

Potencijalna energija deformacije pletiva pri jednom ciklusu opterećenje / rasterećenje

Željko Penava^{1*}, Diana Šimić Penava², Tea Jovanović¹

¹Sveučilište u Zagrebu Tekstilno-tehnološki fakultet, Zagreb, Hrvatska

²Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Zagreb, Hrvatska

*Dopisni autor: zeljko.penava@ttf.unizg.hr

Prispjelo: 19. prosinca 2024.

Prihvaćeno: 28. siječnja 2025.

UDK 677.075:677.017.4



Ovaj je rad licenciran pod licencom
[Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Izvorni znanstveni rad**

Cilj ovog rada je analizirati dijagram sila/istezanje pletiva opterećenog u smjeru redova, a zatim u smjeru nizova očica i definirati zajedničku karakterističnu točku pri određenom istezanju do prekida uzorka pletiva. Zatim provesti ispitivanje s jednim ciklusom opterećenje/rasterećenje, te odrediti potencijalnu energiju pletiva za različite finoće pređe. Za provođenje ispitivanja korištena su glatka cjevasta pletiva za fine ženske čarape izrađena poliamidne mikrofilamentne pređe nazivne finoće 20, 33, 40 i 60 tex. Uzorci pletiva izrezani su u smjeru nizova i u smjeru redova. Ispitivanja su provedena na uzorcima pletiva koji su učvršćeni u dvije paralelne stezaljke koje su postavljene u dinamometar. Uzorci pletiva su najprije izloženi aksijalnoj sili koja djeluje u smjeru nizova i u smjeru redova očica do njihovog prekida, a zatim su uzorci pletiva izloženi jednom ciklusu opterećenje/rasterećenje do relativnog istezanja $\varepsilon=200\%$ u smjeru redova i $\varepsilon=200\%$ u smjeru nizova. Dobiveni rezultati korišteni su za računanje potencijalne energije i kako nazivna finoća pređe utječe na vrijednosti potencijalne energije za različite smjerove djelovanja sile.

Ključne riječi: aksijalno opterećenje; potencijalna energija deformacija; pletivo; finoća pređe

Original scientific paper**

Knitted fabrics potential energy of deformation during one load / unload cycle

The aim of this paper is to analyze the force/elongation diagram of a knitted fabrics loaded in the row's direction, and then in the walle direction, and to define a common characteristic point at a certain elongation until the knitted fabric sample breaks. Then carry out a test with one load/unload cycle and determine the potential energy of the knitted fabric for different yarn count. Smooth tubular knitted fabrics for fine women's socks made of polyamide microfilament yarns with a nominal yarn count of 20, 33, 40 and 60 tex were used for the test. Knitted fabric samples are cut in the row direction and in the walle direction. Tests were performed on fabric samples that were fixed in two parallel clamps that were placed in a tensile tester. The knitted fabric samples are first exposed to an axial force acting in the row direction and in the walle direction until they break, and then the knitted fabric samples are exposed to one loading/unloading cycle until the relative elongation $\varepsilon=200\%$ in the row direction and $\varepsilon=200\%$ in the walle direction. The obtained results were used to calculate the potential energy and how the nominal yarn count affects the potential energy values for different directions of force action.

Keywords: axial load; potential energy of deformations; knitted fabric; yarn count

**Izlaganje na 17. znanstveno-stručnom savjetovanju „Tekstilna znanost i gospodarstvo”, 28. siječnja 2025., Zagreb, Hrvatska

1. Uvod

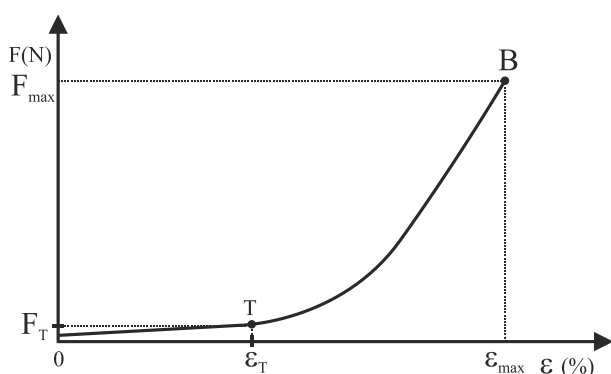
Pletiva su tekstilni plošni proizvodi sastavljeni od redova i nizova očica. Očica je osnovna jedinica pletiva. Očice nastaju tako da se nit dovodi u valoviti oblik tj. kulira se, a zatim isprepliće s drugom niti pri čemu prvo nastaju poluočice, a zatim isprepletanjem slijedećih niti nastaju očice. Jedno od najznačajnijih svojstava pletiva za odjeću je njegova elastičnost kako u smjeru redova tako i nizova. Elastična pletiva nalaze brojne primjene u industriji kompresijskih čarapa, sportske i rekreacijske odjeće, kupaćih kostima, baletne odjeće i dr. Fizikalna i mehanička svojstva pletiva određuju opseg njihovog krajnjeg korištenja u različitim potrebama. Stoga je bitno imati bolje razumijevanje parametara koji utječu na ponašanje tih materijala [1-3]. Pletiva su elastični ortotropni materijali koji se u pogledu strukturnih karakteristika definiraju kao ortotropne ploče s dvije međusobno okomite ravnine elastične simetrije. Njihovi presjeci su glavne osi. Os x je u smjeru redova, a os y je u smjeru nizova pletiva [4,5]. Mjerenje istezanja pletiva kod djelovanja vlačne sile u smjeru nizova i smjeru redova je najrašireniji postupak ispitivanja i analize fizikalnih i mehaničkih svojstava pletiva [6-8]. Uzastopno opterećenje-rasterećenje pletiva, tj. cikličko opterećenje pletiva utječe na veličinu elastičnog područja u kojem dolazi do potpunog iščezavanja trajne deformacije. Ciklička mjerenja služe da bi se analiziralo ponašanje pletiva u primjeni. Ako se pletivo uzastopno opterećuje i rasterećuje, dijagram sila-istezanje imat će oblik petlje [9, 10]. Ova pojava zaostajanja deformacija prema naprezanju naziva se elastična histereza. Površina petlje histereze predstavlja energiju potrošenu na trajne deformacije pri jednom ciklusu opterećenja. Pri ponavljanju ciklusa površina petlje polako se povećava sve dok ne nastane prekid.

Cilj ovog rada je odrediti potencijalnu energiju pletiva za različite finoće pređe pri jednom ciklusu opterećenje/rasterećenje. U tu svrhu provedena su ispitivanja uzoraka pletiva različitih finoća opterećenih u smjeru redova, a zatim u smjeru nizova očica na istezanje. Analiziran je dijagram sila/istezanje pletiva i definirana je zajednička karakteristična točka pri određenom istezanju do prekida uzorka pletiva.

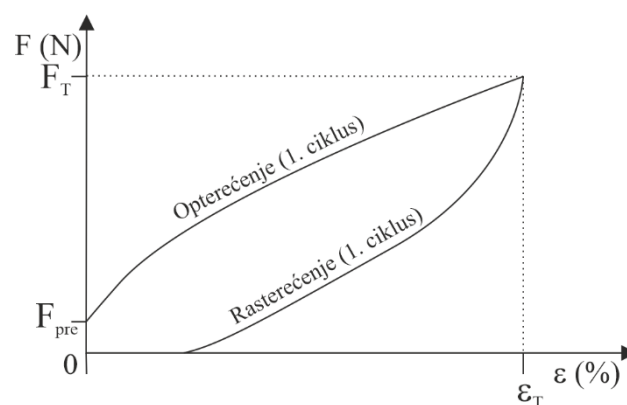
2. Potencijalna energija deformacija pletiva

Pri djelovanju vlačne sile F , dolazi do pojave normalnih naprezanja u pletivu i njegovog produljenja. Na sl.1a prikazana je krivulja odnosa vlačne sile i relativnog produljenja pletiva [11,12]. Točka T predstavlja proizvoljno odabranu zajedničku karakterističnu točku pri određenom istezanju pletiva.

Kako bi se uočilo ponašanje pletiva u uporabi i analizirao fenomen histereze i utrošena energija pletiva, potrebno je pletivo ciklički opteretiti [13]. Uzorak pletiva učvršćuje se u dinamometar koji se sastoji od dvije stezaljke. Gornja stezaljka je fiksna tj. na njoj je nalazi mjerna sonda za silu. Donja stezaljka se automatski pomiče prema dolje i prema gore pomoću motora. Na taj način ostvaruje se gibanje za određeni broj ciklusa uzrokujući naprezanja u pletivu. Najprije, kod dinamičkog ispitivanja donja stezaljka dinamometra pomiče se dok ne postigne produljenje kod unaprijed zadane prednapetosti [14]. Zatim se uzorak jedanputa optereti/rastereti između dvije definirane točke produljenja ($0-\epsilon_T$), sl.1b. Pri ovakvoj deformaciji elementa pletiva promjene temperature i kinetičke energije elementa pletiva su neznatne pa se mogu zanemariti, tako da se ukupan rad W potpuno pretvara u potencijalnu energiju deformacija U (sposobnost proizvodnje mehaničkog rada). Tako se potencijalna energija deformacija akumulira u uzorku pletiva.



a.



b.

Sl.1 a) dijagram ovisnosti između sile F i relativnog produljenja pletiva ϵ , b) cikličko opterećenje- krivulja opterećenje-rasterećenje

3. Eksperimentalni dio

Provedeno je ispitivanje rastezanja do prekida uzorka glatkog cjevastog pletiva pri statičkom opterećenju. Pri tom ispitivanju određene su veličine vlačnih sila i pripadna istežanja do prekida. U tu svrhu primijenjene su klasične metode i instrumenti za ispitivanje vlačnih svojstava pletiva [15-17]. Također su provedena dinamička ispitivanja uzoraka pletiva, cikličko opterećenje i rasterećenje pletiva. Dobiveni su dijagrami opterećenje-produljenje za cikličko ispitivanje pletiva.

Ispitivanje je provedeno mjerenjem produljenja pletiva kod statičkog i dinamičkog opterećenja u smjeru redova i u smjeru nizova pletiva kako bi se odredio utjecaj nazivne finoće pređe na vrijednosti potencijalne energije za različite smjerove djelovanja sile pri jednom ciklusu dinamičkog djelovanja opterećenja.

Za izradu glatkih cjevastih pletiva korištena je poliamidna mikrofilamentna pređa finoće 20, 33, 40 i 60 tex. Svojstva navedenih pletiva prikazana su u tab.1.

Mjerna metoda i postupak ispitivanja debljine pletiva definirana je normom HRN EN ISO 5084:2003 *Tekstil - Određivanje debljine tekstila i tekstilnih proizvoda*. Za određivanje broja nizova i redova očica na jedinicu duljine korištena je norma DIN EN 14971:2006 *Textiles - Knitted fabrics - Determination of number of stitches per unit length and unit area*. Norme za određivanje parametara pletiva su: ASTM D8007-15(2019) *Standard Test Method for Wale and Course Count of Weft Knitted Fabrics* za određivanje broja očica u smjeru niza i reda po jedinici duljine te HRN ISO 3801:2003 *Tekstil - Tkanine - Određivanje mase po jedinici duljine i mase po jedinici površine* za određivanje plošne mase. Prije samog ispitivanja svi uzorci su kondicionirani u uvjetima standardne atmosfere (relativna vlažnost zraka $65 \pm 2\%$, na temperaturi $20 \pm 2^\circ\text{C}$).

Uzorci dimenzija 200 x 50 mm su uklješteni u stezaljke uređaja na razmaku od 100 mm. Za svaki uzorak pletiva provedeno je pet mjerenja. Vlačna svojstva svih uzoraka pletiva ispitivana su prema HRN EN ISO 13934-1:2013 *Tekstil - Vlačna svojstva plošnog tekstila - 1. dio: Određivanje maksimalne sile i istežanja pri maksimalnoj sili metodom trake* na Tensile tester Statimat M (Textechno). Nakon što su za sve uzorke pletiva odredila odabrana točka T ($\epsilon_T=200\%$) pristupilo se cikličkom opterećenju uzorka pletiva na razvlačenje do unaprijed određene točke T. Dinamička ispitivanja uzoraka pletiva provedena su prema DIN 53835-2:2024-05 *Testing of textiles - Testing of the tenso-elastic behaviour - Part 2: Single and plied elastomeric yarns, repeated application of tensile load between constant extension limits* za određivanje elastičnih svojstava jednostrukih i konačnih elastomernih pređa metodom ponavljanja ciklusa opterećenja i rasterećenja između dvije određene vrijednosti produljenja.

4. Rezultati s raspravom

Dijagrami srednjih vrijednosti rezultata ispitivanja djelovanja vlačne sile F i pripadnog relativnog produljenja ϵ na uzorcima pletiva kada sila djeluje u smjeru redova i u smjeru nizova prikazani su na sl.2 i sl.3. Vrijednosti prekidnih sila i pripadnih istežanja pri prekidu, te potencijalna energija pri prekidu kod statičkog ispitivanja dani su u tab.2.

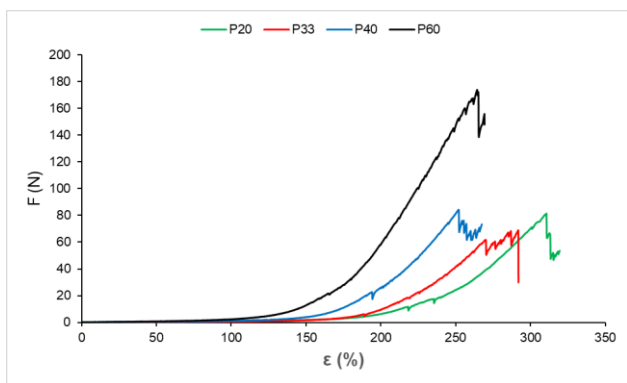
S porastom broja finoće pređe, uzorak pletiva postaje sve grublji i potrebna je veća vrijednost vlačne sile pri statičkom opterećenju da dođe do prekida uzorka i u smjeru redova i u smjeru nizova očica. Najveću vrijednost prekidne sile, prekidnog istežanja i rada pri prekidu ima pletivo smjeru redova i u smjeru nizova s najvećim brojem finoće pređe.

Tab.1 Strukturna svojstva pletiva

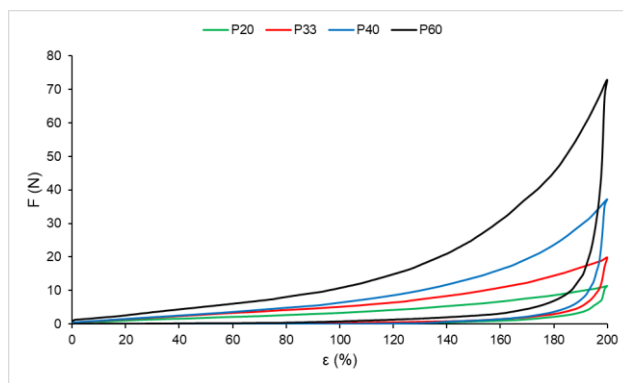
Oznaka	Sirovinski sastav	D_h (broj očica u redu pletiva (cm^{-1}))	D_v (broj očica u nizu pletiva (cm^{-1}))	Finoća pređe (tex)	Površinska masa (g/m^2)	Debljina (mm)
P20	Poliamid	17,0	37,6	20	37	0,31
P33	Poliamid	18,0	32,0	33	51	0,34
P40	Poliamid	16,7	31,2	40	54	0,35
P60	Poliamid	17,2	34,2	60	92	0,43

Tab.2 Srednje vrijednosti prekidne sile, prekidnog istežanja i potencijalne energije pri prekidu kod statičkog opterećenja

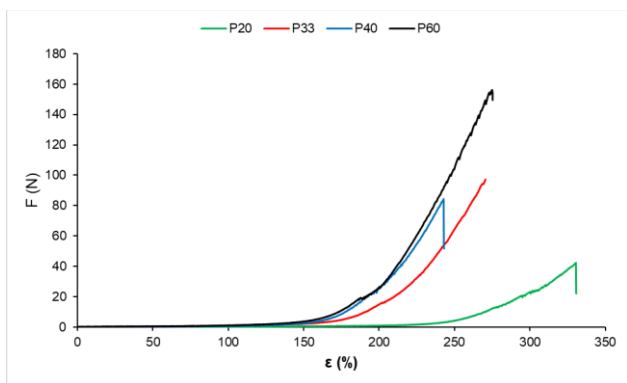
	Nizovi				Redovi			
	P20	P33	P40	P60	P20	P33	P40	P60
Produljenje (%)	330,2	270,4	240,8	275,1	310,6	291,2	251,4	265,1
Prekidna sila (N)	41,5	96,9	87,1	154,7	81,4	69,2	83,3	172,2
Rad pri prekidu (N·cm)	97,6	272,2	156,2	646,9	319,2	314,7	328,4	867,9



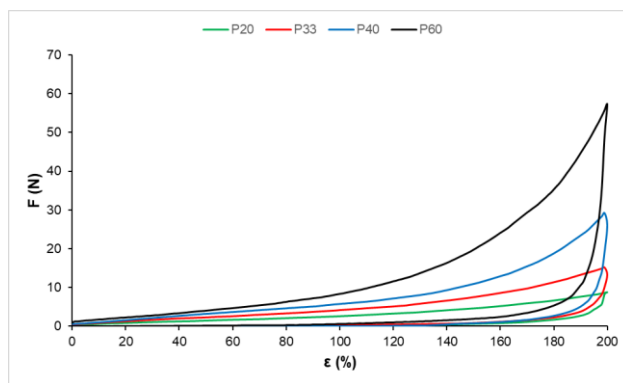
SI.2 Dijagram prekida sila-relativno produljenje ($F - \epsilon$) u smjeru redova



SI.4 Dijagrami rezultata cikličkog opterećenja i rasterećenja pletiva do točke T u smjeru redova



SI.3 Dijagram prekida sila-relativno produljenje ($F - \epsilon$) u smjeru nizova

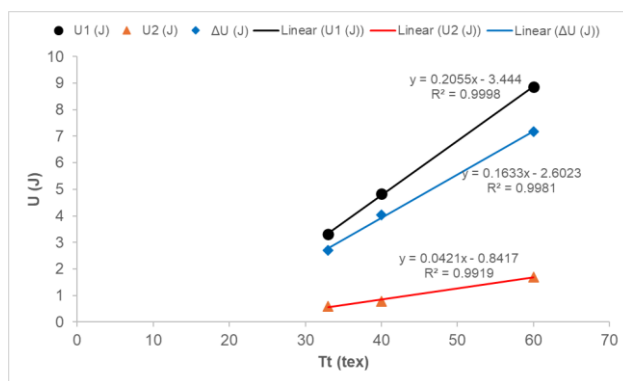


SI.5 Dijagrami rezultata cikličkog opterećenja i rasterećenja pletiva do točke T u smjeru nizova

Svi uzorci su opterećivani vlačnom silom do odabrane vrijednosti relativnog produljenja $\epsilon_T=200\%$ (točka T). Nakon opterećivanja do željenog produljenja, uzorci su rasterećeni. Dijagrami rezultata cikličkog opterećenja i rasterećenja pletiva do točke T za sve ispitane uzorke pletiva prikazani su na sl.4 i sl.5.

Potencijalna energija U_1 jednaka je radu W_1 koji je potrebno utrošiti da dođe do produljenja pletiva za određeno produljenje ϵ , potencijalna energija U_2 jednaka je radu W_2 koji je utrošen za rasterećenje uzorka pletiva, $\Delta U = \Delta W$ je utrošena energija na trajne deformacije pri jednom ciklusu opterećenja i rasterećenja uzorka pletiva. Vrijednosti su prikazane u tab.3. Za uzorke pletiva s većim brojem finoće pređe (i za smjer redova i za smjer nizova očica) potrebno je utrošiti više energije pri jednom dinamičkom ciklusu opterećenja/rasterećenja do unaprijed zadane vrijednosti produljenja.

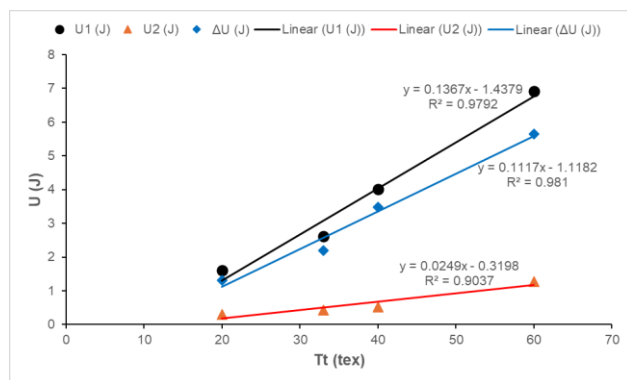
Na sl.6 prikazan je odnos vrijednosti potencijalne energije u smjeru redova očica, a na sl.7 u smjeru nizova očica u odnosu na finoću pređe. Taj odnos je linearan i u smjeru nizova i u smjeru redova očica.



SI.6 Vrijednosti potencijalne energije u smjeru redova očica u odnosu na finoću pređe pletiva

Tab.3 Vrijednosti kod $\epsilon = 200\%$: uzdužna sila F , U_1 , U_2 , ΔU

Tt (tex)	Red			Niz		
	U_1 (J)	U_2 (J)	ΔU (J)	U_1 (J)	U_2 (J)	ΔU (J)
20	2,064	0,388	1,676	1,613	0,305	1,308
33	3,299	0,592	2,707	2,618	0,430	2,188
40	4,825	0,784	4,041	4,004	0,523	3,481
60	8,871	1,701	7,170	6,921	1,277	5,644



Sl.7 Vrijednosti potencijalne energije u smjeru nizova očica u odnosu na finoću pređe pletiva

S porastom finoće pređe pletiva linearno raste vrijednost utrošene potencijalne energije pri opterećenju uzorka i pri rasterećenju uzorka. Također porastom finoće pređe pletiva linearno raste i površina petlje histereze (ΔU) koja predstavlja zaostalu energiju u jednom ciklusu cikličkog opterećenja/rasterećenja uzorka. Za smjer redova koeficijent korelacije za ΔU je $R^2=0.9778$, a za smjer nizova $R^2=0.981$ što pokazuje vrlo visoku povezanost između finoće pređe i utrošene potencijalne energije.

5. Zaključak

Kod statičkog ispitivanja pletiva, porast broja finoće pređe u pletivu uzrokuje porast vrijednosti prekidne sile uzorka kada vlačna sila djeluje u smjeru redova očica i u smjeru nizova očica. Pri rasterećenju prethodno opterećenog uzorka pletiva na rastezanje, dio dijagrama koji odgovara rasterećenju ne mora biti pravocrtan, a također ni dio dijagrama koji odgovara ponovnu opterećenju.

Pri rastezanju uzorka pletiva, kada sila djeluje u smjeru redova i u smjeru nizova očica, rad, odnosno potencijalna energija koju je potrebno utrošiti na rastezanje uzorka je najmanja za uzorke s najmanjim brojem finoće pređe, a najveća je za uzorke pletiva s najvećim brojem finoće pređe. Potencijalna energija utrošena na rasterećenje uzoraka pletiva također je najmanja za uzorke s najmanjim brojem finoće pređe. S porastom sile koja djeluje na uzorak potrebno je utrošiti veći rad za rastezanje uzorka i za rasterećenje. Krivulje opterećenja i rasterećenja su međusobno udaljenije, tj. povećava se utrošena energija ΔU na trajne deformacije pri jednom ciklusu. ΔU je veća kada sila djeluje u smjeru redova očica, nego u smjeru nizova očica. Kada sila djeluje u smjeru nizova i u smjeru redova očica najveći ΔU ima uzorak pletiva s najvećim brojem finoće pređe.

Rezultati cikličkih ispitivanja pokazali su da broj finoće pređe pletiva znatno utječe na veličinu vrijednosti utrošene potencijalne energije i površinu histereze.

Literatura:

- [1] Leaf, V.; Glaskin A. 43—the Geometry of a Plain Knitted Loop. *Journal of the Textile Institute transactions* **1955**, 46(9), T587–T605. <https://doi.org/10.1080/19447027.1955.10750345>
- [2] Jovanović, T.; Penava, Ž.; Vrljićak, Z. Impact of the Elastane Percentage on the Elastic Properties of Knitted Fabrics under Cyclic Loading. *Materials* **2022**, 15(19), 6512. <https://doi.org/10.3390/ma15196512>
- [3] Lozo, M.; Penava, Ž.; Lovrićević, I.; Vrljićak, Z. The Structure and Compression of Medical Compression Stockings. *Materials* **2022**, 15 (1), 353. <https://doi.org/10.3390/ma15010353>
- [4] Peirce, F. T. 5—The Geometry of Cloth Structure. *Journal of the Textile Institute Transactions* **1937**, 28(3), T45–T96. <https://doi.org/10.1080/19447023708658809>
- [5] Su, C.-I.; Yang, H.-Y. Structure and Elasticity of Fine Elastomeric Yarns. *Textile Research Journal* **2004**, 74(12), 1041–1044. <https://doi.org/10.1177/004051750407401202>
- [6] Bassett, R. J.; Postle, R.; Pan, N. Experimental Methods for Measuring Fabric Mechanical Properties: A Review and Analysis. *Textile Research Journal* **1999**, 69(11), 866–875. <https://doi.org/10.1177/004051759906901111>
- [7] Senthilkumar, M.; Anbumani, N.; Hayavadana, J. Elastane fabrics—A tool for stretch applications in sports. *Indian J. Fibre Text. Res.* **2011**, 36, 300–307.
- [8] Ramakrishna, S. Characterization and Modeling of the Tensile Properties of Plain Weft-Knit Fabric-Reinforced Composites. *Composites Science and Technology* **1997**, 57(1), 1–22. [https://doi.org/10.1016/s0266-3538\(96\)00098-x](https://doi.org/10.1016/s0266-3538(96)00098-x)
- [9] Chowdhary, U. Stretch and Recovery of Jersey and Interlock Knits. *International Journal of Textile Science & Engineering* **2018**, 1, 1–8.
- [10] Mani, S.; Anbumani, N. Dynamic Elastic Behavior of Cotton and Cotton / Spandex Knitted Fabrics. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics* **2014**, 9(1), 155892501400900. <https://doi.org/10.1177/155892501400900111>
- [11] Kawabata, S. Nonlinear mechanics of woven and knitted materials. In *Textile Structural Composites* (Chou, T. W. and Ko, F. K., eds). Elsevier, 1989.

- [12] Kelay, M. S.; Bader, D. L.; Reed, P. E. Mechanical Deformation Mechanisms in Knitted Fabric Composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials* **1997**, 10 (1), 76–84.
<https://doi.org/10.1177/089270579701000107>
- [13] Messiry, M.E.; Mohamed, A. Analysis of the effect of cyclic loading on cotton-spandex knitted fabric. In *Proceedings of the 5th International Conference on Advances in Mechanical, Aeronautical and Production Techniques*, Kuala Lumpur, Malaysia, 12–13 March 2016; pp. 1–6.
- [14] Zhangyu, F. Z., Yanmo, C. and Hairu, L. Effects of pre-stretching on the tensile properties of knitted glass fiber fabric reinforced polypropylene composite. *Journal of Thermoplastic Composite Materials* **2006**, 19, 399–411.
- [15] Kawabata, S.; Niwa, M.; Nanashima, Y.; Kawai, H. The Theoretical Investigation on the Biaxial Tensile Properties of Plain Knitted Fabrics. *Sen'i Kikai Gakkai ronbunshū/Sen'i Kikai Gakkai ronbunshu* **1970**, 23(10), T223–T237.
<https://doi.org/10.4188/transjtmsj1965b.23.t223>
- [16] Gommers, B.; Verpoest, I.; Van Houtte, P. Modelling the Elastic Properties of Knitted-Fabric-Reinforced Composites. *Composites Science and Technology* **1996**, 56 (6), 685–694.
[https://doi.org/10.1016/0266-3538\(96\)00053-x](https://doi.org/10.1016/0266-3538(96)00053-x).
- [17] Penava, Ž.; Šimić Penava, D.; Miloš, L. Experimental and Analytical Analyses of the Knitted Fabric Off-Axes Tensile Test. *Textile Research Journal* **2020**, 91(1-2), 62–72.
<https://doi.org/10.1177/0040517520933701>