν στους εκπαιδευτικούς να έχουν εύκολη κι άμεση πρόσβαση σε ένα μεγάλο εύρος σχεδίων, τα οποία μπορούν να αξιοποιήσουν είτε αυτούσια είτε κάνοντας δικές τους τροποποιήσεις που θα βοηθήσουν το τελικό αποτέλεσμα να ταιριάζει ακριβώς στις ανάγκες των μαθητών τους (Stone et al., 2020). Ομοίως, κι ακόμα κι οι μαθητές που αναζητούν κι αξιοποιούν έτοιμα σχέδια μέσα από τα λογισμικά ανοικτού κώδικα φαίνεται να επωφελούνται από αυτήν τη διαδικασία (Buehler et al., 2016).

Τα μαθησιακά αποτελέσματα που παρέχουν τόσο τα αντικείμενα όσο κι οι διαδικασίες σχεδιασμού είναι εξαιρετικά σημαντικά. Ωστόσο, οι εκπαιδευτικοί δε θα έμπαιναν στη διαδικασία να εισάγουν την τρισδιάστατη εκτύπωση στις τάξεις τους, αν αυτή η τεχνολογία δε βοηθούσε στην κατάκτηση ακαδημαϊκών γνώσεων.

Οι περισσότερες μελέτες που έχουν γίνει πάνω σε αυτό αναφέρουν τη σημαντική συνδρομή της τρισδιάστατης εκτύπωσης στην κατάκτηση γνώσεων ακαδημαϊκού περιεχομένου στον τομέα της ιστορίας (Turner et al., 2017), της εσωτερικής διακόσμησης (Greenhalgh, 2016), των μαθηματικών (Huang & Lin, 2017· Smith, 2018) και των φυσικών επιστημών (Horowitz & Schultz, 2014· Hsiao et al., 2019). Η δυνατότητα της τρισδιάστατης εκτύπωσης στη διδασκαλία περιεχομένου STEM φαίνεται να είναι πολύ μεγάλη (Pearson & Dubé, 2022).

Κατά τη διαδικασία σχεδιασμού ενός αντικειμένου που πρόκειται να εκτυπωθεί με τη χρήση τρισδιάστατου εκτυπωτή, οι μαθητές καλούνται να κάνουν πολύπλοκους υπολογισμούς, ακόμα κι αν το ζητούμενο γνωστικό πεδίο δεν είναι τα μαθηματικά. Παράλληλα, οι υπολογισμοί, η οπτικοποίηση κι οι νοητικές περιστροφές αποτελούν

δεξιότητες που αναπτύσσουν οι μαθητές μέσω της τρισδιάστατης εκτύπωσης (Katsioloudis & Jones, 2015).

Τα ψηφιακά γεωμετρικά μοντέλα έχοντας την ευελιξία της περιστροφής να περιστρέφονται φαίνεται να δίνουν τη δυνατότητα στους μαθητές να αντιληφθούν και να κατανοήσουν τα σχήματα από διαφορετικές οπτικές γωνίες σε αντίθεση με τις 2D αναπαραστάσεις σε χαρτί (Pantazis & Prianolou, 2017). Με τον τρόπο αυτό φαίνεται πως ο ψηφιακός σχεδιασμός οδηγεί τους μαθητές στην ανάπτυξη χωροταξικών δεξιοτήτων (Katsioloudis & Jones, 2015). Οι Eisenberg et al. (2013) θεωρούν ότι η χωροταξική αντίληψη των μαθητών βελτιώνεται ακόμα περισσότερο όταν αρχίζουν να σκέφτονται ότι τα αντικείμενα αποτελούνται από μέρη. Η τρισδιάστατη εκτύπωση τις περισσότερες φορές περιλαμβάνει την κατασκευή ολόκληρων αντικειμένων, αλλά οι Eisenberg et al. (2013) προτείνουν οι μαθητές να κατασκευάζουν μέρη και με αυτά να συνθέτουν το τελικό αντικείμενο.

Τέλος, ο ψηφιακός σχεδιασμός που συντελείται κατά τις δραστηριότητες της τρισδιάστατης εκτύπωσης ενθαρρύνει την κατανόηση σύνθετων μαθηματικών εννοιών. Ουσιαστικά, φαίνεται πως δημιουργεί ένα πλαίσιο για την κατάκτηση αφηρημένων μαθηματικών εννοιών με την μετατροπή αυτών σε απτά αντικείμενα.

2.3.2 Γενικές γνωστικές δεξιότητες

Οι δραστηριότητες που αξιοποιούν την τρισδιάστατη εκτύπωση βοηθούν στην ανάπτυξη δεξιοτήτων που σχετίζονται με τη χρήση των λογισμικών σχεδιασμού και των παραγόμενων αντικειμένων όσο και με τις ακαδημαϊκές γνώσεις. Παράλληλα, όμως, αναπτύσσουν και σημαντικές δεξιότητες μάθησης. Δύο από αυτές είναι η κριτική σκέψη κι η ικανότητα επίλυσης προβλημάτων. Η διαρκής διαδικασία σχεδιασμού και τροποποιήσεων του τρισδιάστατου αντικειμένου που αποτελεί βασικό κορμό στην τρισδιάστατη εκτύπωση είναι το στοιχείο που οξύνει την κριτική σκέψη των μαθητών και που τους δίνει ευκαιρίες να επιλύουν προβληματικές καταστάσεις (Martin et al., 2014· Trust & Maloy, 2017). Δεδομένου ότι το αντικείμενο θα εκτυπωθεί μια φορά, οι μαθητές καλούνται να λύνουν κάθε φορά το πρόβλημα των τροποποιήσεων που θα πρέπει να κάνουν κατά τον σχεδιασμό του αντικειμένου, ώστε αυτό να ικανοποιεί τους στόχους,

και στο τέλος να ασκούν κριτική αναλύοντας την επιτυχία ή την αποτυχία των σχεδίων τους (Kostakis et al., 2015).

Συνεπώς, οι μαθητές λειτουργούν σε ένα περιβάλλον που τους δίνει τη δυνατότητα να μαθαίνουν να επιλύουν προβλήματα με αυτονομία και να προβληματίζονται σχετικά με τα δημιουργήματά τους. Μάλιστα, όσο πιο στοχαστικοί γίνονται οι μαθητές τόσο πιο περίπλοκα σχέδια δημιουργούν. Στην κυκλική σχεδιαστική πορεία του εντοπισμού ενός προβλήματος και της αναζήτησης της λύσης μέσω του κριτικού αναστοχασμού και των συνεχών δοκιμών είναι δυνατόν να εμπλακούν και μαθητές δημοτικού (Wright et al., 2018). Βέβαια, ο κριτικός αναστοχασμός κι επίλυση προβλημάτων κατά την τρισδιάστατη εκτύπωση δεν είναι πάντα εύκολες διαδικασίες για τους μαθητές, αλλά όταν οδηγούν σε ένα επιτυχημένο αποτέλεσμα οι μαθητές αποκτούν ένα ισχυρό αίσθημα ικανοποίησης (Pearson & Dubé, 2022).

Μια ακόμη δεξιότητα μάθησης που αναπτύσσεται μέσα από την εκπαιδευτική χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι η συνεργασία. Τόσο στο πλαίσιο της τυπικής όσο και της άτυπης μάθησης η τρισδιάστατη εκτύπωση εμπλέκει τους μαθητές σε συνεργατικές δραστηριότητες (Schelly et al., 2015). Μάλιστα, η συνεργασία σε αρκετές περιπτώσεις κρίνεται απαραίτητη, καθώς δεν διατίθενται οι απαραίτητοι πόροι, ώστε κάθε μαθητής να έχει ατομικό εξοπλισμό. Ανεξαρτήτως του τρόπου με τον οποίο αυτή η συνεργασία προκύπτει, είναι σίγουρο ότι αποτελεί βασικό παράγοντα για τη φάση του σχεδιασμού του αντικειμένου (Loy, 2014· Novak & Wisdom, 2018).

Στο συνεργατικό αυτό περιβάλλον οι μαθητές ανταλλάσσουν ιδέες, προβληματισμούς, θέτουν ερωτήματα ο ένας στον άλλον κι όλα τα μέλη μαζί δοκιμάζουν τις ιδέες τους, γεγονός που οδηγεί σε πιο δημιουργικά σχέδια (Stone et al., 2020). Η συνεργασία αναπτύσσεται τόσο μεταξύ των συνομήλικων μελών της ομάδας εργασίας όσο και με τους συντονιστές των εργαστηρίων που είναι υπεύθυνοι για τη διεξαγωγή των δραστηριοτήτων τρισδιάστατης εκτύπωσης (Loy, 2014· Pantazis & Priavolou, 2017· Trust et al., 2018).

Στις θεωρίες μάθησης που αξιοποιούνται για τη δημιουργία δραστηριοτήτων εφαρμογής της τρισδιάστατης εκτύπωσης, όπως ο κονστρουκτιονισμός, η συνεργασία αποτελεί βασικό πυλώνα, καθώς οι μαθητές αλληλεπιδρούν σε ένα κοινόχρηστο περιβάλλον μάθησης (Schelly et al., 2015). Μέσα από αυτήν τη συνεργασία οι μαθητές μαθαίνουν να επικοινωνούν τις ιδέες τους και να αποδέχονται τις διαφορετικές απόψεις (Liu et al., 2020).

Παράλληλα, η ποικιλία στα στάδια και τις επιλογές κατά τη διάρκεια του τρισδιάστατου σχεδιασμού δίνει στους μαθητές να εξατομικεύσουν τη μάθησή τους κι αυτό το στοιχείο κρίνεται από τους εκπαιδευτικούς βασικό για την ανάπτυξη των κινήτρων μάθησης (Pearson & Dubé, 2022). Οι Kostakis et al. (2015) παρατήρησαν ότι ακόμα κι όταν οι μαθητές εργάζονταν σε δραστηριότητες τρισδιάστατης εκτύπωσης εκτός τάξης εξακολουθούσαν να δείχνουν έντονο ενδιαφέρον κι αποζητούσαν να μοιραστούν τη δουλειά τους με τους συμμαθητές τους ή να τη συγκρίνουν με το σχολικό εγχειρίδιο.

Επίσης, το να επιλέξουν οι ίδιοι οι μαθητές το αντικείμενο που θα εκτυπώσουν φαίνεται ότι ενισχύει τα κίνητρα για μάθηση μέσω της τρισδιάστατης εκτύπωσης και μάλιστα αποτελεί παρακίνηση για την αντιμετώπιση τυχόν δυσκολιών που προκύπτουν (Kostakis et al., 2015). Σύμφωνα με τους Pantazis & Ptianolou (2017) η τρισδιάστατη εκτύπωση αυξάνει τα κίνητρα, καθώς προωθεί πιο ουσιαστικές επικοινωνιακές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μελών που συνεργάζονται.

Το συνεργατικό πλαίσιο λειτουργίας είναι που ενθαρρύνει την ανάπτυξη αυτών των κινήτρων μάθησης (Pearson & Dubé, 2022). Από την άλλη μεριά, η αυτοκατευθυνόμενη μάθηση προϋποθέτει ότι οι μαθητές έχουν αναπτύξει εσωτερικά κίνητρα μάθησης (Loyens et al., 2018). Η τρισδιάστατη εκτύπωση ως μια διαδικασία που βασίζεται στη δημιουργία και τη λήψη αποφάσεων παρέχει στους μαθητές την ευκαιρία να αποκτήσουν τον έλεγχο της μάθησής τους και να αναπτύξουν κίνητρα, ώστε να επιμένουν για να ξεπερνούν τις δυσκολίες. Τα παραπάνω στοιχεία είναι ιδιαίτερα εμφανή στη μελέτη των Cook et al. (2015), όπου οι μαθητές τετάρτης δημοτικού συνεργάστηκαν ώστε να κατασκευάσουν έναν προσθετικό βραχίονα λύνοντας ένα πραγματικό πρόβλημα.

Μία τελευταία δεξιότητα μάθησης που αναπτύσσεται κατά την εκπαιδευτική αξιοποίηση της τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι η δημιουργικότητα. Η διαδικασία του να δημιουργήσει κάποιος ένα έργο απαιτεί τον σχεδιασμό, τον συνδυασμό επιλογών και την παραγωγή, στοιχεία που αποτελούν τον βασικό κορμό της τρισδιάστατης εκτύπωσης (Kratwohl, 2002). Για τον λόγο αυτό πολλές μελέτες υποστηρίζουν την άμεση σύνδεση της δημιουργικότητας με την τρισδιάστατη εκτύπωση, η οποία ωθεί τους μαθητές να γίνουν δημιουργοί (Schelly et al., 2015· Trust et al., 2018· Wright et al., 2018).

Άλλωστε, και στον τομέα της βιομηχανικής παραγωγής, στον οποίο πρωτοεμφανίστηκε η χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης, το στοιχείο της δημιουργικότητας είναι θεμελιώδες (Hughes, 2017). Σε πολλές μελέτες αναφέρεται ότι η είσοδος της τρισδιάστατης εκτύπωσης στις σχολικές μονάδες και τα Πανεπιστήμια θα

βοηθήσει στο να αυξηθεί η καινοτομία (Nemorin & Selwyn,2017). Οι Sun & Li (2018) προτείνουν ότι τα μαθήματα τρισδιάστατης εκτύπωσης θα ενθαρρύνουν την πρωτοπορία συνδυαστικά με την ενσωμάτωση του STEM σε ένα πλαίσιο ενεργητικής μάθησης. Ταυτόχρονα, προτείνεται να ακολουθείται ένα πρόγραμμα αυτοκατευθυνόμενης μάθησης, η οποία μπορεί να αυξήσει τη δημιουργικότητα στα τρισδιάστατα εκτυπωμένα σχέδια (Liu et al., 2020).

3. Μέθοδος Έρευνας

3.1 Σκοπός και Ερευνητικά Ερωτήματα

Η μελέτη κι ανασκόπηση της υπάρχουσας βιβλιογραφίας σχετικά με την εκπαιδευτική χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης σε επίπεδο πρωτοβάθμιας εκπαίδευσης κι ειδικής αγωγής βοήθησε στην εξέταση του παρακάτω ερευνητικού ερωτήματος:

- Ποια είναι η εκπαιδευτική χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης στην Πρωτοβάθμια Εκπαίδευση, Γενικής και Ειδικής Αγωγής;

Το ερευνητικό αυτό ερώτημα επιμερίστηκε στα εξής ερευνητικά υποερωτήματα:

- Ποιο είναι το γνωστικό πεδίο των παρεμβάσεων του 3D Printing στην Πρωτοβάθμια Εκπαίδευση τόσο για μαθητές όσο και για εκπαιδευτικούς;
- Για ποιες ηλικιακές ομάδες μαθητών πρωτοβάθμιας εκπαίδευσης έχουν γίνει παρεμβάσεις με τη χρήση του 3D Printing;
- Ποια είναι τα μαθησιακά αποτελέσματα της εκπαιδευτικής χρήσης του 3D Printing στην Πρωτοβάθμια Εκπαίδευση σε επίπεδο γενικής κι ειδικής εκπαίδευσης;
- Ποιες είναι οι απόψεις των μαθητών και των εκπαιδευτικών για τη μάθηση μέσω του 3D Printing;

3.2 Μέθοδος Ανασκόπησης

3.2.1 Είδη Ανασκοπήσεων

Αναφορικά με τη μέθοδο της ανασκόπησης της βιβλιογραφίας υπάρχουν δύο βασικά είδη που χρησιμοποιούνται στο ερευνητικό πεδίο:

- Συστηματική Ανασκόπηση (Systematic Review)
- Ανασκόπηση Πεδίου (Scoping Review)

Η συστηματική ανασκόπηση αποτελεί έναν τρόπο ερευνητικής σύνθεσης, για τον οποίο εργάζονται ομάδες ανασκόπησης, με στόχο:

- Τη συλλογή διεθνών δεδομένων-στοιχείων που συνδέονται με συγκεκριμένα ερευνητικά ερωτήματα ή υποθέσεις (Gough et al., 2012· Aromataris & Pearson, 2014).
- Την αξιολόγηση αυτών των δεδομένων για την επιβεβαίωση πρακτικών ή την ανάδειξη νέων.
- Τον εντοπισμό αντικρουόμενων ευρημάτων μέσω ερευνών που εξετάζουν το ίδιο θέμα, αλλά καταλήγουν σε διαφορετικά αποτελέσματα (Munn et al., 2018).
- Τον εντοπισμό ελλείψεων, κενών και νέων τάσεων.

Κατά την εκπόνηση μια συστηματικής ανασκόπησης το ερευνητικό ερώτημα χρειάζεται να καθοριστεί με ακρίβεια και σαφήνεια, ώστε να εντοπιστούν οι σχετικές με αυτό μελέτες και να αναλυθούν. Επίσης, οι εντοπισμένες μελέτες αναλύονται κριτικά ως προς την ποιότητά τους κι αξιολογείται η καταλληλότητά τους. Τέλος, τα ευρήματα των μελετών παρουσιάζονται με συστηματικό τρόπο.

Η μεθοδολογία της διαδικασίας αυτής τηρεί μια συγκεκριμένη ακολουθία βημάτων, τα οποία αναλύονται ως εξής:

- Σαφής διατύπωση ερευνητικού ερωτήματος.
- Αναζήτηση σχετικής και κατάλληλης βιβλιογραφίας.
- Επιλογή μελετών βάσει τιθέμενων κριτηρίων.
- Αξιολόγηση των επιλεγμένων μελετών.
- Εντοπισμός δεδομένων-στοιχείων από τις μελέτες.
- Στατιστική ανάλυση των δεδομένων (μετα-ανάλυση).

Το επόμενο είδος ανασκόπησης, η ανασκόπηση πεδίου, αποτελεί μία εξίσου βασική διαδικασία για τη σύνθεση ερευνητικών δεδομένων (Daudt et al., 2013). Κύριος στόχος αυτού του τύπου ανασκόπησης είναι η αναζήτηση του εύρους της υπάρχουσας βιβλιογραφίας σε ένα συγκεκριμένο ερευνητικό πεδίο αναφορικά με τον όγκο και τα χαρακτηριστικά των σχετικών ερευνών (Arksey & O'Malley, 2005).

Ως διαδικασία βοηθάει στο να πραγματοποιηθεί μια σύνοψη του εύρους και του βάθους του πεδίου ενδιαφέροντος. Μάλιστα, εφαρμόζεται σε θέματα που δεν έχουν διερευνηθεί ακόμη εκτενώς ή που αποτελούν ένα περίπλοκο ή ετερογενές πεδίο (Levac et al., 2010). Οι φάσεις που ακολουθούνται είναι οι εξής (Arksey & O'Malley, 2005) :

- Διατύπωση ερευνητικού ερωτήματος.
- Διερεύνηση σχετικών μελετών.
- Επιλογή μελετών.

- Καταγραφή δεδομένων-στοιχείων.
- Συγκριτική μελέτη δεδομένων.
- Κριτική ανάλυση δεδομένων (προαιρετικά).

Στην ανασκόπηση πεδίου η επιλογή των σχετικών μελετών που αποτελούν το αντικείμενο μελέτης ακολουθεί μια συγκεκριμένη πορεία, η οποία περιγράφεται από ένα διάγραμμα ροής (flowchart) (Pham et al., 2014):

- Αναγνώριση (Identification), το στάδιο κατά το οποίο εντοπίζεται το σύνολο των ερευνών που έχουν διεξαχθεί και πραγματοποιείται αφαίρεση των διπλότυπων.
- Εκκαθάριση (Screening), μέσω της οποίας εξετάζονται οι τίτλοι των άρθρων κι οι περιλήψεις τους, ώστε να αφαιρεθούν οι μη σχετικές έρευνες.
- Καταλληλότητα (Eligibility), όπου πραγματοποιείται μέσα από την λεπτομερή μελέτη των ερευνών για την επιλογή των καταλληλότερων.
- Τελική επιλογή (Included), το στάδιο κατά το οποίο συλλέγονται τα άρθρα που θα αποτελέσουν το αντικείμενο της ανασκόπησης.

3.2.2 Σύγκριση Ανασκοπήσεων

Τα παραπάνω είδη ανασκοπήσεων έχουν μεταξύ τους ορισμένες λεπτές διαφορές. Μια από αυτές σχετίζεται με τη φύση των σκοπών, των στόχων και των ερευνητικών ερωτημάτων που τίθενται (Arksey & O'Malley, 2005). Στη συστηματική ανασκόπηση το ερευνητικό ερώτημα είναι σαφώς καθορισμένο. Αντίθετα, η ανασκόπηση πεδίου απαντά σε ευρύτερα τιθέμενα ερωτήματα, καθώς αναζητείται το εύρος της υπάρχουσας βιβλιογραφίας γύρω από ένα θέμα.

Επίσης, η ανασκόπηση πεδίου επιχειρεί την χαρτογράφηση της βιβλιογραφίας σχετικά με ένα θέμα (Arksey & O'Malley, 2005), ενώ η συστηματική ανασκόπηση συνοψίζει τα διαθέσιμα ερευνητικά δεδομένα που σχετίζονται με το τιθέμενο ερευνητικό ερώτημα (Pearson, 2004). Ουσιαστικά, μέσω της ανασκόπησης πεδίου δημιουργείται η παρουσίαση ενός όγκου βιβλιογραφίας, ενώ μέσω της συστηματικής ανασκόπησης συνοψίζονται τα εμπειρικά δεδομένα μέσα από ένα μικρό αριθμό σχετικών ερευνών, τα οποία απαντούν στο ερευνητικό ερώτημα.

Τέλος, η ανασκόπηση πεδίου οδηγεί σε μια περιγραφική επισκόπηση του διαθέσιμου υλικού, χωρίς απαραίτητα να επιτευχθεί η κριτική αποτίμηση μεμονωμένων

μελετών. Αντιθέτως, η συστηματική ανασκόπηση συνθέτει στοιχεία μέσα από έρευνες που έχουν μεμονωμένα αξιολογηθεί αυστηρά, ώστε να περιοριστεί ο βαθμός μεροληψίας.

3.3 Ερευνητικός Σχεδιασμός

Η εργασία εξετάζει την εκπαιδευτική χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης περιορίζοντας το εύρος των υπό μελέτη ερευνών σε συγκεκριμένη ηλικιακή ομάδα. Ειδικότερα, το ενδιαφέρον της έρευνας επικεντρώνεται στο επίπεδο της Πρωτοβάθμιας Εκπαίδευσης τόσο για μαθητές προσχολικής όσο και για μαθητές Δημοτικού. Αυτός ο περιορισμός προέκυψε από το γεγονός ότι ήδη έχουν γίνει βιβλιογραφικές ανασκοπήσεις σχετικά με την εκπαιδευτική χρήση της τρισδιάστατης εκπαίδευσης, οι οποίες όμως περιλαμβάνουν όλες τις βαθμίδες εκπαίδευσης συμπεριλαμβανομένης της τριτοβάθμιας κι ειδικά για τη σχολική εκπαίδευση εξετάζονται συνολικά ως K-12 όλες οι βαθμίδες (Ford & Minshall, 2018· Pearson & Dubé, 2022).

Επίσης, εντοπίζονται βιβλιογραφικές ανασκοπήσεις για συγκεκριμένα μαθήματα, όπως η εφαρμογή της τρισδιάστατης εκτύπωσης στη χημεία και τη βιολογία, με μαθητές που ανήκουν στη Δευτεροβάθμια Εκπαίδευση (Perna & Wiedmer, 2020· Hansen et al., 2020). Ωστόσο, φαίνεται πως προς το παρόν η μελέτη ερευνών για την εκπαιδευτική χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης σε μαθητές Πρωτοβάθμιας Εκπαίδευσης δεν έχει διεξαχθεί, παρά το γεγονός ότι υπάρχουν ερευνητικές μελέτες που εξετάζουν αυτό το θέμα σε αυτές τις ηλικιακές ομάδες.

Η παρούσα, λοιπόν, εργασία επιχειρεί να καλύψει αυτό το κενό. Για την επίτευξη αυτού του σκοπού επιλέγεται η εφαρμογή της ανασκόπησης πεδίου (scoping review), μιας ταξινόμησης της υπάρχουσας βιβλιογραφίας σχετικής με το υπό μελέτη θέμα. Η μέθοδος αυτή επιλέχθηκε, διότι η έρευνα στοχεύει στο να:

- Γίνει χαρτογράφηση της υπάρχουσας βιβλιογραφίας που σχετίζεται με το θέμα της εργασίας.
- Παρουσιαστεί το εύρος των ερευνών σχετικών με το θέμα.
- Διερευνηθούν οι ερευνητικοί σχεδιασμοί κι οι μεθοδολογίες των σχετικών ερευνών.
- Πραγματοποιηθεί μια περιγραφική επισκόπηση παραθέτοντας τα βασικά συμπεράσματα, όπως αυτά προκύπτουν από τις σχετικές έρευνες.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η έρευνα ακολουθεί τα στάδια της ανασκόπησης πεδίου.

Αναλυτικότερα, τα στάδια που ακολουθούνται είναι τα εξής:

- Διατύπωση ερευνητικού ερωτήματος κι υπο-ερωτημάτων.
- Αναζήτηση σχετικών ερευνών.
- Επιλογή ερευνών που συμφωνούν με τα τιθέμενα κριτήρια επιλογής.
- Αξιολόγηση της ποιότητας των ερευνών.
- Εξαγωγή δεδομένων-στοιχείων.

Αναζήτηση ερευνών

Η αναζήτηση των επιστημονικών άρθρων έγινε στις παρακάτω βάσεις δεδομένων:

- Scopus: Μία από τις μεγαλύτερες βάσεις δεδομένων που περιλαμβάνει ένα μεγάλο εύρος επιστημονικής βιβλιογραφίας (<https://www.scopus.com/>).
- Taylor & Francis: Πρόκειται για μια διεθνή εταιρεία που περιλαμβάνει ένα σύνολο βιβλίων κι επιστημονικών περιοδικών με κύρια πεδία ενδιαφέροντος τις ανθρωπιστικές επιστήμες, τις θετικές επιστήμες, την τεχνολογία, τη μηχανική και την ιατρική (<https://www.tandfonline.com/>).
- LearnTechLib: Πρόκειται για ένα ψηφιακό αποθετήριο με επιστημονικές έρευνες που επικεντρώνονται στη μάθηση και την τεχνολογία (<https://www.learntechlib.org/>).
- Eric: Μια ψηφιακή βάση δεδομένων που προσφέρει πρόσβαση σε άρθρα, επιστημονικά περιοδικά, βιβλία σχετικά με τον τομέα της εκπαίδευσης (<https://eric.ed.gov/>).
- Google Scholar: Μια ψηφιακή βάση δεδομένων που επιτρέπει την αναζήτηση βιβλιογραφίας για όλα τα επιστημονικά πεδία ενδιαφέροντος προσφέροντας υλικό, όπως βιβλία, επιστημονικά περιοδικά, άρθρα, δημοσιεύσεις, διπλωματικές εργασίες, διδακτορικές διατριβές κ.α. (<https://scholar.google.gr/>).

Η αναζήτηση της βιβλιογραφίας, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.1, έγινε με λέξεις-κλειδιά που αφορούν την τρισδιάστατη εκτύπωση συνδυαστικά με λέξεις που συνδέονται με την πρωτοβάθμια εκπαίδευση.

Πίνακας 3.3.1 Λέξεις-κλειδιά αναζήτησης

Λέξεις – κλειδιά αναζήτησης άρθρων	
“3D printing”	“Primary education”
“3D printers”	“Elementary education”
	“Preschool education”

	''Special Education''
	''Educators''
	''Teachers''
	''Students''

Η τελευταία πενταετία καθορίστηκε κατά την αναζήτηση ως φίλτρο, καθώς μέσα σε αυτό το διάστημα η μελέτη του θέματος αυτού έγινε πιο συστηματική και για να επιλεγεί η πιο επικαιροποιημένη έρευνα. Η γλώσσα αναζήτησης της βιβλιογραφίας ήταν η αγγλική.

Κριτήρια επιλογής ερευνών

Οι έρευνες που αποτέλεσαν αντικείμενο μελέτης για την ολοκλήρωση της ανασκόπησης πεδίου είναι τα παρακάτω:

- Έρευνες επιστημονικές (εισηγήσεις, άρθρα σε επιστημονικά περιοδικά και πρακτικά συνεδρίων, κεφάλαια σε συλλογικούς τόμους και βιβλία).
- Έρευνες που περιέχουν την εκπαιδευτική χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης.
- Έρευνες με ποσοτικά ή/και ποιοτικά δεδομένα.
- Έρευνες στην αγγλική γλώσσα.
- Έρευνες με ομάδα-στόχο μαθητές Πρωτοβάθμιας Εκπαίδευσης κι Ειδικής Αγωγής.

Κριτήρια αποκλεισμού ερευνών

Οι έρευνες που αποκλείστηκαν από την ανασκόπηση πεδίου είναι οι παρακάτω:

- Οι έρευνες που αποτελούν διπλωματικές εργασίες, διατριβές, βιβλιογραφικές ανασκοπήσεις, posters, περιλήψεις που δεν περιλαμβάνουν ολόκληρα τα άρθρα, κλειδωμένα άρθρα.
- Τεχνικά άρθρα που περιγράφουν την τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης κι άρθρα που δεν περιλαμβάνουν έρευνα σε μαθητές.
- Θεωρητικά άρθρα, άρθρα που δεν περιλαμβάνουν έρευνα.

Διαδικασία επιλογής άρθρων

Συνολικά τα άρθρα που εντοπίστηκαν βάσει των λέξεων-κλειδιών που αξιοποιήθηκαν ήταν 188. Για τις ανάγκες τις παρούσας έρευνας δεν αξιοποιήθηκαν όλα αυτά τα επιστημονικά άρθρα, καθώς εφαρμόστηκε το διάγραμμα ροής (flowchart) PRISMA, μέσω του οποίου τηρείται μια σειρά σταδίων εκκαθάρισης άρθρων ώστε να

μείνουν τα επιθυμητά άρθρα προς μελέτη βάσει των τιθέμενων κριτηρίων (Moher, Liberati, Tetzlaff, & Altman, 2009).

1° Στάδιο: Αναγνώριση – Identification

Στο στάδιο αυτό συγκεντρώθηκαν όλα τα άρθρα, όπως αυτά εντοπίστηκαν μέσα από την αναζήτηση από τις διάφορες πηγές (188) κι αφαιρέθηκαν τα διπλότυπα (28). Μετά από αυτή τη διαδικασία έμειναν 160 άρθρα.

2° Στάδιο: Διαχωρισμός – Screening

Στο στάδιο αυτό έγινε έλεγχος των τίτλων και των περιλήψεων των άρθρων και συγκεντρώθηκαν τα δυνητικά κατάλληλα άρθρα βάσει των κριτηρίων που είχαν τεθεί. Με αυτόν τον τρόπο από τα 160 άρθρα εξαιρέθηκαν 48, τα οποία δεν σχετίζονταν αποκλειστικά με τη βαθμίδα εκπαίδευσης (πρωτοβάθμια εκπαίδευση) που αποτελεί το επίκεντρο ενδιαφέροντος της παρούσας έρευνας. Από τη διαδικασία αυτή παρέμειναν 112 άρθρα.

3° Στάδιο: Καταλληλότητα – Eligibility

Στο στάδιο αυτό αναγνώστηκαν τα 112 επιστημονικά άρθρα κι επιλέχθηκαν τα δυνητικά κατάλληλα (45). Μέσα από αυτή τη διαδικασία αφαιρέθηκαν 67 άρθρα, διότι:

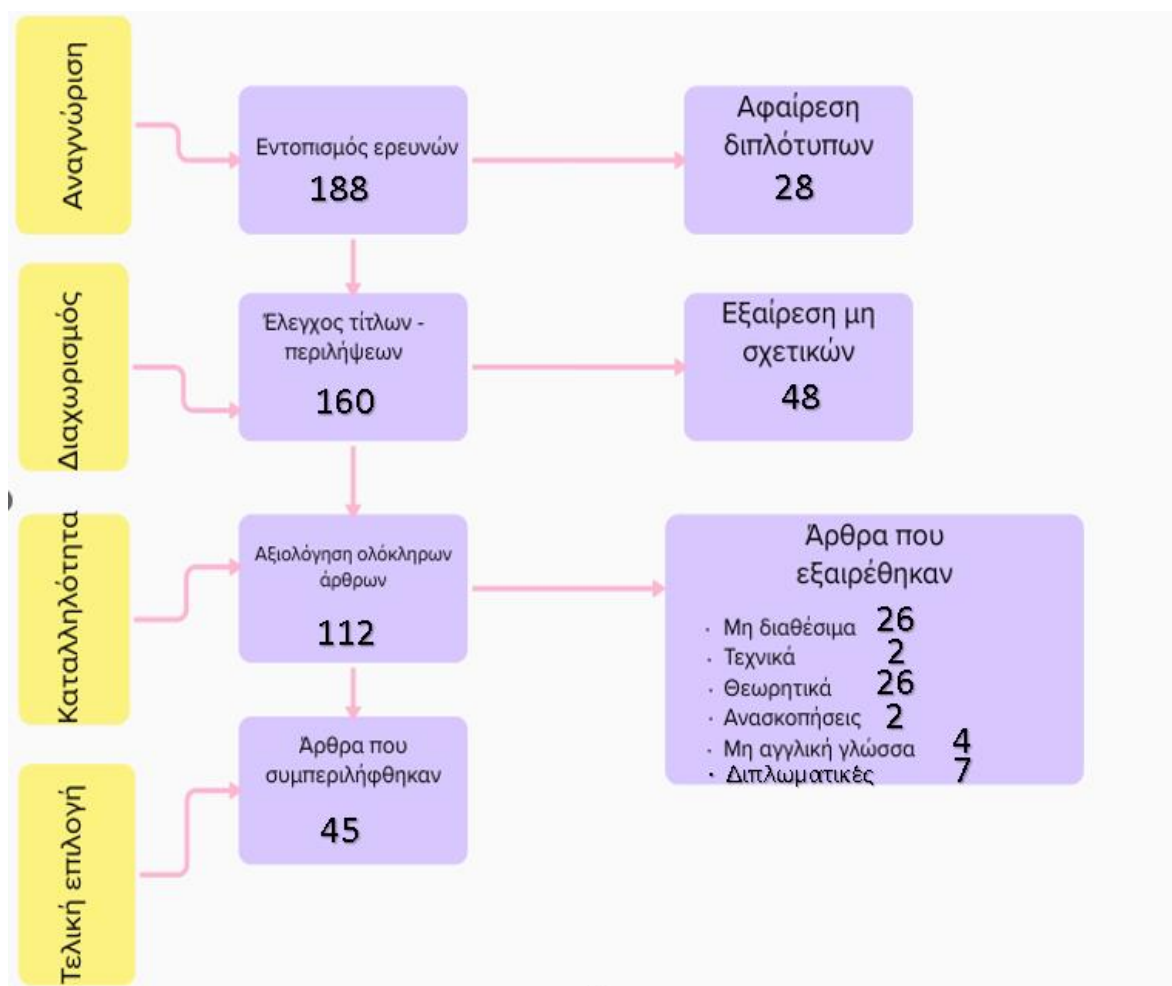
- 26 ήταν μη προσβάσιμα
- 2 δεν ήταν τεχνικά άρθρα
- 26 ήταν θεωρητικά
- 2 ήταν ανασκοπήσεις
- 4 ήταν σε μη αγγλική γλώσσα
- 7 ήταν διπλωματικές εργασίες

4° Στάδιο: Τελική επιλογή – Included

Στο τελευταίο αυτό στάδιο απομονώθηκαν τα επιστημονικά άρθρα που τηρούσαν τα κριτήρια επιλογής κι ένταξης στην έρευνα. Συνολικά είναι 45 άρθρα.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής PRISMA, όπως ακριβώς αυτό εφαρμόστηκε για τις ανάγκες της έρευνας. Το διάγραμμα παρουσιάζει το αρχικό σύνολο των άρθρων που εντοπίστηκαν από τις διάφορες βάσεις δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για την αναζήτηση, τα στάδια φιλτραρίσματος των εντοπισμένων

άρθρων και, τέλος, τον τελικό αριθμό άρθρων που κρίθηκαν κατάλληλα, ώστε να συμπεριληφθούν στην έρευνα.



Σχήμα 3.3 PRISMA (Moher et al., 2009)

Συλλογή δεδομένων

Τα άρθρα (45) που συμπεριλήφθηκαν στην έρευνα αποτέλεσαν αντικείμενο ανάλυσης, μέσω της οποίας προέκυψαν ποιοτικά και ποσοτικά δεδομένα, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 3.2. Τα ποσοτικά δεδομένα βοήθησαν στη συλλογή πληροφοριών συγκεκριμένων κατηγοριών κι αναλύθηκαν με ποσοτική ανάλυση. Τα ποιοτικά δεδομένα βοήθησαν στον εντοπισμό των απόψεων των ερευνητών, καθώς και στον εντοπισμό της σύγκλισης ή/και της απόκλισης των ευρημάτων τους σχετικά με το θέμα της παρούσας έρευνας.

Πίνακας 3.3.2 Κατηγορίες πληροφοριών

Τύπος δεδομένων	Κατηγορίες Πληροφοριών
Ποσοτικά	<ul style="list-style-type: none"> Έτος δημοσίευσης

	<ul style="list-style-type: none"> • Είδος δημοσίευσης (Περιοδικό, Συνέδριο) • Χώρα δημοσίευσης • Μέθοδος έρευνας (ποσοτική/ποιοτική) • Γνωστικό αντικείμενο • Ομάδα στόχου • Μέγεθος δείγματος • Διάρκεια παρέμβασης • Μέσα • Εργαλείο συλλογής δεδομένων (ερωτηματολόγιο, συνεντεύξεις, κ.ά.)
Ποιοτικά	<ul style="list-style-type: none"> • Ερευνητικά ερωτήματα-υποθέσεις • Αποτελέσματα • Αιτιολόγηση αποτελεσμάτων

4. Ανάλυση αποτελεσμάτων (ανάλυση, οργάνωση και ταξινόμηση δεδομένων)

Ο συνολικός αριθμός επιστημονικών άρθρων που αποτελούν τη βάση για τη συλλογή κι ανάλυση των δεδομένων της έρευνας είναι 45. Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, η ενδεδειγμένη μελέτη των δυνητικά καταλληλότερων άρθρων οδήγησε στην τελική επιλογή εκείνων που ικανοποιούσαν τα τιθέμενα κριτήρια επιλογής.

Μετά την ολοκλήρωση της τελικής επιλογής ακολούθησε η ανάλυση των άρθρων αυτών μέσα από τη διαδικασία της αποδελτίωσης αυτών, ώστε να συλλεχθούν, να οργανωθούν και να αναλυθούν τα ποσοτικά και ποιοτικά δεδομένα. Η διαδικασία αυτή διήρκεσε 2 μήνες.

4.1 Ανάλυση ποσοτικών δεδομένων έρευνας

Τα άρθρα οργανώθηκαν κατά αλφαβητική σειρά με βάση το όνομα του συγγραφέα και έλαβαν αύξοντα αριθμό, γεγονός που βοηθάει στην αναφορά τους σε αυτά κατά το στάδιο της ανάλυσης.

Πίνακας 4.1.1 Ερευνητικά άρθρα

Συγγραφέας	Τίτλος άρθρου	Αριθμός
Akyol, C. et al., 2022	3D printers as an educational tool in gifted education: effective use, problems and suggestions.	1
Anđić, B. et al., 2022	Contribution of 3D modelling and printing to learning in primary schools: a case study with visually impaired students from an inclusive Biology classroom.	2
Anđić, B. et al., 2023	A phenomenography study of STEM teachers' conceptions of using three-dimensional modeling and printing (3DMP) in teaching.	3
Arslan, A., & Erdogan, I., 2021	Use of 3D Printers for Teacher Training and Sample Activities.	4
Berman, A. et al., 2018	Exploring the 3D printing process for young children in curriculum-aligned making in the classroom.	5
Bower, M. et al., 2020	Makerspaces pedagogy—supports and constraints during 3D design and 3D printing activities in primary schools.	6
Buehler, E. et al., 2016	Investigating the implications of 3D printing in special education.	7
Buehler, E. et al., 2014	ABC and 3D: opportunities and obstacles to 3D printing in special education environments.	8
Castro-Calviño, L. et al., 2020	Patrimonializarte: a heritage education program based on new technologies and local heritage.	9
Chen, M. et al., 2014	Effects of a 3D printing course on mental rotation ability among 10-year-old primary students.	10
Corum, K., & Garofalo, J., 2015	Using digital fabrication to support student learning.	11

Dooly, M. et al., 2021	Launching a solidarity campaign: Technology-enhanced project-based language learning to promote entrepreneurial education and social awareness.	12
Farnicka, M., & Serrano Diaz, N., 2019	3D printing skills as a resource for the development of creativity in middle childhood.	13
Fell, C. et al., 2017	Additive Manufacturing and Collaborative Learning for Pre-hospital Care Environment.	14
Forbes, A. et al., 2021	An analysis of the nature of young students' STEM learning in 3D technology-enhanced makerspaces.	15
Gratani, F. et al., 2023	Learning in the post-digital era. Transforming education through the Maker approach.	16
Güteryüz, H., & Dilber, R., 2022	Robotic coding and 3D printer with STEM activities; the effect of science teacher candidates on STEM awareness and STEM self-efficacy.	17
Haas, B. et al., 2021	Case study on augmented reality, digital and physical modelling with mathematical learning disabilities students in an elementary school in Luxembourg.	18
Haas, B. et al., 2022	Evaluating Technology-Enhanced, STEAM-Based Remote Teaching With Parental Support in Luxembourgish Early Childhood Education.	19
Huang, C. Y., & Wang, J. C., 2022	Effectiveness of a three-dimensional-printing curriculum: Developing and evaluating an elementary school design-oriented model course.	20
Jin, Y., 2020	What Else Did Pre-service Teachers Learn in a Maker Education Course in a Teacher Education Program Beyond Content?.	21
Junthong, N. et al., 2020	The designation of geometry teaching tools for visually-impaired students using plastic geoboards created by 3D printing.	22
Karabörk, M. A., & Durmus, S., 2020	Effects of Redesigned Model Eliciting Activities on Seventh Grade Students' Mathematics Success and Students' Views about These Activities.	23
Leinonen, T. et al., 2020	3D printing in the wild: adopting digital fabrication in elementary school education.	24
Madani, R., 2019	Achieving Teacher-Free Child-Led Design and Additive Manufacturing Using the Sense.	25
Martínez Moreno, J. et al., 2021	Maker Education in Primary Education: Changes in Students' Maker-Mindset and Gender Differences.	26
Matere, I. M. et al., 2021	Effect of design-based learning on elementary students computational thinking skills in visual programming maker course.	27
Maxwell, D. et al., 2019	Applying design fiction in primary schools to explore environmental challenges.	28
McLean, M. et al., 2020	The importance of collaborative design for narrowing the gender gap in engineering: An analysis of engineering identity development in elementary students.	29
McLoughlin, L. et al., 2016	Virtual sculpting and 3D printing for young people with disabilities.	30
Miller-Ray, J., 2019	Investigating the impact of a community makers' guild training program on elementary and middle school educator perceptions of STEM (science, technology, engineering, and mathematics).	31
Ng, O. L., & Chan, T., 2019	Learning as Making: Using 3D computer-aided design to enhance the learning of shape and space in STEM-integrated ways.	32
Nikou, S. A., 2023	Student motivation and engagement in maker activities under the lens of the Activity Theory: a case study in a primary school.	33
Nikou, S. A. et al., 2021	Investigating elementary school students' attitudes in makerspace activities through design-based learning.	34

Novak, E., & Wisdom, S., 2018	Effects of 3D printing project-based learning on preservice elementary teachers' science attitudes, science content knowledge, and anxiety about teaching science.	35
Novak, E., & Wisdom, S., 2020	Using 3D printing in science for elementary teachers.	36
O'Reilly, J., & Barry, B., 2021	The effect of the use of computer-aided design (CAD) and a 3D printer on the child's competence in mathematics.	37
Özdemir, S. et al., 2017	Furnishing new generations with productive ICT skills to make them the maker of their own future.	38
Schlegel, R. J. et al., 2019	Making in the classroom: Longitudinal evidence of increases in self-efficacy and STEM possible selves over time.	39
Smith, S., 2018	Children's negotiations of visualization skills during a design-based learning experience using nondigital and digital techniques.	40
Spyros, P. et al., 2021	The effect of 3D Printing technology on primary school students' content knowledge, anxiety and interest toward science.	41
Trust, T., & Maloy, R. W., 2017	Why 3D print? The 21st-century skills students develop while engaging in 3D printing projects.	42
Turner, H. et al., 2017	Using 3D printing to enhance understanding and engagement with young audiences: lessons from workshops in a museum.	43
Vones, K. et al., 2018	3D-printing 'Ocean plastic'—Fostering childrens' engagement with sustainability.	44
Vuopala, E. et al., 2020	Implementing a maker culture in elementary school—students' perspectives.	45

- Έτος δημοσίευσης

Στον πίνακα 4.1.2 παρουσιάζεται το σύνολο των άρθρων ανά έτος. Η ομαδοποίηση αυτή αφορά τα 45 άρθρα που αποτελούν τα τελικώς επιλεγμένα για την έρευνα. Σύμφωνα με τα δεδομένα τα περισσότερα άρθρα δημοσιεύτηκαν μεταξύ 2020-2021.

Πίνακας 4.1.2 Έτος δημοσίευσης

Έτος δημοσίευσης	Πλήθος (n=45)	Ποσοστό n%	Αριθμός άρθρου
2014	2	4%	8, 10
2015	1	2%	11
2016	2	4%	7, 30
2017	4	9%	14, 38, 42, 43
2018	4	9%	5, 35, 40, 44
2019	6	13%	13, 25, 28, 31, 32, 39
2020	9	20%	6, 9, 21, 22, 23, 24, 29, 36, 45
2021	9	20%	4, 12, 15, 18, 26, 27, 34, 37, 41
2022	5	12%	1, 2, 17, 19, 20

2023	3	7%	3, 16, 33
Σύνολο	45	100%	

- **Είδος δημοσίευσης**

Στον πίνακα 4.1.3 παρουσιάζεται το πλήθος των άρθρων με βάση το είδος της δημοσίευσης που αυτά αποτελούν. Το μεγαλύτερο μέρος των άρθρων αποτελούν δημοσιεύσεις σε επιστημονικά περιοδικά.

Πίνακας 4.1.3 Είδος δημοσίευσης

Είδος δημοσίευσης	Πλήθος (n=45)	Ποσοστό n%	Αριθμός άρθρου
Περιοδικό	40	89%	1, 2, 3, 4, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 15, 16, 17, 18, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45
Συνέδριο	4	9%	5, 8, 14, 34
Κεφάλαιο	1	2%	19
Σύνολο	45	100%	

- **Χώρα δημοσίευσης**

Ο πίνακας 4.1.4 παρουσιάζει ένα ακόμη ποσοτικό δεδομένο που αναζητήθηκε κατά τη μελέτη των άρθρων. Αυτό είναι η χώρα δημοσίευσης της εκάστοτε ερευνητικής μελέτης. Οι περισσότερες έρευνες φαίνεται πως έλαβαν χώρα στην Αμερική.

Πίνακας 4.1.4 Χώρα διεξαγωγής

Χώρα δημοσίευσης	Πλήθος (n=45)	Ποσοστό n%	Αριθμός άρθρου
Αγγλία	5	12%	28, 30, 33, 34, 37
Αμερική	13	29%	5, 7, 8, 11, 21, 29, 31, 35, 36, 39, 40, 42, 43
Αυστραλία	2	4%	6, 15
Αυστρία	1	2%	2
Ελλάδα	1	2%	41
Ισπανία	3	7%	9, 12, 26
Ιταλία	1	2%	16
Καναδάς	1	2%	14
Κίνα	2	4%	10, 32

Λουξεμβούργο	2	4%	18, 19
Μαυροβούνιο	1	2%	3
Πολωνία	1	2%	13
Πορτογαλία	1	2%	13
Σαουδική	1	2%	25
Αραβία			
Σκωτία	1	2%	44
Ταϊβάν	2	4%	20, 27
Ταϊλάνδη	1	2%	22
Τουρκία	5	12%	1, 4, 17, 23, 38
Φιλανδία	2	4%	24, 45
Σύνολο	45	100%	

- Ερευνητική μέθοδος

Τα ερευνητικά άρθρα που επιλέχθηκαν αναλύθηκαν κι οργανώθηκαν και βάσει της μεθόδου έρευνας που ακολουθήθηκε ανά περίπτωση. Στον πίνακα 4.1.5 συνοψίζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα. Όπως φαίνεται η πλειοψηφία των ερευνών τήρησε μικτή μέθοδο έρευνας.

Πίνακας 4.1.5 Μέθοδος έρευνας

Μέθοδος έρευνας	Πλήθος (n=45)	Ποσοστό (n%)	Αριθμός άρθρου
Ποσοτική	8	18%	10, 11, 22, 25, 27, 31, 41, 42
Ποιοτική	17	38%	3, 7, 8, 12, 13, 14, 15, 18, 19, 21, 28, 29, 30, 38, 40, 43, 44
Μικτή	20	44%	1, 2, 4, 5, 6, 9, 16, 17, 20, 23, 24, 26, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 39, 45
Σύνολο	45	100%	

Ένα ακόμα στοιχείο βάσει του οποίου αναλύθηκαν τα επιστημονικά άρθρα είναι κι ο τύπος της μεθόδου έρευνας που εφαρμόστηκε ανά περίπτωση. Αυτή η ανάλυση αφορά μόνο τα άρθρα με ποσοτική και μικτή μέθοδο έρευνας. Συνεπώς, αφορά μόνο τα 28 από τα 45 συνολικά άρθρα. Όπως παρουσιάζεται στον πίνακα 4.1.6, μέσα από την ανάλυση προέκυψαν έρευνες που ήταν:

- Within
- Between
- Pre-post
- Case study
- Ethnographic
- Post

Πίνακας 4.1.6 Τύποι μεθόδου

Τύπος Μεθόδου	Πλήθος (n=28)	Ποσοστό (n%)	Αριθμός άρθρου
Within	5	18%	1, 20, 32, 34, 39
Between	5	18%	10, 22, 26, 27, 41
Pre-post	12	42%	4, 5, 9, 11, 16, 17, 23, 25, 31, 35, 36, 37
Case study	4	14%	2, 6, 42, 45
Ethnographic	1	4%	24
Post	1	4%	33
Σύνολο	28	100%	

▪ Ερευνητικές ομάδες

Στον πίνακα 4.1.7 παρουσιάζεται ο αριθμός των ομάδων βάσει των οποίων πραγματοποιήθηκαν οι παρεμβάσεις των ερευνών που μελετήθηκαν. Για την οργάνωση αυτού του δεδομένου εξαιρέθηκαν οι ποιοτικές έρευνες, στις οποίες κατά βάση δεν ορίζονται ομάδες. Επομένως, από το σύνολο των 45 άρθρων μόνο τα 28 εξετάστηκαν ως προς τον αριθμό ομάδων έρευνας, τα οποία αποτελούν ποσοτικές και μικτές έρευνες. Από τα 28 άρθρα φαίνεται ότι τα περισσότερα έκαναν παρεμβάσεις αξιοποιώντας μια ομάδα έρευνας.

Πίνακας 4.1.7 Αριθμός ομάδων

Αριθμός ομάδων	Πλήθος (n=28)	Ποσοστό (n%)	Αριθμός άρθρου
Μία	23	82%	1, 2, 4, 5, 6, 9, 11, 16, 17, 20, 23, 24, 25, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 39, 42, 45

Δύο	4	14%	10, 22, 27, 41
Τρεις	1	4%	26
Σύνολο	28	100%	

Στο σημείο αυτό παρουσιάζονται στοιχεία για την ομάδα στόχου των επιστημονικών άρθρων. Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 4.1.8 υπήρχαν έρευνες που χρησιμοποίησαν αποκλειστικά μαθητές, ενώ άλλες μαθητές κι εκπαιδευτικούς ή γονείς. Μία έρευνα συμπεριέλαβε ένα σύνολο επαγγελματιών πέρα από μαθητές κι εκπαιδευτικούς, όπως βιβλιοθηκονόμους, ομαδάρχες και διευθυντές κατασκηνώσεων. Αυτή η περίπτωση αναφέρεται ως «μίξη». Σύμφωνα με την ανάλυση η πλειοψηφία των άρθρων έχει ως ομάδα στόχου τους μαθητές.

Πίνακας 4.1.8 Είδος ομάδας στόχου

Είδος ομάδας στόχου	Πλήθος ερευνών (n=45)					Αριθμός άρθρου
	26	8	7	1	1	
Μαθητές	x					1, 5, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 18, 20, 23, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 33, 34, 37, 38, 39, 40, 41, 43, 44, 45
Εκπαιδευτικοί		x				3, 4, 6, 17, 21, 35, 36, 42
Μαθητές - Εκπαιδευτικοί			x			2, 7, 8, 9, 15, 22, 24, 32
Μαθητές - Γονείς				x		19
Μίξη					x	31
Ποσοστό %	58%	17%	16%	3%	3%	

Ο Πίνακας 4.1.9 παρουσιάζει το μέγεθος του δείγματος που χρησιμοποιήθηκε στις έρευνες των 45 επιστημονικών άρθρων που μελετήθηκαν. Οι περισσότερες έρευνες φαίνεται ότι είχαν δείγμα <50.

Πίνακας 4.1.9 Μέγεθος δείγματος

Μέγεθος δείγματος	Πλήθος (n=45)	Ποσοστό (n%)	Αριθμός άρθρου
-------------------	---------------	--------------	----------------

1-50	29	64%	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 10, 11, 12, 14, 16, 17, 18, 19, 21, 22, 23, 25, 30, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 40, 43, 45
51-100	7	17%	20, 24, 27, 28, 29, 31, 42
101-150	1	2%	9, 41
151- 200	3	7%	32, 39
201- 250	1	2%	26
251- 300	0	0%	0
301- 350	0	0%	0
351- 400	1	2%	13
401- 450	0	0%	0
451 - 500	0	0%	0
501 - 550	1	2%	15
Χωρίς αναφορά	2	4%	8, 44
Σύνολο	45	100%	

- Βαθμίδα εκπαίδευσης

Η έρευνα αυτή, όπως έχει ήδη αναφερθεί, επικεντρώνεται στη μελέτη άρθρων που αφορούν την Πρωτοβάθμια Εκπαίδευση εξετάζοντας τόσο το πλαίσιο της γενικής όσο και της ειδικής αγωγής. Στον Πίνακα 4.1.10 παρουσιάζεται ο διαχωρισμός των επιστημονικών άρθρων ανάλογα με τον τύπο εκπαίδευσης. Όπως φαίνεται και στον πίνακα υπάρχουν έρευνες που έγιναν στο πλαίσιο της γενικής εκπαίδευσης, της ειδικής και δυο περιπτώσεις συμπεριληπτικής εκπαίδευσης, δηλαδή περιπτώσεις που συνδυάζουν δείγμα τόσο από τον χώρο της γενικής όσο και από τον χώρο της ειδικής εκπαίδευσης. Ωστόσο, ο μεγαλύτερος αριθμός άρθρων αφορά τη Γενική εκπαίδευση.

Πίνακας 4.1.10 Βαθμίδα εκπαίδευσης

Βαθμίδα εκπαίδευσης	Πλήθος (n=45)	Ποσοστό (n%)	Αριθμός άρθρου
Γενική εκπαίδευση	39	86%	1, 3, 4, 5, 6, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 19, 20, 21, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 31. 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45
Ειδική εκπαίδευση	4	9%	8, 18, 22, 30
Συμπεριληπτική εκπαίδευση	2	5%	2, 7

▪ Διάρκεια παρέμβασης

Αναφορικά με αυτό το στοιχείο αξίζει να αναφερθεί πως εντοπίστηκε μεγάλος βαθμός ετερογένειας. Επιπλέον, υπήρξαν και περιπτώσεις όπου δεν αναφερόταν καθόλου η διάρκεια παρέμβασης, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 4.1.11. Ως εκ τούτου, η ανάλυση αυτού του στοιχείου ίσως μειονεκτεί ως προς τον βαθμό εγκυρότητας.

Πίνακας 4.1.11 Διάρκεια παρέμβασης

Διάρκεια παρέμβασης	Πλήθος (n=45)	Ποσοστό (n%)	Αριθμός άρθρου
1-24 ώρες	11	24%	3, 5, 11, 17, 18, 22, 26, 31, 33, 38, 40
1-7 μέρες	4	9%	6, 12, 27, 45
1-4 εβδομάδες	4	9%	14, 19, 23, 36
1-6 μήνες	6	14%	21, 24, 29, 31, 37, 41
6 μήνες - 1χρόνος	10	22%	1, 2, 8, 9, 10, 13, 16, 20, 28, 32
1-2 χρόνια	2	4%	30, 39
Δεν αναφέρεται	8	18%	4, 7, 15, 25, 35, 42, 43, 44
Σύνολο	45	100%	

▪ Γνωστικό αντικείμενο

Στον πίνακα 4.1.12 παρουσιάζεται το γνωστικό αντικείμενο στο πλαίσιο του οποίου διεξήχθη κάθε έρευνα. Όπως φαίνεται, οι περισσότερες έρευνες έγιναν στο πεδίο του Stem.

Πίνακας 4.1.12 Γνωστικό αντικείμενο

Γνωστικό αντικείμενο	Πλήθος (n=45)	Ποσοστό (n%)	Αριθμός άρθρου
Stem	16	36%	3, 6, 7, 8, 14, 15, 16, 17, 19, 24, 28, 31, 32, 33, 34, 41
Steam	1	2%	1
Φυσική	4	10%	5, 35, 36, 39
Μαθηματικά	4	10%	18, 22, 23, 37
Ιστορία	1	2%	43

Πολιτισμός	1	2%	9
Γλώσσα (Αγγλικά)	1	2%	12
Τέχνη	1	2%	30
Βιολογία	1	2%	2
Χωροταξικές δεξιότητες	3	7%	10, 11, 40
Υπολογιστική σκέψη (computational thinking)	1	2%	27
Βιωσιμότητα (sustainability)	1	2%	44
Δεξιότητες χειρισμού 3D Printing	1	2%	13
Δεξιότητες σχεδιασμού - παραγωγής	6	13%	20, 25, 26, 29, 38, 45
Γνώση τεχνολογικού παιδαγωγικού περιεχομένου	1	2%	4
Δεξιότητες 21 ^{ου} αιώνα	2	4%	21, 42
Σύνολο	45	100%	

- Μέσα

Αναφορικά με τα μέσα η ανάλυση έγινε σε δύο επίπεδα. Το πρώτο είναι ο εξοπλισμός που αξιοποιήθηκε ανά έρευνα. Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 4.1.13 σε όλες τις έρευνες χρησιμοποιήθηκε 3D Printer, ενώ σε κάποιες αποτέλεσε και τον μοναδικό εξοπλισμό. Το δεύτερο επίπεδο ανάλυσης είναι τα λογισμικά τρισδιάστατης εκτύπωσης που αξιοποιήθηκαν. Σύμφωνα με τον Πίνακα 4.1.14 σε ορισμένες έρευνες αξιοποιήθηκαν διαφορετικά λογισμικά τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Στον Πίνακα 4.1.13 παρουσιάζονται τα μέσα αναφορικά με τον εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή των παρεμβάσεων των ερευνητικών μελετών. Στα περισσότερα άρθρα προκύπτει ότι αξιοποιήθηκε παραπάνω από 1 μέσο.

Πίνακας 4.1.13 Εξοπλισμός

Εξοπλισμός	Πλήθος (n=57)	Ποσοστό (n%)	Αριθμός άρθρου
------------	------------------	-----------------	----------------

Makey	1	2%	26
Makey			
3D scanner	5	8%	12, 14, 25, 40, 44
laser-cut	3	6%	33, 34, 45
2D printers	2	3%	21, 31
AR	3	6%	9, 18, 19
geoboard	1	2%	22
microbits	2	3%	33, 45
Arduino	1	2%	17
Lego Kit	1	2%	16
robotic kits	2	3%	21, 31
traditional	2	3%	29, 39
& e-textile			
circuit			
supplies			
hot glue	1	2%	40
plasticine	2	3%	28, 44
clay and	2	3%	25, 45
fabric			
Traditional	11	20%	2, 10, 13, 18, 23, 25, 27, 28, 32, 40, 41
teaching			
Mόνο 3D	18	32%	1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 11, 15, 20, 24, 30, 35, 36,
Printer			37, 38, 42, 43
Σύνολο	57	100%	

Πίνακας 4.1.14 Λογισμικά

Λογισμικά	Πλήθος (n=47)	Ποσοστό (n%)	Αριθμός άρθρου
Scratch	1	2%	26
Tinkercad	22	48%	1, 2, 8, 13, 14, 16, 20, 24, 26, 28, 29, 32, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 45
Google's	2	4%	10, 22
SketchUp			
123D Design	3	6%	8, 40, 42
Microsoft 3D	1	2%	4
builder			
FabLab	1	2%	11
ModelMaker			
Makers Empire	2	4%	6,15
3D app			

3D printing software	2	4%	9, 41
Ultimaker Cura			
GeoGebra 3D Graphing	1	2%	18
Zaxe (Desktop)	1	2%	17
PLA programs geolocation software	1	2%	9
Geoaugmentaty			
3D AR tool			
Arduino	1	2%	27
Microcontroller with 3D printing design			
Χωρίς αναφορά	9	20%	3, 5, 7, 19, 21, 23, 30, 31, 43
Σύνολο	47	100%	

- **Εργαλεία συλλογής δεδομένων**

Στον Πίνακα 4.1.15 φαίνεται η ανάλυση των εργαλείων συλλογής δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στις έρευνες. Τα βασικότερα εργαλεία που αξιοποιήθηκαν είναι τα ερωτηματολόγια και οι συνεντεύξεις, όπως φαίνεται και στον πίνακα. Σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκαν και σταθμισμένα εργαλεία.

Πίνακας 4.1.15 Εργαλεία συλλογής δεδομένων

Εργαλεία συλλογής δεδομένων	Πλήθος (n=89)	Ποσοστό (n%)	Αριθμός άρθρου
Ερωτηματολόγιο	26	29%	1, 2, 6, 5, 9, 10, 11, 13, 16, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 33, 34, 36, 37, 38, 39, 41, 42, 45
Σταθμισμένα τεστ	5	6%	4, 17, 31, 32, 35
Συνεντεύξεις	23	26%	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 12, 14, 15, 17, 18, 20, 23, 24, 26, 28, 29, 33, 34, 38
Παρατηρήσεις	20	22%	5, 6, 7, 8, 13, 15, 18, 19, 20, 23, 24, 28, 29, 30, 32, 37, 38, 39, 40, 44
Σημειώσεις	9	10%	6, 16, 17, 20, 28, 32, 36, 37, 40
Τεχνουργήματα	5	6%	6, 30, 32, 40, 45

Σχολικό εγχειρίδιο	1	1%	23
Σύνολο	89	100%	

4.2 Ανάλυση ποιοτικών δεδομένων έρευνας

Πέρα από τα ποσοτικά στοιχεία που αναλύθηκαν, τα επιστημονικά άρθρα πέρασαν κι από τη διαδικασία ανάλυσης των ποιοτικών δεδομένων που περιλαμβάνουν. Πρόκειται για τα ερευνητικά ερωτήματα και τα αποτελέσματα στα οποία κατέληξαν οι έρευνες.

- Ερευνητικά ερωτήματα

Ένα πρώτο επίπεδο ανάλυσης των ερευνητικών ερωτημάτων πραγματοποιήθηκε με βάση το αν συγκρίνουν ή όχι τα μέσα που χρησιμοποιούν μεταξύ τους. Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 4.2.1, υπάρχουν περιπτώσεις που παρά το γεγονός ότι στις έρευνες χρησιμοποιούνται παραπάνω από 1 μέσα, σκοπός δεν ήταν η σύγκρισή τους, καθώς τα επιπλέον μέσα χρησιμοποιήθηκαν επικουρικά ώστε να υλοποιηθούν οι δραστηριότητες τρισδιάστατης εκτύπωσης. Παράλληλα, εντοπίζονται και περιπτώσεις που τα πολλαπλά μέσα (συμπεριλαμβανομένης της τρισδιάστατης εκτύπωσης) εξετάστηκαν συνολικά ως προς την συνεισφορά τους στο ευρύτερο πλαίσιο του Maker Education.

Πίνακας 4.2.1 Γενικός σκοπός ερευνών

Σκοπός έρευνας	Πλήθος (n=45)	Ποσοστό (n%)	Αριθμός άρθρου
Σύγκριση μέσων	11	24%	9, 10, 13, 18, 19, 22, 23, 27, 32, 40, 41
Πολλαπλά μέσα μη συγκρινόμενα	13	29%	2, 16, 21, 25, 26, 28, 29, 31, 33, 34, 39, 44, 45
Έλεγχος ενός μέσου	21	47%	1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 11, 12, 14, 15, 17, 20, 24, 30, 35, 36, 37, 38, 42, 43
Σύνολο	45	100%	

Σε ένα δεύτερο επίπεδο ανάλυσης τα ερευνητικά ερωτήματα μελετήθηκαν κι οργανώθηκαν με βάση τον τομέα που εξέτασαν. Η μάθηση είναι ένας τομέας που απασχόλησε τις περισσότερες έρευνες. Ωστόσο, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 4.2.2, υπήρξαν και άλλα θέματα που αποτέλεσαν αντικείμενο διερεύνησης, τα οποία και κατηγοριοποιήθηκαν.

Πίνακας 4.2.2 Κατηγορίες ερευνητικών ερωτημάτων

Κατηγορία ερευνητικού ερωτήματος	Ερευνητικό ερώτημα	Συχνότητα εμφάνισης
Μαθησιακά στοιχεία	Γνώσεις	45
	Δεξιότητες	33
Τεχνικά θέματα	Χρηστικότητα	6
	Ευκολία χρήσης	9
	Ευχαρίστηση	16
	Εμπλοκή	12
Συναισθήματα/ Εμπειρίες	Κίνητρα	5
	Αυτονομία	5
	Συνεργασία	10
	Δημιουργικότητα	13
	Αυτοπεποίθηση	10
	Αυτοαποτελεσματικότητα	9

- **Αποτελέσματα**

Ένα ακόμη σημείο ανάλυσης κι οργάνωσης των επιστημονικών άρθρων που μελετήθηκαν είναι τα αποτελέσματα. Αυτά εξετάστηκαν κι οργανώθηκαν ανάλογα με το αν ήταν θετικά, αρνητικά ή ουδέτερα, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 4.2.3. Στα θετικά αποτελέσματα εντάσσονται εκείνα που υπήρχαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ της πειραματικής ομάδας και της ομάδας ελέγχου, με την ομάδα που αξιοποίησε την τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης να υπερτερεί σε απόδοση. Στα ουδέτερα εντάσσονται εκείνα όπου δεν εντοπίστηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ ομάδας ελέγχου και πειραματικής, με την ομάδα που χρησιμοποίησε την τρισδιάστατη εκτύπωση να έχει την ίδια απόδοση με τα άλλα μέσα. Τέλος, τα αρνητικά αποτελέσματα σημαίνουν ότι η ομάδα που αξιοποίησε την τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης είχε μικρότερη απόδοση και μεγαλύτερη δυσκολία σε σχέση με την ομάδα ελέγχου.

Πίνακας 4.2.3 Είδος αποτελεσμάτων

Είδος αποτελεσμάτων	Πλήθος (n=45)	Ποσοστό (n%)	Αριθμός άρθρου
Θετικά	39	82%	1, 2, 3, 4, 6, 7, 9, 10, 11, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 26, 25, 27, 28, 29, 30, 32, 33, 34, 35, 36, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45
Ουδέτερα	4	9%	13, 27, 31, 37

Αρνητικά	2	4%	5, 8
Σύνολο	45	100%	

Επιπλέον, τα άρθρα αναλύθηκαν και ως προς το αν τα αποτελέσματα, με βάση τα 9 συχνότερα ερευνητικά ερωτήματα που τέθηκαν (γνώσεις, δεξιότητες, ευκολία χρήσης, ευχαρίστηση, συνεργασία, δημιουργικότητα, αυτοπεποίθηση, αυτοαποτελεσματικότητα, εμπλοκή), ήταν θετικά, ουδέτερα ή αρνητικά (Πίνακας 4.2.4). Στα θετικά αποτελέσματα εντάχθηκαν εκείνα τα άρθρα στα οποία η τρισδιάστατη εκτύπωση είτε υπερτερούσε σε απόδοση από τα άλλα μέσα είτε, αν ήταν το μόνο μέσο, είχε θετική επιρροή στους χρήστες (εδώ βρίσκονται τα περισσότερα). Στα ουδέτερα αποτελέσματα, εντάχθηκαν εκείνα τα άρθρα στα οποία εντοπίστηκε ότι η τρισδιάστατη εκτύπωση είχε την ίδια απόδοση σε σχέση με τα υπόλοιπα μέσα είτε, αν ήταν το μοναδικό μέσο, δεν είχε ούτε θετική ούτε αρνητική επιρροή.

Πίνακας 4.2.4 Αποτελέσματα βάσει συχνότερων ερευνητικών ερωτημάτων

Είδος αποτελέσματος	Γνώσεις	Δεξ.	Δημ.	Ευχαρ.	Αυτοπ.	Ευκολία χρήσης	Αυτοαπ.	Εμπλ.	Συν.
Θετικό	37	32	13	15	8	7	9	9	10
Ουδέτερο		1		1	2				
Αρνητικό						2			

Σημειώσεις. Δεξ. = Δεξιότητες, Δημ. = Δημιουργικότητα, Ευχαρ. = Ευχαρίστηση, Αυτοπ. = αυτοπεποίθηση, Αυτοαπ. = Αυτοαποτελεσματικότητα, Εμπλ. = Εμπλοκή, Συν. = Συνεργασία

Εστιάζοντας την προσοχή στα άρθρα με τα θετικά αποτελέσματα, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 4.2.5 τα περισσότερα άρθρα με θετικά αποτελέσματα είχαν pre-post σχεδιασμό. Αξίζει να σημειωθεί ότι η μελέτη του σχεδιασμού έρευνας έγινε για τα άρθρα με ποσοτικές και μικτές μεθόδους έρευνας, δηλαδή για τα 28 από τα 45 στο σύνολο υπό μελέτη άρθρα.

Πίνακας 4.2.5 Είδος σχεδιασμού έρευνας άρθρων με θετικά αποτελέσματα

Είδος σχεδιασμού έρευνας	Πλήθος (n=25)	Ποσοστό (n%)	Αριθμός άρθρου
Within	5	20%	1, 20, 32, 34, 39
Between	5	20%	10, 22, 26, 27, 41
Pre-Post	9	36%	4, 9, 11, 16, 17, 23, 25, 35, 36
Post	1	4%	33
Case study	4	16%	2, 6, 42, 45
Ethnographic	1	4%	24
Σύνολο	25	100%	

Πέρα από τα άρθρα με θετικά αποτελέσματα υπήρξαν κι ορισμένα, λίγα σε αριθμό, που είχαν αρνητικά και ουδέτερα αποτελέσματα. Στον πίνακα 4.2.6 παρουσιάζονται τα άρθρα που εμφάνισαν αρνητικά αποτελέσματα κι οι λόγοι που συνέβη αυτό, ενώ στον πίνακα 4.2.7 παρουσιάζονται τα άρθρα με ουδέτερα αποτελέσματα, εκείνα δηλαδή που δεν προκάλεσαν ούτε θετικά ούτε αρνητικά αποτελέσματα.

Πίνακας 4.2.6 Αρνητικά αποτελέσματα – αιτίες

Πλήθος (n=2)	Ποσοστό (n%)	Αιτία αρνητικού αποτελέσματος			Μέσο	Αριθμός άρθρου
		Γνωστικό φορτίο	Δυσκολία χρήσης	Αρνητικό συναίσθημα		
1	50%		x	x	3D printer	5
1	50%	x	x		3D printer	8
Σύνολο 2	100%					

Πίνακας 4.2.7 Ουδέτερα αποτελέσματα – αιτίες

Πλήθος (n=2)	Ποσοστό (n%)	Αιτία ουδέτερου αποτελέσματος			Μέσο	Αριθμός άρθρου
		Ίδια	Δυσφορία- λίγη γνώση	Μη ξεκάθαρο αποτελεσμα		
1	25%	x		x	3D printer	13
1	25%	x	x		3D printer	27
1	25%				3D printer	31
1	25%				3D printer	37
Σύνολο 4	100%					

4.3 Αξιοπιστία άρθρων

Ένα σημαντικό θέμα που τίθεται κατά την ανάλυση επιστημονικών άρθρων είναι η αξιοπιστία των δεδομένων που αυτά προσφέρουν. Η εξέταση της αξιοπιστίας των άρθρων γίνεται θέτοντας ορισμένα κριτήρια, όπως η οργάνωση της έρευνας, ο αριθμός εργαλείων συλλογής δεδομένων, ο αριθμός του δείγματος. Στην παρούσα εργασία το κριτήριο που τέθηκε είναι ο αριθμός του δείγματος, καθώς είναι το μόνο κριτήριο που μπορεί να εφαρμοστεί οριζόντια σε κάθε υπό μελέτη άρθρο. Από την ανάλυση αυτή εξαιρέθηκαν τα άρθρα με ποιοτικό σχεδιασμό έρευνας εκτός από δύο περιπτώσεις λόγω του μεγάλου αριθμού δείγματος.

Αναλυτικότερα, για τον εντοπισμό εγκυρότερων αποτελεσμάτων αναζητήθηκαν άρθρα:

- Απλού σχεδιασμού με 40 άτομα και πάνω.

- Between σχεδιασμού με 120 και πάνω
- Within σχεδιασμού με 40 και πάνω

Με βάση τα παραπάνω κριτήρια εντοπίστηκαν 7 άρθρα που μπορούν να θεωρηθούν ως αξιόπιστα αναφορικά με τα αποτελέσματα που προσφέρουν. Ο πίνακας 4.3.1 συνοψίζει τα άρθρα που συμπεριλαμβάνονται σε αυτό το επίπεδο ανάλυσης. Παράλληλα, ο πίνακας 4.3.2 συνοψίζει την ομάδα στόχο, το γνωστικό αντικείμενο και τον σκοπό κάθε έρευνας.

Πίνακας 4.3.1 Αξιόπιστα άρθρα

Συγγραφέας	Τίτλος άρθρου	Αριθμός
Castro-Calviño, L. et al., 2020	Patrimonializarte: a heritage education program based on new technologies and local heritage.	1
Farnicka, M., & Serrano Diaz, N., 2019	3D printing skills as a resource for the development of creativity in middle childhood.	2
Forbes, A. et al., 2021	An analysis of the nature of young students' STEM learning in 3D technology-enhanced makerspaces.	3
Huang, C. Y., & Wang, J. C., 2022	Effectiveness of a three-dimensional-printing curriculum: Developing and evaluating an elementary school design-oriented model course.	4
Martínez Moreno, J. et al., 2021	Maker Education in Primary Education: Changes in Students' Maker-Mindset and Gender Differences.	5
Ng, O. L., & Chan, T., 2019	Learning as Making: Using 3D computer-aided design to enhance the learning of shape and space in STEM-integrated ways.	6
Spyros, P. et al., 2021	The effect of 3D Printing technology on primary school students' content knowledge, anxiety and interest toward science.	7

Πίνακας 4.3.2 Σύνοψη αξιόπιστων άρθρων

A/A	Γνωστικό Αντικείμενο	Σκοπός	Ερευνητικός σχεδιασμός	Μέγεθος δείγματος	Ομάδα στόχος
1	Πολιτισμός	Η αποτελεσματικότητα της επίπτωσης των νέων τεχνολογιών στη διδασκαλία της πολιτιστικής κληρονομιάς.	Pre-post	123	Μαθητές - Εκπαιδευτικοί - Γονείς
2	Δεξιότητες χειρισμού 3D printing	Η σύγκριση της ανάπτυξης της δημιουργικότητας σε μαθητές από διαφορετικές ομάδες που έλαβαν διαφορετική εκπαίδευση.	Ποιοτική	400	Μαθητές
3	Stem	Η διερεύνηση της αποτελεσματικότητας της	Ποιοτική	524	Μαθητές - Εκπαιδευτικοί

		μαθησιακής διαδικασίας με τη χρήση τεχνολογιών τρισδιάστατης σχεδίασης και εκτύπωσης .			
4	Δεξιότητες σχεδιασμού - παραγωγής	Ο εντοπισμός του βαθμού αποτελεσματικότητας ενός 3D printing προγράμματος εκπαίδευσης στο Δημοτικό.	Within	85	Μαθητές
5	Δεξιότητες σχεδιασμού - παραγωγής	Η ανάλυση του βαθμού αυτοαποτελεσματικότητας, ενδιαφέροντος και κινήτρων με την εμπλοκή μαθητών σε δραστηριότητες σχεδιασμού και παραγωγής.	Between	243	Μαθητές
6	Stem - Μαθηματικά	Ο εντοπισμός του βαθμού επιρροής των 3D Cad προγραμμάτων στο πεδίο της Stem εκπαίδευσης και των μαθηματικών.	Within	165	Μαθητές - Εκπαιδευτικοί
7	Stem	Η διερεύνηση της επίδρασης ενός υποθετικού εκπαιδευτικού σεναρίου 3D σχεδιασμού και εκτύπωσης στην εννοιολογική κατανόηση, το άγχος και το ενδιαφέρον των μαθητών.	Between	111	Μαθητές

Τα ερευνητικά ερωτήματα που έθεσαν οι ερευνητές των παραπάνω άρθρων, όπως παρουσιάζονται και στον πίνακα 4.3.3, είναι οι γνώσεις (n=8), οι δεξιότητες (n=3), η αυτοαποτελεσματικότητα (n=1), το ενδιαφέρον (n=3). Λιγότερο φαίνεται ότι ασχολήθηκαν με τα συναισθήματα (n=1), η δημιουργικότητα (n=1) και τα κίνητρα (n=1).

Πίνακας 4.3.3 Ερευνητικά ερωτήματα αξιόπιστων άρθρων

Κατηγορία ερευνητικού ερωτήματος	Ερευνητικά ερωτήματα	Συχνότητα
Μαθησιακά στοιχεία	Γνώσεις	7
	Δεξιότητες	3
	Αυτοαποτελεσματικότητα	1
	Ενδιαφέρον	3
Συναισθήματα/ εμπειρίες	Κίνητρα	1
	Άγχος	1

Τα παραπάνω ερευνητικά ερωτήματα των αξιόπιστων άρθρων αναλύθηκαν κι ως προς το αν ήταν θετικά, αρνητικά ή ουδέτερα τα αποτελέσματα. Σύμφωνα με τον πίνακα 4.3.4, τα περισσότερα ήταν θετικά για τα δεδομένα που εξετάστηκαν, ενώ σε κανένα από τα αξιόπιστα άρθρα δεν εντοπίστηκε αρνητικό αποτέλεσμα για το ερευνητικό ερώτημα που μελετήθηκε σε κάθε περίπτωση άρθρου.

Πίνακας 4.3.4 Αποτελέσματα αξιόπιστων άρθρων

Αποτελέσματα	Αποτελέσματα	Θετικά	Ουδέτερα	Αρνητικά
Μαθησιακά	Γνώσεις	6	1	0
στοιχεία	Δεξιότητες	3	0	0
	Αυτοαποτελεσματικότητα	1	0	0
Συναισθήματα/ εμπειρίες	Ενδιαφέρον	2	1	0
	Κίνητρα	1	0	0
	Συναισθήματα	1	0	0
	Δημιουργικότητα	1	0	0

Για κάθε ένα από τα 7 άρθρα που εντοπίστηκαν ακολουθεί παρακάτω μια συνοπτική περιγραφή των ευρημάτων και των λόγων που οδήγησαν σε αυτά.

Έρευνα 1^η (Castro-Calviño, L. et al., 2020)

Στην έρευνα αυτή συμμετείχαν 111 μαθητές και 12 εκπαιδευτικοί διεξήχθη στην Ισπανία. Ο στόχος ήταν να ενσωματώσουν την χρήση ψηφιακών τεχνολογιών σε ένα εκπαιδευτικό πρόγραμμα πολιτισμικής κληρονομιάς για μαθητές και να ελέγξουν την αποτελεσματικότητα αυτής της προσέγγισης. Για τις ανάγκες της έρευνας αξιοποιήθηκαν το geolocation software Geoamentaty AR, Ultimaker Cura software, 3D εκτυπωτής και φωτογραφικές μηχανές. Η έρευνα έγινε σε δύο φάσεις. Κατά την πρώτη οι μαθητές ήρθαν σε επαφή με την περιοχή της μελέτης βγάζοντας φωτογραφίες των σημείων ενδιαφέροντος φτιάχνοντας στο τέλος βίντεο με αυτές τις εικόνες.

Στη δεύτερη φάση χρησιμοποίησαν το geolocation software Geoamentaty AR προκειμένου να δημιουργήσουν στοιχεία που υπήρχαν τα παλαιότερα χρόνια στα σημεία ενδιαφέροντος που είχαν φωτογραφίσει. Μετά, σχεδίασαν κι εκτύπωσαν με τον 3D εκτυπωτή έναν μεγαλιθικό τάφο.

Οι ερευνητές εντόπισαν ότι η χρήση των ψηφιακών μέσων είχε θετική επίδραση στην απόκτηση γνώσεων στο πεδίο της πολιτιστικής κληρονομιάς. Οι ερευνητές αυτό το απέδωσαν στο γεγονός ότι μέσα από την χρήση των ICT οι μαθητές έγιναν δημιουργοί και οι ίδιοι κατηύθυναν τη μάθηση, γεγονός που ενίσχυσε και τα κίνητρά τους.

Έρευνα 2^η (Farnicka, M., & Serrano Diaz, N., 2019)

Η έρευνα αυτή είχε ως δείγμα παιδιά νηπιακής ηλικίας. Τα 100 από αυτά ήταν υπήκοοι Πορτογαλίας και τα 300 υπήκοοι Πολωνίας. Μάλιστα, τα 300 νήπια χωρίστηκαν σε τρεις ομάδες των 100 μαθητών ανάλογα με το κοινωνικο-οικονομικό τους επίπεδο.

Όλες οι ομάδες μαθητών ακολούθησαν την ίδια παρέμβαση εκτός από την ομάδα μεσαίου κοινωνικο-οικονομικού επιπέδου. Η παρέμβαση αφορούσε στην εκμάθηση δεξιοτήτων τρισδιάστατης εκτύπωσης. Σε ένα όμως πρώτο επίπεδο χρησιμοποίησαν καθημερινά υλικά για να εξοικειωθούν με την ιδέα των τρισδιάστατων αντικειμένων.

Σύμφωνα με τους ερευνητές εντοπίστηκε διαφορά αναφορικά με την κατάκτηση των δεξιοτήτων τρισδιάστατης εκτύπωσης μεταξύ των διαφορετικών εθνικοτήτων, γεγονός που απέδωσαν στη διαφορετική διάρκεια των παρεμβάσεων. Οι Πορτογάλοι μαθητές παρακολούθησαν παραπάνω ώρες σε σχέση με τους Πολωνούς. Όμως, η διαφορά αυτή δεν ήταν στατιστικά σημαντική. Επίσης, εντόπισαν σημαντική αύξηση της δημιουργικότητας ανεξαρτήτως κοινωνικο-οικονομικού επιπέδου, γεγονός που απέδωσαν στη δυναμική του προγράμματος τρισδιάστατης εκτύπωσης στο οποίο συμμετείχαν οι μαθητές.

Έρευνα 3^η (Forbes, A. et al., 2021)

Η έρευνα αυτή διεξήχθη στην Αυστραλία και συμμετείχαν 500 μαθητές δημοτικού και 24 εκπαιδευτικοί. Στόχος ήταν να εξεταστεί η μαθησιακή διαδικασία και η φύση του μαθησιακού αποτελέσματος με τη χρήση των τεχνολογιών τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Σύμφωνα με τα ευρήματα της έρευνας φαίνεται ότι η εφαρμογή 3D σχεδιασμού ενίσχυσε σημαντικά τον βαθμό εμπλοκής των μαθητών στη μαθησιακή διαδικασία, γεγονός που οι ερευνητές αποδίδουν στην ομαδοσυνεργατική μάθηση και τις ευκαιρίες έκφρασης της δημιουργικότητας που προσφέρουν αυτού του τύπου οι δραστηριότητες.

Παράλληλα, φαίνεται ότι οι δραστηριότητες τρισδιάστατης εκτύπωσης βοήθησαν σημαντικά στην ενίσχυση της κριτικής σκέψης, της δημιουργικότητας και των δεξιοτήτων επίλυσης προβλήματος, καθώς η φύση των δραστηριοτήτων ώθησε τους μαθητές να χρησιμοποιήσουν στρατηγικές και να επινοήσουν νέους τρόπους για την επίλυση των προβλημάτων, με τα οποία έρχονταν αντιμέτωποι. Επίσης, η ομαδοσυνεργατική μάθηση τηρήθηκε βοήθησε τους μαθητές να έχουν τον έλεγχο της μαθησιακής διαδικασίας.

Έρευνα 4^η (Huang, C. Y., & Wang, J. C., 2022)

Η συγκεκριμένα έρευνα διεξήχθη στην Ταϊβάν και συμμετείχαν 85 μαθητές. Στόχος ήταν να εντοπιστεί ο βαθμός αποτελεσματικότητας της ενσωμάτωσης δραστηριοτήτων σχεδιασμού και παραγωγής σε μαθητές Δημοτικού.

Για τις ανάγκες της έρευνας χρησιμοποιήθηκε 3D εκτυπωτής και λογισμικό σχεδιασμού, προκειμένου οι μαθητές να σχεδιάσουν και να εκτυπώσουν τρισδιάστατα λογότυπα και προϊόντα. Στο επίπεδο σχεδιασμού οι ερευνητές εντόπισαν ότι οι μαθητές μπόρεσαν να σχεδιάσουν με ακρίβεια περίπλοκα πολυγωνικά τρισδιάστατα σχέδια ακολουθώντας τις οδηγίες του επιβλέποντα. Επίσης, η δημιουργικότητα ήταν ένα ακόμη στοιχείο που φάνηκε ότι αναπτύχθηκε σημαντικά μέσα από την χρήση των εφαρμογών τρισδιάστατης εκτύπωσης, γεγονός που προέκυψε από τη μελέτη των παραγόμενων αντικειμένων.

Έρευνα 5^η (Martínez Moreno, J. et al., 2021)

Η συγκεκριμένη έρευνα είχε δείγμα μεγέθους 243 μαθητών δημοτικού. Στην έρευνα συμμετείχαν 10 σχολεία στα οποία δόθηκε η δυνατότητα να επιλέξουν εκείνα τα μέσα που θα χρησιμοποιούσαν. Τρία σχολεία διάλεξαν Scratch, άλλα τρία επέλεξαν το Makey Makey, ενώ 4 διάλεξαν την τρισδιάστατη εκτύπωση.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της έρευνας όλοι οι συμμετέχοντες σημείωσαν σημαντική ανάπτυξη της αυτοαποτελεσματικότητας. Επίσης, σημαντική αύξηση σημείωσαν τα κίνητρα κι το ενδιαφέρον για συμμετοχή σε δραστηριότητες σχεδιασμού και παραγωγής.

Έρευνα 6^η (Ng, O. L., & Chan, T., 2019)

Η έρευνα αυτή πραγματοποιήθηκε στην Κίνα και συμμετείχαν 165 μαθητές. Το βασικό μέσο ήταν ο 3D εκτυπωτής, ενώ χρησιμοποιήθηκαν και απλά σχολικά υλικά για τον σχεδιασμό αντικειμένων 2D, ώστε να γίνει η μετάβαση στα 3D αντικείμενα που ήταν και το ζητούμενο της έρευνας.

Σύμφωνα με τους ερευνητές οι μαθητές που συμμετείχαν στο πρόγραμμα ανέπτυξαν μαθηματικές έννοιες, εξαιτίας των δυνατοτήτων που προσφέρουν τα CAD προγράμματα για τη δημιουργία γεωμετρικών στερεών. Επιπλέον, φάνηκε ότι οι χωροταξική τους αντίληψη ενισχύθηκε σημαντικά, γεγονός που αποδόθηκε στην εμπλοκή τους σε δραστηριότητες σχεδιασμού συμμετρικών σχεδίων.

Έρευνα 7^η (Spyros, P. et al., 2021)

Η τελευταία έρευνα που συγκαταλέγεται στα αξιόπιστα άρθρα έγινε στην Ελλάδα με ένα δείγμα 111 μαθητών. Σε σχέση με τις προηγούμενες εδώ έγινε σύγκριση της τρισδιάστατης εκτύπωσης με την παραδοσιακή διδασκαλία.

Όπως φαίνεται, οι ερευνητές εντόπισαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ της πειραματικής ομάδας και της ομάδας ελέγχου. Το πρώτο σημείο διαφοράς εντοπίστηκε στο επίπεδο άγχους που ένιωθαν οι μαθητές. Η πειραματική ομάδα σημείωσε χαμηλότερα επίπεδα άγχους για δραστηριότητες που εμπεριέχουν μαθηματικές έννοιες, ενώ φάνηκε ότι αυξήθηκε το ενδιαφέρον τους για τις δραστηριότητες της Stem εκπαίδευσης.

5. Συζήτηση

Η παρούσα εργασία αποτελεί μια βιβλιογραφική ανασκόπηση για το πεδίο της τρισδιάστατης εκτύπωσης στον χώρο της Πρωτοβάθμιας Εκπαίδευσης. Τα βασικότερα ευρήματα που εντοπίστηκαν κατά την ανάλυση κι οργάνωση των δεδομένων από τη μελέτη των σχετικών επιστημονικών άρθρων παρουσιάζονται παρακάτω.

- Έτος δημοσίευσης

Το μεγαλύτερο μέρος των άρθρων που αφορούν το πεδίο μελέτης της παρούσας εργασίας δημοσιεύτηκαν τα έτη 2020 (20%) και 2021 (20%) (Arslan & Erdogan, 2021· Huang & Wang, 2022· Turner et al., 2022). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η μελέτη της εκπαιδευτικής χρήσης της τρισδιάστατης εκτύπωσης ξεκίνησε από το έτος 2016 στον χώρο της Πανεπιστημιακής Εκπαίδευσης και μετά διερευνήθηκε η αποτελεσματικότητα της εφαρμογής αυτής της νέας τεχνολογίας στον χώρο της σχολικής εκπαίδευσης (βλ. Κεφ. 2.1), καθώς το κόστος του εξοπλισμού που απαιτείται για project τρισδιάστατης εκτύπωσης έγινε πιο προσιτό δίνοντας έτσι στους ερευνητές τη δυνατότητα να επεκτείνουν την έρευνά τους και σε μικρότερες ηλικιακές ομάδες.

- Είδος δημοσίευσης

Σύμφωνα με τα δεδομένα ανάλυσης, η πλειοψηφία των επιστημονικών άρθρων είναι δημοσιεύσεις σε επιστημονικά περιοδικά (Madani, 2019· Novak & Wisdom, 2018). Το στοιχείο αυτό είναι θετικό δεδομένου ότι πρόκειται για έρευνες ολοκληρωμένες κι όχι πιλοτικά προγράμματα ή έρευνες που είναι σε εξέλιξη, όπως στην περίπτωση των συνεδρίων. Έτσι, υπάρχουν απτά αποτελέσματα προς μελέτη.

- Χώρα δημοσίευσης

Αναφορικά με τη χώρα δημοσίευσης των άρθρων παρατηρείται μεγάλη ετερογένεια. Οι περισσότερες έρευνες έγιναν στην Αμερική (13/45, 29%) (Smith, 2018· Trust & Maloy, 2017· Turner et al., 2017). Έπειτα, ακολουθούν η Αγγλία (5/45, 12%) (McLoughlin et al., 2016. O'Reilly & Barry, 2021) και η Τουρκία με αντίστοιχο ποσοστό (Arslan & Erdogan, 2021· Güleriyüz & Dilber, 2022). Το δεδομένο αυτό είναι εξίσου θετικό λαμβάνοντας υπόψη ότι η Αμερική είναι μια χώρα με προηγμένη τεχνολογία και που δύναται να ακολουθεί τους ρυθμούς της διαρκώς εξελισσόμενης τεχνολογίας, γεγονός που βοηθά σημαντικά στη διεξαγωγή ερευνών.

- Ερευνητική μέθοδος

Τα επιστημονικά άρθρα αναλύθηκαν κι ως προς τη μέθοδο έρευνας που ακολούθησαν οι συγγραφείς τους. Κατά την ανάλυση αυτή προέκυψε ότι υπήρξαν έρευνες που πραγματοποιήθηκαν με ποιοτική έρευνα (McLean et al., 2020· Özdemir et al., 2017), άλλες με ποσοτική (Madani, 2019· Miller-Ray, 2019) και οι περισσότερες με μικτή (Huang & Wang, 2022· Karabörk & Durmus, 2020). Το στοιχείο αυτό είναι θετικό, καθώς η μικτή μέθοδος συνδυάζει ποσοτικές και ποιοτικές μεθόδους αξιοποιώντας έτσι τα πλεονεκτήματα κάθε μεθόδου και καλύπτοντας τα κενά της καθεμιάς.

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί το γεγονός ότι πέρα από τη μέθοδο έρευνας εξετάστηκε και το είδος σχεδιασμού έρευνας. Από αυτήν την ανάλυση εξαιρέθηκαν οι ποιοτικές έρευνες. Συνεπώς, από τα 45 άρθρα μόνο τα 28 εξετάστηκαν ως προς αυτό το δεδομένο. Οι περισσότερες έρευνες ακολούθησαν έναν απλό σχεδιασμό (Güteryüz & Dilber, 2022· Novak & Wisdom, 2020), ενώ οι έρευνες με between (Junthong, Netpradit, & Boonlue, 2020· Spyros et al., 2021) και within subject σχεδιασμό (Nikou, Collins, & Hendry, 2021· Schlegel et al., 2019) ήταν οι αμέσως επόμενες σε μεγαλύτερο πληθυσμό. Οι περισσότερες έρευνες με between σχεδιασμό είναι ποσοτικές (Junthong et al., 2020· Spyros et al., 2021), ενώ στην περίπτωση του απλού σχεδιασμού περισσότερες είναι οι μικτές (Castro-Calviño, Rodríguez-Medina, Gómez-Carrasco, & López-Facal, 2020· Gratani, Giannandrea, & Rossi, 2023).

- Βαθμίδα εκπαίδευσης

Ένα στοιχείο το οποίο αναζητήθηκε κι αναλύθηκε, καθώς αποτελεί ερευνητικό ερώτημα της παρούσας εργασίας, είναι η βαθμίδα εκπαίδευσης. Από τα άρθρα που συγκεντρώθηκαν στο τέλος επιλέχθηκαν εκείνα που μελετούσαν την εκπαιδευτική χρήση της τρισδιάστατης εκπαίδευσης αποκλειστικά σε μαθητές και εκπαιδευτικούς της Πρωτοβάθμιας Εκπαίδευσης, τόσο της Γενικής όσο και της Ειδικής Αγωγής. Τα περισσότερα άρθρα αφορούν τη Γενική Εκπαίδευση (39/45, 89%) (Smith, 2018· Trust & Maloy, 2017), ενώ την Ειδική μόλις 4/45 (9%) (Junthong et al., 2020· Mcloughlin et al., 2016).

Αυτό το στοιχείο μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι η τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης βρήκε εφαρμογή στον τομέα της βιομηχανικής παραγωγής και αναφορικά με την εκπαίδευση χρησιμοποιήθηκε πρωτίστως στον χώρο της πανεπιστημιακής εκπαίδευσης για την κατάρτιση των μελλοντικών επαγγελματιών του

χώρου της βιομηχανίας. Έπειτα, το κόστος των μέσων που χρησιμοποιούνται για την 3D εκτύπωση κατά τα πρώτα χρόνια εμφάνισης της τεχνολογίας αυτής ήταν αρκετά υψηλό, γεγονός που εξηγεί τον λόγο για τον οποίο δεν χρησιμοποιήθηκε στην πρωτοβάθμια εκπαίδευση.

Τα τελευταία χρόνια (βλ. Κεφ. 2.1) ξεκίνησε να εμφανίζεται σε δομές σχολικής εκπαίδευσης δεδομένου ότι πλέον κυκλοφορούν μοντέλα χαμηλού κόστους που θα μπορούσε ως έξοδο να το επωμιστεί μια σχολική μονάδα (Ford & Minshall, 2018· Pearson & Dubé, 2022). Ωστόσο, πρόκειται για μια τεχνολογία που απαιτεί από τους μαθητές να χρησιμοποιήσουν σύνθετα μέσα και λογισμικά ωθώντας τους να χρησιμοποιήσουν στρατηγικές μάθησης που ήδη κατέχουν, ώστε να ελέγχουν όλη τη διαδικασία από τον σχεδιασμό μέχρι και την τελική παραγωγή (Corum & Garofalo, 2015· Haas, , Lavicza, Houghton, & Kreis, 2022). Αυτό το στοιχείο εξηγεί τον λόγο για τον οποίο στον χώρο της Ειδικής Αγωγής η τεχνολογία αυτή δεν έχει δοκιμαστεί σε μεγάλο βαθμό.

- Ερευνητικές ομάδες

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας η ομάδα στόχος ήταν μαθητές κι εκπαιδευτικό προσωπικό Πρωτοβάθμιας Εκπαίδευσης, τόσο από τον χώρο της γενικής όσο κι από τον χώρο της ειδικής αγωγής. Σχεδόν όλες οι έρευνες εξέτασαν δείγμα μαθητών (Dooly, Masats Viladoms, & Mont Algamassilla, 2021· O'Reilly & Barry, 2021). Αυτό είναι ένα θετικό στοιχείο που ενισχύει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της παρούσας έρευνας, ειδικά λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι πρόκειται σε όλες τις περιπτώσεις για μαθητές Πρωτοβάθμιας Εκπαίδευσης που αποτελεί και το ζητούμενο. Μόνο 8 έρευνες ασχολήθηκαν αποκλειστικά με εκπαιδευτικούς (Güleyüz & Dilber, 2022· Novak & Wisdom, 2018), οι οποίοι και πάλι εργάζονται στον χώρο της Πρωτοβάθμιας Εκπαίδευσης. Από τα ανωτέρω στοιχεία φαίνεται ότι οι ερευνητές μέχρι στιγμής έχουν επικεντρώσει το ενδιαφέρον τους στα αποτελέσματα που μπορεί να επιφέρει η τρισδιάστατη εκτύπωση στον μαθητικό πληθυσμό.

Με βάση τα δεδομένα ανάλυσης, όπως αυτά αναπτύχθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, το 64% των άρθρων μελέτησε δείγμα μεταξύ 1-50 άτομα (Güleyüz & Dilber, 2022· Novak & Wisdom, 2018). Το στοιχείο αυτό φαίνεται να είναι λογικό δεδομένου ότι ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για την τρισδιάστατη εκτύπωση έχει μεγάλο κόστος και στην περίπτωση μεγάλου δείγματος θα χρειαζόνταν περισσότερες αντίστοιχες συσκευές.

Παράλληλα, το στοιχείο αυτό δείχνει και τον βαθμό δυσκολίας εύρεσης δείγματος για τη μελέτη αυτής της τεχνολογίας στον μαθητικό πληθυσμό σε επίπεδο Πρωτοβάθμιας Εκπαίδευσης. Η αξιοποίηση σε επίπεδο έρευνας μικρών ηλικιακά μαθητών εγείρει ορισμένα οργανωτικά ζητήματα, όπως για παράδειγμα η συλλογή αδειών για τη συμμετοχή των μαθητών στην έρευνα (Krokos et al., 2019). Έπειτα, η υλοποίηση από μικρούς ηλικιακά μαθητές project για τον σχεδιασμό και την παραγωγή τρισδιάστατων αντικειμένων απαιτεί την οργάνωση μικρών ομάδων εργασίας, γεγονός που σημαίνει ότι απαιτείται και περισσότερο προσωπικό που να επιτηρεί και να βοηθά κατά την εκτέλεση των παρεμβάσεων (Pearson & Dubé, 2022).

- Εργαλεία συλλογής δεδομένων

Τα εργαλεία συλλογής δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν ήταν κυρίως ερωτηματολόγια (n=26) (Madani, 2019· Trust & Maloy, 2017). Το στοιχείο αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς αυτά χρησιμοποιούνται σε μεγαλύτερο βαθμό για τη συλλογή δεδομένων στις έρευνες. Επίσης, οι συνεντεύξεις ήταν ένα ακόμη εργαλείο με μεγάλο εξίσου βαθμό εφαρμογής στα άρθρα που μελετήθηκαν (n=23) (Castro-Calviño et al., 2020· Leinonen, Virnes, Hietala, & Brinck, 2020), στοιχείο εξίσου αναμενόμενο δεδομένου ότι σχεδόν οι μισές μελέτες ακολούθησαν μικτή μέθοδο (n=20) (Andić et al., 2022· Nikou, 2023).

- Διάρκεια παρέμβασης

Η ανάλυση της διάρκειας των παρεμβάσεων ήταν αρκετά δύσκολη, καθώς στο σημείο αυτό εντοπίστηκε μεγάλος βαθμός ανομοιογένειας. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι δεν υπήρχε συγκεκριμένος τρόπος καταγραφής της διάρκειας των παρεμβάσεων από τους συγγραφείς.

Ωστόσο, οι έρευνες διήρκησαν το ελάχιστο 60' (Andić et al., 2023· Özdemir et al., 2017) και σε καμία δε γίνεται αναφορά για λιγότερο από μια ώρα. Το στοιχείο αυτό είναι λογικό κι αναμενόμενο δεδομένου ότι η τρισδιάστατη εκτύπωση απαιτεί αρκετό χρόνο για την παραγωγή μιας κατασκευής.

- Μέσα

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι η έρευνα για την αξιοποίηση της τρισδιάστατης εκτύπωσης απαιτεί όχι μόνο τον απαραίτητο εξοπλισμό, αλλά και τα κατάλληλα λογισμικά μέσω των οποίων γίνεται ο σχεδιασμός του παραγόμενου έργου κι

ο έλεγχος της εκτύπωσης. Αυτός είναι κι ο λόγος όπου εξετάστηκαν ξεχωριστά τα μέσα από τα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν ανά έρευνα.

Σε όλες τις έρευνες έγινε χρήση 3D εκτυπωτή (Bower et al., 2020· Forbes et al., 2021), ενώ σε 18 αποτέλεσε και το μοναδικό μέσο (Bower et al., 2020· Akyol, Uygur, & Yanpar-Yelken, 2022). Στις έρευνες που χρησιμοποιήθηκαν παραπάνω από δύο μέσα φαίνεται ότι είχαν μικρότερο δείγμα μαθητών (Maxwell, Pillatt, Edwards, & Newman, 2019· Νίκου, 2023). Ένας πιθανός λόγος που παρατηρείται αυτό είναι το γεγονός ότι όσο αυξάνονται τα μέσα που χρησιμοποιούνται σε μια έρευνα τόσο αυξάνεται κι η δυσκολία οργάνωσης και διαχείρισής της.

Αναφορικά με τα λογισμικά σχεδιασμού που αξιοποιήθηκαν κατά την τρισδιάστατη εκτύπωση αξίζει να αναφερθεί ότι τη μεγαλύτερη συχνότητα χρήσης παρουσίασε το Tinkercad, καθώς εντοπίζεται σε 22 έρευνες (Ng & Chan, 2019· O'Reilly & Barry, 2021). Το στοιχείο αυτό ήταν αναμενόμενο, καθώς μέσα από τη μελέτη προγενέστερων ανασκοπήσεων το λογισμικό αυτό αναφερόταν ως το πιο εύχρηστο και καταλληλότερο ειδικά για τις μικρότερες ηλικιακές ομάδες (Ford & Minshall, 2018· Pearson & Dubé, 2022).

Ωστόσο, υπήρξαν και 2 περιπτώσεις όπου δεν αξιοποιήθηκε κάποιο λογισμικό σχεδιασμού (Madani, 2019· Dooly et al., 2021), καθώς χρησιμοποιήθηκαν scanners για την ψηφιοποίηση του αντικειμένου που θα εκτυπωνόταν. Το γεγονός ότι σε ένα σύνολο 45 ερευνών μόνο 2 αξιοποίησαν scanners δείχνει την πιθανή δυσκολία στη χρήση αυτού του εργαλείου σε αντίθεση με το λογισμικό σχεδιασμού. Το στοιχείο αυτό επιβεβαιώνεται κι από τις πρότερες ανασκοπήσεις, σύμφωνα με τις οποίες τα scanners χρησιμοποιούνται περισσότερες στην περίπτωση της Τριτοβάθμιας Εκπαίδευσης (Ford & Minshall, 2018· Pearson & Dubé, 2022).

- Γνωστικό Αντικείμενο

Οι περισσότερες έρευνες ασχολήθηκαν με το Stem (n=16), καθώς όπως φαίνεται αυτό το αντικείμενο ενδείκνυται για την ενσωμάτωση της τρισδιάστατης εκτύπωσης (Andić, B. et al., 2023· Güleriyüz, H., & Dilber, R., 2022· Huang & Wang, 2022). Το στοιχείο αυτό επιβεβαιώνεται κι από προηγούμενες ανασκοπήσεις, σύμφωνα με τις οποίες το πεδίο του Stem προσφέρει ένα ευρύ φάσμα δραστηριοτήτων τρισδιάστατης εκτύπωσης για όλες τις βαθμίδες εκπαίδευσης (Ford & Minshall, 2018· Pearson & Dubé, 2022).

Το αμέσως επόμενο πεδίο, στο πλαίσιο του οποίου εξετάστηκε η χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης, είναι οι δεξιότητες σχεδιασμού και παραγωγής (Huang & Wang, 2022· Madani, 2019). Όπως φαίνεται και σε προηγούμενες ανασκοπήσεις τα τελευταία χρόνια οι ερευνητές εξετάζουν την ανάπτυξη αυτού του τύπου δεξιοτήτων σε μαθητές Λυκείου, Γυμνασίου και των μεγαλύτερων τάξεων του Δημοτικού λόγω της ένταξης της Stem εκπαίδευσης σε αυτές τις βαθμίδες (Ford & Minshall, 2018· Pearson & Dubé, 2022).

- Ερευνητικά ερωτήματα

Σύμφωνα με την ανάλυση, όπως αυτή παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, τα άρθρα εξέτασαν πολλά ερευνητικά ερωτήματα. Αρχικά, φαίνεται ότι όλα σχεδόν όλα εξέτασαν μαθησιακά στοιχεία, δηλαδή γνώσεις (n=45) (Andić, B. et al., 2023· Güteryüz, H., & Dilber, R., 2022· Huang & Wang, 2022) και δεξιότητες (n=33) (Huang & Wang, 2022· Madani, 2019). Το στοιχείο αυτό ήταν αναμενόμενο, δεδομένου ότι μια τεχνολογία όπως αυτή της τρισδιάστατης εκτύπωσης, εντάσσεται στον χώρο της εκπαίδευσης με στόχο τη βελτίωση των μαθησιακών αποτελεσμάτων, όπως περιγράφεται και σε προηγούμενες ανασκοπήσεις (Ford & Minshall, 2018· Pearson & Dubé, 2022).

Παράλληλα, εξετάστηκαν και τεχνικά θέματα, όπως η χρηστικότητα (n=6) (Akyol et al., 2022· Corum & Garofalo, 2015) και η ευκολία χρήσης (n=9) (Nikou et al., 2021· Özdemir et al., 2017). Ωστόσο, ένα εξίσου μεγάλο μέρος των ερευνών εξέτασε τα συναισθήματα και τις εμπειρίες (n=41) (Schlegel et al., 2019· Spyros et al., 2021), όπως για παράδειγμα η ευχαρίστηση (n=16) (Schlegel et al., 2019· Spyros et al., 2021), η εμπλοκή (n=12) (Vones et al., 2018· Vuorala et al., 2020) κι η δημιουργικότητα (n=13) (Corum & Garofalo, 2015· Özdemir et al., 2017). Το στοιχείο των συναισθημάτων είναι λογικό να αποτελέσει αντικείμενο ενδιαφέροντος για τους ερευνητές, καθώς αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την αποτελεσματικότητα της μαθησιακής διαδικασίας είτε άμεσα είτε έμμεσα (Kwon, 2019). Αυτή είναι κι η αιτία που αποτέλεσαν μέρος της παρούσας έρευνας κι άρθρα που εξέτασαν αποκλειστικά και μόνο τα συναισθήματα.

- Αποτελέσματα

Τα άρθρα εξετάστηκαν κι ως προς τα αποτελέσματα που προσφέρουν οι παρεμβάσεις που διενήργησαν οι ερευνητές. Σε ένα πρώτο επίπεδο εξετάζεται το σύνολο των 45 άρθρων αναφορικά με τα αποτελέσματά τους, τα οποία διακρίθηκαν σε θετικά, αρνητικά και ουδέτερα.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο στάδιο της ανάλυσης, τα θετικά αποτελέσματα είναι εκείνα που έχουν θετική επίδραση στους εμπλεκόμενους μαθητές. Σύμφωνα με την ανάλυση των αποτελεσμάτων η πλειοψηφία των άρθρων (n=39) έχει θετικά αποτελέσματα αναφορικά με την εκπαιδευτική χρήση των τεχνολογιών της τρισδιάστατης εκτύπωσης τόσο σε μελέτες που αποτέλεσε το μοναδικό μέσο (Akyol et al., 2022· Andić et al., 2023) όσο και σε εκείνες που έγινε σύγκριση μέσων (Chen et al., 2014· Spyros et al., 2021). Το στοιχείο αυτό είναι εξαιρετικά σημαντικό, καθώς δείχνει ότι και στις μικρές ηλικίες του νηπιαγωγείου και του δημοτικού μπορεί μια τέτοια τεχνολογία αιχμής να αξιοποιηθεί για την ενίσχυση της μάθησης και των δεξιοτήτων. Αυτό είναι ένα δεδομένο που επαληθεύεται και σε προηγούμενες μελέτες που εξέτασαν συνολικά την επίδραση της τρισδιάστατης εκτύπωσης σε επίπεδο Πρωτοβάθμιας και Δευτεροβάθμιας Εκπαίδευσης και βρήκαν εξίσου θετική επίδραση (Cook et al., 2015· Kostakis et al., 2015· Pantazis and Priavolou, 2017).

Τα θετικά αποτελέσματα εντοπίζονται κυρίως στο πεδίο των γνώσεων (n=37) (Corum & Garofalo, 2015· Forbes et al., 2021), των δεξιοτήτων (n=32) (Chen et al., 2014· Matere et al., 2021), της ευχαρίστησης (n=19) (Güteryüz & Dilber, 2022· Leinonen et al., 2020), της δημιουργικότητας (n=13) (Farnicka & Serrano Diaz, 2019. Huang & Wang, 2022), της συνεργασίας (n=10) (Andić et al., 2023· Fell et al., 2017), της αυτοαποτελεσματικότητας (n=9) (Güteryüz & Dilber, 2022· Schlegel et al., 2019), της εμπλοκής (n=9) (Vones et al., 2018· Vuopala et al., 2020), της αυτοπεποίθησης (n=8) (Nίκου et al., 2021· Spyros et al., 2021) και της ευκολίας στην χρήση (n=7) (Özdemir et al., 2017· Smith, 2018). Το γεγονός ότι οι γνώσεις αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος στα θετικά αποτελέσματα είναι ένα στοιχείο που επιβεβαιώνεται και από προηγούμενες έρευνες, σύμφωνα με τις οποίες η τρισδιάστατη εκτύπωση βοήθησε σημαντικά στην απόκτηση των απαιτούμενων ακαδημαϊκών γνώσεων (Abouhashem et al., 2015· Chen and Chang , 2018). Το ίδιο ακριβώς παρατηρείται ότι συμβαίνει και με την απόκτηση δεξιοτήτων μέσω της τρισδιάστατης εκτύπωσης, με κύριες από αυτές να είναι οι δεξιότητες σχεδιασμού, οι δεξιότητες επίλυσης προβλήματος και η κριτική σκέψη (Hsiao et al., 2019· Hughes, 2017· Kaya et al., 2019· Pantazis and Priavolou, 2017). Τέλος, το ότι η δημιουργικότητα βρίσκεται τρίτη στη σειρά των συνηθέστερων ευρημάτων ως προς τα τιθέμενα ερευνητικά ερωτήματα είναι εξίσου ένα στοιχείο που επιβεβαιώνεται από τη βιβλιογραφία. Σύμφωνα με τις Pearson & Dubé (2022) στο 73,2% των ερευνών που μελέτησαν φαίνεται ότι η δημιουργικότητα ήταν το τρίτο πιο συχνά εμφανιζόμενο στοιχείο ως θετικό αποτέλεσμα που εντόπιζαν οι ερευνητές.

Τα αρνητικά αποτελέσματα, εκείνα δηλαδή που δείχνουν ότι δεν υπήρξε επίδραση στατιστικά σημαντική της τρισδιάστατης εκτύπωσης στα μαθησιακά αποτελέσματα, εντοπίστηκαν σε 2 μόλις έρευνες (Berman et al., 2018· Buehler et al., 2014). Οι βασικές αιτίες που δίνονται από τους ερευνητές είναι η γνωστική υπερφόρτωση των μαθητών και η δυσκολία χρήσης που αλυσιδωτά οδηγούν στο συναίσθημα της δυσφορίας. Πρόκειται για ευρήματα που έχουν μια λογική βάση, καθώς τα project που χρησιμοποιούν οι ερευνητές βασίζονται στην αυτοκαθοδηγούμενη μάθηση, όπου οι μαθητές έχουν τον έλεγχο της μάθησής τους. Το στοιχείο αυτό συνδυαστικά με το γεγονός ότι οι μαθητές καλούνται να χειριστούν μια τεχνολογία καινούρια και στις περισσότερες περιπτώσεις μη οικεία είναι αναμενόμενο να δημιουργήσει τέτοιου τύπου προβλήματα.

Τα ανωτέρω αίτια αρνητικών αποτελεσμάτων επιβεβαιώνονται από την υπάρχουσα βιβλιογραφία. Το να διατηρηθεί η προσοχή κατά την εκπόνηση ενός τέτοιου project φαίνεται πως είναι μια μεγάλη πρόκληση για τους εκπαιδευτές. Σε αρκετές περιπτώσεις οι μαθητές έρχονται αντιμέτωποι με εμπόδια, τα οποία προκύπτουν είτε στη φάση του σχεδιασμού είτε της παραγωγής και δεν μπορούν να τα ξεπεράσουν μόνοι τους (Kostakis et al., 2015). Τα εμπόδια αυτά αν δεν μπορέσουν να τα αντιμετωπίσουν θα δημιουργήσουν αρνητικά συναισθήματα και φυσικά έντονο γνωστικό φορτίο.

Παράλληλα, υπάρχουν και 4 άρθρα (Farnicka & Serano Diaz, 2019· Matere et al., 2021), τα αποτελέσματα των οποίων είναι ουδέτερα, δηλαδή δε σημειώθηκε ούτε θετική ούτε αρνητική επίδραση της τρισδιάστατης εκτύπωσης στη μάθηση. Οι κύριες αιτίες στις οποίες αποδίδεται αυτό από τους ερευνητές είναι ότι η γνώση παρέμεινε στα ίδια επίπεδα που ήταν πριν την εμπλοκή των μαθητών με την τρισδιάστατη εκτύπωση. Αυτό είναι ένα στοιχείο που εντοπίζεται σε προηγούμενες μελέτες και αποδίδεται κυρίως στον σχεδιασμό των παρεμβάσεων και την ετοιμότητα των εκπαιδευτικών που αναλαμβάνουν αυτά τα project (Ford & Minshall, 2018· Pearson & Dubé, 2022).

- Αξιόπιστα άρθρα

Τα 45 άρθρα που αναλύθηκαν παρέχουν μια γενική εικόνα για τις επιπτώσεις και τον τρόπο χρήσης κι εφαρμογής της τρισδιάστατης εκτύπωσης στην Πρωτοβάθμια Εκπαίδευση. Ωστόσο, για την ανάγκη εξαγωγής ασφαλέστερων αποτελεσμάτων κρίθηκε αναγκαίο να εντοπιστούν τα άρθρα με μεγαλύτερο βαθμό αξιοπιστίας. Συνολικά, εντοπίστηκαν 7 άρθρα (Castro-Calviño et al., 2020· Farnicka & Serrano Diaz, 2019· Forbes et al., 2021· Huang & Wang, 2022· Martínez Moreno et al., 2021· Ng & Chan, 2019· Spyros et al., 2021), τα οποία επιλέχθηκαν με βάση τον μεγάλο αριθμό δείγματος.

Μεταξύ τους τα άρθρα αυτά εμφανίζουν κοινά σημεία ως προς το γνωστικό πεδίο που εξέτασαν και τα ευρήματά τους. Αρχικά, όλα τα αξιόπιστα άρθρα εξέτασαν γνώσεις. Για 3 έρευνες το γνωστικό πεδίο είναι η Stem εκπαίδευση (Forbes et al., 2021· Ng & Chan, 2019· Spyros et al., 2021), ενώ άλλες 3 εξέτασαν γνώσεις χειρισμού, σχεδιασμού και παραγωγής (Farnicka & Serrano Diaz, 2019· Huang & Wang, 2022). Μόνο μια εντοπίστηκε που εξέτασε ένα ιδιαίτερο θέμα, την πολιτιστική κληρονομιά (Castro-Calviño et al., 2020).

Τα στοιχεία αυτά έρχονται σε συμφωνία με τα ευρήματα από τη μελέτη όλων των ερευνών, καθώς μέσα στα συχνότερα γνωστικά αντικείμενα που εξετάστηκαν ήταν η Stem εκπαίδευση (Leinonen et al., 2020· Ng & Chan, 2019) και οι γνώσεις χειρισμού, σχεδιασμού και παραγωγής (Özdemir et al., 2017· Schlegel et al., 2019). Επίσης, επιβεβαιώνονται κι από προηγούμενες μελέτες που εξίσου εντόπισαν τη Stem εκπαίδευση και την απόκτηση γνώσεων σχεδιασμού και παραγωγής ως βασικά γνωστικά αντικείμενα (Ford & Minshall, 2018. Pearson & Dubé, 2022).

Από τα αξιόπιστα άρθρα 3 εξέτασαν δεξιότητες (Farnicka & Serrano Diaz, 2019· Huang & Wang, 2022· Martínez Moreno et al., 2021), ενώ η εξέταση των συναισθημάτων παρουσιάζουν 7 φορές συχνότητα εμφάνισης με τις περισσότερες (n=3) να εντοπίζονται στην εξέταση του ενδιαφέροντος των μαθητών για δραστηριότητες τρισδιάστατης εκτύπωσης (Martínez Moreno et al., 2021· Spyros et al., 2021). Τα συναισθήματα είναι όντως ένα στοιχείο που εξετάζεται συνδυαστικά με τις γνώσεις και τις δεξιότητες και σε προηγούμενες σχετικές με το θέμα μελέτες (Ford & Minshall, 2018. Pearson & Dubé, 2022). Το στοιχείο αυτό είναι αναμενόμενο, διότι μια νέα εκπαιδευτική πρακτική οφείλει να εξεταστεί στον βαθμό που βοηθά στην κατάκτηση της νέας γνώσης και στον βαθμό που προκαλεί το ενδιαφέρον των μαθητών που συνδράμει στην ενεργό συμμετοχή τους.

Ειδικότερα, στην έρευνα των Spyros et al. (2021) φάνηκε ότι τα επίπεδα άγχους των μαθητών αναφορικά με την Stem εκπαίδευση, η οποία εμπλέκει τις φυσικές επιστήμες, μειώθηκε σημαντικά σε σχέση με την ομάδα ελέγχου, γεγονός που ενίσχυσε το ενδιαφέρον. Ωστόσο, μεταξύ μείωσης άγχους και ενίσχυσης ενδιαφέροντος, το άγχος εμφάνισε στατιστικά σημαντικότερη διαφορά (Spyros et al., 2021).

Στην έρευνα των Martínez Moreno et al. (2021) φάνηκε ότι και το αίσθημα της αυτοαποτελεσματικότητας και το ενδιαφέρον των μαθητών αυξήθηκε σημαντικά. Στη συγκεκριμένη έρευνα, όμως, δεδομένου ότι έγινε σύγκριση μεταξύ αγοριών και κοριτσιών, φάνηκε ότι για τα κορίτσια το αίσθημα της αυτοαποτελεσματικότητας μετά τη συμμετοχή τους στην παρέμβαση είχε σημαντική στατιστικά αύξηση σε σχέση με τα

αγόρια (Martínez Moreno et al., 2021). Πρόκειται για τη μοναδική μελέτη που συμπεριέλαβε την εξέταση της τρισδιάστατης εκπαίδευσης μεταξύ των δύο φύλων.

Επίσης, από την έρευνα των Ng & Chan (2019) ορισμένοι μαθητές όσο χρησιμοποιούσαν το CAD πρόγραμμα τρισδιάστατου σχεδιασμού αποκτούσαν μεγαλύτερη εξοικείωση με συνθετότερα σχήματα. Ωστόσο, υπήρξαν και εκείνοι που μπήκαν στη διαδικασία να αλλάξουν τα αρχικά σχέδια που είχαν κάνει σε χαρτί, ώστε να είναι καλύτερο το αποτέλεσμα του τρισδιάστατου σχεδιασμού. Παρά το γεγονός ότι στη δεύτερη περίπτωση οι μαθητές απλοποίησαν τα αρχικά σχέδια, φαίνεται ότι μπήκαν στη διαδικασία της βελτιστοποίησης κι αυτό χωρίς καθοδήγηση.

Παράλληλα, 4 από τις 7 έρευνες εξέτασαν αποκλειστικά δείγμα μαθητών Πρωτοβάθμιας Εκπαίδευσης (Farnicka & Serrano Diaz, 2019· Huang & Wang, 2022· Martínez Moreno et al., 2021· Spyros et al., 2021), 1 είχε και εκπαιδευτικούς και γονείς που συμμετείχαν (Castro-Calviño et al., 2020), ενώ υπάρχουν και 2 στις οποίες συμμετείχαν εκπαιδευτικοί και μαθητές (Forbes et al., 2021· Ng & Chan, 2019). Σε 1 έρευνα επικουρικά συμμετείχαν γονείς και τοπικές αρχές προκειμένου να διευκολυνθεί η διαδικασία της παρέμβασης, χωρίς όμως να εξεταστεί η άποψή τους για τα αποτελέσματα της παρέμβασης (Castro-Calviño et al., 2020). Το στοιχείο αυτό φαίνεται πως εντοπίζεται στη βιβλιογραφία, καθώς και σε άλλες μελέτες που έχουν διεξαχθεί συμμετείχαν είτε γονείς είτε εξειδικευμένο υποστηρικτικό προσωπικό για την ασφαλή διεξαγωγή των ερευνών (Ford & Minshall, 2018. Pearson & Dubé, 2022).

Αξίζει να αναφερθεί ότι συνολικά οι 6 έρευνες από τις 7 είχαν θετικά αποτελέσματα στα γνωστικά αντικείμενα που εξέτασαν και για τα ερευνητικά ερωτήματα που έθεσαν οι ερευνητές τους (Castro-Calviño et al., 2020· Forbes et al., 2021· Huang & Wang, 2022· Martínez Moreno et al., 2021· Ng & Chan, 2019· Spyros et al., 2021). Μόνο 1 από τις 7 παρουσιάζει ουδέτερα αποτελέσματα (Farnicka & Serrano Diaz, 2019), καθώς φαίνεται στην έρευνα αυτή υπήρχε μια διαφοροποίηση στον χρόνο παρέμβασης που διήρκησε για κάθε ομάδα, οπότε οι ερευνητές δεν εντόπισαν στατικά σημαντική διαφορά μεταξύ των ομάδων και η έρευνα για κάποιες ομάδες δεν έχει ολοκληρωθεί ακόμα. Ωστόσο, είναι σημαντικό το γεγονός ότι σε κανένα από τα αξιόπιστα άρθρα δεν εντοπίστηκε αρνητική επίπτωση, γεγονός που δείχνει ότι η τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί να ενισχύσει την εκπαιδευτική πρακτική. Πρόκειται για ένα εύρημα που εντοπίζεται συνολικά στη βιβλιογραφία μελετώντας και προηγούμενες ανασκοπήσεις τόσο στον χώρο της Δευτεροβάθμιας όσο και της Τριτοβάθμιας Εκπαίδευσης.

Ένα δεύτερο βασικό σημείο που αξίζει να αναφερθεί είναι ότι τα αξιόπιστα άρθρα αφορούν τη Γενική Εκπαίδευση και όχι την Ειδική. Η αναφορά αυτή γίνεται, καθώς ένα ερευνητικό ερώτημα της παρούσας εργασίας είναι το κατά πόσον αυτή η τεχνολογία μπορεί να βοηθήσει στον χώρο της Ειδικής Αγωγής. Από τα αξιόπιστα άρθρα που εξετάστηκαν κανένα δεν αναφέρεται στην Ειδική Αγωγή. Το στοιχείο αυτό ήταν αναμενόμενο, καθώς μόνο 4 άρθρα από τα 45 αφορούσαν σε αυτήν τη Βαθμίδα Εκπαίδευσης (Buehler et al., 2014· Haas et al., 2021). Από τη μελέτη άλλων ανασκοπήσεων προκύπτει ότι η έρευνα της εκπαιδευτικής χρήσης σε δομές Ειδικής Αγωγής είναι περιορισμένη και πρόκειται για έρευνες με μικρό δείγμα (Ford & Minshall, 2018. Pearson & Dubé, 2022), ένα στοιχείο αναμενόμενο δεδομένου ότι η τεχνολογία αυτή απαιτεί πολλά στάδια για την ολοκλήρωση ενός project. Μια τέτοια έρευνα που απευθύνεται και σε μαθητές με ιδιαίτερες εκπαιδευτικές ανάγκες είναι δύσκολο να εξετάσει μεγάλο δείγμα. Ωστόσο, είναι ένα στοιχείο που μπορεί να αποτελέσει πρόκληση για τους ερευνητές και να το εξετάσουν στο μελλοντικά βρίσκοντας τον καταλληλότερο τρόπο για την ομαλή διεξαγωγή μιας τέτοιας μελέτης με μεγάλο δείγμα.

- Επιπτώσεις

Με βάση τα παραπάνω στοιχεία θα μπορούσαν να αναφερθούν και ορισμένες επιπτώσεις. Όπως φαίνεται, οι περισσότερες έρευνες για την εκπαιδευτική χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης στην Πρωτοβάθμια Εκπαίδευση είχαν μικρό δείγμα μελέτης. Συνεπώς, δεν είναι εφικτό να καταλήξουμε σε γενικευμένα αποτελέσματα. Αυτό σημαίνει ότι οι μελλοντικές έρευνες στο πεδίο αυτό θα χρειαστεί να εξετάσουν μεγαλύτερα δείγματα για την εξασφάλιση εγκυρότερων αποτελεσμάτων.

Επίσης, άλλο ένα σημαντικό σημείο είναι ότι σε επόμενες μελέτες καλό θα ήταν να γίνεται σύγκριση της τρισδιάστατης εκτύπωσης με άλλα μέσα κι όχι μόνο με την παραδοσιακή διδασκαλία, καθώς σε αυτήν την περίπτωση το αποτέλεσμα είναι σχεδόν αναμενόμενο ότι θα είναι θετικό. Μέσα από τη μελέτη της υπάρχουσας βιβλιογραφίας φαίνεται ότι αρκετές έρευνες εξέτασαν την εκπαιδευτική χρήση την τρισδιάστατης εκπαίδευσης χρησιμοποιώντας μόνο ένα μέσο, τον 3D εκτυπωτή, γεγονός που και πάλι δεν μπορεί να οδηγήσει σε ασφαλή συμπεράσματα. Επομένως, είναι απαραίτητο οι έρευνες που θα ακολουθήσουν να συγκρίνουν την τρισδιάστατη εκτύπωση με άλλα μέσα.

Τέλος, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι στο πεδίο της Ειδικής Αγωγής η τρισδιάστατη εκτύπωση δεν έχει ερευνηθεί πολύ και στις περισσότερες περιπτώσεις που ερευνήθηκε χρησιμοποιήθηκε επικουρικά με άλλα μέσα. Αυτό σημαίνει ότι μελλοντικά θα μπορούσε να εξεταστεί κατά πόσον μπορεί να βοηθήσει τους μαθητές με ιδιαίτερες εκπαιδευτικές ανάγκες, όπως ο αυτισμός ή η διαταραχή ελλειμματικής προσοχής, σε δεξιότητες όπως η συγκέντρωση της προσοχής, η εμπλοκή, το ενδιαφέρον και η μάθηση.

- Περιορισμοί έρευνας

Κατά την εκπόνηση της εργασίας αυτής παρουσιάστηκαν και ορισμένοι περιορισμοί, οι οποίοι αξίζει να αναφερθούν. Αρχικά, κατά το στάδιο αναζήτησης της βιβλιογραφίας υπήρξαν αρκετές έρευνες, οι οποίες δεν είχαν ελεύθερη πρόσβαση, με αποτέλεσμα να είναι μικρό το σύνολο των άρθρων που αξιοποιήθηκε για τις ανάγκες της εργασίας. Πρόκειται για άρθρα τα οποία ήταν επί πληρωμή ή ζητούσαν ετήσια συνδρομή. Επίσης, η ίδια η τεχνολογία που αποτέλεσε αντικείμενο μελέτης (τρειςδιάστατη εκτύπωση) είναι καινοτόμα και στον χώρο της Πρωτοβάθμιας Εκπαίδευσης ξεκίνησε να εφαρμόζεται τα τελευταία χρόνια, οπότε το εύρος των άρθρων αντίστοιχων μελετών είναι περιορισμένο.

Επιπλέον, κατά το στάδιο της ανάλυσης των δεδομένων εντοπίστηκε μεγάλος βαθμός ετερογένειας στη διάρκεια των παρεμβάσεων των ερευνών που εξετάστηκαν. Αυτό συνέβη γιατί δεν υπήρχε κάποια φόρμουλα στην οποία να καταγράφει ο κάθε ερευνητής τη διάρκεια και τα βήματα της παρέμβασής του.

Τέλος, ο αριθμός των αξιόπιστων άρθρων είναι αρκετά μικρός, γεγονός που δείχνει ότι η έρευνα της εκπαιδευτικής χρήσης στην Πρωτοβάθμια Εκπαίδευση είναι μάλλον ελλιπής.

6 Συμπεράσματα

Η έρευνα αυτή αποτελεί σημαντική συνεισφορά στη σχετική βιβλιογραφία, διότι εξετάζει ένα μέσο, την τρισδιάστατη εκπαίδευση, και τη μάθηση που αυτή μπορεί να παρέχει. Το δείγμα της (N=45) είναι αρκετά ικανοποιητικό, για αυτό το θέμα της εργασίας, αν σκεφτεί κανείς ότι εξετάστηκαν μόνο τα πέντε τελευταία έτη και ότι είναι μια τεχνολογία που δεν χρησιμοποιείται ευρέως στην εκπαίδευση.

Μέσα από την ανάλυση φάνηκε ότι επιτυγχάνεται μάθηση και ότι ξεπερνάει άλλες τεχνολογίες και, κυρίως, τη συμβατική διδασκαλία. Οι τομείς στους οποίους βρέθηκε ότι έχει εφαρμοστεί η τρισδιάστατη εκπαίδευση είναι η Stem εκπαίδευση και οι ανάπτυξη δεξιοτήτων σχεδιασμού και παραγωγής.

Βέβαια, το μικρό μέγεθος του δείγματος των περισσότερων ερευνών, αλλά και ο περιορισμένος αριθμός ερευνητικών εργαλείων δημιουργούν την ανάγκη για περαιτέρω μελέτη της μαθησιακής αποτελεσματικότητας αυτής της τεχνολογίας. Τα αποτελέσματα και οι περιορισμοί αποδεικνύουν πως ακόμα η έρευνα βρίσκεται σε ένα αρχικό στάδιο και πως στο μέλλον θα διερευνηθεί ακόμη περισσότερο.

Βιβλιογραφία

- Ackermann, E. (2001). Piaget's constructivism, Papert's constructionism: What's the difference. *Future of learning group publication*, 5(3), 438-449.
- Akyol, C., Uygur, M., & Yelken, T. Y. (2022). 3D printers as an educational tool in gifted education: effective use, problems and suggestions. *Journal for the Education of Gifted Young Scientists*, 10(2), 173-205. DOI: <https://doi.org/10.17478/jegys.1105484>
- Anđić, B., Lavicza, Z., Ulbrich, E., Cvjetičanin, S., Petrović, F., & Maričić, M. (2022). Contribution of 3D modelling and printing to learning in primary schools: a case study with visually impaired students from an inclusive Biology classroom. *Journal of Biological Education*, 1-17. DOI: <https://doi.org/10.1080/00219266.2022.211835>
- Anđić, B., Ulbrich, E., Dana-Picard, T., Cvjetičanin, S., Petrović, F., Lavicza, Z., & Maričić, M. (2023). A phenomenography study of STEM teachers' conceptions of using three-dimensional modeling and printing (3DMP) in teaching. *Journal of Science Education and Technology*, 32(1), 45-60. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10956-022-10005-0>
- Arksey, H., & O'Malley, L. (2005). Scoping studies: towards a methodological framework. *International journal of social research methodology*, 8(1), 19-32. DOI: <https://doi.org/10.1080/1364557032000119616>
- Aromataris, E., & Pearson, A. (2014). The systematic review: an overview. *AJN The American Journal of Nursing*, 114(3), 53-58. DOI: 10.1097/01.NAJ.0000444496.24228.2c
- Arslan, A., & Erdogan, I. (2021). Use of 3D Printers for Teacher Training and Sample Activities. *International Journal of Progressive Education*, 17(3), 343-360. DOI: 10.29329/ijpe.2021.346.22
- Arvanitidi, E., Drosos, C., Theocharis, E., & Papoutsidakis, M. (2019). 3D Printing and Education. *International Journal of Computer Applications*, 177(24), 55-59.
- Attaran, M. (2017). The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. *Business horizons*, 60(5), 677-688. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2017.05.011>
- Bagley, J. R., & Galpin, A. J. (2015). Three-dimensional printing of human skeletal muscle cells: An interdisciplinary approach for studying biological systems.

- Biochemistry and Molecular Biology Education*, 43(6), 403-407. DOI: <https://doi.org/10.1002/bmb.20891>
- Baldassarre, F., & Ricciardi, F. (2017). The additive manufacturing in the Industry 4.0 Era: the case of an Italian FabLab. *Journal of Emerging Trends in Marketing and Management*, 1(1), 105-115.
- Bengtson, J., & Bunnett, B. (2012). Across the table: Competing perspectives for managing technology in a library setting. *Journal of Library Administration*, 52(8), 699-715. DOI: <https://doi.org/10.1080/01930826.2012.746877>
- Berman, A., Deuermeyer, E., Nam, B., Chu, S. L., & Quek, F. (2018, June). *Exploring the 3D printing process for young children in curriculum-aligned making in the classroom*. In Proceedings of the 17th ACM Conference on Interaction Design and Children (pp. 681-686). DOI: <https://doi.org/10.1145/3202185.3210799>
- Bogue, R. (2013). 3D printing: the dawn of a new era in manufacturing?. *Assembly Automation*, 33(4), 307-311. DOI: <https://doi.org/10.1108/AA-06-2013-055>
- Bower, M., Stevenson, M., Forbes, A., Falloon, G., & Hatzigianni, M. (2020). Makerspaces pedagogy—supports and constraints during 3D design and 3D printing activities in primary schools. *Educational Media International*, 57(1), 1-28. DOI: <https://doi.org/10.1080/09523987.2020.1744845>
- Buehler, E., Comrie, N., Hofmann, M., McDonald, S., & Hurst, A. (2016). Investigating the implications of 3D printing in special education. *ACM Transactions on Accessible Computing (TACCESS)*, 8(3), 1-28. DOI: <https://doi.org/10.1145/2870640>
- Buehler, E., Kane, S. K., & Hurst, A. (2014). *ABC and 3D: opportunities and obstacles to 3D printing in special education environments*. In Proceedings of the 16th international ACM SIGACCESS conference on Computers & accessibility (pp. 107-114). DOI: <https://doi.org/10.1145/2661334.2661365>
- Burghardt, M. D., Hecht, D., Russo, M., Lauckhardt, J., & Hacker, M. (2010). A study of mathematics infusion in middle school technology education classes. *Journal of Technology Education*, 22(1), 58–74.
- Camínero, M. A., Chacón, J. M., García-Moreno, I., & Rodríguez, G. P. (2018). Impact damage resistance of 3D printed continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling. *Composites Part B: Engineering*, 148, 93-103. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.04.054>

- Castro-Calviño, L., Rodríguez-Medina, J., Gómez-Carrasco, C. J., & López-Facal, R. (2020). Patrimonializarte: A heritage education program based on new technologies and local heritage. *Education Sciences*, *10*(7), 176-195. DOI: <https://doi.org/10.3390/educsci10070176>
- Chen, M., Zhang, Y., & Zhang, Y. (2014). Effects of a 3D printing course on mental rotation ability among 10-year-old primary students. *International Journal of Psychophysiology*, *2*(94), 240. DOI: 10.1016/j.ijpsycho.2014.08.925
- Chien, Y. H., & Chu, P. Y. (2018). The different learning outcomes of high school and college students on a 3D-printing STEAM engineering design curriculum. *International Journal of Science and Mathematics Education*, *16*(6), 1047-1064. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10763-017-9832-4>
- Cohen, J. D., Huprich, J., Jones, W. M., & Smith, S. (2017). Educators' perceptions of a maker-based learning experience. *The International Journal of Information and Learning Technology*, *34*(5)428-438. DOI: <https://doi.org/10.1108/IJILT-06-2017-0050>
- Cook, K. L., Bush, S. B., & Cox, R. (2015). Creating a Prosthetic Hand. *Science and Children*, *53*(4), 80-86.
- Corum, K., & Garofalo, J. (2015). Using digital fabrication to support student learning. *3D Printing and Additive Manufacturing*, *2*(2), 50-55. DOI: <https://doi.org/10.1089/3dp.2015.0008>
- Daminabo, S. C., Goel, S., Grammatikos, S. A., Nezhad, H. Y., & Thakur, V. K. (2020). Fused deposition modeling-based additive manufacturing (3D printing): techniques for polymer material systems. *Materials today chemistry*, *16*, 100-248. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2020.100248>
- Dankar, I., Pujolà, M., El Omar, F., Sepulcre, F., & Haddarah, A. (2018). Impact of mechanical and microstructural properties of potato puree-food additive complexes on extrusion-based 3D printing. *Food and Bioprocess Technology*, *11*(11), 2021-2031. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11947-018-2159-5>
- Daudt, H. M., van Mossel, C., & Scott, S. J. (2013). Enhancing the scoping study methodology: a large, inter-professional team's experience with Arksey and O'Malley's framework. *BMC medical research methodology*, *13*, 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1186/1471-2288-13-48>

- De Mori, A., Peña Fernández, M., Blunn, G., Tozzi, G., & Roldo, M. (2018). 3D printing and electrospinning of composite hydrogels for cartilage and bone tissue engineering. *Polymers*, *10*(3), 285. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym10030285>
- Dermeik, B., & Travitzky, N. (2020). Laminated object manufacturing of ceramic-based materials. *Advanced Engineering Materials*, *22*(9), 200-256. DOI: <https://doi.org/10.1002/adem.202000256>
- Diegel, O. (2014). *Additive Manufacturing: An Overview A2*. Oxford : Elsevier.
- Dilberoglu, U. M., Gharehpapagh, B., Yaman, U., & Dolen, M. (2017). The role of additive manufacturing in the era of industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, *11*, 545-554. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.148>
- Dooly, M., Masats Viladoms, D., & Mont Algamassilla, M. (2021). Launching a solidarity campaign: Technology-enhanced project-based language learning to promote entrepreneurial education and social awareness. *JOTSE: Journal of Technology and Science Education*, *11*(2), 260-269. DOI: 10.3926/jotse.1224
- Eisenberg, D., Hunt, J., & Speer, N. (2013). Mental health in American colleges and universities: variation across student subgroups and across campuses. *The Journal of nervous and mental disease*, *201*(1), 60-67. DOI: 10.1097/NMD.0b013e31827ab077
- Farnicka, M., & Serrano Diaz, N. (2019). 3D printing skills as a resource for the development of creativity in middle childhood. *Rocznik Lubuski*, *45*(1), 123-134. DOI: <https://doi.org/10.34768/rl.2019.v451.07>
- Fell, C., Sobel, A., & Ordonez, M., (2017, November). Additive Manufacturing and Collaborative Learning for Pre-hospital Care Environment. In Future Technologies Conference (FTC) (pp.1107-1112).
- Fina, F., Goyanes, A., Gaisford, S., & Basit, A. W. (2017). Selective laser sintering (SLS) 3D printing of medicines. *International journal of pharmaceutics*, *529*(1-2), 285-293. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2017.06.082>
- Finley, T. K. (2016). The impact of 3D printing services on library stakeholders: A case study. *Public Services Quarterly*, *12*(2), 152-163. DOI: <https://doi.org/10.1080/15228959.2016.1160808>
- Foo, C. Y., Lim, H. N., Mahdi, M. A., Wahid, M. H., & Huang, N. M. (2018). Three-dimensional printed electrode and its novel applications in electronic devices. *Scientific reports*, *8*(1), 1-11.

- Forbes, A., Falloon, G., Stevenson, M., Hatzigianni, M., & Bower, M. (2021). An analysis of the nature of young students' STEM learning in 3D technology-enhanced makerspaces. *Early Education and Development*, 32(1), 172-187. DOI: <https://doi.org/10.1080/10409289.2020.1781325>
- Ford, S., & Minshall, T. (2019). Invited review article: Where and how 3D printing is used in teaching and education. *Additive Manufacturing*, 25, 131-150. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.10.028>
- Garrison, D. R. (1997). Self-directed learning: Toward a comprehensive model. *Adult education quarterly*, 48(1), 18-33. DOI: <https://doi.org/10.1177/074171369704800103>
- Ge, Q., Li, Z., Wang, Z., Kowsari, K., Zhang, W., He, X., ... & Fang, N. X. (2020). Projection micro stereolithography based 3D printing and its applications. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2(2), 022004. DOI: 10.1088/2631-7990/ab8d9a
- Gmeiner, R., Deisinger, U., Schönherr, J., Lechner, B., Detsch, R., Boccaccini, A. R., & Stampfl, J. (2015). Additive manufacturing of bioactive glasses and silicate bioceramics. *Journal of Ceramic Science & Technology*, 6(2), 75-86.
- Gokhare, V. G., Raut, D. N., & Shinde, D. K. (2017). A review paper on 3D-printing aspects and various processes used in the 3D-printing. *Int. J. Eng. Res. Technol*, 6(6), 953-958.
- Gough, D., Thomas, J., & Oliver, S. (2012). Clarifying differences between review designs and methods. *Systematic reviews*, 1(1), 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1186/2046-4053-1-28>
- Goulas, A., & Friel, R. J. (2016). 3D printing with moon dust. *Rapid Prototyping Journal*, 22(6), 864-870.
- Gratani, F., Giannandrea, L., & Rossi, P. G. (2023). Learning in the post-digital era. Transforming education through the Maker approach. *REM*, 15, 111-119. DOI: <https://dx.doi.org/10.2478/rem-2023-0015>
- Greenhalgh, S. (2016). The effects of 3D printing in design thinking and design education. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 14(4), 752-769. DOI: <https://doi.org/10.1108/JEDT-02-2014-0005>
- Groenendyk, M., & Gallant, R. (2013). 3D printing and scanning at the Dalhousie University Libraries: a pilot project. *Library Hi Tech*, 31(1), 34-41. DOI: <https://doi.org/10.1108/07378831311303912>

- Güleryüz, H., & Dilber, R. (2023). RETRACTED ARTICLE: Robotic coding and 3D printer with STEM activities; the effect of science teacher candidates on STEM awareness and STEM self-efficacy. *Education and Information Technologies*, 28(8), 10803-10803. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10639-022-11257-4>
- Gureckis, T. M., & Markant, D. B. (2012). Self-directed learning: A cognitive and computational perspective. *Perspectives on Psychological Science*, 7(5), 464-481. DOI: <https://doi.org/10.1177/1745691612454304>
- Haas, B., Kreis, Y., & Lavicza, Z. (2021). Case study on augmented reality, digital and physical modelling with mathematical learning disabilities students in an elementary school in Luxemburg. *The International Journal for Technology in Mathematics Education*, 28(3), 125-132. DOI: 10.1564/tme_v28.3.02
- Haas, B., Lavicza, Z., Houghton, T., & Kreis, Y. (2022, June). Evaluating Technology-Enhanced, STEAM-Based Remote Teaching With Parental Support in Luxembourgish Early Childhood Education. *In Frontiers in Education*, 7, 1-12. DOI: <https://doi.org/10.3389/feduc.2022.872479>
- Hager, I., Golonka, A., & Putanowicz, R. (2016). 3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction?. *Procedia Engineering*, 151, 292-299. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.357>
- Hansen, A. K., Langdon, T. R., Mendrin, L. W., Peters, K., Ramos, J., & Lent, D. D. (2020). Exploring the Potential of 3D-printing in Biological Education: A Review of the Literature. *Integrative and Comparative Biology*, 60(4), 896-905.
- Hao, W., Liu, Y., Zhou, H., Chen, H., & Fang, D. (2018). Preparation and characterization of 3D printed continuous carbon fiber reinforced thermosetting composites. *Polymer Testing*, 65, 29-34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2017.11.004>
- Hartings, M. R., & Ahmed, Z. (2019). Chemistry from 3D printed objects. *Nature Reviews Chemistry*, 3(5), 305-314. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41570-019-0097-z>
- Herron, J., & Kaneshiro, K. (2017). A university-wide collaborative effort to designing a makerspace at an academic health sciences library. *Medical reference services quarterly*, 36(1), 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1080/02763869.2017.1259878>
- Hitzler, L., Alifui-Segbaya, F., Williams, P., Heine, B., Heitzmann, M., Hall, W., ... & Öchsner, A. (2018). Additive manufacturing of cobalt-based dental alloys: analysis of microstructure and physicomechanical properties. *Advances in*

- materials science and engineering*, 2018, 1-12. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/8213023>
- Hmelo, C. E., Holton, D. L., & Kolodner, J. L. (2000). Designing to learn about complex systems. *The journal of the learning sciences*, 9(3), 247-298. DOI: https://doi.org/10.1207/S15327809JLS0903_2
- Holt, C., Edwards, L., Keyte, L., Moghaddam, F., & Townsend, B. (2019). Construction 3D printing. In J. G. Sanjayan, A. Nazari, & B. Nematollahi (Ed.), *3D Concrete Printing Technology* (pp. 349-370). Butterworth-Heinemann.
- Hoyles, C., & Noss, R. (1987). Synthesizing mathematical conceptions and their formalization through the construction of a Logo-based school mathematics curriculum. *International Journal of Mathematical Education in Science and Technology*, 18(4), 581-595. DOI: <https://doi.org/10.1080/0020739870180411>
- Holzmann, P., Breitenecker, R. J., Soomro, A. A., & Schwarz, E. J. (2017). User entrepreneur business models in 3D printing. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 28(1), 75-94. DOI: <https://doi.org/10.1108/JMTM-12-2015-0115>
- Horowitz, S. S., & Schultz, P. H. (2014). Printing space: Using 3D printing of digital terrain models in geosciences education and research. *Journal of Geoscience Education*, 62(1), 138-145. DOI: <https://doi.org/10.5408/13-031.1>
- Horst, D. J., Duvoisin, C. A., & de Almeida Vieira, R. (2018). Additive manufacturing at Industry 4.0: a review. *International journal of engineering and technical research*, 8(8), 264-786.
- Horváth, I., & Vroom, R. W. (2015). Ubiquitous computer aided design: A broken promise or a Sleeping Beauty? *Computer-Aided Design*, 59, 161-175. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cad.2014.10.006>
- Hsiao, H. S., Chen, J. C., Lin, C. Y., Zhuo, P. W., & Lin, K. Y. (2019). Using 3D printing technology with experiential learning strategies to improve preengineering students' comprehension of abstract scientific concepts and hands-on ability. *Journal of Computer Assisted Learning*, 35(2), 178-187. DOI: <https://doi.org/10.1111/jcal.12319>
- Huang, T. C., & Lin, C. Y. (2017). From 3D modeling to 3D printing: Development of a differentiated spatial ability teaching model. *Telematics and Informatics*, 34(2), 604-613. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tele.2016.10.005>

- Huang, C. Y., & Wang, J. C. (2022). Effectiveness of a three-dimensional-printing curriculum: Developing and evaluating an elementary school design-oriented model course. *Computers & Education*, 187, 104553. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2022.104553>
- Hughes, J. M. (2017). Digital making with “at-risk” youth. *The International Journal of Information and Learning Technology*, 34, 102-113. DOI: <https://doi.org/10.1108/IJILT-08-2016-0037>
- Jin, Y. (2020). What Else Did Pre-service Teachers Learn in a Maker Education Course in a Teacher Education Program Beyond Content?. *Educational Technology Beyond Content: A New Focus for Learning*, 207-216. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-37254-5_18
- Joshi, S. C., & Sheikh, A. A. (2015). 3D printing in aerospace and its long-term sustainability. *Virtual and Physical Prototyping*, 10(4), 175-185. DOI: <https://doi.org/10.1080/17452759.2015.1111519>
- Junk, S., & Matt, R. (2015). New approach to introduction of 3D digital technologies in design education. *Procedia Cirp*, 36, 35-40. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.01.045>
- Junthong, N., Netpradit, S., & Boonlue, S. (2020). The designation of geometry teaching tools for visually-impaired students using plastic geoboards created by 3D printing. *The New Educational Review*, 59, 87-102. DOI: 10.15804/tner.2020.59.1.07
- Karabörk, M. A., & Durmus, S. (2020). Effects of Redesigned Model Eliciting Activities on Seventh Grade Students’ Mathematics Success and Students’ Views about These Activities. *Malikussaleh Journal of Mathematics Learning*, 3(2), 34-45. DOI: <https://doi.org/10.29103/mjml.v3i2.2895>
- Katsioloudis, P., & Jones, M. (2015). Using computer-aided design software and 3D printers to improve spatial visualization. *Technology and engineering teacher*, 74(8), 14-20.
- Kaya, E., Agca, M., Adiguzel, F., & Cetin, M. (2019). Spatial data analysis with R programming for environment. Human and ecological risk assessment: An *International Journal*, 25(6), 1521-1530. DOI: <https://doi.org/10.1080/10807039.2018.1470896>
- Kim, H. S., & Kang, I. (2015). Study on status of utilizing 3D printing in fashion field. *Journal of the Korea Fashion and Costume Design Association*, 17(2), 125-143.

- Kolb, A. Y., & Kolb, D. A. (2005). Learning styles and learning spaces: Enhancing experiential learning in higher education. *Academy of management learning & education*, 4(2), 193-212. DOI: <https://doi.org/10.5465/amle.2005.17268566>
- Kostakis, V., Niaros, V., & Giotitsas, C. (2015). Open source 3D printing as a means of learning: An educational experiment in two high schools in Greece. *Telematics and informatics*, 32(1), 118-128. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tele.2014.05.001>
- Krathwohl, D. R. (2002). A revision of Bloom's taxonomy: An overview. *Theory into practice*, 41(4), 212-218. DOI: https://doi.org/10.1207/s15430421tip4104_2
- Krokos, E., Plaisant, C., & Varshney, A. (2019). Virtual memory palaces: immersion aids recall. *Virtual reality*, 23, 1-15. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10055-018-0346-3>
- Lee, J. Y., An, J., & Chua, C. K. (2017). Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials. *Applied Materials Today*, 7, 120-133. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2017.02.004>
- Leinonen, T., Virnes, M., Hietala, I., & Brinck, J. (2020). 3D printing in the wild: adopting digital fabrication in elementary school education. *International Journal of Art & Design Education*, 39(3), 600-615. DOI: <https://doi.org/10.1111/jade.12310>
- Letnikova, G., & Xu, N. (2017). Academic library innovation through 3D printing services. *Library Management*, 38(4/5), 208-218. DOI: <https://doi.org/10.1108/LM-12-2016-0094>
- Levac, D., Colquhoun, H., & O'Brien, K. K. (2010). Scoping studies: advancing the methodology. *Implementation science*, 5, 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1186/1748-5908-5-69>
- Liu, Z., Zhang, L., Yu, E., Ying, Z., Zhang, Y., Liu, X., & Eli, W. (2015). Modification of glass fiber surface and glass fiber reinforced polymer composites challenges and opportunities: from organic chemistry perspective. *Current organic chemistry*, 19(11), 991-1010.
- Liu, Y., Hamid, Q., Snyder, J., Wang, C., & Sun, W. (2016). Evaluating fabrication feasibility and biomedical application potential of in situ 3D printing technology. *Rapid Prototyping Journal*, 22(6), 947-955. DOI: <https://doi.org/10.1108/RPJ-07-2015-0090>
- Liu, Z., Zhang, M., Bhandari, B., & Wang, Y. (2017). 3D printing: Printing precision and application in food sector. *Trends in Food Science & Technology*, 69, 83-94. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.08.018>

- Liu, L., Meng, Y., Dai, X., Chen, K., & Zhu, Y. (2019). 3D printing complex egg white protein objects: properties and optimization. *Food and Bioprocess Technology*, 12(2), 267-279. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11947-018-2209-z>
- Liu, B., Wu, Y., Xing, W., Guo, S., & Zhu, L. (2020). The role of self-directed learning in studying 3D design and modeling. *Interactive Learning Environments*, 31(3), 1-14. DOI: <https://doi.org/10.1080/10494820.2020.1855208>
- Low, Z. X., Chua, Y. T., Ray, B. M., Mattia, D., Metcalfe, I. S., & Patterson, D. A. (2017). Perspective on 3D printing of separation membranes and comparison to related unconventional fabrication techniques. *Journal of membrane science*, 523, 596-613. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.10.006>
- Loy, J. (2014). eLearning and eMaking: 3D Printing Blurring the Digital and the Physical. *Education Sciences*, 4(1), 108-121. DOI: <https://doi.org/10.3390/educsci4010108>
- Loyens, S. M., Magda, J., & Rikers, R. M. (2008). Self-directed learning in problem-based learning and its relationships with self-regulated learning. *Educational psychology review*, 20(4), 411-427. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10648-008-9082-7>
- Madani, R. (2019). Achieving Teacher-Free Child-Led Design and Additive Manufacturing Using the Sense. *Research in Arts and Education*, 2019(2), 619-636.
- Maghnani, R. (2015). An exploratory study: the impact of additive manufacturing on the automobile industry. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 5(5), 1-4.
- Manapat, J. Z., Chen, Q., Ye, P., & Advincula, R. C. (2017). 3D printing of polymer nanocomposites via stereolithography. *Macromolecular Materials and Engineering*, 302(9), 160-553. DOI: <https://doi.org/10.1002/mame.201600553>
- Martin, R. L., Bowden, N. S., & Merrill, C. (2014). 3D printing in technology and engineering education. *Technology and engineering teacher*, 73(8), 30-35
- Martínez Moreno, J., Santos, P., & Hernández-Leo, D. (2021, October). Maker Education in Primary Education: Changes in Students' Maker-Mindset and Gender Differences. In Ninth International Conference on Technological Ecosystems for Enhancing Multiculturality (TEEM'21) (pp. 120-125). DOI: <https://doi.org/10.1145/3486011.3486431>
- Matere, I. M., Weng, C., Astatke, M., Hsia, C. H., & Fan, C. G. (2021). Effect of design-based learning on elementary students computational thinking skills in visual

- programming maker course. *Interactive Learning Environments*, 1-14. DOI: <https://doi.org/10.1080/10494820.2021.1938612>
- Maxwell, D., Pillatt, T., Edwards, L., & Newman, R. (2019). Applying design fiction in primary schools to explore environmental challenges. *The Design Journal*, 22(1), 1481-1497. DOI: 10.1080/14606925.2019.1594972
- McLean, M., Nation, J. M., Spina, A., Susko, T., Harlow, D., & Bianchini, J. (2020). The importance of collaborative design for narrowing the gender gap in engineering: An analysis of engineering identity development in elementary students. *Journal of Pre-College Engineering Education Research (J-PEER)*, 10(2), 17-34. DOI: <https://doi.org/10.7771/2157-9288.1210>
- Mcloughlin, L., Fryazinov, O., Moseley, M., Sanchez, M., Adzhiev, V., Comminos, P., & Pasko, A. (2016). Virtual sculpting and 3D printing for young people with disabilities. *IEEE computer graphics and applications*, 36(1), 22-28.
- Miller-Ray, J. (2019). Investigating the impact of a community makers' guild training program on elementary and middle school educator perceptions of STEM (science, technology, engineering, and mathematics). *STEAM Education: Theory and Practice*, 79-100. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-04003-1_5
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D. G., & PRISMA Group*. (2009). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. *Annals of internal medicine*, 151(4), 264-269. DOI: <https://doi.org/10.7326/0003-4819-151-4-200908180-00135>
- Munn, Z., Peters, M. D., Stern, C., Tufanaru, C., McArthur, A., & Aromataris, E. (2018). Systematic review or scoping review? Guidance for authors when choosing between a systematic or scoping review approach. *BMC medical research methodology*, 18, 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12874-018-0611-x>
- Murr, L. E., Gaytan, S. M., Ramirez, D. A., Martinez, E., Hernandez, J., Amato, K. N., ... & Wicker, R. B. (2012). Metal fabrication by additive manufacturing using laser and electron beam melting technologies. *Journal of Materials Science & Technology*, 28(1), 1-14. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1005-0302\(12\)60016-4](https://doi.org/10.1016/S1005-0302(12)60016-4)
- Ng, O. L., & Chan, T. (2019). Learning as Making: Using 3D computer-aided design to enhance the learning of shape and space in STEM-integrated ways. *British Journal of Educational Technology*, 50(1), 294-308. DOI: <https://doi.org/10.1111/bjet.12643>

- Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, *143*, 172-196. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>
- Nikou, S. A. (2023). Student motivation and engagement in maker activities under the lens of the Activity Theory: a case study in a primary school. *Journal of Computers in Education*, 1-19. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40692-023-00258-y>
- Nikou, S. A., Collins, R., & Hendry, M. (2021, April). Investigating elementary school students' attitudes in makerspace activities through design-based learning. In European Conference on Educational Research.
- Norman, J., Madurawe, R. D., Moore, C. M., Khan, M. A., & Khairuzzaman, A. (2017). A new chapter in pharmaceutical manufacturing: 3D-printed drug products. *Advanced drug delivery reviews*, *108*, 39-50. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.03.001>
- Novak, E., & Wisdom, S. (2018). Effects of 3D printing project-based learning on preservice elementary teachers' science attitudes, science content knowledge, and anxiety about teaching science. *Journal of Science Education and Technology*, *27*, 412-432. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10956-018-9733-5>
- Novak, E., & Wisdom, S. (2020). Using 3D printing in science for elementary teachers. *Active learning in college science: The case for evidence-based practice*, 729-739. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-33600-4_45
- Nowlan, G. A. (2015). Developing and implementing 3D printing services in an academic library. *Library Hi Tech*, *33*(4), 472-479.
- O'Reilly, J., & Barry, B. (2023). The effect of the use of computer-aided design (CAD) and a 3D printer on the child's competence in mathematics. *Irish Educational Studies*, *42*(2), 233-256. DOI: <https://doi.org/10.1080/03323315.2021.1964561>
- Owen, D., Hickey, J., Cusson, A., Ayeni, O. I., Rhoades, J., Deng, Y., ... & Zhang, J. (2018). 3D printing of ceramic components using a customized 3D ceramic printer. *Progress in additive manufacturing*, *3*(1), 3-9. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40964-018-0037-3>
- Özdemir, S., Çetin, E., Çelik, A., Berikan, B., & Yüksel, A. O. (2017). Furnishing new generations with productive ICT skills to make them the maker of their own future. *Journal of Education and Future*, (11), 137-157.

- Pantazis, A., & Priavolou, C. (2017). 3D printing as a means of learning and communication: The 3Ducation project revisited. *Telematics and Informatics*, 34(8), 1465-1476. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tele.2017.06.010>
- Papert, S. (1972a). Teaching children thinking. *Programmed Learning and Educational Technology*, 9(5), 245-255. DOI: <https://doi.org/10.1080/1355800720090503>
- Pearson, H. A., & Dubé, A. K. (2022). 3D printing as an educational technology: theoretical perspectives, learning outcomes, and recommendations for practice. *Education and Information Technologies*, 27, 1-28. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10639-021-10733-7>
- Pham, M. T., Rajić, A., Greig, J. D., Sargeant, J. M., Papadopoulos, A., & McEwen, S. A. (2014). A scoping review of scoping reviews: advancing the approach and enhancing the consistency. *Research synthesis methods*, 5(4), 371-385. DOI: <https://doi.org/10.1002/jrsm.1123>
- Pernaa, J., & Wiedmer, S. (2020). A systematic review of 3D printing in chemistry education—analysis of earlier research and educational use through technological pedagogical content knowledge framework. *Chemistry Teacher International*, 2(2), 1-16. DOI: <https://doi.org/10.1515/cti-2019-0005>
- Plemmons, A. (2014). Building a culture of creation. *Teacher Librarian*, 41(5), 12-16.
- Pourchet, L. J., Thepot, A., Albouy, M., Courtial, E. J., Boher, A., Blum, L. J., & Marquette, C. A. (2017). Human skin 3D bioprinting using scaffold-free approach. *Advanced Healthcare Materials*, 6(4), 1601101. DOI: <https://doi.org/10.1002/adhm.201601101>
- Prato, S. C., & Britton, L. (2015). Digital fabrication technology in the library: Where we are and where we are going. *Bulletin of the Association for Information Science and Technology*, 42(1), 12-15. DOI: <https://doi.org/10.1002/bul2.2015.1720420106>
- Purpur, E., Radniecki, T., Colegrove, P. T., & Klenke, C. (2016). Refocusing mobile makerspace outreach efforts internally as professional development. *Library Hi Tech*, 34(1), 130-142. DOI: <https://doi.org/10.1108/LHT-07-2015-0077>
- Ratto, M. (2011). Critical making: Conceptual and material studies in technology and social life. *The information society*, 27(4), 252-260. DOI: <https://doi.org/10.1080/01972243.2011.583819>
- Ratto, M., & Ree, R. (2012). Materializing information: 3D printing and social change. *First Monday*, 17(7). DOI: <https://doi.org/10.5210/fm.v17i7.3968>

- Saengchairat, N., Tran, T., & Chua, C. K. (2017). A review: Additive manufacturing for active electronic components. *Virtual and Physical Prototyping*, *12*(1), 31-46. DOI: <https://doi.org/10.1080/17452759.2016.1253181>
- Sakin, M., & Kiroglu, Y. C. (2017). 3D Printing of Buildings: Construction of the Sustainable Houses of the Future by BIM. *Energy Procedia*, *134*, 702-711. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.562>
- Salentijn, G. I., Oomen, P. E., Grajewski, M., & Verpoorte, E. (2017). Fused deposition modeling 3D printing for (bio) analytical device fabrication: procedures, materials, and applications. *Analytical chemistry*, *89*(13), 7053-7061. DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/acs.analchem.7b00828>
- Schlegel, R. J., Chu, S. L., Chen, K., Deurmeyer, E., Christy, A. G., & Quek, F. (2019). Making in the classroom: Longitudinal evidence of increases in self-efficacy and STEM possible selves over time. *Computers & Education*, *142*, 103637. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.103637>
- Shahrubudin, N., Lee, T. C., & Ramlan, R. (2019). An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications. *Procedia Manufacturing*, *35*, 1286-1296. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.089>
- Schelly, C., Anzalone, G., Wijnen, B., & Pearce, J. M. (2015). Open-source 3-D printing technologies for education: Bringing additive manufacturing to the classroom. *Journal of Visual Languages & Computing*, *28*, 226-237. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jvlc.2015.01.004>
- Silk, E. M., Schunn, C. D., & Strand-Cary, M. (2009). The impact of an engineering design curriculum on science reasoning in an urban setting. *Journal of Science Education and Technology*, *18*(3), 209–223. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10956-009-9144-8>
- Singh, P., & Raghav, A. (2018). 3D food printing: a revolution in food technology. *Acta Scientific Nutritional Health*, *2*(2), 11-12.
- Smith, S. (2018). Children’s negotiations of visualization skills during a design-based learning experience using nondigital and digital techniques. *Interdisciplinary Journal of Problem-Based Learning*, *12*(2), 1-16. DOI: <https://doi.org/10.7771/1541-5015.1747>
- Spyros, P., Georgios, S., Konstantinos, K. T., & Konstantinos, G. (2021). The effect of 3D Printing technology on primary school students’ content knowledge, anxiety

- and interest toward science. *International Journal of Educational Innovation*, 3(1), 38-50.
- Stansbury, J. W., & Idacavage, M. J. (2016). 3D printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities. *Dental materials*, 32(1), 54-64. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dental.2015.09.018>
- Stone, B., Kay, D., Reynolds, A., & Brown, D. (2020). 3D Printing and Service Learning: Accessible Open Educational Resources for Students with Visual Impairment. *International Journal of Teaching and Learning in Higher Education*, 32(2), 336-346.
- Su, A., & Al'Aref, S. J. (2018). History of 3D printing. In J. K. Min, B. Mosadegh, S. Dunham, & S. J. Al'Aref (Ed.), *3D Printing applications in cardiovascular medicine* (pp. 1-10). Academic Press.
- Tekkol, İ. A., & Demirel, M. (2018). An investigation of self-directed learning skills of undergraduate students. *Frontiers in psychology*, 9, 1-14. DOI: 10.3389/fpsyg.2018.02324
- Tofail, S. A., Koumoulos, E. P., Bandyopadhyay, A., Bose, S., O'Donoghue, L., & Charitidis, C. (2018). Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. *Materials today*, 21(1), 22-37. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2017.07.001>
- Trevisan, F., Calignano, F., Aversa, A., Marchese, G., Lombardi, M., Biamino, S., ... & Manfredi, D. (2018). Additive manufacturing of titanium alloys in the biomedical field: processes, properties and applications. *Journal of applied biomaterials & functional materials*, 16(2), 57-67. DOI: <https://doi.org/10.5301/jabfm.5000371>
- Trust, T., & Maloy, R. W. (2017). Why 3D print? The 21st-century skills students develop while engaging in 3D printing projects. *Computers in the Schools*, 34(4), 253-266. DOI: <https://doi.org/10.1080/07380569.2017.1384684>
- Trust, T., Maloy, R. W., & Edwards, S. (2018). Learning through making: Emerging and expanding designs for college classes. *TechTrends*, 62(1), 19-28. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11528-017-0214-0>
- Turner, H., Resch, G., Southwick, D., McEwen, R., Dubé, A. K., & Record, I. (2017). Using 3D printing to enhance understanding and engagement with young audiences: lessons from workshops in a museum. *Curator: The Museum Journal*, 60(3), 311-333. DOI: <https://doi.org/10.1111/cura.12224>

- Uhlmann, E., Kersting, R., Klein, T. B., Cruz, M. F., & Borille, A. V. (2015). Additive manufacturing of titanium alloy for aircraft components. *Procedia Cirp*, *35*, 55-60. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.08.061>
- Uriondo, A., Esperon-Miguez, M., & Perinpanayagam, S. (2015). The present and future of additive manufacturing in the aerospace sector: A review of important aspects. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, *229*(11), 2132-2147. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954410014568797>
- Vanderploeg, A., Lee, S. E., & Mamp, M. (2017). The application of 3D printing technology in the fashion industry. *International Journal of Fashion Design, Technology and Education*, *10*(2), 170-179. DOI: <https://doi.org/10.1080/17543266.2016.1223355>
- Ventola, C. L. (2014). Medical applications for 3D printing: current and projected uses. *Pharmacy and Therapeutics*, *39*(10), 704-711.
- Vijayavenkataraman, S., Fuh, J. Y., & Lu, W. F. (2017). 3D printing and 3D bioprinting in pediatrics. *Bioengineering*, *4*(3), 63-74. DOI: <https://doi.org/10.3390/bioengineering4030063>
- Vones, K., Allan, D., Lambert, I., & Vettese, S. (2018). 3D-printing ‘Ocean plastic’—Fostering childrens’ engagement with sustainability. *Materials Today Communications*, *16*, 56-59. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2018.04.001>
- Vuopala, E., Guzmán Medrano, D., Aljabaly, M., Hietavirta, D., Malacara, L., & Pan, C. (2020). Implementing a maker culture in elementary school—students’ perspectives. *Technology, Pedagogy and Education*, *29*(5), 649-664. DOI: <https://doi.org/10.1080/1475939X.2020.1796776>
- Wang, X., Jiang, M., Zhou, Z., Gou, J., & Hui, D. (2017). 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. *Composites Part B: Engineering*, *110*, 442-458. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.034>
- Wang, Y. C., Chen, T., & Yeh, Y. L. (2019). Advanced 3D printing technologies for the aircraft industry: a fuzzy systematic approach for assessing the critical factors. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *105*(10), 4059-4069. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1927-8>
- Wright, L., Shaw, D., Gaidos, K., Lyman, G., & Sorey, T. (2018). 3D pit stop printing. *Science and Children*, *55*(7), 55-63.

- Yan, Q., Dong, H., Su, J., Han, J., Song, B., Wei, Q., & Shi, Y. (2018). A review of 3D printing technology for medical applications. *Engineering*, 4(5), 729-742. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.07.021>
- Yang, Y., Chen, Y., Wei, Y., & Li, Y. (2016). 3D printing of shape memory polymer for functional part fabrication. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 84(9), 2079-2095. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7843-2>
- Yap, C. Y., Chua, C. K., Dong, Z. L., Liu, Z. H., Zhang, D. Q., Loh, L. E., & Sing, S. L. (2015). Review of selective laser melting: *Materials and applications*. *Applied physics reviews*, 2(4), 041101. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4935926>
- Yap, Y. L., & Yeong, W. Y. (2014). Additive manufacture of fashion and jewellery products: a mini review: This paper provides an insight into the future of 3D printing industries for fashion and jewellery products. *Virtual and Physical Prototyping*, 9(3), 195-201. DOI: <https://doi.org/10.1080/17452759.2014.938993>
- Zocca, A., Lima, P., & Günster, J. (2017). LSD-based 3D printing of alumina ceramics. *Journal of ceramic science and technology*, 8(1), 141-148. DOI: 10.4416/JCST2016-00103