



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
UNIVERSITY OF PIRAEUS

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

ΤΜΗΜΑ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ

**«ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΚΡΙΣΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ»**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Η ψηφιακή μόδα (digital fashion) και οι δυνατότητες της εικονικής
πραγματικότητας (VR) για τη μείωση παραγωγής και σπατάλης υλικών

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΦΟΙΤΗΤΡΙΑ :

ΚΥΡΙΑΚΟΥΛΑ ΛΟΓΓΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ :

ΚΑΘ. ΣΤΕΦΑΝΟΣ ΓΚΡΙΤΖΑΛΗΣ

ΟΜΟΤ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ ΜΑΝΙΑΤΗΣ

ΠΕΙΡΑΙΑΣ, 2026

ΑΦΙΕΡΩΣΗ

*Στην οικογένειά μου,
για την αγάπη, τη στήριξη και την πίστη τους σε εμένα.*

*Με βαθιά ευγνωμοσύνη για την παρουσία τους
σε κάθε βήμα αυτής της διαδρομής.*

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους όσους συνέβαλαν, με διαφορετικούς τρόπους, στην πορεία και στην ολοκλήρωσή της.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους επιβλέποντες και τους διδάσκοντες του μεταπτυχιακού προγράμματος για τις γνώσεις, τα ερεθίσματα και την ακαδημαϊκή συμβολή τους κατά τη διάρκεια των σπουδών μου. Η παρουσία τους αποτέλεσε σημαντικό μέρος αυτής της εκπαιδευτικής διαδρομής.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω, επίσης, σε όσους συνέβαλαν στην οργάνωση και υποστήριξη του προγράμματος, για την άμεση ανταπόκριση και τη βοήθειά τους.

Τέλος, ευχαριστώ θερμά τους ανθρώπους που στάθηκαν δίπλα μου με κατανόηση, ενθάρρυνση και θετική διάθεση. Η ολοκλήρωση αυτής της εργασίας αποτελεί για μένα όχι μόνο το αποτέλεσμα μιας ακαδημαϊκής προσπάθειας, αλλά και το κλείσιμο μιας σημαντικής προσωπικής διαδρομής.

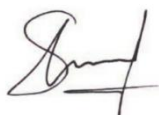
ΔΗΛΩΣΗ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΩΝ ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΩΝ

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν. 1599/1986 και τα άρθρα 2,4,6 παρ. 3 του Ν. 1256/1982, η παρούσα Διπλωματική Εργασία με τίτλο

«Η ψηφιακή μόδα (digital fashion) και οι δυνατότητες της εικονικής πραγματικότητας (VR) για τη μείωση παραγωγής και σπατάλης υλικών»,

καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και οι πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας και αναφέρονται ρητώς μέσα στο κείμενο που συνοδεύουν και η οποία έχει εκπονηθεί στο Τμήμα Ψηφιακών Συστημάτων του Πανεπιστημίου Πειραιώς αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής εργασίας και δεν προσβάλλει κάθε μορφής πνευματικά δικαιώματα τρίτων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή / και πηγές άλλων συγγραφέων, αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και μόνο.

Copyright (C) Κυριακή Λόγγου, 2026, Πειραιάς



Η ΨΗΦΙΑΚΗ ΜΟΔΑ (DIGITAL FASHION) ΚΑΙ ΟΙ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΤΗΣ ΕΙΚΟΝΙΚΗΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑΣ (VR) ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΣΠΑΤΑΛΗΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει τη σχέση ανάμεσα στην ψηφιακή μόδα, την εικονική πραγματικότητα και τη δυνατότητα μείωσης της παραγωγής και της σπατάλης υλικών στη βιομηχανία της μόδας. Η εργασία βασίζεται στην παραδοχή ότι η σπατάλη υλικών δεν αποτελεί αποκλειστικά ζήτημα τελικής απόρριψης ενδυμάτων ή διαχείρισης αποβλήτων μετά την κατανάλωση, αλλά διαμορφώνεται ήδη στα στάδια πριν από τη μαζική παραγωγή, μέσα από διαδικασίες σχεδιασμού, δημιουργίας φυσικών δειγμάτων, τεχνικών διορθώσεων, αξιολόγησης προϊόντων και λήψης αποφάσεων.

Σκοπός της εργασίας είναι να διερευνηθεί πώς η εικονική πραγματικότητα, ως μέρος του ευρύτερου ψηφιακού μετασχηματισμού της μόδας, μπορεί να συμβάλει στον περιορισμό της παραγωγής και της σπατάλης υλικών στα προ-παραγωγικά στάδια. Η μεθοδολογική προσέγγιση βασίζεται σε βιβλιογραφική επισκόπηση και εξετάζει τη σύνδεση της ψηφιακής μόδας και της εικονικής πραγματικότητας με τις διαδικασίες σχεδιασμού, ανάπτυξης και αξιολόγησης προϊόντων πριν από την παραγωγή.

Η ανάλυση δείχνει ότι η εικονική πραγματικότητα μπορεί να συμβάλει στη μείωση της σπατάλης όταν ενισχύει την αξιολόγηση προϊόντων πριν από την παραγωγή, περιορίζοντας την αβεβαιότητα, την ανάγκη για πολλαπλά φυσικά δείγματα και τις επαναληπτικές διορθώσεις. Ωστόσο, η συμβολή της δεν είναι αυτόματη, αλλά εξαρτάται από την ποιότητα της ψηφιακής προσομοίωσης και την ουσιαστική ένταξή της στις διαδικασίες ανάπτυξης προϊόντος. Συνολικά, η VR δεν αντικαθιστά πλήρως τη φυσική αξιολόγηση των ενδυμάτων, μπορεί όμως να λειτουργήσει ως συμπληρωματικό εργαλείο πρόληψης της σπατάλης πριν από τη μαζική παραγωγή.

Λέξεις κλειδιά: ψηφιακή μόδα, εικονική πραγματικότητα, βιωσιμότητα στη μόδα, μείωση σπατάλης υλικών, προ-παραγωγικά στάδια, ανάπτυξη προϊόντος, τρισδιάστατος σχεδιασμός ενδυμάτων, εικονικά πρωτότυπα, μείωση φυσικών δειγμάτων, ψηφιακός μετασχηματισμός στη μόδα.

DIGITAL FASHION AND THE POTENTIAL OF VIRTUAL REALITY (VR) TO REDUCE PRODUCTION AND MATERIAL WASTE

ABSTRACT

This master's thesis examines the relationship between digital fashion, virtual reality, and the potential to reduce unnecessary production and material waste in the fashion industry. The study is based on the premise that material waste is not only associated with the final disposal of garments or post-consumer waste management, but is already shaped in the stages preceding mass production, through processes of design, physical sample development, technical revisions, product evaluation, and decision-making.

The aim of the thesis is to investigate how virtual reality, as part of the broader digital transformation of fashion, can contribute to reducing unnecessary production and material waste in the pre-production stages. The methodological approach is based on a literature review and examines the connection between digital fashion and virtual reality in relation to the processes of product design, development, and evaluation before production.

The analysis shows that virtual reality can contribute to waste reduction when it enhances product evaluation before production, by reducing uncertainty, the need for multiple physical samples, and repetitive revisions. However, its contribution is not automatic, but depends on the quality of digital simulation and its meaningful integration into product development processes. Overall, VR does not fully replace the physical evaluation of garments; however, it can function as a complementary tool for preventing waste before mass production.

Keywords: digital fashion, virtual reality, fashion sustainability, material waste reduction, pre-production stages, product development, 3D garment design, virtual prototyping, physical sample reduction, digital transformation in fashion.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΣΠΑΤΑΛΗ ΥΛΙΚΩΝ ΣΤΗ ΜΟΔΑ	5
1.1 Σύγχρονα μοντέλα παραγωγής στη βιομηχανία της μόδας	5
1.1.1 Εξέλιξη των παραγωγικών μοντέλων	5
1.1.2 Παραγωγή βάσει πρόβλεψης ζήτησης (forecast-driven production).....	7
1.1.3 Επιχειρηματική λογική όγκου και οικονομίες κλίμακας.....	8
1.2 Σπατάλη υλικών στα πρώιμα στάδια παραγωγής	11
1.2.1 Προ-καταναλωτική σπατάλη υφασμάτων (pre-consumer textile waste)	11
1.2.2 Η δημιουργία φυσικών δειγμάτων και πρωτοτύπων ως πηγή προ- παραγωγικής σπατάλης	13
1.2.3 Σπατάλη λόγω αβεβαιότητας ζήτησης και πλεονάζοντος αποθέματος	14
1.3 Κρίσιμα σημεία αβεβαιότητας πριν τη μαζική παραγωγή	15
1.3.1 Αβεβαιότητα αποδοχής προϊόντος	15
1.3.2 Πληροφοριακή ασυμμετρία στην εφοδιαστική αλυσίδα.....	15
1.3.3 Διαχείριση ρίσκου μέσω υπερπαραγωγής	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΨΗΦΙΑΚΗ ΜΟΔΑ ΚΑΙ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΚΥΚΛΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ.....	17
2.1 Ορισμός και Βασικές Έννοιες	17
2.1.1 Τι είναι η ψηφιακή μόδα	17
2.1.2 Βασικές τεχνολογίες ψηφιακής μόδας	19
2.2 Ψηφιοποίηση Σχεδιασμού και Ανάπτυξης Προϊόντος.....	23
2.2.1 Από το σκίτσο στο 3D ψηφιακό πρωτότυπο	23
2.2.2 Ψηφιακή δημιουργία δειγμάτων και εικονικών πρωτοτύπων	25
2.2.3 Ψηφιακά δίδυμα (digital twins) στη μόδα	26
2.2.4 Μελέτη περίπτωσης: Atacac και The Fabricant.....	27
2.3 Ψηφιακά Εργαλεία Πριν την Παραγωγή	29
2.3.1 Εικονικά showrooms και ψηφιακοί κατάλογοι	29
2.3.2 Ψηφιακά Tech Packs και Patternmaking	31

2.3.3 On-demand παραγωγή και micro-factories	32
2.4 Ψηφιακή Μόδα και Βιωσιμότητα	32
2.4.1 Αποϋλοποίηση (dematerialization) του κύκλου παραγωγής.....	33
2.4.2 Ψηφιακός μετασχηματισμός εφοδιαστικής αλυσίδας.....	35
2.4.3 Κυκλική οικονομία και Digital Product Passports	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΕΙΚΟΝΙΚΗ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΤΗΣ ΜΟΔΑΣ	38
3.1 Ορισμός και Τεχνολογικά Χαρακτηριστικά της Εικονικής Πραγματικότητας (Virtual Reality)	38
3.1.1 Ορισμός εικονικής πραγματικότητας	39
3.1.2 Βαθμοί ελευθερίας (Degrees of Freedom) και αλληλεπίδραση	42
3.1.3 Σύγκριση VR, AR και Mixed Reality στη μόδα	44
3.2 Εμβύθιση και Αίσθηση Παρουσίας	47
3.2.1 Θεωρητικό πλαίσιο Presence (Παρουσίας)	48
3.2.2 Immersion ως τεχνικό χαρακτηριστικό	50
3.2.3 Σημασία της παρουσίας για την αξιολόγηση ενδυμάτων	51
3.3 VR και εμπειρία αξιολόγησης προϊόντων πριν από την παραγωγή	53
3.3.1 Εικονικά fitting sessions για ομάδες σχεδιασμού	53
3.3.2 Εικονικά showrooms και sales meetings	56
3.3.3 Pseudo-haptics και απτική ανάδραση.....	57
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Η ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΕΙΚΟΝΙΚΗΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗ ΜΕΙΩΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΣΠΑΤΑΛΗΣ	60
4.1 Πώς η εικονική πραγματικότητα επηρεάζει τις αποφάσεις πριν από την παραγωγή	60
4.1.1 Μείωση αβεβαιότητας πριν από τη φυσική παραγωγή	60
4.1.2 Βελτίωση αξιολόγησης σχεδίου, εφαρμογής και υλικών.....	61
4.1.3 Συνεργατική αξιολόγηση και τεκμηριωμένη απόφαση παραγωγής.....	63
4.2 Πιθανοί μηχανισμοί μείωσης παραγωγής και σπατάλης.....	64
4.2.1 Μείωση φυσικών δειγμάτων και επαναληπτικών διορθώσεων	64
4.2.2 Δοκιμή ενδιαφέροντος πριν από τη μαζική παραγωγή.....	66
4.2.3 Χρήση δεδομένων για πιο στοχευμένες αποφάσεις παραγωγής.....	67
4.3 Προϋποθέσεις εφαρμογής στη βιομηχανία της μόδας.....	68

4.3.1 Τεχνολογική ωριμότητα και ποιότητα ψηφιακών αρχείων	69
4.3.2 Κόστος, δεξιότητες και εκπαίδευση προσωπικού	70
4.3.3 Οργανωσιακή αλλαγή και συνεργασία στην εφοδιαστική αλυσίδα	72
4.4 Περιορισμοί και προκλήσεις της χρήσης της εικονικής πραγματικότητας.....	73
4.4.1 Τεχνικοί περιορισμοί και ακρίβεια προσομοίωσης.....	74
4.4.2 Πρόσβαση, ψηφιακό χάσμα και εξάρτηση από τεχνολογικές υποδομές.....	75
4.4.3 Ενεργειακό και περιβαλλοντικό αποτύπωμα της VR.....	76
4.4.4 Υπερβολικός τεχνολογικός ενθουσιασμός και παραπλανητική προβολή περιβαλλοντικής υπευθυνότητας	77
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ.....	80
5.1 Συνοπτική αποτίμηση της εργασίας	80
5.2 Απάντηση στα ερευνητικά ερωτήματα	81
5.3 Θεωρητική συμβολή της εργασίας	85
5.4 Πρακτικές επιπτώσεις για τη βιομηχανία της μόδας.....	86
5.5 Περιορισμοί της έρευνας.....	87
5.6 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	89
5.7 Τελικό συμπέρασμα	90
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	92

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η βιομηχανία της μόδας αποτελεί έναν από τους πλέον δυναμικούς και ταυτόχρονα περιβαλλοντικά επιβαρυντικούς κλάδους της σύγχρονης οικονομίας. Η παραγωγή ενδυμάτων συνδέεται με εκτεταμένη χρήση φυσικών πόρων, υψηλή κατανάλωση νερού και ενέργειας, χημική επεξεργασία υφασμάτων, εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και σημαντικές ποσότητες κλωστοϋφαντουργικών αποβλήτων. Η περιβαλλοντική αυτή επιβάρυνση εντείνεται από την αύξηση της παραγωγής και της κατανάλωσης, αλλά και από την επικράτηση επιχειρηματικών μοντέλων που βασίζονται στην ταχύτητα, στη συχνή ανανέωση συλλογών και στη διάθεση μεγάλου αριθμού προϊόντων στην αγορά. Στο πλαίσιο αυτό, η γρήγορη μόδα (fast fashion) έχει αναδειχθεί σε βασικό παράγοντα ενίσχυσης της υπερπαραγωγής, καθώς στηρίζεται στη γρήγορη ανταπόκριση στις τάσεις, στη χαμηλή τιμή, στη σύντομη διάρκεια ζωής των προϊόντων και στη συνεχή δημιουργία νέων καταναλωτικών κινήτρων (Bhardwaj & Fairhurst, 2010; Niinimäki et al., 2020).

Το ζήτημα της σπατάλης στη μόδα προσεγγίζεται συχνά μέσα από την οπτική των αποβλήτων που δημιουργούνται μετά την κατανάλωση, δηλαδή όταν τα ενδύματα απορρίπτονται, παραμένουν αχρησιμοποίητα ή οδηγούνται σε χώρους υγειονομικής ταφής και καύσης. Ωστόσο, μια τέτοια προσέγγιση δεν αποτυπώνει πλήρως τον τρόπο με τον οποίο παράγεται η σπατάλη στον κλάδο. Η σπατάλη υλικών δεν εμφανίζεται μόνο στο τέλος του κύκλου ζωής ενός προϊόντος, αλλά διαμορφώνεται ήδη σε προηγούμενα στάδια, μέσα από τις διαδικασίες σχεδιασμού, ανάπτυξης, δημιουργίας δειγμάτων, τεχνικής αξιολόγησης και έγκρισης των προϊόντων. Πριν ένα ένδυμα οδηγηθεί στη μαζική παραγωγή, λαμβάνονται αποφάσεις που αφορούν τη γραμμή, την εφαρμογή, την επιλογή υφάσματος, τα χρώματα, τις τεχνικές λεπτομέρειες και την εμπορική του καταλληλότητα. Οι αποφάσεις αυτές επηρεάζουν άμεσα αν ένα προϊόν θα προχωρήσει στην παραγωγή, αν θα χρειαστεί τροποποιήσεις ή αν θα απορριφθεί.

Η εστίαση στα στάδια που προηγούνται της παραγωγής είναι ιδιαίτερα σημαντική, επειδή σε αυτά επιχειρείται η μείωση της αβεβαιότητας γύρω από το τελικό προϊόν. Στη βιομηχανία της μόδας, η αβεβαιότητα αφορά τόσο την τεχνική και αισθητική αρτιότητα ενός ενδύματος όσο και την πιθανή εμπορική του αποδοχή. Παραδοσιακά, η αξιολόγηση αυτή βασίζεται σε φυσικά δείγματα, τα οποία επιτρέπουν στους σχεδιαστές, στους τεχνικούς, στους αγοραστές και στα στελέχη ανάπτυξης προϊόντων να εξετάσουν το ένδυμα ως προς την εφαρμογή, την κίνηση, την πτώση του υφάσματος, τις αναλογίες και τη συνολική του εικόνα. Παρά τη χρησιμότητά

τους, τα φυσικά δείγματα απαιτούν υλικά, χρόνο, εργασία και μεταφορές, ενώ η ανάγκη για διαδοχικές διορθώσεις μπορεί να οδηγήσει σε επανάληψη της διαδικασίας και σε πρόσθετη κατανάλωση πόρων. Με αυτή την έννοια, η σπατάλη στα πρώιμα στάδια δεν αποτελεί μεμονωμένο φαινόμενο, αλλά συνδέεται άμεσα με τον τρόπο μέσω του οποίου η βιομηχανία επιχειρεί να μειώσει την αβεβαιότητα πριν από την έναρξη της παραγωγής.

Στο πλαίσιο αυτό, η ψηφιακή μόδα αποκτά κεντρική σημασία ως πεδίο τεχνολογικού μετασχηματισμού του κύκλου ανάπτυξης προϊόντος. Περιλαμβάνει ένα σύνολο εργαλείων και πρακτικών που αναδιαμορφώνουν τις διαδικασίες σχεδιασμού, ανάπτυξης, αξιολόγησης και έγκρισης προϊόντων μόδας. Ο τρισδιάστατος σχεδιασμός, τα ψηφιακά πρωτότυπα, οι βιβλιοθήκες υλικών, τα ψηφιακά δίδυμα, τα εικονικά showrooms και οι ψηφιακές ροές εργασίας επιτρέπουν την εξέταση σχεδιαστικών και τεχνικών επιλογών πριν από την κατασκευή φυσικών δειγμάτων. Επομένως, η σημασία τους δεν είναι μόνο τεχνολογική, αλλά και περιβαλλοντική, καθώς μπορούν να συμβάλουν στον περιορισμό επαναληπτικών δοκιμών, στη μείωση της εξάρτησης από φυσικά δείγματα και στην αποφυγή άσκοπης κατανάλωσης υλικών στα στάδια πριν από την παραγωγή (Baek et al., 2022; Casciani et al., 2022).

Η εικονική πραγματικότητα εντάσσεται σε αυτό το ευρύτερο πεδίο ψηφιακού μετασχηματισμού ως ειδικότερο εργαλείο αξιολόγησης και αλληλεπίδρασης με ψηφιακά προϊόντα μόδας. Σε αντίθεση με μια δισδιάστατη απεικόνιση ή με την απλή προβολή ενός τρισδιάστατου μοντέλου σε οθόνη, η εικονική πραγματικότητα δημιουργεί ένα εμβυθιστικό περιβάλλον μέσα στο οποίο ο χρήστης μπορεί να αντιληφθεί το ψηφιακό αντικείμενο με μεγαλύτερη αίσθηση χώρου, κλίμακας και παρουσίας. Τα χαρακτηριστικά αυτά έχουν ιδιαίτερη σημασία για τη μόδα, καθώς το ένδυμα δεν αξιολογείται μόνο ως εικόνα, αλλά ως αντικείμενο που σχετίζεται με το σώμα, την κίνηση, τον όγκο, την εφαρμογή και ύλη. Επομένως, η VR μπορεί να λειτουργήσει ως ενδιάμεσο περιβάλλον ανάμεσα στο ψηφιακό αρχείο και στη φυσική κατασκευή, προσφέροντας ένα πιο σύνθετο πεδίο παρατήρησης και αξιολόγησης πριν από την παραγωγή (Slater & Sanchez-Vives, 2016; Sarakatsanos et al., 2024).

Στην παρούσα εργασία, η εικονική πραγματικότητα προσεγγίζεται όχι ως τεχνολογική καινοτομία καθαυτή, αλλά ως εργαλείο που μπορεί να υποστηρίξει τις διαδικασίες αξιολόγησης και λήψης αποφάσεων πριν από την παραγωγή. Το ερευνητικό ενδιαφέρον εστιάζεται στο κατά πόσο και υπό ποιες προϋποθέσεις η VR μπορεί να συμβάλει στη μείωση της παραγωγής και της σπατάλης υλικών, περιορίζοντας την εξάρτηση από φυσικά δείγματα και επαναληπτικές

διορθώσεις. Η VR δεν αντιμετωπίζεται ως αυτόνομη ή αυτόματη λύση βιωσιμότητας, αλλά ως τεχνολογία της οποίας η περιβαλλοντική σημασία εξαρτάται από την ένταξή της σε οργανωμένες ψηφιακές ροές εργασίας και από την ικανότητά της να επηρεάζει πραγματικές αποφάσεις σχεδιασμού, αξιολόγησης και παραγωγής.

Με βάση τα παραπάνω, το κύριο ερευνητικό ερώτημα της παρούσας εργασίας διατυπώνεται ως εξής: **Πώς η εικονική πραγματικότητα, στο πλαίσιο της ψηφιακής μόδας, μπορεί να συμβάλει στη μείωση της παραγωγής και της σπατάλης υλικών στη βιομηχανία της μόδας;**

Για την τεκμηριωμένη διερεύνηση του κύριου ερευνητικού ερωτήματος, η εργασία διαρθρώνεται γύρω από τα ακόλουθα δευτερεύοντα ερευνητικά ερωτήματα:

1. Ποια χαρακτηριστικά του σύγχρονου παραγωγικού μοντέλου της μόδας συνδέονται με την αυξημένη παραγωγή και τη σπατάλη υλικών;
2. Πώς η ψηφιακή μόδα μετασχηματίζει τις διαδικασίες σχεδιασμού, ανάπτυξης και αξιολόγησης προϊόντων πριν από την παραγωγή;
3. Πώς η εικονική πραγματικότητα επηρεάζει την εμπειρία αξιολόγησης ψηφιακών ενδυμάτων στο στάδιο πριν από τη φυσική παραγωγή;
4. Σε ποιο βαθμό και υπό ποιες προϋποθέσεις η εικονική πραγματικότητα μπορεί να συμβάλει στη μείωση της παραγωγής και της σπατάλης υλικών στον κύκλο παραγωγής της μόδας;
5. Ποιοι είναι οι βασικοί περιορισμοί και οι προκλήσεις της εφαρμογής της εικονικής πραγματικότητας ως εργαλείου βιωσιμότητας στη βιομηχανία της μόδας;

Σκοπός της εργασίας είναι η διερεύνηση της σχέσης ανάμεσα στην ψηφιακή μόδα, την εικονική πραγματικότητα και τη μείωση της παραγωγής και της σπατάλης υλικών, με έμφαση στα στάδια που προηγούνται της μαζικής παραγωγής. Ειδικότερα, η εργασία εξετάζει τους μηχανισμούς μέσω των οποίων η ψηφιοποίηση των διαδικασιών σχεδιασμού, ανάπτυξης και αξιολόγησης προϊόντων μπορεί να περιορίσει την εξάρτηση από φυσικά δείγματα, να μειώσει την αβεβαιότητα στη λήψη αποφάσεων και να υποστηρίξει πιο τεκμηριωμένες επιλογές πριν από την έναρξη της παραγωγής. Παράλληλα, η εργασία προσεγγίζει κριτικά τα όρια της VR, αποφεύγοντας την αντιμετώπισή της ως αυτόματης ή καθολικής λύσης βιωσιμότητας. Υπό

αυτό το πρίσμα, η εικονική πραγματικότητα εξετάζεται ως κρίσιμο εργαλείο αξιολόγησης στο πλαίσιο του ψηφιακού μετασχηματισμού της μόδας, του οποίου η συμβολή συνδέεται με τον τρόπο ενσωμάτωσής του στις διαδικασίες ανάπτυξης προϊόντος.

Η μεθοδολογική προσέγγιση της εργασίας βασίζεται σε βιβλιογραφική επισκόπηση. Η ανάλυση αξιοποιεί επιστημονική βιβλιογραφία που αφορά τη γρήγορη μόδα, τη σπατάλη υλικών, την προ-καταναλωτική σπατάλη, την ψηφιακή μόδα, τον τρισδιάστατο σχεδιασμό, τα ψηφιακά πρωτότυπα, τα ψηφιακά δίδυμα, την εικονική πραγματικότητα, την εμπύθιση και την αίσθηση παρουσίας. Παράλληλα, εξετάζονται μελέτες και παραδείγματα εφαρμογής από τον χώρο της μόδας και της ανάπτυξης προϊόντων, ώστε η συζήτηση να συνδεθεί με συγκεκριμένες πρακτικές δυνατότητες και περιορισμούς. Η επιλογή αυτής της προσέγγισης κρίνεται κατάλληλη, καθώς το ερευνητικό πεδίο βρίσκεται ακόμη σε εξέλιξη και η σχέση ανάμεσα στη VR και στη μείωση της σπατάλης υλικών δεν έχει αποτιμηθεί επαρκώς με ενιαίο και συστηματικό τρόπο.

Συνολικά, η παρούσα εργασία επιδιώκει να συμβάλει στη συζήτηση για τη βιωσιμότητα στη μόδα, μετατοπίζοντας το ενδιαφέρον από τη διαχείριση των αποβλήτων μετά την κατανάλωση προς την πρόληψη της σπατάλης στα στάδια πριν από την παραγωγή. Η εικονική πραγματικότητα εξετάζεται όχι ως τεχνολογία με δεδομένη περιβαλλοντική επίδραση, αλλά ως εργαλείο που μπορεί, υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις, να ενισχύσει την αξιολόγηση προϊόντων, να μειώσει την αβεβαιότητα και να υποστηρίξει πιο τεκμηριωμένες αποφάσεις στον κύκλο ανάπτυξης προϊόντος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΣΠΑΤΑΛΗ ΥΛΙΚΩΝ ΣΤΗ ΜΟΔΑ

1.1 Σύγχρονα μοντέλα παραγωγής στη βιομηχανία της μόδας

1.1.1 Εξέλιξη των παραγωγικών μοντέλων

Η βιομηχανία της μόδας μπορεί να προσεγγιστεί ως ένα δυναμικό παραγωγικό σύστημα, στο οποίο ο χρόνος είναι καθοριστικός. Τα προϊόντα έχουν σύντομο εμπορικό κύκλο ζωής, η ζήτηση μεταβάλλεται έντονα και η πρόβλεψή της είναι περιορισμένη. Επιπλέον, μεγάλο μέρος των αγοραστικών αποφάσεων λαμβάνεται στο σημείο πώλησης, γεγονός που καθιστά κρίσιμους παράγοντες τη διαθεσιμότητα και τον σωστό χρόνο διάθεσης των προϊόντων (Christopher et al., 2004). Παράλληλα, οι αλλαγές στον τρόπο ζωής και η αυξημένη απαίτηση για συνεχή ανανέωση προϊόντων δημιουργούν πίεση στις επιχειρήσεις να μειώσουν τους χρόνους ανταπόκρισης και να αυξήσουν τη συχνότητα καινούργιων συλλογών (Barnes & Lea-Greenwood, 2006). Συνεπώς, η εξέλιξη των παραγωγικών μοντέλων στη μόδα μπορεί να ιδωθεί ως προσαρμογή σε ένα περιβάλλον αυξημένης αβεβαιότητας, όπου η ταχύτητα και η ευελιξία αποκτούν κεντρικό ρόλο.

Ιστορικά, η οργάνωση της παραγωγής στη μόδα βασιζόταν σε ένα ημερολογιακά καθοδηγούμενο μοντέλο (calendar-driven model) δύο βασικών συλλογών (Άνοιξη/Καλοκαίρι και Φθινόπωρο/Χειμώνας), όπου οι αποφάσεις σχεδιασμού, αγορών και παραγωγής «κλείδωναν» πολύ πριν από την πωλησιακή περίοδο. Ο προγραμματισμός μπορούσε να ξεκινά έως και ένα έτος νωρίτερα και να οδηγεί σε ετήσιο κύκλο ανάπτυξης συλλογών. Το μοντέλο αυτό παρείχε σταθερότητα και προβλεψιμότητα, αλλά ενίσχυε την εξάρτηση από προβλέψεις και περιόριζε τη δυνατότητα ταχείας προσαρμογής όταν η ζήτηση αποκλινε (Barnes & Lea-Greenwood, 2006; Bhardwaj & Fairhurst, 2010).

Με την πάροδο του χρόνου, οι μεταβολές στο επιχειρησιακό περιβάλλον κατέστησαν το παραδοσιακό μοντέλο λιγότερο αποτελεσματικό. Οι Christopher et al. (2004) υποστηρίζουν ότι οι αγορές μόδας λειτουργούν ως σύνθετα συστήματα, όπου η ακριβής πρόβλεψη είναι δύσκολη και η αξία μετατοπίζεται προς δομές που επιτρέπουν ταχύτερη απόκριση στη ζήτηση. Ταυτόχρονα, η διεθνοποίηση και η μεταφορά παραγωγής σε περιοχές χαμηλού κόστους

επιμήκυναν την εφοδιαστική αλυσίδα και αύξησαν τους χρόνους παράδοσης (lead times), δημιουργώντας μια κρίσιμη αντίφαση. Ενώ μειώνεται το κόστος, αυξάνονται οι χρόνοι και τα αποθέματα που «παγιδεύονται» στην αλυσίδα ενέχουν κίνδυνο απαξίωσης. Σε αυτό το πλαίσιο, η μείωση του χρόνου παράδοσης και η ταχύτητα διάθεσης στην αγορά (speed-to-market) ενισχύονται ως στρατηγικές προτεραιότητες, επειδή η καθυστέρηση αυξάνει την πιθανότητα το προϊόν να φτάσει μετά την κορύφωση της ζήτησης, οδηγώντας, επιπλέον σε εκπτώσεις και μεγαλύτερο εμπορικό κίνδυνο.

Από αυτή τη μετάβαση αναδύεται η γρήγορη μόδα (fast fashion) ως διακριτό επιχειρησιακό μοντέλο. Οι Barnes και Lea-Greenwood (2006) το ορίζουν ως στρατηγική που στοχεύει σε μικρότερους κύκλους αγορών και μείωσης χρόνων παράδοσης, έτσι ώστε νέα προϊόντα να φτάνουν στα καταστήματα όταν η ζήτηση βρίσκεται στο υψηλότερο της σημείο. Πρακτικά, αυτό εκφράζεται ως συνεχής ανανέωση της ποικιλίας προϊόντων και αυξημένη συχνότητα κυκλοφοριών, που ενθαρρύνει συχνότερες επισκέψεις καταναλωτών. Η πρακτική αυτή συνεπάγεται συντομότερο κύκλο ζωής των προϊόντων και υψηλότερα περιθώρια κέρδους μέσω της γρήγορης διάθεσης εμπορευμάτων, παρακάμπτοντας εντελώς τη διαδικασία των αναγκαστικών μειώσεων τιμών στο τέλος της περιόδου (Bhardwaj & Fairhurst 2010).

Η επικράτηση της γρήγορης μόδας συνοδεύτηκε από επιτάχυνση του κύκλου ζωής προϊόντος και από μετατόπιση πέρα από το κλασικό σχήμα των δύο σεζόν. Οι Bhardwaj και Fairhurst (2010) αναφέρουν ότι από τις αρχές της δεκαετίας του 1990 ενισχύθηκε η πρακτική προσθήκης ενδιάμεσων περιόδων εν μέσω του έτους (mid-seasons), αυξάνοντας την πίεση για μικρότερες παρτίδες και ακόμη πιο σύντομους χρόνους παράδοσης. Αυτό σημαίνει ότι κάθε προϊόν παραμένει εμπορικά ενεργό για μικρότερο χρονικό διάστημα, άρα η αξία του εξαρτάται περισσότερο από τον χρονισμό και από την ικανότητα του συστήματος να ανανεώνει γρήγορα την προσφορά (Christopher et al., 2004).

Για να εδραιωθεί θεωρητικά το fast fashion ως σύστημα και όχι ως απλή επιτάχυνση, είναι κρίσιμο να αναδειχθεί ο συνδυασμός ικανοτήτων του υπό αβεβαιότητα ζήτησης. Οι Cachon και Swinney (2011) ορίζουν ότι ένα σύστημα γρήγορης μόδας συνδυάζει γρήγορη απόκριση (quick response), δηλαδή δυνατότητα συμπίεσης χρόνων ώστε να ταιριάζει καλύτερα η προσφορά με αβέβαιη ζήτηση και ενισχυμένο σχεδιασμό (enhanced design), δηλαδή ικανότητα παραγωγής προϊόντων που συλλαμβάνουν εγκαίρως τάσεις. Αυτά τα χαρακτηριστικά της γρήγορης μόδας, τονίζουν το πρόβλημα του παραδοσιακού μοντέλου σε αγορές με έντονη

μεταβλητότητα και ασταθή ζήτηση, κάνοντας ακόμα πιο επιτακτική την ανάγκη για μετάβαση σε διαφορετικές προσεγγίσεις καθοδηγούμενες από τη ζήτηση. Με αυτόν τον τρόπο, εξηγείται γιατί το σύστημα μετακινήθηκε από εποχικούς κύκλους προς μοντέλα όπου η ταχύτητα, η συχνότητα ανανέωσης και η λειτουργική ευελιξία είναι κεντρικές μεταβλητές (Christopher et al., 2004).

Τέλος, η πρόσφατη βιβλιογραφία περιγράφει το ultra-fast fashion ως επόμενη εξέλιξη προς ένα αποκλειστικά ψηφιακό μοντέλο που βασίζεται σε δεδομένα. Οι Uchańska-Bieniusiewicz και Obłój (2023) αναδεικνύουν ότι το μοντέλο αυτό διαφοροποιείται μέσω αμιγώς ψηφιακής παρουσίας, εκτεταμένης χρήσης τεχνητής νοημοσύνης, μεγάλων δεδομένων και στρατηγικής «δοκιμή–επανάληψη» (test-and-repeat) με μικρές αρχικές παρτίδες και ταχεία κλιμάκωση των επιτυχημένων προϊόντων.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της νέας φάσης αποτελεί η Shein, η οποία λειτουργεί ως αμιγώς διαδικτυακή πλατφόρμα υπερταχείας μόδας. Σύμφωνα με πρόσφατες αναλύσεις, η εταιρεία είναι σε θέση να διαθέτει έως και χιλιάδες νέα σχέδια ημερησίως, αξιοποιώντας μικρές αρχικές παρτίδες και γρήγορη κλιμάκωση των προϊόντων που παρουσιάζουν υψηλή ζήτηση. Παράλληλα, η μέση τιμή ανά κωδικό προϊόντος παραμένει σημαντικά χαμηλότερη σε σχέση με παλαιότερα brands fast fashion, γεγονός που ενισχύει περαιτέρω τη δυναμική της υπερκατανάλωσης (McKinsey & Company, 2025).

Συνεπώς, η εξέλιξη από το παραδοσιακό μοντέλο στο γρήγορο (fast) και τέλος στο υπερ-γρήγορο (ultra-fast) αποτυπώνει σταθερή τάση προς μεγαλύτερη ταχύτητα και συχνότητα ανανέωσης.

1.1.2 Παραγωγή βάσει πρόβλεψης ζήτησης (forecast-driven production)

Η παραγωγή βάσει πρόβλεψης ζήτησης (forecast-driven production) αναφέρεται στη λήψη αποφάσεων παραγωγής και προμήθειας πριν επιβεβαιωθεί η πραγματική ζήτηση, με βάση εκτιμήσεις που γίνονται αρκετό χρόνο πριν από την διάθεση του προϊόντος στην αγορά. Στη μόδα, όπου η ζήτηση είναι ασταθής και οι κύκλοι ζωής σύντομοι, η πρόβλεψη είναι αναγκαία για τον προγραμματισμό, αλλά εμπεριέχει δομικό ρίσκο αστοχίας (Christopher et al., 2004). Παρ' όλα αυτά, οι επιχειρήσεις συνεχίζουν να λαμβάνουν αποφάσεις πριν από τη ζήτηση, επειδή οι μεγάλοι χρόνοι παράδοσης δεν επιτρέπουν να περιμένουν μέχρι να εμφανιστεί αξιόπιστη πληροφορία. Αυτό αποτυπώνεται στο θεωρητικό πλαίσιο των Cachon και Swinney

(2011), όπου στο παραδοσιακό σύστημα, η βασική ποσότητα τοποθετείται πριν τη σεζόν, ενώ η ταχεία απόκριση λειτουργεί συμπληρωματικά, επιτρέποντας πρόσθετη προμήθεια μετά την εμφάνιση πληροφορίας ζήτησης (συχνά με μεγαλύτερο κόστος).

Βασική συνέπεια της παραγωγής βάσει πρόβλεψης είναι ότι κάθε απόκλιση ανάμεσα στην πραγματική ζήτηση και στην αρχική εκτίμηση μεταφράζεται σε υπερ-απόθεμα ή ελλείψεις. Σε κλάδους όπου η διαθεσιμότητα στο σημείο πώλησης θεωρείται κρίσιμη, οι επιχειρήσεις τείνουν να γείρουν προς την πλευρά της ασφάλειας, επιλέγοντας υψηλότερες αρχικές ποσότητες και μεταφέροντας το ρίσκο προς την κατεύθυνση του υπερ-αποθέματος. Όταν τελικά η ζήτηση αποδειχθεί χαμηλότερη από την προβλεπόμενη, το απούλητο προϊόν συνήθως απορροφάται μέσω εκπτώσεων και εκκαθαρίσεων. Οι Christopher et al. (2004), για παράδειγμα, συνδέουν τους μεγάλους χρόνους της εφοδιαστικής αλυσίδας με απώλειες στο λιανεμπόριο, αποδίδοντας σημαντικό μέρος αυτών στις αναγκαστικές μειώσεις τιμών. Παράλληλα, οι Cachon και Swinney (2011) αναλύουν ότι η εκκαθάριση στο τέλος της περιόδου αποτελεί αναμενόμενη έκβαση του υπερ-αποθέματος.

Κεντρικός μηχανισμός πίσω από αυτό το φαινόμενο είναι το χρονικό κενό (lead-time gap). Ο συνολικός χρόνος της εφοδιαστικής αλυσίδας συχνά υπερβαίνει τον χρόνο που η αγορά είναι διατεθειμένη να περιμένει το τελικό προϊόν, με αποτέλεσμα το κενό να καλύπτεται με απόθεμα βασισμένο σε πρόβλεψη (Christopher et al., 2004). Έτσι, η υπερπαραγωγή δεν προκύπτει μόνο από αστοχίες πρόβλεψης, αλλά και ως δομική συνέπεια του χρονικού κενού και του τρόπου κάλυψης του μέσω αποθέματος που βασίζεται σε πρόβλεψη. Σε αυτό το πλαίσιο, η υπεραποθεματοποίηση μπορεί να λειτουργεί και ως στρατηγική ασφάλειας απέναντι στον κίνδυνο ελλείψεων, με το κόστος να μεταφέρεται τελικά στην απαξίωση αποθέματος μέσω εκκαθαρίσεων και μειώσεων τιμών (Christopher et al., 2004; Cachon & Swinney, 2011).

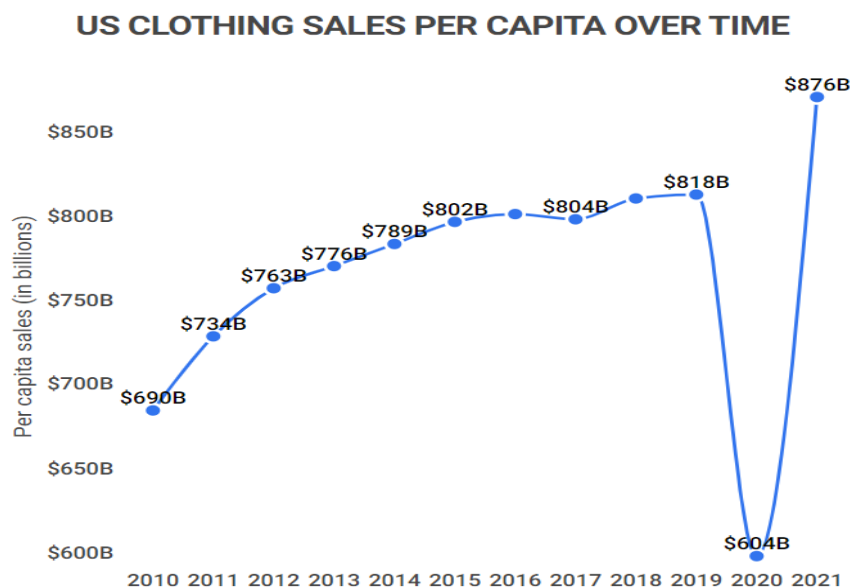
1.1.3 Επιχειρηματική λογική όγκου και οικονομίες κλίμακας

Η επιχειρηματική λογική όγκου στη μόδα βασίζεται στη συστηματική επιδίωξη μεγάλων ποσοτήτων και υψηλής συχνότητας κυκλοφοριών, ώστε να επιτυγχάνονται πλεονεκτήματα κόστους και να διατηρούνται ανταγωνιστικές τιμές. Οι οικονομίες κλίμακας σημαίνουν ότι το μέσο κόστος ανά μονάδα μειώνεται όσο αυξάνεται ο όγκος παραγωγής/προμήθειας. Στη γρήγορη μόδα (fast fashion), ο ανταγωνισμός μετατοπίζεται προς στρατηγικές χαμηλού κόστους και ταχύτητας οι οποίες ευνοούν τη συνεχή ροή προϊόντος και την αύξηση του συνολικού όγκου (Bhardwaj & Fairhurst, 2010). Η μεταφορά της παραγωγής σε χώρες χαμηλού

κόστους αποτελεί βασικό εργαλείο αυτής της στρατηγικής. Η Arrigo (2020) δείχνει ότι οι επιχειρήσεις αξιοποίησαν επί δεκαετίες υπεράκτια παραγωγή, ενώ οι αποφάσεις επιλογής προμηθευτών και τοποθεσίας καθοδηγούνται πρωτίστως από κόστος και χρόνο.

Από την πλευρά της αγοράς, οι χαμηλές τιμές διευκολύνουν συχνότερες αγορές και συντομότερη διάρκεια χρήσης ενδυμάτων. Οι Magwegwe και Shaik (2024) τεκμηριώνουν ότι η γρήγορη μόδα χαρακτηρίζεται από γρήγορους κύκλους κατανάλωσης και σύντομο χρονικό διάστημα ζωής των ενδυμάτων, ενώ τα προσιτά επίπεδα τιμών συνδέονται με αυξημένη ποσότητα και συχνότητα αγορών. Σε συμπληρωματική κατεύθυνση, οι Mathew και Spinelli (2025) συνοψίζουν ότι το επιχειρηματικό μοντέλο ενθαρρύνει υπερκατανάλωση και βιαστική απόρριψη. Έτσι, η συχνότητα ανανέωσης δεν είναι απλώς εμπορική επιλογή, αλλά συνδέεται με μια δομική εντατικοποίηση των υλικών ροών. Με αυτόν τον τρόπο, η υπερπαραγωγή τεκμηριώνεται όχι μόνο ως αποτέλεσμα αβεβαιότητας, αλλά και ως συστημική έκβαση ενός μοντέλου κλίμακας, κόστους και υψηλής συχνότητας.

Η δυναμική αυτή αποτυπώνεται και σε δείκτες κατανάλωσης ένδυσης σε μεγάλες αγορές, όπως οι Ηνωμένες Πολιτείες, όπου οι πωλήσεις ρούχων παρουσιάζουν σταθερή ανοδική πορεία την τελευταία δεκαετία, με προσωρινή μόνο κάμψη την περίοδο της πανδημίας.



Σχήμα 1.1: Πωλήσεις ένδυσης στις ΗΠΑ ανά έτος, 2010–2021 (σε δισ. δολάρια). Η σταθερή αύξηση πριν την πανδημία και η έντονη ανάκαμψη μετά το 2020 υποδηλώνουν ότι η συνολική κατανάλωση

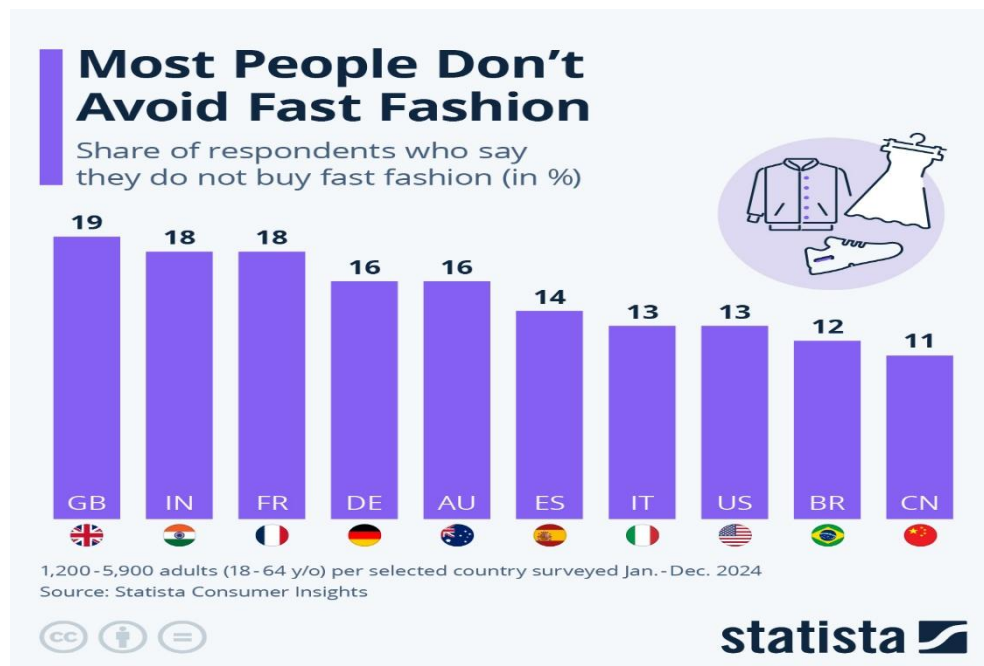
ενδυμάτων παραμένει σε υψηλά επίπεδα, ενισχύοντας τις πιέσεις για αυξημένο όγκο παραγωγής (Statista, 2025).

Η ποσοτική διάσταση του φαινομένου αποτυπώνει ακόμη πιο έντονα τον συστημικό του χαρακτήρα. Εκτιμάται ότι η παγκόσμια αγορά fast fashion, η οποία το 2025 αποτιμήθηκε σε περίπου 160 δισ. δολάρια, αναμένεται να αυξηθεί σημαντικά τα επόμενα χρόνια, φτάνοντας σχεδόν τα 390 δισ. δολάρια έως το 2034, με ετήσιους ρυθμούς ανάπτυξης (CAGR) κοντά στο 10% (Fortune Business Insights, 2026).

Η αναμενόμενη αυτή διεύρυνση της αγοράς αποτυπώνεται και σε προβλέψεις για τον φυσικό όγκο της κατανάλωσης. Εκτιμάται ότι μέχρι το 2030 η παγκόσμια κατανάλωση ενδυμάτων θα αυξηθεί περίπου κατά 60–65%, φθάνοντας σε τάξη μεγέθους άνω των 100 εκατομμυρίων τόνων ετησίως. Η αύξηση αυτή δεν αφορά μόνο περισσότερες μονάδες προϊόντων, αλλά και μεγαλύτερες ροές υλικών που πρέπει να παραχθούν, να διακινηθούν και, τελικά, να διατεθούν (McKinsey & Company, 2025).

Παράλληλα, πρόσφατες αναλύσεις για την περιβαλλοντική επίπτωση της μόδας επισημαίνουν ότι ο κλάδος ευθύνεται για ένα αξιοσημείωτο ποσοστό των παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και της κατανάλωσης νερού, με τη fast fashion να συμβάλλει δυσανάλογα μέσω της σύντομης διάρκειας ζωής των προϊόντων, της υπερπαραγωγής και των αυξημένων ροών αποβλήτων (McKinsey & Company, 2025). Σε αυτό το πλαίσιο, η επιχειρηματική λογική όγκου και ταχύτητας καθιστά ακόμη πιο επιτακτική την αναζήτηση προσεγγίσεων που μειώνουν την παραγωγή και τη σπατάλη στη ρίζα της, πέρα από τις κλασικές λύσεις διαχείρισης αποβλήτων.

Τα στοιχεία αυτά συμπληρώνονται από δεδομένα καταναλωτικής συμπεριφοράς, τα οποία δείχνουν ότι, παρά τη δημόσια συζήτηση για τη βιωσιμότητα, σημαντικό μέρος των καταναλωτών εξακολουθεί να αγοράζει fast fashion. Έρευνα της Statista σε εννέα χώρες καταγράφει ότι μόνο ένα σχετικά μικρό ποσοστό ερωτηθέντων δηλώνει πως αποφεύγει συνειδητά το fast fashion, με τα ποσοστά όσων δεν το αποφεύγουν να παραμένουν διψήφια σε όλες τις αγορές (McKinsey & Company, 2025).



Σχήμα 1.2: Ποσοστό καταναλωτών που δηλώνουν ότι αποφεύγουν το fast fashion σε επιλεγμένες χώρες (2024). Τα δεδομένα υποδηλώνουν ότι, παρότι η ευαισθητοποίηση για τη βιωσιμότητα αυξάνεται, η καθημερινή πρακτική πολλών καταναλωτών παραμένει προσανατολισμένη σε αγορές fast fashion (Statista, 2025).

Συνεπώς, η πίεση προς αύξηση του όγκου παραγωγής δεν προκύπτει μόνο από το επιχειρηματικό μοντέλο, αλλά και από σχετικά σταθερές καταναλωτικές συνήθειες, γεγονός που ενισχύει την ανάγκη για παρεμβάσεις που μετασχηματίζουν τον ίδιο τον κύκλο παραγωγής και όχι μόνο τη διαχείριση των αποβλήτων.

1.2 Σπατάλη υλικών στα πρώιμα στάδια παραγωγής

1.2.1 Προ-καταναλωτική σπατάλη υφασμάτων (pre-consumer textile waste)

Η προ-καταναλωτική σπατάλη υφασμάτων (pre-consumer textile waste) αφορά τις απώλειες υλικών που παράγονται πριν το τελικό προϊόν φτάσει στον καταναλωτή, δηλαδή κατά τη φάση ανάπτυξης προϊόντος και παραγωγής. Σε αυτήν τη φάση εντάσσονται δραστηριότητες όπως η ανάπτυξη πατρόν, η κοπή, η ραφή, ο ποιοτικός έλεγχος και οι προ-παραγωγικές δοκιμές. Παρότι η δημόσια συζήτηση για τη βιωσιμότητα στη μόδα συχνά εστιάζει στα μετα-καταναλωτικά απόβλητα (post-consumer), η βιβλιογραφία επισημαίνει ότι οι προ-καταναλωτικές ροές αποβλήτων είναι λιγότερο ορατές και συχνά όχι απόλυτα τεκμηριωμένες, ιδιαίτερα όταν η παραγωγή είναι γεωγραφικά απομακρυσμένη και κατανεμημένη σε

παγκόσμιες αλυσίδες αξίας (Aus et al., 2021). Παράλληλα, ανασκοπήσεις υψηλής εμβέλειας τονίζουν ότι η αύξηση παραγωγής και κατανάλωσης – ιδίως στο πλαίσιο της fast fashion – συνοδεύεται από αύξηση των ροών αποβλήτων, με προ-καταναλωτικά απόβλητα να παράγονται ήδη μέσα στη διαδικασία ανάπτυξης ενδυμάτων (Niinimäki et al., 2020).

Στην πράξη, μεγάλο μέρος της σπατάλης πριν την διάθεση στον καταναλωτή δημιουργείται στο στάδιο της κοπής. Κατά την κοπή προκύπτουν συστηματικά υφασμάτινα υπολείμματα που δεν μπορούν να ενσωματωθούν στο τελικό προϊόν. Οι Aus et al. (2021) εξηγούν ότι οι απώλειες στην κοπή σχετίζονται αφενός με τη διάταξη των πατρών και τα κενά μεταξύ των κομματιών (απώλειες διάταξης) και αφετέρου με τη διαδικασία στρώσης και κοπής, όπως τα άκρα και τα τελειώματα των στρώσεων. Επιπλέον, περιγράφονται πιο εξειδικευμένες μορφές απωλειών που συνδέονται με τα άκρα των στρώσεων και τα τελειώματα ρολών, οι οποίες, αθροιστικά, δημιουργούν σημαντικό όγκο υπολειμμάτων ακόμη κι όταν η παραγωγή εκτελείται χωρίς εμφανή εμπορικά λάθη. Στην ίδια κατεύθυνση, η ανασκόπηση των Niinimäki et al., (2020) συνοψίζει ευρήματα της βιβλιογραφίας σύμφωνα με τα οποία ένα αξιοσημείωτο ποσοστό υφάσματος χάνεται κατά την δημιουργία ενδυμάτων, με τη σπατάλη να σχετίζεται, μεταξύ άλλων, με τον τύπο ενδύματος, το σχεδιασμό και τη διάσταση/πλάτος του υφάσματος, καθώς και με περιορισμούς στην αποδοτική τοποθέτηση πατρών. Συνεπώς, η σπατάλη στο στάδιο της κοπής δεν αποτελεί τυχαίο συμβάν, αλλά προκύπτει ως αποτέλεσμα γεωμετρικών/τεχνικών περιορισμών και χαρακτηριστικών του υλικού.

Πέρα από τα υπολείμματα κοπής, προ-καταναλωτική σπατάλη παράγεται και από απορρίψεις λόγω ποιότητας ή τεχνικών αστοχιών. Οι Aus et al. (2021) αναφέρουν ότι απόβλητα και υπολείμματα μπορεί να προκύψουν από προβλήματα ποιότητας υφάσματος ή από λάθη στη διαδικασία παραγωγής, τα οποία οδηγούν σε απόρριψη τμημάτων ή κομματιών που δεν πληρούν τις προδιαγραφές. Έτσι, ένα μέρος της απώλειας δεν οφείλεται στη γεωμετρία των πατρών, αλλά στο ότι υλικό που θα μπορούσε θεωρητικά να χρησιμοποιηθεί, τελικά δεν ενσωματώνεται λόγω ελαττωμάτων ή σφαλμάτων παραγωγής (Aus et al., 2021). Συμπερασματικά, η σπατάλη στα στάδια ανάπτυξης του προϊόντος περιλαμβάνει τόσο υπολείμματα διαδικασίας όσο και απώλειες που συνδέονται με ποιοτικούς ή τεχνικούς παράγοντες.

Τέλος, προ-καταναλωτική σπατάλη εμφανίζεται ήδη στη φάση ανάπτυξης προϊόντος, μέσω προ-παραγωγικών δοκιμών και υλικών που χρησιμοποιούνται για αξιολόγηση και έγκριση (π.χ.

δοκιμαστικά πατρόν, δείγματα υφασμάτων). Οι Aus et al. (2021) εντάσσουν ρητά τη δημιουργία δειγμάτων και μικρών δειγμάτων υφάσματος (swatches) στη ροή υπολειμμάτων της ανάπτυξης προϊόντος, υπογραμμίζοντας ότι η σπατάλη δεν ξεκινά στη μαζική παραγωγή αλλά «κτίζεται» ήδη στη διαδικασία σχεδιασμού–δοκιμής–έγκρισης (Aus et al., 2021). Για να αποτυπωθεί και η ποσοτική διάσταση του ζητήματος, οι Islam et al. (2025) συνοψίζουν ότι το 25–40% των υφασμάτων που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή ενδυμάτων καταλήγει ως προ-καταναλωτικό απόβλητο και προτείνουν μια ψηφιακή προσέγγιση ταξινόμησης στο στάδιο κοπής (π.χ. μέσω QR-based καταγραφής), με στόχο ακριβέστερη κατηγοριοποίηση και μείωση επιμόλυνσης των ροών αποβλήτων. Συνολικά, αποδεικνύεται ότι η σπατάλη υλικών θεμελιώνεται από τα πρώτα τεχνικά και οργανωτικά στάδια παραγωγής.

1.2.2 Η δημιουργία φυσικών δειγμάτων και πρωτοτύπων ως πηγή προ-παραγωγικής σπατάλης

Η δημιουργία φυσικών δειγμάτων και πρωτοτύπων αποτελεί κρίσιμο προ-παραγωγικό στάδιο στη βιομηχανία της μόδας, καθώς μέσα από δοκιμαστικές φυσικές εκδοχές του ενδύματος ελέγχονται και εγκρίνονται παράμετροι όπως η εφαρμογή, η κατασκευή, η συμπεριφορά των υλικών και η συνολική «ωριμότητα» του σχεδίου για παραγωγή. Στην παραδοσιακή πρακτική, η έγκριση ενός σχεδίου σπάνια ολοκληρώνεται με ένα μόνο φυσικό πρωτότυπο. Συνήθως παράγονται πολλαπλές εκδοχές, ενώ κάθε αλλαγή σε πατρόν, ύφασμα ή τεχνική λεπτομέρεια μπορεί να ενεργοποιήσει έναν νέο κύκλο δημιουργίας και αξιολόγησης φυσικών δειγμάτων. Αυτός ο επαναληπτικός χαρακτήρας καθιστά το συγκεκριμένο στάδιο καίριο «σημείο έντασης» πριν από τη μαζική παραγωγή, επειδή παράγει ενδιάμεσο υλικό και καταναλώνει πόρους για σκοπούς αξιολόγησης και λήψης αποφάσεων (Erdem et al., 2026). Παράλληλα, όπως ήδη τεκμηριώθηκε, η ύπαρξη δειγμάτων ως μέρος των προ-καταναλωτικών υπολειμμάτων στη φάση ανάπτυξης προϊόντος επιβεβαιώνει ότι η υλική επιβάρυνση ξεκινά πριν από την παραγωγή (Aus et al., 2021).

Ο βασικός μηχανισμός παραγωγής σπατάλης στο στάδιο αυτό είναι ο κύκλος ανατροφοδότησης–διόρθωσης–επανάληψης. Κάθε γύρος αξιολόγησης μπορεί να οδηγήσει σε τροποποιήσεις, οι οποίες συνεπάγονται την κατασκευή νέων φυσικών δειγμάτων ή πρωτοτύπων. Οι Erdem et al. (2026) επισημαίνουν ότι η επαναληπτική παραγωγή πρωτοτύπων και οι συνεχείς αλλαγές αυξάνουν άμεσα το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της προ-παραγωγικής φάσης. Το ίδιο άρθρο δείχνει ότι η αντικατάσταση μέρους αυτής της φυσικής διαδικασίας από

ψηφιακά δείγματα και εικονικά πρωτότυπα μπορεί να μειώσει σημαντικά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, σε δείκτες όπως το δυναμικό υπερθέρμανσης, η τοξικότητα και η ενεργειακή ζήτηση, ακριβώς επειδή περιορίζει την ανάγκη για επαναλαμβανόμενη παραγωγή και μεταφορά φυσικών πρωτοτύπων και επιταχύνει τον κύκλο αξιολόγησης.

Συνεπώς, η σπατάλη στο στάδιο δημιουργίας φυσικών δειγμάτων και πρωτοτύπων δεν είναι παράπλευρη, αλλά λειτουργικά συνδεδεμένη με τον τρόπο με τον οποίο η βιομηχανία της μόδας μειώνει τον τεχνικό και εμπορικό κίνδυνο πριν δεσμευτεί στη μαζική παραγωγή.

1.2.3 Σπατάλη λόγω αβεβαιότητας ζήτησης και πλεονάζοντος αποθέματος

Παρότι οι εκβάσεις των λανθασμένων προβλέψεων εμφανίζονται κυρίως στο στάδιο της λιανικής (απούλητο απόθεμα, εκπτώσεις, πρακτικές διάθεσης), αποτελούν συνέπεια αποφάσεων ποσότητας και προμήθειας που έχουν ληφθεί νωρίτερα, πριν αποκαλυφθεί πλήρως η πραγματική ζήτηση. Όταν οι ποσότητες “κλειδώνονται” εκ των προτέρων υπό αβεβαιότητα, είναι πιθανό η ζήτηση να αποδειχθεί χαμηλότερη και να παραμείνει απόθεμα στο τέλος της περιόδου (Cachon & Swinney, 2011).

Η εμπειρική βιβλιογραφία για τη fast fashion επιβεβαιώνει ότι το πρόβλημα είναι συχνό: οι Zhang et al. (2025) δείχνουν ότι το υπεραπόθεμα συνδέεται με υπερπαραγωγή και αβεβαιότητα ζήτησης και οδηγεί συστηματικά σε απούλητο απόθεμα στο τέλος της πωλησιακής περιόδου. Όταν συσσωρεύεται απόθεμα, ο κυρίαρχος μηχανισμός απορρόφησης είναι οι εκπτώσεις και ιδίως οι εκκαθαρίσεις τέλους περιόδου.

Σε ορισμένες περιπτώσεις, όταν οι εκπτώσεις/εκκαθαρίσεις δεν απορροφούν επαρκώς το πλεόνασμα ή όταν υπάρχουν στρατηγικοί περιορισμοί, ενεργοποιούνται πρακτικές διάθεσης/απομάκρυνσης αποθέματος (εκπτωτικά καταστήματα, δωρεές, ανακύκλωση ή ακόμη και καταστροφή). Οι διαφορετικές μέθοδοι μείωσης υπεραποθέματος δείχνουν ότι οι καταστροφικές πρακτικές (π.χ. καύση) ενισχύουν την αντίληψη σπατάλης και επιβαρύνουν την αξιολόγηση της μάρκας σε σχέση με λιγότερο καταστροφικές επιλογές (Nguyen et al., 2023). Έτσι, όταν το σύστημα αδυνατεί να απορροφήσει το πλεόνασμα μέσω της αγοράς (σε σωστό χρόνο και τιμή), το αποτέλεσμα μεταφέρεται στη σφαίρα των αποβλήτων. Συνολικά, η δυναμική αυτή μπορεί να ιδωθεί και ως υπερπροσφορά: η παραγωγή προηγείται της πραγματικής ζήτησης και η αγορά λαμβάνει περισσότερα προϊόντα από όσα μπορεί να απορροφήσει εντός της περιόδου.

1.3 Κρίσιμα σημεία αβεβαιότητας πριν τη μαζική παραγωγή

1.3.1 Αβεβαιότητα αποδοχής προϊόντος

Η αβεβαιότητα αποδοχής προϊόντος αφορά το ότι, πριν ξεκινήσει η πωλησιακή περίοδος, η επιχείρηση δεν μπορεί να γνωρίζει με ακρίβεια ποια σχέδια θα γίνουν εμπορικά αποδεκτά, ούτε σε ποια ένταση. Στη μόδα το φαινόμενο ενισχύεται επειδή η ζήτηση είναι ασταθής και μεγάλο μέρος των αγορών γίνεται στο σημείο πώλησης, άρα η διαθεσιμότητα και ο σωστός χρόνος διάθεσης καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την απόδοση. Αυτό σημαίνει ότι η επιχείρηση εκτίθεται σε δύο αντίρροπους κινδύνους: ελλείψεις όταν η ζήτηση αποδειχθεί υψηλή ή περίσσεια όταν η ζήτηση υστερήσει.

Η αβεβαιότητα εντείνεται επειδή οι τάσεις αλλάζουν γρήγορα και το αξιόπιστο σήμα ζήτησης εμφανίζεται ουσιαστικά μετέπειτα, όταν το προϊόν βγει στην αγορά. Σε περιβάλλον σύντομου κύκλου ζωής, έστω και μικρές καθυστερήσεις αυξάνουν την πιθανότητα το προϊόν να φτάσει μετά το σημείο μέγιστης εμπορικής αξίας του, οδηγώντας σε απαξίωση και ανάγκη μειώσεων τιμών. Συνεπώς, η αβεβαιότητα αποδοχής δεν είναι απλώς αβεβαιότητα προτιμήσεων αλλά επιχειρησιακό ρίσκο ποσοτήτων και, τελικά, πιθανό υπεραπόθεμα (Christopher et al., 2004).

1.3.2 Πληροφοριακή ασυμμετρία στην εφοδιαστική αλυσίδα

Η πληροφοριακή ασυμμετρία περιγράφει ότι τα πιο αξιόπιστα σήματα ζήτησης προκύπτουν κοντά στον τελικό καταναλωτή, ενώ οι αποφάσεις παραγωγής/προμήθειας λαμβάνονται στα αρχικά στάδια ανάπτυξης ενός προϊόντος. Το βασικό δομικό πρόβλημα είναι το κενό χρόνου: ο χρόνος που απαιτείται για προμήθεια–παραγωγή–μεταφορά συχνά υπερβαίνει τον χρόνο που η αγορά μπορεί να αντιδράσει, άρα οι επιχειρήσεις αναγκάζονται να κλειδώνουν ποσότητες νωρίς. Όταν η ζήτηση αλλάξει, η προσαρμογή είναι περιορισμένη επειδή μέρος του προϊόντος βρίσκεται ήδη στον αγωγό εφοδιαστικής (Christopher et al., 2004).

Επιπλέον, το απόθεμα μπορεί να θολώνει το πραγματικό σήμα της ζήτησης, καθυστερώντας την έγκαιρη διόρθωση των αποφάσεων. Όταν οι ποσότητες προϊόντων που έχουν παραχθεί δεν αντιστοιχούν στη ζήτηση της αγοράς, η διόρθωση πραγματοποιείται αργότερα. Αντί να αλλάζουν έγκαιρα οι παραγόμενες ποσότητες, οι επιχειρήσεις συχνά διαχειρίζονται το πλεονάζον απόθεμα μειώνοντας τις τιμές των προϊόντων (Christopher et al., 2004). Άρα, η πληροφοριακή ασυμμετρία εξηγεί γιατί η χρονική ασυμφωνία παραγωγής–ζήτησης καταλήγει συστηματικά σε υπεραπόθεμα.

1.3.3 Διαχείριση ρίσκου μέσω υπερπαραγωγής

Σε περιβάλλον υψηλής αβεβαιότητας και καθυστερημένης πληροφόρησης, οι επιχειρήσεις τείνουν να διαχειρίζονται το ρίσκο επιδιώκοντας υψηλή πιθανότητα διαθεσιμότητας, ακόμη κι αν αυτό συνεπάγεται μεγαλύτερες αρχικές ποσότητες. Οι Christopher et al. (2004) τονίζουν ότι στη μόδα η διαθεσιμότητα είναι κρίσιμη λόγω παρορμητικής αγοράς και μικρού παραθύρου εμπορικής αξίας· όταν οι χρόνοι είναι μεγάλοι και η ζήτηση ασταθής, η ασφάλεια συχνά παίρνει τη μορφή αποθεματοποίησης.

Όταν όμως η ζήτηση δεν επιβεβαιώσει τις αρχικές ποσότητες, η διόρθωση γίνεται εκ των υστέρων μέσω απαξίωσης. Στη βιβλιογραφία αναφέρονται στις αναγκαστικές μειώσεις τιμών ως μηχανισμό απομάκρυνσης ανεπιθύμητου αποθέματος στη λιανική (Christopher et al., 2004). Συνεπώς, η υπερπαραγωγή/υπερ-αποθεματοποίηση μπορεί να ιδωθεί όχι μόνο ως αποτέλεσμα λανθασμένης πρόβλεψης, αλλά ως συστημική έκβαση διαχείρισης ρίσκου σε ένα σύστημα όπου η έγκαιρη προσαρμογή περιορίζεται από χρόνο και πληροφορία.

Η ανάγκη περιορισμού της αβεβαιότητας στα πρώιμα στάδια σχεδιασμού και αξιολόγησης αναδεικνύει τη σημασία τεχνολογιών που επιτρέπουν δοκιμή και προσομοίωση πριν από τη φυσική παραγωγή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΨΗΦΙΑΚΗ ΜΟΔΑ ΚΑΙ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΚΥΚΛΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

2.1 Ορισμός και Βασικές Έννοιες

2.1.1 Τι είναι η ψηφιακή μόδα

Η ψηφιακή μόδα αποτελεί ένα αναδυόμενο και πολυδιάστατο πεδίο που βρίσκεται στην τομή της παραδοσιακής βιομηχανίας μόδας με τις σύγχρονες ψηφιακές τεχνολογίες. Η σύγκλιση αυτή έχει δημιουργήσει ένα νέο οικοσύστημα πρακτικών και εμπειριών που επαναπροσδιορίζουν τόσο τον τρόπο παραγωγής όσο και τον τρόπο κατανάλωσης της μόδας. Ο όρος εμφανίστηκε για πρώτη φορά στις αρχές του 21ου αιώνα σε σχέση με τις πλατφόρμες ηλεκτρονικού εμπορίου — δηλαδή τις ψηφιακές αγορές όπου τα ενδύματα πωλούνται διαδικτυακά — και στη συνέχεια επεκτάθηκε για να συμπεριλάβει τεχνολογίες όπως τα wearable technologies (έξυπνα ενδύματα με ενσωματωμένους αισθητήρες ή ηλεκτρονικά στοιχεία), τον τρισδιάστατο ψηφιακό σχεδιασμό, τα NFTs (μη αντικαταστάσιμα ψηφιακά τεκμήρια ιδιοκτησίας) και τις εφαρμογές του metaverse (εκτεταμένα εικονικά περιβάλλοντα στα οποία οι χρήστες αλληλεπιδρούν μέσω ψηφιακών αναπαραστάσεων). Παρά τη ραγδαία ανάπτυξη του πεδίου, η εννοιολογική οριοθέτησή του παρέμεινε για μεγάλο διάστημα ασαφής, καθώς η ταχεία τεχνολογική εξέλιξη καθιστούσε δύσκολη τη διατύπωση ενός σταθερού και καθολικά αποδεκτού ορισμού (Baek et al., 2022).

Μια από τις πιο ολοκληρωμένες προσπάθειες εννοιολογικής αποσαφήνισης προέρχεται από τους Baek et al. (2022), οι οποίοι πραγματοποίησαν συστηματική ανασκόπηση 116 επιστημονικών άρθρων αξιοποιώντας τεχνικές machine learning — δηλαδή αυτοματοποιημένης ανάλυσης δεδομένων μέσω αλγορίθμων — και κατέληξαν στον ακόλουθο ορισμό: η ψηφιακή μόδα είναι «η ψηφιακή δημιουργία, παραγωγή και αναπαραστάση της ταυτότητας ενός ατόμου μέσω σχεδιασμού που παράγεται από υπολογιστή». Ο ορισμός αυτός δεν περιορίζει την ψηφιακή μόδα αποκλειστικά στο ψηφιακό ένδυμα ως αυτόνομο προϊόν, αλλά την εντάσσει σε ένα ευρύτερο σύστημα διαδικασιών και εμπειριών που αγγίζουν ολόκληρη την αλυσίδα αξίας — δηλαδή το σύνολο των σταδίων από τον σχεδιασμό και την παραγωγή μέχρι τη διανομή, την κατανάλωση και την έκφραση ταυτότητας σε ψηφιακά περιβάλλοντα (Baek et al., 2022).

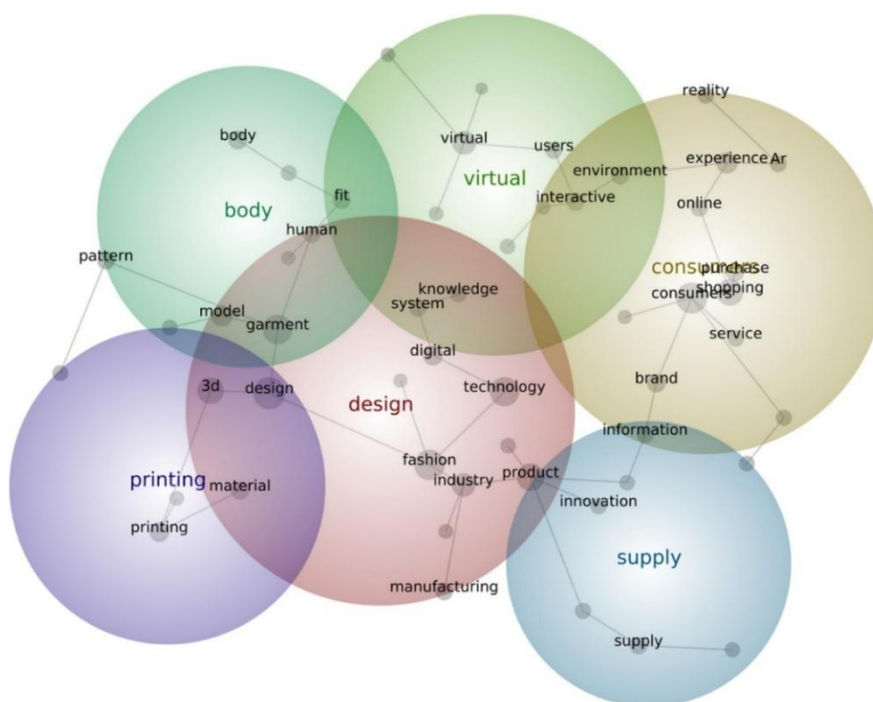
Οι Baek et al. (2022) εντόπισαν έξι βασικές θεματικές που συγκροτούν το πεδίο της ψηφιακής μόδας: design, consumer, virtual, body, printing και supply. Ο άξονας design αφορά τη χρήση ψηφιακών εργαλείων στον σχεδιασμό ενδυμάτων, όπως ο τρισδιάστατος σχεδιασμός και τα λογισμικά προσομοίωσης υφάσματος, τα οποία επιτρέπουν στον σχεδιαστή να «δει» πώς θα κινείται και θα εφαρμόζει ένα ένδυμα πριν κατασκευαστεί φυσικά. Ο άξονας consumer επικεντρώνεται στον μετασχηματισμό της εμπειρίας αγοράς μέσω εργαλείων όπως τα virtual try-ons — εφαρμογές που επιτρέπουν στον καταναλωτή να δοκιμάσει ψηφιακά ένα ένδυμα χωρίς να το φορέσει φυσικά — και τα smart mirrors, δηλαδή έξυπνοι καθρέφτες σε καταστήματα που εμφανίζουν πώς θα φαίνεται ένα ένδυμα στον χρήστη μέσω επαυξημένης πραγματικότητας (Baek et al., 2022).

Ο άξονας virtual αναφέρεται στη δημιουργία και χρήση ψηφιακών ενδυμάτων που δεν έχουν φυσική υπόσταση, αλλά υπάρχουν αποκλειστικά σε εικονικά περιβάλλοντα. Ο άξονας body αφορά τεχνολογίες τρισδιάστατης σάρωσης σώματος, οι οποίες δημιουργούν ακριβείς ψηφιακές αναπαραστάσεις (avatars) με βάση τα πραγματικά σωματικά χαρακτηριστικά του χρήστη, επιτρέποντας πιο ακριβή πρόβλεψη της εφαρμογής του ενδύματος. Τέλος, οι άξονες printing και supply αναδεικνύουν αντίστοιχα τη σχέση της ψηφιακής μόδας με την τρισδιάστατη εκτύπωση ενδυμάτων και με την ψηφιοποίηση της εφοδιαστικής αλυσίδας — δηλαδή του συνόλου των διαδικασιών από την προμήθεια πρώτων υλών μέχρι την παράδοση του τελικού προϊόντος στον καταναλωτή (Baek et al., 2022).

Για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας, η ψηφιακή μόδα ορίζεται ως το σύνολο των ψηφιακών τεχνολογιών, διαδικασιών και εφαρμογών που μετασχηματίζουν τον κύκλο παραγωγής, εμπορίας και κατανάλωσης ενδυμάτων. Έμφαση δίνεται ιδιαίτερα στις εφαρμογές που συμβάλλουν στη μείωση της υλικής κατανάλωσης και της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης, σε συνδυασμό με τις δυνατότητες της εικονικής πραγματικότητας (VR).

Η εσωτερική δομή του πεδίου αποτυπώνεται και οπτικά μέσω της ανάλυσης Leximancer που πραγματοποίησαν οι Baek et al. (2022). Το Σχήμα 2.1 παρουσιάζει τον εννοιολογικό χάρτη που προέκυψε από αυτή την ανάλυση: οι έξι θεματικές ενότητες — design, consumer, virtual, body, printing και supply. Ο άξονας design καταλαμβάνει κεντρική θέση, καθώς συνδέεται με όρους όπως digital, technology, product, industry και manufacturing, γεγονός που υποδεικνύει ότι η ψηφιακή μόδα προσεγγίζεται πρωτίστως ως ζήτημα μετασχηματισμού των διαδικασιών σχεδιασμού και παραγωγής. Αντίστοιχα, η θεματική consumer ομαδοποιεί έννοιες όπως

experience, online, shopping, brand και service, αποτυπώνοντας τον μετασχηματισμό της εμπειρίας αγοράς, ενώ οι θεματικές virtual και body συνδέονται με την ύπαρξη εικονικών περιβαλλόντων και ψηφιακών σωμάτων/avatars αντίστοιχα. Τέλος, οι θεματικές printing και supply αναδεικνύουν τη σημασία της τρισδιάστατης εκτύπωσης υλικών και της ψηφιοποίησης της εφοδιαστικής αλυσίδας στην εξέλιξη της ψηφιακής μόδας.



Σχήμα 2.1: Εννοιολογικός χάρτης (conceptual map) της ψηφιακής μόδας όπως προέκυψε από την ανάλυση Leximancer των Baek et al. (2022). Οι έξι θεματικές ενότητες — design, consumer, virtual, body, printing και supply — εμφανίζονται ως συμπλέγματα εννοιών (clusters) που συγκροτούν το πεδίο.

Στις επόμενες ενότητες, οι έξι αυτές θεματικές χρησιμοποιούνται ως εννοιολογικός «χάρτης» για την ανάλυση των βασικών τεχνολογιών και πρακτικών της ψηφιακής μόδας, με έμφαση στις διαστάσεις design, virtual, body και supply που σχετίζονται άμεσα με τον κύκλο παραγωγής ενδυμάτων.

2.1.2 Βασικές τεχνολογίες ψηφιακής μόδας

Η ψηφιακή μόδα δεν στηρίζεται σε μία και μόνο τεχνολογία, αλλά σε ένα σύνολο συμπληρωματικών εργαλείων και συστημάτων που διαπερνά κάθε στάδιο της αλυσίδας αξίας.

Η κατανόηση αυτών των τεχνολογιών είναι απαραίτητη για να αξιολογηθούν οι δυνατότητες και οι περιορισμοί της ψηφιακής μόδας ως εργαλείου βιωσιμότητας.

Η πρώτη και ιστορικά παλαιότερη κατηγορία είναι τα συστήματα Computer-Aided Design και Computer-Aided Manufacturing (CAD/CAM) — λογισμικά ψηφιακού σχεδιασμού και ψηφιακής κατασκευής αντίστοιχα. Τα συστήματα CAD επέτρεψαν τη δημιουργία, τροποποίηση και ανάλυση πατρών σε ψηφιακό επίπεδο, ενώ τα CAM μετέτρεψαν αυτά τα ψηφιακά δεδομένα σε εντολές για αυτοματοποιημένο εξοπλισμό — όπως μηχανές αυτόματης κοπής υφασμάτων. Παρά τη σημαντική βελτίωση που εισήγαγαν, τα συστήματα CAD/CAM διατηρούσαν τη λογική του δισδιάστατου (2D) σχεδιασμού: η αξιολόγηση εφαρμογής και συμπεριφοράς ενδύματος εξακολουθούσε να βασίζεται σε φυσικά δείγματα (Irovan et al., 2025).

Η επόμενη εξελικτική βαθμίδα είναι ο τρισδιάστατος (3D) ψηφιακός σχεδιασμός, ο οποίος ενσωματώνει μηχανισμούς φυσικής προσομοίωσης για να αναπαραστήσει ρεαλιστικά τη συμπεριφορά των υφασμάτων — τη ροή (πτώση), την ελαστικότητα, το βάρος — πάνω σε εικονικά σώματα (avatars). Λογισμικά όπως το CLO 3D και το Browzwear VStitcher αποτελούν τα πιο διαδεδομένα εργαλεία αυτής της κατηγορίας, επιτρέποντας στον σχεδιαστή να αξιολογεί ταυτόχρονα το 2D πατράν και την αντίστοιχη 3D αναπαράσταση (McQuillan, 2020; Erdem et al., 2026). Η McQuillan (2020) επισημαίνει ότι αυτή η υβριδική 2D/3D διαδικασία μετασχηματίζει τον ίδιο τον τρόπο σκέψης του σχεδιαστή, καθώς αποφάσεις που στο παρελθόν λαμβάνονταν μετά από πολλαπλά φυσικά δείγματα λαμβάνονται πλέον σε ψηφιακό περιβάλλον με άμεση οπτική ανατροφοδότηση.

Στο πλαίσιο αυτής της εξέλιξης αναδύεται μια ολοκληρωμένη ψηφιακή ανάπτυξη προϊόντος (Digital Product Creation - DPC), όπου η διαδικασία από τον σχεδιασμό έως την έγκριση πραγματοποιείται με τρισδιάστατο (3D) σχεδιασμό και ψηφιακά πρωτότυπα (virtual prototypes), μειώνοντας δραστικά την ανάγκη για φυσικά δείγματα (Erdem, 2026; Browzwear, 2024). Το DPC περιλαμβάνει τη δημιουργία τρισδιάστατων πατρών, την ψηφιακή προσομοίωση ενδυμάτων με ρεαλιστικές φυσικές ιδιότητες υλικών και την εφαρμογή τους σε ψηφιακά σώματα (avatars) βασισμένα σε δεδομένα τρισδιάστατης σάρωσης σώματος (Casciani et al., 2022). Η ποσοτική αξιολόγηση της μετάβασης από φυσικά σε ψηφιακά δείγματα από τους Erdem et al. (2026) δείχνει ότι η χρήση τρισδιάστατων ψηφιακών δειγμάτων (3D virtual samples) μπορεί να μειώσει τον χρόνο προετοιμασίας δειγμάτων κατά έως και 73% και τις

εκπομπές CO₂ κατά περίπου 85–92%, φτάνοντας σε ορισμένα σενάρια το 87%. Τα ευρήματα αυτά προσφέρουν ισχυρή ένδειξη ότι η ψηφιακή ανάπτυξη προϊόντος μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της προ-παραγωγικής φάσης.

Εξίσου κρίσιμη τεχνολογία στο πεδίο της ψηφιακής μόδας είναι το blockchain — ένα αποκεντρωμένο ψηφιακό μητρώο που καταγράφει αμετάβλητα και διαφανώς κάθε πληροφορία. Στη μόδα, το blockchain χρησιμοποιείται κυρίως για την ιχνηλασιμότητα προϊόντων: επιτρέπει σε καταναλωτές και ρυθμιστικές αρχές να επαληθεύουν την προέλευση υλικών, τις συνθήκες εργασίας και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα σε κάθε στάδιο της αλυσίδας εφοδιασμού (Badhwar et al., 2023). Αυτή η λειτουργία συνδέεται άμεσα με τα Digital Product Passports (DPP), δηλαδή τα ψηφιακά διαβατήρια προϊόντων που θεσμοθετούνται στο πλαίσιο του Κανονισμού Ecodesign for Sustainable Products Regulation (ESPR) ως ψηφιακό «δελτίο ταυτότητας» για κατηγορίες προϊόντων που θα καθοριστούν σταδιακά, με τα κλωστοϋφαντουργικά και τα ενδύματα να συγκαταλέγονται στους πρώτους τομείς εφαρμογής (European Commission, 2025; Regulation (EU) 2024/1781).

Τέλος, η τεχνητή νοημοσύνη (AI — Artificial Intelligence) και η ανάλυση μεγάλων δεδομένων (big data analytics) αποτελούν τεχνολογίες με ολοένα αυξανόμενη σημασία για τον κλάδο της μόδας. Σε αντίθεση με τα άλλα ψηφιακά εργαλεία που αναλύθηκαν παραπάνω, η τεχνητή νοημοσύνη δεν αφορά μόνο ένα συγκεκριμένο στάδιο της παραγωγής, αλλά διαπερνά ολόκληρη την αλυσίδα αξίας — από τον σχεδιασμό και την πρόβλεψη τάσεων έως τη βελτιστοποίηση αποθεμάτων και την εξατομικευμένη εμπειρία καταναλωτή. Λόγω της οριζόντιας αυτής παρουσίας και της ιδιαίτερης σημασίας της για τη βιωσιμότητα, η τεχνητή νοημοσύνη αναλύεται εκτενέστερα παρακάτω (Wong, 2019).

Τεχνητή νοημοσύνη στη μόδα: εφαρμογές και επιπτώσεις στη βιωσιμότητα

Η τεχνητή νοημοσύνη επηρεάζει τη βιομηχανία μόδας μέσα από τρεις κύριες κατηγορίες εφαρμογών. Η πρώτη είναι η πρόβλεψη τάσεων (trend forecasting): συστήματα AI αναλύουν εκατομμύρια εικόνες από πασαρέλες, μέσα κοινωνικής δικτύωσης, ηλεκτρονικές πωλήσεις και δεδομένα αναζήτησης για να εντοπίσουν αναδυόμενα μοτίβα πολύ πριν γίνουν ορατά στον παραδοσιακό αναλυτή. Αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης, όπως τα Convolutional Neural Networks (CNNs – δίκτυα νευρώνων που αναλύουν εικόνες), ταξινομούν χαρακτηριστικά υφάσματος, στυλ και σχεδίου από φωτογραφίες πασαρέλας, καθιστώντας δυνατή μια αντικειμενική και συστηματική κατανόηση της εξέλιξης της μόδας (Akram et al., 2022; Shi et

al., 2021). Στην πράξη, αυτό σημαίνει ότι οι εταιρείες μπορούν να παράγουν ενδύματα που αντικατοπτρίζουν πραγματική ζήτηση, μειώνοντας την υπερπαραγωγή και τα αδιάθετα αποθέματα που αποτελούν σημαντική πηγή σπατάλης στο fast fashion μοντέλο.

Η δεύτερη κατηγορία αφορά τη βελτιστοποίηση αποθεμάτων και τη διαχείριση εφοδιαστικής αλυσίδας. Η Bieńkowska (2025), σε συστηματική ανασκόπηση 82 μελετών για τις επιπτώσεις της ΑΙ στη μόδα δημοσιευμένη στο περιοδικό Sustainable Development, διαπιστώνει ότι οι τεχνολογίες ΑΙ χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο στην παραγωγή υφασμάτων (fabric production) και στη διανομή B2B, επιτρέποντας βαθύτερη ανάλυση δεδομένων και ακριβέστερες προβλέψεις ζήτησης. Αξίζει να σημειωθεί ότι, σύμφωνα με την ίδια ανασκόπηση, παρά τις υποσχόμενες δυνατότητες, οι διαθέσιμες λύσεις χρησιμοποιούνται ακόμη σε περιορισμένη έκταση (Bieńkowska, 2025).

Η τρίτη και ίσως πιο άμεσα ορατή για τον καταναλωτή κατηγορία είναι οι εξατομικευμένες εμπειρίες αγοράς. Εφαρμογές όπως εικονικές δοκιμές ενδύματος (virtual try-on) που βασίζονται σε ΑΙ, προτάσεις στυλ βασισμένες σε δεδομένα σώματος και αγοραστικής συμπεριφοράς, και chatbots που λειτουργούν ως ψηφιακοί στυλίστες αποτελούν ήδη πραγματικότητα σε πλατφόρμες ηλεκτρονικού εμπορίου μεγάλων οίκων. Ο Karadayi-Usta (2024), σε μελέτη δημοσιευμένη στο Engineering Applications of Artificial Intelligence, τεκμηριώνει ότι η υιοθέτηση εργαλείων ΑΙ και επαυξημένης πραγματικότητας (AR) στη μόδα μπορεί να μειώσει σημαντικά την επιστροφή προϊόντων — ένα από τα σημαντικότερα περιβαλλοντικά προβλήματα του ηλεκτρονικού εμπορίου, καθώς κάθε επιστροφή συνεπάγεται πρόσθετες μεταφορές, συσκευασία και συχνά καταστροφή του επιστραφέντος προϊόντος.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι η κλιμάκωση των εφαρμογών τεχνητής νοημοσύνης στη μόδα συνδέεται και με ευρύτερες ανησυχίες σχετικά με το ενεργειακό αποτύπωμα των κέντρων δεδομένων που απαιτούνται για τη λειτουργία τους. Η πρόκληση για τον κλάδο δεν είναι μόνο να αξιοποιήσει τα εργαλεία ΑΙ για τη μείωση της υπερπαραγωγής και των αποθεμάτων, αλλά να το επιτύχει μέσα σε ένα πλαίσιο ενεργειακά αποδοτικών και κλιματικά ουδέτερων ψηφιακών υποδομών, ώστε τα κέρδη σε βιωσιμότητα στο επίπεδο των υλικών να μην αντισταθμίζονται από αυξημένη κατανάλωση ενέργειας (Cornell Chronicle, 2025).

2.2 Ψηφιοποίηση Σχεδιασμού και Ανάπτυξης Προϊόντος

2.2.1 Από το σκίτσο στο 3D ψηφιακό πρωτότυπο

Η ανάπτυξη ενός ενδύματος ακολούθησε ιστορικά μια σαφώς γραμμική πορεία, από το χειρόγραφο σκίτσο στο επίπεδο πατρόν και από εκεί στο φυσικό δείγμα. Κάθε ατέλεια στην εφαρμογή ή την αισθητική απαιτούσε νέο φυσικό δείγμα (prototype), δηλαδή νέα κατανάλωση υφάσματος, χρόνου και κόστους. Σύμφωνα με τη McQuillan (2020), η συμβατική παραγωγή ενδυμάτων παράγει απώλειες υφάσματος μεταξύ 15% και 25% κατά το στάδιο της κοπής – και η πλειονότητα αυτής της σπατάλης καθορίζεται στο στάδιο του σχεδιασμού, πριν την κατασκευή.

Η μετάβαση στον τρισδιάστατο (3D) ψηφιακό σχεδιασμό αντιμετωπίζει αυτό ακριβώς το πρόβλημα. Σε ένα τρισδιάστατο ψηφιακό περιβάλλον, το ένδυμα δεν απεικονίζεται απλώς, αλλά προσομοιώνεται ρεαλιστικά πάνω σε εικονικό σώμα (avatar), λαμβάνοντας υπόψη τις φυσικές ιδιότητες του υφάσματος, όπως το βάρος, την ελαστικότητα και τη ροή (πτώση). Ο σχεδιαστής μπορεί να βλέπει ταυτόχρονα το επίπεδο 2D πατρόν και την αντίστοιχη 3D αναπαράσταση, κάτι που επιτρέπει άμεση αξιολόγηση της σχέσης μεταξύ σχεδιαστικής επιλογής και κατανάλωσης υλικού. Σε επιστημονική βιβλιογραφία τονίζεται ότι αυτή η υβριδική 2D/3D ψηφιακή διαδικασία μετασχηματίζει τον τρόπο σκέψης του σχεδιαστή, αφού οι αποφάσεις που στο παρελθόν λαμβάνονταν εμπειρικά μετά από πολλαπλά φυσικά δείγματα, λαμβάνονται πλέον σε ψηφιακό περιβάλλον με άμεση οπτική ανατροφοδότηση (McQuillan, 2020).

Η ποσοτική τεκμηρίωση αυτής της μετάβασης προέρχεται από τη μελέτη κύκλου ζωής (Life Cycle Assessment – LCA) των Erdem et al. (2026), η οποία δημοσιεύτηκε στο *Journal of Cleaner Production* και αποτελεί μία από τις πιο συστηματικές αναλύσεις του περιβαλλοντικού αντικτύπου της μετάβασης από φυσικά σε ψηφιακά δείγματα. Τα αποτελέσματά της δείχνουν ότι η αντικατάσταση φυσικών δειγμάτων με τρισδιάστατα ψηφιακά δείγματα μπορεί να μειώσει δραστικά την κατανάλωση πρώτων υλών, νερού και ενέργειας κατά τη φάση ανάπτυξης προϊόντος, ενώ παράλληλα μειώνει τον χρόνο ανάπτυξης έως και κατά 73% (Erdem et al., 2026). Σε πρακτικό επίπεδο, αυτό σημαίνει ότι ένας κύκλος ανάπτυξης που παραδοσιακά απαιτούσε πολλαπλούς γύρους δημιουργίας φυσικών δειγμάτων, διορθώσεων και αποστολών για έγκριση μπορεί, στην πιο προηγμένη μορφή ψηφιακής ανάπτυξης προϊόντος, να ολοκληρωθεί με ελάχιστα ή ακόμη και χωρίς φυσικά δείγματα.

Τα ευρήματα αυτά επιβεβαιώνονται και από ευρύτερη βιβλιογραφία που τεκμηριώνει ποσοτικά τα περιβαλλοντικά οφέλη της ψηφιακής μετάβασης. Σε βιομηχανικές μελέτες που αναλύουν οι Morandi & Tonelli (2023), η υιοθέτηση 3D εργαλείων μειώνει τον αριθμό φυσικών δειγμάτων ανά κύκλο ανάπτυξης από 3–8 σε ένα μόνο φυσικό δείγμα πριν την παραγωγή, ενώ τα ψηφιακά πρωτότυπα μειώνουν το ανθρακικό αποτύπωμα της φάσης ανάπτυξης κατά 30% σε γενικό επίπεδο — και έως 97% στην περίπτωση σύγκρισης ψηφιακού με φυσικό ένδυμα (Morandi & Tonelli, 2023). Ενδεικτική είναι η ανασκόπηση των Habib et al. (2025) στην οποία αναφέρεται ότι σε ένα συμβατικό μοντέλο παραγωγής το 30% των υλικών μετατρέπεται σε απόβλητα ήδη από τη φάση κοπής, ενώ η χρήση ψηφιακών πρωτοτύπων μπορεί να εξαλείψει έως και το 80% αυτής της σπατάλης υφάσματος, παράλληλα με μείωση άνω του 60% στο ανθρακικό αποτύπωμα της αποστολής δειγμάτων (Habib et al., 2025). Συνεπώς, ενισχύεται η άποψη ότι ο 3D ψηφιακός σχεδιασμός δεν αποτελεί απλώς αισθητική ή τεχνολογική καινοτομία, αλλά δομικό εργαλείο αναδιοργάνωσης της διαδικασίας ανάπτυξης προϊόντος.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η μετάβαση αυτή δεν αφορά αποκλειστικά την αντικατάσταση ενός εργαλείου από ένα άλλο, αλλά μια βαθύτερη αναδιοργάνωση της σχεδιαστικής ροής εργασίας. Στον συμβατικό 2D σχεδιασμό, η διαδικασία χαρακτηρίζεται ως «linear και siloed», με σχεδιαστή και πατρονίστ να εργάζονται σε διαδοχικά, αποσυνδεδεμένα στάδια, ενώ τα φυσικά δείγματα ταξιδεύουν εβδομάδες ή μήνες μεταξύ εργοστασίου και αγοραστή για εγκρίσεις (McQuillan, 2020; Morandi & Tonelli, 2023). Στον 3D ψηφιακό σχεδιασμό, αυτές οι διαδοχικές ενέργειες συγκλίνουν σε ένα ενιαίο ψηφιακό περιβάλλον: η McQuillan (2020) περιγράφει τη διαδικασία ως «hybridising of actions», όπου σχεδιαστική και τεχνική διάσταση λειτουργούν ταυτόχρονα και σε άμεση αλληλεπίδραση, αντί για διαδοχικά και ανεξάρτητα. Αποτέλεσμα είναι η αντικατάσταση της φυσικής μεταφοράς δειγμάτων από ψηφιακή επικοινωνία, η οποία επιτρέπει ουσιαστική συνεργασία μεταξύ σχεδιαστών, τεχνικών και αγοραστών σε πραγματικό χρόνο και επιταχύνει ολόκληρη τη ροή εργασίας (Morandi & Tonelli, 2023).

Ένα παράδειγμα εφαρμογής του 3D ψηφιακού σχεδιασμού σε βιομηχανικό επίπεδο αποτελεί ο Ολλανδικός οίκος Scotch & Soda, ο οποίος υιοθέτησε το λογισμικό CLO 3D για να δημιουργεί ψηφιακά πρωτότυπα πριν από οποιαδήποτε φυσική κατασκευή, με αποτέλεσμα τη μείωση των φυσικών δειγμάτων κατά περισσότερο από 50% σε ορισμένες σεζόν. Ομοίως, η PVH Corp – ο μητρικός όμιλος των Calvin Klein και Tommy Hilfiger – ανακοίνωσε ότι έχει ενσωματώσει 3D σχεδιασμό σε σημαντικό τμήμα του χαρτοφυλακίου των brands της ως μέρος της στρατηγικής της για τη μείωση των φυσικών δειγμάτων. Τα παραδείγματα αυτά καταδεικνύουν ότι ο 3D

ψηφιακός σχεδιασμός δεν αποτελεί πλέον πρωτοποριακή εφαρμογή περιορισμένης κλίμακας, αλλά κλιμακούμενη τεχνολογία που υιοθετείται από μεγάλους ομίλους της βιομηχανίας (Casciani et al., 2022).

2.2.2 Ψηφιακή δημιουργία δειγμάτων και εικονικών πρωτοτύπων

Η ψηφιακή δημιουργία δειγμάτων και εικονικών πρωτοτύπων αποτελεί μία από τις σημαντικότερες εφαρμογές του τρισδιάστατου ψηφιακού σχεδιασμού στο πλαίσιο της βιωσιμότητας. Ο όρος αναφέρεται στη διαδικασία κατά την οποία τα φυσικά δείγματα ενδυμάτων, τα οποία στο συμβατικό μοντέλο κατασκευάζονται επανειλημμένα για να ελεγχθούν η εφαρμογή, τα χρώματα, τα υλικά και οι τεχνικές λεπτομέρειες, αντικαθίστανται εν μέρει ή πλήρως από ψηφιακές προσομοιώσεις μέσω λογισμικών τρισδιάστατης μοντελοποίησης (Erdem et al., 2026; Morandi & Tonelli, 2023). Σύμφωνα με τους Baek et al. (2022), η συστηματική ανασκόπηση της σχετικής βιβλιογραφίας αναδεικνύει τρεις αλληλένδετες θεματικές ενότητες που χαρακτηρίζουν αυτή τη λειτουργία: το design, ως εφαρμογή ψηφιακών τεχνολογιών στη σχεδιαστική διαδικασία, το body, ως αξιολόγηση εφαρμογής και εργονομίας μέσω ψηφιακών προτύπων του ανθρώπινου σώματος, και το virtual, ως μετατροπή της υλικής μόδας σε ψηφιακές αναπαραστάσεις.

Η περιβαλλοντική σημασία της μετάβασης από φυσικά σε ψηφιακά δείγματα τεκμηριώνεται εμπειρικά από τους Erdem et al. (2026). Μέσα από ανάλυση κύκλου ζωής (Life Cycle Assessment – LCA), βασισμένη σε πραγματικά εργοστασιακά δεδομένα, η μελέτη δείχνει ότι κάθε φυσικό δείγμα φέρει σημαντικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα, καθώς απαιτεί πρώτες ύλες, όπως ύφασμα, εξαρτήματα και υλικά συσκευασίας, κατανάλωση ενέργειας και νερού κατά την κατασκευή, καθώς και παραγωγή υφασματικών αποβλήτων από δείγματα που δεν εγκρίνονται ή αντικαθίστανται από νεότερες εκδοχές. Επιπλέον, οι εκπομπές CO₂ από τη μεταφορά φυσικών δειγμάτων μεταξύ σχεδιαστήριου, εργοστασίου και κεντρικών γραφείων εκτιμάται ότι διευρύνουν περαιτέρω το χάσμα ανάμεσα στη φυσική και την ψηφιακή διαδικασία ανάπτυξης δειγμάτων. Η αντικατάσταση των φυσικών κύκλων δημιουργίας και έγκρισης δειγμάτων με ψηφιακές προσομοιώσεις μειώνει σημαντικά όλες αυτές τις παραμέτρους: η μείωση των εκπομπών CO₂, με βάση τον δείκτη δυναμικού υπερθέρμανσης του πλανήτη (Global Warming Potential – GWP), κυμαίνεται μεταξύ 85–92% με μέσο όρο 87%, η κατανάλωση ενέργειας μεταξύ 85–94% και η κατανάλωση νερού μεταξύ 86–91%, ανάλογα με τον τύπο ενδύματος (Erdem et al., 2026).

Η εφαρμογή αυτής της ψηφιακής διαδικασίας δεν περιορίζεται στις μεγάλες εταιρείες ενδυμάτων. Λογισμικά όπως το CLO 3D και το Browzwear επιτρέπουν στους σχεδιαστές να δημιουργούν ψηφιακά δείγματα υψηλής ρεαλιστικότητας, να ελέγχουν την εφαρμογή τους σε ψηφιακά σώματα και να μειώνουν τον χρόνο από το σχέδιο έως το πρωτότυπο κατά 50–70% (Casciani et al., 2022; McQuillan, 2020), ενώ το κόστος παραγωγής δείγματος μπορεί να μειωθεί έως και 90% σε σύγκριση με τη δημιουργία φυσικών δειγμάτων (Habib et al., 2025).

2.2.3 Ψηφιακά δίδυμα (digital twins) στη μόδα

Μια πιο σύνθετη έκφραση της ψηφιακής αναπαράστασης στη μόδα είναι τα ψηφιακά δίδυμα (digital twins, DTs). Σύμφωνα με τους Wagner και Kabalska (2023), ένα ψηφιακό δίδυμο αποτελεί ένα ψηφιακό αντικείμενο ή μοντέλο που αναπαριστά ένα διακριτό φυσικό αντικείμενο, διαδικασία, οργανισμό ή πρόσωπο, ενώ δεδομένα από πολλαπλά ψηφιακά δίδυμα μπορούν να συνδυαστούν ώστε να δημιουργηθεί μια σύνθετη αναπαράσταση ποικίλων πραγματικών οντοτήτων και διαδικασιών. Η τεχνολογία DT αναγνωρίζεται ως βασικός μοχλός ψηφιακής μεταμόρφωσης και ως εργαλείο βελτιστοποίησης λειτουργικών διαδικασιών που συμβάλλει στη βιώσιμη ανάπτυξη της βιομηχανίας μόδας.

Οι Casciani et al. (2022) εντάσσουν τα ψηφιακά δίδυμα στο ευρύτερο σύνολο των τεχνολογιών που ορίζουν ως «3D virtual and digital» (3DVD) — δηλαδή τρισδιάστατη μοντελοποίηση (3D modeling), εικονική και επαυξημένη πραγματικότητα (VR και AR), σάρωση 2D/3D και digital twinning (DT). Σύμφωνα με τους ίδιους συγγραφείς, η υιοθέτηση των 3DVD τεχνολογιών από τις επιχειρήσεις μόδας παρέχει ευκαιρίες αποϋλοποίησης του παραδοσιακού μοντέλου αλυσίδας εφοδιασμού και επιτρέπει σημαντική συντόμευση των κύκλων σχεδιασμού, πρωτοτυποποίησης, παραγωγής, marketing και retail. Ειδικότερα, η χρήση ψηφιακών αντιγράφων των φυσικών υλικών — που αποτυπώνουν με ακρίβεια χρώμα, υφή, μοτίβα και ιδιότητες ενδύματος — επιτρέπει φωτορεαλιστικές προσομοιώσεις τρισδιάστατων ψηφιακών ενδυμάτων χωρίς την ανάπτυξη φυσικών πρωτοτύπων παραγωγής.

Στο επίπεδο του προϊόντος, οι Wagner και Kabalska (2023) επισημαίνουν ότι τα ψηφιακά δίδυμα συνδέονται με τον σχεδιασμό και την ανάπτυξη ενδυμάτων με δύο αλληλένδετους τρόπους: αφενός, αποτελούν εικονικές αναπαραστάσεις φυσικών προϊόντων που εμπλουτίζονται με δεδομένα ανατροφοδότησης σε πραγματικό χρόνο, επιτρέποντας την κατανόηση πραγματικών συμπεριφορών και τη διενέργεια αναγκαίων προσαρμογών· αφετέρου, η εικονική δοκιμή προϊόντων μέσω DTs καθίσταται σημαντικά πιο οικονομική και

αποδοτική σε σχέση με την παραγωγή νέων φυσικών πρωτοτύπων. Αυτή η λογική συνδέεται άμεσα με την υπολογιζόμενη εξοικονόμηση σε υλικά, χρόνο και κόστος παραγωγής, γεγονός που συνάδει με τα ευρύτερα ευρήματα για τη μείωση των φυσικών δειγμάτων μέσω εικονικής πρωτοτυποποίησης που αναλύθηκαν στην ενότητα 2.2.1.

Επιπρόσθετα, η αξιοποίηση ψηφιακών διδύμων δεν περιορίζεται στο επίπεδο του προϊόντος, αλλά επεκτείνεται στη δημιουργία νέων μορφών «βιώσιμης αξίας» (sustainable value) για πολλαπλούς εμπλεκόμενους — σχεδιαστές, μάρκες, τεχνολογικούς εταίρους και καταναλωτές. Μέσω της μελέτης περίπτωσης της συνεργασίας μεταξύ της εταιρείας μόδας Bacon Clothing και της τεχνολογικής εταιρείας TwinOne, περιγράφεται ότι η ανάπτυξη ψηφιακών διδύμων επέτρεψε στην πρώτη να μειώσει σημαντικά το κόστος παραγωγής, συναρμολόγησης, βαφής και οπτικοακουστικού υλικού, ενώ παράλληλα διοχέτευσε εικονικό περιεχόμενο για marketing, lookbooks και ψηφιακή παρουσίαση συλλογής κατά τη διάρκεια της Milan Fashion Week. Αυτή η πολυεπίπεδη αξιοποίηση των DTs — από τον σχεδιασμό έως την εμπορική επικοινωνία — αναδεικνύει τη δυνατότητά τους να αναδιαμορφώσουν ολόκληρη την αλυσίδα δημιουργίας αξίας στη βιομηχανία μόδας (Wagner & Balaska, 2022; Casciani et al., 2022).

2.2.4 Μελέτη περίπτωσης: Atacac και The Fabricant

Η λειτουργία του τρισδιάστατου ψηφιακού σχεδιασμού και της δημιουργίας ψηφιακών δειγμάτων ως εργαλείων μετασχηματισμού του κύκλου ανάπτυξης προϊόντος αποτυπώνεται πιο καθαρά μέσα από επιχειρήσεις που έχουν υιοθετήσει ένα μοντέλο λειτουργίας με προτεραιότητα στο ψηφιακό προϊόν (digital-first model). Η Atacac και το The Fabricant αποτελούν δύο χαρακτηριστικές περιπτώσεις πρωτοπόρων επιχειρήσεων, όπως αναλύονται διεξοδικά στις μελέτες των Särämäkari (2023) και Casciani et al. (2022).

Η Atacac είναι μία σουηδική εταιρεία που αξιοποιεί λογισμικά 3D σχεδιασμού σε σχεδόν κάθε στάδιο της δραστηριότητάς της: από τον αρχικό σχεδιασμό έως την εμπορική παρουσίαση και την παραγωγή σε in-house micro-factory. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η Atacac χρησιμοποιεί 3D λογισμικά όπως το CLO 3D για να συνδέσει άμεσα το 2D πατρόν με το 3D ένδυμα, επιτρέποντας στους σχεδιαστές να οπτικοποιούν την εφαρμογή και τις πτυχώσεις πριν κατασκευαστεί οποιοδήποτε φυσικό δείγμα. Στη μελέτη των Särämäkari (2023), το επιχειρηματικό μοντέλο της Atacac περιγράφεται ως «design–present–sell–produce»: πρώτα σχεδιάζονται τα ενδύματα σε 3D, στη συνέχεια παρουσιάζονται σε ψηφιακή μορφή στο κοινό, κατόπιν πωλούνται μέσω προπαραγγελιών και, τέλος, παράγονται σε μικρές ποσότητες κατόπιν

παραγγελίας στο in-house εργαστήριο. Με αυτό τον τρόπο, η Atacac καταφέρνει να μειώσει τον τυπικό χρόνο από την ιδέα στην αγορά από 6–18 μήνες σε περίπου τρεις εβδομάδες, περιορίζοντας παράλληλα στο ελάχιστο τα αποθέματα και τον κίνδυνο αδιάθετης παραγωγής.

Σε επίπεδο παραγωγής, η Atacac στηρίζεται σε ένα μικρό, ευέλικτο micro-factory, εξοπλισμένο με συμβατικό ραπτικό εξοπλισμό και, σταδιακά, με ψηφιακά εργαλεία όπως CNC μηχανές κοπής, το οποίο λειτουργεί σε στενή διασύνδεση με τα ψηφιακά αρχεία σχεδιασμού. Η Särämäkari (2023) επισημαίνει ότι το μοντέλο αυτό επιτρέπει δυναμική τιμολόγηση τύπου «εισιτηρίου αεροπορικής εταιρείας» – όσο νωρίτερα γίνει η προ-παραγγελία τόσο χαμηλότερη η τιμή – με αποτέλεσμα το μεγαλύτερο μέρος του στοκ να πωλείται εκ των προτέρων και το εναπομένον απόθεμα να παραμένει ελάχιστο. Αυτό το σχήμα 3D σχεδιασμού, ψηφιακής ανάπτυξης δειγμάτων και παραγωγής κατόπιν παραγγελίας συνδέεται άμεσα με τη μείωση της υπερπαραγωγής και της προ-καταναλωτικής σπατάλης.

Το The Fabricant, αντίθετα, αποτελεί παράδειγμα επιχείρησης που δραστηριοποιείται αποκλειστικά στο πεδίο της ψηφιακής μόδας. Όπως αναφέρεται από τους Särämäkari (2023) και Casciani et al. (2022), το The Fabricant σχεδιάζει και παράγει ψηφιακά ενδύματα και εμπειρίες μόδας που δεν προορίζονται να υλοποιηθούν ποτέ ως φυσικά προϊόντα, αλλά φοριούνται από avatars, εμφανίζονται σε εικονικά περιβάλλοντα ή ενσωματώνονται σε animated fashion ταινίες. Για το The Fabricant, η ψηφιακή μόδα αποτελεί έναν «χώρο ονείρων», απαλλαγμένο από τους φυσικούς περιορισμούς των υλικών και της παραγωγικής υποδομής, προσφέροντας «ολόκληρη τη βιομηχανία μόδας στον σκληρό δίσκο του χρήστη». Μέσω της αυτοματοποίησης των ροών εργασίας η εταιρεία στοχεύει στη μείωση του χρόνου ανάπτυξης μιας ψηφιακής συλλογής από έξι εβδομάδες σε πέντε ημέρες.

Οι δύο αυτές μελέτες περίπτωσης αναδεικνύουν δύο διαφορετικές, αλλά συμπληρωματικές κατευθύνσεις του ψηφιακού μετασχηματισμού. Στην περίπτωση της Atacac, ο 3D σχεδιασμός και η χρήση ψηφιακών δειγμάτων λειτουργούν ως εργαλεία βελτιστοποίησης ενός φυσικού μοντέλου παραγωγής, μειώνοντας τον χρόνο, τα αποθέματα και τη σπατάλη υλικών μέσα από ένα μοντέλο micro-factory και παραγωγής κατόπιν παραγγελίας. Στην περίπτωση του The Fabricant, η ίδια τεχνολογική υποδομή αξιοποιείται για την ανάπτυξη μιας «καθαρά ψηφιακής» μόδας, όπου η αποϋλοποίηση δεν περιορίζεται στη φάση δημιουργίας και αξιολόγησης δειγμάτων αλλά επεκτείνεται στο σύνολο του προϊόντος, καθώς δεν παράγεται καθόλου φυσικό ένδυμα. Οι περιπτώσεις αυτές λειτουργούν ως παραδείγματα για νέες μορφές αξίας και

επιχειρηματικών μοντέλων στη μόδα, προσφέροντας ταυτόχρονα σημαντικές ενδείξεις για το πώς οι τεχνολογίες 3D και «Virtual Sampling» μπορούν να συμβάλουν σε πιο βιώσιμες και ευέλικτες μορφές παραγωγής και κατανάλωσης.

Η σύγκριση των δύο επιχειρηματικών μοντέλων αποτυπώνεται συνοπτικά στο **Σχήμα 2.2**, όπου φαίνονται οι διαφορετικές κατευθύνσεις που μπορεί να πάρει η αποϋλοποίηση: βελτιστοποίηση φυσικής παραγωγής έναντι πλήρους ψηφιακής μόδας.

ATACAC	THE FABRICANT
3D design σε όλα τα στάδια (CLO 3D).	Ψηφιακά ενδύματα & fashion experiences μόνο.
Μοντέλο «design–present–sell–produce».	Προϊόντα για avatars, εικονικά περιβάλλοντα, ταινίες.
Παραγωγή κατόπιν παραγγελίας σε micro-factory.	Στόχος: μείωση χρόνου συλλογής από 6 εβδομάδες σε 5 ημέρες.
6–18 μήνες → ~3 εβδομάδες time-to-market.	Πλήρης αποϋλοποίηση προϊόντος.

Σχήμα 2.2: Σύγκριση των μοντέλων Atacac και The Fabricant ως παραδειγμάτων «digital-first» φυσικής και καθαρά ψηφιακής μόδας.

2.3 Ψηφιακά Εργαλεία Πριν την Παραγωγή

2.3.1 Εικονικά showrooms και ψηφιακοί κατάλογοι

Μια από τις πιο άμεσα ορατές εφαρμογές της ψηφιακής μόδας στη φάση πριν από την παραγωγή αφορά τον τρόπο παρουσίασης και αξιολόγησης των συλλογών πριν από τη λήψη εμπορικών αποφάσεων. Στο συμβατικό μοντέλο, η παρουσίαση μιας συλλογής σε αγοραστές (buyers), διανομείς και εσωτερικά στελέχη απαιτούσε φυσικά δείγματα — χρωμάτων, υλικών

και μεγεθών — τα οποία μεταφέρονταν σε showrooms σε πολλαπλές αγορές ανά τον κόσμο. Το κόστος αυτής της διαδικασίας ήταν τόσο οικονομικό όσο και περιβαλλοντικό: η μεταφορά, αποθήκευση και διαχείριση φυσικών δειγμάτων συνέβαλλαν σε σημαντικό ανθρακικό αποτύπωμα και υλική σπατάλη (Casciani et al., 2022).

Τα εικονικά showrooms — ψηφιακοί χώροι τρισδιάστατης παρουσίασης συλλογών, στους οποίους αγοραστές και συνεργάτες εξερευνούν ενδύματα σε εικονικά περιβάλλοντα — αντιμετωπίζουν αυτό το πρόβλημα ουσιαστικά. Ο αγοραστής μπορεί να δει ένα ένδυμα σε διαφορετικά χρώματα, υλικά και μεγέθη χωρίς να υπάρχει φυσικό δείγμα για κάθε παραλλαγή, να το περιστρέψει και να εξετάσει λεπτομέρειες κατασκευής, και να ολοκληρώσει τη διαδικασία παραγγελίας εξ αποστάσεως (Moltenbrey & Fischer, 2021). Αυτή η δυνατότητα είναι ιδιαίτερα σημαντική στο πλαίσιο της βιωσιμότητας: μειώνει δραστικά τον αριθμό των φυσικών δειγμάτων που παράγονται για εμπορικούς σκοπούς και περιορίζει τις εκπομπές CO₂ από μεταφορές και επαγγελματικά ταξίδια (Casciani et al., 2022).

Το Retail 4.0, ένα ερευνητικό πρόγραμμα που ανέπτυξε ψηφιακές λύσεις για τη βιομηχανία ενδυμάτων, κατέδειξε πρακτικά ότι τα εικονικά showrooms επιτρέπουν στους αγοραστές και τους κατασκευαστές να εξετάζουν εικονικά πρωτότυπα σε κοινό εικονικό χώρο με τη βοήθεια γυαλιών εικονικής πραγματικότητας, αντικαθιστώντας χρονοβόρες φυσικές συναντήσεις σε πολλαπλές τοποθεσίες (Moltenbrey & Fischer, 2021). Η αντικατάσταση των αντιπροσωπευτικών δειγμάτων με λύσεις AR/VR καθιστά μεγάλο μέρος της παραγωγής φυσικών δειγμάτων περιττή, εξοικονομώντας χρόνο και μειώνοντας το κόστος μεταφοράς, ενώ παράλληλα επιτρέπει την άμεση ψηφιακή ανατροφοδότηση από τους αγοραστές προς τους κατασκευαστές κατά τη φάση ανάπτυξης της συλλογής.

Χαρακτηριστικά παραδείγματα εφαρμογής εικονικών showrooms στη luxury fashion αποτελούν οίκοι όπως η Gucci, η οποία ανέπτυξε AR εφαρμογές που επιτρέπουν στους χρήστες να «δοκιμάζουν» ψηφιακά αξεσουάρ — όπως παπούτσια — μέσω κινητού τηλεφώνου. Παρόμοιες πρωτοβουλίες έχουν υιοθετηθεί ευρέως από μεγάλους οίκους, συνδυάζοντας εικονικά showrooms με ψηφιακούς καταλόγους (digital lookbooks). Ψηφιακά ενδύματα που αναπτύχθηκαν μέσω 3D σχεδιασμού μπορούν να φωτογραφηθούν εικονικά σε διάφορα περιβάλλοντα, να εμφανιστούν σε διαφορετικά avatars και να χρησιμοποιηθούν για εμπορικά υλικά ή ψηφιακές καμπάνιες, χωρίς να απαιτηθεί παραγωγή με φυσικά ρούχα, μοντέλα και τοποθεσίες. Σύμφωνα με επίσημες βιβλιογραφικές πηγές, η B2B παρουσίαση μέσω ψηφιακών

καταλόγων και εικονικών showrooms αποτελεί ένα από τα βασικά στάδια ψηφιακού μετασχηματισμού της εφοδιαστικής αλυσίδας μόδας, με άμεσες θετικές επιπτώσεις στη μείωση των εκπομπών από ταξίδια και μεταφορές δειγμάτων (Casciani et al., 2022).

2.3.2 Ψηφιακά Tech Packs και Patternmaking

Παράλληλα με τα εικονικά showrooms, η ψηφιοποίηση αγγίζει βαθύτερα τη σχεδιαστική διαδικασία μέσω των ψηφιακών tech packs και του αυτοματοποιημένου patternmaking. Ένα tech pack (τεχνικό πακέτο παραγωγής) αποτελεί το σύνολο των τεχνικών πληροφοριών που διαβιβάζει ο σχεδιαστής στον κατασκευαστή — σχέδια, μετρήσεις, οδηγίες ραφής, επιλογές υλικών και ποιοτικές προδιαγραφές — λειτουργώντας ως οδηγός παραγωγής που μετατρέπει τη δημιουργική πρόθεση σε παραγόμενο προϊόν. Στο συμβατικό μοντέλο, τα tech packs συντάσσονταν χειροκίνητα ως στατικά έγγραφα, μια διαδικασία που οδηγούσε συχνά σε παρανοήσεις, λάθη και καθυστερήσεις που απαιτούσαν επανάληψη κύκλων φυσικών δειγμάτων (Tiwari, 2022; Casciani et al., 2022).

Τα ψηφιακά tech packs που παράγονται από 3D λογισμικά σχεδιασμού συνδέουν άμεσα το ψηφιακό ένδυμα με τις παραγωγικές οδηγίες: κάθε τροποποίηση στο 3D μοντέλο ενημερώνει αυτόματα τα τεχνικά στοιχεία, μειώνοντας τις πιθανότητες ανθρώπινου λάθους και επιταχύνοντας τη διαδικασία. Αυτή η αυτοματοποίηση αντιμετωπίζει ένα χρόνιο πρόβλημα της βιομηχανίας: τη διάσταση μεταξύ δημιουργικής πρόθεσης και παραγωγικής εκτέλεσης, η οποία οδηγούσε συχνά σε επανάληψη διαδικασιών με αποτέλεσμα την υλική σπατάλη (Tiwari, 2022; Moltenbrey & Fischer, 2021).

Εξίσου σημαντική είναι η ψηφιοποίηση της δημιουργίας πατρόν (patternmaking) — του σταδίου κατά το οποίο ο σχεδιασμός μεταφράζεται σε επίπεδα τμήματα υφάσματος που αποτελούν τη βάση της κοπής και ραφής. Στο συμβατικό μοντέλο, η διαδικασία αυτή ακολουθούσε μια επαναληπτική λογική δοκιμής και διόρθωσης, κατά την οποία σχεδιαστές και τεχνικοί επαναλάμβαναν βήματα μέχρι η θεωρητική πρόθεση να επιβεβαιωθεί στην πράξη με φυσικό ένδυμα (McQuillan, 2020). Η 3D ψηφιακή δημιουργία πατρόν υπερβαίνει αυτό το μοντέλο επιτρέποντας άμεση οπτικοποίηση της σχέσης μεταξύ 2D πατρόν και 3D αποτελέσματος: κάθε τροποποίηση αντικατοπτρίζεται αυτόματα στο τρισδιάστατο ένδυμα, επιτρέποντας στον σχεδιαστή να λαμβάνει τεκμηριωμένες αποφάσεις για τη γεωμετρία του υφάσματος και τη μείωση της υλικής σπατάλης που αυτή συνεπάγεται (McQuillan, 2020; Casciani et al., 2022).

2.3.3 On-demand παραγωγή και micro-factories

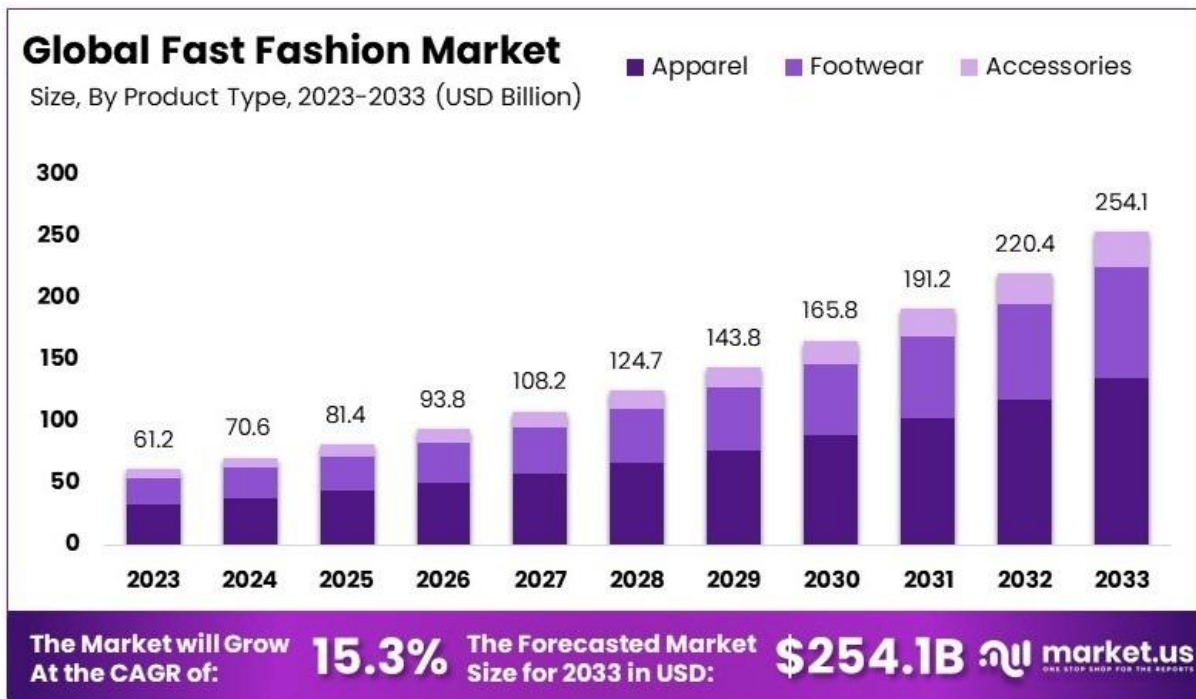
Η ψηφιοποίηση των σχεδιαστικών και τεχνικών διαδικασιών πριν από την παραγωγή δημιουργεί τις προϋποθέσεις για μια ριζική αναδιοργάνωση του ίδιου του μοντέλου παραγωγής, καταλήγοντας στην on-demand παραγωγή και στις micro-factories. Στο συμβατικό μοντέλο fast fashion, τα ενδύματα παράγονται σε μεγάλες ποσότητες πριν οποιαδήποτε γνωστοποίηση της ζήτησης, με αποτέλεσμα αδιάθετα αποθέματα που καταλήγουν σε πωλήσεις σε τιμές κόστους, σε αποθήκευση ή ακόμα και σε καταστροφή (Niinimäki et al., 2020; Casciani et al., 2022).

Το on-demand μοντέλο αντιστρέφει τη λογική, όπου το ένδυμα παράγεται μόνο αφού εκδηλωθεί η ζήτηση του καταναλωτή, αξιοποιώντας τα ψηφιακά δεδομένα σχεδιασμού για να εκκινήσει άμεσα την παραγωγή χωρίς ανάγκη για πρόσθετη δημιουργία δειγμάτων. Αυτό καθίσταται εφικτό όταν τα ψηφιακά αρχεία σχεδιασμού — 3D πατρόν, ψηφιακά υφάσματα, tech packs — είναι άμεσα διαθέσιμα και αποστέλλονται αυτόματα στις παραγωγικές μονάδες. Εταιρείες όπως η Impossible Brands και η Dressarte Paris, οι οποίες παράγουν κατόπιν παραγγελίας ή με ελάχιστα αποθέματα, έχουν υιοθετήσει το on-demand μοντέλο επιτυγχάνοντας σημαντική μείωση της υπερπαραγωγής (Casciani et al., 2022).

Τα «micro-factories» ενισχύουν αυτή τη δυνατότητα παρέχοντας ευέλικτη, γεωγραφικά κατανεμημένη παραγωγή σε μικρές ποσότητες και σύντομο χρόνο (Casciani et al., 2022). Σε συνδυασμό με ψηφιακά εργαλεία σχεδιασμού, επιτρέπουν στη βιομηχανία μόδας να μεταβεί από τη λογική της «παραγωγής για να πουληθεί» στη λογική της «παραγωγής αφού πωληθεί» — μία από τις πιο ουσιώδεις αλλαγές που μπορεί να συμβάλει στη μείωση της υπερπαραγωγής και της συνακόλουθης σπατάλης υλικών (Casciani et al., 2022; Niinimäki et al. 2020).

2.4 Ψηφιακή Μόδα και Βιωσιμότητα

Παράλληλα με την τεχνολογική εξέλιξη, οι προβολές για την αγορά της μόδας δείχνουν ότι οι πιέσεις προς το περιβάλλον αναμένεται να ενταθούν αν δεν αλλάξει ο τρόπος οργάνωσης της παραγωγής. Εκτιμήσεις για την παγκόσμια αγορά fast fashion δείχνουν ότι, παρά τις αυξανόμενες ανησυχίες για τη βιωσιμότητα, ο κύκλος εργασιών του κλάδου συνεχίζει να αυξάνεται και προβλέπεται να προσεγγίσει τα 250–260 δισ. δολάρια έως τις αρχές της δεκαετίας του 2030.



Εικόνα 2.1: Προβλεπόμενη εξέλιξη της παγκόσμιας αγοράς fast fashion 2023–2033 (σε δισ. δολάρια) ανά κατηγορία προϊόντος. Η αναμενόμενη αύξηση του κύκλου εργασιών υποδηλώνει ότι, εάν δεν αλλάξουν οι παραγωγικές πρακτικές, ο συνολικός όγκος παραγωγής και, κατ’ επέκταση, το περιβαλλοντικό αποτύπωμα του κλάδου θα συνεχίσουν να αυξάνονται (Market.us, 2024).

Σε αυτό το πλαίσιο, η ψηφιακή μόδα αναδεικνύεται ως πιθανό εργαλείο μείωσης της υλικής έντασης της παραγωγής, καθώς οι τεχνολογίες 3D σχεδιασμού, virtual sampling και virtual try-on στοχεύουν να περιορίσουν την ανάγκη για φυσικά δείγματα και υπερπαραγωγή ήδη στα πρώιμα στάδια του κύκλου ανάπτυξης ενδύματος.

2.4.1 Αποϋλοποίηση (dematerialization) του κύκλου παραγωγής

Η έννοια της αποϋλοποίησης (dematerialization) αποτελεί τον πυρήνα της σχέσης μεταξύ ψηφιακής μόδας και βιωσιμότητας. Ο όρος αναφέρεται στη διαδικασία μέσω της οποίας φυσικά στάδια παραγωγής — που συνεπάγονται κατανάλωση υλικών, ενέργειας και νερού — αντικαθίστανται από ψηφιακές διαδικασίες που επιτελούν την ίδια λειτουργία χωρίς ή με ελάχιστη χρήση φυσικών πόρων. Στο πλαίσιο της μόδας, η αποϋλοποίηση είναι άμεσα συνδεδεμένη με τη μείωση της προ-καταναλωτικής σπατάλης.

Οι Erdem et al. (2026) τεκμηριώνουν ποσοτικά αυτή τη μείωση (όπως αναφέρθηκε και παραπάνω) – η αντικατάσταση φυσικών δειγμάτων με ψηφιακά αντίστοιχα μειώνει σημαντικά

τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, την κατανάλωση νερού και την παραγωγή υφασματικών αποβλήτων, ενώ επιταχύνει τον κύκλο ανάπτυξης προϊόντος. Αυτά τα αποτελέσματα αποκτούν πρόσθετη σημασία στο πλαίσιο που περιγράφουν οι Niinimäki et al. (2020): η βιομηχανία μόδας παράγει ετησίως εκατομμύρια τόνους υφασματικών αποβλήτων, ενώ η παραγωγή ενδυμάτων έχει αυξηθεί σημαντικά τις τελευταίες δεκαετίες λόγω του μοντέλου της fast fashion. Σε αυτό το πλαίσιο, η αποϋλοποίηση δεν είναι απλώς τεχνολογική καινοτομία — είναι συστηματική παρέμβαση στη ρίζα του προβλήματος.

Η βαθύτερη σημασία της αποϋλοποίησης έγκειται στο ότι δεν αντιμετωπίζει τη σπατάλη μετά τη δημιουργία της, αλλά την αποτρέπει εξ αρχής. Ενώ οι παραδοσιακές στρατηγικές βιωσιμότητας εστιάζουν στην ανακύκλωση και την επαναχρησιμοποίηση — δηλαδή στη διαχείριση αποβλήτων που έχουν ήδη δημιουργηθεί — η αποϋλοποίηση επεμβαίνει στον κύκλο παραγωγής πριν από τη δημιουργία αποβλήτων. Επιπλέον αναδεικνύεται εμπειρικά ότι η υιοθέτηση ψηφιακών τεχνολογιών από εταιρείες μόδας δημιουργεί ευκαιρίες για αποϋλοποίηση σε κάθε στάδιο της αλυσίδας αξίας, καθιστώντας την πιο συμβατή με τις αρχές πρόληψης της σπατάλης στη ρίζα της παραγωγικής διαδικασίας (Niinimäki et al., 2020; Casciani et al., 2022).

Ωστόσο, παρά τα σημαντικά αυτά οφέλη, η αποϋλοποίηση του κύκλου παραγωγής δεν συνεπάγεται μηδενικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα, αλλά κυρίως μετατόπιση ενός μέρους του φορτίου από τα υλικά και τις μεταφορές προς την κατανάλωση ενέργειας για τη λειτουργία των ψηφιακών υποδομών (Xiao et al., 2025). Η Biełkowska (2025) επισημαίνει ότι η συζήτηση για τη συμβολή της τεχνητής νοημοσύνης στη βιώσιμη μόδα τείνει να επικεντρώνεται στα δυνητικά οφέλη, ενώ η πραγματική έκτασή της παραμένει περιορισμένη και δύσκολο να ποσοτικοποιηθεί. Οι Xiao et al. (2025) τεκμηριώνουν ότι η ταχεία ανάπτυξη υποδομών AI μπορεί, στην απουσία στοχευμένης αποανθρακοποίησης, να προσθέσει έως 24-44 εκατομμύρια τόνους CO₂ ετησίως έως το 2030, καθώς και να καταναλώνει 731–1.125 εκατομμύρια m³ νερού ετησίως για ψύξη — ποσότητα αντίστοιχη με την ετήσια οικιακή κατανάλωση 6–10 εκατομμυρίων Αμερικανών.

Επομένως, η αξιολόγηση της ψηφιακής μόδας ως εργαλείου βιωσιμότητας οφείλει να λαμβάνει υπόψη όχι μόνο τη μείωση της υλικής κατανάλωσης και της χημικής επιβάρυνσης από την υποκατάσταση φυσικών δειγμάτων με ψηφιακά (Erdem et al., 2026), αλλά και το πλήρες ενεργειακό και υδατικό αποτύπωμα των ψηφιακών υποδομών που υποστηρίζουν τις

τεχνολογίες 3D, VR/AR και AI (Xiao et al., 2025). Η πρόσφατη βιβλιογραφία αναδεικνύει ότι τα περιβαλλοντικά οφέλη της ψηφιακής ένδυσης εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το αν τα data centers που την υποστηρίζουν τροφοδοτούνται από χαμηλού άνθρακα ενεργειακά μίγματα (Xin et al., 2025). Συνεπώς, η αποϋλοποίηση πρέπει να αντιμετωπίζεται ως μετασχηματισμός — και όχι ως εξαφάνιση — του συνολικού περιβαλλοντικού αποτυπώματος, γεγονός που καθιστά αναγκαία την ανάπτυξη ολοκληρωμένων μελετών κύκλου ζωής που συνυπολογίζουν τόσο τις φυσικές όσο και τις ψηφιακές διαστάσεις (Erdem et al., 2026).

2.4.2 Ψηφιακός μετασχηματισμός εφοδιαστικής αλυσίδας

Η βιωσιμότητα στη μόδα δεν αφορά αποκλειστικά τη φάση σχεδιασμού, αλλά εκτείνεται σε ολόκληρη την εφοδιαστική αλυσίδα — από την προμήθεια πρώτων υλών έως την παράδοση του τελικού προϊόντος στον καταναλωτή. Η ψηφιοποίηση της εφοδιαστικής αλυσίδας αποτελεί μια από τις κρισιμότερες παρεμβάσεις για τη βελτίωση της διαφάνειας, της αποτελεσματικότητας και της ιχνηλασιμότητας σε έναν κλάδο που χαρακτηρίζεται από εξαιρετικά πολύπλοκες, πολυεθνικές αλυσίδες παραγωγής (Niinimäki et al., 2020; Casciani et al., 2022).

Τεχνολογίες όπως το blockchain — ένα αποκεντρωμένο ψηφιακό μητρώο που καταγράφει αμετάβλητα και διαφανώς κάθε συναλλαγή ή γεγονός — επιτρέπουν την ιχνηλασιμότητα ενδυμάτων από την πρώτη ύλη έως τον τελικό αγοραστή (Badhwar et al., 2023). Αυτό σημαίνει ότι ένας καταναλωτής μπορεί θεωρητικά να επαληθεύσει πού παρήχθη ένα βαμβάκι, υπό ποιες συνθήκες εργασίας κατασκευάστηκε το ένδυμα και ποιο είναι το περιβαλλοντικό αποτύπωμά του — εξαλείφοντας το φαινόμενο του greenwashing, δηλαδή της παραπλανητικής παρουσίας εταιρειών ως περιβαλλοντικά υπεύθυνων χωρίς ουσιαστικές δράσεις (Niinimäki et al., 2020; Badhwar et al., 2023). Η συστηματική ανασκόπηση των Badhwar et al. (2023) τεκμηριώνει ότι πλατφόρμες όπως η VeChain, η Brandzledger και η TextileGenesis χρησιμοποιούνται ήδη από μεγάλες εταιρείες (H&M, LVMH, Kering) για την ιχνηλάτηση ινών από τον παραγωγό έως τον καταναλωτή.

Η ψηφιοποίηση της εφοδιαστικής αλυσίδας αντιμετωπίζει επίσης την υπερπαραγωγή μέσω της βελτίωσης της πρόβλεψης ζήτησης. Συστήματα τεχνητής νοημοσύνης που αναλύουν δεδομένα πωλήσεων, τάσεων αγοράς και καταναλωτικής συμπεριφοράς επιτρέπουν ακριβέστερες προβλέψεις — μειώνοντας την ανάγκη για παραγωγή ασφαλείας και τα αδιάθετα αποθέματα

που αποτελούν έναν από τους κύριους μηχανισμούς σπατάλης στο fast fashion (Niinimäki et al., 2020, Casciani et al., 2022).

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η Zara, η οποία αξιοποιεί τεχνολογίες RFID σε συνδυασμό με cloud computing και AI για την ιχνηλάτηση προϊόντων και την ενημέρωση αποθεμάτων σε πραγματικό χρόνο (Li et al., 2024). Η ψηφιακή αυτή υποδομή έχει συμβάλει στη μείωση του αδιάθετου αποθέματος πριν από την τοποθέτηση στα ράφια κατά 25%, ενώ ταυτόχρονα μειώνει το κόστος χειρωνακτικής εργασίας και βελτιώνει την κινητικότητα των αποθεμάτων (Li et al., 2024).

2.4.3 Κυκλική οικονομία και Digital Product Passports

Η κυκλική οικονομία ορίζεται ως ένα οικονομικό σύστημα που στοχεύει στη διατήρηση της αξίας των υλικών για όσο το δυνατόν περισσότερο χρόνο, μέσω επαναχρησιμοποίησης, επισκευής, ανακατασκευής και ανακύκλωσης — αντίθετα με το γραμμικό μοντέλο «πάρε φτιάξε-πέταξε» (take-make-dispose) που χαρακτηρίζει το σύγχρονο fast fashion (Ki et al., 2020). Οι Ki et al. (2020), στη συστηματική τους ανασκόπηση για την κυκλική οικονομία στη μόδα, αναδεικνύουν ότι η εφαρμογή κυκλικών πρακτικών απαιτεί τη συμμετοχή όλων των εμπλεκόμενων — από τους σχεδιαστές και τους κατασκευαστές έως τους διανομείς και τους καταναλωτές — και ότι η έλλειψη πληροφοριακής διαφάνειας αποτελεί έναν από τους βασικούς φραγμούς στην υιοθέτησή της.

Σε αυτό το πλαίσιο, το Digital Product Passport (DPP) — ένα ψηφιακό «διαβατήριο» που αποθηκεύει και κοινοποιεί πληροφορίες για τον κύκλο ζωής ενός προϊόντος — αναδεικνύεται ως κρίσιμο εργαλείο για τη μετάβαση σε κυκλικά μοντέλα. Το DPP συγκεντρώνει δεδομένα για τα υλικά από τα οποία αποτελείται ένα ένδυμα, τον τόπο και τις συνθήκες παραγωγής, το περιβαλλοντικό αποτύπωμα, τις οδηγίες φροντίδας, επισκευής και ανακύκλωσης — επιτρέποντας στον καταναλωτή να λαμβάνει τεκμηριωμένες αποφάσεις και στις εταιρείες να αποδεικνύουν ουσιαστικές δράσεις βιωσιμότητας.

Σύμφωνα με τον Κανονισμό Οικολογικού Σχεδιασμού για Βιώσιμα Προϊόντα (ESPR — Ecodesign for Sustainable Products Regulation) της Ευρωπαϊκής Ένωσης, που εγκρίθηκε το 2024, το DPP θα καταστεί υποχρεωτικό για κατηγορίες προϊόντων όπως τα υφάσματα και τα ενδύματα που διατίθενται στην ευρωπαϊκή αγορά, με την εφαρμογή του να ξεκινά σταδιακά

από τα μέσα της δεκαετίας του 2020 και με στόχο τη λειτουργία ενιαίου ψηφιακού μητρώου DPP από το 2026. Η συστηματική ανασκόπηση των Carvalho et al. (2025) τεκμηριώνει ότι το DPP λειτουργεί ως «γέφυρα» μεταξύ τεχνολογικής καινοτομίας και βιωσιμότητας στον κλάδο κλωστοϋφαντουργίας και ενδυμάτων, παρέχοντας πρωτόγνωρη διαφάνεια και ιχνηλασιμότητα που διευκολύνει βιώσιμες πρακτικές σε ολόκληρη την αλυσίδα αξίας.

Επιπλέον, η κυκλική οικονομία στη μόδα ενισχύεται επίσης από ψηφιακές πλατφόρμες που υποστηρίζουν την επαναχρησιμοποίηση και την ανταλλαγή ενδυμάτων, επεκτείνοντας τον κύκλο ζωής τους και μειώνοντας τη ζήτηση για νέα παραγωγή (Ki et al., 2020). Η επιτυχής υιοθέτηση κυκλικών πρακτικών στη μόδα απαιτεί τόσο τεχνολογικές καινοτομίες — όπως οι ψηφιακές πλατφόρμες και τα DPPs (Carvalho et al., 2025) — όσο και αλλαγές στη νοοτροπία των καταναλωτών και θεσμικά πλαίσια που ευνοούν τη διαφάνεια και την ιχνηλασιμότητα (Ki et al., 2020). Επομένως, η ψηφιακή μόδα δεν αποτελεί αυτόνομη λύση, αλλά θεμελιώδη υποδομή για τη βιωσιμότητα της μόδας σε συστημικό επίπεδο (Casciani et al., 2022).

Τέλος, όπως αναδείχθηκε στο παρόν κεφάλαιο, η ψηφιακή μόδα αποτελεί καταλυτικό παράγοντα μετασχηματισμού του κύκλου παραγωγής, καθώς οι τεχνολογίες 3D virtual sampling, Digital Product Creation και τεχνητής νοημοσύνης επιτρέπουν την εικονική αξιολόγηση προϊόντων πριν τη φυσική τους υλοποίηση. Ωστόσο, η πλήρης αξιοποίηση των δυνατοτήτων του ψηφιακού μετασχηματισμού στη μόδα απαιτεί την εξέταση και άλλων τεχνολογιών που μπορούν να ενισχύσουν την εμπειρία αξιολόγησης προϊόντων. Στο επόμενο κεφάλαιο εξετάζεται η Εικονική Πραγματικότητα (VR), μια τεχνολογία που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τη βιομηχανία της μόδας, αναλύοντας τα χαρακτηριστικά της, τις εφαρμογές της και τον πιθανό ρόλο της στη μείωση της παραγωγής και της σπατάλης υλικών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΕΙΚΟΝΙΚΗ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΤΗΣ ΜΟΔΑΣ

3.1 Ορισμός και Τεχνολογικά Χαρακτηριστικά της Εικονικής Πραγματικότητας (Virtual Reality)

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μετατόπιση από τη γενικότερη ανάλυση της ψηφιακής μόδας προς την ειδικότερη εξέταση της εικονικής πραγματικότητας ως τεχνολογίας αξιολόγησης, παρουσίασης και αλληλεπίδρασης με ψηφιακά προϊόντα μόδας. Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναδείχθηκε ότι η ψηφιοποίηση του σχεδιασμού, η τρισδιάστατη ανάπτυξη προϊόντος, τα ψηφιακά δίδυμα και τα εικονικά showrooms μετασχηματίζουν ήδη τον τρόπο με τον οποίο τα ενδύματα σχεδιάζονται, ελέγχονται και προωθούνται πριν από τη μαζική παραγωγή. Οι τεχνολογίες αυτές δεν περιορίζονται στην απλή ψηφιακή απεικόνιση ενός ενδύματος, αλλά επιτρέπουν τη δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων, την αξιολόγηση εναλλακτικών εκδοχών και τη μεταφορά μέρους της διαδικασίας έγκρισης από το φυσικό στο ψηφιακό περιβάλλον. Η εικονική πραγματικότητα εντάσσεται σε αυτό το οικοσύστημα όχι ως αυτόνομη λύση για τη μείωση της σπατάλης, αλλά ως εμπυθιστικό περιβάλλον μέσα στο οποίο τα ήδη παραγόμενα 3D ψηφιακά ενδύματα, δείγματα ή συλλογές μπορούν να παρουσιαστούν, να εξεταστούν και να αξιολογηθούν με μεγαλύτερη αίσθηση χώρου, κλίμακας και παρουσίας (Slater & Sanchez-Vives, 2016; LaValle, 2023; Kim, 2023).

Η σημασία αυτής της προσέγγισης είναι ιδιαίτερη για την παρούσα εργασία, καθώς το ζητούμενο δεν είναι να εξεταστεί η Εικονική Πραγματικότητα - VR (Virtual Reality) μόνο ως τεχνολογικά εντυπωσιακό ή εμπορικά καινοτόμο μέσο, αλλά να αξιολογηθεί ο πιθανός ρόλος της στη μείωση της παραγωγής και της σπατάλης υλικών στη βιομηχανία της μόδας. Όπως αναδείχθηκε στο Κεφάλαιο 1, η σπατάλη υλικών δεν εμφανίζεται αποκλειστικά στο τέλος του κύκλου ζωής ενός προϊόντος, αλλά διαμορφώνεται ήδη στα πρώιμα στάδια ανάπτυξης, μέσα από διαδικασίες σχεδιασμού, κοπής, τεχνικών διορθώσεων και προ-παραγωγικής έγκρισης. Ιδιαίτερα η δημιουργία φυσικών δειγμάτων αποτελεί κρίσιμο στάδιο, καθώς συχνά απαιτεί πολλαπλές εκδοχές πρωτοτύπων για την αξιολόγηση ενός σχεδίου ώστε να φτάσει στο επόμενο στάδιο της παραγωγής. Σε αυτό το πλαίσιο, η VR μπορεί να λειτουργήσει συμπληρωματικά

προς τον 3D σχεδιασμό και τα ψηφιακά δείγματα, προσφέροντας ένα πιο χωρικό, διαδραστικό και εμπειρικό περιβάλλον αξιολόγησης πριν από τη δέσμευση φυσικών πόρων.

3.1.1 Ορισμός εικονικής πραγματικότητας

Η εικονική πραγματικότητα, ή Virtual Reality (VR), μπορεί να οριστεί ως τεχνολογία που δημιουργεί μέσω υπολογιστή ένα τεχνητό τρισδιάστατο περιβάλλον, το οποίο παρουσιάζεται στον χρήστη με τέτοιο τρόπο ώστε να αντικαθιστά, σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό, τα αισθητηριακά ερεθίσματα του φυσικού κόσμου. Σε αντίθεση με μια απλή ψηφιακή εικόνα ή ένα συμβατικό τρισδιάστατο μοντέλο που προβάλλεται σε οθόνη, η VR επιδιώκει να δημιουργήσει την αίσθηση ότι ο χρήστης δεν παρατηρεί απλώς ένα ψηφιακό αντικείμενο από απόσταση, αλλά βρίσκεται μέσα σε έναν εικονικό χώρο και μπορεί να αλληλεπιδράσει με αυτόν. Στην πιο βασική της μορφή, η VR επιτρέπει την οπτική πρόσβαση σε έναν ψηφιακά κατασκευασμένο χώρο. Στην πιο ανεπτυγμένη μορφή της, όμως, συνδυάζει οπτική, ακουστική και κινητική πληροφορία, ώστε η εμπειρία να γίνεται χωρική, διαδραστική και σωματικά εμπλεκόμενη (Slater & Sanchez-Vives, 2016; LaValle, 2023).

Σύμφωνα με τον Steuer (1995), η εικονική πραγματικότητα δεν περιορίζεται αποκλειστικά σε συγκεκριμένο τεχνολογικό εξοπλισμό, αλλά συνδέεται κυρίως με την αίσθηση συμμετοχής του χρήστη μέσα σε ένα συνθετικό περιβάλλον αντί της εξωτερικής παρατήρησης του. Η προσέγγιση αυτή μετατοπίζει την έμφαση από τις ίδιες τις συσκευές στην εμπειρία εμπύθισης και αλληλεπίδρασης που βιώνει ο χρήστης μέσα στο εικονικό περιβάλλον.

Αντίστοιχα, ο LaValle (2023) υποστηρίζει ότι η εικονική πραγματικότητα βασίζεται στην τεχνητή αισθητηριακή διέγερση, μέσω της οποίας αντικαθίστανται ή ενισχύονται τα πραγματικά αισθητηριακά ερεθίσματα, δημιουργώντας την αίσθηση παρουσίας σε έναν εναλλακτικό ψηφιακό κόσμο.

Επιπλέον, οι Slater και Sanchez-Vives (2016) περιγράφουν την εμπυθιστική εικονική πραγματικότητα ως ένα σύστημα που επιχειρεί να αντικαταστήσει τις πραγματικές αισθητηριακές αντιλήψεις με υπολογιστικά παραγόμενα ερεθίσματα. Η σημασία αυτής της προσέγγισης βρίσκεται στο ότι η VR δεν βασίζεται μόνο στην οπτική αναπαράσταση, αλλά στη δημιουργία ενός συνεχούς αισθητηριοκινητικού βρόχου ανάμεσα στο σώμα του χρήστη και στο ψηφιακό περιβάλλον. Όταν ο χρήστης στρέφει το κεφάλι, κοιτάζει γύρω του, πλησιάζει ένα αντικείμενο ή αλλάζει θέση, το σύστημα πρέπει να ανανεώνει σε πραγματικό χρόνο την

εικόνα, τον ήχο και τις σχετικές χωρικές πληροφορίες. Με αυτόν τον τρόπο, το εικονικό περιβάλλον δεν γίνεται αντιληπτό ως στατική εικόνα, αλλά ως χώρος που ανταποκρίνεται στις κινήσεις και στις ενέργειες του χρήστη. Η αίσθηση αυτή αποτελεί βασική προϋπόθεση για την εμπειρία παρουσίας, δηλαδή για την υποκειμενική εντύπωση ότι ο χρήστης βρίσκεται «μέσα» στο εικονικό περιβάλλον και όχι απλώς απέναντι από αυτό.

Η διάκριση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη βιομηχανία της μόδας, επειδή η αξιολόγηση ενός ενδύματος δεν αφορά αποκλειστικά την επίπεδη εικόνα του. Ένα ένδυμα αξιολογείται ως προς τη γραμμή, την κλίμακα, τη σχέση του με το σώμα, τη συνολική αισθητική του, την παρουσία του στον χώρο και, όταν αυτό είναι τεχνικά εφικτό, την κίνησή του πάνω σε ένα avatar ή σε ένα εικονικό σώμα. Σε μία στατικά αποδιδόμενη τρισδιάστατη εικόνα (render) ή σε μια δισδιάστατη εικόνα, ο παρατηρητής βλέπει το προϊόν από συγκεκριμένη οπτική γωνία. Αντίθετα, σε ένα περιβάλλον VR μπορεί να αλλάζει απόσταση, να κινηθεί γύρω από το αντικείμενο, να συγκρίνει διαφορετικές εκδοχές και να αντιληφθεί καλύτερα τη σχέση του ψηφιακού ενδύματος με τον εικονικό χώρο. Επομένως, η VR προσφέρει μια πιο εμπειρική και χωρική μορφή αξιολόγησης σε σχέση με την απλή ψηφιακή προβολή, στοιχείο που είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε εφαρμογές μόδας όπου η αισθητική, η κλίμακα και η συνολική παρουσίαση του προϊόντος επηρεάζουν τη διαδικασία λήψης αποφάσεων (Kim, 2023).

Ωστόσο, είναι αναγκαίο να διευκρινιστεί ότι η VR δεν παράγει από μόνη της το ψηφιακό ένδυμα ούτε υποκαθιστά πλήρως τη φυσική εμπειρία του υφάσματος. Η ρεαλιστική αναπαράσταση της εφαρμογής, της πτώσης, της ελαστικότητας και της συμπεριφοράς ενός ενδύματος εξαρτάται από τα δεδομένα και τα λογισμικά τρισδιάστατου σχεδιασμού και προσομοίωσης υφασμάτων που έχουν προηγηθεί. Στο Κεφάλαιο 2 έχει ήδη αναδειχθεί ότι ο 3D ψηφιακός σχεδιασμός ενσωματώνει μηχανισμούς φυσικής προσομοίωσης, ώστε να αναπαραστήσει στοιχεία όπως η πτώση, το βάρος και η ελαστικότητα του υφάσματος πάνω σε avatars (Casciani et al., 2022; McQuillan, 2020; Erdem et al., 2026).

Στη βιβλιογραφία διακρίνεται συχνά η εμβυθιστική VR (Immersive Virtual Reality, IVR) από τη μη εμβυθιστική ή επιτραπέζια VR (Desktop Virtual Reality, DVR). Η πρώτη συνδέεται συνήθως με τη χρήση Head-Mounted Display (HMD), δηλαδή συσκευής που φοριέται στο κεφάλι και καλύπτει το οπτικό πεδίο του χρήστη, παρέχοντας στερεοσκοπική εικόνα και παρακολούθηση κίνησης (Slater & Sanchez-Vives, 2016; LaValle, 2023). Η δεύτερη αναφέρεται σε εικονικά περιβάλλοντα που προβάλλονται σε συμβατική οθόνη υπολογιστή ή

άλλη επίπεδη συσκευή. Και οι δύο μορφές μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη μόδα, όμως δεν προσφέρουν την ίδια εμπειρία. Η desktop VR μπορεί να είναι πιο προσβάσιμη, οικονομική και εύκολη στην εφαρμογή, αλλά η immersive VR έχει μεγαλύτερη ικανότητα να δημιουργήσει αίσθηση παρουσίας, δηλαδή την υποκειμενική εντύπωση ότι ο χρήστης βρίσκεται μέσα στο εικονικό περιβάλλον. Η Ricci et al. (2023), συγκρίνοντας IVR και DVR σε εικονικό κατάστημα μόδας, έδειξαν ότι η IVR εμπειρία είχε καλύτερη συνολική εμπειρία για τον χρήστη και μεγαλύτερη διάρκεια παραμονής στο εικονικό περιβάλλον σε αντίθεση με την DVR. Τα ευρήματα αυτά δείχνουν ότι η μεγαλύτερη εμβύθιση δεν λειτουργεί μόνο ως τεχνολογικό χαρακτηριστικό, αλλά μπορεί να επηρεάσει τον τρόπο με τον οποίο οι χρήστες βιώνουν, αξιολογούν και αλληλεπιδρούν με προϊόντα μόδας σε ψηφιακό περιβάλλον (Ricci, 2023).

Η τεχνολογική βάση της VR περιλαμβάνει ορισμένα βασικά στοιχεία. Το πρώτο είναι η οπτική απεικόνιση, συνήθως μέσω στερεοσκοπικών εικόνων που δημιουργούν αίσθηση βάθους. Το δεύτερο είναι η παρακολούθηση της θέσης και του προσανατολισμού του κεφαλιού, ώστε το περιβάλλον να μεταβάλλεται ανάλογα με την κίνηση του χρήστη. Το τρίτο είναι η αλληλεπίδραση, η οποία μπορεί να πραγματοποιείται με χειριστήρια, αισθητήρες χεριών, χειρονομίες, βλέμμα ή άλλα μέσα εισόδου. Το τέταρτο είναι η χρονική απόκριση του συστήματος (Slater & Sanchez-Vives, 2016; LaValle, 2023). Αν η εικόνα καθυστερεί να ακολουθήσει την κίνηση του κεφαλιού, η εμπειρία γίνεται λιγότερο πειστική και μπορεί να προκαλέσει κόπωση ή ναυτία. Για αυτόν τον λόγο, παράγοντες όπως το οπτικό πεδίο, η ανάλυση της εικόνας, η καθυστέρηση απόκρισης και η ακρίβεια παρακολούθησης αποτελούν κρίσιμα τεχνικά χαρακτηριστικά της VR (LaValle, 2023; Kim, 2023).

Η αυξανόμενη σημασία της VR και των συναφών τεχνολογιών στη μόδα συνδέεται και με ευρύτερες τάσεις στο εμπόριο. Η Grand View Research εκτιμά ότι η παγκόσμια αγορά των virtual fitting rooms θα φτάσει τα 20,65 δισεκατομμύρια δολάρια έως το 2030, με κύριους παράγοντες ανάπτυξης την άνοδο των 3D, AR και VR τεχνολογιών και την προσπάθεια των επιχειρήσεων να βελτιώσουν την online εμπειρία δοκιμής (Grand View Research, 2024). Αυτά τα δεδομένα δεν αποδεικνύουν από μόνα τους ότι η VR οδηγεί σε βιωσιμότητα, δείχνουν όμως ότι η εικονική αξιολόγηση προϊόντων εξελίσσεται από περιφερειακή καινοτομία σε σημαντικό πεδίο στρατηγικού ενδιαφέροντος για τη μόδα (Grand View Research, 2024).

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, το ενδιαφέρον εστιάζεται σε τι βαθμό μπορεί η εικονική πραγματικότητα να υποστηρίξει αποφάσεις πριν την παραγωγή, με στόχο τη μείωση της παραγωγής και σπατάλης.

3.1.2 Βαθμοί ελευθερίας (Degrees of Freedom) και αλληλεπίδραση

Για να κατανοηθεί η λειτουργία της VR στη μόδα, είναι απαραίτητο να εξεταστεί η έννοια των βαθμών ελευθερίας, γνωστή ως Degrees of Freedom (DoF). Οι βαθμοί ελευθερίας περιγράφουν τους τρόπους με τους οποίους ένα αντικείμενο ή μια συσκευή μπορεί να κινηθεί και να παρακολουθηθεί μέσα στον τρισδιάστατο χώρο (LaValle, 2023). Στην περίπτωση της VR, η έννοια αυτή αφορά κυρίως το πόσο ακριβώς το σύστημα καταγράφει τις κινήσεις του κεφαλιού, του σώματος ή των χειριστηρίων του χρήστη και πώς τις μεταφράζει σε αντίστοιχες κινήσεις μέσα στο εικονικό περιβάλλον (Slater & Sanchez-Vives, 2016; LaValle, 2023).

Η βασική διάκριση γίνεται ανάμεσα στα συστήματα 3DoF και 6DoF. Τα συστήματα 3DoF παρακολουθούν μόνο τις περιστροφικές κινήσεις του κεφαλιού: αριστερά και δεξιά, πάνω και κάτω, καθώς και την κλίση του κεφαλιού. Με τέτοιου τύπου παρακολούθηση, ο χρήστης μπορεί να κοιτάζει γύρω του μέσα στο εικονικό περιβάλλον, αλλά δεν μπορεί να μετακινηθεί πραγματικά μέσα σε αυτό. Αν σκύψει ή κάνει ένα βήμα μπροστά, το σύστημα δεν μεταφράζει αυτή την κίνηση σε αλλαγή θέσης μέσα στον εικονικό χώρο. Αντίθετα, τα συστήματα 6DoF παρακολουθούν τόσο τις περιστροφικές όσο και τις μεταφορικές κινήσεις: κίνηση προς τα εμπρός και πίσω, δεξιά και αριστερά, πάνω και κάτω. Αυτό σημαίνει ότι ο χρήστης μπορεί να πλησιάσει ένα ψηφιακό αντικείμενο, να το περιεργαστεί από διαφορετικές γωνίες και να αισθανθεί μεγαλύτερη ελευθερία κίνησης (Papaefthymiou et al., 2015; LaValle, 2023; Slater & Sanchez-Vives, 2016).

Η διαφορά αυτή έχει άμεση σημασία για τη μόδα. Σε μια απλή εμπειρία 3DoF, ο χρήστης μπορεί να παρακολουθήσει μια εικονική πασαρέλα ή να δει έναν χώρο γύρω του, όμως η εμπειρία παραμένει κυρίως παρατηρητική. Σε ένα περιβάλλον 6DoF, μπορεί να πλησιάσει ένα ένδυμα, να ελέγξει λεπτομέρειες, να αλλάξει απόσταση, να δει πώς το ρούχο φαίνεται σε σχέση με το σώμα ή τον χώρο και να συμμετάσχει πιο ενεργά στη διαδικασία αξιολόγησης (Slater & Sanchez-Vives, 2016; Kim, 2023). Για τους σχεδιαστές, τους buyers και τις ομάδες ανάπτυξης προϊόντος, αυτή η δυνατότητα είναι κρίσιμη, επειδή η αξιολόγηση ενός ενδύματος συχνά απαιτεί εστίαση σε λεπτομέρειες που δεν είναι ορατές από μία μόνο οπτική γωνία (Moltenbrey & Fischer, 2021).

Η αλληλεπίδραση στη VR δεν περιορίζεται στην κίνηση του κεφαλιού. Τα σύγχρονα συστήματα μπορούν να περιλαμβάνουν χειριστήρια, hand tracking, eye tracking και απτική ανάδραση (LaValle, 2023). Τα χειριστήρια επιτρέπουν στον χρήστη να επιλέγει, να περιστρέφει ή να μετακινεί ψηφιακά αντικείμενα. Το hand tracking επιτρέπει την αναγνώριση των κινήσεων των χεριών χωρίς απαραίτητα τη χρήση φυσικού controller. Το eye tracking παρακολουθεί την κατεύθυνση του βλέμματος και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πιο φυσική πλοήγηση, για ανάλυση προσοχής ή για βελτίωση της απόδοσης γραφικών. Η απτική ανάδραση (haptic feedback), επιχειρεί να προσθέσει κάποια μορφή αίσθησης αφής, μέσω δονήσεων, αντίστασης ή πιο σύνθετων συστημάτων ανάδρασης (LaValle, 2023; Slater & Sanchez-Vives, 2016).

Στη μόδα, η αφή αποτελεί ένα από τα πιο δύσκολα στοιχεία προς ψηφιακή αναπαράσταση. Η υφή, το βάρος, η ελαστικότητα και η θερμική αίσθηση ενός υφάσματος δεν μεταφέρονται εύκολα σε ένα εικονικό περιβάλλον. Για αυτόν τον λόγο, η VR δεν πρέπει να θεωρηθεί άμεσο υποκατάστατο όλων των υλικών δοκιμών (Ricci et al., 2023). Μπορεί όμως να λειτουργήσει συμπληρωματικά, ιδιαίτερα όταν συνδυάζεται με 3D προσομοιώσεις υφασμάτων, βιβλιοθήκες υλικών και avatars. Το ζητούμενο δεν είναι να εξαλειφθεί κάθε φυσικό δείγμα σε όλες τις περιπτώσεις, αλλά να μειωθούν οι επαναλήψεις. Αν ένα σχέδιο μπορεί να απορριφθεί, να διορθωθεί ή να εγκριθεί σε ψηφιακό περιβάλλον πριν κατασκευαστεί, τότε μειώνεται η πιθανότητα άσκοπης παραγωγής φυσικού πρωτοτύπου (Moltenbrey & Fischer, 2021; Casciani et al., 2022).

Η μελέτη των Moltenbrey και Fischer (2021) προσπαθεί να προσεγγίσει αυτή την κατεύθυνση. Στο πλαίσιο του Λιανεμπορίου 4.0 (Retail 4.0), οι συγγραφείς περιγράφουν λύσεις εικονικής πραγματικότητας (VR) και επαυξημένης πραγματικότητας (AR) που επιτρέπουν στους λιανοπωλητές και τους κατασκευαστές να ανταλλάσσουν πληροφορίες για μελλοντικές συλλογές σε εικονικά εκθεσιακά περιβάλλοντα (virtual showrooms), χρησιμοποιώντας συσκευές εικονικής πραγματικότητας. Με αυτόν τον τρόπο, οι αγοραστές (buyers) και οι σχεδιαστές μπορούν να συμμετέχουν σε διαδικασίες αξιολόγησης χωρίς να απαιτείται πάντοτε φυσική παρουσία, μετακίνηση ή η δημιουργία πολλαπλών φυσικών δειγμάτων. Η μελέτη τονίζει ότι τέτοιες λύσεις μπορούν να υποστηρίξουν ταχύτερη ανατροφοδότηση από το λιανεμπόριο προς την ανάπτυξη προϊόντων και να περιορίσουν ή ακόμη και να υποκαταστήσουν μέρος της παραγωγής φυσικών δειγμάτων. Η σημασία αυτής της προσέγγισης έγκειται στο ότι η εικονική πραγματικότητα δεν αντιμετωπίζεται απλώς ως εργαλείο

παρουσίασης, αλλά ως μέσο επικοινωνίας και λήψης αποφάσεων στο πλαίσιο της διαδικασίας ανάπτυξης συλλογών (Moltenbrey & Fischer, 2021).

Παρόμοια, οι Casciani, Chkanikova και Pal (2022) υποστηρίζουν ότι οι τρισδιάστατες εικονικές και ψηφιακές τεχνολογίες (3D virtual and digital technologies), στις οποίες εντάσσονται η 3D μοντελοποίηση, η VR, η AR, η 2D/3D σάρωση και τα digital twins, συμβάλλουν στην αποϋλοποίηση του παραδοσιακού μοντέλου παραγωγής και διανομής της μόδας. Η έννοια της αποϋλοποίησης εδώ δεν σημαίνει ότι η μόδα παύει να παράγει υλικά προϊόντα. Σημαίνει ότι ορισμένες δραστηριότητες που απαιτούσαν φυσικό υλικό, μεταφορές ή παρουσία μπορούν να μεταφερθούν σε ψηφιακές διαδικασίες. Στο πλαίσιο της VR, αυτό αφορά κυρίως τη δυνατότητα παρουσίασης και αξιολόγησης συλλογών, πρωτοτύπων και εμπορικών χώρων χωρίς να απαιτείται κάθε φορά φυσική παραγωγή ή φυσική μετακίνηση όλων των εμπλεκόμενων μερών (Moltenbrey & Fischer, 2021).

Παρά τα πλεονεκτήματα, τα τεχνολογικά χαρακτηριστικά της εικονικής πραγματικότητας συνοδεύονται και από ορισμένους περιορισμούς. Η ποιότητα της εμπειρίας εξαρτάται από παράγοντες όπως το βάρος και η άνεση της συσκευής προβολής κεφαλής (Head-Mounted Display – HMD), η ανάλυση της εικόνας, η σταθερότητα της σύνδεσης, ο βαθμός ρεαλισμού των τρισδιάστατων ψηφιακών μοντέλων, η ακρίβεια των προσομοιώσεων και η εξοικείωση των χρηστών με την τεχνολογία (LaValle, 2023· Kim, 2023). Η Kim (2023), εξετάζοντας εικονικούς χώρους επίδειξης μόδας, αναφέρει ότι, παρά τη δυνατότητα δημιουργίας γνωστικής παρουσίας, αισθητηριακής εμπύθισης, συναισθηματικής εμπλοκής και αισθητικής αλληλεπίδρασης, τεχνικά ζητήματα όπως το βάρος της συσκευής εικονικής πραγματικότητας, οι καθυστερήσεις φόρτωσης δεδομένων (buffering) και τα προβλήματα συνδεσιμότητας μπορούν να μειώσουν την ποιότητα της εμπειρίας. Αυτό υποδηλώνει ότι η αποτελεσματικότητα της εικονικής πραγματικότητας στη βιομηχανία της μόδας δεν εξαρτάται μόνο από τη διαθεσιμότητα της τεχνολογίας, αλλά και από τον τρόπο ενσωμάτωσής της σε μια αξιόπιστη, εργονομική και λειτουργική διαδικασία (Moltenbrey & Fischer, 2021).

3.1.3 Σύγκριση VR, AR και Mixed Reality στη μόδα

Η εικονική πραγματικότητα συχνά συγχέεται με συγγενείς τεχνολογίες, όπως η επαυξημένη πραγματικότητα (Augmented Reality, AR), η μικτή πραγματικότητα (Mixed Reality, MR) και η εκτεταμένη πραγματικότητα (Extended Reality, XR). Η διάκριση αυτών των όρων είναι

απαραίτητη, διότι κάθε τεχνολογία έχει διαφορετική σχέση με τον φυσικό κόσμο και, συνεπώς, διαφορετικές εφαρμογές στη μόδα (Skarbez et al., 2021; Casciani et al., 2022).

Για την κατανόηση αυτής της σχέσης γίνεται χρήση του θεωρητικού πλαισίου reality virtuality continuum των Miligram και Kishino. Σύμφωνα με αυτή την προσέγγιση, στο ένα άκρο βρίσκεται το πραγματικό περιβάλλον και στο άλλο το πλήρως εικονικό περιβάλλον. Ανάμεσα στα δύο άκρα βρίσκονται μορφές μικτής πραγματικότητας, όπου πραγματικά και ψηφιακά στοιχεία συνυπάρχουν σε διαφορετικές αναλογίες. Οι Skarbez, Smith και Whitton (2021), επανεξετάζοντας το μοντέλο αυτό, υπογραμμίζουν ότι η αρχική τυπολογία παραμένει χρήσιμη, αλλά χρειάζεται προσαρμογή στις σύγχρονες τεχνολογίες, επειδή οι σημερινές εμπειρίες δεν διακρίνονται μόνο από το αν προβάλλουν πραγματικά ή ψηφιακά αντικείμενα, αλλά και από τον βαθμό εμπύθισης, τη γνώση του συστήματος για τον φυσικό κόσμο και τη συνοχή της εμπειρίας.

Η VR βρίσκεται πιο κοντά στο άκρο του πλήρως εικονικού περιβάλλοντος. Σε μια εφαρμογή VR, ο χρήστης αποκόπτεται οπτικά από τον φυσικό χώρο και μεταφέρεται σε έναν ψηφιακά κατασκευασμένο χώρο (Skarbez et al., 2021; LaValle, 2023). Στη μόδα, αυτό μπορεί να σημαίνει ένα virtual showroom, μια εικονική πασαρέλα, ένα ψηφιακό κατάστημα ή ένα περιβάλλον αξιολόγησης πρωτοτύπων. Η βασική αξία της VR είναι ότι επιτρέπει τον σχεδιασμό χώρων και εμπειριών που δεν περιορίζονται από φυσικές διαστάσεις, γεωγραφικές αποστάσεις ή κόστος φυσικής εγκατάστασης. Για παράδειγμα, μια συλλογή μπορεί να παρουσιαστεί σε αγοραστές από διαφορετικές χώρες μέσα σε ένα κοινό εικονικό περιβάλλον, χωρίς να χρειάζεται να σταλούν όλα τα φυσικά δείγματα ή να οργανωθεί φυσική παρουσίαση (Moltenbrey & Fischer, 2021; Kim, 2023).

Η AR (Augmented Reality – Επαυξημένη Πραγματικότητα) , αντίθετα, δεν αντικαθιστά το πραγματικό περιβάλλον. Προσθέτει ψηφιακά στοιχεία πάνω στον φυσικό κόσμο, συνήθως μέσω οθόνης κινητού, tablet, smart mirror ή AR glasses. Στη μόδα, η πιο διαδεδομένη εφαρμογή της AR είναι το virtual try-on, όπου ο καταναλωτής βλέπει ένα ένδυμα, αξεσουάρ, παπούτσι ή καλλυντικό να εμφανίζεται ψηφιακά πάνω στο σώμα ή στο πρόσωπό του. Η Karadayi-Usta (2024) τονίζει ότι οι AR εφαρμογές στη μόδα συνδέονται με λύσεις try-on, 3D scanning και 3D visualization, οι οποίες μπορούν να βοηθήσουν τον καταναλωτή να αξιολογήσει καλύτερα την καταλληλότητα ενός προϊόντος πριν από την αγορά. Η χρησιμότητα

αυτών των εργαλείων σχετίζεται με ένα από τα πιο σημαντικά προβλήματα του ηλεκτρονικού εμπορίου μόδας: την αβεβαιότητα ως προς το μέγεθος, την εφαρμογή και την εμφάνιση.

Η MR βρίσκεται ανάμεσα στη VR και την AR, καθώς επιχειρεί να συνδυάσει φυσικά και ψηφιακά στοιχεία με πιο αμφίδρομο τρόπο. Σε μια απλή AR εφαρμογή, ένα ψηφιακό αντικείμενο μπορεί απλώς να προβάλλεται πάνω στον πραγματικό κόσμο. Σε μια πιο ανεπτυγμένη MR εμπειρία, το ψηφιακό αντικείμενο μπορεί να «γνωρίζει» τον φυσικό χώρο, να τοποθετείται σταθερά μέσα σε αυτόν και να αλληλεπιδρά με πραγματικά αντικείμενα ή κινήσεις του χρήστη (Skarbez et al., 2021). Για τη μόδα, αυτό μπορεί να σημαίνει ένα φυσικό κατάστημα όπου ο πελάτης βλέπει επιπλέον ψηφιακές εκδοχές προϊόντων, χρώματα που δεν υπάρχουν στο ράφι ή συνδυασμούς ενδυμάτων σε πραγματικό χώρο. Μπορεί επίσης να σημαίνει ένα περιβάλλον ανάπτυξης προϊόντος όπου φυσικά υφάσματα και ψηφιακά πρωτότυπα συνυπάρχουν στην ίδια διαδικασία αξιολόγησης (Casciani et al., 2022; Moltenbrey & Fischer, 2021).

Η XR λειτουργεί ως ευρύτερος όρος ομπρέλα που περιλαμβάνει VR, AR, MR και άλλες μορφές χωρικής υπολογιστικής εμπειρίας, πράγμα που σημαίνει ότι οι τεχνολογίες αυτές δεν λειτουργούν απομονωμένα (Skarbez et al., 2021). Στην πράξη, μια εταιρεία μόδας μπορεί να χρησιμοποιεί 3D design για την ανάπτυξη ενός ψηφιακού ενδύματος, VR για την παρουσίαση της συλλογής σε buyers, AR για την καταναλωτική δοκιμή και digital twins για τη διαχείριση δεδομένων προϊόντος (Casciani et al., 2022; Karadayi-Usta, 2024; Moltenbrey & Fischer, 2021). Το ζητούμενο, επομένως, δεν είναι να επιλεγεί μία τεχνολογία ως μοναδική λύση, αλλά να κατανοηθεί ποια τεχνολογία είναι κατάλληλη για κάθε στάδιο του κύκλου παραγωγής και κατανάλωσης.

Η διάκριση VR, AR και MR έχει άμεση σημασία για τη μείωση της σπατάλης υλικών. Η VR είναι ιδιαίτερα χρήσιμη όταν χρειάζεται να αναπαρασταθεί ένας πλήρης εικονικός χώρος. Για παράδειγμα, ένα showroom, μια πασαρέλα, μια συνάντηση συλλογής ή ένα περιβάλλον αξιολόγησης πρωτοτύπων. Η AR είναι πιο κατάλληλη όταν το ψηφιακό προϊόν πρέπει να προβληθεί πάνω στον φυσικό χρήστη ή στον φυσικό χώρο, όπως στις εφαρμογές virtual try on. Η MR μπορεί να υποστηρίξει υβριδικές διαδικασίες, όπου φυσικά και ψηφιακά στοιχεία πρέπει να συνυπάρξουν. Επομένως, στο επίπεδο της παραγωγής, η VR συνδέεται περισσότερο με την προ-παραγωγική αξιολόγηση και την παρουσίαση συλλογών, ενώ η AR συνδέεται πιο άμεσα

με τη μείωση αβεβαιότητας στην καταναλωτική αγορά και, πιθανώς, με τη μείωση επιστροφών (Karadayi-Usta, 2024; Moltenbrey & Fischer, 2021, Skarbez et al., 2021).

Συνολικά, η VR ως τεχνολογία χωρικής και αισθητηριακής προσομοίωσης, προσφέρει στη μόδα ένα νέο πεδίο αξιολόγησης πριν από τη φυσική παραγωγή. Παρ' όλα αυτά δεν αποτελεί αυτόματη λύση στο πρόβλημα της σπατάλης, ούτε μπορεί από μόνη της να καταργήσει την ανάγκη για υλικά, δοκιμές και τεχνική γνώση. Η VR λειτουργεί ως περιβάλλον όπου τα ψηφιακά αντικείμενα αποκτούν χωρική παρουσία και μπορούν να αξιολογηθούν πιο ρεαλιστικά πριν δεσμευτούν φυσικοί πόροι. Η επόμενη ενότητα εξετάζει ακριβώς αυτόν τον μηχανισμό, μέσα από τις έννοιες της εμβύθισης και της αίσθησης παρουσίας.

3.2 Εμβύθιση και Αίσθηση Παρουσίας

Η προηγούμενη ενότητα ανέδειξε την εικονική πραγματικότητα ως τεχνολογία που δεν περιορίζεται στην απλή τρισδιάστατη απεικόνιση, αλλά δημιουργεί έναν χώρο μέσα στον οποίο ο χρήστης μπορεί να κινηθεί, να παρατηρήσει και να αλληλεπιδράσει με ψηφιακά αντικείμενα. Ωστόσο, για να αποκτήσει η VR ουσιαστική αξία στη βιομηχανία της μόδας, δεν αρκεί να προσφέρει ένα εντυπωσιακό οπτικό αποτέλεσμα. Το κρίσιμο ζήτημα είναι αν μπορεί να δημιουργήσει συνθήκες αξιόπιστης εμπειρικής αξιολόγησης. Δηλαδή, να μπορεί ο χρήστης μπορεί να αντιληφθεί ένα ψηφιακό ένδυμα ή μια ψηφιακή συλλογή ως κάτι χωρικά παρόν, αισθητικά πειστικό και αρκετά κοντά στην πραγματική εμπειρία ώστε να στηρίζει αποφάσεις πριν από τη φυσική παραγωγή.

Σε αυτό το σημείο αποκτούν κεντρική σημασία οι έννοιες της εμβύθισης (immersion) και της αίσθησης παρουσίας (presence). Οι δύο όροι χρησιμοποιούνται συχνά σαν να είναι ταυτόσημοι, όμως στη θεωρία της εικονικής πραγματικότητας δηλώνουν διαφορετικά επίπεδα του ίδιου φαινομένου. Η εμβύθιση αφορά κυρίως το τι μπορεί να προσφέρει τεχνικά το σύστημα, όπως το οπτικό πεδίο, την στερεοσκοπική απεικόνιση, την ακρίβεια παρακολούθησης κίνησης, τη χαμηλή καθυστέρηση, ποιότητα ήχου και τις δυνατότητες αλληλεπίδρασης. Η παρουσία, αντίθετα, αφορά την ανθρώπινη αντίδραση σε αυτά τα ερεθίσματα, δηλαδή τον βαθμό στον οποίο ο χρήστης ανταποκρίνεται στο εικονικό περιβάλλον σαν αυτό να είχε πραγματική υπόσταση (Slater et al., 2009; Slater & Sanchez Vives, 2016).

Η διάκριση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, επειδή η συμβολή της VR στη μείωση της σπατάλης δεν προκύπτει απλώς από την ύπαρξη ψηφιακών μοντέλων. Προκύπτει όταν τα

ψηφιακά μοντέλα μπορούν να αξιολογηθούν με τέτοια πληρότητα ώστε να περιοριστεί η ανάγκη για επαναλαμβανόμενα φυσικά δείγματα. Όπως αναλύθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, η σπατάλη στη μόδα δεν δημιουργείται μόνο στο τέλος της χρήσης ενός προϊόντος, αλλά ξεκινά ήδη από τα στάδια σχεδιασμού, δημιουργίας πρωτοτύπων, αξιολόγησης και έγκρισης. Επομένως, κάθε τεχνολογία που μειώνει την ανάγκη υλικής δοκιμής πριν από την παραγωγή αποκτά ιδιαίτερη σημασία, υπό την προϋπόθεση ότι η ψηφιακή αξιολόγηση είναι επαρκώς αξιόπιστη.

3.2.1 Θεωρητικό πλαίσιο Presence (Παρουσίας)

Η έννοια της παρουσίας αποτελεί έναν από τους βασικούς θεωρητικούς άξονες στην έρευνα για τα εικονικά περιβάλλοντα. Οι Slater et al. (2009) την ορίζουν ως την τάση των ανθρώπων να ανταποκρίνονται σε εικονικά παραγόμενα αισθητηριακά δεδομένα σαν αυτά να ήταν πραγματικά. Με αυτή την έννοια, η παρουσία δεν είναι απλώς μια υποκειμενική δήλωση του τύπου «ένιωσα ότι ήμουν εκεί». Αφορά τον τρόπο με τον οποίο ο χρήστης συμπεριφέρεται μέσα στο περιβάλλον. Πώς στρέφει το σώμα του, πώς πλησιάζει ένα αντικείμενο, πώς αντιδρά σε ένα εικονικό πρόσωπο, πώς προσαρμόζει την κίνησή του και πώς αποδίδει νόημα σε όσα συμβαίνουν γύρω του.

Αυτή η λειτουργική προσέγγιση διαφοροποιεί την παρουσία από την απλή εμπλοκή ή το ενδιαφέρον. Ένας χρήστης μπορεί να είναι απορροφημένος από μια εικόνα ή ένα βίντεο χωρίς να αντιδρά σε αυτό σαν να βρίσκεται πραγματικά μέσα στον χώρο που απεικονίζεται. Στην VR, αντίθετα, το ζητούμενο είναι η δημιουργία μιας εμπειρίας όπου το εικονικό περιβάλλον παύει να γίνεται αντιληπτό μόνο ως μέσο προβολής και αρχίζει να λειτουργεί ως χώρος δράσης. Για τη μόδα, αυτό σημαίνει ότι το ψηφιακό ένδυμα δεν αντιμετωπίζεται απλώς ως render (στατική τρισδιάστατη απεικόνιση), αλλά ως αντικείμενο που μπορεί να παρατηρηθεί σε κλίμακα, να συγκριθεί με άλλα προϊόντα, να εξεταστεί σε σχέση με το σώμα και να ενταχθεί σε ένα συνολικό αισθητικό πλαίσιο.

Ο Slater (2009) αναλύει την παρουσία μέσα από δύο διακριτές, αλλά αλληλένδετες έννοιες: την Place Illusion (PI) και την Plausibility Illusion (Psi). Η Place Illusion αναφέρεται στην αίσθηση ότι ο χρήστης βρίσκεται πράγματι μέσα στον εικονικό χώρο, παρότι γνωρίζει ότι σωματικά παραμένει σε έναν φυσικό χώρο. Πρόκειται, δηλαδή, για τη χωρική διάσταση της παρουσίας. Σε ένα virtual showroom, για παράδειγμα, η PI αφορά την αίσθηση ότι ο χρήστης

βρίσκεται μέσα σε έναν χώρο παρουσίασης, ότι τα προϊόντα έχουν θέση γύρω του και ότι μπορεί να προσανατολιστεί μέσα σε αυτόν.

Η Plausibility Illusion είναι διαφορετική και, για τη μόδα, ίσως πιο απαιτητική. Δεν αφορά μόνο το αν ο χρήστης νιώθει ότι βρίσκεται «εκεί», αλλά το αν όσα συμβαίνουν μέσα στο περιβάλλον φαίνονται πειστικά και τον αφορούν. Ένα εικονικό showroom μπορεί να έχει σωστή κλίμακα, φωτισμό και χωρική διάταξη, αλλά να μην πείθει ως περιβάλλον αξιολόγησης αν τα ενδύματα δεν κινούνται φυσικά, αν τα υφάσματα φαίνονται άκαμπτα, αν τα avatars δεν αποδίδουν σωστά την εφαρμογή ή αν οι αλληλεπιδράσεις του χρήστη δεν έχουν ουσιαστικό αποτέλεσμα. Η Psi είναι επομένως ιδιαίτερα κρίσιμη για τον κλάδο της μόδας, διότι η αξιολόγηση ενός ενδύματος συνδέεται με την εφαρμογή, την πτώση, την κίνηση, τη λεπτομέρεια και την αισθητική συνοχή.

Οι Slater et al. (2009) προσδιορίζουν τρεις βασικές προϋποθέσεις για την εμφάνιση και διατήρηση της παρουσίας. Η πρώτη είναι ο συνεπής και χαμηλής καθυστέρησης αισθητηριοκινητικός βρόχος (sensorimotor loop), δηλαδή η αντιστοιχία ανάμεσα στην κίνηση του σώματος και στην ανανέωση των αισθητηριακών δεδομένων. Όταν ο χρήστης στρέφει το κεφάλι ή πλησιάζει ένα αντικείμενο, το εικονικό περιβάλλον πρέπει να ανταποκρίνεται άμεσα και φυσικά. Η δεύτερη είναι η στατιστική αληθοφάνεια (statistical plausibility): τα εικονικά ερεθίσματα δεν χρειάζεται να είναι απολύτως φωτορεαλιστικά, πρέπει όμως να είναι αρκετά συμβατά με τις αντιληπτικές προσδοκίες του χρήστη. Η τρίτη είναι οι συσχετίσεις συμπεριφοράς-απόκρισης (behaviour-response correlations), δηλαδή η ικανότητα του περιβάλλοντος να αντιδρά με νόημα στις ενέργειες του χρήστη.

Στο πεδίο της μόδας, οι τρεις αυτές προϋποθέσεις μπορούν να μεταφραστούν σε πρακτικά κριτήρια σχεδιασμού. Ο χρήστης πρέπει να μπορεί να εξετάζει ένα ένδυμα χωρίς τεχνικές ασυνέχειες, να αντιλαμβάνεται το υλικό και τη μορφή του με οπτική συνοχή και να λαμβάνει άμεση ανατροφοδότηση όταν αλλάζει χρώμα, ύφασμα, μέγεθος, οπτική γωνία ή συνδυασμό προϊόντων. Αν αυτά τα στοιχεία λειτουργούν πειστικά, η VR μπορεί να υποστηρίξει μια πιο ολοκληρωμένη προ-παραγωγική αξιολόγηση. Αν όχι, παραμένει ένα εντυπωσιακό αλλά περιορισμένο εργαλείο προβολής.

3.2.2 Immersion ως τεχνικό χαρακτηριστικό

Η εμπύθιση πρέπει να κατανοηθεί ως τεχνικό χαρακτηριστικό του συστήματος και όχι ως απλή ψυχολογική απορρόφηση. Οι Slater και Sanchez-Vives (2016) τονίζουν ότι ο βασικός τεχνολογικός στόχος της εμπυθιστικής VR είναι να επιτρέπει στον χρήστη να αντιλαμβάνεται το εικονικό περιβάλλον μέσα από φυσικές αισθητηριοκινητικές αντιστοιχίες. Η αντίληψη δεν είναι παθητική διαδικασία: χρησιμοποιούμε το σώμα μας για να δούμε, να πλησιάσουμε, να σκύψουμε, να κοιτάξουμε γύρω μας και να εξετάσουμε τον χώρο. Ένα σύστημα VR είναι περισσότερο εμπυθιστικό όσο καλύτερα υποστηρίζει αυτού του τύπου τη φυσική αντίληψη.

Η διάκριση immersion-presence γίνεται πιο σαφής μέσα από την αναλογία των Slater et al. (2009) με την αντίληψη του χρώματος. Το μήκος κύματος του φωτός μπορεί να μετρηθεί αντικειμενικά, αλλά η αντίληψη του χρώματος είναι ανθρώπινη εμπειρία. Με παρόμοιο τρόπο, η εμπύθιση είναι το τεχνικό υπόστρωμα του συστήματος, ενώ η παρουσία είναι η εμπειρική αντίδραση του χρήστη. Δύο διαφορετικά συστήματα μπορεί να έχουν διαφορετικά τεχνικά χαρακτηριστικά και, παρ' όλα αυτά, να παράγουν παρόμοια αίσθηση παρουσίας. Αντίστροφα, το ίδιο τεχνικό σύστημα μπορεί να προκαλέσει διαφορετική παρουσία σε διαφορετικούς χρήστες.

Η θέση αυτή έχει πρακτική σημασία για τη μόδα, επειδή δείχνει ότι δεν απαιτείται τέλειος ρεαλισμός για να υπάρξει χρήσιμη αξιολόγηση. Για ορισμένες αποφάσεις, όπως η γενική σιλουέτα, η αναλογία, η οπτική συνοχή μιας συλλογής ή η παρουσίαση ενός ενδύματος σε χώρο, η οπτική εμπύθιση μπορεί να είναι επαρκής. Ο χρήστης χρειάζεται να αντιληφθεί την κλίμακα, την απόσταση, τη σχέση με το σώμα και τη συνολική αισθητική. Δεν είναι απαραίτητο κάθε ιδιότητα του υφάσματος να αναπαράγεται πλήρως για να ληφθούν προκαταρκτικές αποφάσεις. Αντίθετα, η απαίτηση για απόλυτη προσομοίωση θα καθιστούσε τη VR πρακτικά δυσκίνητη και θα περιόριζε την εφαρμογή της.

Αυτό δεν σημαίνει ότι η πολυαισθητηριακή εμπειρία είναι αδιάφορη. Στη μόδα, η αφή, το βάρος, η ελαστικότητα και η υφή αποτελούν κρίσιμες ιδιότητες του προϊόντος. Η Kim (2023) δείχνει ότι στα VR fashion show spaces η αισθητηριακή εμπύθιση δεν εξαντλείται στην όραση, αλλά συνδέεται με την προσπάθεια του χρήστη να προσλάβει ιδιότητες του ενδύματος μέσα από μη απτικές ενδείξεις, όπως η κίνηση, η τρισδιάστατη απόδοση, η απόσταση και η συμπεριφορά των ψηφιακών μοντέλων. Η πολυαισθητηριακή διάσταση μπορεί επομένως να ενισχύσει την πειστικότητα της εμπειρίας, ακόμη και όταν η φυσική αφή απουσιάζει.

Η μελέτη των Ricci et al. (2023) προσφέρει μια χρήσιμη εμπειρική ένδειξη για τη διαφορά ανάμεσα σε εμβυθιστικές και μη εμβυθιστικές μορφές VR στη μόδα. Σε πείραμα με 60 συμμετέχοντες, συγκρίθηκε μια εμπειρία αγορών σε desktop VR με μια αντίστοιχη εμπειρία σε immersive VR, όπου οι χρήστες αξιολογούσαν τσάντα σε εικονικό κατάστημα. Τα αποτελέσματα έδειξαν υψηλότερες ηδονικές και χρηστικές αξίες στην immersive εκδοχή, καλύτερη συνολική εμπειρία χρήστη, συγκρίσιμο γνωστικό φορτίο και μεγαλύτερη διάρκεια παραμονής στο εικονικό περιβάλλον (Ricci et al., 2023). Το εύρημα αυτό δείχνει ότι η εμβύθιση δεν λειτουργεί μόνο ως τεχνολογική αναβάθμιση, αλλά επηρεάζει τον τρόπο με τον οποίο ο χρήστης εμπλέκεται, εξερευνά και αξιολογεί το προϊόν.

Επομένως, το σημείο αυτό είναι καθοριστικό, διότι, αν η VR αυξάνει την ποιότητα της αξιολόγησης χωρίς να αυξάνει δυσανάλογα το γνωστικό φορτίο, τότε μπορεί να υποστηρίξει πιο τεκμηριωμένες αποφάσεις πριν από την παραγωγή. Η αξία της δεν βρίσκεται απλώς στο ότι δημιουργεί μια «καλύτερη εμπειρία», αλλά στο ότι μπορεί να κάνει το ψηφιακό δείγμα πιο κατανοητό, πιο συγκρίσιμο και πιο χρήσιμο ως εργαλείο απόφασης.

3.2.3 Σημασία της παρουσίας για την αξιολόγηση ενδυμάτων

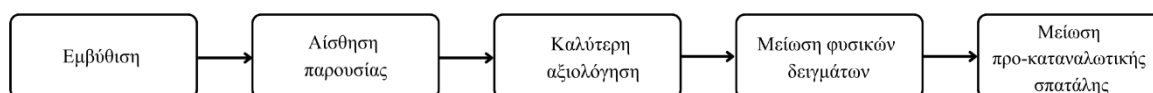
Η παρουσία έχει ιδιαίτερη σημασία για την αξιολόγηση ενδυμάτων, επειδή η μόδα δεν αφορά μόνο την αναγνώριση ενός αντικειμένου, αλλά την εμπειρική του πρόσληψη. Ένα ένδυμα αξιολογείται ως προς την εφαρμογή, τη σιλουέτα, την κίνηση, τη σχέση του με το σώμα, την αισθητική του θέση μέσα σε μια συλλογή και τη συναισθηματική ή συμβολική εντύπωση που δημιουργεί. Σε ένα συμβατικό ψηφιακό αρχείο, ο χρήστης βλέπει ένα μοντέλο. Σε ένα περιβάλλον VR με ισχυρή παρουσία, το ένδυμα εμφανίζεται ως αντικείμενο μέσα σε χώρο, άρα μπορεί να εξεταστεί με τρόπο πιο κοντά στην πραγματική εμπειρία παρουσίασης ή επιλογής.

Η Kim (2023) προτείνει τέσσερις διαστάσεις της VR εμπειρίας στη μόδα: γνωστική παρουσία (cognitive presence), αισθητηριακή εμβύθιση (sensible immersion), συναισθηματική εμβύθιση (emotional immersion) και αισθητική αλληλεπίδραση (aesthetic interaction). Η γνωστική παρουσία αφορά την αίσθηση ότι ο χρήστης μεταφέρεται στον χώρο του γεγονότος ή της παρουσίασης. Η αισθητηριακή εμβύθιση συνδέεται με την πρόσληψη όγκου, απόστασης, κίνησης και υλικότητας. Η συναισθηματική εμβύθιση αφορά τις αντιδράσεις που προκαλούνται από τον χώρο, τα μοντέλα, τον φωτισμό, τον ρυθμό και τη συνολική ατμόσφαιρα. Η αισθητική αλληλεπίδραση, τέλος, δηλώνει τη δυναμική σχέση ανάμεσα στον χρήστη και το αντικείμενο, όπου η αξιολόγηση δεν είναι απλώς μια παθητική θέαση.

Αυτές οι διαστάσεις δείχνουν γιατί η παρουσία είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στη μόδα. Το ένδυμα δεν είναι ουδέτερο τεχνικό αντικείμενο. Η αξία του συνδέεται με το πώς φαίνεται, πώς παρουσιάζεται, πώς κινείται, πώς εντάσσεται σε ένα αισθητικό περιβάλλον και πώς ερμηνεύεται από τον παρατηρητή. Ένα virtual showroom ή ένα VR fashion show μπορεί, εφόσον σχεδιαστεί σωστά, να επιτρέψει στους σχεδιαστές, στους buyers (αγοραστές) και στις ομάδες ανάπτυξης προϊόντος να αξιολογήσουν όχι μόνο μεμονωμένα προϊόντα, αλλά και τη συνολική λογική μιας συλλογής.

Βέβαια, η παρουσία δεν καταργεί πλήρως την ανάγκη για φυσική αξιολόγηση. Η τελική αίσθηση ενός υφάσματος, η ποιότητα ραφής, η αντοχή, η άνεση και η πραγματική εφαρμογή σε διαφορετικά σώματα εξακολουθούν να απαιτούν υλική επαλήθευση. Η συμβολή της VR είναι πιο ρεαλιστικό να αναζητηθεί στα στάδια όπου οι αποφάσεις είναι ακόμη ανοιχτές και επαναληπτικές: επιλογή σχεδίων, χρωμάτων, παραλλαγών, παρουσίασης συλλογής, εμπορικής αφήγησης και αρχικής αποδοχής προϊόντος. Εκεί, η παρουσία μπορεί να περιορίσει τους άσκοπους κύκλους παραγωγής φυσικών δειγμάτων, διότι επιτρέπει πιο πλούσια και πιο έγκαιρη αξιολόγηση του ψηφιακού δείγματος.

Συνολικά, η σχέση εμπύθισης και παρουσίας συνδέεται άμεσα με το κεντρικό ερευνητικό ζήτημα της εργασίας. Η εμπύθιση παρέχει τις τεχνικές συνθήκες: χωρικότητα, αλληλεπίδραση, αισθητηριακή συνοχή και δυνατότητα εξέτασης του ψηφιακού αντικειμένου. Η παρουσία μετατρέπει αυτές τις τεχνικές συνθήκες σε εμπειρία αξιολόγησης. Όταν η εμπειρία αυτή είναι πειστική, μπορεί να βελτιώσει την ποιότητα των αποφάσεων πριν από τη μαζική παραγωγή. Και όταν οι αποφάσεις λαμβάνονται νωρίτερα, με μικρότερη αβεβαιότητα, μειώνεται η ανάγκη για επαναλαμβανόμενα φυσικά δείγματα. Η αλυσίδα αυτή μπορεί να συνοψιστεί όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1 Θεωρητικός μηχανισμός μέσω του οποίου η εμπύθιση και η αίσθηση παρουσίας μπορούν να συμβάλουν στη μείωση της προ-καταναλωτικής σπατάλης στη βιομηχανία της μόδας.

3.3 VR και εμπειρία αξιολόγησης προϊόντων πριν από την παραγωγή

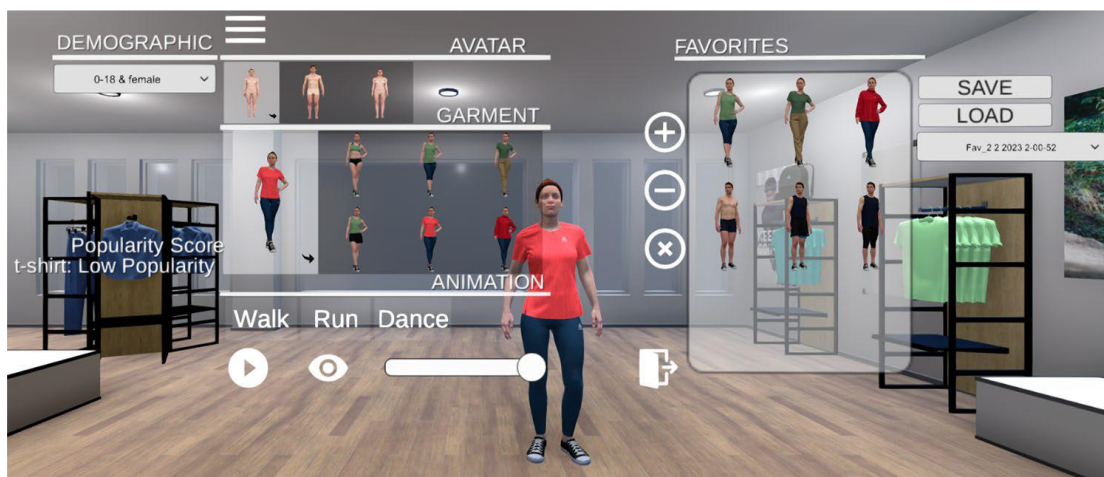
3.3.1 Εικονικά fitting sessions για ομάδες σχεδιασμού

Τα εικονικά fitting sessions (εικονικές δοκιμές εφαρμογής) αποτελούν μία από τις πιο άμεσες εφαρμογές της VR στην προ-παραγωγική αξιολόγηση ενδυμάτων. Στο συμβατικό μοντέλο, η εφαρμογή ενός ενδύματος ελέγχεται μέσα από φυσικά δείγματα πάνω σε σώμα ή κούκλα, ενώ κάθε διόρθωση στο πατρόν, στην πτώση ή στη συνολική γραμμή μπορεί να οδηγήσει σε νέα παραγωγή φυσικών δειγμάτων. Η διαδικασία αυτή είναι αναγκαία για την τεχνική ακρίβεια, αλλά ταυτόχρονα χρονοβόρα και υλικά απαιτητική. Η VR εισάγει μια διαφορετική δυνατότητα ώστε η ομάδα σχεδιασμού να μπορεί να εξετάζει ένα ψηφιακό ένδυμα πάνω σε avatar (εικονικό σώμα), να το παρατηρήσει από διαφορετικές γωνίες, να ελέγξει τη σιλουέτα και την κίνηση και να εντοπίσει προβλήματα πριν κατασκευαστεί φυσικό πρωτότυπο (Erdem et al., 2026; Casciani et al., 2022; Sarakatsanos et al., 2024).

Σε αντίθεση με μια απλή 3D απεικόνιση σε οθόνη, ένα εικονικό fitting session σε περιβάλλον VR προσφέρει στον χρήστη χωρική σχέση με το ένδυμα. Ο σχεδιαστής δεν βλέπει απλώς ένα μοντέλο να περιστρέφεται στην οθόνη, αλλά μπορεί να μεταβάλει ο ίδιος την οπτική του θέση, να πλησιάσει το ένδυμα, να εστιάσει σε λεπτομέρειες, να το εξετάσει σε κίνηση και να συγκρίνει διαφορετικούς συνδυασμούς avatar–ενδύματος. Η αξιολόγηση γίνεται επομένως πιο κοντά στη φυσική εμπειρία fitting, χωρίς όμως να απαιτείται εξαρχής φυσικό δείγμα. Αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία για τις πρώτες φάσεις ανάπτυξης, όπου το ζητούμενο δεν είναι η τελική ποιοτική πιστοποίηση, αλλά η απόφαση για το αν ένα σχέδιο χρειάζεται διόρθωση, αν αξίζει να προχωρήσει ή αν πρέπει να απορριφθεί (Sarakatsanos et al., 2024).

Η εφαρμογή VR Designer των Sarakatsanos et al. (2024) αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της λογικής. Η εφαρμογή σχεδιάστηκε για σχεδιαστές μόδας, λιανοπωλητές, εκπροσώπους πωλήσεων, στελεχών μάρκετινγκ και υπεύθυνους προϊόντων, επιτρέποντας την οπτικοποίηση ενδυμάτων σε διαφορετικούς σωματότυπους, τόσο σε στατικές όσο και σε δυναμικές πόζες. Οι χρήστες μπορούν να αλλάζουν προοπτική, γωνίες θέασης και συνδυασμούς ψηφιακού σώματος και ψηφιακού ενδύματος, ενώ η αξιολόγηση της εφαρμογής πραγματοποιείται υποκειμενικά από τον χρήστη μέσα από την παρατήρηση της προσομοίωσης, συμπεριλαμβανομένων λεπτομερειών όπως τις πτυχώσεις των υφασμάτων (Sarakatsanos et al., 2024). Η προσέγγιση αυτή δείχνει ότι η VR δεν αντικαθιστά απλώς την οθόνη ως μέσο προβολής, αλλά επιτρέπει έναν διαφορετικό τρόπο εξέτασης του ψηφιακού ενδύματος.

Η λειτουργική δομή της εφαρμογής VR Designer αποτυπώνεται στην Εικόνα 3.1, όπου διακρίνονται οι βασικές επιλογές αλληλεπίδρασης του χρήστη με το avatar, το ένδυμα και την κίνηση.



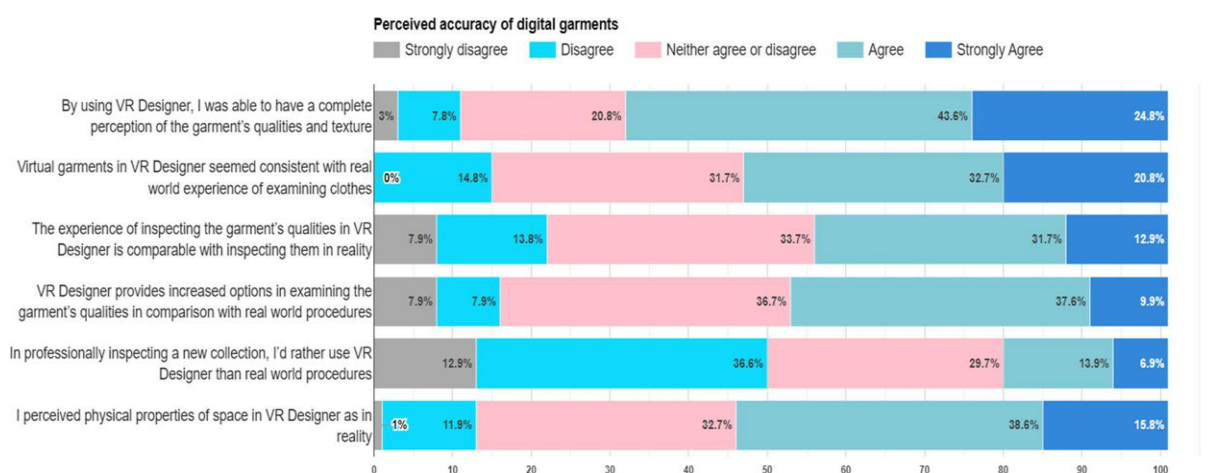
Εικόνα 3.1: Διεπαφή χρήστη της εφαρμογής VR Designer, με επιλογές για avatar, ένδυμα, animation, δημογραφική στόχευση και αποθήκευση αγαπημένων συνδυασμών (Sarakatsanos et al., 2024).

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι η εφαρμογή VR Designer δεν περιορίζεται στη μεμονωμένη χρήση. Η «multiuser» λειτουργία της επιτρέπει σε πολλούς χρήστες να βρίσκονται ταυτόχρονα στο ίδιο εικονικό δωμάτιο, να βλέπουν την ίδια προσομοίωση, να αλληλεπιδρούν με το ένδυμα και να επικοινωνούν μέσω φωνητικής συνομιλίας. Έτσι, το fitting session μπορεί να μετατραπεί σε συνεργατική διαδικασία αξιολόγησης, όπου σχεδιαστές, τεχνικές ομάδες, στελέχη προϊόντος και εμπορικοί συνεργάτες εξετάζουν το ίδιο ψηφιακό δείγμα χωρίς να βρίσκονται στον ίδιο φυσικό χώρο (Sarakatsanos et al., 2024). Η συλλογική αυτή διάσταση είναι σημαντική, επειδή οι αποφάσεις στη μόδα σπάνια λαμβάνονται ατομικά.

Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης της εφαρμογής (VR Designer) είναι ενδεικτικά αλλά όχι απόλυτα. Οι Sarakatsanos et al. (2024) αναφέρουν ότι το 53,5% των χρηστών αντιλήφθηκε το VR περιβάλλον ως παρόμοιο με την πραγματικότητα, ενώ σχεδόν το 50% θεώρησε ότι η εφαρμογή προσφέρει περισσότερες δυνατότητες εξέτασης των χαρακτηριστικών ενός ενδύματος σε σχέση με παραδοσιακές μεθόδους. Παράλληλα, όμως, οι συμμετέχοντες δεν εμφανίστηκαν πλήρως έτοιμοι να αντικαταστήσουν τη φυσική εμπειρία με μια αποκλειστικά

ψηφιακή διαδικασία. Το εύρημα αυτό είναι σημαντικό ακριβώς επειδή αποφεύγει μια υπερβολικά αισιόδοξη ερμηνεία της VR. Η τεχνολογία μπορεί να ενισχύσει ουσιαστικά την προ-παραγωγική αξιολόγηση, αλλά η τελική εμπιστοσύνη στο ένδυμα εξακολουθεί να απαιτεί, σε πολλές περιπτώσεις, υλική επιβεβαίωση.

Η κατανομή των απαντήσεων σχετικά με την αντιληπτή ακρίβεια των ψηφιακών ενδυμάτων παρουσιάζεται στο **Σχήμα 3.2**.



Σχήμα 3.2: Αντιληπτή ακρίβεια των ψηφιακών ενδυμάτων στην εφαρμογή VR Designer ως προς την ποιότητα, την υφή, την ομοιότητα με την πραγματική εμπειρία εξέτασης ενδυμάτων και τη δυνατότητα αντικατάστασης των συμβατικών διαδικασιών (Sarakatsanos et al., 2024).

Η σημασία της εμπυθιστικής εμπειρίας επιβεβαιώνεται και από τη μελέτη των Ricci et al. (2023), η οποία συνέκρινε immersive VR και desktop VR σε εικονικό fashion store με 60 συμμετέχοντες. Η immersive εμπειρία οδήγησε σε υψηλότερες ηδονικές και χρηστικές αξίες, καλύτερη συνολική εμπειρία χρήστη και μεγαλύτερη διάρκεια παραμονής στο περιβάλλον, ενώ το γνωστικό φορτίο παρέμεινε συγκρίσιμο με τη desktop εκδοχή. Συγκεκριμένα, ο μέσος χρόνος εμπειρίας στην immersive VR ήταν 247,11 δευτερόλεπτα, έναντι 179,43 δευτερολέπτων στη desktop VR, με στατιστικά σημαντική διαφορά (Ricci et al., 2023). Παρότι η συγκεκριμένη μελέτη αφορά κυρίως shopping experience και όχι αυστηρά fitting session, δείχνει ότι η εμπύθιση μπορεί να ενισχύσει την προσοχή, την εξερεύνηση και την αντίληψη χαρακτηριστικών προϊόντος. Για την προ-παραγωγική αξιολόγηση, αυτό σημαίνει ότι η IVR μπορεί να υποστηρίξει πιο ενεργή και λεπτομερή εξέταση του ψηφιακού δείγματος από ό,τι μια επίπεδη ή μη εμπυθιστική απεικόνιση.

3.3.2 Εικονικά showrooms και sales meetings

Πέρα από την τεχνική αξιολόγηση της εφαρμογής, η VR έχει σημαντική αξία και στο επίπεδο της εμπορικής αξιολόγησης συλλογών. Στη βιομηχανία της μόδας, οι αποφάσεις για το ποια προϊόντα θα προχωρήσουν στην παραγωγή δεν λαμβάνονται μόνο από τους σχεδιαστές. Εμπλέκονται στελέχη αγορών (buyers), επιχειρήσεις λιανικής (retailers), υπεύθυνοι εμπορικής διαχείρισης προϊόντων (merchandisers), ομάδες πωλητών (sales teams) και στελέχη προϊόντος, οι οποίοι αξιολογούν αν μια συλλογή έχει εμπορική συνοχή, αν ανταποκρίνεται στο κοινό της αγοράς και αν δικαιολογεί παραγωγική δέσμευση. Στο συμβατικό μοντέλο, η διαδικασία αυτή βασίζεται σε φυσικά δείγματα, δειγματικές συλλογές, παρουσιάσεις σε showrooms (εικονικούς εκθεσιακούς χώρους) και διαδοχικά sales meetings (συναντήσεις πωλήσεων) , συχνά σε διαφορετικές γεωγραφικές τοποθεσίες (Casciani et al., 2022; Moltenbrey & Fischer, 2021; Sarakatsanos et al., 2024).

Τα εικονικά showrooms μετασχηματίζουν αυτή τη διαδικασία, επιτρέποντας την παρουσίαση και αξιολόγηση συλλογών σε έναν κοινό ψηφιακό χώρο. Ο αγοραστής μπορεί να εξετάσει ψηφιακά πρωτότυπα, να δει εναλλακτικά χρώματα ή υλικά, να συγκρίνει προϊόντα και να δώσει ανατροφοδότηση χωρίς να απαιτείται κάθε παραλλαγή να έχει παραχθεί φυσικά. Με αυτόν τον τρόπο, η VR μετατρέπει το showroom από φυσικό χώρο επίδειξης σε διαδραστικό περιβάλλον απόφασης (Kim, 2023; Moltenbrey & Fischer, 2021; Sarakatsanos et al., 2024).

Η μελέτη των Moltenbrey και Fischer (2021) είναι ιδιαίτερα σημαντική για αυτή τη διάσταση. Στο πλαίσιο του ερευνητικού έργου Retail 4.0, οι συγγραφείς περιγράφουν την ανάγκη για ψηφιακές λύσεις που ενσωματώνουν λιανοπωλητές και customers στη διαδικασία ανάπτυξης ενδυμάτων. Η υπάρχουσα διάκριση μεταξύ ανάπτυξης και πωλήσεων θεωρείται προβληματική, καθώς η ανατροφοδότηση από την αγορά φτάνει συχνά αργά και με έμμεσο τρόπο, μέσω πωλήσεων ή αξιολογήσεων προϊόντων. Η δυσκολία αξιόπιστης εκτίμησης της ζήτησης οδηγεί είτε σε ελλείψεις είτε σε υπερπαραγωγή, ακριβώς όπως αναδείχθηκε και στο πρώτο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας.

Στο B2B σενάριο που παρουσιάζουν οι Moltenbrey και Fischer (2021), επιχειρήσεις λιανικής και κατασκευαστές συναντώνται στον ίδιο εικονικό χώρο με τη χρήση VR γυαλιών, ώστε να εξετάσουν μελλοντικές συλλογές και εικονικά πρωτότυπα. Η διαδικασία αυτή αντικαθιστά σε έναν βαθμό το παραδοσιακό, τοπικά εξαρτημένο μοντέλο πολλαπλών συναντήσεων και επιτρέπει πιο άμεση επικοινωνία μεταξύ αγοραστών, σχεδιαστών και κατασκευαστών. Οι

συγγραφείς επισημαίνουν ότι οι εξοικονομήσεις σε φυσικά πρωτότυπα μετατοπίζουν δραστηριότητες σχεδιασμού και ανάπτυξης από τη 2D επεξεργασία προς την 3D προσομοίωση, ενώ οι σχεδιαστές, που προηγουμένως εργάζονταν απτικά με φυσικά μοντέλα, καλούνται πλέον να λειτουργούν σε ψηφιακό περιβάλλον.

Συνεπώς, τα εικονικά showrooms και sales meetings μπορούν να λειτουργήσουν ως μηχανισμοί μείωσης αβεβαιότητας πριν από την παραγωγή. Επιτρέπουν τη συλλογή ανατροφοδότησης νωρίτερα, τη σύγκριση εναλλακτικών εκδοχών χωρίς ισοδύναμη υλική παραγωγή και τη συμμετοχή πολλών εμπλεκόμενων σε κοινή διαδικασία αξιολόγησης. Η περιβαλλοντική σημασία αυτής της δυνατότητας γίνεται εμφανής όταν συνδεθεί με τη σπατάλη από φυσικά πρωτότυπα, μεταφορές, φωτογραφίσεις, δειγματικές συλλογές και παραγωγή προϊόντων που τελικά δεν επιλέγονται. Η πλήρης ανάλυση αυτής της σχέσης με τη μείωση σπατάλης ανήκει στο επόμενο κεφάλαιο, όμως ήδη εδώ φαίνεται ότι η VR επηρεάζει το κρίσιμο σημείο όπου η μόδα παίρνει αποφάσεις πριν δεσμεύσει υλικό, χρόνο και παραγωγική δυναμικότητα.

3.3.3 Pseudo-haptics και απτική ανάδραση

Παρά τις δυνατότητες της VR, η αξιολόγηση ενδυμάτων παραμένει ιδιαίτερα απαιτητική λόγω της υλικής φύσης της μόδας. Το ένδυμα δεν είναι μόνο σχήμα και εικόνα. Είναι ύφασμα, βάρος, ελαστικότητα, υφή, θερμική αίσθηση, ήχος κίνησης και επαφή με το σώμα. Η αφή αποτελεί ένα από τα πιο δύσκολα στοιχεία προς ψηφιακή αναπαράσταση, διότι συνδέεται με πολύπλοκες σωματικές και αισθητηριακές εμπειρίες. Για αυτόν τον λόγο, η απουσία πραγματικής αφής είναι ένας από τους βασικούς περιορισμούς της VR και, γενικότερα, των ψηφιακών εργαλείων αξιολόγησης στη μόδα.

Η Ricci (2024) επισημαίνει ότι, κατά την αξιολόγηση υφασμάτων και ενδυμάτων, οι καταναλωτές και οι χρήστες εμπλέκουν πολλαπλές αισθήσεις, με την όραση και την αφή να έχουν ιδιαίτερη σημασία. Το παραδοσιακό online retail δυσκολεύεται να μεταφέρει τη δυνατότητα φυσικής επαφής με το προϊόν, γεγονός που δημιουργεί δισταγμό στην αγορά ενδυμάτων μέσω ψηφιακών καναλιών. Παρά την πρόοδο των haptic interfaces (απτικών διεπαφών), η πιστή αναπαραγωγή της απτικής εμπειρίας των υφασμάτων παραμένει τεχνικά δύσκολη. Η πολυπλοκότητα των υλικών, η ποικιλία υφών, το βάρος, η ελαστικότητα και η κίνηση του υφάσματος δεν μπορούν ακόμη να αποδοθούν πλήρως από τις υπάρχουσες συσκευές απτικής ανάδρασης.

Σε αυτό το κενό παρεμβαίνει η έννοια της ψευδο-απτικής εμπειρίας (pseudo-haptics). Ο όρος αναφέρεται σε τεχνικές που δημιουργούν την εντύπωση απτικής εμπειρίας κυρίως μέσω χειρισμού της οπτικής ανάδρασης. Με άλλα λόγια, ο χρήστης δεν αγγίζει πραγματικά το ύφασμα, αλλά λαμβάνει οπτικά ερεθίσματα που τον βοηθούν να φανταστεί ή να αντιληφθεί ορισμένες απτικές ιδιότητες. Η Ricci (2024), αξιοποιώντας τη θεωρία των pseudo-haptics, υποστηρίζει ότι η απουσία φυσικής επαφής μπορεί να αντισταθμιστεί εν μέρει μέσω οπτικών και διαδραστικών ενδείξεων. Για παράδειγμα, η κίνηση, η παραμόρφωση ή η αλλαγή της μορφής ενός υφάσματος σε διαδοχικές εικόνες μπορεί να δώσει στον χρήστη την εντύπωση ότι αντιλαμβάνεται την ελαστικότητα ή το βάρος του, παρότι η πληροφορία παραμένει οπτική και όχι απτική.

Η σημασία αυτής της προσέγγισης για τη μόδα είναι ουσιαστική. Αν και η VR μπορεί να αποδώσει τον χώρο, την κλίμακα και την κίνηση ενός ενδύματος, η αξιολόγηση του υφάσματος παραμένει πιο δύσκολη. Οι ψευδο-απτικές ενδείξεις μπορούν να λειτουργήσουν ως ενδιάμεση λύση, προσφέροντας οπτικές ενδείξεις για ιδιότητες που κανονικά γίνονται αντιληπτές μέσω της αφής. Για παράδειγμα, η ελαστικότητα μπορεί να υποδηλωθεί μέσα από τον τρόπο με τον οποίο το ύφασμα φαίνεται να τεντώνεται, να επανέρχεται ή να παραμορφώνεται κατά την αλληλεπίδραση. Το βάρος μπορεί να αποδοθεί μέσα από την πτώση, την ταχύτητα κίνησης, τις πτυχώσεις ή την αντίδραση του υφάσματος σε οπτικά ελεγχόμενη μεταβολή. Η πληροφορία παραμένει οπτική, αλλά ενεργοποιεί την προηγούμενη απτική εμπειρία του χρήστη.

Στο πλαίσιο της προ-παραγωγικής αξιολόγησης, τα pseudo-haptics μπορούν να ενισχύσουν την εμπιστοσύνη στο ψηφιακό δείγμα, ιδίως όταν συνδυάζονται με 3D προσομοιώσεις υφάσματος και βιβλιοθήκες υλικών. Ένας σχεδιαστής ή ένα στέλεχος αγορών μπορεί να μην αγγίζει το ύφασμα, αλλά μπορεί να αποκτήσει πληρέστερη εικόνα για το πώς αυτό συμπεριφέρεται οπτικά και δυναμικά. Η πληροφορία αυτή δεν είναι ισοδύναμη με τη φυσική αφή, αλλά μπορεί να είναι επαρκής για ορισμένες πρώιμες αποφάσεις: επιλογή μεταξύ διαφορετικών υφασμάτων, απόρριψη υλικών που δεν αποδίδουν σωστά τη σχεδιαστική πρόθεση ή σύγκριση εναλλακτικών εκδοχών πριν ζητηθεί φυσικό δείγμα.

Παράλληλα, η απτική ανάδραση μπορεί να έχει διαφορετικά επίπεδα πολυπλοκότητας. Σε πιο απλές εφαρμογές, η ανάδραση περιορίζεται σε δονήσεις ή χειριστήρια που υποδηλώνουν επαφή με ένα αντικείμενο. Σε πιο σύνθετα συστήματα, μπορεί να χρησιμοποιούνται απτικά γάντια ή συσκευές αντίστασης, αν και η πρακτική τους εφαρμογή στη βιομηχανία της μόδας

παραμένει περιορισμένη λόγω κόστους, εργονομίας και δυσκολίας ακριβούς αναπαραγωγής της υφασμάτινης αίσθησης. Για αυτόν τον λόγο, τα pseudo-haptics έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον: δεν απαιτούν απαραίτητα εξειδικευμένο υλικό, αλλά αξιοποιούν τις διασταυρώσεις όρασης και αφής στην ανθρώπινη αντίληψη.

Ωστόσο, η χρήση pseudo-haptics πρέπει να αξιολογείται με προσοχή. Η οπτικοποιημένη αφή μπορεί να βοηθήσει τον χρήστη να σχηματίσει εντύπωση για το ύφασμα, αλλά μπορεί επίσης να δημιουργήσει υπερβολικές προσδοκίες αν η ψηφιακή αναπαράσταση δεν αντιστοιχεί στο πραγματικό υλικό. Στη μόδα, όπου η ποιότητα του υφάσματος επηρεάζει άμεσα την αντίληψη αξίας, η απόκλιση ανάμεσα στο ψηφιακό και στο φυσικό προϊόν μπορεί να υπονομεύσει την εμπιστοσύνη. Επομένως, τα pseudo-haptics δεν πρέπει να αντιμετωπίζονται ως πλήρες υποκατάστατο της αφής, αλλά ως υποστηρικτικό εργαλείο που ενισχύει την πρόιμη αξιολόγηση και μειώνει ορισμένες, όχι όλες, τις ανάγκες φυσικής δοκιμής.

Συνολικά, αποδεικνύεται ότι η εικονική πραγματικότητα μπορεί να επηρεάσει την αξιολόγηση προϊόντων πριν από την παραγωγή σε τρία συμπληρωματικά επίπεδα. Πρώτον, μέσα από εικονικά fitting sessions, επιτρέπει στις ομάδες σχεδιασμού να εξετάζουν εφαρμογή, σιλουέτα, κίνηση και λεπτομέρειες πριν κατασκευαστεί φυσικό δείγμα. Δεύτερον, μέσω εικονικών showrooms και sales meetings, επιτρέπει σε στελέχη αγορών, επιχειρήσεις λιανικής και κατασκευαστές να αξιολογούν συλλογές, να δίνουν ανατροφοδότηση και να μειώνουν την εμπορική αβεβαιότητα πριν τη δέσμευση σε παραγωγή. Τρίτον, μέσω pseudo haptics και απτικής ανάδρασης, επιχειρεί να αντιμετωπίσει έναν από τους σημαντικότερους περιορισμούς της ψηφιακής μόδας, την απουσία υλικής επαφής. Η συμβολή της VR, επομένως, δεν βρίσκεται σε μία μόνο λειτουργία, αλλά στη δημιουργία ενός πιο πλούσιου προ-παραγωγικού περιβάλλοντος αξιολόγησης. Όσο πιο αξιόπιστη γίνεται αυτή η αξιολόγηση, τόσο περισσότερο μπορεί να περιοριστεί η ανάγκη για επαναλαμβανόμενα φυσικά δείγματα και, κατ' επέκταση, η προ-καταναλωτική σπατάλη υλικών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Η ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΕΙΚΟΝΙΚΗΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗ ΜΕΙΩΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΣΠΑΤΑΛΗΣ

4.1 Πώς η εικονική πραγματικότητα επηρεάζει τις αποφάσεις πριν από την παραγωγή

Το προηγούμενο κεφάλαιο ανέδειξε την εικονική πραγματικότητα ως τεχνολογικό περιβάλλον που διαφοροποιείται από τις απλές ψηφιακές απεικονίσεις, καθώς συνδέεται με την εμπύθιση, την αίσθηση παρουσίας και τη δυνατότητα χωρικής αντίληψης του ψηφιακού αντικειμένου. Στο πλαίσιο της μόδας, τα χαρακτηριστικά αυτά αποκτούν ιδιαίτερη σημασία, επειδή το ένδυμα δεν αξιολογείται μόνο ως εικόνα, αλλά ως αντικείμενο που σχετίζεται με το σώμα, την κίνηση, την εφαρμογή και την υλικότητα. Με βάση αυτό το θεωρητικό υπόβαθρο, το παρόν κεφάλαιο μεταφέρει τη συζήτηση από την τεχνολογική κατανόηση της VR στη λειτουργική της αξιοποίηση μέσα στον κύκλο ανάπτυξης προϊόντος.

Η ανάλυση που ακολουθεί εξετάζει πώς η εικονική πραγματικότητα μπορεί να επηρεάσει τις αποφάσεις που προηγούνται της φυσικής παραγωγής, με ποιον τρόπο συνδέεται με πιθανούς μηχανισμούς περιορισμού παραγωγής και σπατάλης, ποιες προϋποθέσεις απαιτούνται για την εφαρμογή της στη βιομηχανία της μόδας και ποιοι περιορισμοί πρέπει να ληφθούν υπόψη. Η VR εξετάζεται ως εργαλείο που μπορεί να αποκτήσει περιβαλλοντική αξία όταν εντάσσεται σε οργανωμένες ψηφιακές ροές εργασίας και επηρεάζει πραγματικές αποφάσεις σχεδιασμού, αξιολόγησης και παραγωγής.

4.1.1 Μείωση αβεβαιότητας πριν από τη φυσική παραγωγή

Η ανάπτυξη ενός ενδύματος περιλαμβάνει πάντοτε ένα επίπεδο αβεβαιότητας. Ένα σχέδιο σε δισδιάστατη μορφή, είτε πρόκειται για σκίτσο είτε για τεχνικό σχέδιο είτε για εικόνα σε οθόνη, δεν μπορεί να αποδώσει πλήρως τον τρόπο με τον οποίο το ένδυμα θα σταθεί πάνω στο σώμα, πώς θα κινηθεί, πώς θα πέσει το ύφασμα ή αν η γραμμή του θα λειτουργήσει στην πράξη. Για τον λόγο αυτό, το φυσικό δείγμα έχει παραδοσιακά κεντρικό ρόλο στη διαδικασία ανάπτυξης προϊόντος. Μέσω αυτού, οι εμπλεκόμενοι μπορούν να επιβεβαιώσουν την εφαρμογή, τις αναλογίες, τις τεχνικές λεπτομέρειες και τη συνολική αισθητική του προϊόντος. Ωστόσο, κάθε

φυσικό δείγμα απαιτεί υλικά, εργασία, χρόνο και συχνά μεταφορές, ενώ σε περίπτωση απόρριψης ή διόρθωσης η διαδικασία επαναλαμβάνεται.

Η εικονική πραγματικότητα μπορεί να μειώσει μέρος αυτής της αβεβαιότητας, επειδή επιτρέπει την εξέταση του ενδύματος σε τρισδιάστατο και εμβυθιστικό περιβάλλον πριν από τη φυσική παραγωγή. Στην εφαρμογή VR Designer, οι Sarakatsanos et al. (2024) περιγράφουν ένα ψηφιακό περιβάλλον αξιολόγησης, στο οποίο το ένδυμα μπορεί να εξεταστεί πριν περάσει στο στάδιο της φυσικής κατασκευής. Η σημασία αυτής της δυνατότητας δεν βρίσκεται μόνο στην οπτική αναπαράσταση του προϊόντος, αλλά κυρίως στο ότι προσφέρει στους εμπλεκόμενους μια πιο σαφή βάση για πρόιμη αξιολόγηση και εντοπισμό πιθανών αδυναμιών.

Η έννοια του ψηφιακού επιπέδου αξιολόγησης πριν από τη φυσική παραγωγή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη, επειδή συνδέει άμεσα την εικονική πραγματικότητα με τα προπαραγωγικά στάδια. Η VR δεν παρουσιάζεται απλώς ως εργαλείο προβολής μιας συλλογής, αλλά ως ενδιάμεσο περιβάλλον αξιολόγησης ανάμεσα στο ψηφιακό αρχείο του ενδύματος και στη φυσική του κατασκευή. Η αξιολόγηση αυτή μπορεί να βοηθήσει τους επαγγελματίες να εντοπίσουν αδυναμίες πριν προχωρήσουν στην παραγωγή φυσικού δείγματος. Έτσι, η αβεβαιότητα δεν αντιμετωπίζεται αποκλειστικά μέσω φυσικών δοκιμών, αλλά μπορεί να περιοριστεί αρχικά μέσα στο ψηφιακό περιβάλλον.

Η μείωση αβεβαιότητας δεν σημαίνει ότι η VR αντικαθιστά πλήρως τη φυσική αξιολόγηση. Ιδίως στη μόδα, όπου η υλικότητα, η αφή και η πραγματική συμπεριφορά του υφάσματος έχουν μεγάλη σημασία, η φυσική εμπειρία παραμένει σημαντική. Ωστόσο, η VR μπορεί να προηγηθεί αυτής της εμπειρίας και να λειτουργήσει ως φίλτρο. Σχέδια που παρουσιάζουν εμφανή προβλήματα μπορούν να διορθωθούν ψηφιακά ή να απορριφθούν πριν καταναλωθούν υλικά. Αντίστοιχα, σχέδια που εμφανίζονται πιο ώριμα μπορούν να προχωρήσουν σε φυσικό δείγμα με μεγαλύτερη βεβαιότητα. Με αυτόν τον τρόπο, η VR ενισχύει τη διαδικασία λήψης αποφάσεων πριν από τη φυσική παραγωγή.

4.1.2 Βελτίωση αξιολόγησης σχεδίου, εφαρμογής και υλικών

Η δεύτερη διάσταση αφορά την ποιότητα της αξιολόγησης. Η απόφαση για ένα ένδυμα δεν βασίζεται μόνο στο αν το σχέδιο είναι αισθητικά ενδιαφέρον. Εξαρτάται επίσης από το αν το ένδυμα εφαρμόζει σωστά στο σώμα, αν η γραμμή του υποστηρίζεται από το ύφασμα, αν οι αναλογίες είναι λειτουργικές, αν οι λεπτομέρειες βρίσκονται στη σωστή θέση και αν η

συνολική εικόνα του προϊόντος είναι κατάλληλη για τη συλλογή και την αγορά στην οποία απευθύνεται. Όσο πιο ελλιπής είναι η προπαραγωγική αξιολόγηση, τόσο αυξάνεται η πιθανότητα διορθώσεων, πρόσθετων δειγμάτων και επαναληπτικών διαδικασιών.

Η VR μπορεί να βελτιώσει αυτή την αξιολόγηση, επειδή επιτρέπει την παρατήρηση του ενδύματος ως τρισδιάστατου αντικειμένου πάνω σε ψηφιακό σώμα. Στην εφαρμογή VR Designer, οι χρήστες μπορούν να επιλέγουν διαφορετικά ενδύματα, σωματότυπους και κινήσεις, όπως περπάτημα ή τρέξιμο, ώστε να εξετάζουν χαρακτηριστικά της εφαρμογής, όπως η πτώση, οι πτυχώσεις και οι λεπτομέρειες του υφάσματος (Sarakatsanos et al., 2024). Η δυνατότητα αυτή είναι σημαντική, επειδή το ένδυμα δεν είναι στατικό αντικείμενο. Η αξία του εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο φαίνεται, κινείται και συμπεριφέρεται σε σχέση με το σώμα.

Στην αξιολόγηση της εφαρμογής VR Designer, οι χρήστες αναγνώρισαν τη χρησιμότητα της εφαρμογής για την κατανόηση ποιοτήτων και υφών των ενδυμάτων, ενώ θετικά αξιολογήθηκε και η δυνατότητα παρατήρησης λεπτομερειών, όπως πτυχώσεις και φερμουάρ (Sarakatsanos et al., 2024). Παράλληλα, οι συγγραφείς σημειώνουν ότι οι περισσότεροι χρήστες διατήρησαν επιφυλάξεις ως προς την πλήρη αντικατάσταση της πραγματικής εμπειρίας από την εικονική αξιολόγηση. Αυτό το εύρημα είναι κρίσιμο, γιατί δείχνει ότι η VR μπορεί να ενισχύσει την αξιολόγηση, αλλά δεν πρέπει να παρουσιάζεται ως πλήρης υποκατάσταση της φυσικής εμπειρίας του υλικού.

Η πρακτική εφαρμογή αυτής της λογικής φαίνεται στην περίπτωση της Tommy Hilfiger/STITCH, η οποία αφορά άμεσα τη μετάβαση από παραδοσιακές σχεδιαστικές πρακτικές σε ένα ολοκληρωμένο ψηφιακό οικοσύστημα 3D ανάπτυξης προϊόντος. Σύμφωνα με τους Tenuta και Testa (2020), η πρωτοβουλία περιλαμβάνει ψηφιακή βιβλιοθήκη υφασμάτων, πατρών και χρωμάτων, εργαλεία τρισδιάστατης παρουσίασης και τεχνολογίες απεικόνισης, καθώς και εκπαίδευση των ομάδων σχεδιασμού, δημιουργίας πατρών, τεχνικών, στελεχών ανάπτυξης προϊόντος και στελεχών εμπορικής διαχείρισης συλλογών μέσω της STITCH Academy.

Η περίπτωση αυτή είναι χρήσιμη επειδή δείχνει ότι η αξιολόγηση σχεδίου, εφαρμογής και υλικών σε ψηφιακό περιβάλλον δεν εξαρτάται μόνο από μία εφαρμογή VR. Προϋποθέτει ευρύτερη ψηφιακή υποδομή με ψηφιακά αρχεία υφασμάτων, ακριβή πατρών, τρισδιάστατη απεικόνιση, τεχνολογίες απεικόνισης και εκπαίδευση των επαγγελματικών ομάδων που

συμμετέχουν στην ανάπτυξη προϊόντος. Επομένως, η VR μπορεί να λειτουργήσει αποτελεσματικά μόνο όταν στηρίζεται σε αξιόπιστα ψηφιακά δεδομένα. Όσο πιο ολοκληρωμένο είναι το ψηφιακό οικοσύστημα γύρω από το ένδυμα, τόσο μεγαλύτερη είναι η δυνατότητα να αξιοποιηθεί η VR ως εργαλείο τεκμηριωμένης προπαραγωγικής αξιολόγησης.

Ωστόσο, χρειάζεται προσοχή ως προς τα όρια της ψηφιακής αξιολόγησης υλικών. Η VR μπορεί να αποδώσει οπτικά στοιχεία του υφάσματος, όπως η πτώση, η κίνηση, οι πτυχώσεις, ο όγκος και η σχέση του με το σώμα, αλλά δεν μπορεί ακόμη να μεταφέρει πλήρως την απτική εμπειρία. Η πραγματική υφή, το βάρος, η αίσθηση στο δέρμα ή η θερμική συμπεριφορά ενός υφάσματος παραμένουν δύσκολο να αξιολογηθούν αποκλειστικά εικονικά. Συνεπώς, η VR μπορεί να ενισχύσει την αξιολόγηση σχεδίου και εφαρμογής και να περιορίσει ορισμένες φυσικές δοκιμές, αλλά δεν πρέπει να θεωρηθεί απόλυτη αντικατάσταση της φυσικής εμπειρίας του υλικού.

4.1.3 Συνεργατική αξιολόγηση και τεκμηριωμένη απόφαση παραγωγής

Η τρίτη διάσταση αφορά τη μετάβαση από την ατομική αξιολόγηση στη συλλογική απόφαση παραγωγής. Στα προπαραγωγικά στάδια, το ζητούμενο δεν είναι μόνο να εξεταστεί αν ένα ένδυμα φαίνεται λειτουργικό ή αισθητικά ολοκληρωμένο, αλλά και να αποφασιστεί αν θα απορριφθεί, θα τροποποιηθεί, θα περάσει σε φυσικό δείγμα ή θα προχωρήσει προς παραγωγή. Σε αυτό το σημείο, η VR μπορεί να λειτουργήσει ως κοινός χώρος αξιολόγησης, όπου διαφορετικοί εμπλεκόμενοι εξετάζουν το ίδιο ψηφιακό αντικείμενο με βάση κοινή οπτική αναφορά.

Η λειτουργία πολλαπλών χρηστών του VR Designer είναι σημαντική ακριβώς σε αυτό το επίπεδο. Οι Sarakatsanos et al. (2024) αναφέρουν ότι η εφαρμογή επιτρέπει σε περισσότερους χρήστες να συμμετέχουν στο ίδιο εικονικό περιβάλλον, να επικοινωνούν και να αξιολογούν από κοινού τα ψηφιακά ενδύματα. Έτσι, η VR δεν περιορίζεται στην ατομική παρατήρηση ενός σχεδίου, αλλά μπορεί να υποστηρίξει συναντήσεις, παρουσιάσεις και συλλογικές αποφάσεις σχετικά με το ποια προϊόντα είναι αρκετά ώριμα για να προχωρήσουν στο επόμενο στάδιο ανάπτυξης.

Η συνεργατική διάσταση της VR ενισχύεται και από τη μελέτη των Lee et al. (2020), οι οποίοι εξέτασαν τη χρήση της εικονικής πραγματικότητας στη σχεδιαστική εκπαίδευση μόδας. Η μελέτη τους δείχνει ότι ένα VR περιβάλλον μπορεί να υποστηρίξει σχεδιαστικές συναντήσεις

και συνεργατική διερεύνηση ιδεών. Αν και η έρευνα πραγματοποιείται σε εκπαιδευτικό και όχι βιομηχανικό πλαίσιο, είναι χρήσιμη επειδή τεκμηριώνει τη δυνατότητα της VR να λειτουργεί ως χώρος ανταλλαγής, οπτικοποίησης και συλλογικής επεξεργασίας σχεδιαστικών προτάσεων.

Η σημασία αυτής της συνεργατικής αξιολόγησης είναι πρακτική. Όταν οι εμπλεκόμενοι εξετάζουν το ίδιο ψηφιακό ένδυμα μέσα σε κοινό εικονικό περιβάλλον, η συζήτηση γίνεται πιο συγκεκριμένη και μειώνονται οι παρερμηνείες που μπορεί να προκύψουν από στατικές εικόνες, τεχνικά σχέδια ή λεκτικές περιγραφές. Οι αποφάσεις μπορούν να βασιστούν σε κοινή αντίληψη του σχεδίου και όχι σε αποσπασματικές ερμηνείες του κάθε τμήματος. Με αυτόν τον τρόπο, η VR αποκτά ρόλο όχι μόνο ως μέσο απεικόνισης, αλλά και ως περιβάλλον συντονισμού πριν από τη φυσική παραγωγή.

Η σύνδεση με τη μείωση παραγωγής και σπατάλης παραμένει έμμεση, αλλά ουσιαστική. Όταν η απόφαση παραγωγής λαμβάνεται μετά από ψηφιακή και συλλογική αξιολόγηση, μειώνεται η πιθανότητα να παραχθούν φυσικά δείγματα που θα απορριφθούν ή θα χρειαστούν άμεσες διορθώσεις. Επομένως, η συμβολή της VR βρίσκεται κυρίως στην πρόληψη: βοηθά να εντοπίζονται προβλήματα και να λαμβάνονται πιο τεκμηριωμένες αποφάσεις πριν αυτά αποκτήσουν υλική μορφή.

4.2 Πιθανοί μηχανισμοί μείωσης παραγωγής και σπατάλης

Στην παρούσα ενότητα εξετάζονται οι βασικοί μηχανισμοί μέσα από τους οποίους η εικονική πραγματικότητα, σε συνδυασμό με ευρύτερες ψηφιακές πρακτικές ανάπτυξης προϊόντος, μπορεί να συμβάλει στον περιορισμό παραγωγής και σπατάλης. Η ανάλυση επικεντρώνεται στη μείωση φυσικών δειγμάτων και επαναληπτικών διορθώσεων, στη δοκιμή ενδιαφέροντος πριν από τη μαζική παραγωγή και στη χρήση δεδομένων για πιο στοχευμένες αποφάσεις παραγωγής.

4.2.1 Μείωση φυσικών δειγμάτων και επαναληπτικών διορθώσεων

Ο πιο άμεσος και ισχυρά τεκμηριωμένος μηχανισμός αφορά τη μείωση των φυσικών δειγμάτων. Στο παραδοσιακό μοντέλο ανάπτυξης προϊόντος, το φυσικό δείγμα αποτελεί βασικό μέσο ελέγχου της εφαρμογής, της γραμμής, της πτώσης του υφάσματος, των αναλογιών και των τεχνικών λεπτομερειών. Ωστόσο, κάθε φυσικό δείγμα απαιτεί ύφασμα, βοηθητικά υλικά, κοπή, ραφή, φινίρισμα, ποιοτικό έλεγχο και συχνά αποστολή σε πελάτες, υπεύθυνους αγορών

ή κεντρικά γραφεία. Αν το δείγμα δεν εγκριθεί, η διαδικασία επαναλαμβάνεται, με αποτέλεσμα νέους κύκλους χρήσης υλικών, χρόνου και ενέργειας.

Ιδιαίτερα σημαντική είναι η μελέτη των Erdem et al. (2026), η οποία δεν περιορίζεται σε θεωρητική συζήτηση για την ψηφιοποίηση, αλλά συγκρίνει ποσοτικά τη φυσική και την ψηφιακή δημιουργία δειγμάτων μέσω ανάλυσης κύκλου ζωής. Οι συγγραφείς περιγράφουν τη φυσική δημιουργία δείγματος ως διαδικασία που περιλαμβάνει στάδια όπως παραγωγή υφάσματος, κοπή, ραφή, επεξεργασίες και άλλες φυσικές λειτουργίες. Αντίθετα, στη διαδικασία ψηφιακής δημιουργίας δείγματος, το ύφασμα ψηφιοποιείται και το ένδυμα προσομοιώνεται σε 3D περιβάλλον πάνω σε ψηφιακό σώμα. Με αυτόν τον τρόπο, η ανάγκη για φυσικό ύφασμα, βοηθητικά υλικά και επαναλαμβανόμενες φυσικές παρεμβάσεις μειώνεται σημαντικά.

Τα αποτελέσματα της ίδιας μελέτης δείχνουν ότι η ψηφιακή δημιουργία δειγμάτων μπορεί να επιφέρει σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη σε σχέση με τη φυσική παραγωγή δειγμάτων. Οι Erdem et al. (2026) αναφέρουν σημαντικές μειώσεις σε δείκτες όπως το δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη, το δυναμικό τοξικότητας για την ανθρώπινη υγεία, τη ζήτηση πρωτογενούς ενέργειας και την κατανάλωση νερού. Ιδιαίτερα ως προς τη ζήτηση πρωτογενούς ενέργειας, τα φυσικά δείγματα παρουσίασαν σαφώς υψηλότερες τιμές από τα ψηφιακά, ενώ τα ψηφιακά δείγματα απαιτούσαν κυρίως ηλεκτρική ενέργεια για τη λειτουργία λογισμικού και συστημάτων προσομοίωσης. Σύμφωνα με τα παραπάνω ευρήματα, η μείωση της φυσικής δημιουργίας δειγμάτων μπορεί να έχει μετρήσιμη περιβαλλοντική αξία.

Η ανασκόπηση των Baria et al. (2025) ενισχύει αυτή τη θέση από την πλευρά της τεχνολογικής εφαρμογής. Οι συγγραφείς εξετάζουν εργαλεία όπως CLO 3D, Optitex, Lectra και Browzwear και υποστηρίζουν ότι η 3D δημιουργία δειγμάτων επιτρέπει την οπτικοποίηση του σχεδίου, της εφαρμογής και της πτώσης του υφάσματος χωρίς να απαιτείται άμεση παραγωγή φυσικού πρωτοτύπου. Επιπλέον, αναφέρουν ότι η 3D τεχνολογία μπορεί να μειώσει την ανάγκη για φυσικά δείγματα, να επιταχύνει τη διαδικασία έγκρισης και να περιορίσει υλικά, εργασίες και μεταφορές που συνδέονται με την παραδοσιακή δημιουργία δειγμάτων.

Η VR συνδέεται με αυτόν τον μηχανισμό όχι επειδή δημιουργεί το ψηφιακό δείγμα, αλλά επειδή μπορεί να το καταστήσει πιο αξιολογήσιμο. Η ψηφιακή δημιουργία δείγματος μπορεί να γίνει σε 3D λογισμικό, ενώ η VR προσφέρει ένα πιο εμπυθιστικό περιβάλλον μέσα στο οποίο το ψηφιακό ένδυμα μπορεί να εξεταστεί σε σχέση με το σώμα, την κίνηση και τον χώρο.

Επομένως, η VR μπορεί να ενισχύσει την αξιολόγηση των ψηφιακών δειγμάτων και, όταν συνδέεται με 3D δημιουργία δειγμάτων, να υποστηρίξει τη μείωση φυσικών πρωτοτύπων και επαναληπτικών διορθώσεων.

Η ίδια λογική ισχύει και για τους κύκλους διόρθωσης. Στη συμβατική διαδικασία, ένα δείγμα μπορεί να τροποποιηθεί πολλές φορές μέχρι να εγκριθεί. Κάθε αλλαγή μπορεί να σημαίνει νέο φυσικό δείγμα ή νέα αποστολή. Στην ψηφιακή διαδικασία, αρκετές διορθώσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν πρώτα στο ψηφιακό αρχείο, όπως αλλαγές στο πατρόν, στο μήκος, στη γραμμή, στο χρώμα ή στην εφαρμογή. Οι Casciani et al. (2022) αναφέρουν ότι η 3D μοντελοποίηση επιτρέπει την ενσωμάτωση και βελτιστοποίηση της ροής σχεδιασμού και ανάπτυξης, συμπεριλαμβάνοντας επαναληπτική πρωτοτυποποίηση, ελέγχους εφαρμογής, προσομοιώσεις λειτουργικής απόδοσης και οπτικοποίηση αισθητικών χαρακτηριστικών, όπως χρώμα, μοτίβο και υλικό. Έτσι, η διόρθωση μπορεί να μετατοπιστεί σε προγενέστερο ψηφιακό στάδιο, πριν μετατραπεί σε νέα φυσική παραγωγή.

4.2.2 Δοκιμή ενδιαφέροντος πριν από τη μαζική παραγωγή

Ο δεύτερος μηχανισμός αφορά τη δυνατότητα αξιολόγησης του ενδιαφέροντος για ένα σχέδιο ή μια συλλογή πριν από τη μαζική παραγωγή. Στη μόδα, οι επιχειρήσεις καλούνται να αποφασίσουν ποια προϊόντα θα προχωρήσουν, σε ποιες ποσότητες, χρώματα και παραλλαγές, πριν υπάρξει πλήρης εικόνα για την πραγματική ανταπόκριση της αγοράς. Όταν η ζήτηση υπερεκτιμάται, δημιουργούνται απούλητα αποθέματα, εκπτώσεις, οικονομικές απώλειες και τελικά σπατάλη προϊόντων και υλικών (Singh et al., 2019).

Η VR μπορεί να συνδεθεί με αυτόν τον μηχανισμό όταν χρησιμοποιείται ως περιβάλλον παρουσίασης και αξιολόγησης νέων σχεδίων πριν από τη φυσική παραγωγή. Μια συλλογή μπορεί να παρουσιαστεί ψηφιακά σε ομάδες σχεδιασμού, ανάπτυξης προϊόντος, αγορών ή εμπορικού σχεδιασμού, ώστε να αξιολογηθεί αν τα προϊόντα ανταποκρίνονται στη σχεδιαστική κατεύθυνση, στην εμπορική στρατηγική και στις ανάγκες της αγοράς στην οποία απευθύνονται. Με αυτόν τον τρόπο, η συζήτηση για το αν ένα προϊόν πρέπει να προχωρήσει μπορεί να γίνει πριν η επιχείρηση δεσμευτεί σε φυσικά δείγματα ή σε μεγαλύτερες ποσότητες παραγωγής (Sarakatsanos et al., 2024; Lee et al., 2020)

Η σημασία αυτής της διαδικασίας βρίσκεται στο ότι η VR μπορεί να προσφέρει πιο πλούσιο πλαίσιο αξιολόγησης από μια στατική εικόνα ή ένα τεχνικό σχέδιο. Οι εμπλεκόμενοι μπορούν

να εξετάσουν το ένδυμα σε τρισδιάστατο περιβάλλον, να παρατηρήσουν τη γραμμή, τον όγκο, τις αναλογίες και τη συνολική εικόνα του προϊόντος και να συγκρίνουν εναλλακτικές εκδοχές πριν ληφθούν αποφάσεις παραγωγής. Η αξιολόγηση αυτή δεν εξαλείφει την αβεβαιότητα, αλλά μπορεί να βοηθήσει στον έγκαιρο εντοπισμό σχεδίων που χρειάζονται τροποποίηση ή δεν είναι αρκετά ώριμα για να προχωρήσουν (Sarakatsanos et al., 2024).

Επομένως, η δοκιμή ενδιαφέροντος πριν από τη μαζική παραγωγή λειτουργεί ως μηχανισμός ζήτησης. Αν ένα σχέδιο αξιολογηθεί αρνητικά ή θεωρηθεί εμπορικά αδύναμο σε ψηφιακό στάδιο, μπορεί να διορθωθεί ή να απορριφθεί πριν παραχθούν φυσικά δείγματα ή μεγάλες ποσότητες. Αντίθετα, τα σχέδια που εμφανίζουν μεγαλύτερη δυναμική μπορούν να προχωρήσουν με μεγαλύτερη βεβαιότητα. Με αυτόν τον τρόπο, η VR μπορεί να συμβάλει σε πιο επιλεκτικές αποφάσεις παραγωγής και να περιορίσει τον κίνδυνο παραγωγής προϊόντων που τελικά δεν θα αξιοποιηθούν.

4.2.3 Χρήση δεδομένων για πιο στοχευμένες αποφάσεις παραγωγής

Ο τρίτος μηχανισμός αφορά τη χρήση δεδομένων για τη μείωση της αβεβαιότητας πριν από τη μαζική παραγωγή. Στη μόδα, οι αποφάσεις για το ποια σχέδια θα προχωρήσουν, σε ποιες ποσότητες, χρώματα ή παραλλαγές, λαμβάνονται συχνά πριν υπάρξει σαφής εικόνα για τη μελλοντική ζήτηση. Αυτό είναι ιδιαίτερα κρίσιμο για νέα προϊόντα, τα οποία δεν διαθέτουν προηγούμενο ιστορικό πωλήσεων. Επομένως, η αξιοποίηση διαθέσιμων ψηφιακών πληροφοριών μπορεί να υποστηρίξει πιο τεκμηριωμένες αποφάσεις πριν η επιχείρηση δεσμευτεί σε φυσική παραγωγή.

Στο επίπεδο της πρόβλεψης ζήτησης, οι Singh et al. (2019) δείχνουν ότι η εκτίμηση της ζήτησης για νέα προϊόντα μόδας δεν μπορεί να βασιστεί αποκλειστικά σε ιστορικές πωλήσεις, επειδή τα νέα σχέδια δεν έχουν προηγούμενο εμπορικό ιστορικό. Για τον λόγο αυτό, προτείνουν μοντέλα που αξιοποιούν χαρακτηριστικά προϊόντων, εμπορικούς παράγοντες και διαθέσιμα δεδομένα πωλήσεων, ώστε να εκτιμηθεί καλύτερα η πιθανή ζήτηση νέων ειδών. Η σημασία αυτής της προσέγγισης είναι ότι η απόφαση παραγωγής μπορεί να υποστηριχθεί από δεδομένα και όχι μόνο από εμπειρική κρίση ή αβέβαιες προβλέψεις.

Αντίστοιχα, οι Papadopoulos et al. (2022) αναδεικνύουν ότι η πρόβλεψη της απήχησης ενός νέου ενδύματος είναι δύσκολη όταν δεν υπάρχουν προηγούμενα δεδομένα πωλήσεων. Η συμβολή της μελέτης τους είναι ότι δείχνει πως ακόμη και πριν από την εμπορική κυκλοφορία

ενός προϊόντος μπορούν να αξιοποιηθούν διαθέσιμες ψηφιακές πληροφορίες, όπως η εικόνα, η περιγραφή και τα βασικά χαρακτηριστικά του, για να εκτιμηθεί η πιθανή ανταπόκριση της αγοράς. Το σημείο αυτό είναι σημαντικό επειδή συνδέει την ψηφιακή πληροφορία με τη μείωση της αβεβαιότητας πριν από τη φυσική παραγωγή.

Η VR μπορεί να συνδεθεί με αυτή τη λογική όταν λειτουργεί ως περιβάλλον παρουσίασης και αξιολόγησης ψηφιακών σχεδίων πριν από τη φυσική παραγωγή. Μια συλλογή ή ένα επιμέρους ένδυμα μπορεί να παρουσιαστεί ψηφιακά σε ομάδες σχεδιασμού, ανάπτυξης προϊόντος, αγορών ή εμπορικού σχεδιασμού, ώστε να αξιολογηθεί αν αξίζει να προχωρήσει, να τροποποιηθεί ή να απορριφθεί. Σε αυτό το πλαίσιο, η VR δεν εξετάζεται ως εργαλείο καταναλωτικής εμπειρίας μετά την παραγωγή, αλλά ως μέρος της προπαραγωγικής διαδικασίας λήψης αποφάσεων.

Επομένως, η χρήση δεδομένων μπορεί να συμβάλει στον περιορισμό της υπερπαραγωγής όταν συνδέεται με αποφάσεις που λαμβάνονται πριν από τη δέσμευση υλικών και παραγωγικής δυναμικότητας. Η VR μπορεί να ενισχύσει αυτή τη διαδικασία προσφέροντας ένα πιο πλούσιο περιβάλλον αξιολόγησης των ψηφιακών προϊόντων, ενώ τα δεδομένα μπορούν να υποστηρίξουν την επιλογή των σχεδίων που έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα εμπορικής ανταπόκρισης. Με αυτόν τον τρόπο, η παραγωγή μπορεί να γίνει πιο επιλεκτική, πιο στοχευμένη και λιγότερο εξαρτημένη από αβέβαιες εκτιμήσεις.

4.3 Προϋποθέσεις εφαρμογής στη βιομηχανία της μόδας

Η ανάλυση των προηγούμενων ενοτήτων έδειξε ότι η εικονική πραγματικότητα μπορεί να συμβάλει στη μείωση παραγωγής και σπατάλης όταν εντάσσεται σε ένα ευρύτερο ψηφιακό σύστημα ανάπτυξης προϊόντος. Επομένως, η αποτελεσματικότητά της εξαρτάται από το αν υπάρχουν οι κατάλληλες τεχνικές, ανθρώπινες και οργανωσιακές προϋποθέσεις.

Οι τρισδιάστατες εικονικές και ψηφιακές τεχνολογίες στη μόδα, όπως η τρισδιάστατη μοντελοποίηση, η VR, η AR, η σάρωση σώματος και τα ψηφιακά δίδυμα, μπορούν να αποϋλοποιήσουν ορισμένες φάσεις της παραδοσιακής αλυσίδας αξίας και να συντομεύσουν στάδια όπως ο σχεδιασμός, η πρωτοτυποποίηση, η παραγωγή, το μάρκετινγκ και η λιανική πώληση (Casciani et al., 2022). Ωστόσο, η δυνατότητα αυτή δεν πραγματοποιείται αυτόματα. Για να λειτουργήσει η VR ως εργαλείο που υποστηρίζει τη βιωσιμότητα, πρέπει να συνδεθεί

με αξιόπιστα ψηφιακά αρχεία, κατάλληλες δεξιότητες και οργανωσιακή ενσωμάτωση στις διαδικασίες της επιχείρησης.

Με βάση αυτή τη λογική, η παρούσα ενότητα εξετάζει τρεις βασικές προϋποθέσεις εφαρμογής. Την τεχνολογική ωριμότητα και την ποιότητα των ψηφιακών αρχείων, το κόστος και την εκπαίδευση του προσωπικού, καθώς και την οργανωσιακή αλλαγή και συνεργασία στην εφοδιαστική αλυσίδα.

4.3.1 Τεχνολογική ωριμότητα και ποιότητα ψηφιακών αρχείων

Η πρώτη προϋπόθεση αφορά την τεχνολογική ωριμότητα των εργαλείων που υποστηρίζουν την εικονική αξιολόγηση. Για να μπορεί ένα ένδυμα να αξιολογηθεί σε περιβάλλον VR, πρέπει πρώτα να έχει δημιουργηθεί ως αξιόπιστο ψηφιακό δείγμα. Αυτό σημαίνει ότι η ψηφιακή αναπαράσταση δεν μπορεί να περιορίζεται σε μια απλή εικόνα του προϊόντος, αλλά πρέπει να αποδίδει με επαρκή ακρίβεια το σχέδιο, την εφαρμογή, την πτώση του υφάσματος, τις αναλογίες και τη σχέση του ενδύματος με το σώμα.

Η τεχνολογική ωριμότητα των 3D εργαλείων αποτελεί βασική προϋπόθεση για την αξιοποίηση της VR, επειδή η εικονική αξιολόγηση εξαρτάται από την ποιότητα του ψηφιακού δείγματος που προβάλλεται. Όπως επισημαίνουν οι Baria et al. (2025), η 3D δημιουργία δειγμάτων μπορεί να υποστηρίξει την ανάπτυξη και αξιολόγηση ενδυμάτων πριν από τη φυσική κατασκευή, ωστόσο η αξιοπιστία της διαδικασίας επηρεάζεται από την ακρίβεια της ψηφιακής αναπαράστασης, τη ρεαλιστική απόδοση των υλικών και την ικανότητα του συστήματος να προσομοιώνει πειστικά την εφαρμογή και την πτώση του υφάσματος. Επομένως, στην περίπτωση της VR, το κρίσιμο ζήτημα δεν είναι μόνο η ύπαρξη ψηφιακού ενδύματος, αλλά η ποιότητα και η τεχνική αξιοπιστία του ψηφιακού αρχείου πάνω στο οποίο βασίζεται η εικονική αξιολόγηση.

Η τεχνολογική ωριμότητα, όμως, δεν αφορά μόνο την ύπαρξη λογισμικού. Αφορά και την ποιότητα των δεδομένων που εισάγονται σε αυτό. Αν οι ιδιότητες του υφάσματος, οι διαστάσεις του σώματος ή το πατρών δεν αποδοθούν σωστά, τότε η ψηφιακή εικόνα μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένη αξιολόγηση. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τη μόδα, όπου η αξία του ενδύματος δεν εξαρτάται μόνο από το σχήμα του, αλλά και από τον τρόπο με τον οποίο κινείται, εφαρμόζει και αλληλεπιδρά με το σώμα. Οι Baria et al. (2025) επισημαίνουν ότι, παρά την πρόοδο των 3D τεχνολογιών, εξακολουθούν να υπάρχουν δυσκολίες στη ρεαλιστική

αναπαράσταση των υλικών, ιδίως ως προς την υφή, το πάχος και την απτική αίσθηση του υφάσματος. Συνεπώς, η ψηφιακή αξιολόγηση μπορεί να είναι πολύ χρήσιμη, αλλά δεν πρέπει να θεωρείται πάντα πλήρης αντικατάσταση της φυσικής εμπειρίας.

Η σημασία της ακρίβειας γίνεται ακόμη πιο έντονη όταν η VR συνδέεται με την εφαρμογή και την εξατομίκευση. Οι Wolff et al. (2023) δείχνουν ότι τα τυποποιημένα μεγέθη δεν καλύπτουν επαρκώς τις διαφοροποιήσεις των ανθρώπινων σωμάτων, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε κακή εφαρμογή και υπερπαραγωγή. Η μελέτη τους προτείνει εργαλείο σχεδιασμού εξατομικευμένων ενδυμάτων με βάση τρισδιάστατες σαρώσεις σώματος, λαμβάνοντας υπόψη όχι μόνο τη στατική μορφή του σώματος, αλλά και μεταβάσεις ανάμεσα σε διαφορετικές στάσεις. Αυτό δείχνει ότι η αξιόπιστη ψηφιακή αξιολόγηση δεν μπορεί να βασίζεται αποκλειστικά σε ένα γενικό ψηφιακό σώμα, αλλά χρειάζεται πιο ακριβή δεδομένα σώματος και κίνησης.

Η τεχνική αξιοπιστία αφορά επίσης το ίδιο το περιβάλλον VR. Όταν η αξιολόγηση πραγματοποιείται μέσα σε εικονική πραγματικότητα, είναι σημαντικό η κλίμακα, η κίνηση και η θέση του χρήστη στον χώρο να αποδίδονται με ακρίβεια. Οι Jost et al. (2019), εξετάζοντας συστήματα εικονικής πραγματικότητας έξι βαθμών ελευθερίας, τονίζουν ότι πριν χρησιμοποιηθούν τέτοια συστήματα σε ερευνητικές ή βιομηχανικές εφαρμογές πρέπει να επιβεβαιώνεται ότι παρέχουν συνεπείς και αξιόπιστες μετρήσεις κίνησης. Παρότι η μελέτη δεν αφορά ειδικά τη μόδα, είναι χρήσιμη για να υπογραμμιστεί ότι η VR ως εργαλείο αξιολόγησης χρειάζεται τεχνική ακρίβεια.

Επομένως, η πρώτη προϋπόθεση εφαρμογής είναι η ύπαρξη ώριμης ψηφιακής υποδομής. Χωρίς αξιόπιστα ψηφιακά δείγματα, σωστά δεδομένα υφασμάτων, ακριβή ψηφιακά σώματα και τεχνικά σταθερό περιβάλλον VR, η εικονική πραγματικότητα κινδυνεύει να λειτουργήσει περισσότερο ως εργαλείο προβολής παρά ως εργαλείο ουσιαστικής προπαραγωγικής αξιολόγησης.

4.3.2 Κόστος, δεξιότητες και εκπαίδευση προσωπικού

Η δεύτερη προϋπόθεση αφορά το κόστος υιοθέτησης και τις δεξιότητες του ανθρώπινου δυναμικού. Η μετάβαση σε 3D και VR περιβάλλοντα δεν περιορίζεται στην αγορά ενός λογισμικού ή μιας συσκευής εικονικής πραγματικότητας. Απαιτεί επενδύσεις σε ψηφιακά εργαλεία, εξοπλισμό, άδειες χρήσης, δημιουργία ψηφιακών αρχείων, εκπαίδευση προσωπικού

και τεχνική υποστήριξη. Για τον λόγο αυτό, η εφαρμογή τέτοιων τεχνολογιών μπορεί να είναι πιο εύκολη για μεγάλες επιχειρήσεις, αλλά δυσκολότερη για μικρότερες επιχειρήσεις ή προμηθευτές με περιορισμένους πόρους.

Οι Baria et al. (2025) αναφέρουν ότι, παρότι η 3D δημιουργία δειγμάτων μπορεί να μειώσει υλικά, χρόνο και κόστος σε σύγκριση με τη φυσική δημιουργία δειγμάτων, η υιοθέτησή της συνοδεύεται από σημαντικά εμπόδια. Τα βασικότερα είναι το υψηλό αρχικό κόστος, η ανάγκη εξειδικευμένης εκπαίδευσης και οι δυσκολίες που σχετίζονται με τη ρεαλιστική απόδοση των υλικών. Ειδικά για μικρομεσαίες επιχειρήσεις, οι επενδύσεις σε προηγμένα ψηφιακά συστήματα και η ανάγκη κατάρτισης προσωπικού μπορούν να αποτελέσουν ουσιαστικό περιορισμό.

Η ανάγκη εκπαίδευσης δεν αφορά μόνο τους σχεδιαστές. Η ψηφιακή ανάπτυξη προϊόντος απαιτεί συμμετοχή πολλών διαφορετικών επαγγελματικών ομάδων – σχεδιαστών, τεχνικών ανάπτυξης προϊόντος, στελεχών παραγωγής, υπευθύνων αγορών, στελεχών εμπορικού σχεδιασμού και ομάδων μάρκετινγκ. Η μελέτη των Conlon και Gallery (2024) είναι ιδιαίτερα χρήσιμη, επειδή δείχνει ότι η ανάπτυξη ψηφιακών δεξιοτήτων δεν αφορά μόνο τη χρήση ενός 3D εργαλείου, αλλά και την κατανόηση ενός νέου μοντέλου ανάπτυξης προϊόντος. Οι συμμετέχοντες στο masterclass κατανόησαν καλύτερα τον ρόλο των 3D και εικονικών τεχνολογιών σε πιο βιώσιμες διαδικασίες ανάπτυξης προϊόντος, καθώς και τη θέση τους ως μελλοντικά στελέχη μάρκετινγκ ή διοίκησης μέσα σε ένα μοντέλο όπου το προϊόν μπορεί να σχεδιαστεί, να παρουσιαστεί, να πωληθεί και έπειτα να παραχθεί.

Η ίδια μελέτη δείχνει ότι η βιομηχανία της μόδας χρειάζεται επαγγελματίες που μπορούν να κατανοούν τις ψηφιακές τεχνολογίες πέρα από το στενό τεχνικό επίπεδο. Δεν αρκεί κάποιος να γνωρίζει πώς λειτουργεί ένα λογισμικό. Πρέπει να μπορεί να αντιληφθεί πώς τα ψηφιακά δείγματα συνδέονται με την ανάπτυξη συλλογών, την εμπορική αξιολόγηση, τη βιωσιμότητα, την επικοινωνία με προμηθευτές και τη λήψη αποφάσεων. Αυτό είναι κρίσιμο για την εφαρμογή της VR, επειδή η τεχνολογία μπορεί να επηρεάσει την παραγωγή μόνο αν οι ομάδες γνωρίζουν πώς να τη χρησιμοποιούν σε πραγματικές αποφάσεις και όχι μόνο σε παρουσιάσεις.

Η εκπαίδευση του προσωπικού συνδέεται επίσης με την αλλαγή επαγγελματικής κουλτούρας. Οι Casciani et al. (2022) αναφέρουν ότι οι τρισδιάστατες εικονικές και ψηφιακές τεχνολογίες απαιτούν νέα επαγγελματικά προφίλ, τα οποία συνδυάζουν γνώσεις μόδας, ψηφιακής τεχνολογίας και επιχειρηματικής λειτουργίας. Παράλληλα, επισημαίνουν ότι η ψηφιοποίηση

μπορεί να δημιουργήσει κενά δεξιοτήτων και ανάγκη συνεχούς εκπαίδευσης. Επομένως, η επιτυχής εφαρμογή της VR στη μόδα δεν είναι μόνο ζήτημα τεχνολογικής αγοράς, αλλά και ζήτημα εκπαίδευσης, προσαρμογής και ανάπτυξης νέων δεξιοτήτων.

Συνεπώς, η δεύτερη προϋπόθεση είναι η δημιουργία ανθρώπινης και οργανωσιακής ικανότητας. Αν οι εργαζόμενοι δεν έχουν εκπαιδευτεί κατάλληλα, η VR μπορεί να παραμείνει περιφερειακό εργαλείο εντυπωσιασμού. Αντίθετα, όταν οι ομάδες κατανοούν πώς να δημιουργούν, να αξιολογούν και να αξιοποιούν ψηφιακά δείγματα, η VR μπορεί να ενταχθεί ουσιαστικά στη διαδικασία λήψης αποφάσεων πριν από τη φυσική παραγωγή.

4.3.3 Οργανωσιακή αλλαγή και συνεργασία στην εφοδιαστική αλυσίδα

Η τρίτη προϋπόθεση αφορά την ένταξη της VR και των 3D τεχνολογιών στις οργανωμένες ροές της εφοδιαστικής αλυσίδας της μόδας. Η εφαρμογή τους δεν περιορίζεται στο στάδιο του σχεδιασμού, αλλά συνδέεται με τον τρόπο με τον οποίο οι ομάδες ανάπτυξης προϊόντος, οι προμηθευτές και οι συνεργάτες στο στάδιο της παραγωγής επικοινωνούν, αξιολογούν και λαμβάνουν αποφάσεις πριν από τη φυσική παραγωγή.

Οι Casciani et al. (2022) υποστηρίζουν ότι ο ψηφιακός μετασχηματισμός στη μόδα επηρεάζει συνολικά τις διαδικασίες, τις υπηρεσίες, τα επιχειρηματικά μοντέλα και την εφοδιαστική αλυσίδα. Οι τρισδιάστατες και εικονικές τεχνολογίες μπορούν να συμβάλουν στην αποϋλοποίηση ορισμένων δραστηριοτήτων, στη συντόμευση διαδικασιών και στην αναδιοργάνωση του λειτουργικού μοντέλου προς πιο συνεργατικές μορφές εργασίας.

Η οργανωσιακή αλλαγή περιλαμβάνει τη διασύνδεση διαφορετικών τμημάτων και επαγγελματικών ρόλων. Στη μόδα, η ανάπτυξη ενός προϊόντος συνδέει σχεδιαστές, τεχνικές ομάδες, υπεύθυνους υλικών, προμηθευτές, παραγωγούς, εμπορικά τμήματα και λιανέμπορους. Η ψηφιακή δημιουργία προϊόντος μπορεί να λειτουργήσει ως κοινή βάση εργασίας για αυτές τις ομάδες, εφόσον τα ψηφιακά αρχεία είναι προσβάσιμα, κατανοητά και αξιοποιήσιμα από διαφορετικούς εμπλεκόμενους. Οι Conlon και Gallery (2024) τονίζουν ότι οι 3D τεχνολογίες συνδέονται με τη σύγκλιση διαφορετικών λειτουργιών της επιχείρησης και με την ανάγκη οι επαγγελματίες της μόδας να κατανοούν τον τρόπο με τον οποίο τα ψηφιακά αρχεία κινούνται μέσα στην αλυσίδα αξίας.

Η ανάγκη συνεργασίας αφορά και τις σχέσεις με προμηθευτές, παραγωγούς και άλλους φορείς της εφοδιαστικής αλυσίδας. Ο ΟΟΣΑ επισημαίνει ότι οι επιχειρήσεις στον κλάδο ένδυσης και

υπόδησης χρειάζεται να εντοπίζουν, να προλαμβάνουν και να μετριάζουν πιθανές αρνητικές επιπτώσεις όχι μόνο στις δικές τους δραστηριότητες, αλλά και στην ευρύτερη αλυσίδα εφοδιασμού τους (OECD, 2018). Αν και η πηγή δεν αφορά ειδικά τη VR, είναι χρήσιμη επειδή δείχνει ότι κάθε τεχνολογική μετάβαση στη μόδα πρέπει να εντάσσεται σε υπεύθυνες και συνεργατικές πρακτικές.

Η συνεργασία είναι ιδιαίτερα σημαντική επειδή η βιομηχανία της μόδας είναι γεωγραφικά κατακερματισμένη. Ο σχεδιασμός, η ανάπτυξη, η παραγωγή και η διανομή μπορεί να πραγματοποιούνται σε διαφορετικές χώρες και από διαφορετικούς οργανισμούς. Η VR μπορεί να δημιουργήσει ένα κοινό ψηφιακό περιβάλλον αξιολόγησης, όμως αυτό δεν αρκεί από μόνο του. Χρειάζονται κοινές διαδικασίες, σαφείς ρόλοι, συμβατά ψηφιακά αρχεία και συμφωνημένος τρόπος αξιοποίησης της ψηφιακής πληροφορίας. Διαφορετικά, το ψηφιακό περιβάλλον κινδυνεύει να παραμείνει αποκομμένο από τις πραγματικές αποφάσεις παραγωγής.

Επομένως, η οργανωσιακή ενσωμάτωση σχετίζεται άμεσα με το αν η VR μπορεί να επηρεάσει τις υλικές ροές της παραγωγής. Αν η τεχνολογία χρησιμοποιείται μόνο για παρουσίαση ψηφιακών δειγμάτων, χωρίς να μειώνει φυσικά πρωτότυπα, επαναληπτικές διορθώσεις ή λανθασμένες αποφάσεις παραγωγής, η συμβολή της στη βιωσιμότητα παραμένει περιορισμένη. Αντίθετα, όταν οι ψηφιακές αξιολογήσεις οδηγούν σε λιγότερα φυσικά δείγματα, καλύτερη επιλογή σχεδίων και πιο στοχευμένη παραγωγή, η VR μπορεί να λειτουργήσει ως μέρος μιας ευρύτερης στρατηγικής πρόληψης σπατάλης.

4.4 Περιορισμοί και προκλήσεις της χρήσης της εικονικής πραγματικότητας

Η παρούσα ενότητα εξετάζει τους βασικούς περιορισμούς που συνοδεύουν τη χρήση της εικονικής πραγματικότητας στη βιομηχανία της μόδας. Η ανάλυση εστιάζει σε τέσσερις άξονες – την τεχνική ακρίβεια της προσομοίωσης, την πρόσβαση στις απαιτούμενες υποδομές, το ενεργειακό και περιβαλλοντικό αποτύπωμα των ψηφιακών τεχνολογιών και, τέλος, τον κίνδυνο υπερβολικών ή μη τεκμηριωμένων ισχυρισμών βιωσιμότητας. Με αυτόν τον τρόπο, η ενότητα αποσαφηνίζει τα σημεία που πρέπει να ληφθούν υπόψη ώστε η χρήση της VR να αξιολογείται με ρεαλισμό και επιστημονική τεκμηρίωση.

4.4.1 Τεχνικοί περιορισμοί και ακρίβεια προσομοίωσης

Ο πρώτος περιορισμός αφορά την ακρίβεια της ψηφιακής αναπαράστασης. Για να αξιολογηθεί ένα ένδυμα σε περιβάλλον VR, πρέπει πρώτα να έχει δημιουργηθεί ένα αξιόπιστο 3D ψηφιακό δείγμα. Αν το ψηφιακό δείγμα δεν αποδίδει σωστά το πατρόν, την εφαρμογή, την πτώση του υφάσματος, τις πτυχώσεις, τον όγκο ή τις λεπτομέρειες του ενδύματος, τότε η εικονική αξιολόγηση μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένες αποφάσεις. Επομένως, η αξιοπιστία της VR εξαρτάται άμεσα από την ποιότητα του ψηφιακού υλικού πάνω στο οποίο βασίζεται.

Η ανασκόπηση των Baria et al. (2025) δείχνει ότι τα εργαλεία 3D δημιουργίας δειγμάτων μπορούν να υποστηρίξουν την οπτικοποίηση της εφαρμογής, της υφής και της πτώσης του ενδύματος χωρίς άμεση ανάγκη φυσικού δείγματος. Ωστόσο, η ίδια πηγή επισημαίνει ότι εξακολουθούν να υπάρχουν σημαντικές τεχνικές δυσκολίες, κυρίως ως προς τη ρεαλιστική απόδοση των υλικών, την απτική αίσθηση, την υφή και το πάχος του υφάσματος. Αυτό σημαίνει ότι η ψηφιακή αξιολόγηση μπορεί να είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τη μορφή, τη γραμμή και την οπτική συμπεριφορά του ενδύματος, αλλά δεν μπορεί πάντα να αντικαταστήσει πλήρως τη φυσική εμπειρία του υλικού.

Η παρατήρηση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη μόδα, επειδή το ένδυμα δεν αξιολογείται μόνο ως εικόνα. Είναι υλικό αντικείμενο που φοριέται, κινείται και έρχεται σε επαφή με το σώμα. Η πραγματική αίσθηση ενός υφάσματος, το βάρος του, η ελαστικότητά του, η θερμική του συμπεριφορά και η αίσθηση που δημιουργεί στο δέρμα δύσκολα αποδίδονται πλήρως σε ένα ψηφιακό περιβάλλον. Ακόμη και όταν η προσομοίωση είναι οπτικά ικανοποιητική, μπορεί να μην επαρκεί για τελικές αποφάσεις σε προϊόντα όπου η υλικότητα αποτελεί κεντρικό στοιχείο της αξίας τους.

Ένας επιπλέον τεχνικός περιορισμός αφορά την ίδια τη λειτουργία του εικονικού περιβάλλοντος. Η αξιολόγηση σε VR απαιτεί σταθερή απεικόνιση, σωστή αντίληψη κλίμακας, ομαλή κίνηση και ακριβή παρουσίαση του σώματος ή του ψηφιακού μοντέλου. Αν το περιβάλλον παρουσιάζει καθυστέρηση, παραμορφώσεις ή χαμηλή ποιότητα απεικόνισης, τότε μειώνεται η εμπιστοσύνη του χρήστη στην αξιολόγηση. Συνεπώς, η VR μπορεί να λειτουργήσει ως εργαλείο προπαραγωγικής αξιολόγησης μόνο όταν το ψηφιακό ένδυμα, το ψηφιακό σώμα και το ίδιο το περιβάλλον προβολής έχουν επαρκή τεχνική αξιοπιστία.

Για τον λόγο αυτό, η VR δεν πρέπει να παρουσιάζεται ως πλήρης αντικατάσταση της φυσικής αξιολόγησης, αλλά ως ενδιάμεσο ψηφιακό στάδιο που μπορεί να μειώσει μέρος της αβεβαιότητας πριν από τη φυσική παραγωγή. Είναι καταλληλότερη για την πρώιμη αξιολόγηση σχεδίου, εφαρμογής, αναλογιών, όγκου και κίνησης, ενώ η φυσική αξιολόγηση παραμένει σημαντική όταν η αφή, η πραγματική υφή και η τελική συμπεριφορά του υφάσματος είναι κρίσιμες.

4.4.2 Πρόσβαση, ψηφιακό χάσμα και εξάρτηση από τεχνολογικές υποδομές

Ο δεύτερος περιορισμός αφορά την άνιση πρόσβαση στις τεχνολογικές υποδομές που απαιτούνται για την αξιοποίηση της VR και των 3D εργαλείων στη μόδα. Παρότι οι τεχνολογίες αυτές μπορούν να υποστηρίξουν πιο ευέλικτες και ψηφιακά οργανωμένες διαδικασίες ανάπτυξης προϊόντος, η εφαρμογή τους προϋποθέτει κατάλληλο λογισμικό, υπολογιστική ισχύ, ψηφιοποιημένα υλικά, τεχνική υποστήριξη και εξειδικευμένες δεξιότητες. Για τον λόγο αυτό, η πρόσβαση σε τέτοια συστήματα δεν είναι ίδια για όλες τις επιχειρήσεις ή για όλους τους κρίκους της εφοδιαστικής αλυσίδας.

Οι Baria et al. (2025) αναφέρουν ότι, παρά τα πλεονεκτήματα της 3D δημιουργίας δειγμάτων ως προς τη μείωση χρόνου, κόστους και υλικών, η υιοθέτηση αυτών των τεχνολογιών συνοδεύεται από εμπόδια. Τα σημαντικότερα είναι το υψηλό αρχικό κόστος, η ανάγκη εξειδικευμένης εκπαίδευσης, οι απαιτήσεις σε εξοπλισμό και οι δυσκολίες σύνδεσης με υπάρχοντα συστήματα της επιχείρησης. Στο πλαίσιο της παρούσας ενότητας, τα εμπόδια αυτά δεν εξετάζονται μόνο ως οικονομικό ζήτημα, αλλά κυρίως ως παράγοντες που μπορούν να δημιουργήσουν άνιση δυνατότητα πρόσβασης και αξιοποίησης των νέων τεχνολογιών.

Το ζήτημα αυτό δημιουργεί πιθανό ψηφιακό χάσμα μέσα στον κλάδο. Οι επιχειρήσεις που έχουν πρόσβαση σε λογισμικό, εξοπλισμό και εξειδικευμένο προσωπικό μπορούν να ενσωματώσουν ταχύτερα τις νέες τεχνολογίες στις διαδικασίες τους. Αντίθετα, μικρότερες επιχειρήσεις, ανεξάρτητοι σχεδιαστές ή προμηθευτές σε λιγότερο ψηφιοποιημένες αγορές μπορεί να δυσκολευτούν να ακολουθήσουν. Έτσι, μια τεχνολογία που θεωρητικά μπορεί να ενισχύσει τη βιωσιμότητα ενδέχεται πρακτικά να είναι διαθέσιμη μόνο σε ένα μέρος της βιομηχανίας.

Η πρόκληση δεν είναι μόνο οικονομική, αλλά και γνωσιακή. Η αξιοποίηση VR και 3D εργαλείων απαιτεί επαγγελματίες που μπορούν να κατανοούν τα ψηφιακά δείγματα, να

διαχειρίζονται αρχεία, να ερμηνεύουν προσομοιώσεις και να συνδέουν την ψηφιακή αξιολόγηση με πραγματικές αποφάσεις παραγωγής. Αν οι χρήστες δεν είναι εκπαιδευμένοι, η τεχνολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιφανειακά, κυρίως για παρουσίαση ή εντυπωσιασμό, χωρίς να επηρεάζει ουσιαστικά τη μείωση φυσικών δειγμάτων ή περιττών διορθώσεων.

4.4.3 Ενεργειακό και περιβαλλοντικό αποτύπωμα της VR

Ο τρίτος περιορισμός αφορά το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των ίδιων των ψηφιακών τεχνολογιών. Η εικονική πραγματικότητα συχνά παρουσιάζεται ως «άυλη» λύση, επειδή δεν απαιτεί ύφασμα ή φυσικό προϊόν για να δημιουργηθεί μια εμπειρία αξιολόγησης ή παρουσίασης. Ωστόσο, το ψηφιακό δεν είναι περιβαλλοντικά μηδενικό. Οι συσκευές VR, οι υπολογιστές υψηλής απόδοσης, οι διακομιστές, τα δίκτυα, η αποθήκευση αρχείων και η παραγωγή ψηφιακού περιεχομένου απαιτούν ενέργεια, πρώτες ύλες και τεχνολογική υποδομή.

Η μελέτη του Andrae (2017), η οποία πραγματοποιεί ανάλυση κύκλου ζωής συσκευής εικονικής πραγματικότητας, δείχνει ότι ένα σύστημα VR έχει δικό του περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Τα αποτελέσματα της μελέτης επηρεάζονται σημαντικά από την προέλευση μετάλλων, όπως ο χρυσός, από την ηλεκτρική ενέργεια που χρησιμοποιείται στην παραγωγή, από τη συναρμολόγηση των ηλεκτρονικών μερών και από τη διανομή του τελικού προϊόντος. Η μελέτη δείχνει επίσης ότι η χρήση ανακυκλωμένων μετάλλων και ηλεκτρικής ενέργειας χαμηλότερου περιβαλλοντικού αντίκτυπου θα μπορούσε να μειώσει σημαντικά μέρος του αποτυπώματος.

Η συμβολή της μελέτης είναι σημαντική, επειδή αποφεύγει την απλουστευτική θέση ότι κάθε ψηφιακή λύση είναι αναγκαστικά και βιώσιμη. Η VR μπορεί να μειώσει φυσικά δείγματα ή μετακινήσεις μόνο όταν αντικαθιστά πραγματικά τέτοιες διαδικασίες. Αν, αντίθετα, προστίθεται ως επιπλέον εργαλείο χωρίς να περιορίζει τη φυσική παραγωγή, τότε δημιουργεί πρόσθετο ψηφιακό και ενεργειακό φορτίο.

Ανάλογη κριτική διατυπώνεται και στη βιβλιογραφία για το μετασύμπαν. Ο Al-kfairy (2025) επισημαίνει ότι η περιβαλλοντική βιωσιμότητα των τεχνολογιών του μετασύμπαντος δεν είναι εγγενής στην εικονική τους φύση. Εξαρτάται από τον σχεδιασμό τους, την ενεργειακή υποδομή στην οποία βασίζονται, τη διάρκεια ζωής του εξοπλισμού και τις πιθανές παράπλευρες επιπτώσεις της αυξημένης ψηφιακής χρήσης. Ο συγγραφέας αναγνωρίζει ότι οι εικονικές τεχνολογίες μπορούν να μειώσουν ορισμένες φυσικές δραστηριότητες, όπως μετακινήσεις ή

πρωτοτυποποίηση, αλλά ταυτόχρονα δημιουργούν κινδύνους που σχετίζονται με υψηλή κατανάλωση ενέργειας, σύντομους κύκλους ζωής συσκευών και ηλεκτρονικά απόβλητα.

Οι Periyasamy και Periyasami (2023) επίσης υποστηρίζουν ότι η ψηφιακή μόδα και το μετασύμπαν μπορούν να προσφέρουν δυνατότητες για πιο βιώσιμες πρακτικές, όπως ψηφιακές παρουσιάσεις, εικονική δοκιμή, εξατομίκευση και καλύτερη πρόβλεψη ζήτησης. Παράλληλα, όμως, αναδεικνύουν την ανάγκη ύπαρξης ισχυρής υποδομής, υπολογιστικής ισχύος, συνδεσιμότητας και αποθήκευσης δεδομένων. Αυτό δείχνει ότι η ψηφιακή μόδα βασίζεται σε υλικές και ενεργειακές προϋποθέσεις, ακόμη και όταν το τελικό προϊόν ή η εμπειρία εμφανίζεται ως «άυλη».

Επομένως, η περιβαλλοντική αξιολόγηση της VR πρέπει να είναι συγκριτική. Δεν αρκεί να εξετάζεται αν ένα ψηφιακό δείγμα δεν καταναλώνει ύφασμα. Πρέπει να εξετάζεται ποιο φυσικό στάδιο αντικαθιστά, πόσα δείγματα αποφεύγονται, πόση ενέργεια απαιτείται για τη δημιουργία και προβολή του ψηφιακού αρχείου, πόσο συχνά ανανεώνεται ο εξοπλισμός και αν η χρήση της τεχνολογίας μειώνει ή αυξάνει τελικά το συνολικό αποτύπωμα. Η VR έχει περιβαλλοντική αξία μόνο όταν η μείωση φυσικών διαδικασιών είναι μεγαλύτερη από το νέο ψηφιακό αποτύπωμα που δημιουργεί.

4.4.4 Υπερβολικός τεχνολογικός ενθουσιασμός και παραπλανητική προβολή περιβαλλοντικής υπευθυνότητας

Ο τέταρτος περιορισμός αφορά τον κίνδυνο υπερβολικού τεχνολογικού ενθουσιασμού και παραπλανητικής προβολής περιβαλλοντικής υπευθυνότητας, πρακτική που στη διεθνή βιβλιογραφία αναφέρεται ως greenwashing. Η μόδα είναι ένας κλάδος όπου η καινοτομία συχνά αξιοποιείται επικοινωνιακά. Νέες τεχνολογίες, όπως η VR, η ψηφιακή μόδα και το μετασύμπαν, μπορούν να παρουσιαστούν ως βιώσιμες λύσεις επειδή φαίνονται να μειώνουν την ανάγκη για φυσικά υλικά. Ωστόσο, αν οι ισχυρισμοί αυτοί δεν συνοδεύονται από μετρήσιμα δεδομένα και διαφάνεια, υπάρχει ο κίνδυνος να λειτουργήσουν περισσότερο ως στρατηγική εικόνας παρά ως πραγματική περιβαλλοντική βελτίωση.

Η μελέτη της Ledendal (2026) για την εικονική συλλογή Neo-Ex της Carlings είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την κατανόηση αυτού του κινδύνου. Η συγγραφέας δείχνει ότι η εικονική μόδα παρουσιάζεται επικοινωνιακά ως πιο βιώσιμη εναλλακτική σε σχέση με την παραδοσιακή ένδυση, επειδή συνδέεται με τη μείωση αποβλήτων. Ωστόσο, η ίδια μελέτη επισημαίνει ότι ο

σχεδιασμός, η παραγωγή ψηφιακής εικόνας και η αποθήκευση εικονικών ενδυμάτων απαιτούν ενέργεια και μπορούν να έχουν σημαντικό περιβαλλοντικό κόστος. Η απουσία διαφάνειας γύρω από αυτές τις ενεργειακές απαιτήσεις και η έλλειψη ανεξάρτητης επαλήθευσης καθιστούν προβληματικούς τους ισχυρισμούς βιωσιμότητας.

Η παρατήρηση αυτή συνδέεται με το ευρύτερο πρόβλημα του greenwashing στη μόδα. Οι Badhwar et al. (2024), μέσα από συστηματική ανασκόπηση για το πράσινο μάρκετινγκ και το greenwashing στη βιομηχανία μόδας και κλωστοϋφαντουργίας, δείχνουν ότι ορισμένες επιχειρήσεις προβάλλουν μια πράσινη εικόνα χωρίς να πραγματοποιούν ουσιαστικές περιβαλλοντικές ή κοινωνικές αλλαγές. Η ίδια μελέτη τονίζει ότι οι ασαφείς περιβαλλοντικοί όροι, η παραπλανητική χρήση πιστοποιήσεων και οι διαφορετικές ερμηνείες των «πράσινων» ισχυρισμών από τους καταναλωτές μπορούν να ενισχύσουν τη σύγχυση και να υπονομεύσουν την εμπιστοσύνη.

Αντίστοιχα, οι Adamkiewicz et al. (2022) επισημαίνουν ότι το greenwashing στη μόδα συνδέεται με ασαφείς ή παραπλανητικούς περιβαλλοντικούς ισχυρισμούς, ελλιπή διαφάνεια και δυσκολία διάκρισης ανάμεσα στην πραγματική περιβαλλοντική πρακτική και στην επικοινωνιακή προβολή της. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για την ψηφιακή μόδα και τη VR, επειδή μια εταιρεία μπορεί να παρουσιάζει μια εικονική συλλογή, ένα ψηφιακό showroom ή μια εμπειρία VR ως βιώσιμη πρωτοβουλία, χωρίς να τεκμηριώνει ότι μειώθηκαν πράγματι τα φυσικά δείγματα, η παραγωγή, τα αποθέματα ή οι μεταφορές.

Συνεπώς, η χρήση της VR ως εργαλείου βιωσιμότητας χρειάζεται αυστηρή τεκμηρίωση. Δεν αρκεί να αναφέρεται ότι μια εμπειρία είναι ψηφιακή για να θεωρηθεί βιώσιμη. Πρέπει να εξετάζεται αν η εφαρμογή της οδήγησε σε πραγματική μείωση υλικών, ενέργειας, μετακινήσεων ή αποβλήτων. Επίσης, πρέπει να υπάρχει σαφής πληροφόρηση για το ψηφιακό αποτύπωμα της τεχνολογίας, ώστε να αποφεύγεται η μεταφορά του προβλήματος από τη φυσική παραγωγή στην ψηφιακή υποδομή.

Ο κίνδυνος παραπλανητικής προβολής είναι ιδιαίτερα έντονος όταν η VR χρησιμοποιείται περισσότερο ως εργαλείο επικοινωνίας παρά ως εργαλείο μετασχηματισμού της παραγωγικής διαδικασίας. Αν μια επιχείρηση χρησιμοποιεί εικονικές παρουσιάσεις αλλά συνεχίζει να παράγει την ίδια ποσότητα φυσικών δειγμάτων και απούλητων προϊόντων, τότε η τεχνολογία δεν επιφέρει ουσιαστική βιωσιμότητα. Αντίθετα, αν η VR συνδέεται με λιγότερα φυσικά πρωτότυπα, καλύτερη επιλογή σχεδίων, πιο στοχευμένη παραγωγή και διαφανή μέτρηση

αποτελεσμάτων, τότε μπορεί να αποτελέσει μέρος μιας ουσιαστικότερης στρατηγικής μείωσης σπατάλης.

Συνολικά, οι περιορισμοί της εικονικής πραγματικότητας δεν ακυρώνουν τη χρησιμότητά της, αλλά προσδιορίζουν τις συνθήκες υπό τις οποίες μπορεί να έχει ουσιαστική συμβολή. Η αξία της εξαρτάται από την ακρίβεια της προσομοίωσης, την ποιότητα των ψηφιακών αρχείων, την πρόσβαση σε κατάλληλες υποδομές, την περιβαλλοντική αξιολόγηση των ψηφιακών συστημάτων και τη διαφάνεια των ισχυρισμών βιωσιμότητας. Μόνο όταν οι εικονικές εφαρμογές οδηγούν σε μετρήσιμη μείωση φυσικών διαδικασιών μπορούν να θεωρηθούν ουσιαστικό εργαλείο περιορισμού παραγωγής και σπατάλης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

5.1 Συνοπτική αποτίμηση της εργασίας

Η παρούσα εργασία εξέτασε τη σχέση ανάμεσα στην ψηφιακή μόδα, την εικονική πραγματικότητα και τη δυνατότητα μείωσης της παραγωγής και της σπατάλης υλικών στη βιομηχανία της μόδας. Το βασικό ζητούμενο δεν ήταν να παρουσιαστεί η εικονική πραγματικότητα ως μια αυτόνομη τεχνολογική λύση, αλλά να διερευνηθεί εάν και με ποιους τρόπους μπορεί να ενταχθεί σε έναν ευρύτερο ψηφιακό μετασχηματισμό του κύκλου ανάπτυξης προϊόντος. Για τον λόγο αυτό, η ανάλυση εστίασε κυρίως στα προπαραγωγικά στάδια, όπου λαμβάνονται αποφάσεις για τον σχεδιασμό, την εφαρμογή, τα φυσικά δείγματα, τις διορθώσεις και την τελική έγκριση ενός προϊόντος.

Αφετηρία της εργασίας αποτέλεσε η διαπίστωση ότι η σπατάλη στη μόδα δεν περιορίζεται στο τέλος του κύκλου ζωής των ενδυμάτων, δηλαδή στην απόρριψη από τον καταναλωτή ή στη διαχείριση μεταχειρισμένων προϊόντων. Σημαντικό μέρος της διαμορφώνεται ήδη πριν από τη μαζική παραγωγή, μέσα από διαδικασίες που σχετίζονται με την αβεβαιότητα της ζήτησης, τη συνεχή ανανέωση συλλογών, τη δημιουργία φυσικών πρωτοτύπων, τις επαναληπτικές διορθώσεις και την ανάγκη γρήγορης διάθεσης νέων προϊόντων στην αγορά. Το σύγχρονο μοντέλο παραγωγής της μόδας, ιδιαίτερα όταν συνδέεται με πρακτικές γρήγορης μόδας, ενισχύει την πίεση για ταχύτητα, όγκο και συνεχή παραγωγή νέων σχεδίων, αυξάνοντας τον κίνδυνο υπερπαραγωγής και σπατάλης υλικών (Niinimäki et al., 2020).

Στη συνέχεια, η εργασία ανέδειξε την ψηφιακή μόδα ως ένα πεδίο που δεν αφορά μόνο την αισθητική ή εμπορική παρουσίαση ψηφιακών ενδυμάτων, αλλά και τον μετασχηματισμό των διαδικασιών σχεδιασμού, ανάπτυξης και αξιολόγησης προϊόντων. Ο τρισδιάστατος σχεδιασμός, τα ψηφιακά πρωτότυπα, οι βιβλιοθήκες υλικών, τα ψηφιακά δίδυμα και οι εικονικές ροές εργασίας μπορούν να μεταφέρουν μέρος της ανάπτυξης προϊόντος από το φυσικό στο ψηφιακό περιβάλλον. Η σημασία αυτής της μετάβασης βρίσκεται στο ότι ορισμένες αποφάσεις μπορούν να ληφθούν πριν από τη δέσμευση φυσικών πόρων, περιορίζοντας την ανάγκη για πολλαπλά φυσικά δείγματα και διαδοχικές υλικές δοκιμές.

Μέσα σε αυτό το πλαίσιο, η εικονική πραγματικότητα εξετάστηκε ως ειδικότερο τεχνολογικό εργαλείο που μπορεί να ενισχύσει την εμπειρία αξιολόγησης των ψηφιακών προϊόντων μόδας. Σε αντίθεση με μια απλή δισδιάστατη απεικόνιση ή μια τρισδιάστατη προβολή σε οθόνη, η VR

προσφέρει αίσθηση χώρου, κλίμακας, εμβύθισης και παρουσίας. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι κρίσιμα για τη μόδα, επειδή το ένδυμα δεν αξιολογείται μόνο ως εικόνα, αλλά ως αντικείμενο που σχετίζεται με το σώμα, την κίνηση, την εφαρμογή, τον όγκο και την υλικότητα.

Η ανάλυση έδειξε ότι η περιβαλλοντική αξία της VR δεν είναι άμεση ούτε δεδομένη. Η τεχνολογία αποκτά ουσιαστική σημασία όταν εντάσσεται σε οργανωμένες ψηφιακές ροές εργασίας και όταν επηρεάζει πραγματικές αποφάσεις σχεδιασμού, ανάπτυξης και παραγωγής. Μπορεί να συμβάλει στη μείωση της σπατάλης όταν χρησιμοποιείται για την έγκαιρη αξιολόγηση σχεδίων, τον περιορισμό φυσικών πρωτοτύπων, τη μείωση επαναληπτικών διορθώσεων, τη συνεργατική λήψη αποφάσεων και την καλύτερη επιλογή των προϊόντων που θα προχωρήσουν στη φυσική παραγωγή.

Παράλληλα, η εργασία ανέδειξε ότι η VR πρέπει να προσεγγίζεται με ρεαλισμό. Η αξιολόγηση ενός ενδύματος δεν εξαρτάται μόνο από την οπτική του αναπαράσταση, αλλά και από την υφή, το βάρος, την ελαστικότητα, την αφή και τη συμπεριφορά του υφάσματος σε πραγματικές συνθήκες. Επομένως, η VR δεν μπορεί να αντικαταστήσει πλήρως τη φυσική αξιολόγηση, ιδίως σε προϊόντα όπου η υλικότητα αποτελεί κρίσιμο στοιχείο ποιότητας. Συνολικά, η αξία της βρίσκεται κυρίως στην προληπτική της λειτουργία, κατά την οποία μπορεί να βοηθήσει τις επιχειρήσεις να λαμβάνουν πιο τεκμηριωμένες αποφάσεις πριν από τη φυσική παραγωγή και να περιορίζουν διαδικασίες που συνεπάγονται άσκοπη χρήση υλικών.

5.2 Απάντηση στα ερευνητικά ερωτήματα

Η παρούσα εργασία οργανώθηκε γύρω από ένα κύριο ερευνητικό ερώτημα και πέντε δευτερεύοντα ερευνητικά ερωτήματα, με σκοπό να διερευνηθεί ο ρόλος της εικονικής πραγματικότητας στο πλαίσιο της ψηφιακής μόδας και η πιθανή συμβολή της στη μείωση της παραγωγής και της σπατάλης υλικών. Η απάντηση στα ερωτήματα αυτά προκύπτει από τη σύνδεση του παραγωγικού προβλήματος της μόδας με τις δυνατότητες του ψηφιακού μετασχηματισμού και ειδικότερα με τη χρήση της VR στα προπαραγωγικά στάδια.

Το πρώτο ερευνητικό ερώτημα αφορούσε τα χαρακτηριστικά του σύγχρονου μοντέλου παραγωγής της μόδας που συνδέονται με αυξημένη παραγωγή και σπατάλη υλικών. Από την ανάλυση προέκυψε ότι η σπατάλη στη μόδα δεν είναι τυχαίο ή απομονωμένο φαινόμενο, αλλά συνδέεται με τον τρόπο οργάνωσης του ίδιου του παραγωγικού συστήματος. Η γρήγορη μόδα βασίζεται στη συνεχή ανανέωση συλλογών, στη μείωση του χρόνου διάθεσης στην αγορά, στη

χαμηλή τιμή, στην παραγωγή μεγάλου όγκου προϊόντων και στην ανάγκη διαρκούς ανταπόκρισης στις μεταβαλλόμενες τάσεις. Τα χαρακτηριστικά αυτά αυξάνουν την πίεση για ταχύτητα και ποσότητα, ενώ παράλληλα ενισχύουν την εξάρτηση από προβλέψεις ζήτησης που συχνά δεν μπορούν να επαληθευτούν με ακρίβεια πριν από την παραγωγή.

Ιδιαίτερη σημασία έχει το γεγονός ότι τα φυσικά δείγματα και οι επαναληπτικές διορθώσεις λειτουργούν ως μηχανισμός μείωσης αβεβαιότητας για τις επιχειρήσεις, αλλά ταυτόχρονα δημιουργούν υλική επιβάρυνση. Κάθε νέο φυσικό πρωτότυπο απαιτεί ύφασμα, εργασία, χρόνο και συχνά μεταφορά ανάμεσα σε σχεδιαστικές, τεχνικές και παραγωγικές ομάδες. Επομένως, η αυξημένη παραγωγή και σπατάλη υλικών συνδέονται με τη δομική αβεβαιότητα της μόδας, την πίεση για ταχύτητα, την παραγωγή βάσει πρόβλεψης και την ανάγκη πολλαπλών υλικών ελέγχων πριν από την τελική έγκριση ενός προϊόντος.

Το δεύτερο ερευνητικό ερώτημα αφορούσε τον τρόπο με τον οποίο η ψηφιακή μόδα μετασχηματίζει τις διαδικασίες σχεδιασμού, ανάπτυξης και αξιολόγησης προϊόντων πριν από την παραγωγή. Η ανάλυση έδειξε ότι η ψηφιακή μόδα δεν πρέπει να περιορίζεται στην έννοια του ψηφιακού ενδύματος ως αυτόνομου προϊόντος ή ως μέσου προβολής σε εικονικά περιβάλλοντα. Αντίθετα, αποτελεί ένα ευρύτερο πεδίο τεχνολογικών πρακτικών που επηρεάζουν τον τρόπο με τον οποίο τα προϊόντα σχεδιάζονται, αναπτύσσονται, αξιολογούνται και εγκρίνονται. Ο τρισδιάστατος σχεδιασμός, τα ψηφιακά πρωτότυπα, τα λογισμικά προσομοίωσης υφάσματος, οι βιβλιοθήκες υλικών, τα ψηφιακά δίδυμα και οι πλατφόρμες συνεργασίας επιτρέπουν τη μεταφορά μέρους της ανάπτυξης προϊόντος από το φυσικό στο ψηφιακό περιβάλλον (Baek et al., 2022).

Η σημασία αυτού του μετασχηματισμού έγκειται στο ότι η αξιολόγηση ενός ενδύματος μπορεί να αρχίσει πριν από την κατασκευή φυσικού δείγματος. Οι σχεδιαστές, οι τεχνικοί σχεδίασης πατρών, τα στελέχη ανάπτυξης προϊόντων και οι εμπορικές ομάδες μπορούν να εξετάσουν διαφορετικές εκδοχές ενός προϊόντος και να αξιολογήσουν την εφαρμογή, τη γραμμή, τους χρωματικούς συνδυασμούς, τα υλικά και τις τεχνικές λεπτομέρειες σε ψηφιακή μορφή. Με αυτόν τον τρόπο, ο ψηφιακός μετασχηματισμός δεν περιορίζεται στην επιτάχυνση της παραγωγής, αλλά συνδέεται και με τη δυνατότητα λήψης πιο τεκμηριωμένων αποφάσεων πριν από τη δέσμευση φυσικών πόρων.

Το τρίτο ερευνητικό ερώτημα αφορούσε το πώς η εικονική πραγματικότητα επηρεάζει την εμπειρία αξιολόγησης προϊόντων στο στάδιο πριν από την παραγωγή. Η απάντηση συνδέεται

με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της VR, δηλαδή την εμβύθιση, την αίσθηση παρουσίας, τη χωρική αντίληψη και τη δυνατότητα αλληλεπίδρασης με ψηφιακά αντικείμενα σε τρισδιάστατο περιβάλλον. Σε αντίθεση με μια απλή εικόνα ή ένα τρισδιάστατο μοντέλο που προβάλλεται σε οθόνη, η VR επιτρέπει στον χρήστη να αντιληφθεί το ψηφιακό ένδυμα μέσα σε έναν χώρο, σε σχέση με το σώμα, την κλίμακα, την κίνηση και τη συνολική του παρουσία (Slater & Sanchez-Vives, 2016).

Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τη μόδα, επειδή το ένδυμα δεν αξιολογείται αποκλειστικά ως οπτική επιφάνεια. Η εφαρμογή, ο όγκος, η γραμμή, η πτώση του υφάσματος, οι αναλογίες και η συμπεριφορά του ενδύματος πάνω σε ένα σώμα αποτελούν στοιχεία που επηρεάζουν την τελική απόφαση. Η VR μπορεί να ενισχύσει αυτή την αξιολόγηση, επειδή δημιουργεί ένα πιο άμεσο και εμπειρικό περιβάλλον παρατήρησης. Ωστόσο, η επίδραση αυτή δεν πρέπει να υπερεκτιμηθεί. Η VR μπορεί να βελτιώσει την οπτική και χωρική αξιολόγηση, αλλά δεν αναπαράγει πλήρως την απτική εμπειρία του υφάσματος. Επομένως, λειτουργεί κυρίως ως συμπληρωματικό εργαλείο, το οποίο μπορεί να μειώσει μέρος της αβεβαιότητας πριν από το φυσικό δείγμα, χωρίς να καταργεί σε όλες τις περιπτώσεις την ανάγκη φυσικής επιβεβαίωσης.

Το τέταρτο ερευνητικό ερώτημα αφορούσε τον βαθμό και τις προϋποθέσεις υπό τις οποίες η εικονική πραγματικότητα μπορεί να συμβάλει στη μείωση της παραγωγής και της σπατάλης υλικών στον κύκλο παραγωγής της μόδας. Η εργασία έδειξε ότι η συμβολή της VR είναι κυρίως έμμεση και προληπτική. Η VR δεν μειώνει τη σπατάλη επειδή αντικαθιστά από μόνη της την παραγωγή, αλλά επειδή μπορεί να βελτιώσει τις αποφάσεις που προηγούνται της παραγωγής. Όταν ένα ένδυμα αξιολογείται με μεγαλύτερη σαφήνεια στο ψηφιακό περιβάλλον, είναι πιθανότερο να εντοπιστούν νωρίτερα σχεδιαστικές ή τεχνικές αδυναμίες, να περιοριστούν οι επαναλήψεις φυσικών πρωτοτύπων και να μειωθεί ο αριθμός των προϊόντων που προχωρούν σε φυσική ανάπτυξη χωρίς επαρκή τεκμηρίωση.

Η δυνατότητα αυτή συνδέεται με συγκεκριμένους μηχανισμούς. Η VR μπορεί να μειώσει την ανάγκη για πολλαπλά φυσικά δείγματα, να περιορίσει επαναληπτικές διορθώσεις, να ενισχύσει τη συνεργατική αξιολόγηση ανάμεσα σε ομάδες που βρίσκονται σε διαφορετικές τοποθεσίες και να υποστηρίξει πιο τεκμηριωμένες αποφάσεις σχετικά με το ποια σχέδια θα προχωρήσουν πριν δεσμευτούν υλικά, χρόνος και παραγωγική δυναμικότητα. Η εφαρμογή VR Designer, για παράδειγμα, αναδεικνύει τη δυνατότητα της VR να λειτουργήσει ως προπαραγωγικό επίπεδο αξιολόγησης, προσφέροντας στους σχεδιαστές καλύτερη αντίληψη της αισθητικής, της

εφαρμογής και της λειτουργικότητας του ενδύματος πριν από το στάδιο της κατασκευής (Sarakatsanos et al., 2024).

Παρά τα παραπάνω, η συμβολή της VR δεν είναι αυτόματη. Για να λειτουργήσει ως εργαλείο μείωσης σπατάλης, πρέπει να εντάσσεται σε οργανωμένες ψηφιακές ροές εργασίας. Απαιτούνται αξιόπιστα 3D μοντέλα, ακριβείς ψηφιακές βιβλιοθήκες υλικών, επαρκής ποιότητα προσομοίωσης, τεχνική κατάρτιση των ομάδων και σαφής σύνδεση της ψηφιακής αξιολόγησης με τις πραγματικές αποφάσεις παραγωγής. Αν η VR χρησιμοποιείται μόνο ως εργαλείο εντυπωσιακής παρουσίασης ή προώθησης, χωρίς να επηρεάζει τις αποφάσεις σχεδιασμού, ανάπτυξης προϊόντος και παραγωγής, τότε η περιβαλλοντική της συμβολή παραμένει περιορισμένη.

Το πέμπτο ερευνητικό ερώτημα αφορούσε τους βασικούς περιορισμούς και τις προκλήσεις της εφαρμογής της εικονικής πραγματικότητας ως εργαλείου βιωσιμότητας στη βιομηχανία της μόδας. Από την ανάλυση προέκυψε ότι οι περιορισμοί αυτοί είναι τεχνολογικοί, οργανωτικοί, αντιληπτικοί και περιβαλλοντικοί. Σε τεχνολογικό επίπεδο, η αξιοπιστία της VR εξαρτάται από την ποιότητα των τρισδιάστατων μοντέλων, την ακρίβεια της προσομοίωσης υφάσματος, την απόδοση της κίνησης, την ανάλυση, την καθυστέρηση απόκρισης και τη συνολική λειτουργικότητα του συστήματος. Σε οργανωτικό επίπεδο, απαιτούνται επενδύσεις, εκπαίδευση, διαλειτουργικά συστήματα, ενημερωμένες βιβλιοθήκες υλικών και εσωτερικές διαδικασίες που επιτρέπουν την αξιολόγηση μέσω εικονικής πραγματικότητας για τη λήψη αποφάσεων.

Σε επίπεδο αντίληψης και αποδοχής, η στάση των επαγγελματιών της μόδας αποτελεί κρίσιμο παράγοντα. Οι σχεδιαστές, οι τεχνικοί σχεδίασης πατρόν, οι υπεύθυνοι αγορών και τα στελέχη ανάπτυξης προϊόντων είναι συχνά εξοικειωμένοι με τη φυσική αξιολόγηση του υφάσματος και του δείγματος. Για τον λόγο αυτό, η μετάβαση σε ένα ψηφιακό ή εικονικό περιβάλλον αξιολόγησης μπορεί να δημιουργήσει επιφυλάξεις, ιδίως όταν η υλικότητα του προϊόντος θεωρείται καθοριστική για την τελική απόφαση. Παράλληλα, σε περιβαλλοντικό επίπεδο, η ίδια η τεχνολογία διαθέτει αποτύπωμα, καθώς η χρήση συστημάτων VR, υπολογιστικών υποδομών, διαδικασιών ψηφιακής απόδοσης, εξυπηρετητών και εξοπλισμού συνεπάγεται κατανάλωση ενέργειας και πιθανή παραγωγή ηλεκτρονικών αποβλήτων.

Με βάση την εστίαση της παρούσας εργασίας στα στάδια που προηγούνται της φυσικής παραγωγής, το κύριο ερευνητικό ερώτημα μπορεί να απαντηθεί με τη διαπίστωση ότι η

εικονική πραγματικότητα, στο πλαίσιο της ψηφιακής μόδας, μπορεί να συμβάλει στην πρόληψη και τη μείωση της παραγωγής και της σπατάλης υλικών στα πρώιμα παραγωγικά στάδια της βιομηχανίας της μόδας. Η συμβολή αυτή δεν είναι άμεση, καθολική ή αυτόματη, αλλά προκύπτει κυρίως μέσα από τη βελτίωση της αξιολόγησης πριν από τη φυσική παραγωγή. Ειδικότερα, η VR μπορεί να υποστηρίξει την έγκαιρη εξέταση ψηφιακών ενδυμάτων, να περιορίσει την ανάγκη για πολλαπλά φυσικά πρωτότυπα, να διευκολύνει τη συνεργατική αξιολόγηση και να οδηγήσει σε πιο τεκμηριωμένες αποφάσεις σχετικά με το ποια προϊόντα θα προχωρήσουν στο επόμενο στάδιο. Με αυτόν τον τρόπο, μπορεί να περιοριστεί μέρος της υλικής σπατάλης που δημιουργείται πριν από τη μαζική παραγωγή, υπό την προϋπόθεση ότι η τεχνολογία εντάσσεται σε οργανωμένες ψηφιακές ροές εργασίας, βασίζεται σε αξιόπιστα 3D δεδομένα και αξιολογείται σε σχέση με το δικό της περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

5.3 Θεωρητική συμβολή της εργασίας

Η θεωρητική συμβολή της παρούσας διπλωματικής εντοπίζεται στη σύνδεση της ψηφιακής μόδας με τη βιωσιμότητα της παραγωγικής διαδικασίας και, ειδικότερα, με τη δυνατότητα περιορισμού της σπατάλης υλικών πριν από τη φυσική παραγωγή. Η ψηφιακή μόδα αναδεικνύεται ως ευρύτερο πεδίο μετασχηματισμού των διαδικασιών σχεδιασμού, ανάπτυξης, αξιολόγησης και λήψης αποφάσεων στη βιομηχανία της μόδας.

Η προσέγγιση αυτή είναι σημαντική, καθώς μεταφέρει τη συζήτηση για τη βιωσιμότητα από το τελικό στάδιο του κύκλου ζωής των ενδυμάτων προς τα στάδια που προηγούνται της μαζικής παραγωγής. Η σπατάλη υλικών δεν αντιμετωπίζεται μόνο ως ζήτημα διαχείρισης αποβλήτων, ανακύκλωσης ή επαναχρησιμοποίησης, αλλά και ως αποτέλεσμα αποφάσεων που λαμβάνονται πολύ νωρίτερα, κατά τον σχεδιασμό, την ανάπτυξη προϊόντος, τη δημιουργία φυσικών δειγμάτων και την έγκριση συλλογών. Με αυτή την έννοια, η ψηφιακή μόδα αποκτά θεωρητική σημασία ως πεδίο πρόληψης της σπατάλης και όχι μόνο ως μέσο παρουσίας ή κατανάλωσης.

Μέσα σε αυτό το ευρύτερο πλαίσιο εντάσσεται και η εικονική πραγματικότητα. Η VR δεν εξετάζεται ως απομονωμένη τεχνολογία ούτε ως εργαλείο που μπορεί από μόνο του να καταστήσει τη μόδα βιώσιμη. Αντίθετα, προσεγγίζεται ως ένα ειδικότερο μέσο που μπορεί να ενισχύσει την αξιολόγηση των ψηφιακών ενδυμάτων στα πρώιμα παραγωγικά στάδια. Η θεωρητική της αξία προκύπτει από τη δυνατότητα να προσφέρει αίσθηση χώρου, κλίμακας, παρουσίας και πιο άμεσης παρατήρησης του ψηφιακού προϊόντος πριν από την κατασκευή φυσικού δείγματος.

Με βάση αυτή τη λογική, η σχέση ανάμεσα στην ψηφιακή μόδα, την εικονική πραγματικότητα και τη μείωση της σπατάλης δεν είναι άμεση ούτε αυτόματη. Η ψηφιακή μόδα δημιουργεί τις προϋποθέσεις ώστε μέρος της ανάπτυξης προϊόντος να μεταφερθεί σε ψηφιακό περιβάλλον, ενώ η VR μπορεί να ενισχύσει την αξιολόγηση αυτών των ψηφιακών προϊόντων πριν από τη φυσική παραγωγή. Όταν η αξιολόγηση γίνεται πιο σαφής και πιο τεκμηριωμένη, μπορεί να μειωθεί η αβεβαιότητα που οδηγεί σε πολλαπλά φυσικά πρωτότυπα, επαναληπτικές διορθώσεις και άσκοπη χρήση υλικών.

Συνολικά, η θεωρητική συμβολή της διπλωματικής βρίσκεται στη διαμόρφωση μιας πιο σύνθετης κατανόησης της βιωσιμότητας της μόδας μέσα από ψηφιακές τεχνολογίες. Η τεχνολογία δεν αντιμετωπίζεται ως αυτοσκοπός, αλλά ως μέρος ενός ευρύτερου συστήματος αποφάσεων. Η ψηφιακή μόδα προσφέρει το γενικότερο πλαίσιο μετασχηματισμού, ενώ η εικονική πραγματικότητα λειτουργεί ως ένα από τα εργαλεία που μπορούν να ενισχύσουν την προπαραγωγική αξιολόγηση. Με αυτόν τον τρόπο, αναδεικνύεται ότι οι ψηφιακές τεχνολογίες μπορούν να συνδεθούν με την πρόληψη της σπατάλης υλικών, υπό την προϋπόθεση ότι εντάσσονται σε οργανωμένες ροές εργασίας και επηρεάζουν πραγματικές αποφάσεις παραγωγής.

5.4 Πρακτικές επιπτώσεις για τη βιομηχανία της μόδας

Τα συμπεράσματα της ανάλυσης έχουν πρακτική σημασία για τις επιχειρήσεις μόδας, καθώς δείχνουν ότι ο ψηφιακός μετασχηματισμός μπορεί να επηρεάσει ουσιαστικά τα στάδια που προηγούνται της φυσικής παραγωγής. Η ψηφιακή μόδα μπορεί να αξιοποιηθεί ως εργαλείο οργάνωσης, αξιολόγησης και λήψης αποφάσεων κατά την ανάπτυξη νέων συλλογών και προϊόντων.

Μέσα από τον τρισδιάστατο σχεδιασμό, τα ψηφιακά πρωτότυπα, τις βιβλιοθήκες υλικών και τις ψηφιακές ροές εργασίας, οι επιχειρήσεις μπορούν να εξετάζουν περισσότερες εκδοχές ενός προϊόντος πριν δεσμεύσουν φυσικούς πόρους. Η πρακτική σημασία αυτής της μετάβασης βρίσκεται στο ότι μέρος της αβεβαιότητας που παραδοσιακά αντιμετωπιζόταν μέσω φυσικών δειγμάτων μπορεί να μεταφερθεί σε ψηφιακό περιβάλλον. Οι σχεδιαστικές, τεχνικές και εμπορικές ομάδες μπορούν να αξιολογούν την εφαρμογή, τη γραμμή, τις αναλογίες, τους χρωματικούς συνδυασμούς και τις τεχνικές λεπτομέρειες ενός προϊόντος πριν από την κατασκευή φυσικού πρωτοτύπου.

Σε αυτό το πλαίσιο, η εικονική πραγματικότητα μπορεί να λειτουργήσει ως πρόσθετο επίπεδο αξιολόγησης μέσα στο ευρύτερο ψηφιακό οικοσύστημα της επιχείρησης. Η αξία της βρίσκεται στη δυνατότητα να διευκολύνει την παρατήρηση του προϊόντος σε σχέση με το σώμα, την κίνηση, την κλίμακα και τον χώρο. Έτσι, μπορεί να υποστηρίξει πιο τεκμηριωμένες αποφάσεις σχετικά με το ποια σχέδια χρειάζονται περαιτέρω ανάπτυξη, ποια πρέπει να τροποποιηθούν και ποια δεν είναι σκόπιμο να προχωρήσουν σε φυσική παραγωγή.

Η πρακτική αυτή διάσταση είναι ιδιαίτερα σημαντική σε επιχειρήσεις όπου ο σχεδιασμός, η τεχνική ανάπτυξη, οι προμηθευτές και η παραγωγή βρίσκονται σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές. Η κοινή ψηφιακή ή εικονική αξιολόγηση μπορεί να περιορίσει καθυστερήσεις, ασυνεννοησίες, μετακινήσεις δειγμάτων και επαναληπτικές διορθώσεις. Με αυτόν τον τρόπο, η ψηφιακή μόδα και η VR μπορούν να συμβάλουν σε μια πιο οργανωμένη και επιλεκτική διαδικασία ανάπτυξης προϊόντων.

Ωστόσο, η πρακτική αξιοποίηση της VR προϋποθέτει περισσότερα από την απλή αγορά τεχνολογικού εξοπλισμού. Για να έχει ουσιαστική επίδραση στη μείωση της σπατάλης, πρέπει να στηρίζεται σε αξιόπιστα τρισδιάστατα μοντέλα, ενημερωμένες ψηφιακές βιβλιοθήκες υλικών, ακριβείς τεχνικές πληροφορίες και κατάλληλα εκπαιδευμένες ομάδες. Εξίσου σημαντικό είναι η ψηφιακή αξιολόγηση να συνδέεται με πραγματικές αποφάσεις παραγωγής. Αν η VR χρησιμοποιείται αποσπασματικά ή μόνο για λόγους προβολής, η συμβολή της στη βιωσιμότητα παραμένει περιορισμένη.

Συνολικά, οι πρακτικές επιπτώσεις της ανάλυσης δείχνουν ότι η ψηφιακή μόδα και η εικονική πραγματικότητα μπορούν να υποστηρίξουν μια πιο προληπτική προσέγγιση στη μείωση της σπατάλης υλικών. Η ψηφιακή μόδα παρέχει το ευρύτερο πλαίσιο για τον μετασχηματισμό της ανάπτυξης προϊόντος, ενώ η VR μπορεί να ενισχύσει ειδικότερα την αξιολόγηση πριν από τη φυσική παραγωγή. Όταν οι δύο αυτές διαστάσεις συνδέονται με οργανωμένες ροές εργασίας, τεχνική αξιοπιστία και σαφείς διαδικασίες λήψης αποφάσεων, μπορούν να συμβάλουν σε μια παραγωγική διαδικασία με λιγότερη σπατάλη.

5.5 Περιορισμοί της έρευνας

Η αναγνώριση των περιορισμών της παρούσας διπλωματικής είναι απαραίτητη για την ακριβέστερη ερμηνεία των συμπερασμάτων της. Οι περιορισμοί αυτοί δεν αναιρούν την ανάλυση, αλλά προσδιορίζουν το ερευνητικό πλαίσιο μέσα στο οποίο εξετάστηκε η σχέση

ανάμεσα στην ψηφιακή μόδα, την εικονική πραγματικότητα και τη μείωση της σπατάλης υλικών στα πρώιμα παραγωγικά στάδια.

Ο βασικότερος περιορισμός αφορά τη μεθοδολογική βάση της εργασίας. Η ανάλυση στηρίχθηκε σε βιβλιογραφική επισκόπηση, επιστημονικές μελέτες, δευτερογενή δεδομένα και επιλεγμένες εταιρικές περιπτώσεις. Επομένως, τα συμπεράσματα προκύπτουν μέσα από συνθετική και κριτική αποτίμηση της υπάρχουσας γνώσης και όχι μέσα από πρωτογενή εμπειρική μέτρηση σε συγκεκριμένη επιχείρηση μόδας. Αυτό σημαίνει ότι η εργασία μπορεί να αναδείξει τους μηχανισμούς μέσω των οποίων η VR ενδέχεται να συμβάλει στη μείωση φυσικών δειγμάτων, διορθώσεων και υλικής σπατάλης, χωρίς όμως να ποσοτικοποιεί άμεσα το μέγεθος αυτής της επίδρασης σε πραγματικές παραγωγικές συνθήκες.

Ένας δεύτερος περιορισμός σχετίζεται με τη φύση των διαθέσιμων ποσοτικών δεδομένων. Τα στοιχεία που αξιοποιούνται στη σχετική βιβλιογραφία προέρχονται από διαφορετικές μελέτες, εταιρικές περιπτώσεις, τεχνολογικές εφαρμογές και αναλύσεις κύκλου ζωής. Συνεπώς, δεν βασίζονται πάντοτε σε κοινή μεθοδολογία, δεν αφορούν τις ίδιες κατηγορίες προϊόντων και δεν εξετάζουν απαραίτητα τα ίδια στάδια της παραγωγικής διαδικασίας. Η ετερογένεια αυτή περιορίζει τη δυνατότητα άμεσης σύγκρισης των αποτελεσμάτων και δεν επιτρέπει τη διατύπωση ενός ενιαίου ποσοτικού συμπεράσματος για το ακριβές μέγεθος της συμβολής της VR.

Επιπλέον, η εφαρμογή της εικονικής πραγματικότητας στα προπαραγωγικά στάδια της μόδας αποτελεί ακόμη αναπτυσσόμενο πεδίο. Η διαθέσιμη βιβλιογραφία για τη VR στη μόδα επικεντρώνεται συχνότερα στο λιανικό εμπόριο, στα εικονικά καταστήματα, στη δοκιμή ενδυμάτων σε ψηφιακό περιβάλλον και στην εμπειρία καταναλωτή. Αντίθετα, οι μελέτες που εξετάζουν ειδικά τη VR ως εργαλείο προπαραγωγικής αξιολόγησης και περιορισμού υλικής σπατάλης είναι πιο περιορισμένες. Για τον λόγο αυτό, η παρούσα διπλωματική συνδύασε πηγές από την ψηφιακή μόδα, τον τρισδιάστατο σχεδιασμό, τα ψηφιακά πρωτότυπα, τη βιωσιμότητα και την εικονική πραγματικότητα, ώστε να διαμορφώσει μια πιο ολοκληρωμένη συνθετική προσέγγιση.

Τέλος, η περιβαλλοντική αξιολόγηση της VR παραμένει σύνθετη. Η πιθανή μείωση φυσικών δειγμάτων και μεταφορών πρέπει να εξετάζεται σε σχέση με το περιβαλλοντικό κόστος της ψηφιακής υποδομής, όπως η κατανάλωση ενέργειας, ο τεχνολογικός εξοπλισμός, η υπολογιστική ισχύς, η αποθήκευση δεδομένων και τα ηλεκτρονικά απόβλητα. Επομένως, η

βιωσιμότητα της VR δεν μπορεί να θεωρηθεί δεδομένη, αλλά χρειάζεται να αξιολογείται συγκριτικά και κατά περίπτωση.

Συνολικά, οι παραπάνω περιορισμοί δείχνουν ότι τα συμπεράσματα της διπλωματικής πρέπει να ερμηνευθούν ως τεκμηριωμένη θεωρητική και συνθετική αποτίμηση του πεδίου. Η αναγνώρισή τους ενισχύει την αξιοπιστία της ανάλυσης, καθώς επιτρέπει μια προσεκτική, ρεαλιστική και επιστημονικά ισορροπημένη κατανόηση της σχέσης ανάμεσα στην ψηφιακή μόδα, την εικονική πραγματικότητα και τη μείωση της σπατάλης υλικών.

5.6 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Με βάση τους περιορισμούς που αναδείχθηκαν, η μελλοντική έρευνα μπορεί να συμβάλει στην πιο ακριβή αξιολόγηση της σχέσης ανάμεσα στην ψηφιακή μόδα, την εικονική πραγματικότητα και τη μείωση της σπατάλης υλικών. Η παρούσα διπλωματική έδειξε ότι η συμβολή της εικονικής πραγματικότητας στα πρώιμα παραγωγικά στάδια είναι σημαντική ως δυνατότητα, αλλά χρειάζεται περαιτέρω εμπειρική διερεύνηση για να αποτιμηθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η πραγματική της επίδραση.

Μία βασική κατεύθυνση αφορά τη διεξαγωγή πρωτογενών μελετών σε επιχειρήσεις μόδας που εφαρμόζουν εικονική πραγματικότητα στα στάδια σχεδιασμού, ανάπτυξης και αξιολόγησης προϊόντων. Τέτοιες μελέτες θα μπορούσαν να εξετάσουν αν και σε ποιο βαθμό η χρήση της τεχνολογίας μειώνει τον αριθμό φυσικών δειγμάτων, τις επαναληπτικές διορθώσεις, τον χρόνο ανάπτυξης, τις μεταφορές δειγμάτων και την κατανάλωση υλικών.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα είχαν επίσης συγκριτικές μελέτες ανάμεσα σε διαφορετικές μορφές αξιολόγησης προϊόντων. Για παράδειγμα, θα μπορούσε να συγκριθεί η αξιολόγηση ενός φυσικού δείγματος με την αξιολόγηση ενός τρισδιάστατου ψηφιακού δείγματος σε οθόνη και με την αξιολόγηση του ίδιου προϊόντος σε περιβάλλον εικονικής πραγματικότητας. Μια τέτοια προσέγγιση θα βοηθούσε να αποσαφηνιστεί ποια στοιχεία αξιολογούνται αποτελεσματικότερα σε κάθε περίπτωση και σε ποιες συνθήκες η εικονική πραγματικότητα προσφέρει ουσιαστικό πλεονέκτημα.

Παράλληλα, είναι απαραίτητες περισσότερες αναλύσεις κύκλου ζωής, οι οποίες να εξετάζουν όχι μόνο το περιβαλλοντικό κόστος των φυσικών δειγμάτων, αλλά και το ενεργειακό και τεχνολογικό κόστος της εικονικής υποδομής. Η σύγκριση ανάμεσα στα υλικά, τις μεταφορές και τα απόβλητα που αποφεύγονται και στην ενέργεια, τον εξοπλισμό, την υπολογιστική ισχύ

και την αποθήκευση δεδομένων που απαιτούνται θα επέτρεπε πιο ασφαλή συμπεράσματα για την περιβαλλοντική αξία της τεχνολογίας.

Μια ακόμη σημαντική κατεύθυνση αφορά την αποδοχή της εικονικής πραγματικότητας από τους επαγγελματίες της μόδας. Μελλοντικές έρευνες θα μπορούσαν να εξετάσουν τις στάσεις σχεδιαστών, τεχνικών σχεδίασης πατρόν, στελεχών ανάπτυξης προϊόντων και υπευθύνων αγορών απέναντι στην ψηφιακή και εικονική αξιολόγηση. Η κατανόηση των παραγόντων που ενισχύουν ή περιορίζουν την εμπιστοσύνη τους στην τεχνολογία είναι κρίσιμη για την επιτυχή ένταξή της στις καθημερινές διαδικασίες ανάπτυξης προϊόντων.

Επιπλέον, η μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να εστιάσει στη βελτίωση της απτικής και ψευδοαπτικής αναπαράστασης των υφασμάτων. Η δυσκολία απόδοσης της υφής, του βάρους, της ελαστικότητας και της φυσικής συμπεριφοράς του υφάσματος παραμένει βασικός περιορισμός της εικονικής αξιολόγησης. Η ανάπτυξη πιο αξιόπιστων μεθόδων αναπαράστασης αυτών των ιδιοτήτων θα μπορούσε να ενισχύσει την ακρίβεια των αποφάσεων πριν από την κατασκευή φυσικού δείγματος.

Τέλος, θα ήταν χρήσιμο να διερευνηθεί η σύνδεση της εικονικής πραγματικότητας με πιο ευέλικτα παραγωγικά μοντέλα, όπως η παραγωγή κατόπιν ζήτησης, η εξατομικευμένη παραγωγή και οι μικρότερες παραγωγικές παρτίδες. Η εικονική πραγματικότητα δεν αποτελεί από μόνη της σύστημα περιορισμού της υπερπαραγωγής, μπορεί όμως να υποστηρίξει πιο προσεκτικές αποφάσεις πριν από τη δέσμευση υλικών και παραγωγικής δυναμικότητας.

Συνολικά, η μελλοντική έρευνα χρειάζεται να εξετάσει την εικονική πραγματικότητα όχι μόνο ως τεχνολογική εμπειρία, αλλά ως εργαλείο που εντάσσεται σε συγκεκριμένες παραγωγικές και οργανωτικές διαδικασίες. Με αυτόν τον τρόπο θα μπορεί να αξιολογηθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια πότε η χρήση της οδηγεί σε πραγματική μείωση φυσικών διαδικασιών και πότε παραμένει συμπληρωματικό μέσο παρουσίασης.

5.7 Τελικό συμπέρασμα

Η παρούσα διπλωματική κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η ψηφιακή μόδα μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στον μετασχηματισμό της βιομηχανίας της μόδας, ιδίως στα στάδια που προηγούνται της φυσικής παραγωγής. Η συμβολή της δεν περιορίζεται στη δημιουργία ψηφιακών ενδυμάτων ή στην αξιοποίηση νέων τεχνολογιών για λόγους προβολής. Συνδέεται κυρίως με τη δυνατότητα μεταφοράς μέρους του σχεδιασμού, της ανάπτυξης και της

αξιολόγησης προϊόντων σε ψηφιακό περιβάλλον, πριν από τη δέσμευση υλικών και παραγωγικών πόρων.

Η σημασία αυτής της προσέγγισης είναι ότι μετατοπίζει το ενδιαφέρον από τη διαχείριση της σπατάλης μετά την παραγωγή προς την πρόληψή της στα πρώιμα παραγωγικά στάδια. Η σπατάλη στη μόδα δεν δημιουργείται μόνο όταν ένα ένδυμα απορρίπτεται ή δεν πωλείται. Μπορεί να ξεκινήσει πολύ νωρίτερα, μέσα από πολλαπλά φυσικά δείγματα, επαναληπτικές διορθώσεις, λανθασμένες εκτιμήσεις ζήτησης και αποφάσεις παραγωγής που λαμβάνονται με αβεβαιότητα. Επομένως, η μείωση της σπατάλης συνδέεται και με την ποιότητα των αποφάσεων που λαμβάνονται πριν από τη φυσική παραγωγή.

Μέσα σε αυτό το πλαίσιο, η εικονική πραγματικότητα μπορεί να λειτουργήσει ως σημαντικό εργαλείο προπαραγωγικής αξιολόγησης. Η δυνατότητα που προσφέρει για πιο άμεση παρατήρηση του ψηφιακού ενδύματος, με αίσθηση χώρου, κλίμακας και παρουσίας, μπορεί να βοηθήσει τις ομάδες σχεδιασμού και ανάπτυξης να εντοπίζουν νωρίτερα ορισμένες σχεδιαστικές ή τεχνικές αδυναμίες. Με αυτόν τον τρόπο, μπορεί να περιοριστεί η ανάγκη για πολλαπλά φυσικά πρωτότυπα και να υποστηριχθούν πιο τεκμηριωμένες αποφάσεις σχετικά με το ποια προϊόντα θα προχωρήσουν σε φυσική ανάπτυξη και παραγωγή.

Ωστόσο, η εικονική πραγματικότητα δεν αποτελεί αυτόνομη λύση για τη βιωσιμότητα στη μόδα. Η συμβολή της είναι ουσιαστική μόνο όταν εντάσσεται σε ένα ευρύτερο ψηφιακό σύστημα ανάπτυξης προϊόντων. Ένα τέτοιο σύστημα προϋποθέτει αξιόπιστα τρισδιάστατα δεδομένα, ενημερωμένες ψηφιακές βιβλιοθήκες υλικών, κατάλληλη τεχνική υποστήριξη, εκπαίδευση των ομάδων και σύνδεση της ψηφιακής αξιολόγησης με πραγματικές αποφάσεις παραγωγής. Χωρίς αυτές τις προϋποθέσεις, η VR κινδυνεύει να παραμείνει εργαλείο παρουσίας, χωρίς ουσιαστική επίδραση στη μείωση της σπατάλης.

Το τελικό συμπέρασμα είναι ότι η ψηφιακή μόδα και η εικονική πραγματικότητα μπορούν να στηρίξουν μια πιο υπεύθυνη, επιλεκτική και προληπτική προσέγγιση στην παραγωγή της μόδας. Η ψηφιακή μόδα διαμορφώνει το ευρύτερο πλαίσιο μέσα στο οποίο οι αποφάσεις μπορούν να ληφθούν νωρίτερα και με καλύτερη πληροφόρηση, ενώ η VR μπορεί να ενισχύσει την αξιολόγηση που προηγείται της κατασκευής φυσικών δειγμάτων. Υπό αυτές τις προϋποθέσεις, οι ψηφιακές τεχνολογίες δεν αντικαθιστούν την ανθρώπινη κρίση ή τη φυσική εμπειρία του ενδύματος, αλλά μπορούν να συμβάλουν σε μια παραγωγική διαδικασία πιο οργανωμένη, πιο τεκμηριωμένη και με λιγότερη σπατάλη.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Adamkiewicz, J., Kochańska, E., Adamkiewicz, I., & Łukasik, R. M. (2022). Greenwashing and sustainable fashion industry. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 38, Article 100710. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2022.100710>
- Akram, S., Malik, P., Singh, R., Gehlot, A., Juyal, A., Ghafoor, K., & Shrestha, S. (2022). Implementation of digitalized technologies for fashion industry 4.0: Opportunities and challenges. *Scientific Programming*, 2022, Article 7523246. <https://doi.org/10.1155/2022/7523246>
- Al-kfairy, M. (2025). Greening the virtual: An interdisciplinary narrative review on the environmental sustainability of the Metaverse. *Sustainability*, 17(16), Article 7269. <https://doi.org/10.3390/su17167269>
- Andrae, A. S. G. (2017). Life cycle assessment of a virtual reality device. *Challenges*, 8(2), Article 15. <https://doi.org/10.3390/challe8020015>
- Arrigo, E. (2020). Global sourcing in fast fashion retailers: Sourcing locations and sustainability considerations. *Sustainability*, 12(2), Article 508. <https://doi.org/10.3390/su12020508>
- Aslam, U., & Davis, L. (2024). Analyzing consumer expectations and experiences of augmented reality (AR) apps in the fashion retail sector. *Journal of Retailing and Consumer Services*, 76, Article 103577.
- Aus, R., Moora, H., Vihma, M., Unt, R., Kiisa, M., & Kapur, S. (2021). Designing for circular fashion: Integrating upcycling into conventional garment manufacturing processes. *Fashion and Textiles*, 8, Article 34. <https://doi.org/10.1186/s40691-021-00262-9>
- Badhwar, A., Islam, S., Tan, C. S. L., Panwar, T., Wigley, S., & Nayak, R. (2024). Unraveling green marketing and greenwashing: A systematic review in the context of the fashion and textiles industry. *Sustainability*, 16(7), Article 2738. <https://doi.org/10.3390/su16072738>
- Badhwar, A., Tan, C. S. L., & Islam, S. (2023). Exploring the potential of blockchain technology within the fashion and textile supply chain with a focus on traceability, transparency, and product authenticity: A systematic review. *Frontiers in Blockchain*, 6, Article 1044723. <https://doi.org/10.3389/fbloc.2023.1044723>

- Baek, E., Choo, H. J., Wei, X., & Yoo, J. J. (2022). Digital fashion: A systematic literature review across business and marketing. *Computers in Human Behavior*, 138, Article 107407. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2022.107407>
- Barnes, L., & Lea-Greenwood, G. (2006). Fast fashioning the supply chain: Shaping the research agenda. *Journal of Fashion Marketing and Management: An International Journal*, 10(3), 259–271. <https://doi.org/10.1108/13612020610679259>
- Baria, B., Shahid, M. A., Misra, A., Hoque, M. B., Rahman, M. M., Hossain, M. D., & Das, D. (2025). Transformative effect of 3D sampling technology for the ready-made garment industry: A review. *Textile Research Journal*. <https://doi.org/10.1177/00405175251360399>
- Bhardwaj, V., & Fairhurst, A. (2010). Fast fashion: Response to changes in the fashion industry. *The International Review of Retail, Distribution and Consumer Research*, 20(1), 165–173. <https://doi.org/10.1080/09593960903498300>
- Bieńkowska, J. (2025). The effects of artificial intelligence on the fashion industry: Opportunities and challenges for sustainable transformation. *Sustainable Development*, 33(1), e1. <https://doi.org/10.1002/sd.3312>
- Burberry. (2024, November 11). *Burberry builds on legacy of digital innovation with virtual scarf try-on experience* [Press release]. Burberry plc. <https://www.burberryplc.com/news/brand/2024/burberry-builds-on-legacy-of-digital-innovation-with-virtual-sca>
- Browzwear. (2024). *What is digital product creation in the fashion industry?* <https://browzwear.com/blog/what-is-digital-product-creation-in-the-fashion-industry>
- Cachon, G. P., & Swinney, R. (2011). The value of fast fashion: Quick response, enhanced design, and strategic consumer behavior. *Management Science*, 57(4), 778–795. <https://doi.org/10.1287/mnsc.1100.1303>
- Carvalho, C., Silva, C., & Abreu, M. J. (2025). Circular economy: Literature review on the implementation of the digital product passport (DPP) in the textile industry. *Sustainability*, 17(5), Article 1802. <https://doi.org/10.3390/su17051802>
- Casciani, D., Chkanikova, O., & Pal, R. (2022). Exploring the nature of digital transformation in the fashion industry: Opportunities for supply chains, business models, and sustainability-

oriented innovations. *Sustainability: Science, Practice and Policy*, 18(1), 773–795. <https://doi.org/10.1080/15487733.2022.2125640>

Chang, H. J., Lee, H.-Y., & Kim, M. J. (2025). Virtual reality in fashion: A systematic review and research agenda. *Clothing and Textiles Research Journal*. <https://doi.org/10.1177/0887302X251352563>

Christopher, M., Lowson, R., & Peck, H. (2004). Creating agile supply chains in the fashion industry. *International Journal of Retail & Distribution Management*, 32(8), 367–376. <https://doi.org/10.1108/09590550410546188>

Conlon, J., & Gallery, C. (2024). Developing digital skills: A fashion business masterclass in virtual 3D prototyping with Style3D. *International Journal of Fashion Design, Technology and Education*, 17(1), 76–85. <https://doi.org/10.1080/17543266.2023.2247425>

Cornell Chronicle. (2025, November 9). ‘Roadmap’ shows the environmental impact of AI data center boom. *Cornell University*. <https://news.cornell.edu/stories/2025/11/roadmap-shows-environmental-impact-ai-data-center-boom>

Erdem, S. B., Büyükkamacı, N., & Birol, Ş. (2026). Environmental benefits of virtual sampling for garment production. *Journal of Cleaner Production*, 538, Article 147401. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.147401>

Ευρωπαϊκή Επιτροπή. (2024). *Κανονισμός (ΕΕ) 2024/1781 — Ecodesign for Sustainable Products Regulation (ESPR)*. Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Fortune Business Insights. (2026). *Fast fashion market*. <https://www.fortunebusinessinsights.com/fast-fashion-market-112250>

Grand View Research. (2024a). *Virtual fitting room market size, share & trends analysis report, 2030*. <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/virtual-fitting-room-market>

Grand View Research. (2024b). *Virtual fitting room market to reach \$20.65Bn by 2030*. <https://www.grandviewresearch.com/press-release/global-virtual-fitting-room-market>

Habib, A., Ullah, A., Maha, M. M., & Bristy, A. (2025). Advancing sustainable fashion through 3D virtual design for reduced environmental impact. *Journal of Textile Engineering & Fashion Technology*, 11(3), 135–142.

ILG. (2026, February 2). *A guide to e-commerce fashion returns*. International Logistics Group. <https://www.international-logistics-group.com/uk-en/insights/e-commerce-fashion-returns-161371/>

Irovan, M., Florea-Burduja, E., Raru, A., Tutunaru, I., & Frunze, V. (2025). Digital technologies and sustainability in contemporary fashion within education and industrial transformation. *TEXTEH XII*, 140.

Islam, I. S., Haq, H. M., Hossain, M. F., Biswas, H., & Uddin, M. B. (2025). Innovative solutions for sustainable fashion: QR code-driven pre-consumer waste sorting in garment manufacturing. *Materials Circular Economy*, 7(1), Article 49. <https://doi.org/10.1007/s42824-025-00196-3>

Jhanji, Y. (2018). Computer-aided design—garment designing and patternmaking. In *Automation in garment manufacturing*. Technological Institute of Textile and Sciences. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101211-6.00011-2>

Jost, T. A., Drewelow, G., Koziol, S., & Rylander, J. (2019). A quantitative method for evaluation of 6 degree of freedom virtual reality systems. *Journal of Biomechanics*, 97, Article 109379. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2019.109379>

Karadayi-Usta, S. (2024). Role of artificial intelligence and augmented reality in fashion industry from consumer perspective: Sustainability through waste and return mitigation. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 133, Article 108114. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.108114>

Ki, C.-W., Chong, S. M., & Ha-Brookshire, J. E. (2020). How fashion can achieve sustainable development through a circular economy and stakeholder engagement: A systematic literature review. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, 27(6), 2401–2424. <https://doi.org/10.1002/csr.1970>

Kim, S. J. (2023). Virtual fashion experiences in virtual reality fashion show spaces. *Frontiers in Psychology*, 14, Article 1276856. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2023.1276856>

LaValle, S. M. (2023). *Virtual reality*. Cambridge University Press. <https://lavalle.pl/vr/>

Ledendal, M. (2026). Communicating virtual fashion: A case study of the virtual collection Neo-Ex. In P. von Wachenfeldt, L. Cantoni, N. Sabatini, & T. Sádaba (Eds.), *Fashion*

communication in the digital age: Proceedings of the FACTUM 25 Conference (pp. 239–253). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-99481-4_18

Lee, J. H., Yang, E. K., Lee, E. J., Min, S. Y., Sun, Z. Y., & Xue, B. J. (2020). The use of VR for collaborative exploration and enhancing creativity in fashion design education. *International Journal of Fashion Design, Technology and Education*, 14(1), 48–57. <https://doi.org/10.1080/17543266.2020.1858350>

Li, R., Liu, W., & Zhou, S. (2024). Digital transformation of supply chain management in the fast fashion industry: A case study of Zara. *SHS Web of Conferences*, 181, Article 04019. <https://doi.org/10.1051/shsconf/202418104019>

Magwegwe, F. M., & Shaik, A. (2024). Theory of planned behavior and fast fashion purchasing: An analysis of interaction effects. *Current Psychology*, 43, 28868–28885. <https://doi.org/10.1007/s12144-024-06465-9>

Mathew, M., Mathew, M., & Spinelli, R. (2025). Decoding sustainable drivers: A systematic literature review on sustainability-induced consumer behaviour in the fast fashion industry. *Sustainable Production and Consumption*, 55, 132–145. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2025.02.011>

McKinsey & Company. (2025). *What is fast fashion?* <https://www.mckinsey.com/featured-insights/mckinsey-explainers/what-is-fast-fashion>

McQuillan, H. (2020). Digital 3D design as a tool for augmenting zero-waste fashion design practice. *International Journal of Fashion Design, Technology and Education*, 13(1), 89–100. <https://doi.org/10.1080/17543266.2020.1737248>

Milgram, P., & Kishino, F. (1994). A taxonomy of mixed reality visual displays. *IEICE Transactions on Information and Systems*, E77-D(12), 1321–1329. <http://www.alice.id.tue.nl/references/milgram-kishino-1994.pdf>

Moltenbrey, F., & Fischer, T. (2021). Retail 4.0: Digital customer and retailer feedback to garment development. *Journal of Textile Science & Fashion Technology*, 8(2), Article 000682. <https://doi.org/10.33552/JTSFT.2021.08.000682>

Morandi, A., & Tonelli, C. (2023). *The impact of 3D technology on sustainability in fashion luxury product design: Evidences from an exploratory analysis* [Master's thesis, Scuola di Ingegneria Industriale e dell'Informazione, Milano].

- Nann, L., Finken, D., Döring, T., & Hofstetter, R. (2024). The illusion of luxury: Augmented reality's clash with brand essence. *Marketing Review St. Gallen*, 41(2), 50–57.
- Nguyen, O. D. Y., Bucic, T., Ngo, L. V., & Oppewal, H. (2023). Disposal-based scarcity: How overstock reduction methods influence consumer brand perceptions and evaluations. *Journal of the Academy of Marketing Science*, 51, 1305–1326. <https://doi.org/10.1007/s11747-023-00969-9>
- Niinimäki, K., Peters, G., Dahlbo, H., Perry, P., Rissanen, T., & Gwilt, A. (2020). The environmental price of fast fashion. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(4), 189–200. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0039-9>
- OECD. (2018). *OECD due diligence guidance for responsible supply chains in the garment and footwear sector*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/9789264290587-en>
- Papaefthymiou, M., Plelis, K., Mavromatis, D., & Papagiannakis, G. (2015, December). *Mobile virtual reality featuring a six degrees of freedom interaction paradigm in a virtual museum application* (Technical Report FORTH-ICS/TR-462). Foundation for Research and Technology – Hellas, Institute of Computer Science.
- Papadopoulos, S.-I., Koutlis, C., Papadopoulos, S., & Kompatsiaris, I. (2022). Multimodal Quasi-AutoRegression: Forecasting the visual popularity of new fashion products. *International Journal of Multimedia Information Retrieval*, 11, 717–729. <https://doi.org/10.1007/s13735-022-00262-5>
- Periyasamy, A. P., & Periyasami, S. (2023). Rise of digital fashion and metaverse: Influence on sustainability. *Digital Economy and Sustainable Development*, 1, Article 16. <https://doi.org/10.1007/s44265-023-00016-z>
- Ricci, M. (2024). *Designing next-generation retail experiences via virtual reality and pseudo-haptics* [Doctoral dissertation, Politecnico di Bari].
- Ricci, M., Evangelista, A., Di Roma, A., & Fiorentino, M. (2023). Immersive and desktop virtual reality in virtual fashion stores: A comparison between shopping experiences. *Virtual Reality*, 27, 2281–2296. <https://doi.org/10.1007/s10055-023-00806-y>
- Sarakatsanos, O., Papazoglou-Chalikias, A., Boikou, M., Chatzilari, E., Jauk, M., Hafliger, U., Nikolopoulos, S., & Kompatsiaris, I. (2024). VR Designer: Enhancing fashion showcases

through immersive virtual garment fitting. *Virtual Reality*, 28, Article 70. <https://doi.org/10.1007/s10055-024-00945-w>

Särmäkari, N. (2023). Digital 3D fashion designers: Cases of Atacac and The Fabricant. *Fashion Theory*, 27(1), 85–114. <https://research.aalto.fi/en/publications/digital-3d-fashion-designers-cases-of-atacac-and-the-fabricant>

Shi, M., Chussid, C., Yang, P., Jia, M., Lewis, V. D., & Cao, W. (2021). The exploration of artificial intelligence application in fashion trend forecasting. *Textile Research Journal*, 91(11–12), 1357–1374. <https://doi.org/10.1177/00405175211006212>

Singh, P. K., Gupta, Y., Jha, N., & Rajan, A. (2019). Fashion retail: Forecasting demand for new items. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/1907.01960>

Skarbez, R., Smith, M., & Whitton, M. C. (2021). Revisiting Milgram and Kishino's reality virtuality continuum. *Frontiers in Virtual Reality*, 2, Article 647997. <https://doi.org/10.3389/frvir.2021.647997>

Slater, M. (2009). Place illusion and plausibility can lead to realistic behaviour in immersive virtual environments. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1535), 3549–3557. <https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0138>

Slater, M., Lotto, B., Arnold, M. M., & Sanchez-Vives, M. V. (2009). How we experience immersive virtual environments: The concept of presence and its measurement. *Anuario de Psicología*, 40(2), 193–210.

Slater, M., & Sanchez-Vives, M. V. (2016). Enhancing our lives with immersive virtual reality. *Frontiers in Robotics and AI*, 3, Article 74. <https://doi.org/10.3389/frobt.2016.00074>

Statista. (2025, April 27). *Clothing and shoes are the most returned online purchases*. Statista. <https://www.statista.com/chart/34373/most-returned-product-categories-purchased-online/>

Steuer, J. (1992). Defining virtual reality: Dimensions determining telepresence. *Journal of Communication*, 42(4), 73–93. <https://doi.org/10.1111/j.1460-2466.1992.tb00812.x>

Tenuta, L., & Testa, S. (2020). Fashion-tech today. In C. Colombi & L. Tenuta (Eds.), *Education for fashion-tech: Design and technology for future fashion creatives* (pp. 10–43). Nielsen Book.

Tiwari, S. (2022). Importance of techpack in apparel industry with reference to technological trends in modern era. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, 9(2), a715–a721.

Uchańska-Bieniusiewicz, A., & Obłój, K. (2023). Disrupting fast fashion: A case study of Shein's innovative business model. *International Entrepreneurship Review*, 9(3), 47–59. <https://doi.org/10.15678/IER.2023.0903.03>

Wagner, R., & Kabalska, A. (2022). Sustainable value in the fashion industry: A case study of value construction/destruction using digital twins. *Sustainable Development*, 31(2), 745–757. <https://doi.org/10.1002/sd.2474>

Wolff, K., Herholz, P., Ziegler, V., Link, F., Brügel, N., & Sorkine-Hornung, O. (2023). Designing personalized garments with body movement. *Computer Graphics Forum*, 42(1), 180–194. <https://doi.org/10.1111/cgf.14728>

Wong, W. K. (Ed.). (2019). *Artificial intelligence on fashion and textiles*. Springer International Publishing.

Xiao, T., Nerini, F. F., Matthews, H. D., Tavoni, M., & You, F. (2025). Environmental impact and net-zero pathways for sustainable artificial intelligence servers in the USA. *Nature Sustainability*, 8(12), 1541–1553. <https://doi.org/10.1038/s41893-025-01681-y>

Xin, B., Song, Y., Tan, H., & Peng, W. (2025). Sustainable digital fashion in a metaverse ecosystem. *Journal of Retailing and Consumer Services*, 82, Article 104099. <https://doi.org/10.1016/j.jretconser.2024.104099>

Zhang, Y., Wang, J. F., Lin, C., & Hult, G. T. M. (2025). Assessing fast fashion overstock through time-to-peak-sales. *Journal of Retailing*, 101(3), 431–453. <https://doi.org/10.1016/j.jretai.2025.05.001>