

Utjecaj motanja na vlačnu čvrstoću tetiva

Kopčić, Iva

Master's thesis / Diplomski rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:555781>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-13**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Iva Kopčić

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Zdravko Schauerl, dipl. ing.

Student:

Iva Kopčić

Zagreb, 2019.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Iva Kopčić**

Mat. br.: 0035192922

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj motanja na vlačnu čvrstoću tetiva**

Naslov rada na engleskom jeziku: **The influence of coiling on tensile strength of the tendons**

Opis zadatka:

Ruptura prednjeg križnog ligamenta predstavlja jednu od najčešćih povreda koljenog zgloba kod sportaša profesionalaca, ali i kod rekreativaca. Jedan od operativnih postupaka saniranja te ozljede uključuje uzimanje dijela tetive jednog od mišića stražnje lože natkoljenice ozlijeđene osobe te njegovo implantiranje na mjesto puknutog križnog ligamenta. Kako bi se dobila potrebna čvrstoća zamjenska tetiva se presavija dva, tri ili četiri puta te učvršćuje na mjesto puknutog ligamenta.

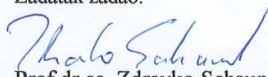
U radu je potrebno dati pregled postupaka operativnog liječenja puknutih prednjih križnih ligamenata s naglaskom na korištenje tetiva mišića ozlijeđene osobe. U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je analizirati utjecaj motanja na vlačnu čvrstoću tetiva. Koristeći suvremenu laboratorijsku opremu, kidalice i optičke mjerne sustave za 3D analizu deformacija, potrebno je ustanoviti jel postoji razlika u vlačnoj čvrstoći tetiva koje su presavinute u odnosu na tetive koje su presavinute i motane pod definiranim kutom.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

2. svibnja 2019.

Zadatak zadao:


Prof.dr.sc. Zdravko Schauerl

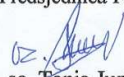
Datum predaje rada:

4. srpnja 2019.

Predviđeni datum obrane:

10., 11. i 12. srpnja 2019.

Predsjednica Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svom mentoru prof. dr. sc. Zdravku Schauperlu što mi je omogućio pisanje ove teme te mi osigurao stručan tim za pomoć. Zahvaljujem se tvrtki Topomatika d.o.o. na ustupljenoj kidalici, dr. sc. Nenadu Drvaru i Ivi Baržić na pomoći pri osmišljanju i provođenju eksperimenta. Zahvaljujem se i ortopedima dr. Josipu Vlaiću, dr. Mariju Josipoviću, dr. Juri Serdari te dr. sc. Ani Pilipović na stručnoj pomoći pri pripremanju i provođenju eksperimenta.

Iva Kopčić

Sadržaj

Popis slika	6
Popis tablica	7
Popis oznaka	8
SAŽETAK	10
SUMMARY	11
1. UVOD	12
2. MEHANIČKA SVOJSTVA SPIRALNE UŽADI	14
2.1. Propagacija pukotine u spiralnom užetu	17
2.2. KUT USPONA α	18
3. METODA KORELACIJE DIGITALNE SLIKE	19
3.1. OPTIČKI SUSTAV ARAMIS	20
3.1.1. Priprema mjernog objekta	21
3.1.2. Nanošenje stohastičkog uzorka na površinu mjernog objekta	22
3.1.3. Podešavanje i kalibracija sustava	23
3.1.4. Snimanje uzoraka	25
3.1.5. Pohrana i obrada digitalnih slika	26
4. Eksperimentalni dio	28
4.1. Ispitivanje užadi	28
4.2. Ispitivanje ovčjih tetiva	33
4.3. Ispitivanje ovčjih tetiva ARAMIS-om	36
4.4. Ispitivanje ljudskih tetiva	37
5. REZULTATI EKSPERIMENTALNOG ISPITIVANJA	40
5.1. Ispitivanje užadi	40
5.2. Ispitivanje ovčjih tetiva	44
5.3. Ispitivanje ljudskih tetiva	48
5.4. Ispitivanje užadi sustavom ARAMIS	51
.....	51
5.5. Ispitivanje ovčjih tetiva sustavom ARAMIS	52
6. RASPRAVA	54
7. ZAKLJUČAK	56
LITERATURA	57

Popis slika

Slika 1.	Dimenzije vlaknaste užadi [4].....	14
Slika 2.	Osnovni oblik spiralnog užeta [4].....	16
Slika 3.	Sustav za digitalnu korelaciju slike [6].....	19
Slika 4.	Primjer stohastičkog rastera i crveno označena pravokutna faseta u referentnoj konfiguraciji a) i deformiranoj konfiguraciji b) [6].....	20
Slika 5.	Optički mjerni sustav Aramis [6].....	21
Slika 6.	Primjeri stohastičkih uzoraka za različite mjerne volumene.....	23
Slika 7.	Primjer lošeg nanošenja stohastičkog premaza a) previse crne boje, b) previse bijele boje [8].....	23
Slika 8.	Kalibracijski objekti: a) kalibracijska ploča, b) kalibracijski križ [9].....	24
Slika 9.	Dijelovi sustava Aramis [10].....	25
Slika 10.	Pikselirani uzorak stohastičkog premaza s preklapanjem faseta u crvenoj boji [8].....	27
Slika 11.	Uže za statičko vlačno ispitivanje.....	28
Slika 12.	Stohastički premaz za ispitivanje užeta Aramis sustavom.....	29
Slika 13.	Ispitivanje užeta Aramisom.....	29
Slika 14.	Uže za statičko vlačno ispitivanje.....	30
Slika 16.	Ispitivanje 4 ravne i 4 uvijene niti užeta.....	32
Slika 15.	Ispitivanje 3 ravne i 3 uvijene niti užeta.....	32
Slika 17.	Uzorci ovčjih tetiva prije pripreme za ispitivanje na kidalici.....	33
Slika 18.	Šav na ovčjoj tetivi.....	34
Slika 19.	Fiksacija uvijene tetive.....	35
Slika 20.	Uvijena ovčja tetiva.....	35
Slika 21.	Tetiva nejednolikog presjeka.....	36
Slika 22.	Puknuta ovčja tetiva.....	36
Slika 23.	Ispitivanje ovčjih tetiva ARAMIS-om.....	37
Slika 24.	Statičko vlačno ispitivanje ravne tetive.....	38
Slika 25.	Ljudska tetiva tipa Gracilis.....	38
Slika 26.	Sušenje tetive prije ispitivanja.....	38
Slika 27.	Fiksacija uvijene tetive - gornje uže.....	39
Slika 28.	Fiksacija uvijene tetive - donje uže.....	39
Slika 29.	Grafički prikaz rezultata 1. uzorka užadi - 3 niti.....	41
Slika 30.	Grafički prikaz rezultata 5. uzorka užadi - 4 niti.....	43
Slika 31.	Grafički prikaz rezultata ispitivanja ovčjih tetiva - 4. par.....	46
Slika 32.	Grafički prikaz rezultata ispitivanja ovčjih tetiva - 8. par.....	46
Slika 33.	Grafički prikaz rezultata ispitivanja ovčjih tetiva - 18. par.....	47
Slika 34.	Grafički prikaz rezultata ljudskih tetiva - 1. par.....	49
Slika 35.	Grafički prikaz rezultata ljudskih tetiva - 2. par.....	49
Slika 36.	Grafički prikaz rezultata ljudskih tetiva - 3. par.....	50
Slika 37.	Grafički prikaz rezultata ljudskih tetiva - 4. par.....	50
Slika 38.	Ispitivanje štrika ARAMIS-om - početno stanje.....	51
Slika 39.	Ispitivanje štrika ARAMIS-om - završno stanje.....	52
Slika 41.	Preklapanje referentnih točaka.....	53
Slika 40.	Ispitivanje ovčjih tetiva ARAMIS-om - početno stanje.....	53
Slika 42.	Pucanje ovčje tetive.....	53

Popis tablica

Tablica 1 Minimalna prekidna sila (FL) i dozvoljeno opterećenje (F) vlaknaste užadi [4]	15
Tablica 2 Iznosi maksimalne sile dobivene ispitivanjem 3 niti užeta	40
Tablica 3 Postotak povećanja maksimalne sile kod uvijenih uzoraka s 3 niti.....	42
Tablica 4 Iznosi maksimalne sile dobivene ispitivanjem 3 niti užeta	42
Tablica 5 Postotak povećanja maksimalne sile kod uvijenih uzoraka s 4 niti.....	44
Tablica 6 Iznosi maksimalne sile dobivene ispitivanjem ovčjih tetiva	45
Tablica 7 Iznosi maksimalnih sila kod ispitivanje ljudskih tetiva.....	48

Popis oznaka

Oznaka	Jedinica	Opis
<i>LCA</i>	-	anterior cruciatum ligament
<i>PCL</i>	-	posterior cruciate ligament
<i>S</i>	-	faktor sigurnosti
<i>d</i>	mm	promjer
<i>F</i>	N	sila
<i>R_m</i>	MPa	vlačna čvrstoća
<i>F_L</i>	N	minimalna prekidna sila
<i>h</i>	mm	hod zavojnice
<i>F_n</i>	N	uzdužna sila u vlaknu
<i>F₂</i>	N	sila uzduž opterećenja užeta
<i>F₁</i>	N	sila okomita na smjer opterećenja
<i>κ</i>	-	zakrivljenost
<i>τ</i>	-	torzija
<i>α</i>	°	kut uspona
<i>R</i>	mm	polumjer
<i>DIC</i>	-	digital image correlation
<i>u</i>	-	standardno odstupanje

\bar{u}	-	prosjek
<i>GR</i>	-	gracilis
<i>ST</i>	-	semitendinosus

SAŽETAK

Ozljeda koljena jedna je od najčešćih povreda kod profesionalnih sportaša, ali i kod rekreativaca. Jedna od ozbiljnih ozljeda koje dosta često zahtijevaju operativni zahvat je ruptura prednjeg križnog ligamenta. Operativni postupak može se izvesti na više načina, a jedan od njih je korištenjem tetive jednog od mišića stražnje lože natkoljenice ozlijeđene osobe te njeno implantiranje na mjesto nativnog križnog ligamenta. Kako bi se dobila potrebna duljina i čvrstoća, zamjenska tetiva (tzv. presadak) presavija se jednom, dvaput ili četiri puta te učvršćuje na mjesto puknutog ligamenta.

U ovom radu napravljen je pregled postupaka operativnog liječenja puknutih prednjih križnih ligamenata s naglaskom na korištenje presadka tetiva mišića ozlijeđene osobe. U teorijskom dijelu prikazano je zašto je odabrano motanje kao sistem ojačavanja presadka. U eksperimentalnom dijelu analiziran je utjecaj motanja na vlačnu čvrstoću tetiva. Provedena su preliminarna ispitivanja na užadi i životinjskim tetivama korištenjem suvremene laboratorijske opreme, kidalica i optičkih mjernih sustava za 3D analizu deformacija. Ustanovljeno je postoji li razlika u vlačnoj čvrstoći tetiva koje su presavinite u odnosu na tetive koje su presavinite i motane pod definiranim kutom.

Ključne riječi: ligament, tetiva, presadak, vlačna čvrstoća, Aramis

SUMMARY

Knee injury is one of the most common injuries to the professional athletes, but also in recreational sport. One of the serious injuries that frequently requires surgery is the rupture of the santerior cruciate ligament. The operative procedure can be performed in several ways, one of which is taking one tendon of the hamstring of the injured person and implanting it to the site of the ruptured cruciate ligament. To obtain the required length and strength, the replacement tendon (called autograft) is folded once, twice or four times and fastened to the place of the broken ligament.

This paper presents an overview of the procedures for operative treatment of ruptured anterior cruciate ligament with an emphasis on the use of the muscle tendon of the injured person. The theoretical part shows why twisting was selected as a grafting system. In the experimental part, the influence of motility on the tensile strength of the tendon was analyzed. Preliminary tests on rope and animal tendons were conducted using modern laboratory equipment, testing machines and optical measurement systems for 3D deformation analysis. It is established whether there is a difference in the tensile strength of the tendons that are folded in relation to the tendons that are folded and twisted at a defined angle.

Key words: ligament, tendon, autograft, tensile strength, Aramis

1. UVOD

Koljeno je najveći i najsloženiji zglob u ljudskom tijelu. Zbog mnogobrojnih sila koje se javljaju u različitim smjerovima, koljeno je osigurano velikim brojem tetiva i ligamenata. Nema tipična zglobna tijela, a podržano je sistemom sveza, koje uz meniske i miškulaturu omogućuju odraz i zaustavljanje, akceleraciju i deceleraciju. Prednji križni ligament (*LCA*, lat. *Ligament cruciatum anterior*) smatra se glavnim stabilizatorom koljena. Sastavljen je od gustih nasumičnih snopova kolagenih vlakana koji su utkani u rahlo vezivno tkivo [1]. Nasumična posloženost vlakana daje ligamentu veću vlačnu čvrstoću nego što je ona u mnogim drugim ligamentima. Dva glavna tipa vlakana koja sadrži *LCA* su ona s neuniformnim (koja se opiru vlačnim silama) i uniformnim promjerom (koja se opiru silama smicanja) [1].

Ruptura prednjeg križnog ligamenta česta je ozljeda kod mladih aktivnih ljudi, a pogotovo kod profesionalnih sportaša. Ženske sportašice imaju veći rizik od ozljede *LCA*-a, čak 2,1 do 3,1 puta [1], zbog jačih kvadricepsa koji zatežu ligamente, mekših ligamenata i drugačijeg poravnanja nogu. Ozljeda uglavnom nastaje kod doskoka ili kod nagle promjene smjera - kad stopalo ostane ukopano, a potkoljenica se zarotira. Doskok ne bi smio biti na puno stopalo u potpuno uspravnom stavu s koljenima u punoj ekstenziji već u blagoj fleksiji. Posljedica rupture *LCA* je nestabilnost koljena, a za potrebu stabilizacije koljena, radi se rekonstrukcija ligamenta pomoću slobodnog presađka te se koristi minimalno invazivni artroskopski pristup za brži oporavak. Opći ciljevi rekonstrukcije *LCA* su očuvanje homeostaze u zglobovima i vraćanje pacijenta na razinu aktivnosti prije ozljede. Da bi ti ciljevi bili ostvareni, operacija bi trebala (1) vratiti izvornu anatomiju, (2) osigurati stabilnu fiksaciju i (3) vraćanje funkcije zgloba. Sadašnje metode rekonstrukcije *LCA* koriste više vrsta presađaka za rekonstrukciju *LCA* i općenito se smatraju uspješnima. Ipak, rezultati različitih istraživanja pokazuju pozitivan *Lachmanov* test u 68,2% slučajeva. [2]. Također, tim pristupom se izbjegava rezanje proprioceptora što skraćuje oporavak od operacije. Zbog manjeg rizika od upalne reakcije i rizika od prenosivih bolesti te zbog revaskularizacije i rekolaženizacije najčešće se koristi autologni presađak, tj. autografit [1].

Autografit je presađak koji se dobiva od tkiva istog pacijenta. Za rekonstrukciju se koristi tetiva zbog svojstva zacjeljivanja koje tetive općenito posjeduju. Presađak tetive može se presaviti da bi se formirale 2 do 6 uzastopnih niti kako bi se povećao promjer presađka čime se povećava čvrstoća presađka [3]. Iako veći autografit može biti jači, transplantat koji je prevelik može ograničiti ekstenziju

koljena, kao i njegovu fleksiju, sudarajući se sa stražnjim križnim ligamentom (*PCL*). Prema tome, mora se održavati ravnoteža između čvrstoće i pokretljivosti presatka [3]. Međutim, tim postupkom još uvijek se ne dobiva dovoljna stabilnost koljena. Jedan od razloga je što se uzima tetiva s istog koljena na kojem je ruptura, a to uzrokuje dodatnu nestabilnost već nestabilnog koljena. Drugi razlog je što se pričvršćenjem na kost ne osigurava da svaka nit od njih tri ili četiri preuzima jednaki dio opterećenja. Najčešće se događa da je jedna nit puno više opterećena od druge te ona sama može izdržati puno manje opterećenje nego što bi autograft izdržao kada bi se opterećenje raspodjelo među svim nitima.

Kako bi se postigla jednolika raspodjela opterećenja među nitima te veća čvrstoća cijelog presadka, moguće je presadak dodatno uviti. Tako dobivamo strukturu sličnu užetu koja bi mogla biti čvršća od četiri ravne niti. Već su i sama kolagena vlakna unutar tetive spiralno pletena pa je logično oponašati prirodno usmjerenje i princip prijenosa. Takav pristup pripremi presadka još uvijek je dovoljno jednostavan za kirurga jer ne zahtjeva neki dodatan komplicirani postupak. Međutim, potrebno je zadržati duljinu i promjer presadka. Također, ne smije se stvoriti prevelika površinska napetost među nitima. Zato je potrebno odabrati optimalan kut uvijanja koji će biti veći od 90 stupnjeva.

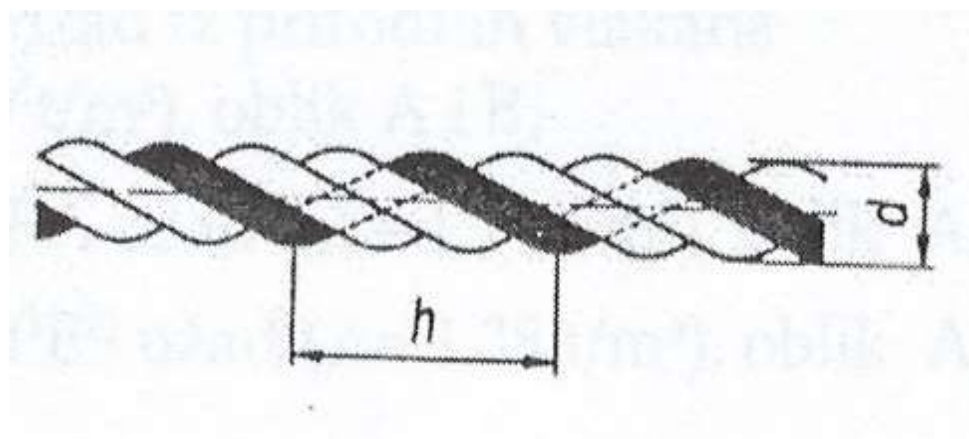
U ovom radu ispitat će se utjecaj motanja (uvijanja) na vlačnu čvrstiću niti od različitih materijala. Radi uvida u ponašanje i jednostavnosti ispitivanja započet će se s nitima užadi, a zadnja ispitivanja će biti prevedena na tetivama životinjskog i ljudskog porijekla. Pri ispitivanju koristit će se sustav ARAMIS za mjerenje deformacije.

2. MEHANIČKA SVOJSTVA SPIRALNE UŽADI

Uže je gipki, visokooterećeni strojni element koji je pojmovno nerazdvojan uz dizanje i prenošenje tereta [4]. Užad se može definirati kao nosiva konstrukcija koja je učinkovita pri podupiranju vlačnih opterećenja, ali je vrlo fleksibilna u savijanju [5]. Užad se razlikuje od ostalih struktura kao što je lanac, jer je višestruka redundantna struktura napravljena od više paralelnih nosivih elemenata, koji su obično na neki način uvrnuti kako bi se omogućilo da sklop funkcionira kao kohezivna cjelina [5]. Razlikuje se žičana i vlaknasta užad prema svojim osnovnim značajkama – materijalu, čvrstoći, trajnosti i području primjene. Spiralni način pletenja užeta može se vidjeti i u prirodi, npr. polisaharidi (celulozne i biljne stanične stijenke) i polipeptidi (kolagen, tetive, zidovi arterija i paukova svila). Kod pogonske užadi vlakna mogu prirodna ili sintetička. Prirodna se izrađuju iz npr. konoplje, manile ili sisala. Neka sintetička izrađena su od poliamida, poliestera i polipropilena. Vlaknasta užad dimenzionira se prema prekidnoj sili, uz faktor sigurnosti $S \geq 8$ [4]. Tablica 1. definira potrebni minimalnu prekidnu silu i dozvoljeno opterećenje u odnosu prema promjeru d prikazanom na slici 1., a on treba biti:

$$d \geq c\sqrt{F} \quad (1)$$

gdje je, c - koefijent, a F – sila u užetu, N [4].



Slika 1. Dimenzije vlaknaste užadi [4]

Tablica 1. Minimalna prekidna sila (F_L) i dozvoljeno opterećenje (F) vlaknaste užadi [4]

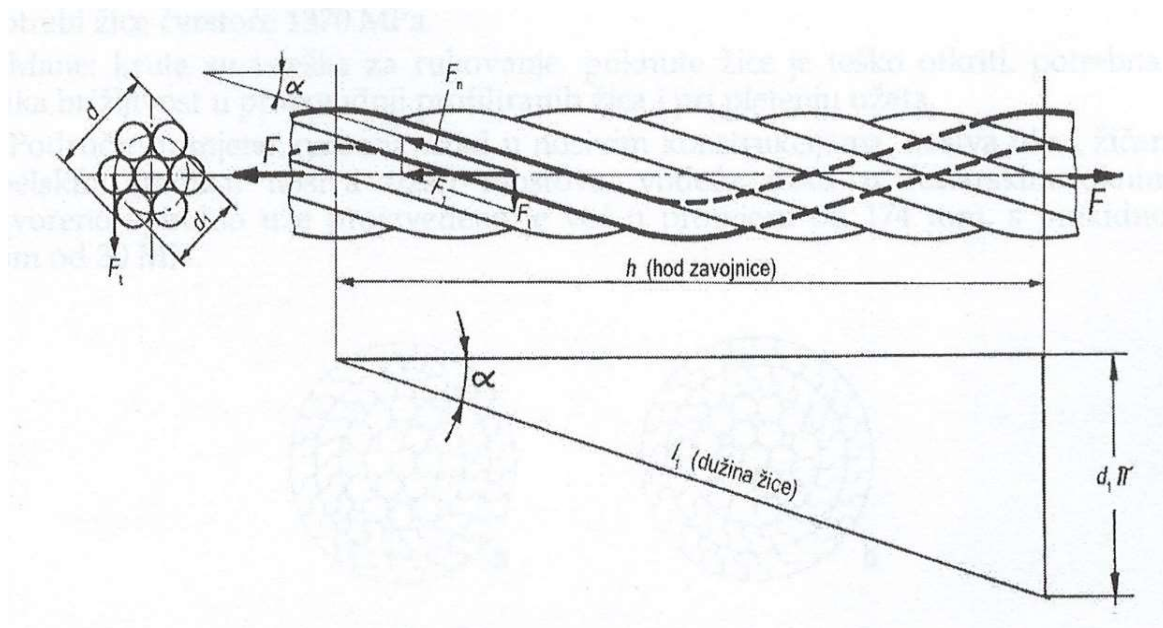
Materijal i pletenje	Min F_L , N (d , mm)	Dozvoljeno opterećenje F , N (d , mm)	Koeficijent c
Prirodna vlakna (Ha, Ma, Si)	$(60...70) \cdot d^2$	$(7...8) \cdot d^2$	0,365...0,34
Konoplja (Ha)	$(35...38) \cdot d^2$	$\approx 4,5 \cdot d^2$	$\approx 0,47$
Sintetička vlakna (PA)	$(165...200) \cdot d^2$	$(20...25) \cdot d^2$	0,22...0,2
Sintetička vlakna (PES)	$(146...165) \cdot d^2$	$(18...20) \cdot d^2$	0,35...0,22
Sintetička vlakna (PP); vrsta S2, S3	$(116...150) \cdot d^2$	$(14...18) \cdot d^2$	0,26...0,23
Sintetička vlakna (PP); vrsta S1	$(70...90) \cdot d^2$	$(8...11) \cdot d^2$	0,34...0,30

Za vlaknastu užad uzima se da presjek vlakana iznosi 2/3 teorijskog presjeka definiranog promjerom d , (slika 1.), pa se čvrstoća te užadi može uvjetno definirati izrazom [4]

$$R_m \cong \frac{F_L}{\left(\frac{2}{3} \frac{\pi d^2}{4}\right)} = \frac{1,9F_L}{d^2} \quad (2)$$

Dužina hoda zavojnice pramena (slika 2.) ovisi o materijalu i promjeru užeta d , ali najviše:

- $h = 3,5 \cdot d$ za užad iz prirodnih vlakana
- $h = (3,5...3,7) \cdot d$ za užad iz sintetičkih vlakana



Slika 2. Osnovni oblik spiralnog užeta [4]

Na slici 2. prikazan je osnovni oblik spiralnog užeta. Uže je vlačno opterećeno te je prikazana i rastav sila na uzdužnu silu u vlaknu (F_n), silu uzduž opterećenja užeta (F_2) te silu okomitu na smjer opterećenja (F_1). Spirala je definirana promjerom d_1 i kutom uspona α , kao što je prikazano na slici. Važne geometrijske karakteristike spirale su zakrivljenost κ i torzija τ (geometrijski zaokret u zavojnici - ne miješati s mehaničkom torzijom). U slučaju kružne spirale, κ i τ su konstantni i nisu nula u strukturi [5]. Mogu se izraziti sljedećim jednostavnim izrazima [5]:

$$\kappa = \frac{(\sin \alpha)^2}{R} \quad i \quad \tau = -\frac{\cos \alpha \sin \alpha}{R} \quad , \quad (3)$$

gdje je $R = d/2$. Deformirane žice imaju samo djelomice plastificiranu zonu, dok dio presjeka u elastičnoj zoni naprezanja teži svojom akumuliranom energijom elastične deformacije odvrnuti, odnosno poravnati žicu. Superponirano djelovanje svih žica u užetu uslijed potencijalne energije elastične deformacije zvat ćemo *izradbenom vrtljivošću* užeta. Kada se uže optereti pojavljuje se još i pogonska vrtljivost užeta, koja je posljedica smanjenja kuta uspona alfa pri opterećenju. Do toga dolazi sumarnim djelovanjem tangencijalnih komponenta F_1 sila u pojedinim žicama F_1 (slika 2.) [4].

2. 1. Propagacija pukotine u spiralnom užetu

Sama priroda vlaknaste strukture nudi iznimno koristan mehanizam za sprečavanje širenja pukotina. U čvrstoj strukturi, jedna pukotina može se širiti i uzrokovati propadanje cijele strukture. Da bi vlaknasti sustav puknuo, pukotina se mora kretati unutar vlakna, preko međusloja (eng. *interphase*), a zatim u sljedeće vlakno, i tako dalje, ako se nastavlja širiti. Ako je međusloj između vlakana dovoljno slab, visoko koncentrirano područje vlačnog naprezanja koje postoji neposredno ispred vrha pukotine uzrokovat će odvajanje vlaknastog međusloja i otupljivanje pukotine (učinkovito kontroliranje pucanja). U slučaju većine užadi mehanizam prijenosa opterećenja između susjednih vlakana je u osnovi kroz sile trenja uzrokovane kontaktnim opterećenjem između njih. Ova frikcijska adhezija djelotvorna je samo u smicanju uzduž međusloja. Zbog toga će zatezna zona naprezanja pred propagirajućom pukotinom izazvati razdvajanje žica, a pukotina će se zaustaviti i neće se nastaviti u susjednu žicu. [5]

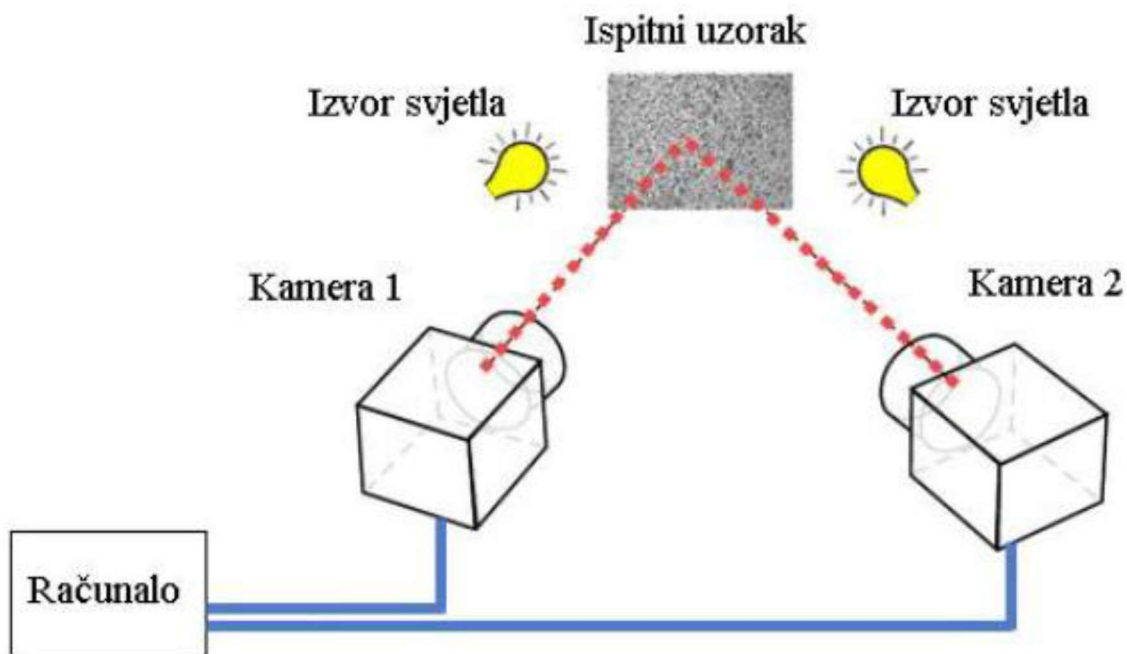
Sile trenja između vlakana imaju još jednu strukturalnu prednost. Slomljeno vlakno unutar konstrukcije ne nosi teret na stvarnom mjestu prekida. Udaljavanjem od puknuća, vlakna postupno preuzimaju teret sve dok na određenoj udaljenosti od puknuća ne preuzmu opterećenje potpuno. Aksijalna duljina preko koje se to događa poznata je kao "efektivna duljina". Čak i konstrukcija od neprekinutih dugih elemenata, kao što je žičana užad, može imati svaku pojedinačnu žicu puknutu i još uvijek sposobnu za rad. To, naravno, zahtijeva da se lomovi žice dostatno rasporede duž užeta (tj. budu odvojeni više od dvostruke "efektivne duljine").

2.2. KUT USPONA α

Što je viši kut polaganja, to je komponenta manje učinkovita kod prijenosa vlačnog opterećenja. Priroda užeta bit će kompromis između njegove sposobnosti da obavlja svoju primarnu funkciju vlačnog opterećenja ležaja i potrebne razine fleksibilnosti. Primjer užeta koje se ne mora savijati je užad koja služi kao zatezi na mostu. U ovoj primjeni može se upotrijebiti konopac od spiralne niti. Spiralna užad vrlo je kruta u savijanju i, što je još važnije, sa stajališta konstruktora mosta, vrlo kruta pod aksijalnim opterećenjem [5]. Krutost u savijanju posljedica je činjenice da su žice ispletene u mnogo koncentričnih slojeva pri vrlo malom kutu zavojnice. Kut spirale dizajniran je da bude dovoljan da drži konop zajedno tako da može djelovati kao cjelina (mora se imati na umu da će u životnom vijeku biti nešto savijanja - posebno za prijevoz gdje se pramen mora namotati) [5]. U slučaju savijanja niti tetiva treba uzeti u obzir da su najviše opterećene vlačno u koljenu te će, s obzirom na ovo svojstvo aksijalne čvrstoće, biti odabran optimalni kut uvijanja tetive kako bismo ostvarili što manji kut uspona [5].

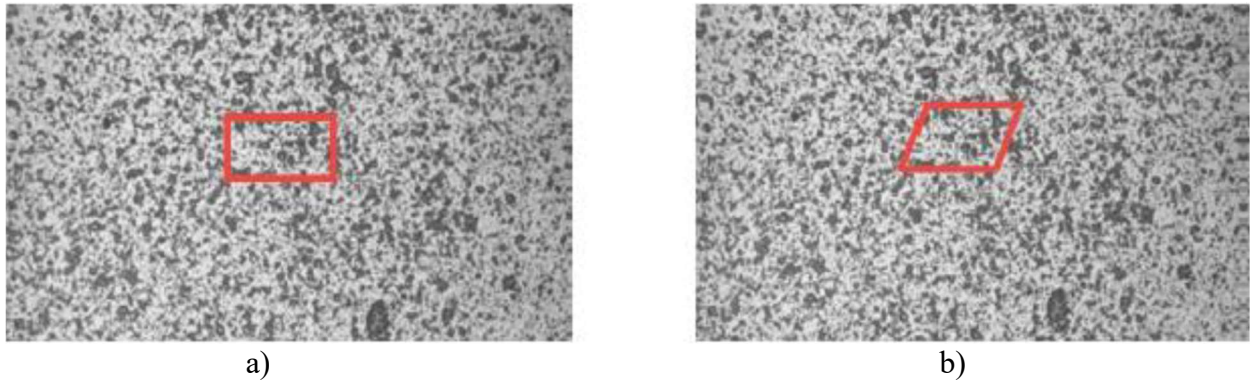
3. METODA KORELACIJE DIGITALNE SLIKE

Digitalna korelacija slike (*DIC*) je inovativna nekontaktna optička tehnika za mjerenje naprezanja i pomaka [6]. *DIC* radi usporedbu digitalnih fotografija komponente ili ispitnog komada u različitim fazama deformacije što omogućuje bolje razumijevanje ponašanja materijala i konstrukcije tijekom opterećivanja [6]. Metoda ne zahtijeva posebnu rasvjetu niti posebnu pripremu površine koja se slika. Međutim, kako bi se dobile jasne slike deformacije, blokovi piksela moraju biti slučajni i jedinstveni s rasponom razina kontrasta i intenziteta. Za primjenu metode, koriste se kamera, izvor svjetla te odgovarajući algoritam koji omogućuje korelaciju rezultirajućih digitalnih slika. Navedeni elementi sustava prikazani su na slici 3.



Slika 3. Sustav za digitalnu korelaciju slike [6]

Promjena položaja točaka na površini ispitnog uzorka prati se uspoređivanjem digitalnih slika u različitim stadijima deformacije. Uspoređuje se položaj mjernih točaka u deformiranom stanju s njihovim početnim položajem u nedeformiranom stanju koje je određeno prvom i referentnom slikom. Izlazni podaci mjerenja su digitalne slike. Digitalne slike diskretiziraju se manjim poljima piksela koja se nazivaju podskupovi (eng. *subsets*) ili fasete (eng. *facets*), što je prikazano na slici 4. [6].

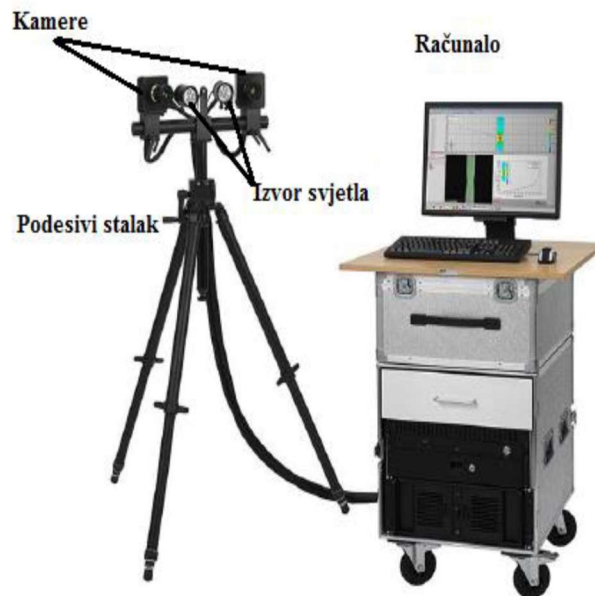


Slika 4. Primjer stohastičkog rastera i crveno označena pravokutna faseta u referentnoj konfiguraciji a) i deformiranoj konfiguraciji b) [6]

U središtu svake fasete nalazi se središnja, mjerna točka (eng. *measuring point*). Fasete su obično pravokutnog ili kvadratičnog oblika, a međusobno se razlikuju jedinstvenom raspodjelom intenziteta sive boje. Ako materijal koji se ispituje nema raznoliku teksturu kada je riječ o intenzitetu nijansi sive boje, nanosi se stohastički uzorak (raster) na površinu. Također, u nekim slučajevima je moguće staviti i samo referentne točke kao markere u obliku naljepnica te se tako prati njihovo pomicanje. Takav način mjerenja dobiva se lokalnim pristupom korelaciji digitalne slike.

3.1. OPTIČKI SUSTAV ARAMIS

Aramis je beskontaktni optički 3D mjerni sustav koji analizira, izračunava i dokumentira pomake i deformacije. Dijelovi sustava prikazani su na slici 5. Temelji se na lokalnom pristupu korelacije digitalne slike. Sustav služi za mjerenje trodimenzionalne promjene oblika i raspodjele deformacija na površini statički ili dinamički opterećenih ili deformiranih objekata. Primjenjuje se u analizi čvrstoće konstrukcija, određivanju svojstava materijala, verifikaciji i usavršavanju numeričkih proračuna, itd. Prikladan je za analizu objekata iz metalnih, kompozitnih, gumenih, drvenih i drugih materijala. Elementi sustava prikazani su na slici. Sustav se sastoji od podesivog stalka, dviju kamera, izvora svjetla i računala za obradu rezultirajućih digitalnih slika. Ako se pri mjerenju koristi jedna kamera govori se o 2D mjerenju, a ako se koriste dvije kamere tada je riječ o 3D mjerenju. Funkcije samog sustava *Aramis* kontroliraju se softverom. Preko softverskog sustava dostupne su funkcije mjerenja, procjene, prikaza i ispisa rezultata. Također,



Slika 5. Optički mjerni sustav Aramis [6]

svim funkcijama može se pristupiti putem padajućeg izbornika ili kombinacijom tipki. *Aramis* koristi operativni sustav *Linux* koji u kombinaciji s posebno razvijenim softverom *Aramisa* predstavlja vrhunski sklop alata, informacija i mogućnosti [6]. Sam postupak mjerenja sustavom može se podijeliti na sljedeće korake:

1. Priprema mjernog objekta,
2. Nanošenje stohastičkog uzorka na površinu mjernog objekta,
3. Podešavanje i kalibracija sustava za željeni mjerni volumen,
4. Provedba snimanja mjernog objekta,
5. Pohrana i obrada digitalnih slika.

3.1.1. Priprema mjernog objekta

Priprema mjernog objekta važan je dio kod obavljanja mjerenja. Neadekvatna površina mjernog objekta i problem s rasterom mogu znatno utjecati na rezultat. Zato je potrebno ispuniti sljedeće preduvjete [7]:

- Površina mjernog objekta mora imati uzorak prepoznatljiv senzoru kako bi jasno mogao izdvojiti fasete. Na temelju toga, područje piksela u referentnoj slici može se dodijeliti određenom području piksela u ciljanoj slici.
- Karakteristični uzorak površine mora biti u stanju pratiti deformacije uzorka.
- Optimalna površina uzorka mora biti glatka. Jako strukturirana površina može uzrokovati probleme u identifikaciji fasete i proračunu 3D točki.
- Obojani uzorak na objektu mora imati dobar kontrast.
- Površina uzorka ne smije biti sjajna zbog refleksije koja uzrokuje loš kontrast i svjetlinu u desnoj i lijevoj kameri. Refleksija može predstavljati problem kod računanja područja faseta.

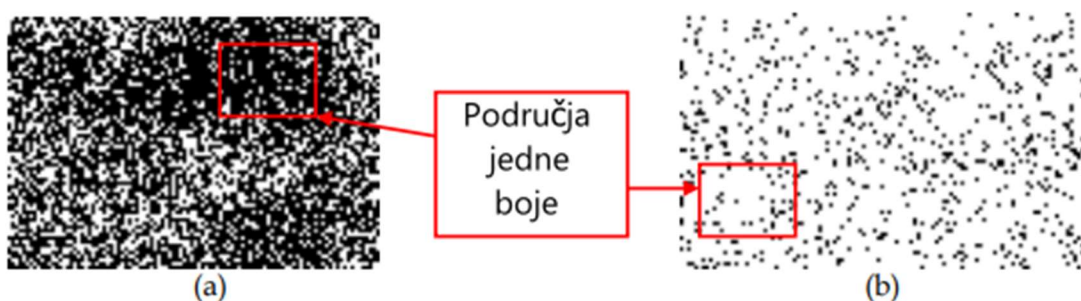
Prema navedenim uvjetima mjerenju su najprikladniji stohastički uzorci koji su prilagođeni mjernom volumenu, razlučivosti kamere i veličini fasete.

3.1.2. Nanošenje stohastičkog uzorka na površinu mjernog objekta

Budući da metoda korelacije digitalne slike zahtijeva što nepravilniju teksturu na površini mjernog objekta, prije samog mjerenja uzorke je potrebno adekvatno pripremiti – nanijeti stohastički uzorak (raster) prepoznatljiv sustavu. Raster se najčešće postiže nanošenjem nereflektirajuće mat bijele boje te naknadnim nanošenjem crne boje s ciljem dobivanja crnih točkica na bijeloj podlozi. Za dobivanje rastera najčešće se koriste klasični sprejevi. Bitno je napomenuti da gustoća i veličina nanesenih točkica uglavnom ovise o veličini mjernog volumena. Mali mjerni volumeni zahtijevaju finiji i gušći raster. Primjeri stohastičkog premaza na kosti prikazan je na slici 6.



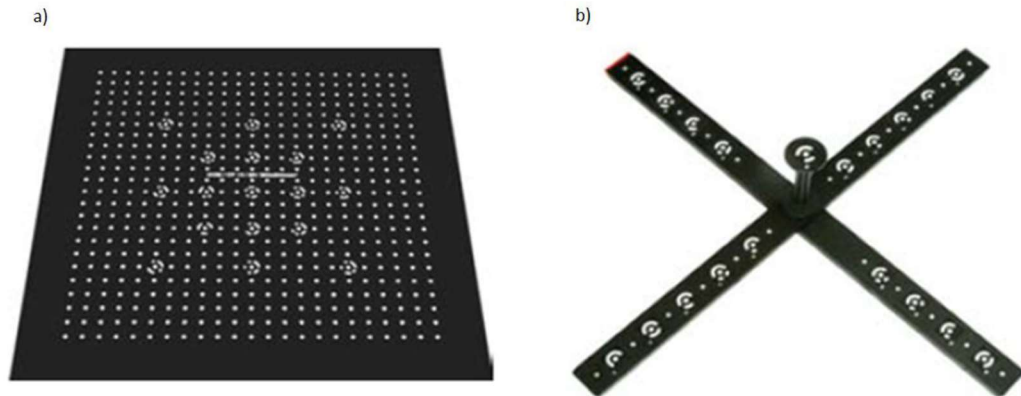
Slika 6. Primjeri stohastičkog premaza na kosti



Slika 7. Primjer lošeg nanošenja stohastičkog premaza a) previse crne boje, b) previse bijele boje [8]

3.1.3. Podešavanje i kalibracija sustava

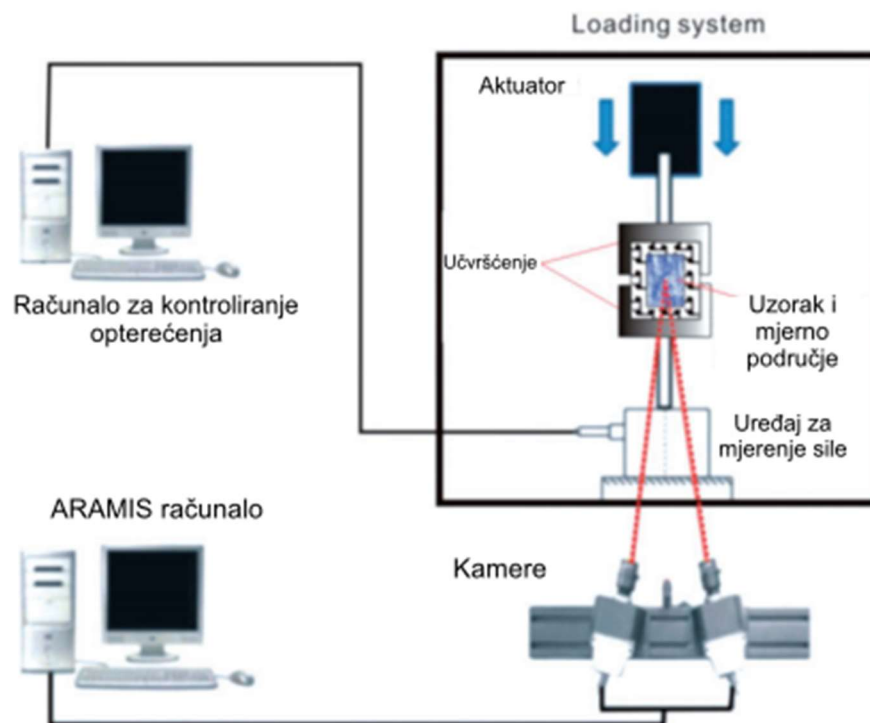
Prije početka mjerenja potrebno je podesiti optički sustav. Podešavanje sustava podrazumijeva definiranje udaljenosti sustava od mjernog objekta, osvjetljenja objekta i kalibraciju kamere. Kalibracija služi za podešavanje vanjskih i unutarnjih parametara kamere, te da bi se poništile sve nepravilnosti u kameri koje mogu biti uzrokovane okolinom. Mjerni sustav Aramis kalibrira se pomoću odgovarajućih kalibracijskih objekata: za male volumene koriste se kalibracijske ploče, dok se za veće mjerne volumene koriste kalibracijski štapovi.



Slika 8. Kalibracijski objekti: a) kalibracijska ploča, b) kalibracijski križ [9]

Na slici 8. prikazani su primjeri kalibracijskih objekata. Prilikom mjerenja i kalibracije vrlo je važna mjerna udaljenost, parametri kao što su udaljenost i kut između kamera važni su radi bolje triangulacije točke u prostoru te se nakon kalibracije ne smiju mijenjati [7].

Slika 9 prikazuje dijelove sustava i parametre koji se podešavaju prilikom kalibracije. U slučaju loše postavljenih kamera, promjena udaljenosti i kuta između kamera, odabira krivog kalibracijskog objekta ili krivo provedenog procesa kalibracije dolazi do dekalibracije sustava što rezultira velikim odstupanjima u rezultatima mjerenja. Algoritam radi na način da se iz 2D koordinata referentne točke svake kamere triangulacijom izračunaju prostorne koordinate. Nakon toga, prostorne se koordinate preračunaju nazad u 2D koordinate i uspoređuju s prvobitnim položajem, što se naziva odstupanjem referentnih točaka. Kada se na taj način obuhvate sve točke snimljene prilikom kalibracije i izračuna njihovo prosječno odstupanje dobiva se greška kalibracije.



Slika 9. Dijelovi sustava Aramis [10]

Sustav jednadžbi triangulacije je sustav koji je predefiniран i preko njega se dobiva skup rješenja na osnovu čije standardne devijacije se procjenjuje je li sustav ispravno kalibriran. Za ispravnu kalibraciju očekivana greška 23 kalibracije može iznositi od 0,01 piksela do 0,04 piksela [7]. Kada se sustav jednom kalibrira za određeni mjerni volumen, podaci o kalibraciji pohranjuju se u memoriju te kalibraciju nije potrebno više ponavljati ukoliko nema potrebe za povećanjem ili smanjenjem mjernog volumena [7].

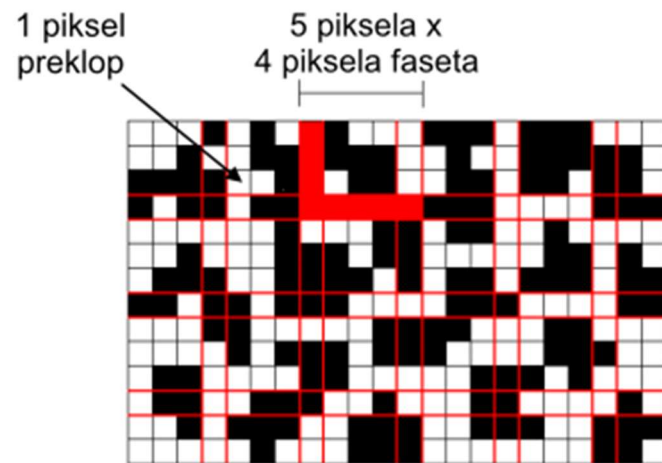
3.1.4 Snimanje uzoraka

Kad je sustav kalibriran znači da je definirana veličina piksela, odnosno definirano je koliko piksela odgovara jednom milimetru. Nakon kalibracije sustav je spreman za mjerenje te se pozicionira ispred mjernog objekta na odgovarajuću udaljenost i, ako je potrebno, dodatno se podešavaju izvori svjetla kako bi se dobila oštra slika bez neželjenih refleksija. Neposredno prije snimanja potrebno je podesiti parametre kamere, a to prvenstveno podrazumijeva brzinu snimanja slika i vrijeme ekspozicije. Oba

parametra ovisna su o tehničkim specifikacijama kamere, ali direktno ovise i o količini svjetla na mjernom objektu.

3.1.5 Pohrana i obrada digitalnih slika

Po završetku snimanja, rezultirajuće digitalne slike pohranjuju se u memoriju sustava. Budući da se algoritam sustava temelji na lokalnom pristupu metode korelacije digitalne slike, digitalne slike se diskretiziraju fasetama. Veličina fasete i korak definiraju se softverski prilikom obrade digitalnih slika. Pojmovi *piksel*, *fasete*, *polje fasete* i *preklapanje fasete* opisani su vizualno na slici 10. Slika 10. prikazuje crno-bijeli uzorak koji predstavlja primjer uzorka mrlja stohastičkog premaza, podijeljen na piksele. Crvene crte označavaju polje fasete iznad uzorka točkica, što je sastavljena od zbirke piksela. Svaka fasete na slici je 5 piksela po 4 piksela i polje fasete ima preklapanje od 1 piksela između svake fasete. Kako je već prije spomenuto, fasete se identificiraju i prate pomoću stupnja intenziteta nijansi sive boje kroz različite korake opterećenja. Veličina fasete direktno utječe na mjernu nesigurnost mjerenja pomaka i deformacija. Povećanjem fasete smanjuje se mjerna nesigurnost, no izračun postaje računalno zahtjevniji. Također, u takvom slučaju nemoguće je odrediti pomake i deformacije u zonama manjima od veličine fasete. Smanjenje veličine fasete eliminira navedene nedostatke, no uzrokuje povećanje mjerne nesigurnosti. Povećanjem koraka fasete smanjuje se gustoća mjernih točaka što rezultira kraćim trajanjem izračuna pomaka i deformacija. S druge strane, smanjenjem koraka gustoća mjernih točaka se povećava čime izračun postaje zahtjevniji. Općenito na mjernu nesigurnost utječe nekoliko čimbenika: karakteristike rastera (veličina i jednolika raspodjela crno-bijelih točkica), parametri analize (kriteriji korelacije, funkcije oblika implementirane u algoritam, veličina i korak fasete), parametri kamere (rezolucija, šum, optička distorzija), utjecaj okoline (temperatura, vibracije stalka, osvjetljenje). Mjerni sustav Aramis ima mogućnost mjerenja malih i velikih objekata (veličine od 1 mm do 2000 mm) s istim sensorom, a deformacije koje se mogu mjeriti su u rasponu od 0,01 % do 100 %. Kao rezultat mjerenja dobiva se cijelo polje pomaka i deformacija te u tom smislu Aramis predstavlja iznimno moćan alat za validaciju numeričkih proračuna.



Slika 10. Pikselerani uzorak stohastičkog premaza s preklapanjem faseta u crvenoj boji [8]

4. Eksperimentalni dio

4.1. Ispitivanje užadi

Za određivanje utjecaja motanja na čvrstoću tetive i presadka koristilo se statičko vlačno ispitivanje na INSPEKT 20-1 Table kidalici u laboratoriju tvrtke Topomatika d.o.o. u Zagrebu. Kidalica je pogodna za univerzalnu namjenu u raznim industrijama. Pogonjena je elektromotorom, a postiže maksimalnu silu od 20 kN. Obzirom na tešku dostupnost i tešku pripremu, preliminarno ispitivanje provedeno je na užadi. Bilo je potrebno pronaći uže koje će prema strukturi najbliže odgovarati strukturi tetive. S obzirom da je tetiva relativno ravna pa ju se mota tek pri ispitivanju, izabrano je uže koje je prikazano na slici 11.

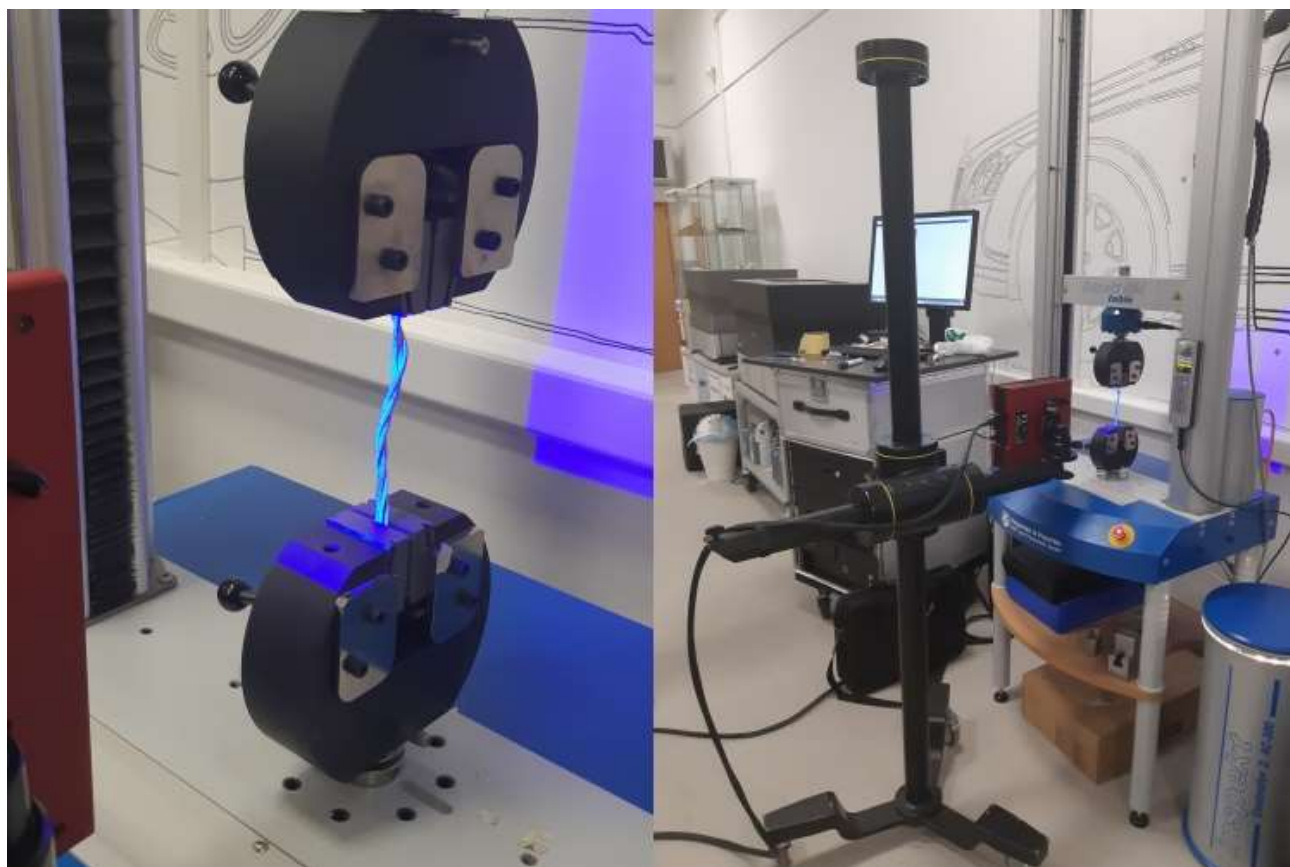


Slika 11. Uže za statičko vlačno ispitivanje

Uže je izvana glatko te izrađeno od polimera, a iznutra ojačano žicom. Međutim, s takvim užetom nije bilo moguće dobiti prave brojčane rezultate jer je proklizavalo u čeljustima kidalice. Ono zbog čega je svejedno ispitivanje bilo korisno je snimanje ponašanja materijala sustavom ARAMIS, prikazano na slici 13. Za snimanje ARAMIS sustavom bilo je potrebno uže našpricati stohastičkim premazom (slika 12.).



Slika 12. Stohastički premaz za ispitivanje užeta Aramis sustavom



Slika 13. Ispitivanje užeta Aramisom

Sljedeći korak bilo je ispitivanje užadi koju je moguće motati, a da ne proklizava u čeljusti. Odabrano je uže kao na slici 14, promjera 10 mm. Sve niti koje su ispitivane bile su duljine 15 cm. Tijek ispitivanja određen je tako da je moguće uvidjeti razliku u čvrstoći kod neuvijenih i uvijenih uzoraka užadi.



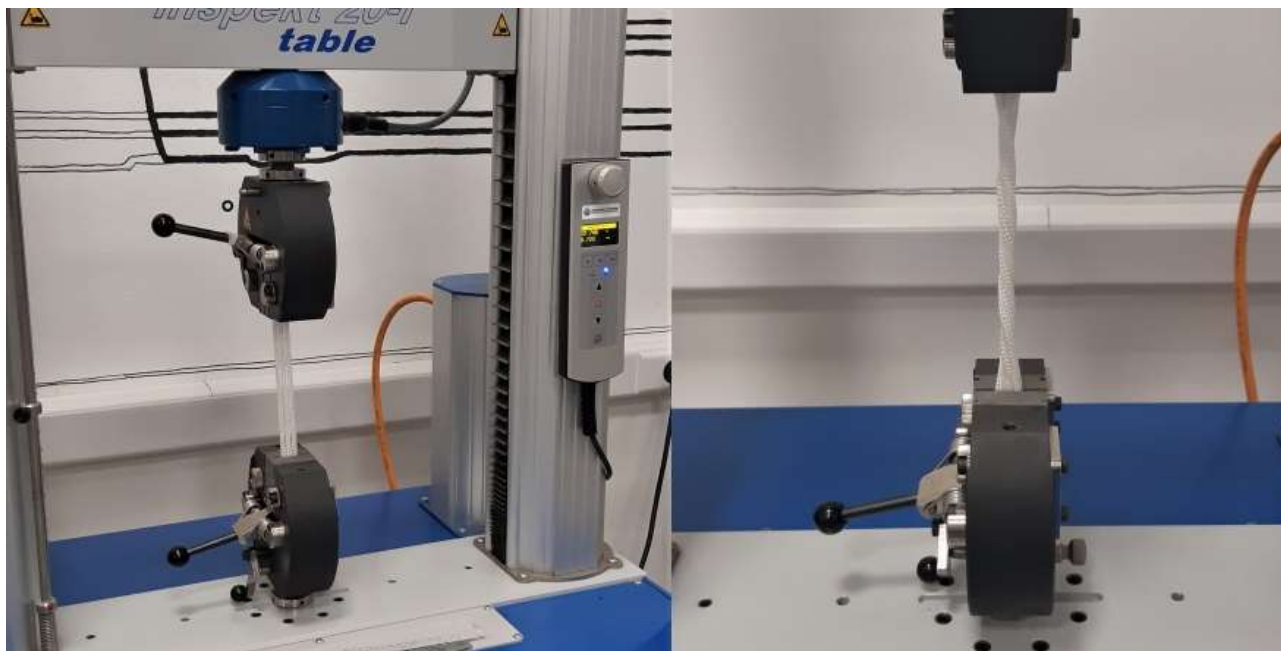
Slika 14. Uže za statičko vlačno ispitivanje

Također, bilo je potrebno utvrditi utječe li kut motanja (uvijanja) na čvrstoću uzorka. Osim toga, presadak tetiva može biti savijen 2 ili 3 puta, ovisno o tome koja se vrsta tetive koristi za presadak. Tako se, nakon savijanja, dobiju 3 ili 4 ravne niti. Redoslijed ispitivanja uzoraka prikazan je u tablici 2.

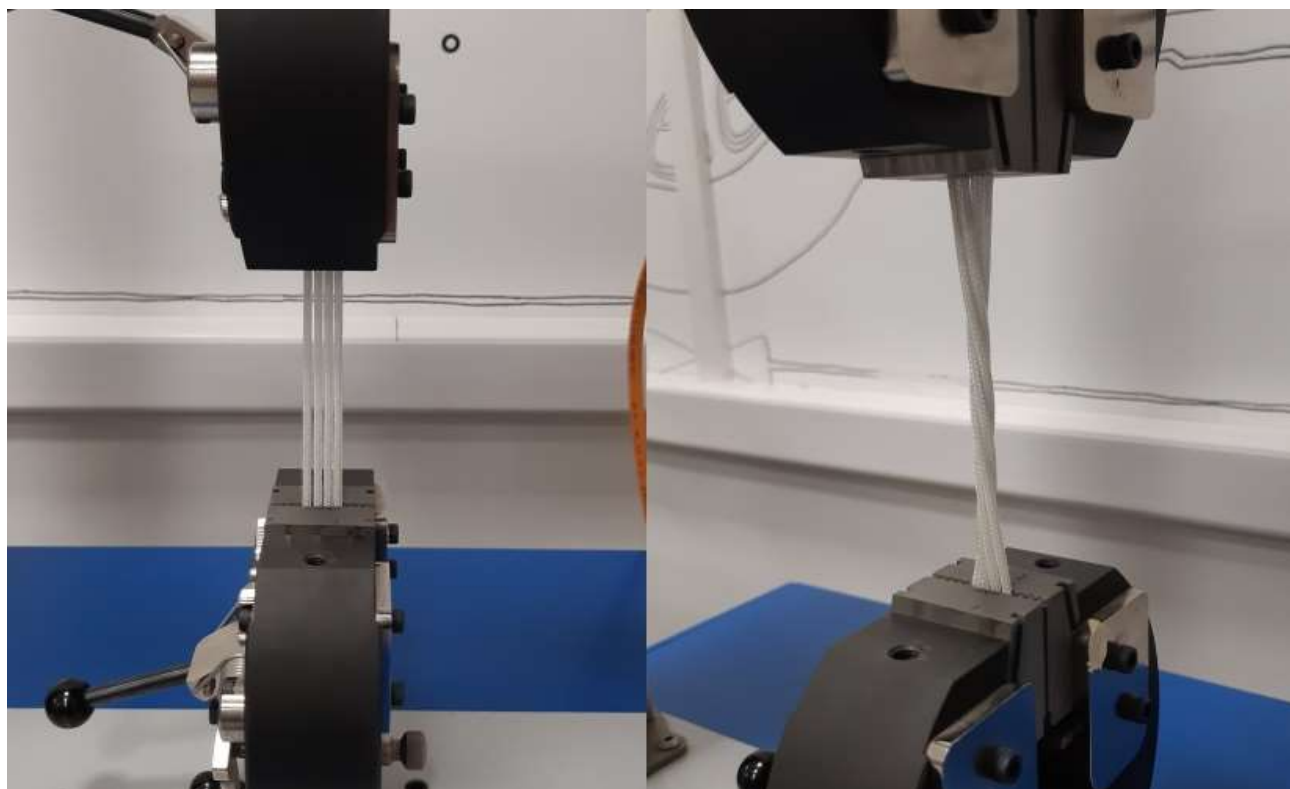
Tablica 2. Slijed mjerenja uzoraka užadi.

Mjerenje br.	1	2	3	4	5	6	7
Broj niti	3	3	3	3	4	4	4
Broj uzoraka	5	5	5	5	5	5	5
Kut motanja	0°	360°	720°	1080°	0°	360°	720°

Kutevi su odabrani kako bi se izbjegao prevelik površinski pritisak među nitima, ali kako bi se svejedno jednoliko raspodjelilo opterećenje. Uzorke s 4 niti nije se ispitivalo s uvijanjem za kut od 1080° . Već se kod kuta od 720° događalo da se niti međusobno „zapeku“ što je pokazatelj prevelikog površinskog pritiska među nitima. Ispitivanje 3 niti užeta na kidalici prikazano je na slici 16. Kod ove vrste užeta nije bilo proklizavanja. Korištenje ARAMIS sustava nije bilo moguće ni kod ravnih ni kod uvijenih niti jer površina užeta nije glatka pa kamera ne može precizno pratiti pomak točaka.



Slika 16. Ispitivanje 3 ravne i 3 uvijene niti užeta



Slika 15. Ispitivanje 4 ravne i 4 uvijene niti užeta

4.2. Ispitivanje ovčjih tetiva

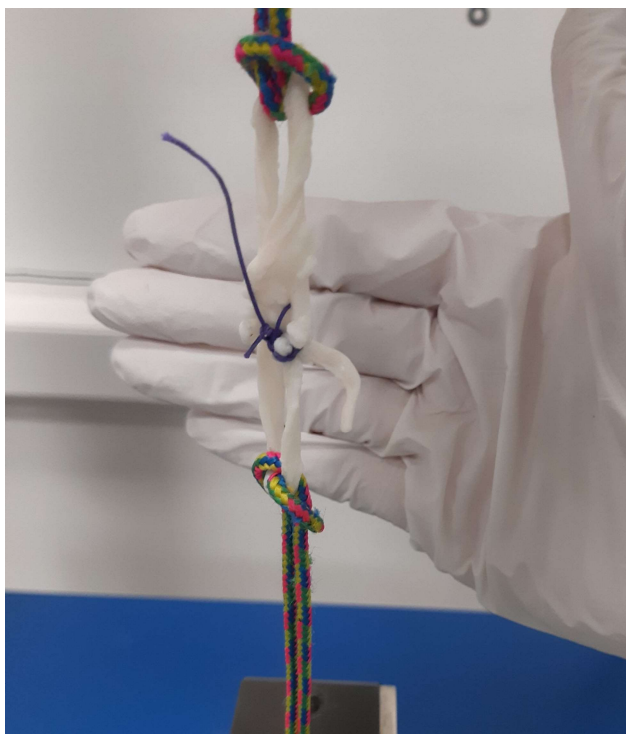
Ispitivanje na životinjskim tetivama provedeno je prije ispitivanja na ljudskim tetivama. Za ispitivanje, zbog lagane dostupnosti, odabrane su tetive ovčjeg kadavera. Izdvojene su tetive sa stražnje lijeve i desne noge. Dobiveno je 20 pari tetiva. S obzirom da su parovi tetiva dobiveni s iste ovce te su se tetive razlikovale po vrsti, uzorci su se jako razlikovali po debljini, duljini i ujednačenosti presjeka. Uzorke je pripremao kirurg koji ih je odvojio od mišića te spremio u posudice s vodom kako bi se očuvala prirodna vlažnost. Uzorci su osušeni na papirnatom ručniku. Uzorci tetiva i njihovo sušenje prikazani su na slici 17.



Slika 17. Uzorci ovčjih tetiva prije pripreme za ispitivanje na kidalici

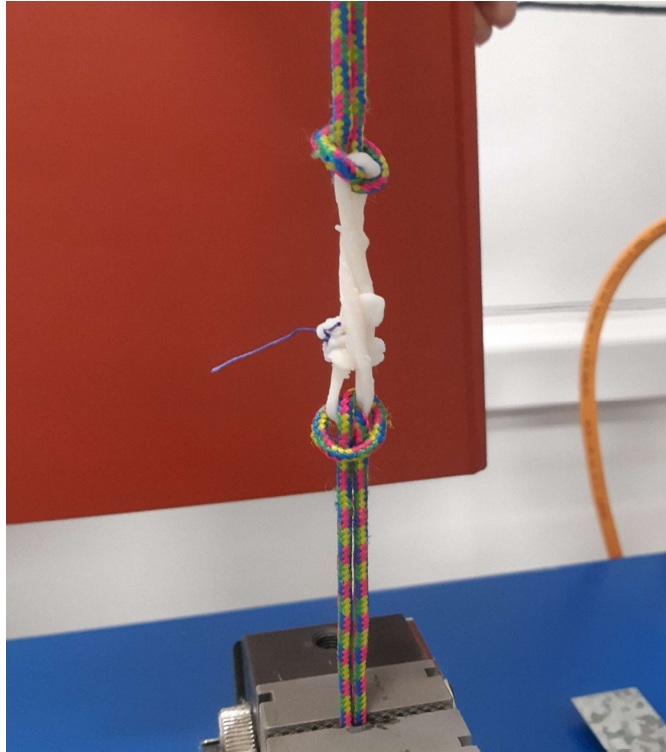
Tetive nisu bile dovoljno dugačke da bi se savijale 2 ili 3 puta, pa su bile savijene jednom i zašivene na krajevima. Šav je izvodio kirurg koncem prije samog ispitivanja kao što je prikazano na slici 18. Bilo je bitno da se ispitivanje provede što prije nakon vađenja iz posudice s vodom kako se tetive ne bi osušile. Svaki par tetiva ispitan je na način da je tetiva s jedne noge bila neuvijena pri statičkom vlačnom ispitivanju, a s druge noge uvijena. Kut uvijanja odabran je s obzirom na duljinu i debljinu tetive. Odabrani kut je 540° jer se tako osiguralo da površinski pritisak ne bude prevelik, a da se svejedno dobije spirala.

Prihvat tetive u čeljusti kidalice osiguran je pomoću užadi. Tetiva i užde svezani su u tzv. muški čvor. Takav čvor je odabran jer se dodatno steže pri razvlačenju te je tako osigurano da se tetiva i užde ne razvežu prilikom vlačnog opterećivanja.

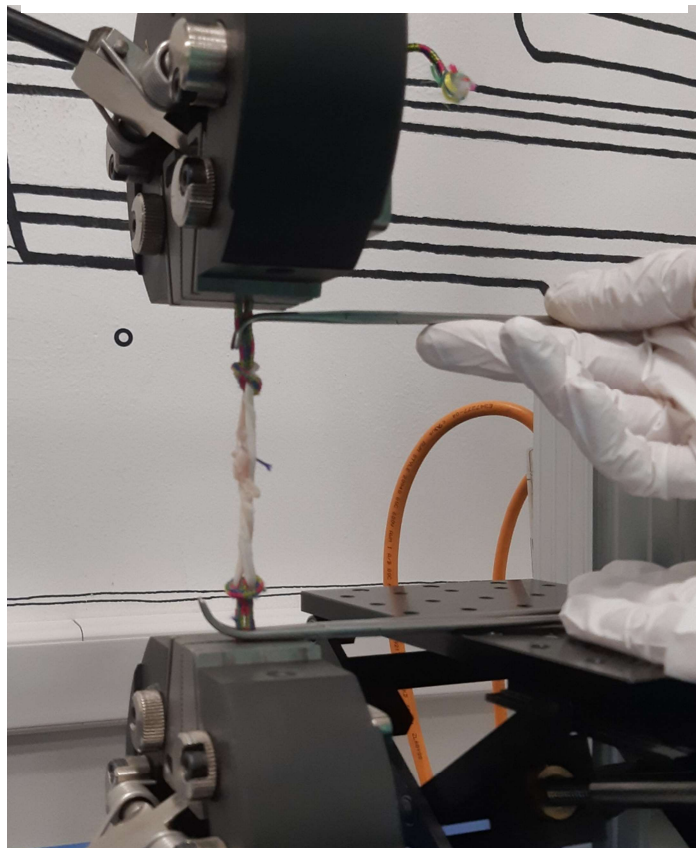


Slika 18. Šav na ovčjoj tetivi

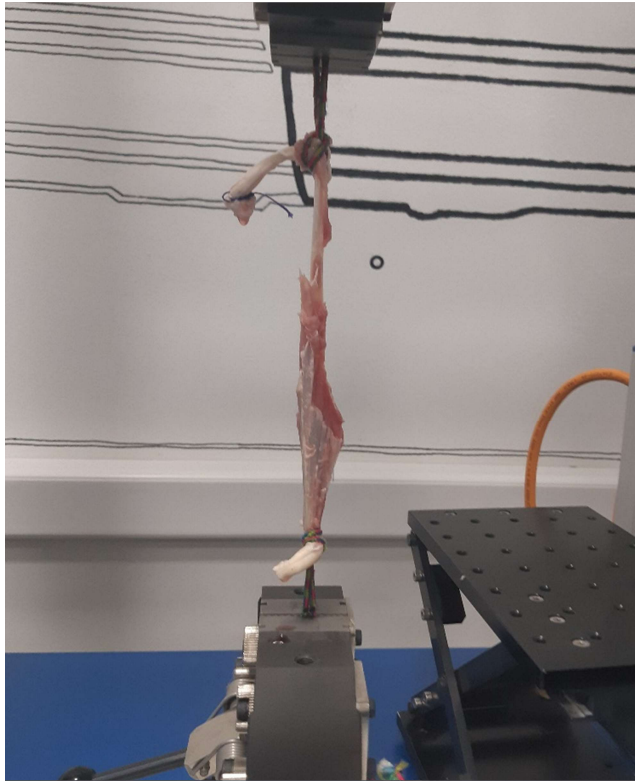
Kod ispitivanja uvijene tetive, dolazilo je do odmotavanja tetive pa je bila potrebna fiksacija užadi. Osiguranje od odmotavanja postignuto je obuhvaćanjem užadi na gornjoj i donjoj strani škarama za prepariranje te držanjem rukama tijekom cijelog ispitivanja, kao što je prikazano na slici 20. Do pucanja je uvijek dolazilo uz sami šav (slika 21.). Tetive su bile različitog poprečnog presjeka (slika 22.), šav se uvijek stavlja na najtanji dio tetive. Šav nije utjecao na čvrstoću tetive zbog načina izvedbe.



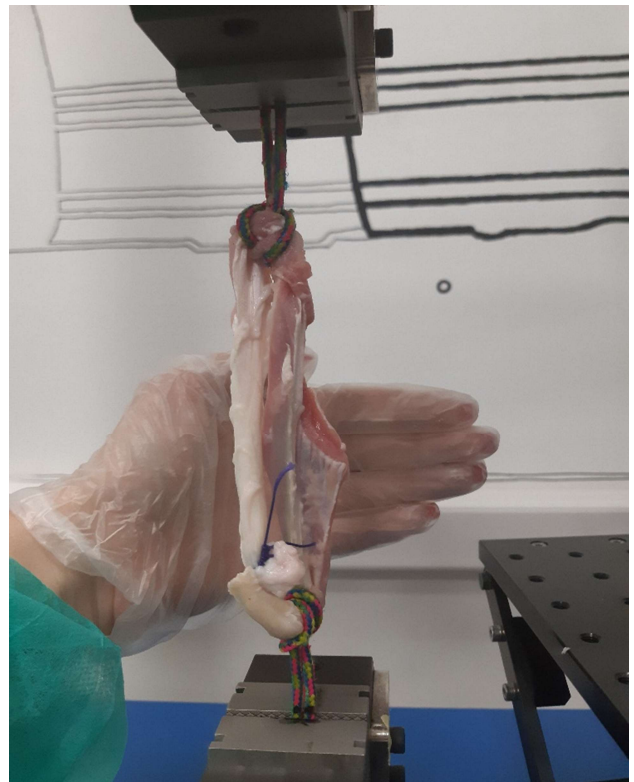
Slika 20. Uvijena ovčja tetiva



Slika 19. Fiksacija uvijene tetive



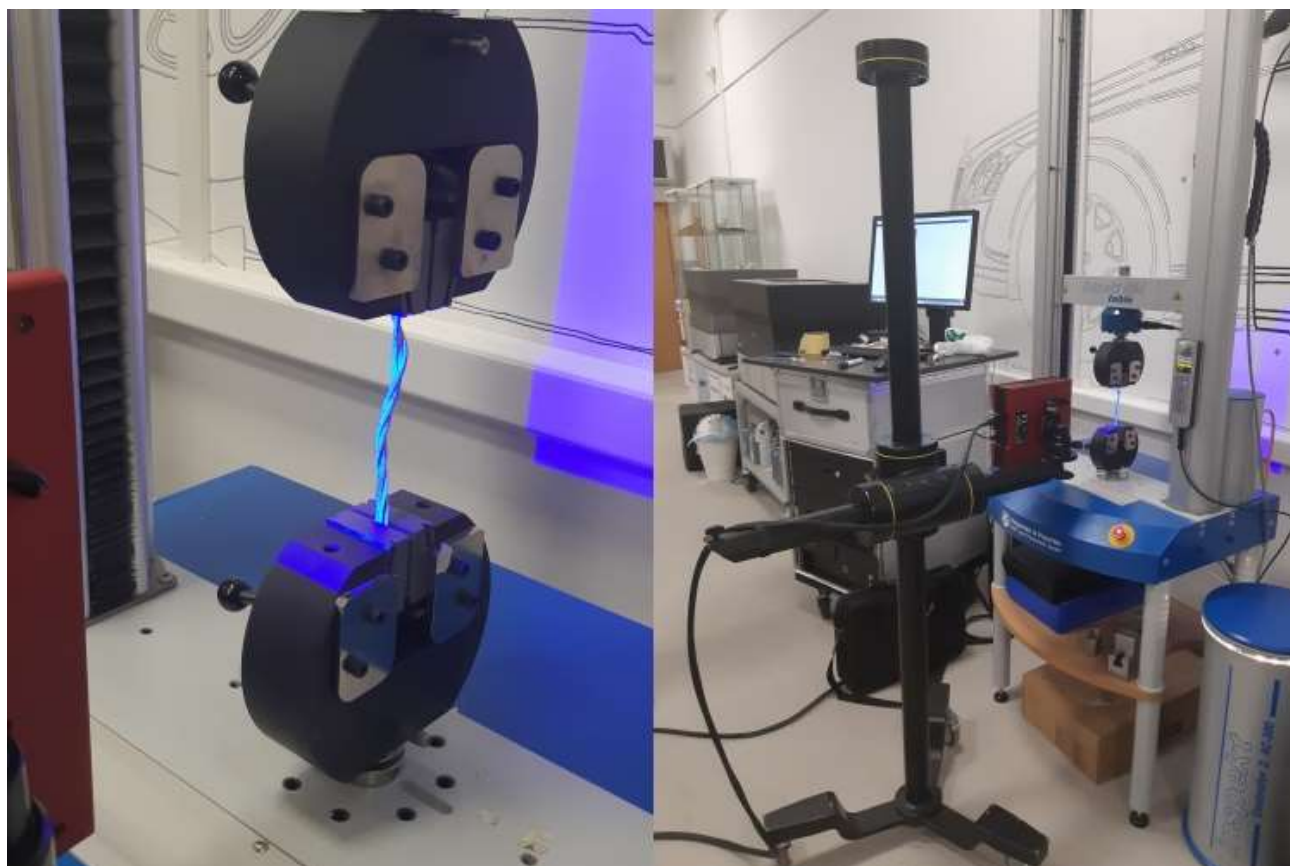
Slika 22. Puknuta ovčja tetiva



Slika 21. Tetiva nejednolikog presjeka

4.3. Ispitivanje ovčjih tetiva ARAMIS-om

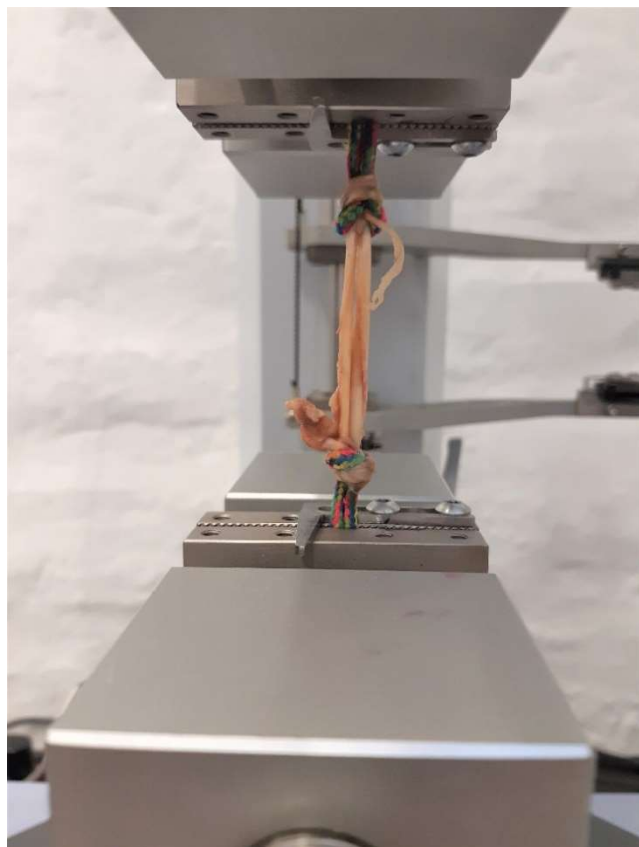
Kod ispitivanja ravnih tetiva, korišten je i ARAMIS sustav za mjerenje pomaka. S obzirom na vlažnost i strukturu, nije bilo moguće koristiti sprej za nanošenje stohastičkog premaza. Kao referentne točke, koristili su se markeri u obliku naljepnica koji su se ljepili na tetivu (slika 23.). Da bi se zaljepile, bilo je potrebno površinu obrisati papirom. ARAMIS-om se mjerio pomak referentnih točaka. Međutim, zbog pritezanja u užetu koje se događalo prilikom razvlačenja tetive, točke su se zakretale te kamera više nije razlikovala desnu i lijevu nit tetive. Isti problem, ali u još većem razmjeru dogodio bi se i na uvijenim tetivama.



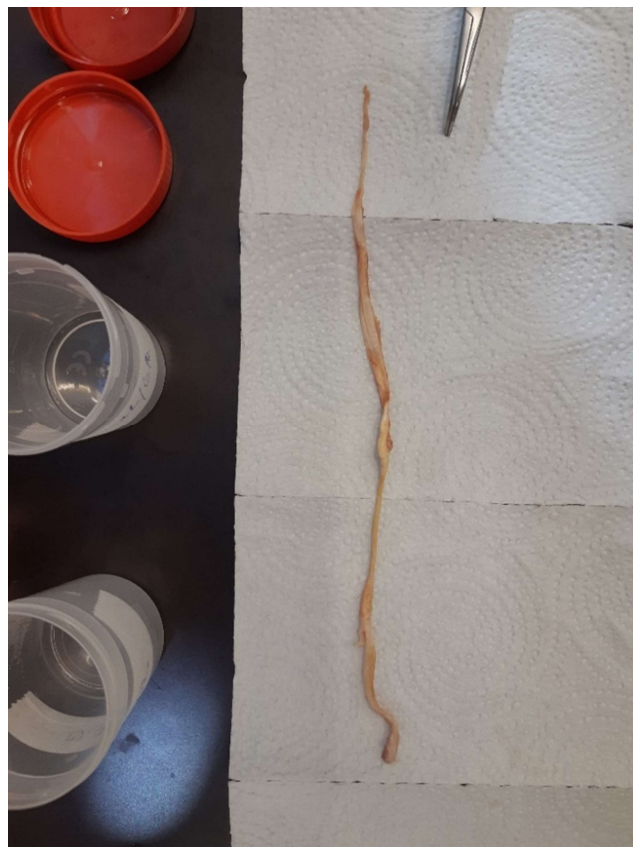
Slika 23. Ispitivanje ovčjih tetiva ARAMIS-om

4.4. Ispitivanje ljudskih tetiva

U suradnji s Medicinskim fakultetom Sveučilišta u Zagrebu, dobiven je pristup četiri para tetiva ljudskih kadavera (slika 25.). Statičko vlačno ispitivanje provedeno je u Laboratoriju za aditivne tehnologije Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu na kidalici proizvođača Shimadzu AGS-X maksimalne sile 10 kN. Temperatura prostorije u kojoj se eksperiment provodio bila je 22°C. Tetive su bile zamrznute, a nekoliko sati prije ispitivanja izvađene su iz zamrzivača kako bi se odledile. Prihvat u kidalicu riješen je na isti način kao i kod ovčjih tetiva, pomoću užadi (slika 24.). Međutim, nije bilo potrebno šivati ih, kao što je to bio slučaj kod ovčjih, već su bile savijene dva puta te je jedan kraj tetive bio u donjem čvoru, a drugi u gornjem. Kako se pri rastezanju ne bi dogodilo da se kraj tetive izvuče iz čvora, oko 2 cm vrha je ostavljeno s vanjske strane čvora. Brzina ispitivanja bila je 10 mm/min.

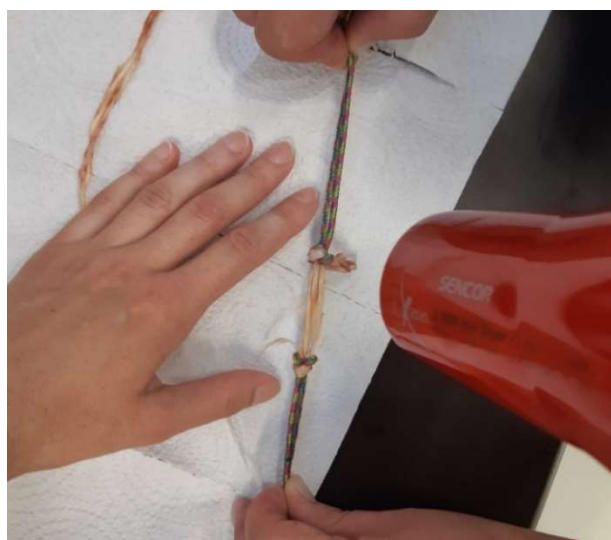


Slika 24. Statičko vlačno ispitivanje ravne tetive



Slika 25. Ljudska tetiva mišića gracilisa

Za dodatno osiguranje od izvlačenja, bilo je potrebno osušiti tetivu. Mokra bi klizala u čvoru te ne bi došlo do pucanja već izvlačenja. Sušenje je bilo na zraku, a prije samog ispitivanja, osušene su dodatno



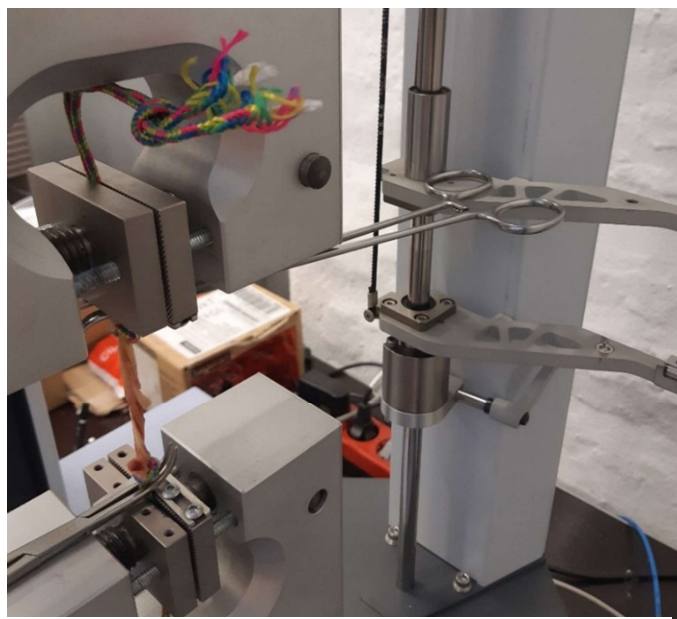
Slika 26. Sušenje tetive prije ispitivanja

hladnim zrakom sušila za kosu (slika 26.).

Kod ispitivanja uvijenih tetiva, bilo je potrebno osigurati od odmotavanja, odnosno rotiranja užadi. Fiksacija je ostvarena na isti način kao i s ovčjim tetivama, pomoću hvataljki za prepariranje. Škare su bile oslonjene na kidalicu kako se ne bi pomicale. Fiksacija kod gornjeg i donjeg čvora prikazana je na slikama 27. i 28.



Slika 28. Fiksacija uvijene tetive - donje uže



Slika 27. Fiksacija uvijene tetive - gornje uže

5. REZULTATI EKSPERIMENTALNOG ISPITIVANJA

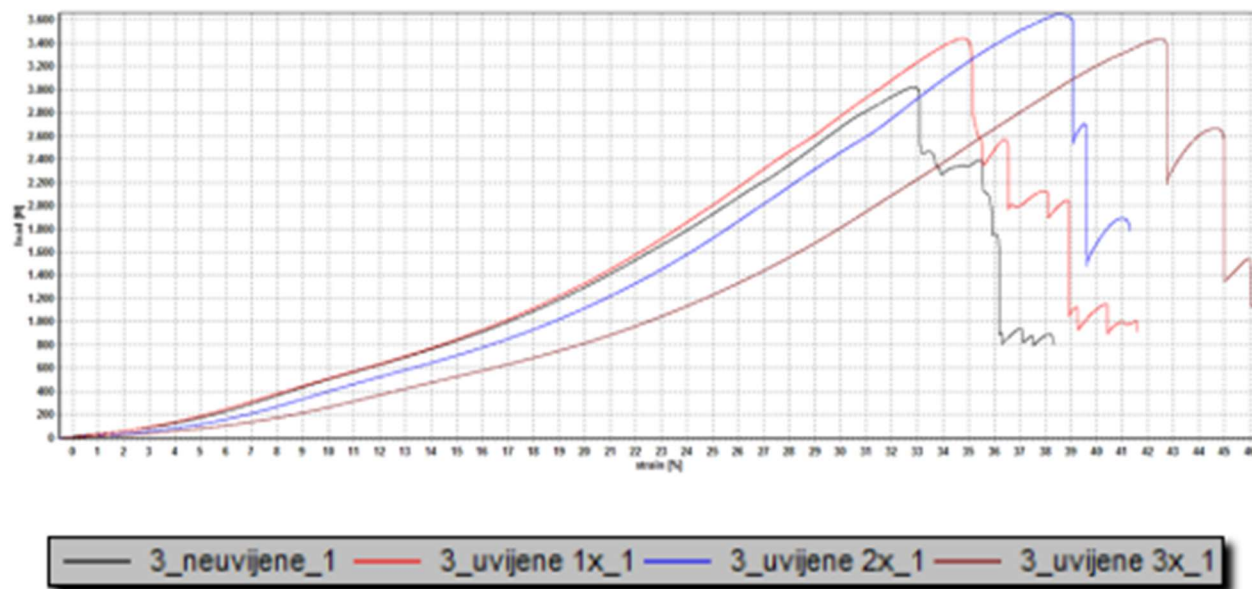
5.1. Ispitivanje užadi

Tijekom ispitivanja užadi, vrijednost koja se mjerila je maksimalna sila. Razmak čeljusti postavljen je na pretpostavljenu duljinu presađka tetive, 10 cm. Prirast sile ispitivanja je 10 N/s. U tablici 3. su prikazane maksimalne sile postignute s 3 ravne niti te sile koje su postignute kada su se 3 niti uvile za kut od 360°, 720° i 1080°. Statističkom analizom dobiven je prosjek iznosa sile i standardno odstupanje.

Tablica 3. Iznosi maksimalne sile dobivene ispitivanjem 3 niti užeta

Uzorak br.	Maksimalna sila pod različitim kutovima uvijanja [kN]			
	0°	360°	720°	1080°
1.	3,019	3,441	3,654	3,439
2.	3,261	3,548	3,363	3,336
3.	2,626	3,559	3,620	3,305
4.	2,75	3,236	3,251	2,628
5.	3,189	3,294	2,943	2,977
Σ	14,845	17,078	16,831	15,685
\bar{u}	2,969	3,4156	3,3662	3,137
u	3±0,11	3,4±0,06	3,4±0,12	3,1±0,13

Prema rezultatima je vidljivo da se ojačanje postiže motanjem niti. Prema prosjeku se vidi da je ojačanje najveće u slučaju uvijanja za kut od 360° . Povećanjem kuta na kut od 720° i 1080° također dovodi do veće maksimalne sile, ali u manjem postotku nego pod kutem od 360° . Može se zaključiti da je pretpostavka da će površinski pritisak među nitima utjecati nepovoljno na maksimalnu silu točna. Postotak povećanja maksimalne sile kod uvijenih uzoraka naspram neuvijenih prikazan je u tablici 4.



Slika 29. Grafički prikaz rezultata 1. uzorka užadi - 3 niti

Kod kuta od 1080° došlo je i do manje sile od sile neuvijenog uzorka te je u prosjeku maksimalna sila veća za samo 6,2 %. Za ispitivanje tetiva dolaze u obzir samo kutevi 360° i 720° . Na slici 29. je prikazan dijagram sila-deformacija prikazan za prvi uzorak od 3 niti bez uvijanja, te uvijene za sve kuteve. U tom slučaju, maksimalna sila najveća je kod kuta od 720° . Vidljivo je da je ponašanje materijala slično, samo je iznos maksimalne sile veći te je uz to i deformacija veća.

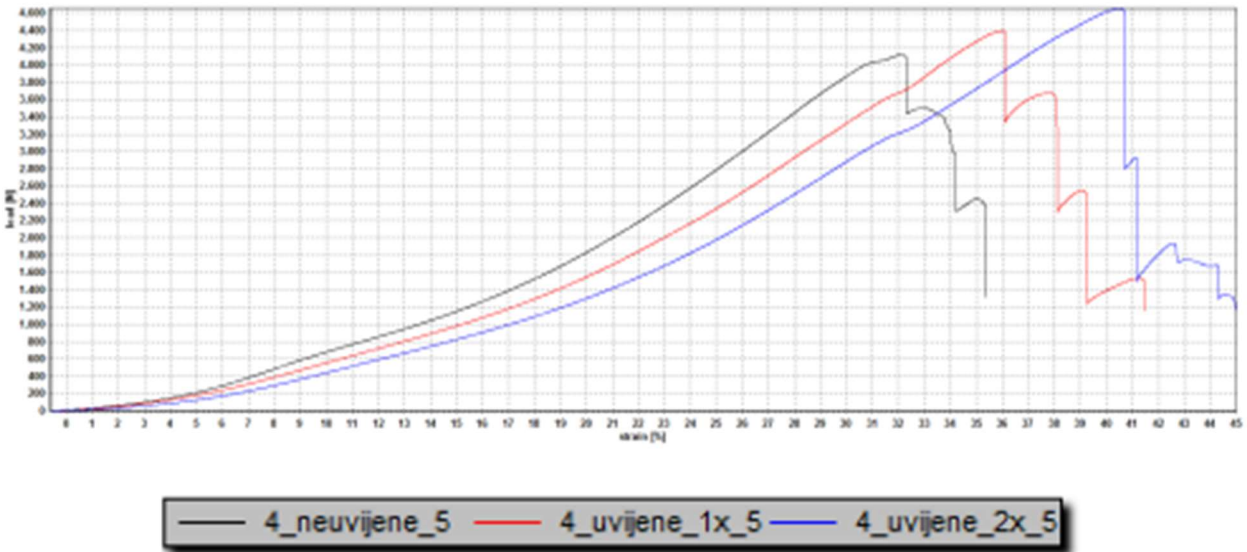
Tablica 4. Postotak povećanja maksimalne sile kod uvijenih uzoraka s 3 niti

Uzorak br.	Postotak povećanja maksimalne sile pod različitim kutovima uvijanja		
	360°	720°	1080°
1.	14 %	21 %	13,9 %
2.	8,8 %	3,1 %	2,3 %
3.	35,5 %	37,9 %	25,9 %
4.	17,7 %	18,2 %	-4,5 %
5.	3,3 %	-7,8 %	-6,7 %
\bar{u}	16 %	14 %	6,2 %

Tablica 5. Iznosi maksimalne sile dobivene ispitivanjem 4 niti užeta

Uzorak br.	Maksimalna sila pod različitim kutovima uvijanja [kN]		
	0°	360°	720°
1.	4,266	3,711	4,112
2.	4,136	4,536	4,465
3.	4,643	4,093	4,09
4.	4,335	3,989	3,98
5.	4,121	4,396	4,650
Σ	21,501	20,725	21,297
\bar{u}	4,3002	4,145	4,2594
u	4,3±0,09	4,2±0,13	4,3±0,11

Ispitivanje užadi s 4 niti provedeno je na isti način, osim što se uvijalo samo za 360° i 720° jer je bilo okom vidljivo da je napetost prevelika kod kuta od 1080°, a što se dalo zaključiti i iz rezultata dobivenih s 3 niti. Rezultati ispitivanja te vrijednosti dobivene statističkom analizom su u tablici 5.



Slika 30. Grafički prikaz rezultata 5. uzorka užadi - 4 niti

Na slici 30. je grafički prikaz ponašanja materijala kod ispitivanja 5. uzorka s 4 niti. Kao i kod ispitivanja uzoraka s 3 niti, vidljivo je da je ponašanje materijala slično, ali se najveća maksimalna sila postiže u slučaju kuta od 720°.

Postotak povećanja maksimalne sile kod uvijenih uzoraka naspram neuvijenih prikazan je u tablici 6. Po prosjeku rezultata jasno je da u slučaju uvijanja od 360° nije došlo do ojačanja, već suprotno. Uvijeni uzorci su postigli manju maksimalnu silu za u prosjeku 3,3 %. U slučaju uvijanja za 720° došlo je do neznatno boljeg rezultata, povećanje maksimalne sile za 1 %. Može se zaključiti da je slučaj s tetivom od 4 niti nepovoljniji slučaj kojemu bi trebalo posvetiti posebnu pažnju u daljnjim istraživanjima.

Tablica 6. Postotak povećanja maksimalne sile kod uvijenih uzoraka s 4 niti

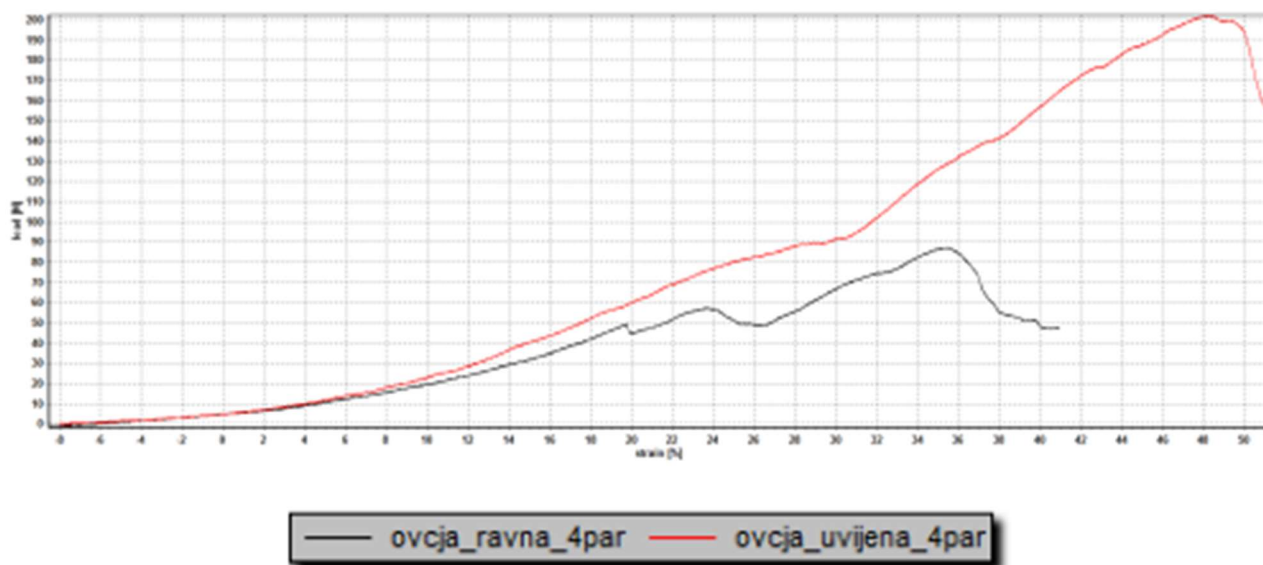
Uzorak br.	Postotak povećanja maksimalne sile pod različitim kutovima uvijanja	
	360°	720°
1.	-13,0%	3,6%
2.	9,7%	8,0%
3.	-12,0%	-12,0%
4.	-8,0%	-7,2%
5.	6,7%	12,8%
\bar{u}	-3,3%	1,0%

5.2. Ispitivanje ovčjih tetiva

Uzorci ovčjih tetiva bili su prekratki da bi se dobile 3 niti savijanjem. Tetiva je bila presavinuta samo jednom. S obzirom na promjer, duljinu i broj niti odabran je kut za uvijanje od 540°. Tim kutom se osigurava spiralna struktura uzorka, a ne ostvaruje se preveliki pritisak među nitima. Titive su bile jako različitih svojstava (duljina, presjekom jednolikost presjeka) pa su iz tog razloga iznosi sile jako različiti. Također, zbog loših fizikalnih svojstava pojedinih uzoraka, nije došlo do povećanja maksimalne sile pri motanju. Međutim, kod tetiva koje su imale relativno jednolik presjek, relativno dobru debljinu i duljinu, te slična svojstva između tetive s lijeve i desne noge, dobio se odličan rezultat. U tablici 6 prikazani su iznosi maksimalnih sila kod ispitivanih parova tetiva. Bez obzira na velik broj loših uzoraka tetiva, prosječno povećanje maksimalne sile iznosi 30%. Tetiva u paru koja je bila uvijena bila je deblja i jednolikog presjeka. Zaključuje se da model ispitivanja potvrđuje početnu hipotezu da je moguće uvijanjem povećati čvrstoću.

Tablica 7. Iznosi maksimalne sile dobivene ispitivanjem ovčjih tetiva

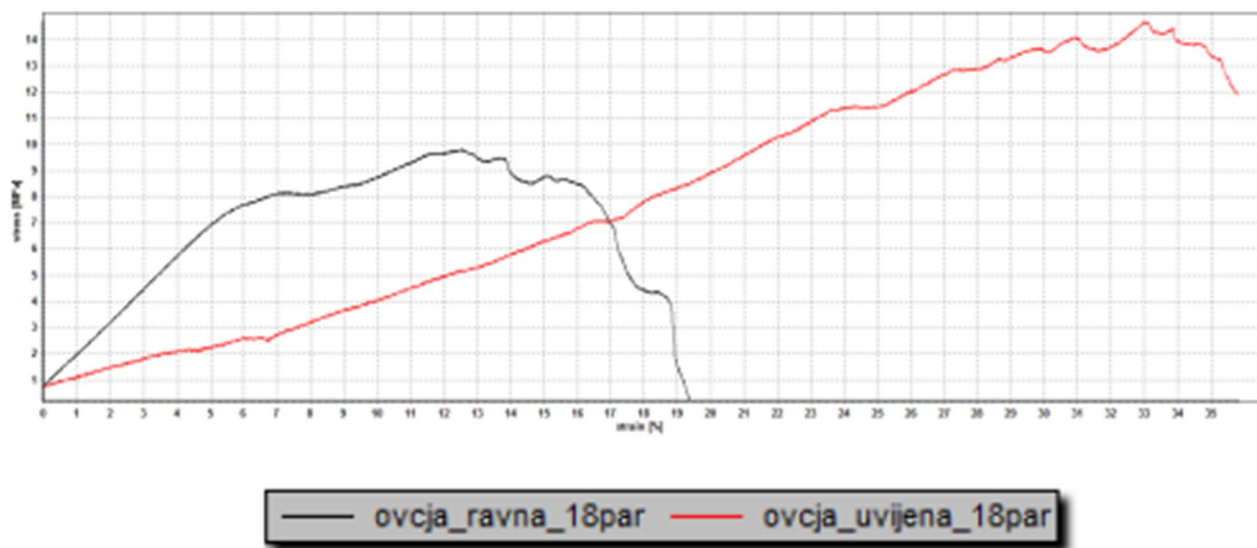
Uzorak br.	Maksimalna sila pod različitim kutovima uvijanja [kN]		
	0° [N]	540° [N]	stupanj ojačanja
1.	39,38	20,30	-51,5 %
2.	72,94	118,66	62,7 %
3.	87,18	201,90	132,0 %
4.	30,94	65,82	127,0 %
5.	91,22	59,30	-35,0 %
6.	34,28	8,82	-74,3 %
7.	42,88	84,96	98,1 %
8.	102,98	288,00	179,7 %
9.	221,88	297,16	33,9 %
10.	38,78	18,86	-51,4 %
11.	323,90	150,94	-53,4 %
12.	107,52	25,68	-76,1 %
13.	85,10	137,40	61,5 %
14.	100,98	25,90	-74,4 %
15.	44,70	32,34	-27,7 %
16.	590,04	483,08	-18,1 %
17.	64,68	93,12	44,0 %
18.	46,58	224,80	382,6 %
19.	269,28	216,28	-19,7 %
20.	73,36	56,30	-23,3 %
ū	123,43	130,48	30,8 %



Slika 31. Grafički prikaz rezultata ispitivanja ovčjih tetiva - 4. par



Slika 32. Grafički prikaz rezultata ispitivanja ovčjih tetiva - 8. par



Slika 33. Grafički prikaz rezultata ispitivanja ovčjih tetiva - 18. par

Slike 31., 32. i 33. prikazuju dijagrame sila-deformacija za 3., 8., i 18. par ovčjih tetiva. Crvena linija prikazuje uvijenu tetivu, dok crna prikazuje ravnu tetivu. Vidljivo je da se, osim što se iznos sile povećava, iznos produljenja također drastično povećava. Takav rezultat je dobar iz razloga što pokazuje da se tetiva pod opterećenjem može više produljiti bez ulaska u plastično područje, a to pridonosi boljoj stabilnosti koljena. Na prvom dijagramu je čak i ponašanje ravne i uvijene tetive slično, samo su iznosi maksimalne sile kod uvijene veći. Mali padovi sile koji se pojavljuju u dijagramu nakon čega sila opet raste pokazuju pucanje kolagenih vlakana unutar tetive što se ne smatra rupturom. Ruptura je tek kada sva vlakna jedne (ili više) niti popucaju te se tetiva razdvoji.

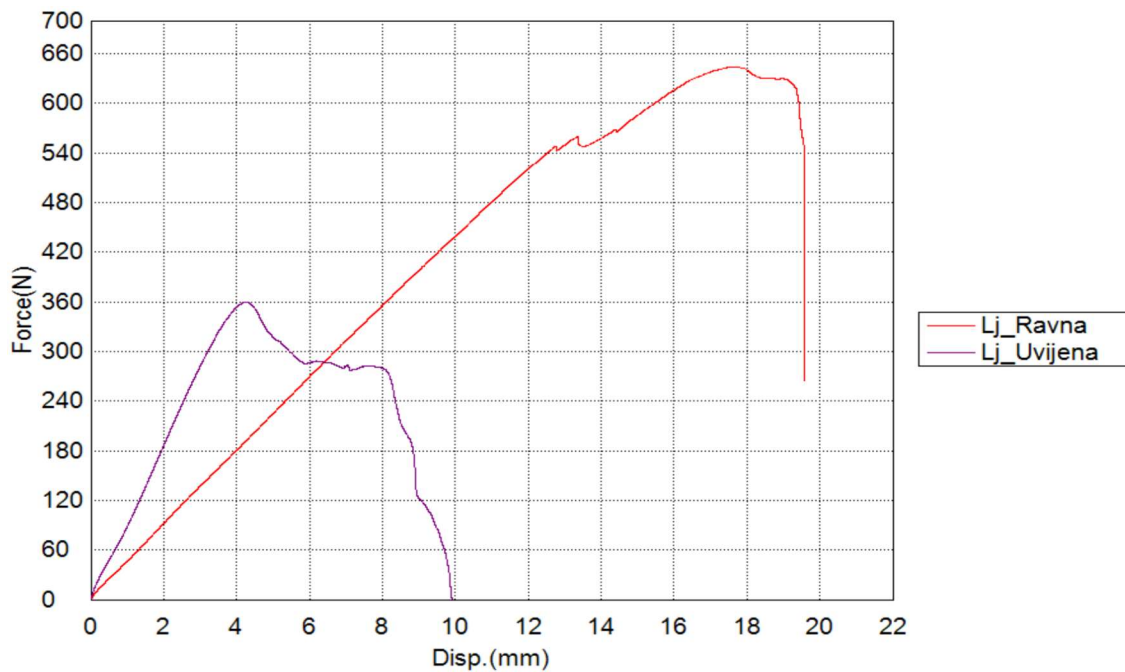
5.3. Ispitivanje ljudskih tetiva

Za ispitivanje ljudskih tetiva dobivena su 3 para tetiva mišića gracilisa (*GR*), te 1 par tetiva mišića semitendinosusa (*ST*). U tablici 8. prikazani su rezultati eksperimentalnog ispitivanja.

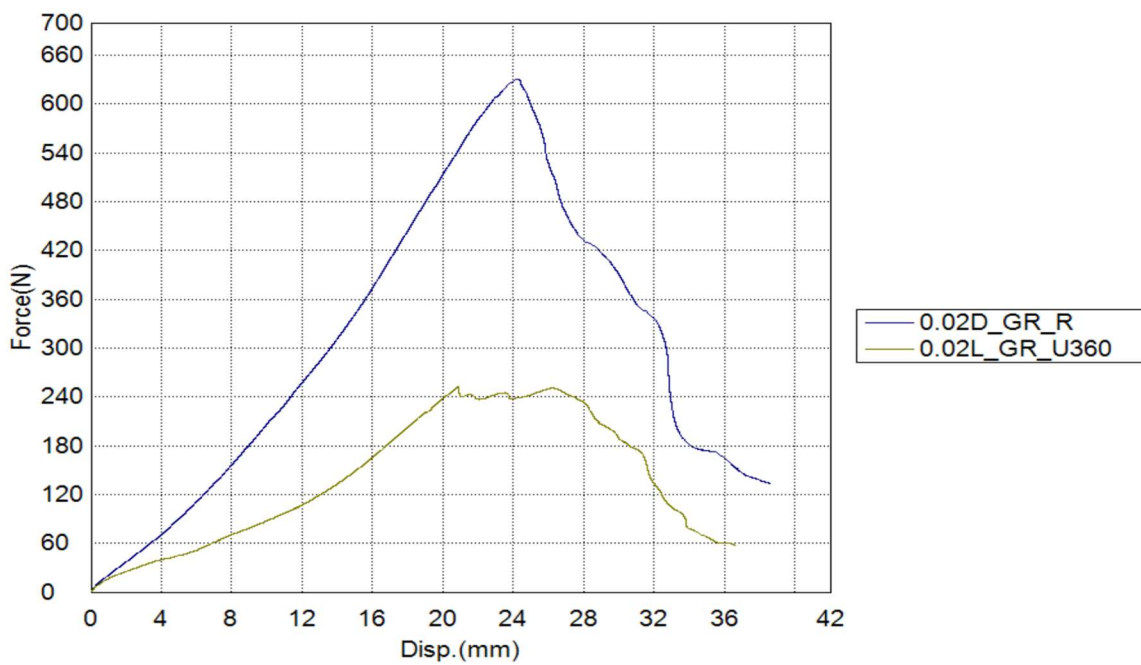
Tablica 8. Iznosi maksimalnih sila kod ispitivanje ljudskih tetiva

LJUDSKE TETIVE					
	NAZIV TETIVE	RAVNA	UVIJENA		STUPANJ OJAČANJA
		MAX SILA (N)	MAX SILA (N)	KUT UVIJANJA	
1.	0,04 GR	644,134	359,372	360°	-44,2 %
2.	0,02 GR	630,573	252,051	360°	-60,0 %
3.	0,01 GR L	-	332,112	360°	-47,3 %
4.	0.01 GR D	-	897,241	540°	42,3 %
5.	0.01 ST	326,767	392,195	540°	20,0 %

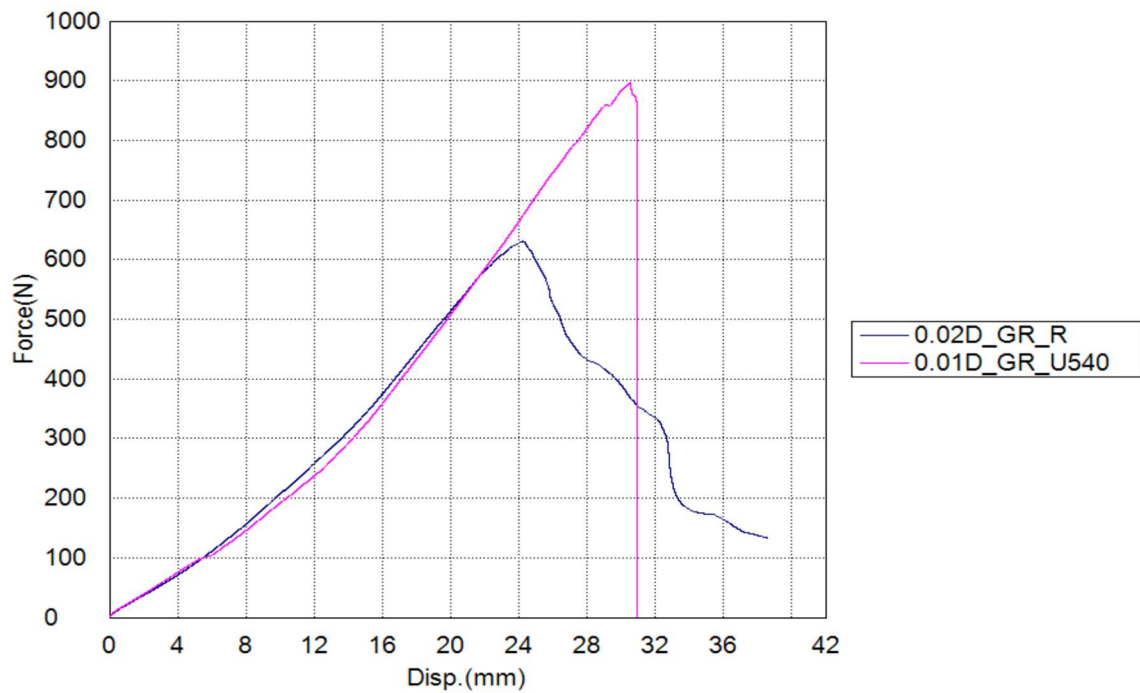
Naziv tetive označava pacijenta i vrstu tetive. Tri para tetiva ispitana su tako da je jedna tetiva bila neuvijena, a druga uvijena. Kod prva dva para postignuta je znatno manja maksimalna sila kod uvijene tetive. Zatim je iz trećeg para tetiva, lijeva tetiva bila ispitana također uvijena za 360°. Nakon što je dobiven sličan rezultat kao u prva dva para, a s obzirom na mali broj uzoraka, odlučeno je da se i desna tetiva iz istog para uvije, ali za veći kut, 540°. Maksimalne sile kod neuvijenih tetiva iz prva dva para sličnog su iznosa. Iz tog razloga, moglo se pretpostaviti da će i tetive iz 3. para imati sličan rezultat jer su istog tipa (*GR*) da ih se ispitivalo neuvijene. Kada se iznos maksimalne sila tetive uvijene za 540 stupnjeva iz 3. para usporedi s iznosom maksimalne sile ravne tetive iz 2. para, dobiva se da je sila kod uvijene veća za 42,3%. Iz tog razloga, zadnji par tetiva mišića semitendinosusa ispitivao se tako da je jedna tetiva ravna, a druga uvijena za 540°. Dobivena je za 20% veća maksimalna sila kod uvijene tetive nego kod ravne. Grafički prikaz rezultata ispitivanja ljudskih tetiva prikazan je na slikama 34., 35., 36. i 37.



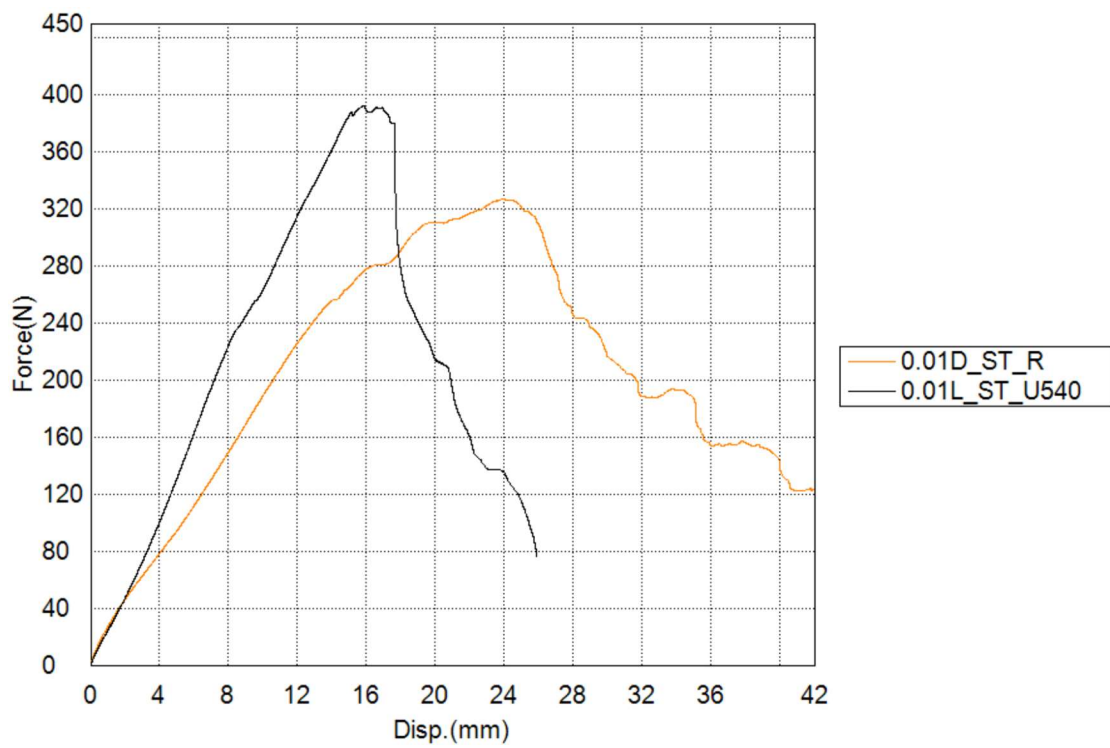
Slika 34. Grafički prikaz rezultata ljudskih tetiva - 1. par



Slika 35. Grafički prikaz rezultata ljudskih tetiva - 2. par



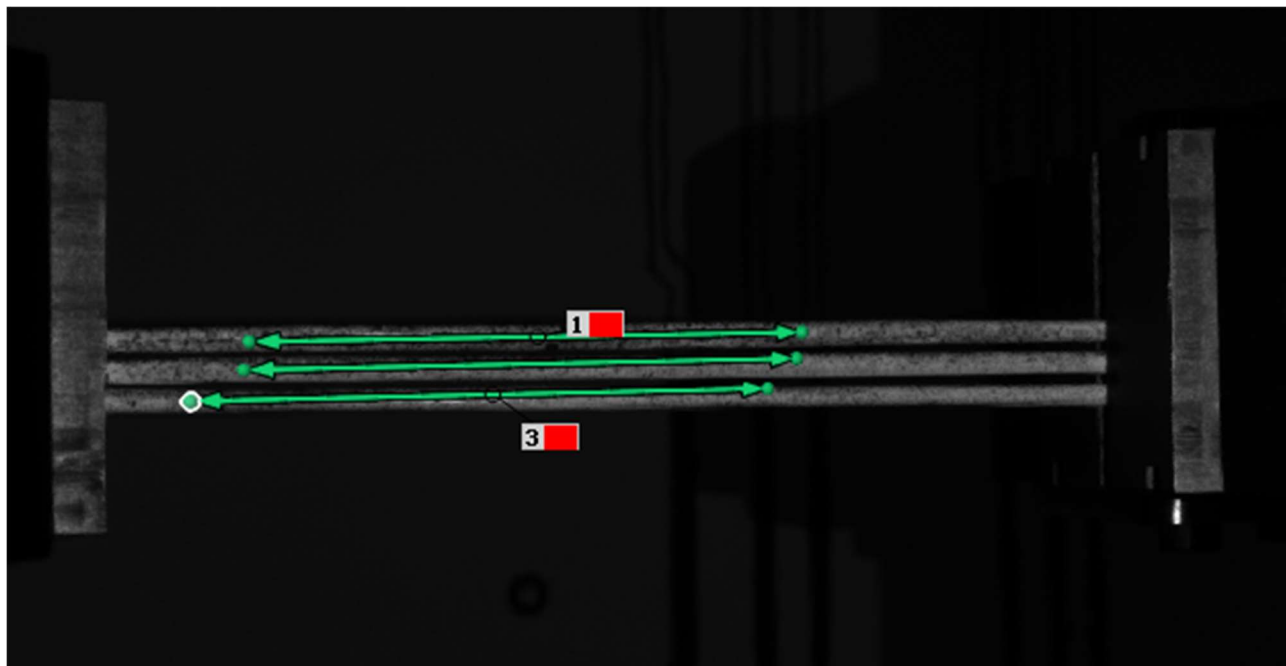
Slika 36. Grafički prikaz rezultata ljudskih tetiva - 3. par



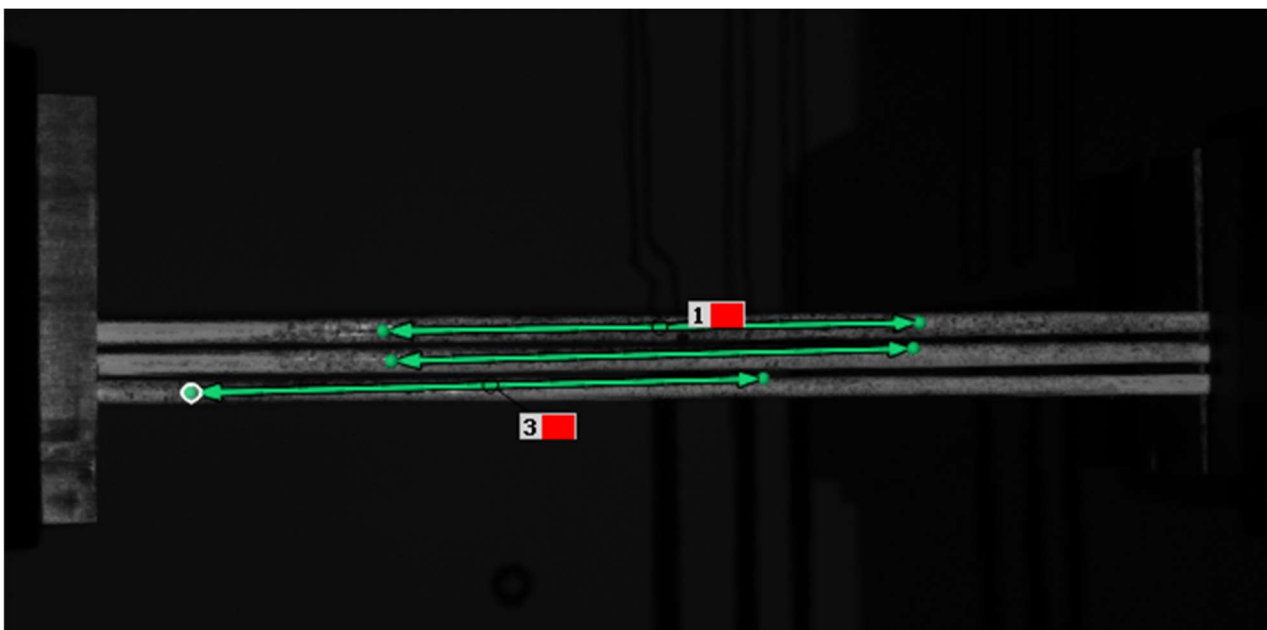
Slika 37. Grafički prikaz rezultata ljudskih tetiva - 4. par

5.4. Ispitivanje užadi sustavom ARAMIS

Pri statičkom vlačnom ispitivanju užeta, deformacija je praćena i sustavom ARAMIS. Rezultati mjerenja prikazani su na slikama 38. i 39. Vidljivo je na slici 39. da iz ćeljusti proklizavaju dvije niti te opterećenje preuzima samo jedna nit. Dakle, i u ovako idealnim laboratorijskim uvjetima, teško je ostvariti raspodjelu opterećenja na sve tri niti štrika. Iz tog razloga, analogijom se pretpostavlja da se ni u operativnom zahvatu ne ostvaruje dobra raspodjela opterećenja te tetiva puca ranije kao da je promjer presadka samo jedna nit, a ne sve tri.



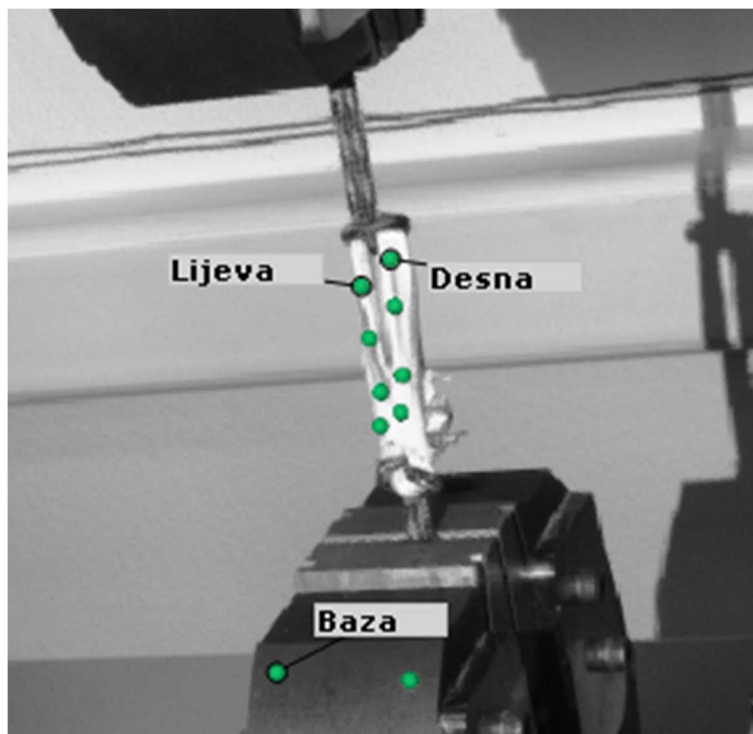
Slika 38. Ispitivanje štrika ARAMIS-om - početno stanje



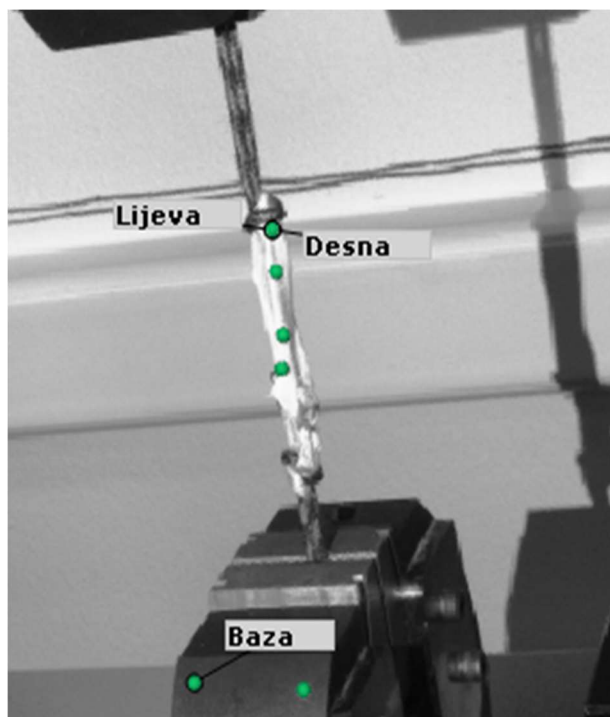
Slika 39. Ispitivanje štrika ARAMIS-om - završno stanje

5.5. Ispitivanje ovčjih tetiva sustavom ARAMIS

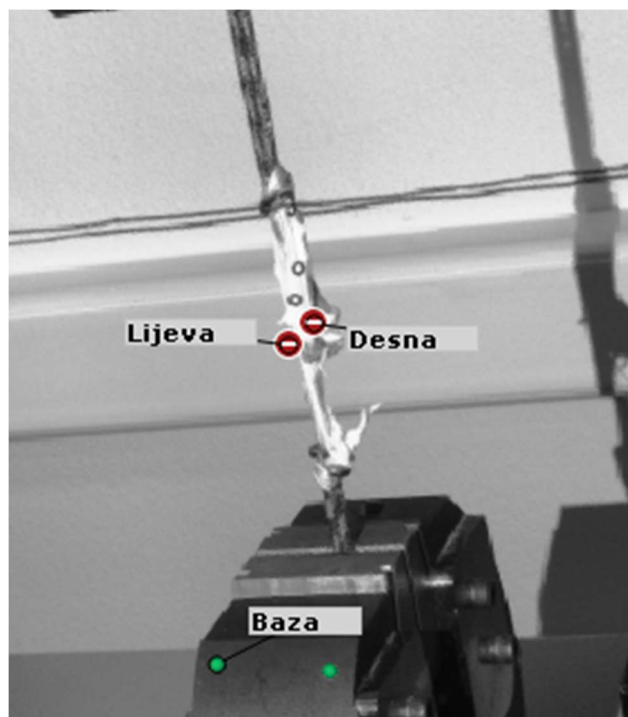
Pri statičkom vlačnom ispitivanju ovčjih tetiva, deformacija je također praćena sustavom ARAMIS. Kamere su pratile naljepnice zaljepljene na tetive kao referentne točke (slika 40.). Međutim, tijekom razvlačenja, čvor koji je napravljen od užadi se stezao oko tetive te se za par milimetara zarotirao (slika 41.). Tada kamera više nije mogla pratiti referentne točke te se prestala mjeriti deformacija (slika 42.). Takav bi se problem mogao riješiti čeljustima koje bi spriječile rotaciju. Također, u tom slučaju prihvat s užadi nije idealno rješenje. Kako bi se izbjegao čvor, trebalo bi dizajnirati male koloture prilagođene dimenzijama tetiva za ispitivanje na kidalici, kao što se ispituje užad prema normi. Tako bi se dobila bolja usporedba s realnim pričvršćivanjem tetiva za kost u operativnom zahvatu, a spriječila bi se rotacija jer ne bi bilo stezanje u čvoru koje je uzrokovalo rotaciju.



Slika 41. Ispitivanje ovčjih tetiva ARAMIS-om - početno stanje



Slika 40. Preklapanje referentnih točaka



Slika 42. Pucanje ovčje tetive

6. RASPRAVA

Statičkim vlačnim ispitivanjem užadi s različitim kutevima uvijanja, dobivena je veća maksimalna sila nego kod ravnih uzoraka. Najveći stupanj povećanja maksimalne sile dobiven je pri kutu od 360° kod užeta s 3 niti ($F_{max} = 3,62 \text{ kN}$). Statističkom analizom dobiven je rezultat da je u prosjeku stupanj povećanja maksimalne sile ipak u prosjeku veći pri kutu od 360° . Ako se bolje pogledaju vrijednosti, razlog takvom rezultatu je zadnji uzorak koji nije imao veću maksimalnu silu od neuvijene. Moguće je da je taj uzorak bio krivo postavljen u čeljusti. U svakom slučaju, povećanje sile pojavilo se pri kutevima 360° i 720° , ali veličina kuta nije bitno razlikovala iznos te maksimalne sile. Kod ispitivanja uzoraka užadi s 4 niti, povećanje maksimalne sile nije statistički značajno (1 %). U slučaju motanja za 360° u prosjeku nije došlo do povećanja već do smanjenja maksimalne sile (-3,3 %). Zaključuje se da je površinski pritisak među nitima toliko velik da nepovoljno utječe na čvrstoću uzorka. Povoljniji slučaj je s 3 niti.

Statičkim vlačnim ispitivanjem na ovčjim tetivama dobiveni su vrlo različiti rezultati, a razlog tomu je velika razlika u fizičkim svojstvima tetiva (promjer, duljina, jednolikost promjera, oštećenja prilikom odvajanja od mišića). Međutim, rezultati kod tetiva koje imaju jednoliki presjek, nisu pretanke na dijelovima ili oštećene, pokazuju da je kod uvijene čak do 4 puta veća maksimalna sila. Sve su tetive bile uvijene za kut od 540° obzirom da su uzroci imali samo dvije niti. Statističkom obradom rezultata dobiven je prosjek povećanja maksimalne sile od čak 30 %. Ovakav rezultat potvrđuje hipotezu o povoljnom utjecaju motanja na čvrstoću tetive te je ispitivanje zato nastavljeno na ljudskim tetivama.

Za ispitivanje hipoteze na ljudskim tetivama, dobiven je pristup samo četiri para tetiva. Tako mali broj uzoraka nije dovoljan za statističku analizu i zaključak, ali je korisno bilo ispitati ih kako bi se provjerilo koliko se drugačije ponašaju od životinjskih tetiva te ima li eksperiment smisla i na ljudskom tkivu. Također, one su dovoljno dugačke da ih se može presavinuti 2 puta pa je bila prilika za ispitati koji kut dovodi do povećanja maksimalne sile kod 3 niti. Pretpostavljeni kut je 360° zbog rezultata dobivenih na užadi. Međutim, kod ispitivanja uvijanjem za 360° dobivena je maksimalna sila za 60 % manja od ravne tetive. Razlog tomu je što su niti tetive tanje od niti užeta, tj. tetiva nije svugdje istog poprečnog presjeka po svojoj duljini pa analogija ne može biti tako direktna. S obzirom da su tetive po teksturi i promjeru slične ovčjima, odlučeno je tetive ispitati uvijene za isti kut kao i

ovčje, 540°. Dobiven je rezultat koji pokazuje povećanje maksimalne sile za 40 %. Zbog malog broja uzoraka, nije moguće ništa zaključiti statističkom analizom, ali ovakvo ispitivanje daje dobar uvid u ponašanje ljudskim tetiva kod statičkog vlačnog ispitivanja. Postavlja se pitanje je li analogija užadi dovoljno dobra. Uže koje je korišteno je već ispleteno, deblje su niti i od umjetnog je materijala. Za pravu analogiju u budućim istraživanjima bilo bi bolje potražiti prirodne materijale za ispitivanje, npr. biljne uzorke. Također, potrebno je uzeti faktore godina, antropoloških mjera i zdravstvenog stanja kadavera s kojih su tetive dobivene. Međutim, s obzirom da se ne ispituje iznos maksimalne sile, već samo usporedba iznosa u paru s istog kadavera, takvi podaci ne bi trebali uvelike utjecati na rezultate. Osim toga, potreban je veći uzorak životinjskih i ljudskih tetiva za bolju statističku analizu podataka. Da bi se izbjegla raznolikost u svojstvima životinjskih tetiva, potrebno je imati uzorke sa različitih kadavera životinje te ispitivati isti tip tetive. U svakom slučaju, postavljena hipoteza ovim rezultatima je potvrđena.

7. ZAKLJUČAK

Ruptura prednjeg križnog ligamenta ozbiljna je ozljeda te ju je često potrebno liječiti operativnim zahvatom. Pitanje je može li se na neki način poboljšati stabilnost koljena i čvrstoća presadka. Iz tog razloga, ispitivano je hoće li tetivni presadak izdržati veću silu ako je se, uz savijanje, dodatno i uvije za određeni kut. Prema rezultatima ovog rada, može se zaključiti da se maksimalna sila povećava za oko 30% ako se tetivni presadak uvije za kut od 540° . Takav rezultat dobiven je na životinjskim i ljudskim tetivama. Međutim, zbog pristupa malom uzorku tetiva za ispitivanje, potrebno je u daljnjem istraživanju dobiti rezultate na većem uzorku. Da bi se izbjegla raznolikost u svojstvima životinjskih tetiva, potrebno je imati uzorke sa različitih kadavera životinje te ispitivati istu vrstu tetive. Također, trebalo bi razmotriti analogiju s užadi, s obzirom da su u ovom radu ispitana užad od umjetnog materijala koji se ne ponaša slično kao biološki materijali. Bolja analogija dobila bi se korištenjem užadi izrađenih od prirodnih materijala (biljnog porijekla) što može biti početni korak za daljnji rad na ovom području.

LITERATURA

- [1] Marina Ivančević: Rehabilitacija nakon ozljede prednjeg križnog ligamenta; Medicinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 2018.
- [2] Sebastian Kopf, Volker Musahl, Scott Tashman, Michal Szczodry, Wei Shen, Freddie H. Fu: A systematic review of the femoral origin and tibial insertion Morphology of the ACL; Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 2009.
- [3] Matthew J. Kraeutler, MD, Ryan M. Wolsky, BS, Armando F. Vidal, MD, and Jonathan T. Bravman, MD: Anatomy and Biomechanics of the Native and Reconstructed Anterior Cruciate Ligament Surgical Implications; The Journal of Bone and Joint Surgery, 2017
- [4] Krunoslav Ormuž: Skripta iz predmeta Elementi transportnih uređaja, poglavlje 02, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu
- [5] J.J. Evans, I.M.L. Ridge: Compliant Structures in Nature and Engineering, Chapter 7 Rope and rope-like structures; WIT Transactions on State of the Art in Science and Engineering, Vol 20, 2005
- [6] Dr Nick McCormick and Dr Jerry Lord: Digital Image Correlation; Materials Today, Vol 13, No. 12, 2010.
- [7] Ivana Vranić: Utjecaj tehnike zatvaranja reza cistotomije na maksimalni intravezikalni tlak u svinjskom mokraćnom mjehuru, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2018.

- [8] Vanessa Pickerd: Optimisation and Validation of the ARAMIS Digital Image Correlation System for use in Large-scale High Strain-rate Events, Maritime Division, 2013.
- [9] Aramis User Information – Hardware, GOM mbH, Njemačka 2009.
- [10] Jie Wang, Baoxing Chen, Hai Wang and Anthony M Waas: Experimental study on the compressionafter-impact behavior of foam-core sandwich panels, Journal of Sandwich Structures and Materials 2015,