

## УСТОЙЧИВОСТ И ДИГИТАЛНИ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ ПРОЕКТИРАНЕТО НА ОБЛЕКЛО

**Незабравка Попова-Недялкова**

Нов български университет, департамент „Изкуства и дизайн“,  
“Овча купел” 21, бул. „Монетевидео“, София 1618, България

### **Резюме:**

*Модната индустрия се намира в критичен етап на трансформация, изправена пред сериозни екологични и социални предизвикателства, произтичащи от традиционния линеен модел на производство и потребление. Като един от най-замърсяващите сектори в световен мащаб, индустрията е отговорна за значителни въглеродни емисии, замърсяване на водните ресурси и натрупване на огромни количества текстилни отпадъци, задълбочени от явления като бързата мода. В отговор на тези предизвикателства устойчивата мода се налага като интегриран подход, насочен към намаляване на екологичното въздействие, осигуряване на етични трудови практики и насърчаване на принципите на кръговата икономика.*

*Настоящата статия изследва как дигиталните технологии се превръщат в ключов инструмент за справяне с тези проблеми. Технологии като 3D дизайн и виртуално прототипиране значително намаляват необходимостта от физически мостри, спестявайки ресурси и време. Дигиталният текстилен печат и производството по поръчка елиминират свръхпроизводството и намаляват разхода на вода и енергия. Изкуственият интелект оптимизира прогнозите за модните тенденции и управлението на веригата за доставки, редуцирайки отпадъците и повишавайки ефективността. Блокчейн технологиите осигуряват прозрачност и проследяемост във веригата за доставки, утвърждавайки етичните стандарти. Виртуалните пробни и разширената реалност подобряват потребителското изживяване и намаляват дела на върнатите стоки, докато 3D принтирането предлага иновативни възможности за персонализирано и нискоотпадно производство с устойчиви материали.*

*Статията разглежда също и принципите на кръговата икономика в модата — проектиране за дълготрайност, повторна употреба, ремонт и рециклиране, подкрепени от дигитални инструменти и разширена отговорност на производителя. Въпреки съществуващите предизвикателства, интеграцията на устойчивостта и дигиталните технологии се очертава като основна посока за бъдещето на модната индустрия, проправяйки път към по-отговорна, прозрачна и иновативна екосистема.*

**Ключови думи:** модна индустрия, текстил, облекло, устойчивост, дигитални технологии

## SUSTAINABILITY AND DIGITAL TECHNOLOGIES IN APPAREL DESIGN

**Nezabravka Popova-Nedyalkova**

New Bulgarian University, Department Arts and Design,  
“Ovcha kupel”, 21 Montevideo Str., 1618 Sofia, Bulgaria  
nezi\_ned@abv.bg

**Abstract:**

*The fashion industry is undergoing a critical transformation as it confronts significant environmental and social challenges associated with its traditional linear model of production and consumption. As one of the most polluting sectors globally, it is responsible for substantial carbon emissions, water contamination, and the accumulation of vast amounts of textile waste – issues further intensified by the rise of fast fashion. In response, sustainable fashion has emerged as a comprehensive framework aimed at reducing environmental impact, promoting ethical labor practices, and advancing the principles of a circular economy.*

*This article examines the role of digital technologies as key enablers of this transition. Innovations such as 3D design and virtual prototyping minimize the need for physical samples, conserving materials and shortening design cycles. Digital textile printing and on-demand manufacturing combat overproduction and significantly reduce water and energy consumption. Artificial intelligence enhances trend forecasting and supply chain optimization, improving operational efficiency while minimizing waste. Blockchain technologies improve transparency and traceability across the supply chain, reinforcing ethical practices and counteracting product counterfeiting. Virtual try-ons and augmented reality enrich the consumer experience and reduce product returns, while 3D printing enables customized, low-waste production using sustainable materials.*

*Furthermore, the article discusses how circular economy principles – designing for durability, reuse, repair, and recyclability – are increasingly supported by digital innovations and Extended Producer Responsibility (EPR) frameworks. Although challenges remain, including high implementation costs, data integration complexities, and the need for specialized expertise, the integration of sustainability and digital technologies is emerging as a critical pathway toward a more responsible, transparent, and innovative fashion ecosystem.*

**Keywords:** *fashion industry, textiles, clothing, sustainability, digital technologies*

## 1. Въведение: пресечната точка на устойчивостта и иновациите в модната индустрия

Модната индустрия, дълго време доминирана от линейния модел „вземи – направи – изхвърли“, е изправена пред безпрецедентни предизвикателства, свързани с нейното въздействие върху околната среда и обществото. Този традиционен подход води до значително изчерпване на ресурси, мащабно замърсяване и генериране на огромни количества отпадъци, което оказва сериозно негативно влияние върху планетата [1]. Секторът е признат за един от най-замърсяващите в световен мащаб, допринасяйки за приблизително 10% от глобалните въглеродни емисии и около 20% от индустриалното водно замърсяване, особено в процесите на багрене и обработка на текстил [2].

Проблемите със свръхпроизводството и бързата мода са особено изразени. Статистическите данни показват, че съвременният потребител купува с 60% повече дрехи, но ги носи два пъти по-кратко в сравнение с преди 15 години. Тази тенденция води до бързо натрупване на текстилни отпадъци, като годишно се генерират около 92 милиона тона. Ако тази динамика се запази, се прогнозира увеличение на емисиите от модната индустрия с 50% до 2030 г. [3]. Освен екологичните щети, бързата мода е свързана и с несигурни условия на труд, експлоатация на работна сила и прекомерни отпадъци.

В отговор на тези предизвикателства концепцията за устойчива мода се утвърждава като всеобхватен термин, описващ усилията на индустрията за намаляване на въздействието върху околната среда, защита на работниците, участващи в производството на облекла, и спазване на хуманно отношение към животните [4]. Устойчивостта в модата обхваща широк спектър от фактори, включително намаляване на емисиите на CO<sub>2</sub>, овладяване на свръхпроизводството, минимизиране на замърсяването и отпадъците, подкрепа на биоразнообразието и осигуряване на справедливи заплати и безопасни условия на труд. Ключовите принципи на устойчивата мода се фокусират върху използването на органични и рециклирани материали, естествени влакна и иновативни тъкани. Практики като производство

## 1. Introduction: The Intersection of Sustainability and Innovation in the Fashion Industry

The fashion industry, long dominated by the linear “take–make–dispose” model, faces unprecedented challenges related to its environmental and social impact. This traditional approach has led to significant resource depletion, large-scale pollution, and the generation of vast amounts of waste, all of which have had a severe negative effect on the planet [1]. The sector is recognized as one of the most polluting globally, contributing approximately 10% of global carbon emissions and about 20% of industrial water pollution, particularly through textile dyeing and finishing processes [2].

Issues such as overproduction and fast fashion are particularly pronounced. Statistical data indicate that today’s consumer buys 60% more clothing but wears each item for only half as long as 15 years ago. This trend results in the rapid accumulation of textile waste, with around 92 million tons generated annually. If this dynamic continues, the fashion industry’s emissions are projected to increase by 50% by 2030 [3]. Beyond environmental damage, fast fashion is also associated with precarious labor conditions, workforce exploitation, and excessive waste generation.

In response to these challenges, the concept of sustainable fashion has emerged as a comprehensive term describing the industry’s efforts to reduce environmental impact, protect garment workers, and uphold humane treatment of animals [4]. Sustainability in fashion encompasses a wide range of factors, including reducing CO<sub>2</sub> emissions, curbing overproduction, minimizing pollution and waste, supporting biodiversity, and ensuring fair wages and safe working conditions. Core principles of sustainable fashion emphasize the use of organic and recycled materials, natural fibers, and innovative textiles. Practices such as zero-waste manufacturing, carbon-neutral transportation, and circular fashion

с нулеви отпадъци, въглеродно неутрално транспортиране и инициативи за кръгова мода са в основата на този подход.

На фона на тези критични предизвикателства дигиталните технологии се утвърждават като мощен катализатор за трансформация. Те предлагат нови възможности за справяне с проблемите, като революционизират процесите на проектиране, производство, дистрибуция и потребление в модната индустрия [5]. Чрез въвеждането на иновативни дигитални решения секторът може да постигне по-ефективни, прозрачни и отговорни практики, проправяйки пътя към едно по-устойчиво бъдеще [6]. Тази трансформация не е просто въпрос на избор, а необходимост, обусловена от нарастващото потребителско търсене на устойчиви продукти, които 67% от глобалните потребители считат за решаващ фактор при покупка на облекло.

## **2. Устойчивост в проектирането и производството на облекло. Основни принципи на устойчивата мода**

Устойчивата мода представлява многостранен подход, който обхваща екологични, социални и икономически аспекти с цел трансформация на индустрията към по-отговорни практики. За постигане на тези цели е необходимо дефиниране и прилагане на ясни работни процедури при създаването на устойчиви модни колекции [7].

### **2.1. Екологични аспекти**

В основата си устойчивата мода цели значително намаляване на въглеродния отпечатък на производството на облекло, опазване на водните ресурси, ограничаване на химическото замърсяване и редуциране на генерирането на отпадъци през целия жизнен цикъл на продукта [8]. Това включва конкретни мерки като опазване на биоразнообразието и удължаване на жизнения цикъл на материалите. Практики като производство с нулеви отпадъци и въглеродно неутрално транспортиране са ключови за постигането на тези цели.

### **2.2. Социални и етични аспекти**

initiatives are foundational to this approach.

Amidst these critical challenges, digital technologies are emerging as powerful catalysts for transformation. They offer new possibilities for addressing issues by revolutionizing design, production, distribution, and consumption processes in the fashion industry [5]. Through the integration of innovative digital solutions, the sector can achieve more efficient, transparent, and responsible practices, paving the way toward a more sustainable future [6]. This transformation is not merely a matter of choice but a necessity, driven by the growing consumer demand for sustainable products – 67% of global consumers now consider sustainability a decisive factor when purchasing clothing.

## **2 .Sustainability in Apparel Design and Production: Core Principles of Sustainable Fashion**

Sustainable fashion represents a multifaceted approach that encompasses environmental, social, and economic aspects, aiming to transform the industry towards more responsible practices. To achieve these goals, it is necessary to define and implement clear working procedures in the creation of sustainable fashion collections [7].

### **2.1. Environmental Aspects**

At its core, sustainable fashion seeks to significantly reduce the carbon footprint of garment production, protect water resources, limit chemical pollution, and decrease waste generation throughout the product's life cycle [8]. This involves specific measures such as preserving biodiversity and extending the lifespan of materials. Practices such as zero-waste manufacturing and carbon-neutral transportation are key to achieving these goals.

### **2.2. Social and Ethical Aspects**

Beyond environmental dimensions, sustainable

Отвъд екологичните измерения, устойчивата мода акцентира върху социалната отговорност. Тя включва осигуряване на справедливи възнаграждения и безопасни условия на труд за работниците в текстилното производство, което допринася за повишаване на качеството на живот и развитието на местните общности. Внимателният подбор на производствени партньори и изграждането на лоялни взаимоотношения са съществени за постигане на високи етични стандарти.

### 2.3. Икономическа устойчивост

Движението за устойчива мода се основава на убеждението, че бизнесът може да функционира по-устойчиво, без да жертва печалба и растеж. Това изисква компаниите да интегрират екологични, социални и етични подобрения в своята управленска стратегия. Прилагането на устойчиви практики води до по-чисти производствени процеси, по-доволни потребители и по-стабилно дългосрочно развитие на бизнеса.

### 2.4. Устойчиви материали

Изборът на материали е критичен аспект на устойчивото проектиране на облекло, като иновациите в тази сфера предлагат все по-широка гама екологични алтернативи [9].

#### 2.4.1. Естествени влакна

- **Органичен памук:** За разлика от конвенционалния памук, който е сред най-химически интензивните култури, използващ около 25% от световните инсектициди и над 10% от пестицидите, органичният памук се отглежда без генетични модификации, синтетични торове или пестициди [10]. Той използва значително по-малко вода (88% по-малко) и енергия (62% по-малко) в сравнение с конвенционалния памук. Например, за една тениска от органичен памук са необходими само 243 литра вода, докато за конвенционална тениска – 2700 литра [11]. Водещи марки като Patagonia и Everlane активно го включват в колекциите си, за да намалят екологичното си въздействие. Zara също

fashion emphasizes social responsibility. This includes ensuring fair wages and safe working conditions for textile workers, contributing to the improvement of quality of life and the development of local communities. Careful selection of production partners and the cultivation of loyal relationships are essential for upholding high ethical standards.

### 2.3. Economic Sustainability

The sustainable fashion movement is grounded in the belief that businesses can operate more sustainably without sacrificing profit or growth. This requires companies to integrate environmental, social, and ethical improvements into their management strategies. The implementation of sustainable practices leads to cleaner production processes, more satisfied consumers, and more stable long-term business development.

### 2.4. Sustainable Materials

Material selection is a critical aspect of sustainable apparel design, and innovations in this field are offering an increasingly wide range of eco-friendly alternatives [9].

#### 2.4.1. Natural Fibers

- **Organic Cotton:** In contrast to conventional cotton – one of the most chemically intensive crops, using around 25% of the world's insecticides and over 10% of its pesticides – organic cotton is grown without genetic modification, synthetic fertilizers, or pesticides [10]. It consumes significantly less water (88% less) and energy (62% less) than conventional cotton. For instance, a T-shirt made of organic cotton requires only 243 liters of water, compared to 2,700 liters for a conventional one [11]. Leading brands such as Patagonia and Everlane actively incorporate it into their collections to reduce environmental impact. Zara has also launched the

стартира инициативата „Join Life“, фокусирана върху използването на органичен памук.

- **Коноп:** Едно от най-екологичните влакна, конопът изисква минимално количество вода и не се нуждае от пестициди при отглеждане. Той подпомага регенерацията на хранителните вещества в почвата и не изисква химическа защита срещу вредители. Конопът е известен със своята здравина и дълготрайност, което прави облеклата от него изключително устойчиви. Levi's, например, го използва в комбинация с памук за производство на екологичен деним.

- **Лен:** Подобно на конопа, ленът е естествено влакно, добивано от растението лен. То може да се отглежда без торове и има минимални нужди от вода. Всички части на растението се използват (семена, масло, влакна), което минимизира отпадъците. Ленът е здрав, устойчив на молци, биоразградим и често се произвежда без багрила.

- **Бамбук:** Бамбукът е бързо растящо, възобновяемо растение, което изисква малко вода и пестициди, което го прави предпочитан избор за производство на облекло. Тъканта от бамбук наподобява усещането за памук или коприна.

#### 2.4.2. Рециклирани материали

- **Рециклиран полиестер (rPET):** Извлича се от използвани пластмасови бутилки или текстилни отпадъци, като спомага за намаляване на пластмасовото замърсяване и необходимостта от нова пластмаса, произведена от изкопаеми горива. Производството на rPET изисква значително по-малко ресурси и генерира по-ниски въглеродни емисии в сравнение със създаването на нови влакна. Това е подходящ избор за спортно и функционално облекло, при което естествените влакна често не могат да осигурят необходимите свойства [12].

- **Econyl:** Иновативна алтернатива на найлона, Econyl се произвежда от регенерирани пластмаси, отпадъчни тъкани и рибарски мрежи, събрани от океана. Материалът притежава същите характеристики като традиционния найлон, но има значително по-малък екологичен отпечатък [13].

- **Рециклиран памук:** Произвежда се от отпадъчни тъкани, останали след индустриални

„Join Life“ initiative, focusing on the use of organic cotton.

- **Hemp:** One of the most environmentally friendly fibers, hemp requires minimal water and no pesticides. It supports soil nutrient regeneration and does not need chemical pest control. Hemp is known for its durability and strength, making garments made from it particularly long-lasting. Levi's, for example, uses it in combination with cotton to produce eco-friendly denim.

- **Linen:** Like hemp, linen is a natural fiber derived from the flax plant. It can be cultivated without fertilizers and requires minimal water. All parts of the plant are used (seeds, oil, fibers), minimizing waste. Linen is strong, moth-resistant, biodegradable, and often produced without dyes.

- **Bamboo:** Bamboo is a fast-growing, renewable plant that requires little water and few pesticides, making it a popular choice for apparel production. Bamboo fabric offers a texture similar to cotton or silk.

#### 2.4.2. Recycled Materials

- **Recycled Polyester (rPET):** Derived from used plastic bottles or textile waste, rPET helps reduce plastic pollution and the need for new fossil-fuel-based polyester. Its production requires significantly fewer resources and generates lower carbon emissions than the creation of virgin polyester. It is particularly suitable for activewear and performance garments, where natural fibers often cannot meet required functionality [12].

- **Econyl:** An innovative alternative to nylon, Econyl is made from regenerated plastics, discarded textiles, and fishing nets recovered from the ocean. The material retains the same qualities as traditional nylon but has a significantly lower environmental footprint [13].

- **Recycled Cotton:** Produced from textile scraps left over from industrial processes or from

процеси или от вече използвани текстилни изделия. Това спомага за ограничаване на текстилните отпадъци, намалява употребата на нови суровини и свежда до минимум използването на вредни химикали [14]. Подобни добри практики за приложение на рециклирани суровини се разглеждат и при вълната, където използването ѝ в занаятите допринася за кръговата икономика и съхраняване на традициите [15].

### 2.4.3. Иновативни и био-базирани материали

- **Tencel (Lyocell):** Леки влакна, получени от целулоза от дървесина (евкалипт, бук, смърч), добивана от устойчиво управлявани гори. Производственият процес на Tencel е изключително ефективен, тъй като позволява рециклиране на 99% от използваните разтворители и вода в затворена система, което значително намалява ресурсопотреблението. Tencel е почти 50 пъти по-абсорбиращ от памука [16].

- **Piñatex:** Материал, наподобяващ кожа, произведен от влакна на ананасови листа – страничен продукт от отглеждането на ананаси. Той е екологичен, икономически жизнеспособен и биоразградим и изисква по-малко енергия и вода в сравнение с традиционната кожа [17].

- **Гъбена кожа (Mycelium leather):** Създава се от гъбични мицели и представлява устойчива и еластична алтернатива на животинската кожа, без да включва експлоатация на животни [18,19].

- **Qmonos:** Биоразградим материал от ново поколение, създаван чрез генетично модифицирани бактерии, които произвеждат протеини, наподобяващи естествената паяжина [20,21].

- **Други иновативни материали:** Корк [22], органичен бамбук [23], Modal [24], SCOBY [25], AppleSkin [26], Woocoa [27], QMilk [28], S.Cafe [29], EcoVero [30] и регенерирани текстилни отпадъци [31] също се утвърждават като перспективни устойчиви алтернативи.

post-consumer textile waste, recycled cotton helps reduce textile waste, minimizes the use of virgin raw materials, and lowers the demand for harmful chemicals [14]. Similar good practices for the application of recycled raw materials are also discussed in the case of wool, where their use in crafts contributes to the circular economy and the preservation of traditions [15].

### 2.4.3. Innovative and Bio-Based Materials

- **Tencel (Lyocell):** Lightweight fibers derived from wood pulp (eucalyptus, beech, spruce) harvested from sustainably managed forests. The Tencel production process is highly efficient, allowing for the recovery and reuse of 99% of the solvents and water used in a closed-loop system, significantly reducing resource consumption. Tencel is nearly 50 times more absorbent than cotton [16].

- **Piñatex:** A leather-like material produced from pineapple leaf fibers, a byproduct of pineapple cultivation. It is eco-friendly, economically viable, biodegradable, and requires less energy and water than traditional leather [17].

- **Mycelium Leather:** Made from fungal mycelium, this material offers a sustainable and flexible alternative to animal leather, without involving animal exploitation [18,19].

- **Qmonos:** A next-generation biodegradable material created using genetically engineered bacteria that produce proteins similar to natural spider silk [20,21].

- **Other Innovative Materials:** Cork [22], organic bamboo [23], Modal [24], SCOBY [25], AppleSkin [26], Woocoa [27], QMilk [28], S.Cafe [29], EcoVero [30], and regenerated textile waste [31] are also gaining recognition as promising sustainable alternatives.

**Таблица 1.** Сравнение на ключови устойчиви материали и техните екологични предимства

Материал	Произход/Състав	Основни екологични предимства	Примери за употреба/Марки
Органичен памук	Естествени влакна, отглеждани без ГМО, синтетични торове, пестициди	Изисква 88% по-малко вода, 62% по-малко енергия от конвенционалния памук; елиминира химическото замърсяване на почвата и водата	Patagonia, Everlane, Zara, L'Envers
Коноп	Естествени влакна от растение коноп	Изисква минимално вода и пестициди, регенерира почвените хранителни вещества, здравина и дълготрайност	Levi's (в комбинация с памук)
Лен	Естествени влакна от растение лен	Изисква малко вода и торове, цялото растение се използва, биоразградим, устойчив на молци	Често за спално бельо, но и за облекло
Бамбук	Естествени влакна от бамбуково растение	Бързо растящ, възобновяем, не изисква химикали, малко вода	Тениски, потници, бельо, домашно и спортно облекло
Рециклиран полиестер (rPET)	Пост-потребителски пластмасови бутилки, текстилни отпадъци	Намалява пластмасовите отпадъци, изисква по-малко ресурси и CO2 емисии от нов полиестер	Бельо, спортно облекло, връхни дрехи
Econyl	Регенерирани индустриални пластмаси, отпадъчни тъкани, рибарски мрежи	Алтернатива на найлона с идентично качество, но с много по-малък екологичен отпечатък	Синтетични влакна, бански костюми, спортно облекло
Tencel (Lyocell)	Целулозни влакна от дървесна маса (евкалипт, бук, смърч)	99% рециклиране на разтворители и вода в затворена система, по-малко енергия и вода от памука	Активно облекло, бельо, ежедневно облекло
Piñatex	Влакна от листа на ананас (страничен продукт)	Биоразградим, екологичен, изисква по-малко енергия и вода от традиционната кожа	Аксесоари, обувки, понякога облекло
Гъбена кожа (Mycelium)	От гъбички	Устойчива, еластична алтернатива на животинска кожа, без експлоатация на животни	Обувки, аксесоари
Qmonos	От копринени гени и микроби	Биоразградим, следващо поколение устойчив материал	Иновативни модни приложения

**Table 1.** Comparison of Key Sustainable Materials and Their Environmental Advantages

<b>Material</b>	<b>Origin/Composition</b>	<b>Main Environmental Advantages</b>	<b>Examples of Use / Brands</b>
<b>Organic Cotton</b>	Natural fibers grown without GMOs, synthetic fertilizers, or pesticides	Requires 88% less water and 62% less energy than conventional cotton; eliminates chemical contamination of soil and water	Patagonia, Everlane, Zara, L'Envers
<b>Hemp</b>	Natural fiber from the hemp plant	Requires minimal water and pesticides; regenerates soil nutrients; highly durable	Levi's (in blends with cotton)
<b>Linen</b>	Natural fiber from the flax plant	Requires little water and fertilizers; entire plant is used; biodegradable and moth-resistant	Common in bedding and apparel
<b>Bamboo</b>	Natural fiber from bamboo	Fast-growing, renewable, requires few chemicals and little water	T-shirts, tank tops, underwear, loungewear, activewear
<b>Recycled Polyester (rPET)</b>	Post-consumer plastic bottles, textile waste	Reduces plastic waste; requires fewer resources and emits less CO <sub>2</sub> than virgin polyester	Underwear, activewear, outerwear
<b>Econyl</b>	Regenerated industrial plastics, textile waste, fishing nets	Alternative to nylon with identical properties but a much smaller ecological footprint	Synthetic fibers, swimwear, sportswear
<b>Tencel (Lyocell)</b>	Cellulose fibers from wood pulp (eucalyptus, beech, spruce)	99% of solvents and water are recycled in a closed-loop system; uses less energy and water than cotton	Activewear, underwear, everyday clothing
<b>Piñatex</b>	Fibers from pineapple leaves (a byproduct of agriculture)	Biodegradable and eco-friendly; requires less energy and water than traditional leather	Accessories, footwear, sometimes garments
<b>Mycelium Leather</b>	Derived from fungal mycelium	Sustainable, flexible alternative to animal leather; free from animal exploitation	Footwear, accessories
<b>Qmonos</b>	From spider silk genes and microbes	Biodegradable next-generation sustainable material	Innovative fashion applications

## 2.5. Устойчиви производствени процеси

Оптимизирането на производствените процеси е също толкова важно, колкото и изборът на материали, за постигане на цялостна устойчивост в модната индустрия [32, 33]. Крюгер и Рахнев [34] подчертават значението на технологичната документация като ключов инструмент за поддържане на устойчиво развитие и високо качество в предачното и тъкачното производство.

### 2.5.1. Водоспестяващи техники

- **Безводно багрене:** Иновативни технологии като DyeCoo използват свръхкритичен CO<sub>2</sub> като среда за багрене на полиестер, напълно елиминирайки необходимостта от вода, спомагателни химикали и генериране на отпадни води [35, 36, 37]. Системата рециклира над 95% от използвания CO<sub>2</sub> в затворен цикъл. Водещи марки като ИКЕА, Nike, Adidas, Gap и Decathlon вече са възприели или планират да внедрят технологията DyeCoo. Gap Inc. също е разработила Dry Indigo® – технология за багрене на деним с пяна, която намалява потреблението на вода с до 99%, химикалите с 89% и енергията с 65%, като едновременно елиминира изхвърлянето на вода, в сравнение с традиционния процес на багрене с индиго [38].

- **Затворени водни системи:** Фабрики като Saitex са пример за напредък в управлението на водните ресурси, като успяват да рециклират 98% от използваната вода. Внедряването на затворени водни системи в багрините цехове може да доведе до значителни икономии на разходи — до 60% в някои производства. Това показва, че устойчивите практики могат да намалят оперативните разходи в дългосрочен план.

- **Водоефективни процеси:** Технологии като струйно багрене (jet dyeing) и сухо багрене (dry dyeing) прилагат иновативни методи, използвайки сгъстен въздух или свръхкритичен въглероден диоксид, напълно елиминирайки необходимостта от вода в процеса на багрене.

- **Програма Washwell на Gap:** Тази иновативна програма за пране на деним е спестила над 229 милиона литра вода в сравнение с конвенционалните методи. Към момента на

## 2.5. Sustainable Manufacturing Processes

Optimizing production processes plays an equally crucial role as the choice of materials in achieving comprehensive sustainability in the fashion industry [32, 33]. Krüger and Rahnev [34] highlight the significance of technological documentation as a key instrument for sustaining development and ensuring high quality in spinning and weaving production.

### 2.5.1. Water-Saving Techniques

- **Waterless dyeing:** Innovative technologies such as DyeCoo use supercritical CO<sub>2</sub> as a dyeing medium for polyester, completely eliminating the need for water, auxiliary chemicals, and the generation of wastewater [35, 36, 37]. The system recycles more than 95% of the CO<sub>2</sub> used in a closed-loop process. Leading brands such as IKEA, Nike, Adidas, Gap, and Decathlon have already adopted or plan to adopt the DyeCoo technology. Gap Inc. has also developed Dry Indigo®, a foam-dyeing process for denim that reduces water use by up to 99%, chemicals by 89%, and energy by 65%, while eliminating water discharge entirely compared to traditional indigo dyeing processes [38].

- **Closed-loop water systems:** Factories such as Saitex exemplify advancements in water management, recycling 98% of the water they use. Implementing closed-loop water systems in dyeing facilities can result in significant cost savings – up to 60% in some operations. This demonstrates that sustainable practices can also reduce operational costs in the long term.

- **Water-efficient processes:** Technologies such as jet dyeing and dry dyeing utilize compressed air or supercritical carbon dioxide to eliminate the need for water entirely in the dyeing process.

- **Gap's Washwell Program:** This innova-

докладваните данни Gap Inc. е спестила общо 5,7 милиарда литра вода чрез комбинирани усилия.

### 2.5.2. Енергийно ефективни процеси

Намаляването на енергийната консумация е съществено не само за екологичната устойчивост, но и за намаляване на емисиите на парникови газове и производствените разходи. Технологии като DyeCoo се отличават с висока енергийна ефективност благодарение на сухия процес на багрене и кратките производствени цикли, което намалява необходимостта от енергия за изпаряване на вода. Цифровият текстилен печат също потребява по-малко енергия в сравнение с традиционните методи, допринасяйки за общи енергийни спестявания в индустрията.

### 2.5.3. Намаляване на химикалите

#### • ZDHC Roadmap to Zero Programme:

Тази многостранна инициатива насочва модната индустрия към елиминиране на вредните химикали от глобалната верига на доставки. Целта е да бъдат защитени работниците, потребителите и екосистемите чрез изграждане на устойчива производствена среда [39]. Оптимизацията на процесите на багрене е друг подход за намаляване на химическото натоварване. Тя води до по-добро усвояване на багрилата от влакното и до минимизиране на остатъците във ваната, което улеснява пречистването на отпадъчните води [40]. Програмата се фокусира върху контрола на химикалите на входа, по време на производствения процес и при отпадъчните потоци. С над 9000 отчетени теста на отпадъчни води, ZDHC представлява най-голямата база данни за по-чисти химически продукти в модната индустрия [41].

• **Естествени и нисковъздействащи багрила:** Използването на биоразградими багрила, извлечени от растения или други природни източници, които не вредят на околната среда, е ключова устойчива практика. Нисковъздействащите багрила, макар и синтетични, са по-безопасни от традиционните, тъй като изискват по-малко енергия и вода и съдържат по-малко токсични химикали.

#### • Еко-съзнателни довършителни

ive denim washing program has saved over 229 million liters of water compared to conventional methods. At the time of reporting, Gap Inc. had saved a total of 5.7 billion liters of water through combined efforts.

### 2.5.2. Energy-Efficient Processes

Reducing energy consumption is essential not only for environmental sustainability but also for lowering greenhouse gas emissions and manufacturing costs. Technologies like DyeCoo are highly energy-efficient due to their dry processing and shortened production cycles, reducing the need for energy-intensive water evaporation. Digital textile printing also consumes less energy compared to traditional methods, contributing to overall energy savings in the industry.

### 2.5.3. Chemical Reduction

#### • ZDHC Roadmap to Zero Programme:

This multi-stakeholder initiative is guiding the fashion industry toward the elimination of hazardous chemicals from global supply chains. Its goal is to protect workers, consumers, and ecosystems by building a more sustainable production environment [39]. Optimization of dyeing processes is another key approach to reducing the chemical load in textile production. It enhances dye uptake by the fibers and minimizes residuals in the dye bath, thereby facilitating more efficient wastewater treatment [40]. The program focuses on chemical control at the input stage, during production, and in waste streams. With over 9,000 reported wastewater tests, ZDHC hosts the largest database of cleaner chemical products in the fashion sector [41].

• **Natural and low-impact dyes:** The use of biodegradable dyes derived from plants or other

**техники:** Включват ензимни обработки и механични довършителни процеси, които намаляват необходимостта от химикали и вода, като същевременно постигат желаните функционални и визуални характеристики на тъканите.

## 2.6. Принципи на кръговата икономика в модата

Кръговата икономика представлява фундаментална промяна спрямо линейния модел, като предлага интегриран подход за постигане на устойчивост в модната индустрия. Кръговата мода включва подходи към дизайна и производството, които гарантират, че облеклото остава в употреба възможно най-дълго. Тя се основава на принципите на повторна употреба, ремонт, препродажба, рециклиране и регенерация. За разлика от линейния модел, кръговата мода е проектирана така, че да елиминира отпадъците и замърсяването още в началния етап, като същевременно допринася за възстановяване на природните ресурси [42]. Тази система цели създаване на по-добри продукти и услуги за потребителите, развитие на устойчива и процъфтяваща индустрия и опазване на околната среда, като едновременно с това приоритизира правата и равенството на всички участници във веригата.

## 2.7. Дизайн за дълготрайност, издръжливост и ремонт

До 80% от екологичния отпечатък на една дреха се определя още на етапа на проектиране. Затова устойчивият дизайн поставя акцент върху качеството и дълготрайността, така че изделията да устоят на интензивно използване и да намалят нуждата от честа подмяна. Този подход включва екодизайн, използване на мономатериали за полесно рециклиране и интегриране на възможности за ремонт. Фокусът върху издръжливостта и непреходния дизайн гарантира, че устойчивите дрехи остават в употреба по-дълго, намалявайки необходимостта от честа подмяна.

## 2.8. Модели за повторна употреба (втора употреба, наем)

natural sources that do not harm the environment is a key sustainable practice. While synthetic, **low-impact dyes** are safer than conventional alternatives, requiring less water and energy and containing fewer toxic chemicals.

- **Eco-conscious finishing techniques:**

These include enzyme treatments and mechanical finishing processes, which reduce the need for chemicals and water while still achieving the desired functional and aesthetic qualities of textiles.

## 2.6. Principles of Circular Economy in Fashion

The circular economy represents a fundamental shift from the linear model, offering an integrated approach to achieving sustainability in the fashion industry. Circular fashion includes design and production strategies that ensure garments remain in use for as long as possible. It is based on principles such as reuse, repair, resale, recycling, and regeneration. Unlike the linear model, circular fashion is designed to eliminate waste and pollution from the outset, while contributing to the restoration of natural systems [42]. This model aims to create better products and services for consumers, support a thriving and sustainable industry, and protect the environment, while also prioritizing rights and equity across the entire supply chain.

## 2.7. Design for Longevity, Durability, and Repair

Up to 80% of a garment's environmental footprint is determined at the design stage. For this reason, sustainable design emphasizes quality and longevity, ensuring that products can withstand frequent use and reduce the need for premature replacement. This approach incorporates eco-design, the use of mono-materials for easier recycling, and the integra-

- **Втора употреба:** Секторът на препродажбата на облекло бележи бърз растеж, като се очаква пазарът в Европа да достигне €26 милиарда до 2030 г. Движещи фактори са екологични, икономически и стилистични съображения. Данните показват, че 58% от американските потребители са закупували дрехи втора употреба през 2024 г., а 68% от младите поколения (18–44 години) също са се възползвали от този модел [31]. За модните марки създаването на платформи за втора употреба удължава жизнения цикъл на продуктите и създава нови възможности за връзка с клиентите, задълбочавайки емоционалната обвързаност с бранда. Марки като lululemon (Like New), Eileen Fisher (Renew) и The North Face (Renewed) вече предлагат собствени програми за препродажба, с което значително удължават жизнения цикъл на своите продукти.

- **Наем:** Макар все още да заема нишова позиция, моделът на наем също следва философията „използване вместо притежание“. Той позволява на потребителите да наемат облекла за специални поводи или сезони, ограничавайки необходимостта от закупуване на нови артикули. Пример за това е Houdini Sportswear, която активно насърчава клиентите си да избират наем пред покупка.

- **Корекция:** Удължаването на живота на дрехата дори само с 2,2 години може да намали въглеродния ѝ отпечатък с до 73%. За модните марки предлагането или насърчаването на подобен вид услуги представлява осезаем израз на ангажираност към устойчивост и повишава възприеманата стойност на продуктите. Марки като Patagonia, Deuter и Arc'teryx предлагат такива услуги, демонстрирайки ангажираност и утвърждавайки стойността на дълготрайността.

## 2.9. Рециклиране и ъпсайклинг на текстил

Затварянето на „кръговия цикъл“ в модната индустрия се осъществява чрез иновативни технологии и процеси, които позволяват ефективно рециклиране на текстилни материали и тяхното трансформиране в нови продукти. Христова-Поповска [43] акцентира върху значението на новите технологични разработки и екологични методи, които подкрепят намаляването на въздействието на текстилното

tion of repairability. A focus on durability and timeless design ensures that sustainable garments stay in use longer, thus reducing overall consumption and waste.

## 2.8. Reuse Models (Second-Hand, Rental)

- **Second-hand:** The resale apparel sector is growing rapidly, with the European market expected to reach €26 billion by 2030. Key drivers include environmental, economic, and stylistic considerations. Data show that 58% of U.S. consumers purchased second-hand clothing in 2024, and 68% of younger generations (ages 18-44) have also embraced this model [31]. For fashion brands, developing second-hand platforms extends product lifecycles and opens new opportunities for customer engagement, deepening emotional attachment to the brand. Brands such as lululemon (Like New), Eileen Fisher (Renew), and The North Face (Renewed) already offer resale programs that significantly prolong the life of their products.

- **Rental:** Although still occupying a niche position, the rental model aligns with the philosophy of “use over ownership.” It allows consumers to rent garments for specific occasions or seasons, reducing the need to purchase new items. A notable example is Houdini Sportswear, which actively encourages customers to choose renting instead of buying.

- **Repair:** Extending the life of a garment by even just 2.2 years can reduce its carbon footprint by up to 73%. For fashion brands, offering or promoting such services is a tangible expression of commitment to sustainability and enhances the perceived value of their products. Brands like Patagonia, Deuter, and Arc'teryx offer these services, reinforcing their dedication to durability and long-lasting design.

## 2.9. Textile Recycling and Upcycling

Closing the circular loop in the fashion industry is

производство върху околната среда и насърчават прилагането на устойчиви решения. Това включва и ъпсайклинг, при който съществуващи текстилни изделия или отпадъци се превръщат в нови продукти чрез техники като пачуърк, бродерия и други. Ангелова и Капанък [44] подчертават, че ефективното използване на текстилните ресурси и практическите примери за ъпсайклинг – като изработване на нови изделия от употребявани дънки – имат значителен потенциал за намаляване на отпадъците и удължаване на жизнения цикъл на материалите.

### **2.10. Разширена отговорност на производителя (EPR)**

Разширената отговорност на производителя (Extended Producer Responsibility – EPR) представлява политическа рамка, която променя фундаментално начина, по който модната индустрия възприема жизнения цикъл на продуктите си – от проектирането до изхвърлянето [45]. Чрез тази концепция се прехвърля отговорността за управлението на отпадъците от публичния сектор и данъкоплатците към компаниите, които извличат печалба от производството и продажбата на продуктите. EPR задължава марките да поемат отговорност за целия жизнен цикъл на своите изделия, включително събирането, сортирането, повторната употреба, рециклирането и окончателното изхвърляне. Обикновено това включва финансови вноски за финансиране на системи за събиране и рециклиране, постигане на задължителни цели за повторна употреба или рециклиране, отчетност относно съдържанието на материали и химикали, проектиране на продукти за по-лесна рециклируемост или ремонт, както и създаване на програми за обратно приемане. Еко-модулираните такси, при които производителите плащат по-малко за продукти, проектирани за кръговост, и повече за трудно рециклируеми изделия, създават финансови стимули за по-добър дизайн и възнаграждават издръжливостта, възможността за ремонт, рециклируемостта и използването на рециклирано съдържание.

### **3. Дигитални технологии, трансформиращи дизайна и производството на облекло**

Дигиталните технологии играят ключова роля

achieved through innovative technologies and processes that enable the effective recycling of textile materials and their transformation into new products. Hristova-Popovska [43] emphasizes the importance of new technological developments and ecological methods that mitigate the environmental impact of textile production and promote the adoption of sustainable solutions. This also includes upcycling, whereby existing garments or textile waste are repurposed into new products through techniques such as patchwork, embroidery, and others. Angelova and Kapanak [44] highlight that the efficient use of textile resources and practical examples of upcycling – such as creating new items from discarded jeans – hold significant potential for reducing waste and extending the lifecycle of materials.

### **2.10. Extended Producer Responsibility (EPR)**

Extended Producer Responsibility (EPR) is a policy framework that fundamentally reshapes how the fashion industry perceives the lifecycle of its products – from design to disposal [45]. Through this concept, responsibility for waste management is shifted from the public sector and taxpayers to the companies that profit from the production and sale of products.

EPR requires brands to take responsibility for the entire lifecycle of their products, including collection, sorting, reuse, recycling, and final disposal. Typically, this involves financial contributions to support systems for collection and recycling, meeting mandatory reuse or recycling targets, disclosing material and chemical content, designing products for easier recyclability or repair, and creating take-back programs.

Eco-modulated fees, where producers pay lower fees for products designed for circularity and higher fees for hard-to-recycle items, create financial incentives

в прехода на модната индустрия към устойчиви практики, предоставяйки иновативни решения на всеки етап от жизнения цикъл на продукта.

### **3.1. 3D софтуер за дизайн и виртуално прототипиране**

#### **3.1.1. Приложение и ползи**

3D софтуерите за дизайн предоставят възможност на дизайнерите да създават хиперреалистични, наситени с данни дигитални 3D симулации на облекло. Тези симулации могат да функционират както като изцяло дигитални продукти, така и като дигитални прототипи на бъдещи физически изделия. Основно предимство е значителното намаляване на необходимостта от физически мостри и прототипи, което води до съществено редуциране на отпадъците и минимизиране на екологичния отпечатък на производствения процес [46]. Създаването на физически мостри изисква значителни ресурси като материали, енергия и транспорт. Елиминирането или значителното им намаляване чрез виртуално прототипиране директно води до понижен въглероден отпечатък и по-ефективно потребление на ресурси. Това представлява ключова стъпка към по-устойчива верига на доставки, която преминава от линеен към дигитално ориентиран и по-ефективен производствен модел, в съответствие с принципите на кръговата икономика.

Тази технология ускорява процеса на проектиране, спестява време и разходи, като същевременно улеснява бързите промени и ревизии на дизайните. 3D дизайнът също така позволява дистанционна работа и ефективно сътрудничество между дизайнери от различни части на света, което разширява възможностите за иновации.

#### **3.1.2. Примери за софтуер**

Сред водещите 3D софтуерни решения са Marvelous Designer, CLO 3D, Browzwear и OptiTex, както и по-универсални инструменти като Adobe Photoshop, Illustrator и Procreate, използвани за създаване и манипулиране на изображения на облекла.

for improved design and reward durability, repairability, recyclability, and the use of recycled content.

### **3. Digital Technologies Transforming Apparel Design and Manufacturing**

Digital technologies play a key role in the fashion industry's transition toward sustainable practices by offering innovative solutions at every stage of the product lifecycle.

#### **3.1. 3D Design Software and Virtual Prototyping**

##### **3.1.1. Application and Benefits**

3D design software enables designers to create hyper-realistic, data-rich digital 3D simulations of garments. These simulations may function as fully digital products or as digital prototypes of future physical garments. One major advantage is the significant reduction in the need for physical samples and prototypes, leading to substantial waste reduction and minimization of the environmental footprint of the production process [46]. Physical prototyping demands considerable resources, including materials, energy, and transportation. By eliminating or drastically reducing physical samples through virtual prototyping, the carbon footprint is directly reduced and resource use is optimized. This is a crucial step toward a more sustainable supply chain – shifting from a linear to a digitally driven and more efficient production model, aligned with circular economy principles.

This technology accelerates the design process, saves time and cost, and facilitates rapid design changes and iterations. Moreover, 3D design enables remote collaboration between designers across the globe, fostering innovation.

### 3.1.3. Възможности

3D софтуерите предлагат възможности за създаване на сложни дизайни с висока степен на прецизност, симулиране на реалистично поведение на тъканите и визуализация на висококачествени изображения, които достоверно представят крайния продукт [47, 48].

## 3.2. Дигитален текстилен печат и производство по поръчка (On-Demand Manufacturing)

### 3.2.1. Дигитален текстилен печат

Тази технология позволява директно нанасяне на щампи върху текстил чрез специализирани принтери, което води до значително намаляване на употребата на вода — с до 95%, и на енергията — със 75%, като едновременно с това минимизира текстилните отпадъци [49]. Едно от основните предимства на дигиталния печат е възможността за производство на много малки серии от даден дизайн, дори под един ярд плат.

### 3.2.2. Производство по поръчка (Print-on-Demand)

При този модел продукцията се осъществява само след получаване на конкретна поръчка от клиента, което напълно елиминира свръхпроизводството и проблема с излишните наличности. Този подход преобръща традиционния модел на модната индустрия, като производството се съобразява директно с реалните потребителски заявки, вместо да се основава на прогнозиране на продажбите, което често води до натрупване на излишни запаси.

### 3.2.3. Екологични ползи

Комбинацията от дигитален печат и производство по поръчка носи значителни екологични предимства: елиминирание на отпадъците от непродадени стоки, рязко намаляване на водното потребление (до 95% по-малко спрямо традиционното багрене, при което за една тениска обикновено се използват около 2700 литра вода). Освен това, локалното производство и съкращаването на транспортните разстояния могат да намалят въглеродните емисии с до 47%. Дигиталният печат допринася и за минимизиране на отпадъците от плат, които при традиционните

### 3.1.2. Examples of Software

Leading 3D software tools include Marvelous Designer, CLO 3D, Browzwear, and OptiTex, alongside general creative tools like Adobe Photoshop, Illustrator, and Procreate, used to create and manipulate garment imagery.

### 3.1.3 Capabilities

3D software tools offer the ability to create complex designs with high precision, simulate realistic fabric behavior, and visualize high-quality renderings that closely represent the final product [47, 48].

## 3.2. Digital Textile Printing and On-Demand Manufacturing

### 3.2.1. Digital Textile Printing

This technology allows for direct application of prints onto fabric using specialized printers, reducing water usage by up to 95% and energy consumption by up to 75%, while simultaneously minimizing textile waste [49]. A key advantage is the ability to produce extremely small runs, even less than one yard of fabric per design.

### 3.2.2. Print-on-Demand Production

In this model, garments are produced only after a specific order is received, completely eliminating overproduction and surplus inventory. It reverses the traditional fashion production model by responding directly to real-time consumer demand rather than relying on sales forecasts, which often lead to unsold stock.

### 3.2.3. Environmental Benefits

The combination of digital printing and on-demand manufacturing delivers significant environmental benefits: elimination of waste from unsold prod-

методи могат да достигнат до 15% по време на рязането. Тези дигитални технологии са пряк отговор на проблема със свръхпроизводството и текстилните отпадъци, който е един от най-значимите екологични проблеми в модната индустрия. Традиционната модна индустрия генерира приблизително 92 милиона тона текстилни отпадъци годишно именно в резултат на свръхпроизводство. Дигиталните технологии директно адресират този проблем, като произвеждат единствено търсеното количество продукти [50]. Това представлява съществена промяна в бизнес модела на модната индустрия, която преминава от спекулативно масово производство към модел, ориентиран към търсенето, водещ до значителни екологични ползи и по-устойчива верига за доставки.

### **3.3. Изкуствен интелект (AI) и машинно обучение**

Изкуственият интелект и машинното обучение предлагат мощни инструменти за оптимизация на процесите в модната индустрия, допринасяйки за постигане на по-голяма устойчивост [51]. Авторът вече е разглеждал в детайли ролята на AI като трансформиращ фактор за устойчивост и иновации в модната индустрия [52].

#### **3.3.1. Прогнозиране на модни тенденции и потребителско търсене**

AI системите анализират огромни обеми данни от социални медии, модни ревюта, уличен стил, появи на знаменитости и потребителско поведение, за да идентифицират възникващи тенденции значително по-рано, отколкото това е възможно чрез традиционни методи. Например Zara използва AI за прогнозиране на тенденции в партньорство с технологични компании, което ѝ позволява да проектира и пуска нови артикули в рамките на 2-3 седмици, вместо за стандартните шест месеца. Tommy Hilfiger прилага AI чрез своята платформа „Reimagine Retail“, която анализира данни от социални мрежи и клиентски предпочитания, за да подпомогне дизайнерските решения.

#### **3.3.2. Оптимизация на веригата за доставки**

ucts, drastic reduction of water consumption (up to 95% less than traditional dyeing, which typically uses around 2,700 liters of water per T-shirt). Furthermore, local production and shorter transportation distances can reduce carbon emissions by up to 47%. Digital printing also minimizes fabric waste during cutting, which can reach up to 15% in conventional methods.

These digital technologies offer a direct solution to the problem of overproduction and textile waste – among the most pressing environmental challenges in fashion. The industry currently generates approximately 92 million tons of textile waste per year, much of which stems from overproduction. Digital technologies directly address this by enabling production to align precisely with demand, marking a major shift from speculative mass production toward a demand-driven model with profound environmental and supply chain benefits [50].

### **3.3. Artificial Intelligence (AI) and Machine Learning**

Artificial Intelligence and machine learning provide powerful tools for optimizing fashion industry processes and supporting the achievement of greater sustainability [51]. The author has previously explored the role of AI as a transformative factor for sustainability and innovation in the fashion industry [52].

#### **3.3.1. Trend Forecasting and Demand Prediction**

AI systems analyze vast datasets from social media, fashion shows, street style, celebrity appearances, and consumer behavior to identify emerging trends much earlier than traditional methods. For instance, Zara uses AI in partnership with tech firms to forecast trends, allowing it to design and release new

### **и управление на инвентара**

AI подпомага управлението на сложността във веригата за доставки, включително сезонни колебания в търсенето, поддържане на бързо променящи се модни тенденции и глобално снабдяване с материали. Алгоритмите за машинно обучение оптимизират тези системи чрез предиктивна аналитика. Интегрирането на AI в прогнозите за тенденции и управлението на веригата за доставки създава синергия, която е от съществено значение за устойчивостта. По-прецизното прогнозиране на търсенето намалява свръхпроизводството, което директно редуцира отпадъците и необходимостта от складиране на излишни стоки. Това води до по-нисък екологичен отпечатък и подобрява ефективността на ресурсите, тъй като се произвежда само необходимото и се оптимизира движението на стоки в цялата верига за доставки.

### **3.3.3. Оптимизация на производството и контрол на качеството**

AI системите могат да откриват дефекти още в ранните етапи на производствения процес, предотвратявайки производството на значителни количества дефектна продукция (например над 4,5 тона годишно). Освен това, AI може да наблюдава работата на оборудването и да прогнозира евентуални повреди преди тяхното възникване.

### **3.3.4. Персонализирани преживявания при пазаруване**

AI предоставя персонализирани модни препоръки. Например Stitch Fix анализира над 85 различни параметъра за всеки клиент, включително стилкови предпочитания, обратна връзка относно размерите и начин на живот. Това не само увеличава удовлетвореността и лоялността на потребителите, но и намалява дела на върнатите стоки — фактор от съществено значение за устойчивостта, тъй като по-малко върнати продукти означават по-ниски отпадъци и по-малко транспортни емисии.

### **3.3.5. Възможност за мащабно създаване на облекла по поръчка**

items within 2–3 weeks, compared to the industry standard of six months. Tommy Hilfiger utilizes AI through its Reimagine Retail platform to analyze social media data and consumer preferences in support of design decisions.

### **3.3.2. Supply Chain Optimization and Inventory Management**

AI helps manage the complexity of fashion supply chains, including seasonal demand fluctuations, rapid trend shifts, and global sourcing. Machine learning algorithms optimize these systems through predictive analytics. Integrating AI into forecasting and supply chain management creates synergy essential for sustainability. Improved demand prediction reduces overproduction, which directly cuts waste and excess inventory. This lowers the environmental footprint and enhances resource efficiency by producing only what is needed and optimizing goods movement across the supply chain.

### **3.3.3. Production Optimization and Quality Control**

AI systems can detect defects early in the production process, preventing the manufacture of large volumes of faulty products (e.g., over 4.5 tons per year). Additionally, AI can monitor equipment performance and forecast maintenance needs before breakdowns occur.

### **3.3.4. Personalized Shopping Experiences**

AI delivers personalized fashion recommendations. For example, Stitch Fix analyzes over 85 data points per customer, including style preferences, fit feedback, and lifestyle data. This not only increases customer satisfaction and loyalty but also reduces return rates – a critical factor for sustainability, as fewer returns mean less waste and lower transport emissions.

AI позволява проектиране и производство на облекла по индивидуална поръчка в големи мащаби, удовлетворявайки специфичните нужди и предпочитания на потребителите.

### 3.3.6. Блокчейн и проследяемост на веригата за доставки

Блокчейн технологията предоставя децентрализирана и прозрачна дигитална инфраструктура, която може да трансформира модната индустрия, като осигурява безпрецедентна проследяемост и доверие.

- **Приложение и ползи.** Блокчейн в модата се използва за справяне с предизвикателства като фалшифициране на продукти, липса на прозрачност във веригата на доставки и неетично снабдяване. Технологията подобрява прозрачността, проследяемостта и доверието в модната екосистема, предоставяйки неизменна и защитена информация за транзакциите.

- **Проследяемост от суровини до краен продукт.** Чрез използване на NFC тагове, QR кодове и IoT технологии компаниите могат детайлно да проследяват движението на продуктите на всеки етап — от добива на суровини до създаването на крайния продукт. Това създава уникална дигитална идентичност за всяка дреха, позволявайки мониторинг в реално време върху процесите в цялата верига за доставки.

- **Борба с фалшификатите и етично снабдяване.** Блокчейн осигурява автентичността на продуктите чрез създаване на защитени с рещу подправяне цифрови записи, намалявайки разпространението на фалшиви стоки. Потребителите могат да сканират NFC тагове или QR кодове върху продуктите, за да получат достъп до блокчейн записите, удостоверяващи автентичността на артикула и етичното му производство. Това е съществено за гарантиране на справедливи условия на труд и осигуряване на суровини от неконфликтни и устойчиви източници.

- **Повишаване на потребителското доверие и прозрачността.** Потребителите днес все по-често изискват информация за произхода на продуктите си, тяхното етично производство и устойчивост. Блокчейн технологията, с нейната

### 3.3.5. Scalable Custom Garment Production

AI enables the scalable design and production of custom garments, catering to individual consumer needs and preferences while minimizing waste and unsold inventory.

### 3.3.6. Blockchain and Supply Chain Traceability

Blockchain technology provides a decentralized and transparent digital infrastructure that can transform the fashion industry by offering unprecedented traceability and trust.

- **Application and Benefits:** Blockchain addresses challenges such as counterfeiting, lack of transparency, and unethical sourcing. It improves trust across the fashion ecosystem by providing immutable, secure records of transactions.

- **Traceability from Raw Material to Final Product:** Through NFC tags, QR codes, and IoT technologies, companies can trace product movement at every stage – from raw material extraction to final garment creation. This creates a unique digital identity for each item and enables real-time monitoring throughout the supply chain.

- **Combating Counterfeits and Ensuring Ethical Sourcing:** Blockchain ensures product authenticity through tamper-proof digital records, reducing the spread of counterfeit goods. Consumers can scan NFC tags or QR codes to access blockchain-verified data on product authenticity and ethical production – key for assuring fair labor conditions and sourcing from non-conflict, sustainable origins.

- **Boosting Consumer Trust and Transparency:** Today's consumers increasingly demand transparency around product origin, ethical production, and sustainability. Blockchain technology ad-

неизменност и прозрачност, директно отговаря на това търсене, предоставяйки проверими данни за произхода на материалите, производствените процеси и етичните практики. Това изгражда доверие и позволява на потребителите да вземат информирани решения. За марките това е стратегическо предимство, чрез което могат да се диференцират на пазара и да отговорят на нарастващите очаквания за устойчивост.

**Примери.** VeChain е известна със своята прозрачност в проследяването на веригата за доставки. Arianee предоставя цифрови сертификати за автентичност. Ecoalf използва блокчейн за проследяване на процесите по рециклиране, докато Fashion for Good прилага технологията за иновации в кръговата мода. Everledger сътрудничи с MCQ (модния бранд на Alexander McQueen) за изграждане на платформа, която използва блокчейн и IoT за демонстрация на устойчиви ангажименти и проследяване на жизнения цикъл на облеклата, включително тяхната собственост и възможности за препродажба.

### 3.4. Виртуални пробни и разширена реалност (AR/VR)

Виртуалните пробни и разширената реалност трансформират потребителското изживяване, като същевременно предлагат значителни ползи за устойчивостта.

Виртуалните пробни представляват дигитален еквивалент на физическите пробни, позволявайки на потребителите да „изпробват“ дрехи виртуално, за да преценят размер, прилягане или стил. Тази технология, подобно на виртуалните козметични щандове, дава възможност на клиентите да визуализират как биха изглеждали с конкретни дрехи или грим, използвайки компютри, таблети или смартфони. Едно от основните предимства на виртуалните пробни е потенциалното намаляване на броя на върнатите продукти поради несъответствие в размерите или прилягането. Това има директно отражение върху устойчивостта, тъй като намалява логистичните разходи, свързани с връщанията, и минимизира отпадъците от продукти, които често не могат да бъдат повторно

използвани. Това директно отговаря на търсенето, предлагайки проверими данни за материали, процеси и етични практики. Това изгражда доверие и позволява на потребителите да вземат информирани решения. За марките това е стратегическо предимство, чрез което могат да се диференцират на пазара и да отговорят на нарастващите очаквания за устойчивост.

#### Examples:

- VeChain offers transparency in supply chain tracking.
- Arianee provides digital certificates of authenticity.
- Ecoalf uses blockchain to trace recycling processes.
- Fashion for Good applies blockchain to circular fashion innovation.
- Everledger, in collaboration with MCQ (Alexander McQueen), uses blockchain and IoT to trace the full lifecycle of garments, including ownership history and resale potential.

### 3.4. Virtual Try-Ons and Augmented Reality (AR/VR)

Virtual try-ons and augmented reality are transforming the customer experience while offering substantial sustainability benefits.

Virtual try-ons serve as a digital equivalent to physical fitting rooms, allowing consumers to “try on” garments virtually to assess fit, size, and style. Similar to virtual makeup counters, these technologies let users visualize how clothes or cosmetics would look using computers, tablets, or smartphones.

One major advantage is the potential reduction in product returns due to sizing or fit issues. This directly supports sustainability by reducing the logistics associated with returns and minimizing waste from unsellable returned items. Such technologies

продадени. Подобни технологии не само подобряват потребителското преживяване, но и осигуряват по-потапящо и удобно пазаруване. Въпреки обещаващия си потенциал, технологиите за разширена реалност все още се развиват и срещат предизвикателства, свързани с точността и прецизността на визуализацията.

### 3.5. 3D принтиране в модата

3D принтирането представлява авангардна технология, която революционизира проектирането и производството на облекло, като предлага значителни ползи за устойчивостта.

#### 3.5.1. Приложение и ползи

Чрез 3D принтиране могат да се създават уникални дизайни, нови видове тъкани и персонализирани облекла, което минимизира генерирането на отпадъци. Технологията позволява изработка на „безшевни“ облекла, които се разтягат подобно на спортни или йога панталони, въпреки че са създадени чрез 3D печат. Материалните отпадъци се свеждат до минимум, тъй като неизползваният прах може да бъде рециклиран. Освен това 3D принтирането осигурява възможности за персонализация и производство по поръчка, което ограничава свръхпроизводството и излишните наличности. Локалното производство намалява и транспортните емисии, свързани с глобалната логистика.

#### 3.5.2. Материали

За 3D принтиране в модата се използват разнообразни материали, включително найлон (PA12) или TPU прах чрез селективно лазерно синтероване (SLS), компостируема биопластмаса като WillowFlex, както и Vero – мултиматериален полимер, който позволява създаване на сложни, гъвкави и издръжливи структури директно върху текстил.

#### 3.5.3. Примери

- **Iris van Herpen:** Пионер в прилагането

not only enhance user experience but also enable a more immersive and convenient shopping process. Despite their promising potential, AR technologies are still evolving and face challenges related to accuracy and realistic visualization.

### 3.5. 3D Printing in Fashion

3D printing is a cutting-edge technology that is revolutionizing garment design and production while offering significant sustainability benefits.

#### 3.5.1. Application and Benefits

3D printing enables the creation of unique designs, novel textile structures, and customized garments, all while minimizing material waste. The technology allows for seamless garments that stretch like athletic or yoga pants, even though they are produced via additive manufacturing. Unused powder can be recycled, further reducing waste. Moreover, 3D printing supports customization and on-demand manufacturing, helping eliminate overproduction and excess inventory. Localized production also reduces transportation emissions tied to global logistics.

#### 3.5.2. Materials

Materials used in fashion 3D printing include:

- Nylon (PA12) and TPU powder through Selective Laser Sintering (SLS),
- Compostable bioplastics like WillowFlex,
- Vero – a multi-material polymer that enables the creation of intricate, flexible, and durable structures directly on textiles.

#### 3.5.3. Examples

на триизмерният печат в модата. Един от уникалните модели, които създава, е 3D принтираната сватбена рокля, реализирана след 3D сканиране на фигурата на младоженката и над 600 часа работа в софтуер за дигитално моделиране [53].

- **Zac Posen:** Придобива известност с 3D принтираните си тоалети за Met Gala 2019. Роклята „Rose Petal“ е изградена върху рамка от титан, върху която са наслоени 37 венчелистчета от пластмасов полимер. Друга впечатляваща рокля, носена от Нина Добрев, е създадена от прозрачна, устойчива пластмаса с помощта на SLA технология и изисква над 200 часа за принтиране и постобработка [54].

- **Prada:** В колекцията „Re-Nylon“ използва 3D принтирани катарамии, изработени от рециклирана океанска пластмаса. Облеклата са изработени от прежда ECONYL®, получена също чрез рециклиране на пластмасови отпадъци от сметища и океани, която може да бъде рециклирана многократно без загуба на качеството [55].

- **Adidas:** Разработва Futurecraft. Loop – обувка, изцяло изработена от един материал, предназначена за връщане и повторна преработка. Adidas използва 3D принтиране и за създаване на стотици прототипи на междинни подметки, тествани за оптимално омекотяване преди серийно производство [56].

„Веднага след като получихме обувките от Поколение 1, успяхме да започнем Фаза 2. Събрахме обувките, рециклирахме ги, съхранявахме ги в нашата верига за доставки и в крайна сметка преработихме рециклирания материал в нови компоненти за маратонки. Материалът се разтопява и се превръща в нови пелети, които се нагриват, за да образуват нови компоненти, включително капсите за връзките и външната подметка. За създаването на останалите компоненти на междинната подметка и горната част се използва материал Virgin TPU“ [56].

- **Heisel:** Силвия Хайсел създава роклята „The Name Dress“ от компостируема биопластмаса WillowFlex, принтирана с нулев отпадък, като символ на устойчивост и признание към жените в STEM областите (наука, технологии, инженерство и математика) [57].

- **MIT’s Self-Assembly Lab:** Разработва

- **Iris van Herpen:** A pioneer in applying 3D printing in fashion. Her 3D-printed wedding dress was created following a full-body scan of the bride and over 600 hours of digital modeling work [53].

- **Zac Posen:** Gained recognition for his 3D-printed gowns at the 2019 Met Gala. The Rose Petal dress featured a titanium frame with 37 layered polymer petals. Another standout, worn by Nina Dobrev, was printed from transparent, sustainable plastic using SLA technology and required over 200 hours of printing and post-processing [54].

- **Prada:** In its Re-Nylon collection, Prada used 3D-printed buckles made from recycled ocean plastic. The garments themselves are made from ECONYL® yarn, also sourced from ocean waste and landfill plastics, which can be recycled repeatedly without quality loss [55].

- **Adidas:** Developed Futurecraft.Loop, a shoe made entirely from a single material, designed for return and remanufacture. The brand used 3D printing to create hundreds of midsole prototypes before finalizing the cushioning performance for production [56].

- **Heisel:** Designer Sylvia Heisel created The Name Dress using compostable WillowFlex bioplastic, 3D-printed with zero waste. The project celebrates sustainability and honors women in STEM (Science, Technology, Engineering, Mathematics) [57].

- **MIT’s Self-Assembly Lab:** Developed a 4D-knitted dress with thermo-activated seams that tighten or loosen without the need for zippers or buttons. It uses shape-memory 3D-printed fibers [58]. 3D printing’s ability to produce intricate and customized designs with minimal waste and the use of recycled or biodegradable materials is fundamentally reshaping fashion manufacturing toward a circular economy model. It reduces dependence on virgin

4D плетена рокля с термоактивирани шевове, които се стягат или отпускат около тялото без нужда от ципове или копчета, използвайки 3D принтирани нишки с памет за формата [58].

Способността на 3D принтирането да създава сложни и персонализирани дизайни с минимални отпадъци и да използва рециклирани или биоразградими материали фундаментално променя модното производство, ориентирайки го към кръгов икономически модел. Това е важна стъпка към постигане на целите на кръговата икономика, като се намалява зависимостта от първични ресурси и се свежда до минимум генерирането на отпадъци.

Въпреки огромния си потенциал, 3D принтирането в модата все още е в начален етап на развитие и се сблъсква с предизвикателства като ограничен избор на материали, високи разходи и нестабилна търговска стойност на дигиталните облекла.

#### 4. Предизвикателства и бъдещи тенденции

Въпреки значителния напредък, пътят към напълно устойчива и дигитализирана модна индустрия остава предизвикателен, макар и изпълнен с обещаващи перспективи.

##### 4.1. Качество и точност на данните

Едно от основните предизвикателства пред модните марки е събирането и управлението на точни и съгласувани данни по цялата глобална верига за доставки. Липсата на надеждни данни увеличава риска от несъответствия, регулаторни санкции и накърняване на репутацията.

##### 4.2. Интеграция на системи

Интегрирането на нови дигитални решения, като например дигиталните продуктови паспорти (DPP), в съществуващи ИТ инфраструктури (напр. ERP системи, PLM платформи и проследяващи системи) представлява значителна сложност. Необходими са инвестиции в автоматизация и управление на данни, за да се намали сложността и да се гарантира актуалност и точност на информацията.

resources and minimizes waste generation.

However, despite its potential, 3D printing in fashion remains in its early stages and faces challenges such as limited material choices, high costs, and the uncertain commercial viability of digital garments.

#### 4. Challenges and Future Trends

Despite significant progress, the path toward a fully sustainable and digitalized fashion industry remains challenging – though filled with promising prospects.

##### 4.1. Data Quality and Accuracy

One of the key challenges for fashion brands is collecting and managing accurate and consistent data across the entire global supply chain. A lack of reliable data increases the risk of inconsistencies, regulatory violations, and reputational damage.

##### 4.2. Systems Integration

Integrating new digital solutions, such as Digital Product Passports (DPPs), into existing IT infrastructures (e.g., ERP systems, PLM platforms, and tracking systems) presents significant complexity. Investments in automation and data management are required to reduce operational complexity and ensure that information remains up-to-date and accurate.

##### 4.3. Costs and Accessibility

The high implementation costs of cutting-edge technologies such as 3D printing and blockchain present a serious barrier, especially for small and medium-sized enterprises (SMEs). Blockchain, for example, is a resource-intensive technology that

### 4.3. Разходи и достъпност

Високите разходи за внедряване на авангардни технологии като 3D принтиране и блокчейн представляват сериозна бариера, особено за малки и средни предприятия (МСП). Блокчейн например е ресурсно-интензивна технология, която повдига въпроси относно енергийната ѝ ефективност. За МСП се препоръчва използването на услуги на външни доставчици или участие в съвместни платформи за споделяне на данни, с цел разпределяне на разходите и запазване на конкурентоспособността.

### 4.4. Липса на стандартизация и сътрудничество

За да се осъществи мащабна трансформация, е необходимо индустриално сътрудничество и създаване на общи стандарти за данни и процеси [59]. Силните партньорства с доставчици са ключови за централизацията на данните и за гарантиране на съответствие с устойчивите стандарти. Както подчертават Беров и съавт. [60], системното изпитване и акредитация на текстилните материали е ключов инструмент за гарантиране на качеството и надеждността на иновативните облекла.

### 4.5. Поверителност и сигурност на данните

Тъй като AI разчита на значителни обеми потребителски данни, възникват сериозни въпроси относно поверителността и сигурността на личната информация. Модните марки трябва да постигнат баланс между персонализираните услуги и защитата на потребителските данни.

### 4.6. Зрялост на технологиите

Някои технологии, като AR за виртуални пробни или 3D принтирането, все още не са достатъчно развити за масово приложение. Те се сблъскват с предизвикателства по отношение на точността, прецизността и ограничения избор на материали.

## 5. Бъдещи тенденции и иновации

Въпреки съществуващите предизвикателства,

raises questions about energy efficiency. SMEs are encouraged to engage external service providers or participate in shared data platforms to distribute costs and maintain competitiveness.

### 4.4. Lack of Standardization and Collaboration

Achieving large-scale transformation requires industry-wide collaboration and the development of common standards for data and processes [59]. Strong partnerships with suppliers are essential for data centralization and ensuring compliance with sustainability standards. As emphasized by Berov et al. [60], systematic testing and accreditation of textile materials are essential for ensuring the quality and reliability of innovative garments.

### 4.5. Data Privacy and Security

As AI relies heavily on large volumes of user data, serious concerns arise around privacy and data protection. Fashion brands must strike a balance between offering personalized services and safeguarding consumer information.

### 4.6. Technology Maturity

Some technologies, such as AR for virtual try-ons or 3D printing, are not yet sufficiently mature for mass adoption. They face ongoing challenges related to precision, accuracy, and a limited range of materials.

## 5. Future Trends and Innovations

Despite current challenges, the fashion industry continues to evolve, driven by innovation and an increasing focus on sustainability.

модната индустрия продължава да се развива, водена от иновации и засилен фокус върху устойчивостта.

### 5.1. Метавселена и дигитални облекла

Възходът на метавселената създава нова икономика на виртуално себеизразяване, при която дигиталните облекла (NFTs) могат да допринесат за намаляване на текстилните отпадъци, потреблението на вода и въглеродните емисии в сравнение с физическите облекла. Все повече модни марки организират виртуални модни ревюта и предлагат дигитални „кожи“ за аватари. Тази тенденция има потенциала да трансформира връзката на потребителите с модата, превръщайки облеклото не само в естетически израз, но и в символ на статус, уникалност и персонализация в дигиталната среда [61].

Обувките от лимитираната серия „adidas X Crazyfast Bugatti“ на Adidas и Bugatti се предлагат на търг и са съчетани с NFT версия на „цифров близък“, която може да се носи в метавселената [62].

### 5.2. 4D принтиране и интелигентен текстил

Развитието на технологиите в 3D принтирането води до появата на 4D принтиране, което позволява създаване на материали, способни да реагират на външни стимули като температура или влажност.

Разработването на 4D технологията за плетене е вдъхновено от идеята за 4D печат, при който „четвъртото измерение“ е времето, нужно на произведения обект да се самоформи. В практиката това означава, че дрехата първо се изплита цяла върху индустриална плетачна машина, управлявана от компютър, като в нея се вгражда активна прежда. След това „необработената“ дреха се облича върху манекен, а роботизирана ръка я нагрива на определени места с топлинен пистолет. Под въздействието на топлината платът се свива точно там и в степента, в която е необходимо. Формата и специфичните свойства на дрехата зависят от това къде и как е разпределена активната прежда.

4D текстилът обикновено включва поне

### 5.1. The Metaverse and Digital Fashion

The rise of the metaverse is creating a new economy of virtual self-expression, where digital garments (NFTs) can help reduce textile waste, water consumption, and carbon emissions when compared to physical clothing. More fashion brands are now organizing virtual fashion shows and offering digital “skins” for avatars. This trend has the potential to transform how consumers engage with fashion, turning clothing into not only an aesthetic expression but also a symbol of status, uniqueness, and personalization in the digital space [61].

An example is the limited-edition “adidas X Crazyfast Bugatti” sneaker, offered at auction alongside an NFT “digital twin” version designed for use in the metaverse [62].

### 5.2. 4D Printing and Smart Textiles

Advancements in 3D printing have led to the emergence of 4D printing, which enables the creation of materials that respond to external stimuli, such as temperature or humidity.

The development of 4D knitting technologies is inspired by the concept of 4D printing, where the “fourth dimension” is time, allowing an object to self-transform over time. In practice, this means that a garment is first knitted in one piece using a computer-controlled industrial knitting machine with embedded active yarn. The unprocessed garment is then placed on a mannequin, and a robotic arm applies localized heat using a heat gun. The fabric contracts only where and to the extent necessary. The shape and functionality of the garment depend on the placement and configuration of the active yarn.

4D textiles typically consist of at least one textile layer into which smart materials are integrated

един пласт текстил, в който са интегрирани интелигентни материали или върху който са изградени интелигентни структури. Той е резултат от комбинацията между еластични текстилни материали и технологии за 3D печат. При този процес се използва предварително разтегнат текстил, чиято вътрешна напрегнатост, заедно с нанесения печат, води до извиване или деформиране на прототипите в желаната форма [63].

Проектът „Носима слънчева енергия“ (Wearable Solar) възниква с идеята да проучи как слънчеви панели могат да се вплетат в текстил. Създадени са два прототипа – от вълна и кожа – които включват сегменти със соларни клетки. Тези части могат да се разгъват и да улавят слънчевата светлина, когато е налична, или да се прибират и остават скрити, когато няма нужда от тяхната функция [64].

### **5.3. Биопроизводство и регенеративни материали**

Модната индустрия отчита сериозен напредък в разработването на лабораторно създадени материали, като гъбена кожа, паякова коприна и различни растителни алтернативи. Тези иновации предоставят устойчиви решения, които намаляват зависимостта от традиционните суровини.

### **5.4. Разширена отговорност на производителя (EPR) и дигитални продуктови паспорти (DPP)**

Разширената отговорност на производителя (EPR) ще продължи да оказва силно влияние върху модната индустрия, налагайки по-голяма проследяемост и отчетност по отношение на целия жизнен цикъл на продуктите. Дигиталните продуктови паспорти (DPP) ще играят ключова роля, осигурявайки детайлна информация за произхода на суровините, използваните материали и производствените процеси. Това ще улесни процесите на рециклиране и повторна употреба.

### **5.5. Устойчивост като основен двигател на иновациите**

or over which smart structures are built. The process often uses pre-stretched textiles, where internal tension combined with printed structures leads to intentional deformation or shaping of the prototypes [63]. One example is the Wearable Solar project, which explores how solar panels can be woven into textiles. Two prototypes – one made of wool and one of leather – include foldable solar panel segments. These panels can be unfolded to capture sunlight when needed or hidden when inactive [64].

### **5.3. Biofabrication and Regenerative Materials**

The fashion industry is making significant progress in developing lab-grown materials, such as mycelium leather, spider silk, and various plant-based alternatives. These innovations offer sustainable solutions that reduce dependence on traditional raw materials.

### **5.4. Extended Producer Responsibility (EPR) and Digital Product Passports (DPPs)**

Extended Producer Responsibility (EPR) will continue to shape the fashion sector by requiring greater traceability and accountability across the entire product lifecycle. Digital Product Passports (DPPs) will play a crucial role by providing detailed information on material origins, components, and production processes. This will facilitate recycling, reuse, and circularity efforts.

### **5.5. Sustainability as a Core Driver of Innovation**

Consumer demand for sustainable products continues to grow, compelling brands to integrate sustainability into their strategic identity. The future of

Потребителското търсене на устойчиви продукти продължава да нараства, което принуждава марките да интегрират устойчивостта в своята стратегическа идентичност. Бъдещето на модната индустрия ще бъде белязано от засилено внимание към етичното снабдяване и устойчивото производство, отчитащо въздействието върху околната среда и обществото.

## 6. Заключение

Модната индустрия се намира в критичен етап на трансформация, обусловен от неотложната необходимост от устойчивост и ускорен от бързия напредък на дигиталните технологии. Традиционният линеен модел на производство и потребление е доказано екологично неустойчив, водещ до значително замърсяване, изчерпване на ресурси и натрупване на отпадъци. В отговор на тези предизвикателства, устойчивата мода се утвърждава като всеобхватен подход, който интегрира екологични, социални и икономически принципи, насочени към минимизиране на негативните въздействия върху околната среда и повишаване на етичните стандарти в индустрията.

Дигиталните технологии се очертават като ключов инструмент в този преход. 3D софтуерите за дизайн и виртуално прототипиране намаляват необходимостта от физически мостри, което води до значително редуциране на отпадъците и въглеродния отпечатък още на етапа на проектиране. Дигиталният текстилен печат и производството по поръчка предоставят директни решения за справяне със свръхпроизводството и текстилните отпадъци, като същевременно драстично намаляват консумацията на вода и енергия. Изкуственият интелект и машинното обучение оптимизират прогнозите за модните тенденции и управлението на веригата за доставки, което намалява излишните запаси и повишава ефективността на ресурсите. Блокчейн технологиите осигуряват безпрецедентна прозрачност и проследяемост, изграждайки доверие у потребителите относно етичното производство и устойчивите практики. Виртуалните пробни подобряват клиентското изживяване и намаляват броя на върнатите стоки, докато 3D принтирането предлага възможности

fashion will be increasingly defined by ethical sourcing and sustainable manufacturing, with a focus on minimizing environmental and social impacts.

## 6. Conclusion

The fashion industry is undergoing a critical transformation, driven by the urgent need for sustainability and accelerated by the rapid advancement of digital technologies. The traditional linear model of production and consumption has proven environmentally unsustainable, leading to widespread pollution, resource depletion, and growing volumes of waste.

In response to these challenges, sustainable fashion is emerging as a comprehensive approach that integrates environmental, social, and economic principles aimed at minimizing negative environmental impacts and enhancing ethical standards across the industry.

Digital technologies are proving to be key enablers in this transition. 3D design software and virtual prototyping reduce the need for physical samples, significantly cutting waste and carbon emissions early in the design process. Digital textile printing and on-demand manufacturing directly address overproduction and textile waste, while drastically reducing water and energy consumption. Artificial intelligence (AI) and machine learning enhance trend forecasting and supply chain management, which helps reduce excess inventory and optimize resource use. Blockchain technologies offer unprecedented transparency and traceability, strengthening consumer trust in ethical and sustainable practices. Virtual try-ons improve customer experience while reducing product returns, and 3D printing enables personalized, low-waste manufacturing with innovative materials.

The shift toward a circular economy, supported by

за персонализирано и нискоотпадъчно производство с иновативни материали.

Преходът към кръгова икономика, подкрепен от тези дигитални иновации, е от съществено значение за бъдещето на модата. Той насърчава проектирането за дълготрайност, повторна употреба, ремонт и рециклиране, удължавайки жизнения цикъл на облеклата и свеждайки до минимум генерирането на отпадъци. Въпреки че предизвикателства като качеството на данните, интеграцията на системите и високите разходи все още съществуват, непрекъснатите иновации в метавселената, 4D принтирането и биопроизводството предлагат обещаващи възможности.

В заключение, синергията между устойчивостта и дигиталните технологии не е просто временна тенденция, а фундаментална трансформация, която е от ключово значение за бъдещето на модната индустрия. Тя предоставя възможност на компаниите да съчетават екологична отговорност, социална справедливост и икономическа жизнеспособност. Продължаващите инвестиции в тези технологии, съчетани със стремеж към сътрудничество и прозрачност, са от решаващо значение за изграждането на една наистина устойчива и отговорна модна индустрия в бъдеще.

these digital innovations, is essential for the future of fashion. It promotes the design of long-lasting garments, reuse, repair, and recycling, thereby extending product lifecycles and minimizing waste generation.

Although challenges such as data quality, systems integration, and high implementation costs persist, continued innovation in the metaverse, 4D printing, and biofabrication offers promising new directions.

In conclusion, the synergy between sustainability and digital technologies is not a passing trend but a fundamental transformation critical to the future of the fashion industry. It offers a pathway for companies to combine environmental responsibility, social equity, and economic viability. Ongoing investments in these technologies, coupled with a commitment to collaboration and transparency, are essential for building a truly sustainable and accountable fashion industry.

## REFERENCES:

- [1] Johnson & Wales University Online. (2024, December 4). What is Circular Fashion, and How is it Creating a More Sustainable Future? [online]. [Accessed 11 July 2025]. Available at: <https://online.jwu.edu/blog/what-is-circular-fashion-and-how-is-it-creating-a-more-sustainable-future/> JWU Online
- [2] NoName Global. (n.d.). Why Sustainable Practices Are Essential in Modern Garment Production [online]. [Accessed 11 July 2025]. Available at: <https://www.nonameglobal.com/post/why-sustainable-practices-are-essential-in-modern-garment-production>
- [3] DC Fashion Week. (2025, March 30). Sustainable Fashion Trends: The Rise of Print on Demand [online]. [Accessed 11 July 2025]. Available at: <https://dcfashionweek.org/sustainable-fashion-trends-the-rise-of-print-on-demand/>
- [4] Lenvers Fashion Journal. (n.d.). Understanding Ethical and Sustainable Fashion [online]. [Accessed 11 July 2025]. Available at: <https://www.lenversfashion.com/blogs/journal/understanding-ethical-and-sustainable-fashion>
- [5] RITA Charitable Trust. (n.d.). What is Digital Fashion Designing? [online]. [Accessed 11 July 2025]. Available at: <https://ritacharitabletrust.org/what-is-digital-fashion-designing/>
- [6] Medium – Digital Society. (n.d.). How Should the Fashion Industry Face the Challenges and Opportunities in the Digital Society? [online]. [Accessed 11 July 2025]. Available at: <https://medium.com/digital-society/how-should-the-fashion-industry-face-the-challenges-and-opportunities-in-the-digital-society-015518ed8a9e>
- [7] Koleva, M., Rahnev, I. (2024). Working procedures for building a sustainable fashion collection. *Textile and Garment Magazine*, 10(10), 356. <https://doi.org/10.53230/tgm.1310-912X.2024.1006.39>
- [8] Koleva, M., Ivanova, D., Vassileva-Tonkova, E., Staneva, D. (2019). Comparison of mineral tanning agents in the processing of enzyme-degreased sheep skins (in Bulgarian). *Textile and Garment Magazine*, 2, 46–50.
- [9] Dobрева-Dragostinova, I. (2014). *ABC of Sustainable Design* (in Bulgarian). Sofia: New Bulgarian University. ISBN 978-954-535-950-7.
- [10] CarbonTrail. (n.d.). Top Sustainable Materials for Eco-Friendly Fashion [online]. [Accessed 11 July 2025]. Available at: <https://carbontrail.net/blog/top-sustainable-materials-for-eco-friendly-fashion/>
- [11] White2Label Manufacturing. (n.d.). Sustainable Clothing Manufacturing [online]. [Accessed 11 July 2025]. Available at: <https://www.white2label-manufacturing.com/blog/sustainable-clothing-manufacturing>
- [12] Textile Exchange. (n.d.). Polyester [online]. [Accessed 11 July 2025]. Available at: <https://textileexchange.org/polyester/>
- [13] ECONYL®. (n.d.). ECONYL® [online]. [Accessed 11 July 2025]. Available at: <https://econyl.aquafil.com/>
- [14] Lenuo Yarn. (n.d.). What is the Recycled Cotton? [online]. [Accessed 11 July 2025]. Available at: <https://bg.lenuoyarn.com/info/what-is-the-recycled-cotton-75643262.html>
- [15] Hristova-Popovska, T., Rahnev, I. (2024). Application of recycled wool raw materials in textile crafts. *Textile and Garment Magazine*, 10(10), 355. <https://doi.org/10.53230/tgm.1310-912X.2024.1006.38>
- [16] TENCEL™ by Lenzing. (n.d.). TENCEL™ Fibers [online]. [Accessed 11 July 2025]. Available at: <https://www.tencel.com/fibers>
- [17] Ananas Anam. (n.d.). Ananas Anam [online]. [Accessed 11 July 2025]. Available at: <https://www.ananas-anam.com/>
- [18] ScienceDirect. (2023). Sustainable production of natural textile dyes from tree barks for eco-friendly cotton dyeing [online] [Accessed 11 July 2025]. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214993723001598>
- [19] Bolt Threads. (n.d.). Mylo™ [online]. [Ac-

cessed 11 July 2025]. Available at: <https://bolt-threads.com/techology/mylo/>

[20] Renoon Blog. (n.d.). Qmonos: A Breakthrough in Biotech-Driven Textiles [online]. [Accessed 11 July 2025]. Available at: <https://www.renoon.com/blog/qmonos-a-breakthrough-in-biotech-driven-textiles>

[21] Dezeen. (2019, October 24). Spiber Moon Parka Spider Silk – The North Face Japan [online]. [Accessed 1 July 2025]. Available at: <https://www.dezeen.com/2019/10/24/spiber-moon-parka-spider-silkthe-north-face-japan/>

[22] Cork-a-Text. (n.d.). Cork-a-Text [online]. [Accessed 11 July 2025]. Available at: <https://www.cork-a-text.com/>

[23] Sewport. (n.d.). Bamboo Fabric [online]. [Accessed 11 July 2025]. Available at: <https://sewport.com/fabrics-directory/bamboo-fabric>

[24] MasterClass. (n.d.). What is Modal Fabric? [online]. [Accessed 11 July 2025]. Available at: <https://www.masterclass.com/articles/fabric-guide-what-is-modal-fabric#7GuM5tDct-BIVrQ6dUr4Qhl>

[25] Instructables. (n.d.). Kombucha Fabric [online]. [Accessed 11 July 2025]. Available at: <https://www.instructables.com/Kombucha-Fabric/>

[26] Oliver Company London. (n.d.). Apple Leather [online]. [Accessed 11 July 2025]. Available at: <https://olivercompanylondon.com/pages/apple-leather>

[27] Apparel Talks by Apurva. (2020, December 5). Woocoa: Vegan Wool from Coconut and Hemp [online]. [Accessed 11 July 2025]. Available at: <https://appareltalksbyapurva.wordpress.com/2020/12/05/woocoa-vegan-wool-from-coconut-and-hemp/>

[28] QMilk. (n.d.). QMilk [online]. [Accessed 11 July 2025]. Available at: <https://www.qmilkfiber.eu/>

[29] Singtex. (n.d.). S.Café® [online]. [Accessed 11 July 2025]. Available at: <https://www.singtex.com/fabric/s-cafe/>

[30] ECOVERO™. (n.d.). ECOVERO™ [online].

[Accessed 11 July 2025]. Available at: <https://www.ecovero.com/our-fibers/>

[31] The Fabric Store. (n.d.). Deadstock Fabrics [online]. [Accessed 11 July 2025]. Available at: <https://wearethefabricstore.com/pages/deadstock-fabrics>

[32] Kolev, N., Staneva, D., Zheleva, D., Rahnev, I. (2018). New possibilities for design and production of textile products through gluing/welding (in Bulgarian). *Textile and Garment Magazine*, 4, 118–128.

[33] Koleva, T. (2023). Comparative description of fabric appearance defects (in Bulgarian). *Textile and Garment Magazine*, 7–8, 219–231.

[34] Krüger, R., Rahnev, I. (2019). The importance of technological documentation for the sustainable development of spinning and weaving production (in Bulgarian). *Textile and Garment Magazine*, 2, 40–45.

[35] Faume. (n.d.). Repair, Resell, Recycle – What if This Became the New Fashion Model Baseline [online]. [Accessed 11 July 2025]. Available at: <https://www.faume.co/en/blog/repair-resell-recycle-what-if-this-became-the-new-fashion-model-baseline>

[36] bluesign® (Organization). (n.d.). Circular Fashion [online]. [Accessed 11 July 2025]. Available at: <https://www.bluesign.com/en/circular-fashion/>

[37] DyeCoo (Company). (n.d.). CO<sub>2</sub> Dyeing [online]. [Accessed 11 July 2025]. Available at: <https://dyecoo.com/co2-dyeing/>

[38] Gap Inc. (2019, June 18). Gap Inc. Set to Release Waterless Dyed Denim in 2020 [online]. [Accessed 11 July 2025]. Available at: <https://www.gapinc.com/en-us/articles/2019/06/gap-inc-set-to-release-waterless-dyed-denim-in-2020> Gap Inc.+1

[39] Roadmap to Zero. (n.d.). Roadmap to Zero: About [online]. [Accessed 11 July 2025]. Available at: <https://www.roadmaptozero.com/about>

[40] Amin, G., Konstantinović, S., Jordanov, I., & Djordjević, D. (2023). Optimization of dyeing acrylic fibers under laboratory conditions. *Textile and Garment Magazine*, 5, 147–152. <https://doi.org/10.53230/tgm.1310-912X.2023.0005.02>

- [41] Roadmap to Zero. (n.d.). Roadmap to Zero [online]. [Accessed 11 July 2025]. Available at: <https://www.roadmaptozero.com/>
- [42] Ellen MacArthur Foundation. (n.d.). Our Vision of a Circular Economy for Fashion [online]. [Accessed 11 July 2025]. Available at: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/our-vision-of-a-circular-economy-for-fashion>
- [43] Hristova-Popovska, T. K. (2022). New technological developments and methods for creating ecological products (in Bulgarian). *Textile and Garment Magazine*, 11–12, 322–327.
- [44] Angelova, R., & Kapanak, S. (2022). Analysis of the possibilities for efficient use of textile resources (in Bulgarian). *Textile and Garment Magazine*, 11–12, 304–309.
- [45] European Packaging. (n.d.). Extended Producer Responsibility [online]. [Accessed 11 July 2025]. Available at: <https://www.european-packaging.eu/policy-area/extended-producer-responsibility/>
- [46] Number Analytics. (n.d.). Ultimate Guide: 3D Design in Fashion [online]. [Accessed 11 July 2025]. Available at: <https://www.numberanalytics.com/blog/ultimate-guide-3d-design-fashion>
- [47] Yakimov, P. (2015). History and development of computer graphics in feature films. The path from analogue to digital technologies (in Bulgarian). *Yearbook of the Department “Cinema, Advertising and Show Business” 2013–2014*. Sofia: New Bulgarian University, Planeta 3, pp. 182–196. ISBN 978-954-535-886-9.
- [48] Yakimov, P. (2023). Deepfake: the potential of the technology for creating visual art forms (in Bulgarian). *Departments “Architecture”, “Design” and “Fine Arts”, Collection of scientific publications*, 8I 2022–23. Sofia: New Bulgarian University Press, pp. 225–234. ISSN 1314–7188.
- [49] Rimini, G., Rahnev, I. (2017). Technological advantages of inkjet printing in textile production (in Bulgarian). *Textile and Garment Magazine*, 5, 122–131. <https://doi.org/10.53230/tgm.1310-912X.2017.0005.02>
- [50] Georgiev, G., Rimini, G., Staneva, D., Rahnev, I. (2017). Sublimation transfer printing on double-layer fabric (polyester/cotton) (in Bulgarian). *Textile and Garment Magazine*, 9, 235–242.
- [51] Appinventiv. (n.d.). AI in Fashion Industry [online]. [Accessed 11 July 2025]. Available at: <https://appinventiv.com/blog/ai-in-fashion-industry/>
- [52] Popova-Nedyalkova, N. (2022). Artificial intelligence in the fashion industry: fabric between technology and style (in Bulgarian). *Textile and Garment Magazine*, 11–12, 328–332. <https://doi.org/10.53230/tgm.1310-912X.2022.0009.04>
- [53] Parametric Architecture. (n.d.). Iris van Herpen Unveils the World’s First 3D Printed Wedding Dress [online]. [Accessed 11 July 2025]. Available at: <https://parametric-architecture.com/iris-van-herpen-unveils-the-worlds-first-3d-printed-wedding-dress/>
- [54] TCT Magazine. (n.d.). Zac Posen x GE Additive x Protolabs: 3D Print Met Gala [online]. [Accessed 11 July 2025]. Available at: <https://www.tctmagazine.com/additive-manufacturing-3d-printing-news/zac-posed-ge-additive-protolabs-3d-print-met-gala/>
- [55] Prada Group. (n.d.). Prada Re-Nylon [online]. [Accessed 11 July 2025]. Available at: <https://www.pradagroup.com/en/sustainability/environment-csr/prada-re-nylon.html?ref=techpacker.com>
- [56] Adidas. (n.d.). Futurecraft Loop Phase 2: How We’re Finding a Way [online]. [Accessed 11 July 2025]. Available at: <https://news.adidas.com/running/futurecraft.loop-phase-2--how-we-re-finding-away/s/43c42bf2-73ca-4ccb-930b-5ac5b6637a76>
- [57] The Powerhouse. (n.d.). Meet the Names Dress by Sylvia Heisel [online]. [Accessed 11 July 2025]. Available at: <https://thepowerhouse.group/meet-the-names-dress-by-sylvia-heisel-2/>
- [58] MIT Self Assembly Lab. (n.d.). 4D Knit Dress [online]. [Accessed 11 July 2025]. Available at: <https://selfassemblylab.mit.edu/4d-knit-dress>
- [59] Nacheva, M. (2024). The basic construction in fashion design (in Bulgarian). *Textiles, Clothing, Leather and Technology*, 3, 59.
- [60] Berov, A., Kostova, S., & Nedyalkova, R.

(2023). The role of testing in innovative projects for equipping military personnel (in Bulgarian). *Textile and Garment Magazine*, 1, 22–28. <https://doi.org/10.53230/tgm.1310-912X.2023.00001.03>

[61] Aleksandrova, M. (2024). *Neoconceptualism and the Metaverse in Contemporary Fashion* (in Bulgarian). Blagoevgrad: University Press “Neofit Rilski”, pp. 10–13. ISBN 978-954-00-0379-5.

[62] Adidas Football. (2025, July 4). Post on 4D Knit Dress [online]. [Accessed 11 July 2025]. Available at: <https://x.com/adidasfootball/status/1721210726964941014/photo/1>

[63] Lampion Magazine. (2024, May 22). 4D Knit Dress – Sustainability, Raw Materials, Textile Manufacturing [online]. [Accessed 11 July 2025]. Available at: <https://lampionmagazine.com/article/2024/05/22/4d-knit-dress-self-assembly-lab-sustainability-raw-materials-textile-manufacturing/>

[64] Pauline van Dongen. (n.d.). Wearable Solar Dress [online]. [Accessed 11 July 2025]. Available at: <https://www.paulinevandongen.nl/portfolio/wearable-solar-dress/>