

Primjena umjetne inteligencije za digitalizaciju tekstilnih materijala kod 3D simulacije odjeće

Slavenka Petrak¹, Maja Mahnić Naglič¹

¹Sveučilište u Zagrebu Tekstilno-tehnološki fakultet, Zavod za odjevnu tehnologiju, Prilaz baruna Filipovića 28a, Zagreb

Sažetak: U radu je prikazano istraživanje utjecaja metoda ispitivanja svojstava tekstilnih materijala na 3D simulaciju i razvoj digitalnih prototipova odjeće, s fokusom na primjenu UI tehnologije, kao pristupačnije i prihvatljivije metode u kontekstu održivosti razvojnog procesa. Digitalizacija tekstilnih materijala predstavlja značajan izazov u procesu razvoja 3D modela odjeće, o čemu ovise realističnost i procjena pristalosti u skladu sa željenim oblikom i zahtjevima za funkcionalnošću. U istraživanju je postavljena metodologija vrednovanja digitalnih prototipova odjeće, razvijenih primjenom podataka o mehaničkim svojstvima tkanina utvrđenih različitim metodama, koja omogućuje objektivnu evaluaciju na temelju komparativne analize parametara drapiranja. Istraživanje provedeno na šest tkanina, pokazalo je vrlo dobru korelaciju rezultata digitalnih prototipova razvijenih primjenom mehaničkih parametara KES-FB sustava i SEDDI Textura UI aplikacije, što podržava uporabu UI tehnologije za procjenu svojstava tkanina, potrebnih za 3D simulaciju.

Ključne riječi: digitalizacija svojstava tekstilnih materijala, umjetna inteligencija, 3D simulacija odjeće

1. Uvod

Transformacija odjevne i modne industrije posljednjih godina je značajno potaknuta primjenom računalnih alata i cjelovitih sustava za razvoj digitalnih proizvoda u virtualnom okruženju, simulacijskih tehnologija te novih metoda digitalizacije tekstilnih materijala. U fokusu je razvoj digitalnih blizanaca, koji dizajnerima i članovima razvojnih timova omogućuju evaluaciju i prilagodbu dizajna, analizu krojeva, pristalosti i funkcionalnosti modela te ciljane prilagodbe, bez potrebe za izradom velikog broja fizičkih prototipova [1, 2]. Pri tome je posebno važno da se u virtualnom okruženju može vjerodostojno reproducirati ponašanje stvarnih tekstilnih materijala, s obzirom na utjecaj

koji imaju na oblikovanje forme modela i nabora, kao i funkcionalnost modela koja se procjenjuje s aspekta analize deformacija tekstilnih materijala, po pojedinim zonama digitalnog prototipa odjevnog predmeta [3-5]. Metode 3D simulacije odjeće uključuju fizikalnu simulaciju spajanja 2D krojnih dijelova oko 3D modela tijela, simulaciju kontakta između 3D modela tijela i tekstilnog materijala pridruženog krojnim dijelovima digitalnog odjevnog predmeta, kao i interakciju između slojeva tekstilnog materijala, sve pod utjecajem vanjskih čimbenika poput gravitacije [6]. Stoga je precizno određivanje mehaničkih svojstava tekstilnih materijala ključno za razvoj digitalnih prototipova odjeće, koji mogu pouzdano simulirati stvarno ponašanje i omogućiti odabir tekstilnih materijala od kojih će se određeni model u konačnici izrađivati. Tradicionalni pristupi određivanju vrijednosti parametara mehaničkih svojstava tekstilnih materijala temelje se na laboratorijskim ispitivanjima uzoraka, primjenom specijalizirane mjerne opreme. Jedan od najpoznatijih sustava za objektivno vrednovanje tekstilnih materijala je Kawabata Evaluation System (KES-FB), sastavljen od četiri mjerna uređaja za mjerenje parametara vlačnih, savojnih, smičnih, kompresijskih i površinskih svojstava [7]. Iako primjena ovakvog mjernog sustava omogućuje utvrđivanje točnih i pouzdanih vrijednosti, njegova primjena je ograničena uglavnom na znanstveno-istraživački rad jer zahtijeva visoku razinu stručnosti, posebno u interpretaciji rezultata mjerenja, cijena opreme zahtijeva značajna financijska ulaganja, a sam proces je dugotrajan te zahtijeva pripremu i kondicioniranje veće količine stvarnih uzoraka, u laboratorijskim uvjetima prije samog procesa mjerenja. Svi navedeni uvjeti utjecali su na slabu zastupljenost i primjenu ovakvog sustava u industrijskim uvjetima te se paralelno s razvojem pojedinog CAD sustava za razvoj digitalnih prototipova odjeće postupno razvijaju i mjerni sustavi za vrednovanje svojstava [8-10].

Razvoj alata umjetne inteligencije u posljednjih nekoliko godina potaknuo je razvoj novih pristupa i metoda digitalizacije svojstava tekstilnih materijala, koji proces čine znatno bržim, jednostavnijim i financijski pristupačnim istraživačima i razvojnim timovima u tvrtkama. Metode temeljene na primjeni alata umjetne inteligencije koriste algoritme strojnog učenja za procjenu vrijednosti parametara mehaničkih svojstava tekstilnih materijala na temelju dostupnih podataka o materijalu, čime se smanjuje potreba za složenim laboratorijskim ispitivanjima i skupom opremom. Među takvim alatima ističe se aplikacija SEDDI Textura, koja omogućuje procjenu vrijednosti parametara mehaničkih svojstava potrebnih za 3D simulaciju, analizu i vrednovanje deformacija tekstilnih materijala na digitalnom prototipu modela tijekom njegovog razvoja [11]. Unatoč istaknutim prednostima koje ovakav pristup nudi, pitanje točnosti i pouzdanosti u odnosu na tradicionalna laboratorijska mjerenja još uvijek nije dovoljno istraženo. U tom smislu, ističe se potreba za sustavnom procjenom točnosti digitalizacije svojstava tekstilnih materijala primjenom alata umjetne inteligencije, odnosno komparacijom procijenjenih vrijednosti s vrijednostima utvrđenim laboratorijskim ispitivanjima i mjerenjima. Sukladno navedenom, cilj ovog istraživanja je ispitati primjenu parametara mehaničkih svojstava utvrđenih SEDDI Textura UI aplikacijom na odabranom setu uzoraka tekstilnih materijala u odnosu na primjenu

vrijednosti utvrđenih laboratorijskim mjerenjima na istom setu uzoraka primjenom KES-FB mjernog sustava. Rezultati prikazanog istraživanja doprinose boljem razumijevanju pouzdanosti alata umjetne inteligencije za procjenu mehaničkih svojstava tekstilnih materijala, njihovoj digitalizaciji i primjeni rezultata u procesu digitalnog razvoja odjeće i drugih tekstilnih proizvoda.

Digitalna transformacija u procesu dizajna i razvoja novih kolekcija odjeće ima iznimno važnu ulogu jer ima značajan utjecaj na održivost, posebno s aspekta smanjenja troškova povezanih s tekstilnim materijalima i izvorima energije koji proizlaze iz tradicionalnog proizvodnog procesa i izrade višestrukih stvarnih prototipova [12-14]. Unatoč sve većoj digitalizaciji cjelokupnog procesa, dizajn i konstrukcija modela i dalje se provjeravaju izradom stvarnih prototipova te se ovisno o složenosti modela, korekcije krojeva i izrada prototipova provode u više iteracija, čime se povećava količina tekstilnog otpada i stvaraju dodatni troškovi vezani uz prekomjerno trošenje materijala i transport između brendova i dislociranih dobavljača koji proizvode uzorke modela, što posljedično pridonosi onečišćenju okoliša i narušavanju ekosustava [14, 15]. Brendovi koji primjenjuju digitalno prototipiranje izvještavaju o smanjenju troškova uzorkovanja i do 80 %, te do 50 % kraćem vremenu izlaska proizvoda na tržište [16-18]. Iz tog razloga se na globalnoj razini uspostavlja sve veći broj inicijativa i direktiva usmjerenih na smanjenje negativnog utjecaja ove industrije putem digitalne transformacije, inovacija u proizvodnji i novih poslovnih modela koji osiguravaju konkurentnost, smanjenje troškova i povećanje učinkovitosti [19-21].

2. Pregled dosadašnjih istraživanja

Digitalne i tehnološke inovacije značajno mijenjaju pristup razvoju kolekcija odjeće. Od procesa dizajna u koji se sve više integriraju digitalni alati za izradu skica, koji omogućuju brži i kvalitetniji razvoj i prezentaciju dizajnerskih ideja, do razvoja krojeva primjenom specijaliziranih 2D/3D CAD sustava za proizvodnju odjeće, koji također omogućuju digitalnu komunikaciju s poslovnim partnerima te prezentaciju i prodaju digitalnih ili stvarnih modnih proizvoda kupcima putem računalnih platformi. Digitalni 3D dizajn odjeće omogućuje brže i preciznije digitalno prototipiranje umjesto izrade više stvarnih prototipova, čime se štede resursi, smanjuju troškovi i posljedično smanjuje negativan utjecaj na okoliš [22-24].

Digitalizacija tekstilnih materijala predstavlja ključni korak u procesu virtualnog dizajna odjeće jer omogućuje simulaciju mehaničkog ponašanja tkanina u 3D CAD okruženju. Različiti CAD sustavi za razvoj digitalnih prototipova odjevnih modela kod 3D simulacije primjenjuju podatke o fizikalnim i mehaničkim svojstvima tekstilnih materijala određene različitim sustavima za vrednovanje [1, 8-11], što predstavlja jedan od najistaknutijih problema u implementaciji digitalnog prototipiranja u proizvodni proces. Osim najpoznatijeg KES mjernog sustava [4, 7], razvijeni su i drugi, noviji sustavi,

od kojih su poznatiji CLO Fabric Kit [8] i Browzwear-ov Fabric Analyser (FAB) [9]. Ovakvi uređaji izravno mjere i analiziraju deformacijsko ponašanje ciljanog tekstilnog materijala iz čega se utvrđuju vrijednosti mehaničkih parametara, potrebni za primjenu kod 3D simulacije u CAD sustavu za razvoj digitalnih prototipova odjeće [25, 26]. Nedostaci primjene ovakvih uređaja su uglavnom visoka cijena te složen i dugotrajan proces mjerenja koji obično zahtijeva visoku razinu stručnosti i iskustva pri ispitivanju kako bi se osigurala pouzdanost utvrđenih rezultata. Dodatni problem predstavlja nedostatak standardiziranih metoda i setova podataka, što često dovodi do ograničene interoperabilnosti između različitih CAD sustava i mjernih uređaja [27, 28].

U novije vrijeme razvijaju se metode koje koriste metapodatke o materijalu ili vizualne informacije (poput fotografija ili videozapisa), uz primjenu umjetne inteligencije (UI) i algoritama strojnog učenja za procjenu njihovih mehaničkih karakteristika. Prednost ovih metoda je u tome što ne zahtijevaju specijaliziranu laboratorijsku opremu što ubrzava i pojednostavljuje postupak ispitivanja za krajnjeg korisnika i čime se povećava fleksibilnost i dostupnost postupka digitalizacije [22, 29, 30]. Prema dostupnoj literaturi razlikuju se dva osnovna pristupa. U prvom pristupu simulacije se koriste za iterativno prilagođavanje parametara tekstilnog materijala, dok se ne postigne odgovarajuća podudarnost između simuliranog i stvarnog ponašanja tkanine, pri čemu ulazni podaci mogu biti pojedinačne slike odjevnih predmeta ili video sekvence njihova kretanja [31]. U drugom pristupu, simulacije se koriste za generiranje velikih skupova podataka, koji služe za treniranje modela strojnog učenja, čime se omogućuje procjena vrijednosti mehaničkih parametara na temelju vizualnih informacija iz video ili slikovnih prikaza [32, 33]. Neki od pristupa digitalizaciji tkanina temelje se na primjeni dubinskih slika [34] i koeficijentata trenja [35], dok metode vođene podacima [36, 37] koriste deskriptore gibanja i 3D granične podatke za identifikaciju sličnih tkanina. Iako su ovi pristupi znanstveno zanimljivi i obećavajući, većina takvih metoda još uvijek nije pronašla širu primjenu izvan istraživačkih laboratorija.

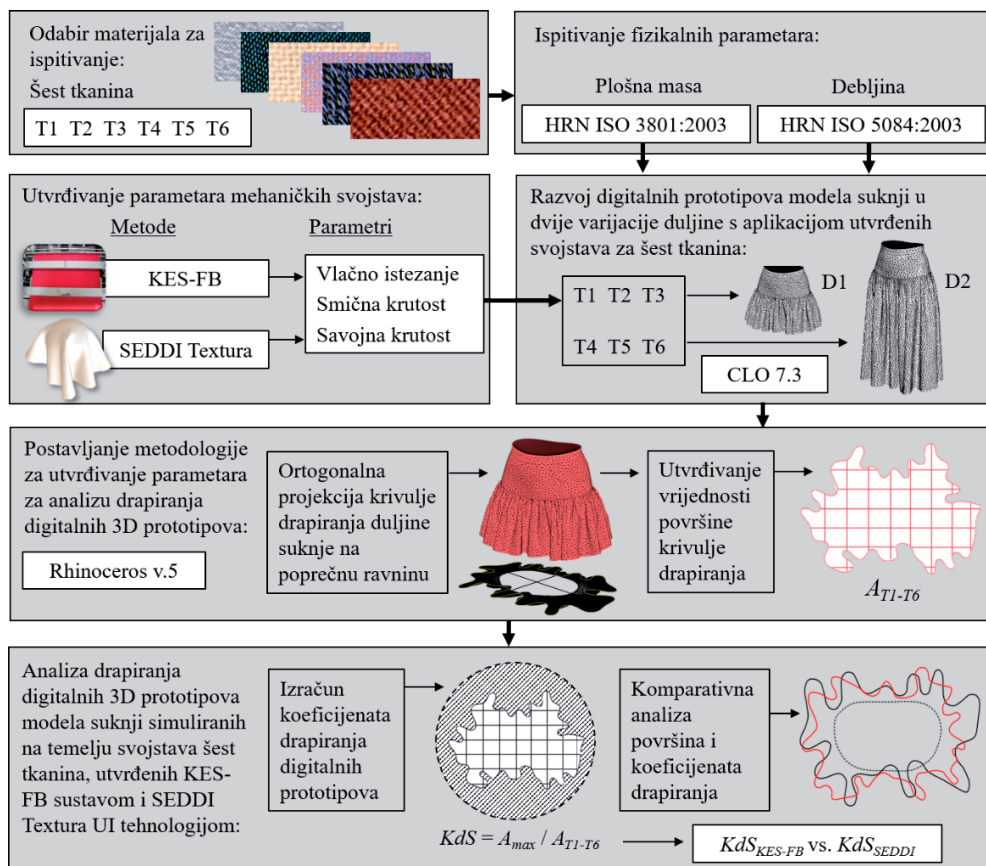
Najnoviji smjer razvoja u području digitalizacije tekstilnih materijala temelji se na korištenju metapodataka o tkaninama. Ove metode koriste algoritme strojnog učenja trenirane na velikim skupovima podataka koji sadrže informacije o strukturi, gustoći, sastavu i debljini tkanina, dok se kao izlazni podaci dobivaju procijenjene vrijednosti mehaničkih parametara materijala. Prema jednom od novijih pregleda literature, najučinkovitiji algoritmi za predviđanje složenih svojstava tekstilnih materijala i njihovu implementaciju u CAD sustave za digitalno prototipiranje odjeće jesu hibridni modeli koji kombiniraju umjetnu inteligenciju, strojno učenje i fizikalne simulacije [30, 38]. Simulacije temeljene na metodi konačnih elemenata te UI modeli koji uključuju umjetne i konvolucijske neuronske mreže postižu visoku preciznost u predviđanju mehaničkih svojstava tekstilnih materijala [37, 39], dok kombinacije s tehnikama neizravne logike dodatno povećavaju točnost predviđanja drapiranja tkanina [40, 41]. Zbog svoje jednostavnosti, brzine i relativno niskih troškova primjene, takvi pristupi sve se češće uvode u industrijsku praksu. U posljednje vrijeme razvijeno je nekoliko

komercijalnih rješenja koja omogućuju procjenu parametara tkanina upravo na temelju metapodataka, među kojima se ističu sustavi poput SEDDI Textura [11], CLO Fabric Creator [8] i Vizoo physX [42]. Budući da je postupak određivanja svojstava tekstilnih materijala i njihove implementacije u CAD sustave za digitalno 3D prototipiranje znatno pojednostavljen, takvi sustavi omogućuju dizajnerima jednostavno variranje modela s obzirom na različite tkanine, o čijim svojstvima u velikoj mjeri ovise konačni izgled, oblik i pristajanje modela, čime se znatno olakšava odabira odgovarajućeg materijala za određeni model. Osim parametara fizikalnih i mehaničkih svojstava uzorka tekstilnog materijala, sustavi generiraju i podatke o prozirnosti i hrapavosti površine koji kod simulacije osiguravaju visoku realističnost prikaza površine modela odjavnog predmeta, a također je moguće i generirati podatke o cijeni, dostupnosti zaliha kod proizvođača i/ili podrijetlu i utjecaju pojedinih materijala na okoliš, čime se dizajnerima i razvojnim inženjerima omogućuje donošenje odluka o odabiru ekološki prihvatljivih materijala [11, 22].

Procjena točnosti postupaka digitalizacije tkanina zahtijeva i jasno definirane metode za evaluaciju točnosti digitalnih modela materijala. Međutim, dostupna literatura koja se bavi industrijskim metodama evaluacije pada tkanina relativno je ograničena. U industriji odjeće često se koristi pojam evaluacije, koji podrazumijeva procjenu odstupanja između simuliranog i stvarnog ponašanja tkanine, unutar prihvatljivih granica pogreške. Jedan od rijetkih sustavnih pregleda metoda validacije digitalnih tkanina predstavila je organizacija 3D Retail Coalition, koja je analizirala različite pristupe koje koriste proizvođači 3D CAD sustava [43]. U praksi su razvijeni i specifični postupci za validaciju digitalnog pada tkanina [27, 44-46]. Primjerice, razvijen je postupak u kojem se kvadratni uzorak tkanine postavlja preko kugle te se dobiveni oblik fotografira pod kontroliranim uvjetima, iz više kutova promatranja. Takav se eksperimentalni postupak može replicirati i u digitalnom simulacijskom okruženju, što omogućuje izravnu usporedbu stvarnog i simuliranog rezultata. Točnost digitalnog modela procjenjuje se usporedbom širine najširih dijelova drapiranog uzorka tkanine u stvarnom i simuliranom prikazu, pri čemu se digitalni model smatra evaluiranim, ako odstupanje mjerenja ne prelazi određeni prag pogreške, do 20 % od stvarnog mjerenja tkanine. Na sličan način primjenjuje se i standardna Cusick Drape Meter metoda, korištena i u ovom istraživanju, kod koje se koriste kružni uzorci tkanina, postavljeni na kružni nosač manjih dimenzija, pri čemu rubovi uzorka slobodno padaju pod utjecajem vlastite težine. Metodu je također moguće reproducirati u digitalnim uvjetima, što omogućuje usporedbu realnih i simuliranih uzoraka tekstilnih materijala i evaluaciju procesa simulacije na temelju korelacije utvrđenih koeficijentata drapiranja (K_d), koji u području ispitivanja materijala predstavljaju standardni parametar za vrednovanje drapiranja [3, 45]. U kontekstu navedenih istraživanja posebno je važno sustavno procijeniti točnost novih pristupa digitalizaciji, temeljenih na umjetnoj inteligenciji, u usporedbi s tradicionalnim laboratorijskim metodama mjerenja mehaničkih svojstava tkanina, što predstavlja temelj za razumijevanje potencijala UI tehnologija u području digitalnog razvoja i simulacije odjavnih predmeta.

3. Eksperimentalni dio

Na Slici 1 prikazan je plan rada provedenog istraživanja utjecaja metoda ispitivanja svojstava tekstilnih materijala na 3D simulaciju i razvoj digitalnih prototipova odjeće.



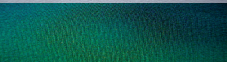





Slika 1: Plan istraživanja

3.1 Tekstilni materijali

U istraživanju je korišteno šest tkanina različitog sirovinskog sastava, veza i strukturnih svojstava, Tablica 1.

Tablica 1: Vez tkanina i prikaz skenirane površine

Tkanina	Vez	Skenirana površina tkanine	Tkanina	Vez	Skenirana površina tkanine
T1	Platno 1/1		T4	Platno 1/1	
T2	Keper 3/1		T5	Keper 2/1	
T3	Keper 2/1		T6	Keper 2/1	

Tkanine T1 i T2 izrađene su od poliesterskih vlakana, tkanine T3 do T5 su mješavine poliesterskih i elastanskih vlakana s vunom, pamukom i viskozom u različitim omjerima, dok je tkanina T6 izrađena od mješavine poliesterskih vlakana s manjim udjelom elastanskih vlakana. Sve tkanine prikladne su za izradu ženske vanjske odjeće. Odabrani sirovinski sastavi i mješavine vlakana predstavljaju najčešće kombinacije u komercijalnoj proizvodnji te se primjenjuju u izradi širokog spektra odjevnih proizvoda. Gustoća niti po jedinici duljine, masa po jedinici površine te debljina uzoraka tkanina određeni su u skladu s važećim normama [47-49], Tablica 2.

Tablica 2: Karakterizacija tkanina

Tkanina	Sirovinski sastav	Gustoća niti [niti/cm]		Plošna masa [g/m ²]	Debljina [mm]
		osnova	potka		
T1(M2)	100 % poliestersko vlakno	72,8	36,3	83,66	0,25
T2 (M1)	100 % poliestersko vlakno	112,2	41,2	135,17	0,31
T3 (M3)	75 % vuna 15 % poliestersko vlakno 10 % elastansko vlakno	23,7	24,1	178,70	0,40
T4 (M5)	97 % poliestersko vlakno 3 % elastansko vlakno	60,3	31,7	242,00	0,56
T5 (M6)	65 % pamuk 31 % poliestersko vlakno 4 % elastansko vlakno	42,6	18,1	253,36	0,62
T6 (M4)	63 % poliestersko vlakno 33 % viskoza 4 % elastansko vlakno	35,7	28,2	286,13	0,61

3.2 Ispitivanje parametara mehaničkih svojstava tekstilnih materijala primjenom KES-FB sustava

Za ispitivanje vlačnih, smičnih i savojnih svojstava odabranih tkanina korišten je Kawabata Evaluation System (KES-FB) mjerni sustav za objektivno vrednovanje tekstila i odjeće. Prema metodologiji sustava, korišteni su uzorci dimenzija 20x20

cm, koji su prethodno kondicionirani na standardne uvjete temperature od 21 ± 1 °C i 65 ± 1 % relativne vlažnosti. Za potrebe 3D simulacije i ispitivanje drapiranja modela suknje korištene su vrijednosti mehaničkih parametara vlačnog istežanja u smjeru osnove i potke pri maksimalnoj sili od 490,35 N/m (*EMT-1/osnova* i *EMT-2/potka*), smična krutost (*G*) te savojna krutost u smjeru osnove i potke (*B-1/osnova* i *B-2/potka*), prikazane u Tablici 3 [7].

Tablica 3: Utvrđene vrijednosti parametara mehaničkih svojstava primjenom KES-FB sustava

Tkanina	Vlačna svojstva		Smična svojstva	Savojna svojstva	
	<i>EMT-1</i> [%]	<i>EMT-2</i> [%]	<i>G</i> [cN/(cm°)-1]	<i>B-1</i> [cNcm]	<i>B-2</i> [cNcm]
T1	3,90	31,28	0,46	0,0085	0,0033
T2	2,75	6,92	0,41	0,0195	0,0061
T3	9,05	11,49	0,50	0,0214	0,0200
T4	20,43	18,15	0,57	0,0322	0,3880
T5	3,48	21,15	1,26	0,0743	0,0370
T6	21,54	22,05	0,61	0,0297	0,0240

Za potrebe 3D simulacije u programu za razvoj digitalnih prototipova odjeće CLO, vrijednosti parametara utvrđene KES-FB sustavom su preračunate u mjerne jedinice naprežanja materijala koje podržava program, Tablica 4 [4, 50].

Tablica 4: Vrijednosti mehaničkih parametara preračunati u jedinice za unos u program CLO

Tkanina	Vlačna svojstva		Smična svojstva	Savojna svojstva	
	Istežanje osnova [g/s ²]	Istežanje potka [g/s ²]	Smik [g/s ²]	Savoj osnova [gmm ² /s ²]	Savoj potka [gmm ² /s ²]
T1	471944	373515	46000	850	330
T2	477226	458614	41000	1950	610
T3	449656	439815	50000	2140	2000
T4	407166	415023	57000	3220	3880
T5	473860	404746	126000	7430	3700
T6	403447	401762	61000	2970	2400

3.3 Digitalizacija tekstilnih materijala primjenom UI tehnologije

Za digitalizaciju uzoraka tkanine primjenom UI tehnologije korištena je aplikacija SEDDI Textura [11]. Aplikacija koristi skenirane slike stvarnih uzoraka materijala,

Tablica 1, i ulazne podatke o sirovinskom sastavu, plošnoj masi i debljini tkanina, Tablica 2, na temelju čega procjenjuje vrijednosti mehaničkih parametara za vlačna, smična i savojna svojstva. Digitalni prikazi površine analiziraju se sloj po sloj, na temelju čega se generiraju 3D uzorci tkanina u formatima (U3M ili Zfab), prikladnima za direktnu implementaciju u CAD programe za razvoj digitalne odjeće CLO i Browzwear. Vrijednosti parametara mehaničkih svojstava utvrđeni SEDDI Textura aplikacijom, za šest odabranih tkanina, prikazani su u Tablici 5.

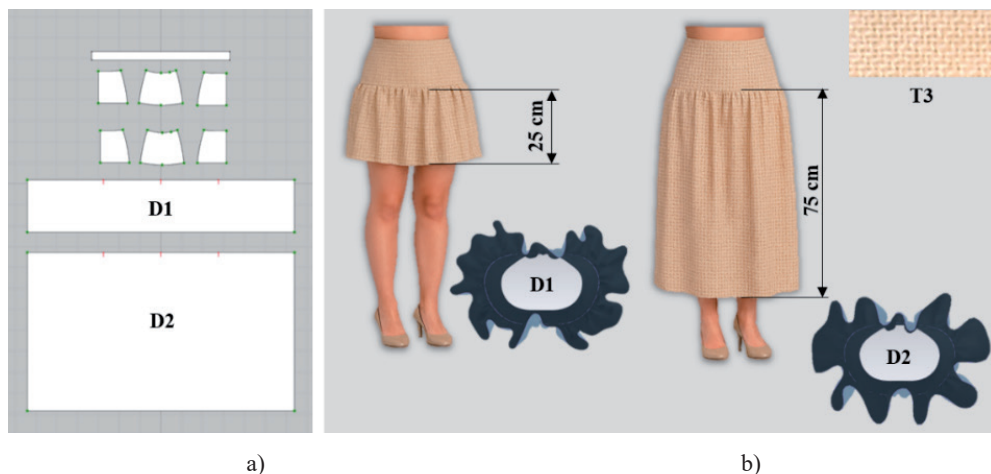
Tablica 5: Vrijednosti mehaničkih parametara utvrđene primjenom SEDDI Textura UI aplikacije

Tkanina	Vlačna svojstva		Smična svojstva	Savojna svojstva	
	Istezanje osnova [g/s ²]	Istezanje potka [g/s ²]	Smik [g/s ²]	Savoj osnova [gmm ² /s ²]	Savoj potka [gmm ² /s ²]
T1	685657	605199	53349	529	600
T2	775798	668222	66711	1568	2090
T3	590790	389397	46739	1687	1293
T4	664904	490003	59571	3234	2747
T5	666580	413367	114243	7119	2946
T6	647152	361808	75174	5231	2191

Jedna od istaknutih prednosti primjene UI tehnologije za utvrđivanje vrijednosti parametara mehaničkih svojstava za potrebe 3D simulacije je to što nema potrebe za pripremom uzoraka. To izravno ima pozitivan učinak s aspekta održivosti s obzirom da se smanjuju energetske i materijalne resursi vezani uz potrebno kondicioniranje uzoraka te se smanjuje količina otpada uzrokovana velikim brojem uzoraka koji se odbacuju nakon ispitivanja. Također je omogućena procjena svojstava materijala na već gotovom odjevnom predmetu bez potrebe za uništavanjem odjevnog predmeta u smislu izrezivanja uzorka tekstila za ispitivanje, što ima posebno značajan potencijal u području restauracije i konzervacije povijesnih tekstilnih materijala gdje destruktivne metode ispitivanja nisu primjenjive.

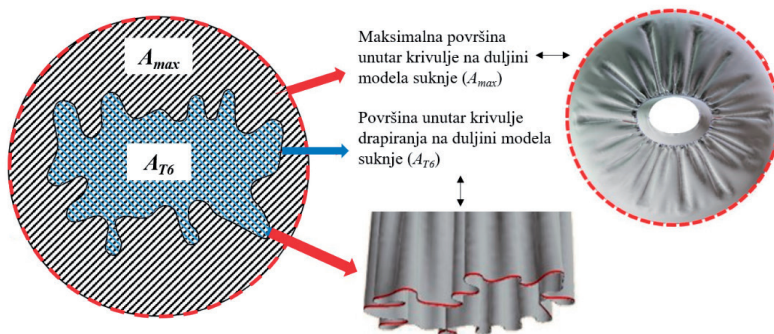
3.4 3D simulacija i računalna analiza drapiranja modela suknje

Računalna analiza drapiranja tkanina provedena je na digitalnim 3D prototipovima ženske suknje s volanom u dvije varijacije duljine: mini (D1) i maksimi (D2), razvijanim u CAD programu CLO v.2025 [50], Slika 2. Parametri površinske poligonalne mreže modela postavljeni su na visoku rezoluciju s duljinom stranice poligona od 4 mm, pri čemu su simulacije izvođene s pedeset iteracija i vremenskim razmakom od 0,033 sekunde.



Slika 2: Model suknje u dvije varijacije duljine: a) krojni dijelovi, b) digitalni prototipovi s prikazom projekcije drapiranja modela na duljini

Drapiranje tkanine se definira kao kompleksna deformacija koja nastaje pri slobodnom padu tkanine pod utjecajem vlastite težine te uvelike ovisi o vlačnim i smičnim svojstvima, kao i o površinskoj masi i debljini materijala. Drapiranje se standardno utvrđuje primjenom Cusick Drape Meter metode i izračunom koeficijenta drapiranja koji predstavlja omjer između nedrapirane površine kružnog uzorka tkanine i drapirane površine uzorka postavljenog na kružni nosač manjih dimenzija, pri čemu rubovi slobodno padaju pod utjecajem težine tkanine [51, 52]. Suknja kao odjevni predmet se na tijelu ponaša na sličan način, u području između struka i bokova priliježe uz tijelo, dok prema duljini slobodno pada pri čemu se oblikuju nabori koji definiraju drapiranje modela. U tom smislu, za računalnu analizu drapiranja digitalnih 3D prototipova modela suknji postavljena je metodologija utvrđivanja krivulja i izračuna koeficijenta drapiranja temeljena na Cusick Drape Meter metodi, Slika 3.



Slika 3: Postavljena metodologija izračuna koeficijenta drapiranja digitalnih prototipova modela suknji temeljena na Cusick Drape Meter metodi

Koeficijent drapiranja digitalnog prototipa modela suknje (KdS), definiran je kao omjer drapirane površine simuliranog modela suknje (A_{T1-Tn}) i maksimalne moguće površine unutar krivulje duljine modela (A_{max}) izražene u mm^2 , Slika 3, te se izračunava pomoću izraza (1):

$$KdS = \frac{A_{T1-Tn}}{A_{max}} [mm^2], \quad (1)$$

Maksimalna površina krivulje na duljini modela suknje (A_{max}) izvedena je iz opsega krivulje, koji je poznat na temelju duljine segmenata ruba suknje i izračunat preko izraza (2):

$$O_{length} = 2560 \text{ mm} \Rightarrow r = \frac{O_{length}}{2\pi} \Rightarrow A_{max} = \frac{O_{length}^2}{4\pi} = 521518.917 \text{ mm}^2, \quad (2)$$

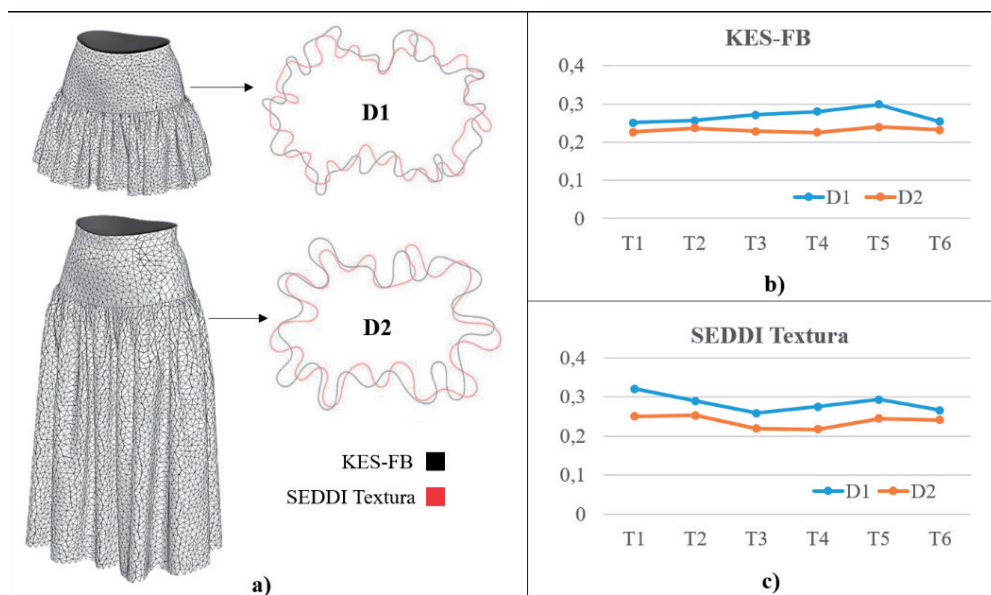
Izvedene su 3D simulacije modela suknji u dvije varijacije duljine s primjenom utvrđenih mehaničkih parametara za šest odabranih tkanina. Digitalni prototipovi modela izvezeni su u standardnom .obj 3D formatu i uvezeni u Rhinoceros v.5 program, u kojem je provedena daljnja obrada modela i mjerenje parametara za izračun koeficijenata drapiranja. Na temelju digitalnih prototipova, nabori na suknjama su projicirani na poprečnu ravninu, te su pomoću ortogonalnih projekcija kreirane krivulje drapiranja. Krivulje drapiranja su zatvorene u površine, te su izmjerene vrijednosti površina potrebne za daljnju analizu i izračun koeficijenata drapiranja.

Na temelju predstavljene metodologije, provedena je komparativna analiza 3D simulacije drapiranja za šest različitih tkanina na temelju mehaničkih parametara svojstva određenih mjernim sustavom KES-FB i digitalizacijom pomoću SEDDI Textura UI aplikacije. Izvedeno je preklapanje digitalnih prototipova, pri čemu su analizirani oblici i vrijednosti površina unutar utvrđenih krivulja drapiranja na duljini simuliranih modela i razlike u vrijednostima izračunatih koeficijenata drapiranja, Tablica 6.

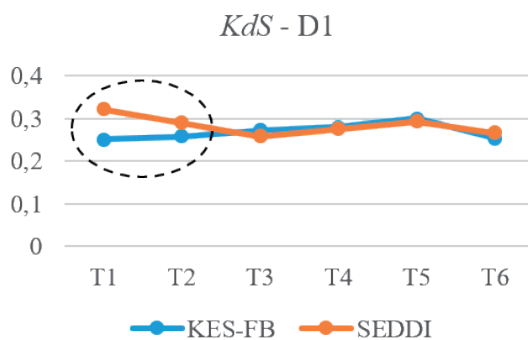
4. Rezultati

Analiza oblika krivulja drapiranja izvedena je preklapanjem modela simuliranih na temelju KES-FB i SEDDI Textura parametara. Na preklapljenim prikazima vidljive su razlike u oblicima krivulja ovisno o duljini, pri čemu su u usporedbi s malim i nepravilnim naborima na duljini D1, pravilniji i dublji nabori oblikovani na modelima veće duljine D2, Slika 4a. To pokazuje učinak ukupnog povećanja mase na drapiranje i formiranje nabora na duljini odjavnog predmeta. S povećanjem duljine, odnosno volana na suknji, povećava se i ukupna masa modela, što dodatno pojačava utjecaj savojnih svojstava na drapiranje i formiranje nabora. Stoga je i očekivano da će se na većoj duljini formirati pravilnije krivulje koja obuhvaćaju manju površinu, što znači da će i koeficijenti drapiranja biti manji u usporedbi s drapiranjem kraćih modela duljine D1, Slika 4b i 4c.

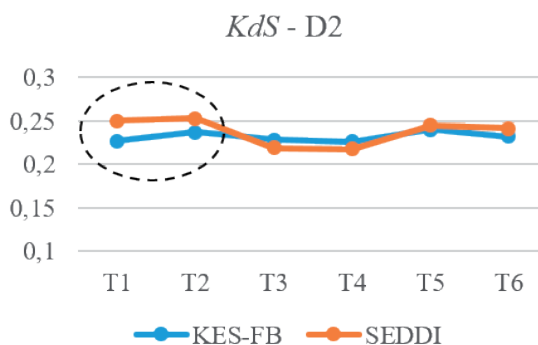
Vrijednosti utvrđenih površina i izračunati koeficijenti drapiranja digitalnih 3D prototipova modela suknji simuliranih na temelju KES-FB i SEDDI Textura parametara, u dvije varijacije duljine, prikazani su u Tablici 6. Na obje duljine suknji, veće razlike utvrđene su kod modela simuliranih na temelju uzoraka tkanina T1 i T2, Slika 5. Ako analiziramo vrijednosti ispitanih svojstava tkanina, Tablice 2 i 3, uočljivo je da uzorci tkanina T1 i T2 imaju značajno manju plošnu masu ($T1 = 83,6 \text{ g/m}^2$, $T2 = 135 \text{ g/m}^2$) u odnosu na ostale tkanine i niže izmjerene vrijednosti parametara savojne i smične krutosti ($G = 0,41 - 0,46 \text{ cN/(cm}^\circ\text{)}^{-1}$, $B = 0,003 - 0,019 \text{ cN/cm}$), što ih čini izuzetno mekanim i deformabilnim tkaninama. Također, ako usporedimo vrijednosti parametara mehaničkih svojstava izmjerene primjenom KES-FB sustava i digitalizacijom pomoću SEDDI Textura UI aplikacije, kod uzoraka tkanina T1 i T2 mogu se uočiti veće razlike u vrijednostima parametara između dvije metode mjerenja, što ima značajan utjecaj na simulaciju i razlike u drapiranju digitalnih prototipova modela suknji.



Slika 4: Komparativna analiza krivulja i koeficijenata drapiranja digitalnih prototipova modela suknji u odnosu na duljinu modela: a) prikaz preklopljenih krivulja drapiranja u varijacijama duljine D1 i D2, b) komparativni dijagram vrijednosti utvrđenih koeficijenata drapiranja modela duljine D1 i D2 s primjenom parametara KES-FB sustava, c) komparativni dijagram vrijednosti utvrđenih koeficijenata drapiranja modela duljine D1 i D2 s primjenom parametara SEDDI Textura aplikacije



a)

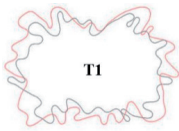
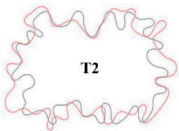
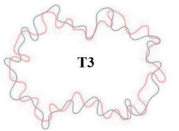
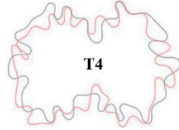
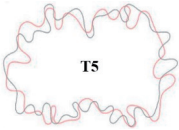
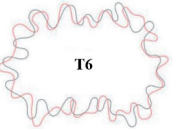
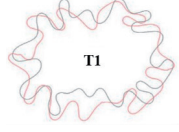
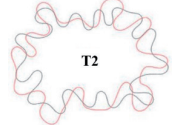
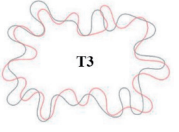
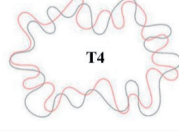
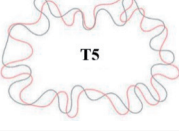
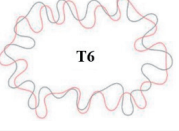


b)

Slika 5: Komparativna analiza vrijednosti utvrđenih koeficijenata drapiranja digitalnih prototipova simuliranih primjenom KES-FB i SEDDI Textura parametara: a) duljina D1, b) duljina D2

S obzirom na različite metodologije utvrđivanja parametara mehaničkih svojstava između dvije primijenjene metode ispitivanja tkanina, razlike u izmjerenim vrijednostima, Tablice 4 i 5, su očekivane. KES-FB sustav se temelji na ispitivanju svojstava kod niskih opterećenja ($F_{max} = 490,35$ N/m), što u F/ε dijagramu vlačnog ponašanja obuhvaća isključivo linearno područje, stoga preračunate vrijednosti kod unosa u CAD program za 3D simulaciju odjeće sustavno predviđaju veće vrijednosti deformacija u odnosu na vrijednosti procijenjene primjenom SEDDI Textura UI aplikacijom. UI tehnologija primjenjuje metode strojnog učenja koja su trenirane na velikim bazama podataka utvrđenih različitim metodama mjerenja, čime obuhvaćaju značajno širi raspon mjerenja u odnosu na linearno područje na kojem se bazira KES-FB sustav.

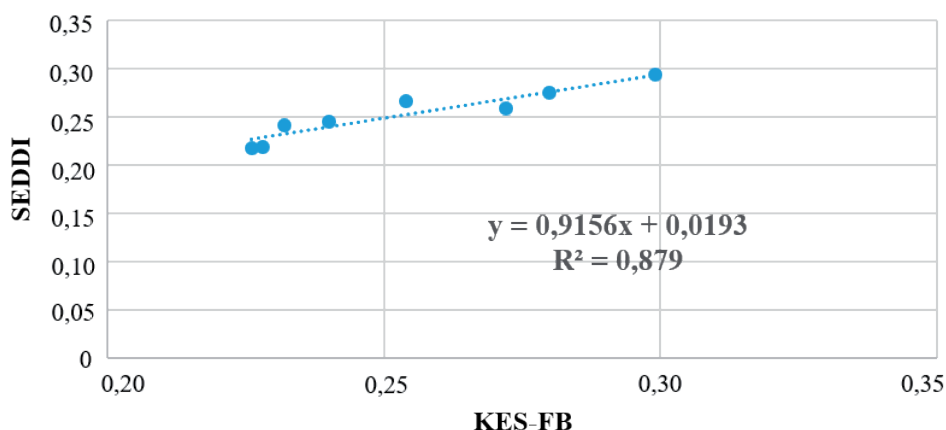
Tablica 6: Analiza oblika krivulja drapiranja, vrijednosti utvrđenih površina i izračunati koeficijenti drapiranja digitalnih 3D prototipova modela suknji simuliranih na temelju parametara šest tkanina ispitanih primjenom sustava KES-FB i SEDDI Textura UI aplikacije, u dvije varijacije duljine modela

Duljina		D1		
Preklopljene krivulje				
A [m ²]	KES-FB ■	0,131	0,134	0,142
	SEDDI ■	0,168	0,151	0,135
KdS	KES-FB ■	0,251	0,257	0,272
	SEDDI ■	0,321	0,290	0,258
Preklopljene krivulje				
A [m ²]	KES-FB ■	0,146	0,156	0,132
	SEDDI ■	0,144	0,153	0,139
KdS	KES-FB ■	0,280	0,299	0,254
	SEDDI ■	0,275	0,293	0,266
Duljina		D2		
Preklopljene krivulje				
A [m ²]	KES-FB ■	0,118	0,124	0,119
	SEDDI ■	0,130	0,132	0,114
KdS	KES-FB ■	0,227	0,237	0,228
	SEDDI ■	0,250	0,253	0,219
Preklopljene krivulje				
A [m ²]	KES-FB ■	0,118	0,125	0,121
	SEDDI ■	0,113	0,128	0,126
KdS	KES-FB ■	0,226	0,240	0,232
	SEDDI ■	0,217	0,245	0,241

* A [m²] - površina unutar krivulje drapiranja izražena u m², KdS - koeficijent drapiranja odjevnog predmeta, KES-FB - vrijednosti utvrđene na temelju modela simuliranih s parametrima Kawabata Evaluation sustava, SEDDI - vrijednosti utvrđene na temelju modela simuliranih s parametrima SEDDI Textura UI aplikacije, T1-T6 - krivulje modela simuliranih na temelju parametara ispitivanih tkanina T1 do T6

Procjene vrijednosti parametara primjenom UI tehnologije proizlaze iz učenja iz velikih skupova podataka, multimodalnog unosa i optimizacije prema ishodima simulacije, što se značajno razlikuje od pojedinačnih mjerenja primjenom standardnih metoda ispitivanja tkanina. Utvrđene razlike u vrijednostima parametara koje su posebno izražene kod tkanina male plošne mase i niskih vrijednosti savojne i smične krutosti, kao što je to slučaj kod tkanina T1 i T2, ukazuju na moguće nedovoljno širok raspon mjerenja deformacija primjenom KES-FB sustava za potrebe 3D simulacije.

Kod ostalih tkanina (T3 do T6), utvrđena je jaka pozitivna korelacija između koeficijenta drapiranja modela suknji simuliranih primjenom KES-FB i SEDDI Textura parametara, na obje duljine modela D1 i D2, Slika 6. S obzirom da vrijednosti plošne mase preostalih uzoraka (178,7 - 286,1 g/m²) pokrivaju širok raspon tkanih tkanina koje se uobičajeno koriste za proizvodnju različitih vrsta odjeće, utvrđeni rezultati predstavljaju značajan doprinos u smislu primjenjivosti UI tehnologije za ispitivanje mehaničkih svojstava potrebnih za 3D simulaciju i razvoj digitalnih prototipova odjeće.



Slika 6: Korelacija koeficijenata drapiranja između digitalnih 3D prototipova suknji simuliranih na temelju KES-FB i SEDDI Textura parametara (uzorci tkanine T3 do T6)

5. Zaključci

Iako je digitalizacija proizvodnih procesa jedan od značajnih pozitivnih elemenata s gledišta održivosti, implementacija i primjena suvremenih računalnih tehnologija i digitalnog prototipiranja u odjevnoj industriji još uvijek je značajno ograničena. Evaluacija digitalnih prototipova odjeće na temelju objektivnih parametara ključna je za napredak prijelaza s tradicionalnih metoda stvaranja fizičkih prototipova na održiviji pristup usmjeren na digitalni razvoj. Ovaj pomak značajno smanjuje negativan utjecaj na okoliš minimiziranjem otpada tkanine, očuvanjem resursa i smanjenjem potrošnje energije tijekom procesa dizajna i razvoja proizvoda. Stoga su studije evaluacije digi-

talnih 3D prototipova odjeće, poput istraživanja predstavljenog u ovom radu, od velike važnosti jer pružaju bolje razumijevanje i predviđanje ponašanja odjeće u odnosu na svojstva ciljane tkanine u procesu digitalnog prototipiranja. Potvrda primjenjivosti UI tehnologije za digitalizaciju uzoraka tekstilnih materijala i njezina upotreba u 3D simulaciji odjeće uvelike olakšava i ubrzava proces određivanja vrijednosti parametara u usporedbi sa standardnim metodama ispitivanja svojstava tekstilnih materijala. To ima značajan pozitivan utjecaj s ekološke perspektive, jer dovodi do znatnih ušteda energije i materijalnih resursa potrebnih za mjernu opremu, kao i sam proces ispitivanja. Pojednostavljenjem radnih procesa i uklanjanjem potrebe za opsežnom pripremom uzoraka, učinkovito se smanjuje tekstilni otpad koji nastaje zbog velikog broja mjerenja koje zahtijevaju standardne metode. Studija naglašava potencijal alata temeljenih na umjetnoj inteligenciji, kao zamjenu za tradicionalne metode vrednovanja svojstava tekstilnih materijala. Eksperimentalno je potvrđena primjenjivost UI tehnologije SEDDI Textura za procjenu mehaničkih svojstava odabranih tkanina na temelju strukturnih i vizualnih podataka, bez potrebe za klasičnim laboratorijskim mjerenjima. Prednost ove metode leži u skalabilnosti, korištenju velikih skupova podataka, multimodalnom pristupu i optimizaciji prema simulacijskim rezultatima. Buduća istraživanja trebaju obuhvatiti širi raspon tekstilnih materijala, odjevnih proizvoda i procesa dorade tekstilnih materijala, kao i analize podudarnosti sa stvarnim ponašanjem odjevnih predmeta.

ZAHVALA

Objava rada proizašla je iz provedbe institucionalnog istraživačkog projekta “Održivi razvoj odjeće dodane vrijednosti: Digitalno prototipiranje, primjena umjetne inteligencije i biomaterijala”, AI3D-BioWear, šifra projekta: TTF-IIP-02, koji financira Europska unija - NextGenerationEU.

6. Literatura

- [1] Sayem, A.S.M.: *Digital Fashion Innovations Advances in Design, Simulation, and Industry*, CRC Press, ISBN 978-1-032-20729-2, Boca Raton USA, (2023)
- [2] Gupta, D.: New directions in the field of anthropometry, sizing and clothing fit, U *Anthropometry, Apparel Sizing and Design*, Elsevier, ISBN 978-0-08-102605-2, Amsterdam The Netherlands, (2020), str. 3-27
- [3] Jevšnik, S.; Stjepanović, Z., Rudolf, A.: 3D Virtual prototyping of garments, approaches, developments and challenges, *Journal of Fibers Bioengineering and Informatics*, **10** (2017) 1, 51-63, <https://doi.org/10.3993/jfbim00253>
- [4] Mahnić Naglič, M.; Petrak, S., Tomljenović, A.: Analysis of Woven Fabric Mechanical Properties in the Context of Sustainable Clothing Development Process, *Polymers*, **17** (2025) 15, 2013, <https://doi.org/10.3390/polym17152013>

- [5] Kim, J.H.; Lee, J.S.: Investigating parameters affecting the real and virtual drapability of silk fabrics for traditional Hanbok, *Fashion and Textiles*, **11** (2024) 21, <https://doi.org/10.1186/s40691-024-00388-6>
- [6] Pandžić, S.; Pejša, T., Matković, K., Benko, H., Čereković, A., Matijašević, M.: *Virtualna okruženja: Interaktivna 3D grafika i njene primjene*, Element, ISBN 978-953-197-606-0, Zagreb Hrvatska, (2011)
- [7] Geršak, J.: *Coplex Fabric Deformations and Clothing Modelling in 3D*, LAP Lambert academic Publishing, ISBN 978-3-659-32809-1, Staarbrucken Germany, (2013)
- [8] Fabric Kit, <https://support.clo3d.com/hc/en-us/articles/360041074334-Fabric-Kit-Manual>, *Pristupljeno*: 2026-02-11
- [9] Browzwear, <https://browzwear.com/products/fabric-analyzer>, *Pristupljeno*: 2026-02-11
- [10] Optitex, <https://optitex.com/products/fabric-management/>, *Pristupljeno*: 2026-02-11
- [11] SEDDI Textura, <https://textura.ai/>, *Pristupljeno*: 2025-11-04
- [12] Wiegand, T.; Wynn, M.: Sustainability, the Circular Economy and Digitalisation in the German Textile and Clothing Industry, *Sustainability*, **15** (2023) 11, 9111, <https://doi.org/10.3390/su15119111>
- [13] Alexander, B.; Rutter, C.: Towards Transformation: Digitalization, Sustainability and Customer Experience, *Fashion Practice*, **14** (2022) 3, 319-328, <https://doi.org/10.1080/17569370.2022.2129468>
- [14] Singh, J.; Bansal, S.: The impact of the fashion industry on the climate and ecology, *World Journal of Advanced Research and Reviews*, **21** (2024) 1, 210-215, <https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.21.1.2610>
- [15] Zekri, H.B.: Globalization and the fast fashion phenomenon: The impact upon labors, environment and the consumer behavior, *MAS Journal of Applied Sciences*, **6** (2021) 3, 651-660, <https://doi.org/10.52520/masjaps.102>
- [16] CLO Sustainability Hub, <https://www.clo3d.com/en/resources/esp>, *Pristupljeno*: 2024-10-15
- [17] Browzwear Success Stories, <https://browzwear.com/success-stories>, *Pristupljeno*: 2024-10-15
- [18] The Interline Sustainability Report 2024, <https://theinterline.com/The-Interline-Sustainability-Report-2024.pdf>, *Pristupljeno*: 2024-10-15
- [19] Akhtar, W.H.; Watanabe, C., Neittaanmäki, P.: A new perspective on the textile and apparel industry in the digital transformation era, *Textiles*, **2** (2022) 4, 633-656, <https://doi.org/10.3390/textiles2040037>
- [20] Casciani, D.; Chkanikova, O., Pal, R.: Exploring the nature of digital transformation in the fashion industry: Opportunities for supply chains, business models, and sustainability oriented innovations, *Sustainability: Science, Practice and Policy*, **18** (2022) 1, 773-795, <https://doi.org/10.1080/15487733.2022.2125640>
- [21] Arribas, V.; Alfaro, J.A.: 3D technology in fashion: From concept to consumer, *Journal of Fashion Marketing and Management*, **22** (2018) 2, 240-251, <https://doi.org/10.1108/JFMM-10-2017-0114>
- [22] Petrak, S.: Digital fashion innovation and sustainability, *Zbornik 14th International Scientific Conference on Manufacturing Engineering, Development and Modernization of Manufacturing RIM 2023*, Hodžić, A. i sur. (ur.), str. 251–266, ISSN 2566-3283, Sarajevo Bosna i Hercegovina, rujan 2023, Univerzitet u Bihaću Tehnički fakultet, Bihać, (2023)

- [23] Choi, C.: 3D dynamic fashion design development using digital technology and its potential in online platforms, *Fashion and Textiles*, **9** (2022) 9, <https://doi.org/10.1186/s40691-021-00286-1>
- [24] Ranjan, R.; Pandey, R., Kumar, V.: Integration of CAD technology for fast and customized production of apparels, *Journal of Education and Psychology*, **57** (2020) 4639–4645, <https://doi.org/10.17762/pae.v57i9.1817>
- [25] Volino, P.; Magnenat-Thalmann, N., Faure, F.: A simple approach to nonlinear tensile stiffness for accurate cloth simulation, *ACM Transactions on Graphics*, **28** (2009) 4, 1-16, <https://doi.org/10.1145/1559755.1559762>
- [26] Miguel, E.; Bradley, D., Thomaszewski, B., Bickel, B., Matusik, W., Otaduy, M.A., Marschner, S.: Data-driven estimation of cloth simulation models, *Computer Graphics Forum*, **31** (2012) 2pt2, 519-528, <https://doi.org/10.1111/j.1467-8659.2012.03031.x>
- [27] Kuijpers, S.; LuibleBär, C., Gong, H.: The Measurement of Fabric Properties for Virtual Simulation - A Critical Review, *IEEE Standards Association, Industry Connections Report*, (2020) 1-43
- [28] Maksimović, N.: Methods to digitizing physical properties of fabric for virtual simulation, *Tekstilna Industrija*, **68** (2020) 3, 36-43, <https://doi.org/10.5937/tekstind2003036M>
- [29] Youn, S.; West, A., Mathur, K.: Evaluation of a new artificial intelligence-based textile digitization using fabric drape, *Textile Research Journal*, **94** (2024) 17-18, 2001-2018, <https://doi.org/10.1177/00405175241236881>
- [30] Tu, Y.F.; Kwan, M.Y., Yick, K.L.: A systematic review of AI-driven prediction of fabric properties and handfeel, *Materials*, **17** (2024) 20, 5009, <https://doi.org/10.3390/ma17205009>
- [31] Yang, S.; Pan, Z., Amert, T., Wang, K., Yu, L., Berg, T., Lin, M.C.: Physics-inspired garment recovery from a single-view image, *ACM Transactions on Graphics*, **37** (2018) 5, 1-14, <https://doi.org/10.1145/3026479>
- [32] Bouman, K.L.; Xiao, B., Battaglia, P., Freeman, W.T.: Estimating the material properties of fabric from video, *Zbornik IEEE International Conference on Computer Vision*, , str. 1984-1991, Sydney Australija, prosinac 2013, IEEE Computer Society, (2013) <https://doi.org/10.1109/ICCV.2013.455>
- [33] Bi, W.; Jin, P., Nienborg, H., Xiao, B.: Estimating mechanical properties of cloth from videos using dense motion trajectories: Human psychophysics and machine learning, *Journal of Vision*, **18** (2018) 5, <https://doi.org/10.1167/18.5.12>
- [34] Zhang, H.; Dana, K., Nishino, K.: Friction from reflectance: Deep reflectance codes for predicting physical surface properties from oneshot in-field reflectance, *Zbornik European Conference on Computer Vision*, str. 808-824, Amsterdam Nizozemska, listopad 2016, Springer, (2016), doi 10.1007/978-3-319-46493-0_49
- [35] Rasheed, A.H.; Romero, V., Bertails-Descoubes, F., Wuhler, S., Franco, J.S., Lazarus, A.: Learning to measure the static friction coefficient in cloth contact, *Zbornik IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Seattle SAD, srpanj 2020, IEEE Computer Society, (2020), <https://doi.org/10.1109/CVPR42600.2020.00993>

- [36] Rodriguez-Pardo, C.; Prieto-Martin, M., Casas, D., Garces, E.: How Will It Drape Like? Capturing Fabric Mechanics from Depth Images, *Computer Graphics Forum*, **2** (2023) 42, <https://doi.org/10.1111/cgf.14750>
- [37] Feng, X.; Huang, W., Xu, W., Wang, H.: Learning-Based Bending Stiffness Parameter Estimation by a Drape Tester, *ACM Transactions on Graphics*, **41** (2022) 6, 221, <https://doi.org/10.1145/3550454.3555464>
- [38] Koptelov, A.; Thompson, A., Hallett, S.R., El Said, B.: A deep learning approach for predicting the architecture of 3D textile fabrics, *Materials & Design*, **239** (2024) 112803, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2024.112803>
- [39] Hsu, M.K.; Chen, W., Huang, B.Y., Shen, L.H., Hsu, C.H., Chang, R.Y., Yu, C.H.: A deep learning empowered smart representative volume element method for long fiber woven composites, *Frontiers in Materials*, **10** (2023) 1179710, <https://doi.org/10.3389/fmats.2023.1179710>
- [40] Hamdi, T.; Ghith, A., Fayala, F.: A fuzzy logic method for predicting the drape behavior, *Zbornik International Conference on Engineering & MIS (ICEMIS)*, str. 1-5, svibanj 2017, Monastir Tunisia, University of Monastir and IEEE, (2017)
- [41] Lee, S.; Han, Y., Yun, C.: Development of a fabric classification system using drapability and tactile characteristics, *Fashion and Textiles*, **11** (2024) 2, <https://doi.org/10.1186/s40691-023-00368-2>
- [42] Vizoo, <https://www.vizoo3d.com/physx-platform/>, *Pristupljeno*: 2026-02-11
- [43] Digital Fabric Physics Interoperability 3DRC Innovation Sub Committee, chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglefndmkaj/https://3drc.pi.tv/wp-content/uploads/2023/11/3DRC-Digital-Fabric-Physics-Interoperability-Findings_1.pdf, *Pristupljeno*: 2026-02-08
- [44] Kim, S.H.; Kim, S., Park, C.K.: Development of similarity evaluation method between virtual and actual clothing, *International Journal of Clothing Science and Technology*, **29** (2017) 5, 743-750, <https://doi.org/10.1108/IJCST-01-2017-0001>
- [45] Petrak, S.; Mahnić Naglič, M., Rogale, D., Geršak, J.: Analysis of Polygonal Computer Model Parameters and Influence on Fabric Drape Simulation, *Materials*, **14** (2021) 21, 6259, <https://doi.org/10.3390/ma14216259>
- [46] Shim, E.; Koo, D.S., An, J.S., Yoon, H.J.: Comparison of the Silhouette of Virtual Clothes by Fabric Characteristics of Nylon Fabric for the Utilization of Virtual Clothes, *ACS Omega*, **7** (2022) 47156-47164, <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c06302>
- [47] HRN EN ISO 7211-2:2024; Tekstil – Metode analiza strukturnih parametara tkanina - 2. dio: Određivanje broja niti na jedinici duljine (ISO 7211-2:2024 ; EN ISO 7211-2:2024)
- [48] HRN ISO 3801:2003; Tekstil – Tkanine - Određivanje mase po jedinici duljine i mase po jedinici površine; (ISO 3801:1977)
- [49] HRN ISO 5084:2003; Tekstil - Određivanje debljine tekstila i tekstilnih proizvoda; (ISO 5084:1996; EN ISO 5084:1996)
- [50] Clo3D Software, <https://www.clo3d.com/en/>, *Pristupljeno*: 2025-05-11
- [51] Cusick, G.E.: 21—The Measurement of Fabric Drape, *Journal of Textile Institute*, **59** (1968) 253–260
- [52] Robson, D.; Long, C.C.: Drape analysis using Imaging Techniques, *Clothing and Textile Research Journal*, **18** (2000) 1, 1-8, <https://doi.org/10.1177/0887302X0001800101>