

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Frane Pamuković

Zagreb, 2012.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor

Prof. dr. sc. Janoš Kodvanj, dipl. ing.

Student

Frane Pamuković

Zagreb, 2012.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija, opremu Laboratorija za eksperimentalnu mehaniku Fakulteta strojarstva i brodogradnje, te literaturu navedenu na kraju ovog rada.

Zahvaljujem se na pomoći voditelju rada prof. dr. sc. Janošu Kodvanju čiji su savjeti bili od neprocjenjive vrijednosti. Također, zahvaljujem se i dr. sc. Anti Bakiću na nesebičnoj pomoći i usmjeravanju tijekom izrade diplomskog rada, te asistentu mag. mech. ing. Martinu Surjaku na pomoći pri korištenju opreme Laboratorija za eksperimentalnu mehaniku. Zahvalu dugujem i laborantu Gordanu Plačku za entuzijazam kojim je prilazio problemima nastalim tijekom provođenja eksperimenata, a čijom je zaslugom postignuta iznimna preciznost mjerenja izradom posebnog postolja za provedena mjerenja.

Posebne zahvale dugujem svojoj obitelji i prijateljima na podršci tijekom studiranja.

Frane Pamuković

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VI
1. Uvod.....	1
2. Osnove osteosinteze	3
2.1. Interfragmentarna kompresija	5
3. Vanjski fiksatori pri liječenju fraktura kostiju	7
3.1. Konstrukcija vanjskog fiksatora.....	9
4. Eksperimentalno ispitivanje stabilnosti nove konstrukcije fiksatora	13
4.1. Mehaničke osnove eksperimenta	13
4.2. Uređaj za statičko opterećenje.....	17
4.3. Optički mjerni sustav Aramis.....	18
4.3.1. Kalibracija mjernog sustava	21
4.3.2. Priprema ispitnih uzoraka	24
4.4. Provedba eksperimenta	27
4.4.1. Ispitivanje pri aksijalnom opterećenju.....	27
4.4.2. Ispitivanje pri savojnom opterećenju u četiri točke.....	28
5. Rezultati eksperimentalnog ispitivanja stabilnosti fiksatora	30
5.1. Rezultati ispitivanja stabilnosti pri aksijalnom opterećenju.....	30
5.2. Rezultati ispitivanja stabilnosti pri savojnom opterećenju.....	37
6. ZAKLJUČAK	44
7. LITERATURA	45

POPIS SLIKA

Slika 1. Prva faza osteosinteze	3
Slika 2. Druga faza osteosinteze	4
Slika 3. Treća faza osteosinteze	4
Slika 4. Zavisnot vrste novonastalog tkiva o koeficijentu ϵ	5
Slika 5. Vrste okvira vanjskog fiksatora	7
Slika 6. Nova konstrukcija fiksatora	11
Slika 7. Uzdužni presjek fiksatora s pozicijama	11
Slika 8. Presjeci zgloba s polugom.....	12
Slika 9. Dijagram kidanja F- Δ L	14
Slika 10. Dijagram naprezanje – istežanje σ - ϵ	15
Slika 11. Statička kidalica Messphysik Beta 50-5	17
Slika 12. Optički mjerni sustav Aramis	18
Slika 13. Faseta veličine 15x15 s dva preklapajuća piksela.....	19
Slika 14. Epipolarna ravnina	20
Slika 15. Kalibriranje Aramis sustava.....	21
Slika 16. Kalibracijski objekt	21
Slika 17. Parametri sutava u zavisnosti o mjernom volumenu.....	22
Slika 18. Parametri kalibracije sustava Aramis.....	23
Slika 19. Epruveta od poliacetala	24
Slika 20. Vijci (pinovi) za kosti	24
Slika 21. Nanošenje rastera na model ispitne skupine	25
Slika 22. Uzorci rastera za razne veličine mjerne površine	25
Slika 23. Dobiveni raster na površini fiksatora	26
Slika 24. Fiksator u čeljustima statičke kidalice	26
Slika 25. Mjerenje pomaka na modelu kontrolne skupine	27
Slika 26. Mjerenje pomaka na ispitnom modelu.....	28
Slika 27. Fiksator Orthofix opterećen na savijanje	29
Slika 28. Model nove konstrukcije fiksatora opterećen na savijanje	29
Slika 29. Određivanje pomaka pri aksijalnom opterećenju u programu Aramis v6.2	30
Slika 30. Pomaci u smjeru osi y na modelima ispitne skupine s prekidom koštane mase	31
Slika 31. Pomaci u smjeru osi y na modelima kontrolne skupine s prekidom koštane mase ..	31
Slika 32. Pomaci u smjeru osi x na modelima ispitne skupine s prekidom koštane mase	32

Slika 33. Pomaci u smjeru osi x na modelima kontrolne skupine s prekidom koštane mase ..	32
Slika 34. Pomaci u smjeru osi z na modelu ispitne skupine s prekidom koštane mase	33
Slika 35. Pomaci u smjeru osi z na modelu kontrolne skupine s prekidom koštane mase.....	33
Slika 36. Pomaci u smjeru osi y na modelima ispitne skupine s ulomcima u kontaktu	34
Slika 37. Pomaci u smjeru osi y na modelima kontrolne skupine s ulomcima u kontaktu	34
Slika 38. Pomaci u smjeru osi x na modelima ispitne skupine s ulomcima u kontaktu	35
Slika 39. Pomaci u smjeru osi x na modelima kontrolne skupine s ulomcima u kontaktu	35
Slika 40. Pomaci u smjeru osi z na modelima ispitne skupine s ulomcima u kontaktu	36
Slika 41. Pomaci u smjeru osi z na modelima kontrolne skupine s ulomcima u kontaktu	36
Slika 42. Određivanje pomaka pri savojnom opterećenju u programu Aramis v6.2	37
Slika 43. Pomaci u smjeru osi y na modelima ispitne skupine s prekidom koštane mase	38
Slika 44. Pomaci u smjeru osi y na modelima kontrolne skupine s prekidom koštane mase ..	38
Slika 45. Pomaci u smjeru osi x na modelima ispitne skupine s prekidom koštane mase	39
Slika 46. Pomaci u smjeru osi x na modelima kontrolne skupine s prekidom koštane mase ..	39
Slika 47. Pomaci u smjeru osi z na modelu ispitne skupine s prekidom koštane mase	40
Slika 48. Pomaci u smjeru osi z na modelu kontrolne skupine s prekidom koštane mase.....	40
Slika 49. Pomaci u smjeru osi y na modelima ispitne skupine s ulomcima u kontaktu	41
Slika 50. Pomaci u smjeru osi y na modelima kontrolne skupine s ulomcima u kontaktu	41
Slika 51. Pomaci u smjeru osi x na modelima ispitne skupine s ulomcima u kontaktu	42
Slika 52. Pomaci u smjeru osi x na modelima kontrolne skupine s ulomcima u kontaktu	42
Slika 53. Pomaci u smjeru osi z na modelu ispitne skupine s ulomcima u kontaktu	43
Slika 54. Pomaci u smjeru osi z na modelu kontrolne skupine s ulomcima u kontaktu	43

POPIS TABLICA

Tablica 1. Maksimalni pomaci u smjeru osi y na modelima s prekidom koštane mase	31
Tablica 2. Maksimalni pomaci u smjeru osi x na modelima s prekidom koštane mase	32
Tablica 3. Maksimalni pomaci u smjeru osi y na modelima s ulomcima u kontaktu	34
Tablica 4. Maksimalni pomaci u smjeru osi x na modelima s ulomcima u kontaktu	35
Tablica 5. Maksimalni pomaci u smjeru osi y na modelima s prekidom koštane mase	38
Tablica 6. Maksimalni pomaci u smjeru osi x na modelima s prekidom koštane mase	39
Tablica 7. Maksimalni pomaci u smjeru osi y na modelima s ulomcima u kontaktu	41
Tablica 8. Maksimalni pomaci u smjeru osi x na modelima s ulomcima u kontaktu	42

POPIS OZNAKA

E	[N/mm ²]	- modul elastičnosti
F_e	[N]	- sila tečenja (razvlačenja)
F_k	[N]	- sila pri kojoj dolazi do loma epruvete
F_m	[N]	- maksimalna sila
L_0	[mm]	- početna mjerna duljine epruvete
R_e	[N/mm ²]	- granica razvlačenja
R_k	[N/mm ²]	- naprezanje pri kojem dolazi do loma epruvete
R_m	[N/mm ²]	- vlačna čvrstoća
$R_{p0,2}$	[N/mm ²]	- konvencionalna granica tečenja
ΔL	[mm]	- produljenje
ΔL_u	[mm]	- ukupno produljenje
ε	[mm/mm]	- deformacija, istezanje (relativno roduljenje)
σ	[N/mm ²]	- naprezanje
F	[N]	- sila
S_0	[mm ²]	- površina poprečnog presjeka
ε_{Atr}	[mm/mm]	- trajna plastična deformacija
ε_u	[mm/mm]	- vrijednost istezanja nakon loma
A	[%]	- istezljivost

SAŽETAK

Vanjska fiksacija je operacijsko liječenje prijeloma dugih kostiju upotrebom vanjskih konstrukcija koje se klinovima ili žicama vezuju za kost te tako imobiliziraju koštane ulomke odvojene mjestom prekida koštane mase.

Iako je i u mirnodopsko vrijeme jedan od najučestalijih oblika trauma koje se svakodnevno prijavljuju na odjelima prve pomoći, u ratnoj traumatologiji ove ozljede često dovode do preopterećenja bolničkih kapaciteta zbog izrazito velikog broja politraumatiziranih pacijenata u relativno kratkom vremenskom periodu. Upotrebom vanjskih fiksatora, te uz korištenje rendgena može se sanirati veliki broj ovakvih ozljeda u kratkom vremenskom roku.

U ovom radu ispitana je stabilnost i krutost prototipa novokonstruiranog fiksatora koji je izrađen od medicinskog čelika ISO 5832-1 u firmi Instrumentaria d.d., a rezultati su uspoređeni s rezultatima dobivenim na vanjskom fiksatoru Orthofix koji je u svakodnevnoj kliničkoj uporabi. Oba modela su imala isti raspored spojnih elemenata u prostoru. Utjecaj različitih konstrukcijskih rješenja na pomake karakterističnih točaka ispitan je pri statičkom ekscentričnom aksijalnom opterećenju i pri savijanju u četiri točke. Mjerenja su provedena s ulomcima tibije (plastični model tibije) u kontaktu na mjestu prekida, te s ulomcima međusobno udaljenim 10 mm što je predstavljalo defekt koštane mase.

Ključne riječi: vanjska fiksacija, osteosinteza, interfragmentarna kompresija, stabilnost konstrukcije, optički mjerni sustav, pomaci

1. Uvod

Prekidi koštanog tkiva koji se uobičajeno nazivaju lomovi ili frakture kostiju, jedan su od najučestalijih oblika trauma koji se svakodnevno prijavljuju na odjelima hitne pomoći, bilo da su nastala uslijed velikih udarnih sila tj. naprezanja na kosti ili kao posljedica oslabljene koštane strukture uslijed osteoporozе ili sličnih patoloških promjena u samoj strukturi kostiju. Ovakve ozljede još su učestalije u ratnim razdobljima kada često dolazi do preopterećenja bolničkih kapaciteta te se javila potreba za što bržim saniranjem politraumatiziranih pacijenata. O biološkoj pozadini cijeljenja kostiju biti će riječi u drugom poglavlju. Upotrebom vanjskih fiksatora, stabiliziraju se koštani ulomci odvojeni frakturom te se ubrzava proces zarastanja kosti, a pacijent se može oslanjati na traumatiziranu nogu ubrzo nakon implementacije fiksatora budući da on na sebe preuzima ukupno opterećenje.

Prva masovna upotreba vanjskih fiksatora pojavila se tijekom Vijetnamskog rata, dok povijest vanjskog fiksatora seže daleko u prošlost, prema nekim izvorima i do 400. g. p.n.e. kada je, pretpostavlja se, Hipokrat prvi izumio preteču današnjih vanjskih fiksatora.

Razvojem tehnologija proizvodnje, pronalaskom novih, lakših i otpornijih materijala, te boljim razumijevanjem procesa cijeljenja fraktura, vanjski fiksatori postaju sve manji dok u isto vrijeme moraju na sebe preuzeti sva opterećenja, što dovodi do potrebe za eksperimentalnim ispitivanjem stabilnosti i graničnog opterećenja fiksatora implementiranog na traumatiziranu kost. Više o upotrebi fiksatora pri liječenju prijeloma opisano je u trećem poglavlju, u kojem se ujedno razmatra i konstrukcija prototipa novog vanjskog fiksatora tvrtke Instrumentaria d.d.

U ovom radu dan je prikaz serije ovakvih ispitivanja vanjskog fiksatora kojeg proizvodi tvrtka Orthofix, te prototipa nove konstrukcije fiksatora hrvatskog proizvođača medicinske opreme Instrumentaria d.d. Cilj provedenih ispitivanja je utvrditi prednosti i mane nove konstrukcije fiksatora, što bi dalje vodilo ka optimizaciji proizvoda za serijsku proizvodnju.

Oba fiksatora podvrgnuta su identičnim ispitivanjima, detaljnije opisanim u četvrtom poglavlju, prvom, u kojem se optereti fiksatore aksijalnim opterećenjem koje je simuliralo opterećenja koja se javljaju prilikom oslanjanja na traumatiziranu nogu. Drugo ispitivanje odnosi se na savojno opterećenje u četiri točke, pri čemu je kao i kod aksijalnog opterećenja početni razmak među koštanim ulomcima iznosio 10 mm, kako bi osigurali da opterećenje ne prenose koštani ulomci. Oba ispitivanja ponovljena su i za slučaj da su se koštani ulomci dodirivali već na samom početku kako bi odredili količinu naprezanja koja se prenose na samu kost.

Konačni rezultati ispitivanja priloženi u petom poglavlju dali su prilično dobar uvid u prednosti i mane ovih fiksatora, pri čemu je vidljivo kako nova konstrukcija bolje podnosi savojna, dok Orthofix bolje prenosi aksijalna opterećenja, što je detaljnije prikazano u navedenim poglavljima.

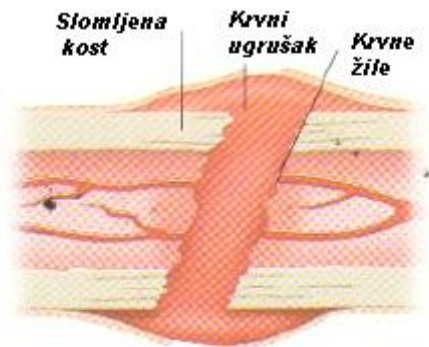
2. Osnove osteosinteze

Nužnost upotrebe vanjskih fiksatora, osim praktičnih razloga zbrinjavanja većeg broja pacijenata u kratkom roku, proizlazi također i iz biološke podloge cijeljenja fraktura kostiju poznate kao osteosinteza. Jedan od temeljnih principa osteosinteze, na kojoj počiva nužnost upotrebe vanjskih fiksatora, jeste teorija inerfragmentarne kompresije o kojoj će biti više riječi u idućem poglavlju.

Proces osteosinteze odvija se u tri glavne faze:

- upala
- popravak
- re-modeliranje

pri čemu prva faza nastaje trenutno nakon pojave loma.



Slika 1. Prva faza osteosinteze

U ovoj fazi dolazi do pojave hematoma tj. krvnog ugruška (slika 1.) čija funkcija je osim pružanja djelomične stabilnosti mjestu frakture i dovođenje velike količine osteoblasta – stanica potrebnih za sinteriranje koštane matrice, hondrocita – stanica koje su zadužene za sintezu svih dijelova međustanične tvari, te osteoklasta – stanica koje su zadužene za uklanjanje mrtvog tkiva kako bi se osteosinteza mogla neometano odvijati.

Stvaranje kalusa, tj. nove spužvaste kosti koja spaja koštane ulomke označava početak druge faze osteosinteze. Upravo u ovoj fazi od presudne je važnosti da se na mjestu prijeloma osigura stabilnost ulomaka, pri čemu se u medicinskim krugovima još uvijek vode polemike oko potrebe za omogućavanjem minimalnih pomaka među samim koštanim ulomcima što bi prema nekim znanstvenicima dovelo do ubrzanja procesa cijeljenja.

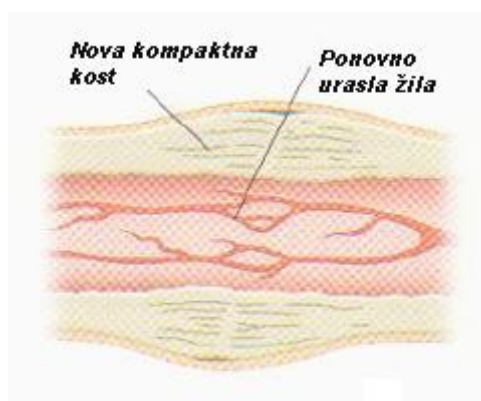
Ono što je sigurno, jeste da preveliki razmak i izrazito gibanje među ulomcima može dovesti do toga da umjesto kompaktne kosti, na mjestu prijeloma nastane meko tkivo (slika 2.). Ovo

se može osigurati pravilnom aplikacijom uređaja za vanjsku fiksaciju kakvi su prikazani u ovom radu.



Slika 2. Druga faza osteosinteze

Nakon što se koštani ulomci rapozicioniraju na anatomske ispravne pozicije te se osiguraju od pomicanja, te nakon što je stvoren kalus, nastupa treća, završna faza osteosinteze (slika 3.). Nova spužvasta kost koja je nastala u drugoj fazi po mehaničkim svojstvima je nešto slabija od osnovnog koštanog materijala pa svoju stabilnost temelji na nakupini materijala po cijelom presjeku što je jasno vidljivo i na rendgenskim slikama. U zadnjoj fazi dolazi do procesa optimizacije pri čemu se smanjuje veličina kalusa dok se povećavaju mehanička svojstva preostalog dijela spužvaste kosti koja ga sačinjava.



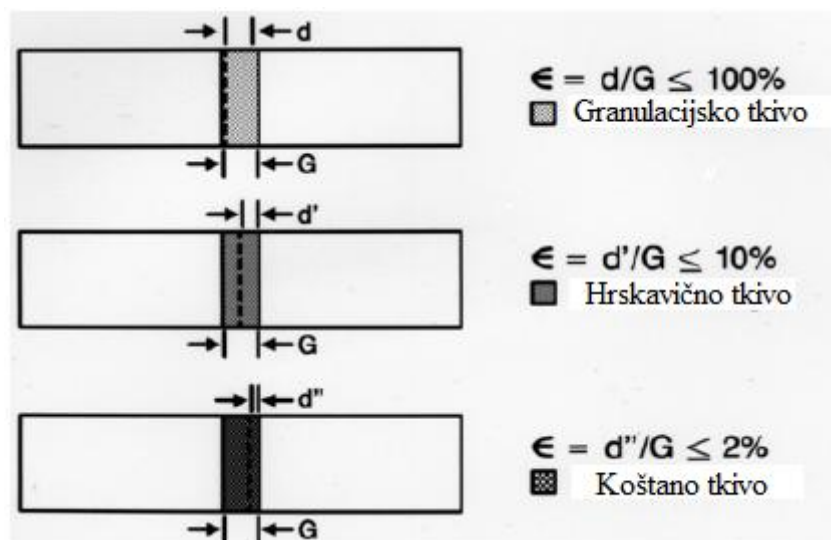
Slika 3. Treća faza osteosinteze

Konačni rezultat ove faze osteosinteze je asimilacija kalusa u osnovni materijal kosti, oblikom i funkcijom, a može potrajati od mjesec do godine dana, zavisno o vrsti ozljede, starosti osobe te biokemijskoj strukturi samih kostiju.

2.1. Interfragmentarna kompresija

Od prvih zapisanih postupaka liječenja fraktura kostiju, poznato je kako mehaničko opterećenje i imobilizacija koštanih ulomaka odvojenih frakturom utječe na tijek oporavka i kvalitetu nastalog koštanog tkiva.

Unatoč tome, tek je 1979. Perren uveo pojam interfragmentarne kompresije, teoriju koja je dala matematičku podlogu i medicinsko obrazloženje povezanosti razmaka među koštanim ulomcima te brzine i kvalitete osteosinteze. Naime, on je utvrdio kako je udaljenost među ulomcima od presudne važnosti na oblik tkiva koji nastaje na mjestu loma (slika 4).



Slika 4. Zavisnot vrste novonastalog tkiva o koeficijentu ϵ

Konkretno, teorija interfragmentarne kompresije povezuje omjer relativne udaljenosti koštanih ulomaka nakon implementacije uređaja za fiksaciju (bilo vanjskih, bilo unutarnjih) te početnog razmaka među njima (širina inicijalne pukotine).

Perren je teoriju interfragmentarne kompresije matematički prikazao pomoću koeficijenta ϵ koji predstavlja omjer udaljenosti između ulomaka nakon pritezanja uređajima za fiksaciju (repozicioniranje) te širine inicijalne pukotine:

$$\epsilon = \frac{\text{udaljenost koštanih ulomaka nakon repozicioniranja}}{\text{širina inicijalne pukotine}} = \frac{d}{G} \quad (1)$$

Dakle, koristeći prethodnu jednadžbu i sliku 4, jasno je kako kalusno tkivo može diferencirati u slijedeća tri oblika zavisno o koeficijentu ε :

- $\varepsilon \leq 100\%$ - dolazi do stvaranja **granulacijskog tkiva** koje nastaje u drugoj fazi cijeljenja te nije samo po sebi dostatno za potpuni oporavak i povrat funkcije kosti,
- $2\% \leq \varepsilon \leq 10\%$ - na području prekida tijekom kosti stvara se **hrskavično tkivo** koje također ne može adekvatno zamijeniti koštano tkivo,
- $\varepsilon \leq 2\%$ - pri dovoljnom pritisku među koštanim ulomcima, određenom po ovoj teoriji razmakom među njima, dolazi do stvaranja **koštanog tkiva** po svojstvima jednakog ostalim dijelovima kosti.

Svoju teoriju Perren je temeljio na činjenici da proces okoštavanja podrazumijeva premoštavanje pukotine među koštanim ulomcima okoštavanjem, tako što se vlakna na samoj pukotini spajaju jedno po jedno sve dok se i zadnje vlakno ne poveže, te se stvori nova kost po svojstvima jednaka ostatku neoštećenog koštanog tkiva.

Ograničavajući faktor čine prevelik razmak među ulomcima koje vlakna ne mogu premostiti, kao i prevelik tlak nastao među njima, u slučaju da su re-pozicionirani preblizu jedan drugome, pri čemu, ako ukupni tlak na presjeku prijeđe 30 MPa, dolazi do nekroze tj. odumiranja koštanog tkiva. Ova ograničenja valja imati u vidu tijekom izrade i upotrebe uređaja za fiksaciju.

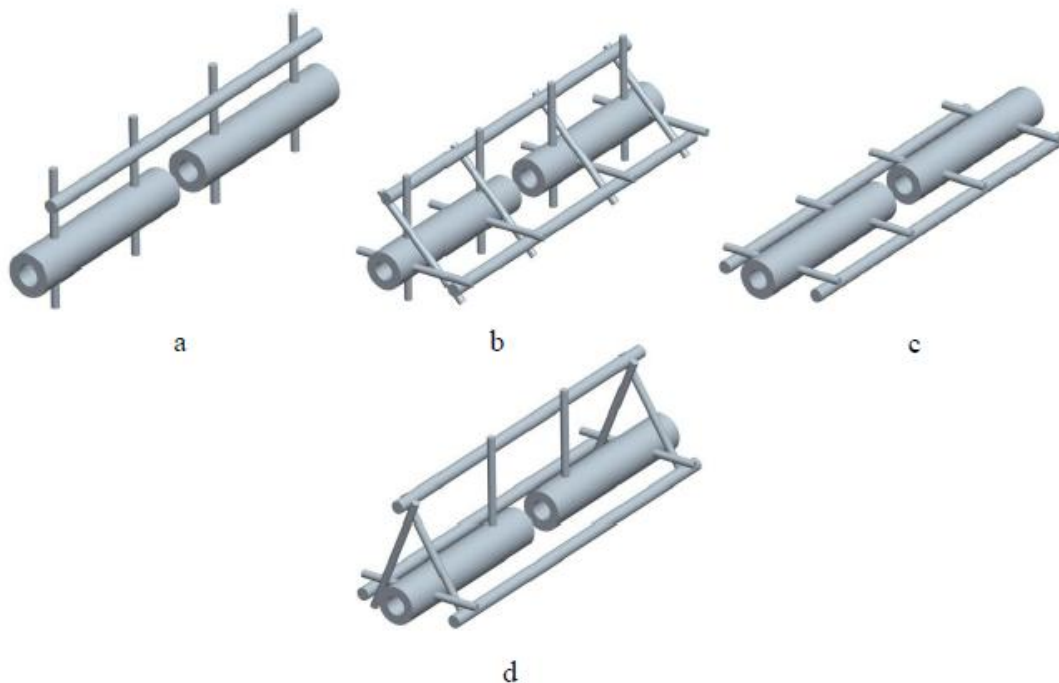
3. Vanjski fiksatori pri liječenju fraktura kostiju

Brzo i kvalitetno uspostavljanje funkcije ozlijeđenih ekstremiteta postiže se:

- anatomskom repozicijom ulomaka koja posebice dolazi do izražaja pri liječenju zglobnih prijeloma,
- stabilnom osteosintezi uzimajući u obzir lokalne mehaničke odnose među koštanim ulomcima,
- održavanjem cirkulacije u koštanim ulomcima te mekom tkivu koja se postiže dobrom i pažljivom operativnom tehnikom,
- ranom, aktivnom i bezbolnom mobilizacijom okolne muskulature i zglobova čime se sprječava pojava frakturne bolesti i atrofije mišića.

Osnovna pretpostavka za potpunu funkcionalnu obnovu traumatiziranih kostiju je kvalitetna imobilizacija i anatomska ispravna repozicija koštanih ulomaka (prve dvije gore navedene stavke) koja se osigurava pravilnom upotrebom vanjskih fiksatora.

Imobilizacija koštanih ulomaka upotrebom vanjskih fiksatora ostvaruje se postavljanjem vijaka koji ulaze u ili kroz kost te se povezuju na vanjski okvir. Na slici 5. dan je prikaz dvije osnovne vrste okvira, unilateralni i bilateralni, a koji se mogu postaviti u jednoj ili dvije ravnine.



Slika 5. Vrste okvira vanjskog fiksatora: a – unilateralni okvir, jedna ravnina; b – unilateralni okvir, dvije ravnine; c – bilateralni okvir, jedna ravnina; d – bilateralni okvir, dvije ravnine

Indikacije za upotrebu uređaja za vanjsku fiksaciju su svi teški, otvoreni, nestabilni prijelomi, kao i prijelomi kod kojih je došlo do oštećenja krvnih žila i živaca, dok kontraindikacije, osim općih kirurških kontraindikacija, ne postoje.

Prednosti vanjske fiksacije su:

- 1) ekonomska isplativost te mogućnost ponovne upotrebe uređaja za fiksaciju,
- 2) jednostavna, brza implementacija sa minimalnom operacijskom traumom uz prisustvo uvježbanog liječnika,
- 3) adekvatna imobilizacija teških otvorenih prijeloma koje nije moguće adekvatno sanirati gipsom ili trakcijom, te gdje postoji rizik od infekcije rane,
- 4) smanjena mogućnost pojave lokalne osteoporoze i atrofije mišića budući da imobilizacije vanjskim fiksatorom omogućava funkcionalno osposobljavanje tijekom samog opravka,
- 5) mogućnost direktne kontrole stanja rane te vezanog neurovaskularnog sustava,
- 6) mogućnost daljnjih kirurških zahvata, previjanja, sekundarnih šavova, te bolje njege bolesnika,
- 7) sposobnost pacijenta za pohađanjem rane fizikalne terapije neposrednim razgibavanjem susjednih zglobova čime se također smanjuje mogućnost atrofije mišića i lokalne osteoporoze,
- 8) dozvoljavanje rane mobilizacije pacijenta.

Iako se upotrebom vanjskih fiksatora omogućava fizikalna terapija, funkcionalna terapija je otežana, a postoje i određene komplikacije vezane za upotrebu i primjenu fiksatora.

U nekim slučajevima fiksator nije konačno rješenje već zahtjeva sekundarnu osteosintezu nakon uklanjanja samog fiksatora što se postiže korištenjem pločica ili čavla za osteosintezu, što u potonjem slučaju znači i ponovni pristup mjestu prijeloma, te posljedično ponovno ugrožavanje sterilnosti i cirkulacije.

3.1. Konstrukcija vanjskog fiksatora

U ovom radu prikazani su rezultati eksperimentalnog ispitivanja stabilnosti prototipa novokonstruiranog fiksatora, a rezultati su uspoređeni s rezultatima dobivenim identičnim ispitivanjem vanjskog fiksatora Orthofix.

Nova konstrukcija (slika 6.) konstruirana je u suradnji s tvrtkom Instrumentaria d.d., te je u ispitivanjima prikazano konstrukcijsko rješenje unilateralnog modularnog fiksatora (slika 5.a), a istraživanja su provedena u Laboratoriju za eksperimentalnu mehaniku Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu.

Pri konstruiranju vanjskog fiksatora prikazanog u ovom radu vodilo se računa o sljedećim funkcionalnim zahtjevima:

- pomični dijelovi zaduženi za prilagodbu različitim oblicima kostiju moraju biti jednostavni u primjeni te moraju omogućiti jednostavnu implementaciju na kost,
- mehaničkim svojstvima mora odgovoriti na zahtjeve koji se postavljaju na fiksatore koji su već u upotrebi, u smislu opterećenja na kompresiju, fleksiju i torziju.

Konstrukcijski zahtjevi proizašli iz funkcionalnih zahtjeva su sljedeći:

- mogućnost održavanja razmaka među pinovima tijekom cijelog oporavka pri čemu se podrazumijeva da, umjesto kosti, fiksator na sebe preuzima cjelokupno opterećenje,
- mogućnost sfernog gibanja držača pinova kako bi se fiksator mogao prilagoditi različitim pozicijama lomova, te mogućnost prihvata standardnih pinova.

Geometrijski zahtjevi na vanjski fiksator proizlaze iz same primjene, naime, fiksator prikazan u ovom radu prvenstveno se koristi pri liječenju prijeloma potkoljenice:

- minimalni razmak unutarnjih pinova treba iznositi oko 150 mm,
- maksimalni razmak vanjskih pinova treba iznositi oko 300 mm,
- kut otklona držača pinova od središnje osi fiksatora treba biti veći od 25° ,
- najveći promjer tijela fiksatora ne treba biti veći od 35 mm.

Konstrukcijskim rješenjem prikazanim u ovom radu zadovoljeni su ovi zahtjevi:

- a) udaljenost unutarnjih pinova – 167 mm,
- b) udaljenost vanjskih pinova – 297 mm,
- c) kut otklona držača pinova – 26° ,
- d) najveći promjer – 38 mm.

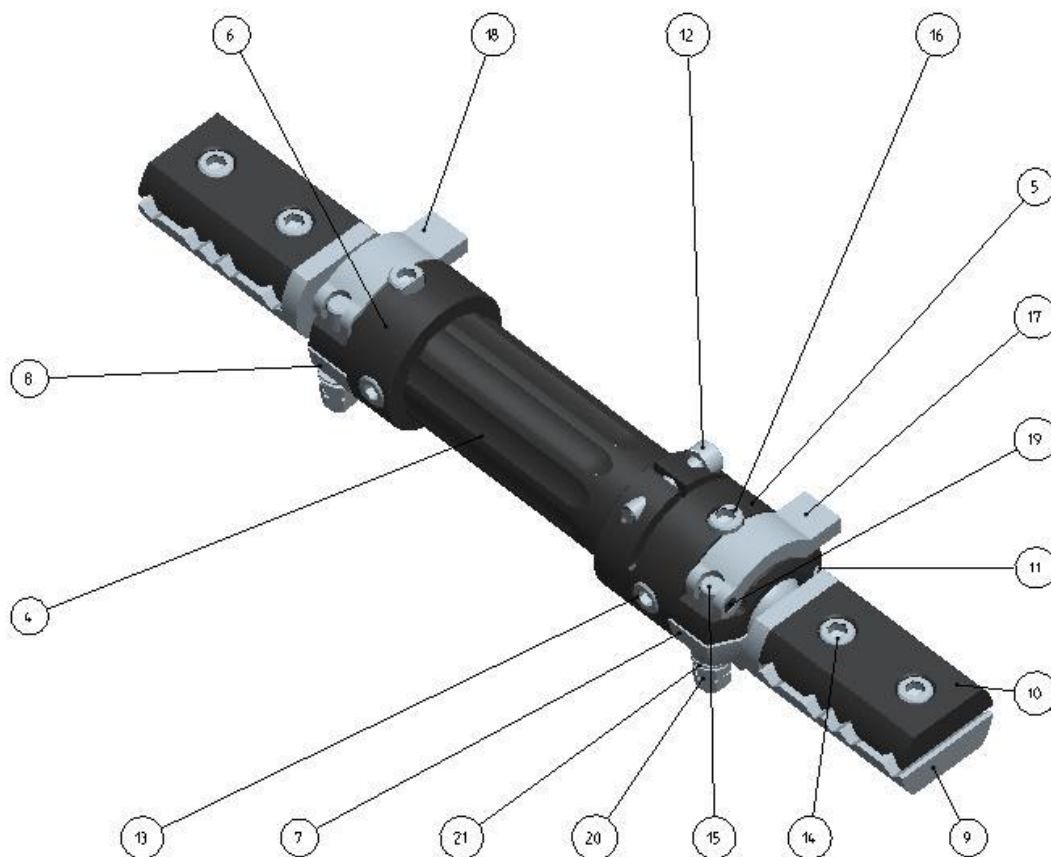
Na slikama 6, 7 i 8 prikazano je konstrukcijsko rješenje vanjskog fiksatora s pozicijama dobiveno na temelju gore navedenih zahtjeva.

Funkcionalni zahtjevi nove konstrukcije fiksatora, prikazani na gore navedenim slikama, riješeni su na sljedeći način:

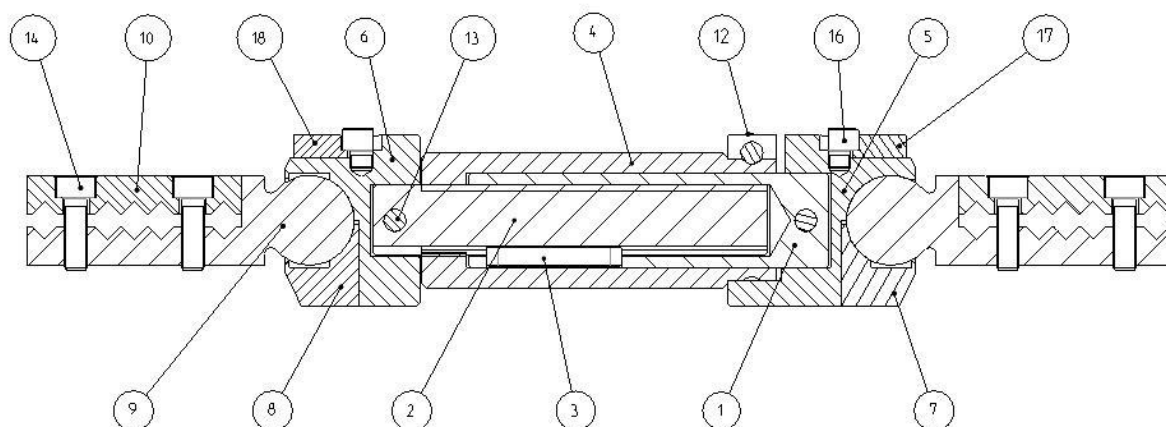
- I. Problem distrakcije riješen je pomoću fiksne (1) i pomične koaksijalne šipke (2), koje su međusobno povezane preko spojne cijevi (4) koja ujedno služi i kao ručica. Pomična šipka je navojem spojena na spojnu cijev (4) čijim se okretanjem pomična cijev pomiče u aksijalnom smjeru. Ovime se osiguralo postavljanje držača pinova (10) u os fiksatora.
- II. Sferno gibanje držača pinova (10) osigurano je zglobnom vezom s kuglom (9). Na ovaj način držač pinova ima tri stupnja slobode, a fiksiranje pozicije omogućeno je jednim pokretom. Kako bi se izbjegla potreba za ključem, zglob je izveden dvodjelno, a gornji i donji dio povezani su s jedne strane osovinom (19), a s druge strane stežu se polugom (17 i 18) na ekscentar preko tanjurastih opruga (21). Sila na kuglu (9) se na taj način povećava u odnosu na silu u steznom vijku (12) zbog efekta poluge. Prihvat pinova izveden je po uzoru na izvedbu većine fiksatora u upotrebi danas, stežu se vijcima (14) između pločica (10) s prorezima za pinove. Ovi prorezi omogućuju prihvat pinova promjera do 6 mm.
- III. Vođeni jednostavnošću zaključavanja željene pozicije fiksatora, ovo je postignuto s jednim vijkom (15) i dvije poluge (17 i 18). Ručica sklopa za distrakciju je vezana za zglob i zaključava se vijkom (12) koji se ne okreće zajedno sa ručicom pa je uvijek na dostupnom mjestu. Zaključavanje zglobova držača pinova (spojnica) odvija se pomoću poluga vezanih za ekscentar pomoću tanjurastih opruga. Eventualno popuštanje zgloba, tj. smanjenje pritiska na kuglu nakon učestalog korištenja može se riješiti zatezanjem matica (20).

Označene pozicije na sljedećim slikama su:

1 – šipka-nepomična, 2 – šipka-pomična, 3 – pero, 4 – spojna cijev-ručica, 5 – lijevi zglob, 6 – desni zglob, 7 – donji lijevi zglob, 8 – donji desni zglob, 9 – kugla, 10 – držač pinova, 11 – vijak-osovina zgloba, 12 – vijak za stezanje ručice, 13 – vijak za šipke, 14 – vijak za pinove, 15 – vijak poluge, 16 – vijak za osiguranje poluge, 17 – lijeva poluga, 18 – desna poluga, 19 – osovina poluge, 20 – matica, 21 – tanjuraste opruge.

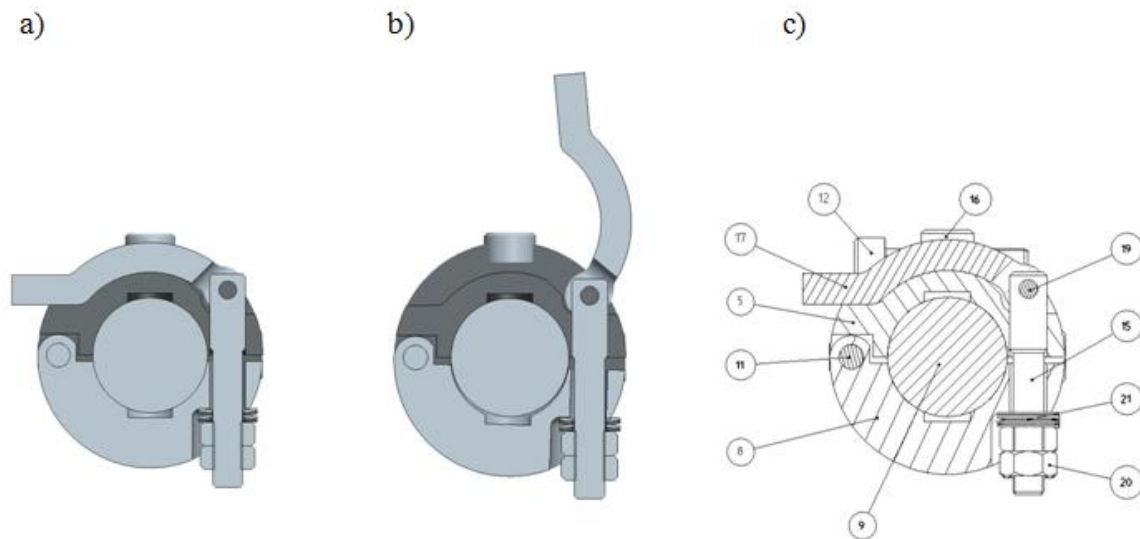


Slika 6. Nova konstrukcija fiksatora



Slika 7. Uzdužni presjek fiksatora s pozicijama

Na idućoj slici prikazan je zglob s polugom u zatvorenom i otvorenom položaju te glavni dijelovi zgloba radi boljeg pregleda same funkcije i načina zaključavanja fiksatora u željenoj poziciji.



Slika 8. Presjeci zgloba s polugom

Nakon što je dan pregled konstrukcije fiksatora te zahtjeva koje moraju zadovoljiti, u idućem poglavlju biti će prikazan eksperiment proveden s ciljem usporedbe nove konstrukcije fiksatora s već postojećom konstrukcijom tvrtke Orthofix u uvjetima koji simuliraju stvarna opterećenja na fiksator prilikom svakodnevne upotrebe od strane pacijenata

4. Eksperimentalno ispitivanje stabilnosti nove konstrukcije fiksatora

Eksperimentalna ispitivanja biomehaničkih svojstava provedena su na ispitnom modelu od medicinskog čelika ISO 5832-1 proizvedenom u firmi Instrumentaria d.d., a uspoređivana su s rezultatima dobivenim na kontrolnom modelu tvrtke Orthofix.

Oba fiksatora ispitivana su u identičnim uvjetima, opterećena identičnim opterećenjima. Eksperiment se sastojao od dva dijela, prvoga u kojem su se pratili pomaci na fiksatoru u slučaju da među koštanim ulomcima postoji razmak od 10 mm koji simulira prekid koštane mase, te od drugog dijela u kojem je razmatran slučaj dodira među koštanim ulomcima.

U oba slučaja prvo se pratilo statičko opterećenje, aksijalno do 1000 N, te savojno opterećenje u četiri točke do 250 N uključujući i rasterećenje.

Procjena stabilnost konstrukcije novog fiksatora određena je na temelju pomaka jednog koštanog ulomka u odnosu na drugi, kao i na temelju pomaka pojedinih točaka na samoj konstrukciji fiksatora u usporedbi sa pomacima identičnih točaka na fiksatoru Orthofix.

4.1. Mehaničke osnove eksperimenta

U ovom poglavlju dane su fizikalne osnove neophodne za razumijevanje, analizu i interpretaciju provedenih eksperimenata.

Mehanička podloga sastoji se u suštini od statičkog vlačnog pokusa iz kojeg se dobiva zakon po kojem se mijenja produljenje zavisno o sili koja djeluje na ispitne uzorke, a dobiveni dijagram naziva se dijagram kidanja.

Dijagram na slici 9. prikazuje jedan takav dijagram dobiven tijekom statičkog vlačnog pokusa provedenog na nekom konstrukcijskom čeliku. Budući da svako opterećenje u tijelu izaziva deformaciju, tako i pri ovom pokusu dolazi do produljenja ispitnog uzorka prilikom vlačnog opterećenja.

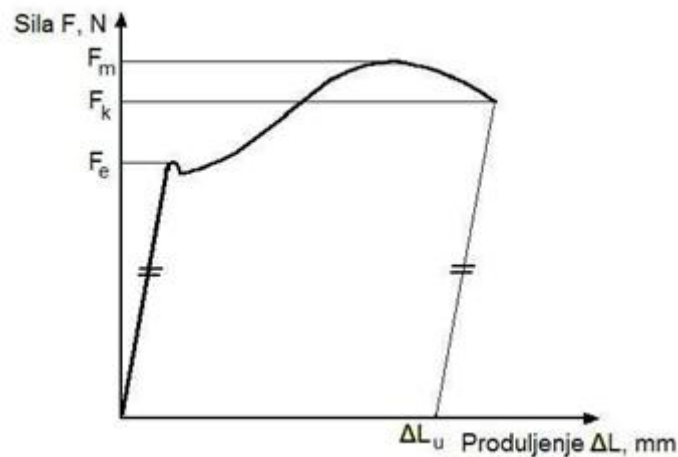
Produljenje ΔL , u mm, predstavlja povećanje razmaka L_0 mm koji označava početnu udaljenost dvije razmatrane točke, nakon opterećenja silom F N.

U prvom dijelu dijagrama ovisnost između sile F narinute na ispitni uzorak i produljenja ΔL mijenja se prema jednadžbi pravca, tj. linearna je:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2)$$

Ova jednadžba naziva se još i Hookeov zakon, pri čemu je E , modul elastičnosti, konstanta vezana za svojstvo materijala kojom se opisuje čvrstoća veze među atomima u kristalnoj rešetci ili amorfnoj strukturi, a ε , istežanje ili relativno produljenje.

Područje na kojem su sila i produljenje u linearnoj korelaciji naziva se još i Hookeov pravac (slika 9.), a koeficijent smijera ovog pravca je veći što je modul elastičnosti veći, tj. što je veći kut kojeg Hookeov pravac zatvara sa osi apscisa.



Slika 9. Dijagram kidanja $F-\Delta L$

Linearna zavisnost sile i produljenja traje do sile F_e koja se naziva silom tečenja (razvlačenja), a nakon čega se ispitni uzorak nastavlja produljavati uz čak i mali pad opterećenja.

Opterećenje se dalje povećava sve do dostizanja sile F_m , nakon čega se epruveta nastavlja produljavati uz pad sile, sve do konačnog loma epruvete pri sili F_k .

Ukupna duljina epruvete točno u trenutku pucanja pri sili F_k , iznosi L_u [mm], a produljenje ΔL_u nakon loma iznosi

$$\Delta L_u = L_u - L_0. \quad (3)$$

Ova vrijednost može se dobiti grafički iz dijagrama tako što se iz točke loma povuče paralela sa Hookeovim pravcem te se pronade presjecište ovog pravca sa osi apscisa (slika 9.). Kako bi se dobio bolji uvid u ponašanje materijala opterećenog silom, morama se uzeti u obzir promjena poprečnog presjeka ispitnog uzorka te se stoga uvodi pojam naprezanja tj. sile po jedinici površine prema izrazu

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (4)$$

pri čemu je F sila izražena u N, a S_0 površina početnog presjeka.

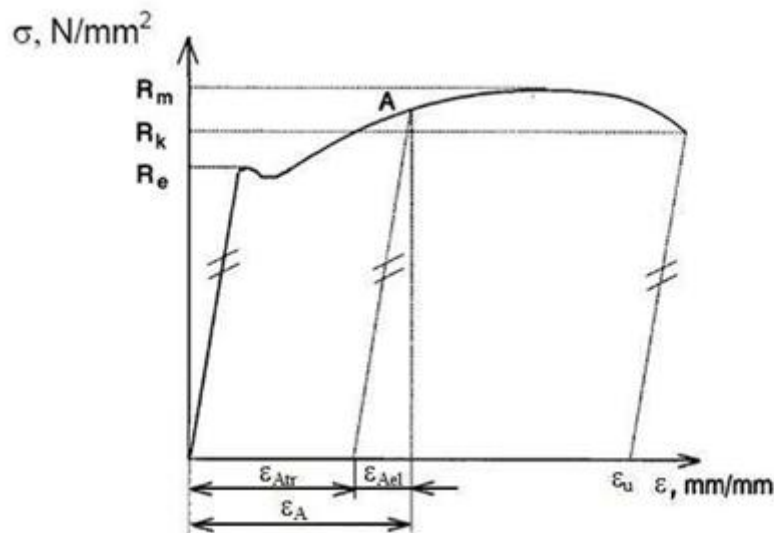
Istezanje ili relativno produljenje (produljenje s obzirom na početni razmak) dato je izrazom

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (5)$$

što se može izraziti i u postotcima, kao

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100. \quad (6)$$

Uzimajući u obzir odnos naprezanja σ i produljenja ε , može se dobiti dijagram analogan dijagramu $F-\Delta L$, a u kojem se može pratiti odnos između naprezanja i produljenja (slika 10.) koji se naziva dijagram naprezanje – istezanje, $\sigma-\varepsilon$.



Slika 10. Dijagram naprezanje – istezanje $\sigma-\varepsilon$

Ako se materijal optereti iznad njegove granice razvlačenja R_e tada se ulazi u područje plastičnih ili trajnih deformacija. Za slučaj u kojem se ispitni uzorak tereti do točke A te ga se tada rastereti ($\sigma = 0$). Ovdje dolazi do pojave plastičnih ili trajnih deformacija ε_{Atr} što znači da će razmak mjernih točaka L_0 nakon rasterećenja biti uvećan za iznos ΔL_A .

$$\varepsilon_{Atr} = \frac{\Delta L_A}{L_0} \quad (7)$$

Na gornjem dijagramu se nailazi na još dvije točke karakteristične za svaki materijal, a to su vlačna ili rastezna čvrstoća R_m koja označava maksimalan iznos sile kojeg materijal može

podnijeti te konačno naprezanje R_k kod kojeg dolazi do loma materijala. Vlačna čvrstoća određuje se prema sljedećoj zakonitosti:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}, \quad (8)$$

dok se konačno naprezanje iskazuje kao

$$R_k = \frac{F_k}{S_0}, \quad (9)$$

Istezanje nakon kidanja pronalazi se na način analogan onome kod određivanja vrijednosti ΔL_u u dijagramu sila-naprezanje $F-\Delta L$, povlačenjem paralele iz konačne točke dijagrama s Hookeovim pravcem te pronalaženjem presjecišta tog pravca s osi apscisa (slika 10.), a određuje se prema izrazu

$$\varepsilon_u = \frac{L_u - L_0}{L_0}, \quad (10)$$

Ako se pak istezanje ε_u želi izraziti u postocima, obilježava se slovom A i nazivamo se istežljivost

$$A = \varepsilon_u \cdot 100. \quad (11)$$

Ova vrijednost govori o relativnom produljenju u aksijalnom smjeru u odnosu na početnu duljinu.

4.2. Uređaj za statičko opterećenje

Ispitivanja prikazana u ovom radu vršena su pomoću kidalice Beta 50-5 (slika 11.) proizvođača Messphysik iz Austrije, pogonjene elektromotorima, a koja postiže maksimalnu silu od 50 kN. Na ovom uređaju provedena su statička ispitivanja aksijalnog opterećenja te savijanja u četiri točke čime se upravljalo sa potpuno digitalizirane upravljačke jedinice EDC25.



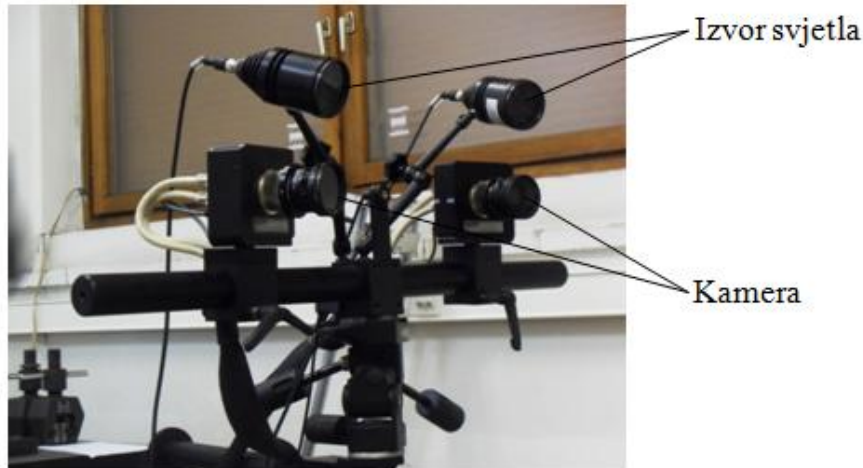
Slika 11. Statička kidalica Messphysik Beta 50-5

Epruvete napravljene posebno za provedbu ovog eksperimenta smještane su u čeljusti kidalice te se na njih narinulo zadano opterećenje, a o čemu će biti više govora u narednim poglavljima.

Tijekom provođenja eksperimenta sila na kidalici pratila se na upravljačkoj jedinici pri čemu se posebno pazilo na pravilan vremenski slijed opterećenja pri čemu se sila kod pokusa sa simulacijom prekida koštane mase mijenjala brzinom od 5 N/s, dok je kod pokusa sa simulacijom dodira među ulomcima brzina čeljusti iznosila 0,1 mm/min. Pri aksijalnom opterećenju sile su išle do 1000 N, kod savojnog do 250 N, te se nakon svakog opterećenja pratilo i rasterećenje do 0 N.

4.3. Optički mjerni sustav Aramis

Kako uređaj za statičko opterećenje nije u stanju pratiti pomake na svim točkama epruveta i samog fiksatora, u ovu svrhu korišten je optički mjerni sustav Aramis (slika 12.) temeljen na principu objektnog raster postupka.



Slika 12. Optički mjerni sustav Aramis

Ovaj sustav se koristi za mjerenje promjene oblika u dvije ili tri prostorne dimenzije površina opterećenih statičkim ili dinamičkim opterećenjima, u realnom vremenu s tim da može uključiti veliki broj točaka na samoj površini mjernog objekta.

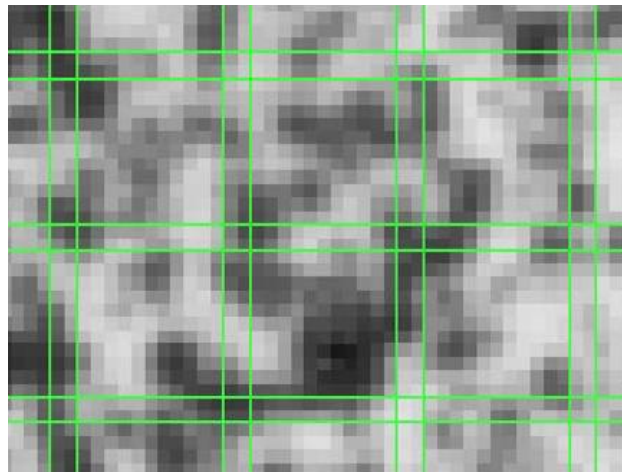
Zavisno o pripremi mjernih uzoraka, ispitnom okruženju i kompleksnosti eksperimenta, Aramis može odrediti deformacije s točnošću do 0,01%, a ukoliko su poznata svojstva materijala program može izračunati i komponente tenzora naprezanja.

Sustav koji je korišten u ovom eksperimentu sastoji se od sljedećih osnovnih elemenata:

- dvije digitalne CCD kamere Dalsa Falcon 4M60 s frekvencijom od 60 do 480 Hz i rezolucijom 2358×1728 piksela,
- dvije leće 50 mm Titanar,
- kalibracijskog objekta CP20/MV90×72,
- upravljačke jedinice s foto senzorom i tipkalom,
- rasvjetne jedinice LEDscale 30372-0001A 30°,
- dva framegrabber-a X64CL iPro,
- programskog paketa Aramis v6.2.

Metoda objektnog rastera na kojoj se zasniva sustav Aramis služi se algoritmima koji čine softwaresku podlogu ovog mjernog sustava, a koja uspoređuje svjetloću površine promatranog objekta te traži ekvivalentna područja u svim snimkama pojedinog mjerenja. U tu svrhu potrebno je pripremiti podlogu ispitnih uzoraka na način da se dobije izraziti kontrast na površini uz posebnu pažnju na stohastičnost rasporeda crno-bijelih točaka kako bi se one lakše identificirale na slikama pomoću internog algoritma.

Slike dobivene ovim postupkom prvo se dijele na osnovne slikovne elementa tzv. fasete (slika 13.) koje predstavljaju mjerne točke čija se veličina definira u pikselima, a preklapanje između njih se također mjeri u broju preklapajućih piksela.

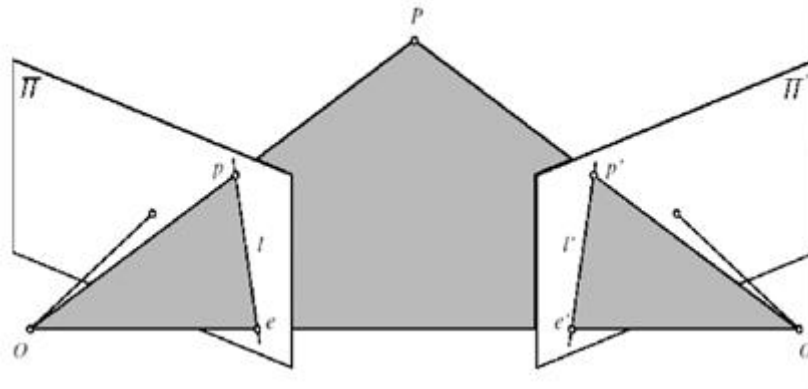


Slika 13. Faseta veličine 15x15 s dva preklapajuća piksela

Na gornjoj slici prikazan je sustav fasete kakve su korištene prilikom izvođenja eksperimenata prikazanih u ovom radu. Određivanje prostornih koordinata točaka na samom objektu dobiva se pronalaženjem slikovnih koordinata na slikama lijeve i desne kamere, a ovaj postupak naziva se i problemom jednoznačnosti te se rješava pomoću principa epipolarnih ravnina koji je dio algoritma samog sustava što znači da je neovisan o promatranom mjernom objektu već ovisi isključivo o unutrašnjim parametrima kamere i njihovoj relativnoj orijentaciji.

Ova predefiniranost sustava s dvije kamere koristi se za rješavanje navedenog problema jednoznačnosti prikazanog na sljedećoj slici gdje P označava točku na promatranom objektu snimanog kamerama II (lijeva kamera) i II' (desna kamera). Točka p predstavlja projekciju točke P na kameri II dok položaj slikovnog osjeta objektne točke p' u desnoj kameri nije poznat što znači da nije zadovoljen uvijet jednoznačnosti. Točke O i O' predstavljaju poznata projekcijska središta lijeve odnosno desne kamere, a spajanjem ove dvije točke dobiva se tzv. osnovna linija.

Spajanjem točaka P i O , te točaka O i O' , dobivaju se dva pravca koja leže u istoj ravnini (pravac OO' , koji prolazi točkama e , odnosno e' zajednički je svim vidljivim objektnim točkama P). Ovako definirana ravnina naziva se epipolarna ravnina i prikazana je na slici 14.



Slika 14. Epipolarna ravnina

Projekcija epipolarne ravnine u lijevoj kameri definira epipolarnu ravninu 1, dok u desnoj kameri projiciranjem ove ravnine dobiva se druga epipolarna ravnina $1'$ na kojoj po definiciji mora ležati tražena slikovna točka p' čiji položaj se zna budući da je na početku pretpostavljeno da u desnoj kameri nije poznato gdje se nalazi preslikana točka p' .

Ovaj problem rješava se pod uvjetom da se točka P nalazi u vidnom polju desne kamere, te da njeni slikovni osjeti ne prolaze točkama e , odnosno e' . Također, promatrana objektna točka ne smije biti zasjenjena unutar vidnog polja neke od kamera.

Točke e i e' su virtualne slike optičkog središta jedne kamere viđena drugom kamerom, a nazivaju se epipolovima. Na ovaj način se problem pronalaženja pripadajućeg para točke o (tzv. stereopara) u desnoj kameri svodi s ravninskog problema na jednodimenzijski problem, budući da se korištenjem informacija o poznatom relativnom položaju lijeve i desne kamere u stvari traži točka p' samo uzduž epipolarne linije $1'$ u drugoj kameri. Kada se ovim algoritmom pronađu sve početne fasete sustav izračunava pomake i deformacije.

U ovom radu uzete su fasete veličine 15×15 piksela jer predstavljaju svojevrsan kompromis između točnosti i vremena potrebnog za računanje pomaka. U većini slučajeva uputno je koristiti ovu veličinu faseta, te prilagoditi površinski raster shodno tome, što znači da stohastički uzorci moraju biti vidljivi unutar samih faseta. Naravno, odstupanja od ove veličine su moguća, npr. veće fasete vode duljem vremenu proračuna, ali su zato rezultati točniji, isto tako, manje fasete vode do smanjene točnosti, ali i bržeg proračuna pomaka.

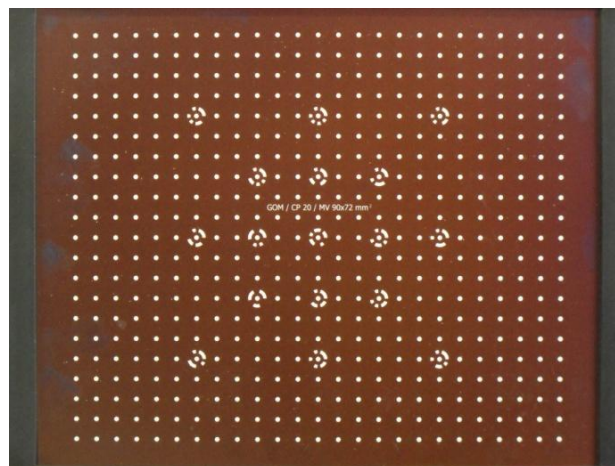
4.3.1. Kalibracija mjernog sustava

Budući da je u prethodnom poglavlju navedeno kako proračun pomaka i deformacija pomoću optičkog sustava Aramis ovisi izravno o samim parametrima uređaja, neophodno je prije provedbe ispitivanja kalibrirati sustav (slika 15.) u svrhu podešavanja parametara kamere kako bi se smanjile moguće pogreške, nepravilnosti te ubrzao sam postupak mjerenja.



Slika 15. Kalibriranje Aramis sustava

Kalibriranje je postupak koji je strogo propisan uputama koje dolaze sa samim sustavom, a uz same parametre koji su u uputama zapisani, dolaze i kalibracijski objekti (slika 16.) kojima se kalibrira sustav za točno određene veličine (volumene) mjernih objekata. Pomoću ovih kalibracijskih objekata u tijeku procesa kalibracije kamerama se za jedan piksel dodjeljuje stvarna jedinica milimetar.



Slika 16. Kalibracijski objekt

Parametri koji se podešavaju prilikom kalibracije (slika 17.) kao što su međusobna udaljenost kamera, kut kamera i udaljenost sustava od mjernog objekta dani su u uputama za određeni mjerni volumen.

Leće	Mjerni volumen [mm x mm]	Komentar	Min. udaljenost od mjernog objekta [mm]	Dist. prsten [mm]	Mjerna udaljenost [mm]	Udaljenost kamera [mm]	Kut kamere [°]	Kodirani kalibracijski objekti	Dubina mjernog volumena [mm]										
									1.4	2	2.8	4	5.6	8	11	16	22	32	
50mm, famdijia leća Al (Titanar)	25 x 18	1)	500	25	205	66	26	CQ 23x18	---	---	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	---	---
	35 x 26	1)	500	12.5	225	70	25	CQ/CP20 30x24	---	---	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	1.8	---	---	
	50 x 37	1)	500	12.5	260	88	25	CQ/CP20 55x44	---	---	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0.5	5.8	---	---	
	65 x 48	---	500	---	305	108	25	CQ/CP20 55x44	---	---	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	4.6	13	---	---	
	80 x 60	---	500	---	345	126	25	CQ/CP20 55x44	---	---	n.a.	n.a.	n.a.	2.1	9.6	22	---	---	
	100 x 75	---	500	---	400	150	25	CP20 90x72	---	---	n.a.	n.a.	n.a.	7.6	19	38	---	---	
	125 x 90	---	500	---	475	184	25	CP20 90x72	---	---	n.a.	n.a.	4.1	18	35	65	---	---	
	150 x 110	---	500	---	550	216	25	CP20 175x140	---	---	n.a.	n.a.	12	32	57	99	---	---	
	175 x 130	---	500	---	625	250	25	CP20 175x140	---	---	n.a.	4.6	22	49	82	140	---	---	
	200 x 150	---	500	---	695	282	25	CP20 175x140	---	---	n.a.	11	34	68	110	190	---	---	
	250 x 180	---	500	---	845	348	25	CP20 250x200	---	---	4.7	31	66	120	190	>250	---	---	
	300 x 220	---	800	---	995	414	25	CP20 250x200	---	---	20	57	110	180	280	>300	---	---	
	350 x 260	---	800	---	1140	480	25	CP20 350x280	---	---	38	88	160	260	>350	>350	---	---	
	400 x 290	---	800	---	1290	546	25	CP20 350x280	---	---	62	130	220	350	>400	>400	---	---	
	500 x 370	---	800	---	1590	678	25	CP20 350x280	---	---	120	230	370	>500	>500	>500	---	---	
	750 x 550	2)	1200 fixed	---	2310	---	29	CC20 700x560	---	---	330	560	>750	>750	>750	>750	---	---	
	1000 x 730	2)	1200 fixed	---	3070	---	22	CC20 1000x800	---	---	740	>1000	>1000	>1000	>1000	>1000	---	---	
	1250 x 920	2)	1600 fixed	---	3800	---	24	CC20 1400x1120	---	---	1200	>1250	>1250	>1250	>1250	>1250	---	---	
1500 x 1100	2)	1600 fixed	---	4550	---	20	CC20 1400x1120	---	---	>1500	>1500	>1500	>1500	>1500	>1500	---	---		
1750 x 1300	2)	1600 fixed	---	5290	---	17	CC20 2000x1600	---	---	>1750	>1750	>1750	>1750	>1750	>1750	---	---		

Legenda: 1) Bez laserske točkice
2) Za više informacija obratiti pažnju na upute za korištenje - "Hardware for ARAMIS"

--- Promjer leća nije moguće podešavati
n.a. Nije moguće namjestiti fokus na cijeli mjerni volumen

Slika 17. Parametri sutava u zavisnosti o mjernom volumenu

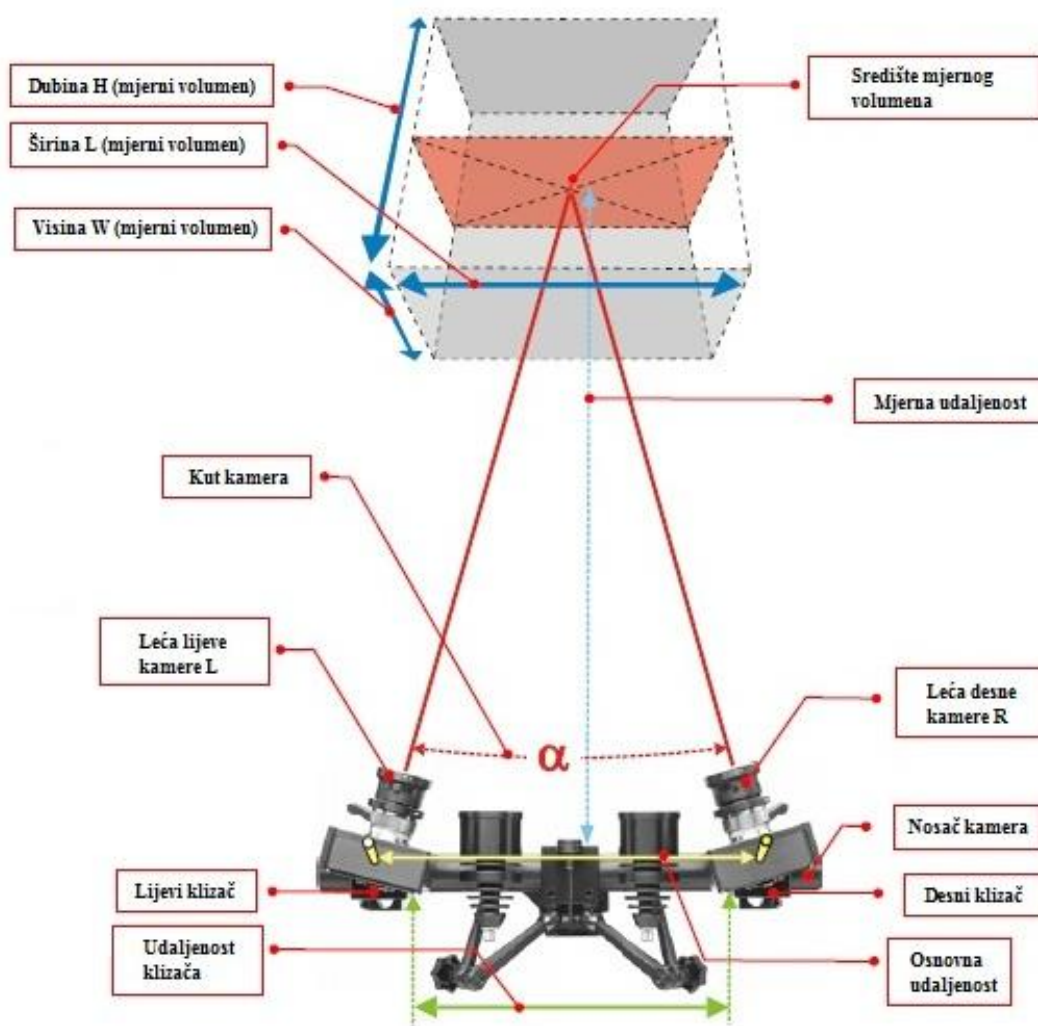
Također, propisani su i otvori blende, fokus kamere te polarizacija stakala koja se nalaze u svakoj kameri te na izvoru svjetla (reflektori). Za ovaj eksperiment uzet je kalibracijski objekt *CP20/MV90/72*, a parametri za snimanje u ovom radu su slijedeći:

- objektiv 50 mm,
- mjerni volumen: 200×150 mm,
- mjerna udaljenost: 695 mm,
- međusobna udaljenost kamera: 282 mm,
- kut kamera: 25°.

Nakon što se kalibracija provede do kraja, njene postavke se mogu pohraniti u memoriju računala te kalibraciju više nije potrebno provoditi za slučaj snimanja istog mjernog volumena.

Isto tako, nakon kvalitetno odrađene kalibracije, cjelokupni sustav Aramis se može premiještati na bilo koju lokaciju uz pažljivo rukovanje pazeći da pri premještanju ne pomaknemo kamere ili poremetimo bilo koji od parametara određenih u toku kalibracije.

Radi lakšeg razumijevanja postavki koje se moraju namjestiti tijekom kalibracije, na slici 18 dan je prikaz parametara određenih od strane proizvođača Aramisa, njemačke tvrtke GOM mbH.



Slika 18. Parametri kalibracije sustava Aramis

4.3.2. Priprema ispitnih uzoraka

Priprema mjernih uzoraka se sastoji od nanošenja stohastičkog uzorka izrazitog kontrasta koji će prilikom promjene oblika ispitnih uzorak pratiti deformacije njihove površine. Stohastičnost je potrebna iz razloga lakšeg pronalaženja istog polja u obje kamere.

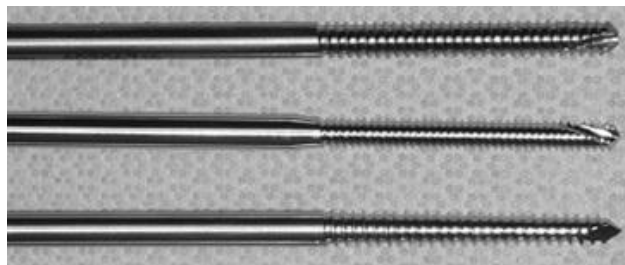
Plastični modeli tibije promjera 30 mm u tekstu nazvani i epruvete (slika 19.) na koje su postavljeni vanjski fiksatori izrađeni su od poliacetala (POM) koji je poznat po dobrim mehaničkim svojstvima, visokoj čvrstoći i dobrim antifrikcijskim svojstvima, te je dimenzionalno postojan.



Slika 19. Epruveta od poliacetala

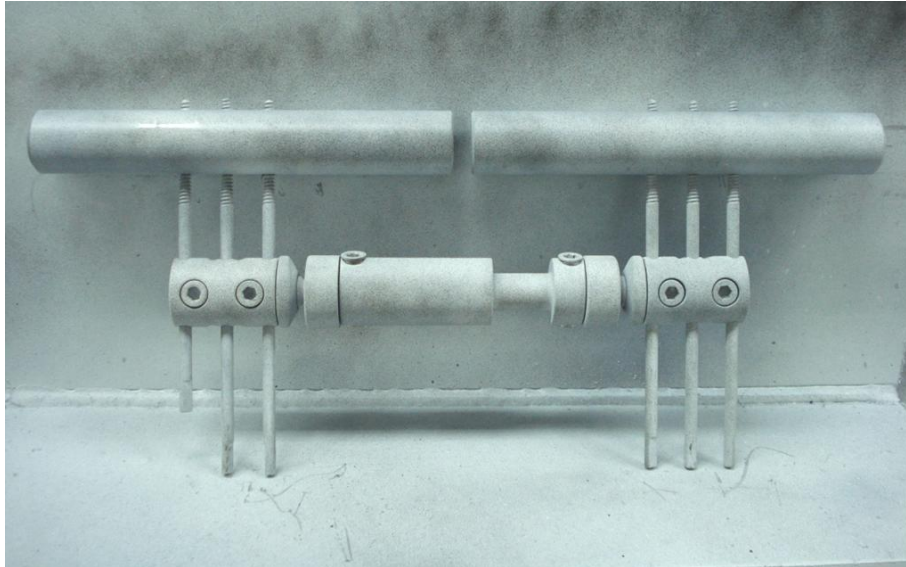
Bitna stvar pri izboru materijala epruvete bila su zanemariva elastična svojstva koja posjeduje poliacetal budući da spada u skupinu plastomera, što naročito pogoduje potpunom prijenosu sile na vijke i vanjski fiksator.

Kod modela s prekidom koštane mase ulomci su duljine 200 mm s međusobnom udaljenošću od 10 mm. Duljina ulomaka kod modela s kontaktom na mjestu prekida iznosila je 205 mm. Ulomci su za vanjske fiksatore pričvršćeni sa šest vijaka (pinova) (slika 20.) promjera 6 mm. Razmak unutarnjih pinova kod oba fiksator iznosio je 186 mm, a modeli kosti su od fiksatora bili na udaljenosti 40 mm.



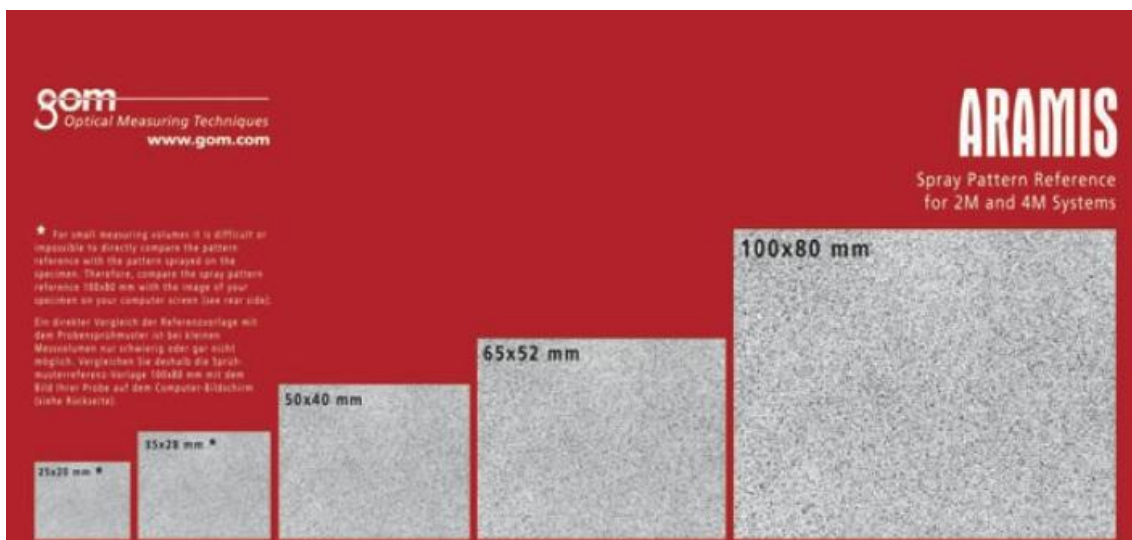
Slika 20. Vijci (pinovi) za kosti

Kako bi se dobio što nepravilniji raster na ispitivanim zorcima, prvo je nanošena bijela boja po čitavoj površini, a zatim se dozirala crna boja (slika 21.) po potrebi. Ovaj postupak se ponavljao više puta, sve dok se nije dobio željeni raster što je bilo provjeravano pravljenjem testnih snimaka na samoj kidalici sa Aramisom.



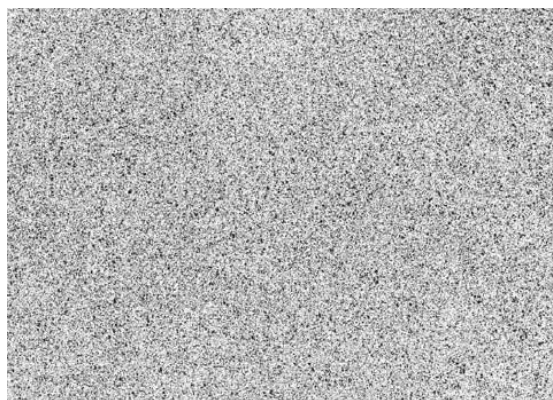
Slika 21. Nanošenje rastera na model ispitne skupine

Posebna pažnja pridana je refleksiji površine. Ukoliko je površina tamna ali nereflektirajuća, dovoljno je samo nanijeti određenu količinu bijele boje, dok je u slučaju reflektirajuće površine potrebno nanijeti određenu količinu crne boje. Ovo se može naknadno podešavati otvorom blende na kamerama čime se regulira količina svjetla koje upada na samu leću kamere. Uzorci rastera za razne veličine mjernih površina također su standardizirani u uputama sustava Aramis, a dani su na slici 22.



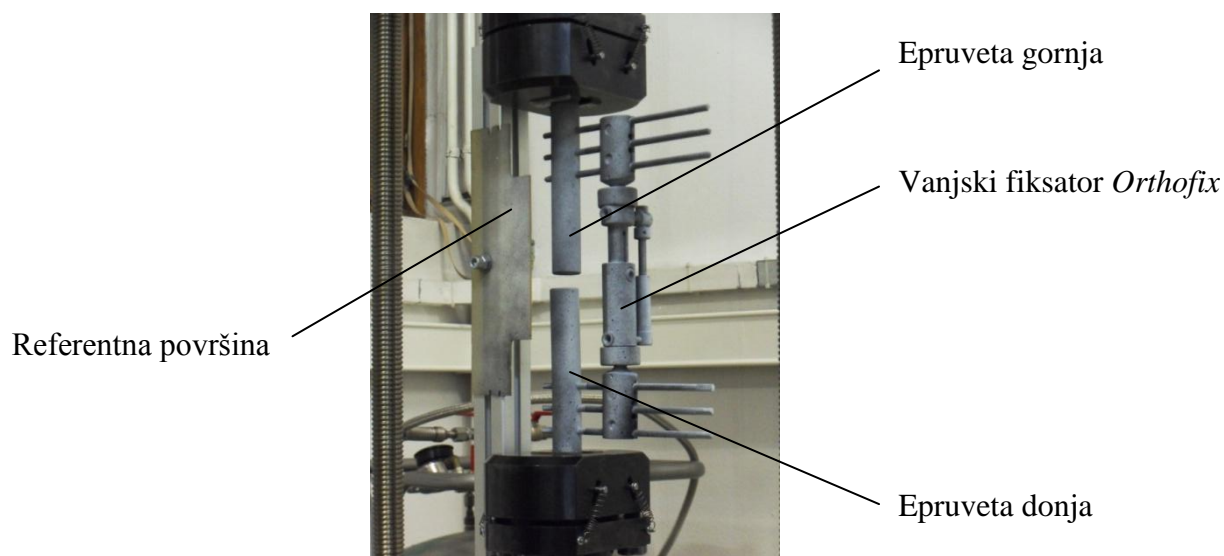
Slika 22. Uzorci rastera za razne veličine mjerne površine

Nakon što je dobiven zadovoljavajući raster (slika 23.) mjerni objekt se postavlja u vidno polje sustava te se učvršćuje u čeljustima statičke kidalice (slika 24.).



Slika 23. Dobiveni raster na površini fiksatora

Kako bi se dobile referentne točke u slučaju pomaka mjernog uzorka, na samu kidalicu postavlja se nepomični objekt s nanešenim rasterom koji će predstavljati referentni koordinatni sustav.



Slika 24. Fiksator u čeljustima statičke kidalice

Nakon ispravne kalibracije sustava za potreban mjerni volumen, nanošenja kvalitetnog rastera na ispitne uzorke, te postavljanja istih u čeljusti kidalice i vidno polje Aramisa, može se otpočeti s provedbom eksperimenta.

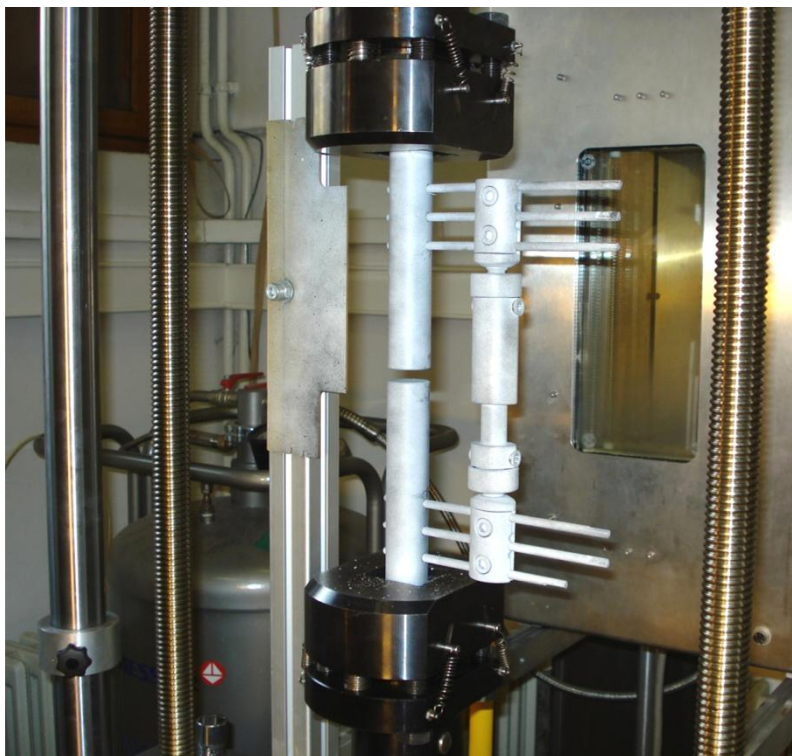
4.4. Provedba eksperimenta

U ovom poglavlju biti će opisana provedba eksperimenta s modelima nove konstrukcije te konstrukcije Orthofix. Ispitivanja su provedena s ciljem određivanja pomaka modela koštanih ulomaka pri aksijalnom opterećenju te opterećenju na savijanje u četiri točke, te usporedbe rezultata ispitne skupine (nova konstrukcija) s onima kontrolne skupine (Orthofix) kako bi se moglo pristupiti daljnjem poboljšanju novog fiksatora, ako se on pokaže nužnim nakon provedbe ispitivanja i analize rezultata.

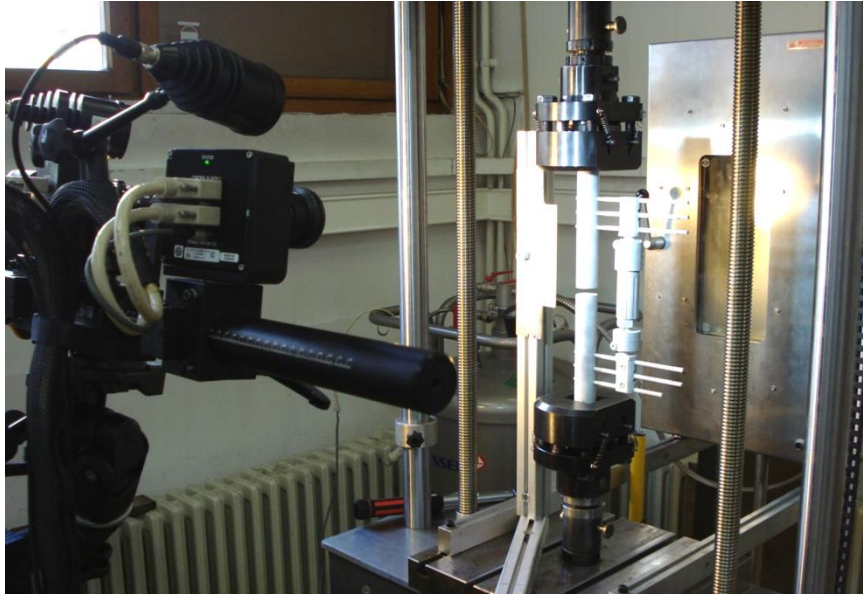
I pri aksijalnom kao i pri savojnom opterećenju, ispitivanje je provedeno na 3 modela s prekidom koštane mase od 10 mm, te na 3 modela s kontaktom ulomaka na mjestu prekida.

4.4.1. Ispitivanje pri aksijalnom opterećenju

Pri aksijalnom ispitivanju (slika 25. i 26.) fiksatori su bili opterećeni kvazistatičkom silom koja se kretala od 0 do 1000 N, a zatim su bili rasterećeni uz brzinu deformiranja od 5 N/s. Prvi snimak u svim ispitivanjima prikazuje fiksatore u neopterećenom stanju, a zatim su slike uzimane svakih 5 s, što značil da je pri svakom mjerenju kod aksijalnog opterećenja sustav Aramis snimio 80 snimaka.



Slika 25. Mjerenje pomaka na modelu kontrolne skupine



Slika 26. Mjerenje pomaka na ispitnom modelu

Kod modela s kontaktom na mjestu prekida nije bilo moguće provesti brzinu od 5 N/s budući da je pri toj brzini sila trenutno dostizala vrijednost od 1000 N uslijed dodira među ulomcima, te je pri ispitivanju na aksijalno opterećenje modela sa kontaktom na mjestu loma odabrana brzina deformiranja 0,1 mm/min, pri čemu je snimljeno ukupno 56 slika za svako ispitivanje ispitne skupine, dok je kod kontrolne skupine broj slika iznosio 44. Ova razlika u broju slika proizašla je iz različitog vremena u kojem su fiksatori dostigli maksimalno opterećenje od 1000 N.

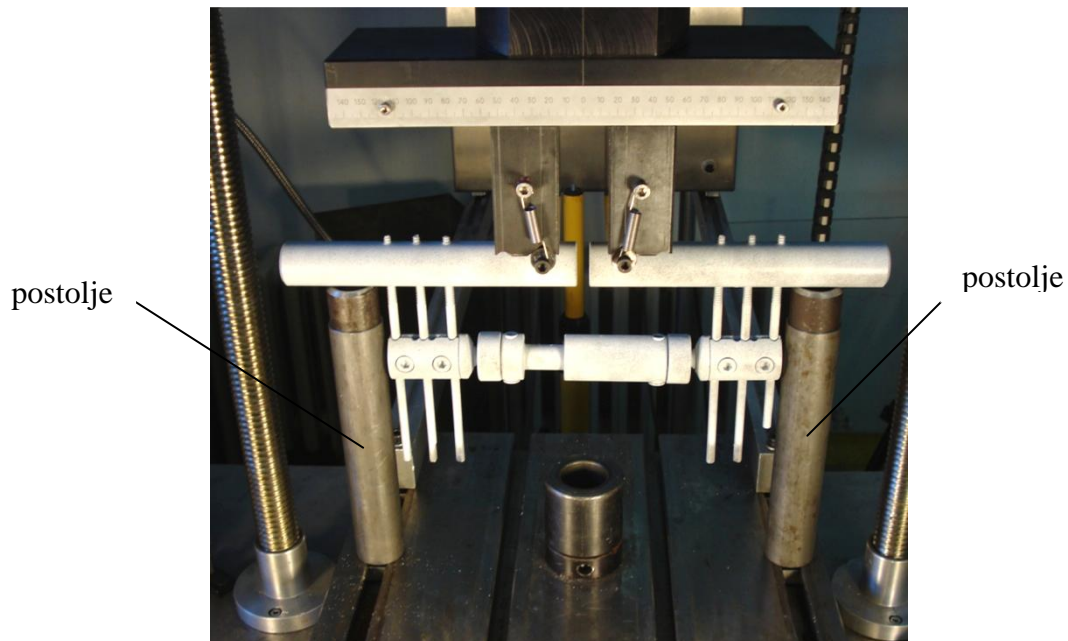
4.4.2. Ispitivanje pri savojnom opterećenju u četiri točke

Mjerenje pomaka pri savijanju u četiri točke nešto je zahtjevnije jer je tražilo izradu posebnog postolja (slika 27.) koje će osigurati dovoljan prostor za deformaciju fiksatora bez da utječe na samu deformaciju. Postolje je također trebalo onemogućiti rotaciju fiksatora ili je barem svesti na minimum.

Modeli su u ovom slučaju postavljeni horizontalno, oslonjeni su na postolje s međusobnim razmakom od 320 mm. Opterećenje se vršilo preko dva valjka promjera 16 mm, međusobno udaljenim 50 mm, a koji su pričvršćeni za pomični dio kidalice.

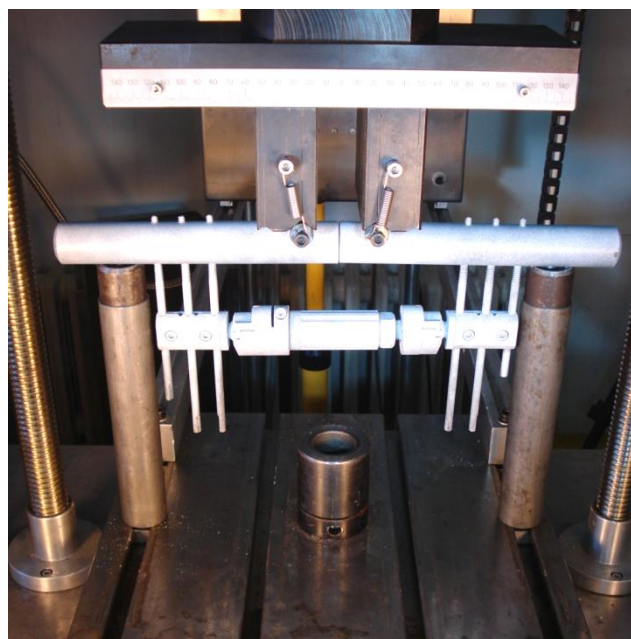
Opterećenje i rasterećenje oba fiksatora kretalo se brzinom 5 N/s do maksimalne sile od 250 N. Nakon prvog snimka koji prikazuje model u neopterećenom stanju, Aramis je automatski uzimao slike svake sekunde što znači da je za svaki model dobiveno 100 slika, a ispitne

epruvete mijenjane su nakon svakog ispitivanja kako bi se izbjegao eventualni utjecaj oštećenja ili deformacije epruvete na rezultat sljedećeg mjerenja.



Slika 27. Fiksator Orthofix opterećen na savijanje

Kod savojnog opterećenja fiksatora s dodirrom na mjestu prekida koštane mase (slika 28.), opterećenje i rasterećenje se također odvijalo brzinom od 5 N/s, također do 250 N. Slike su kao i u prethodnom slučaju uzimane svake sekunde što je dalo 100 slika po modelu. Epruvete su također mijenjane nakon svakog ispitivanja.



Slika 28. Model nove konstrukcije fiksatora opterećen na savijanje

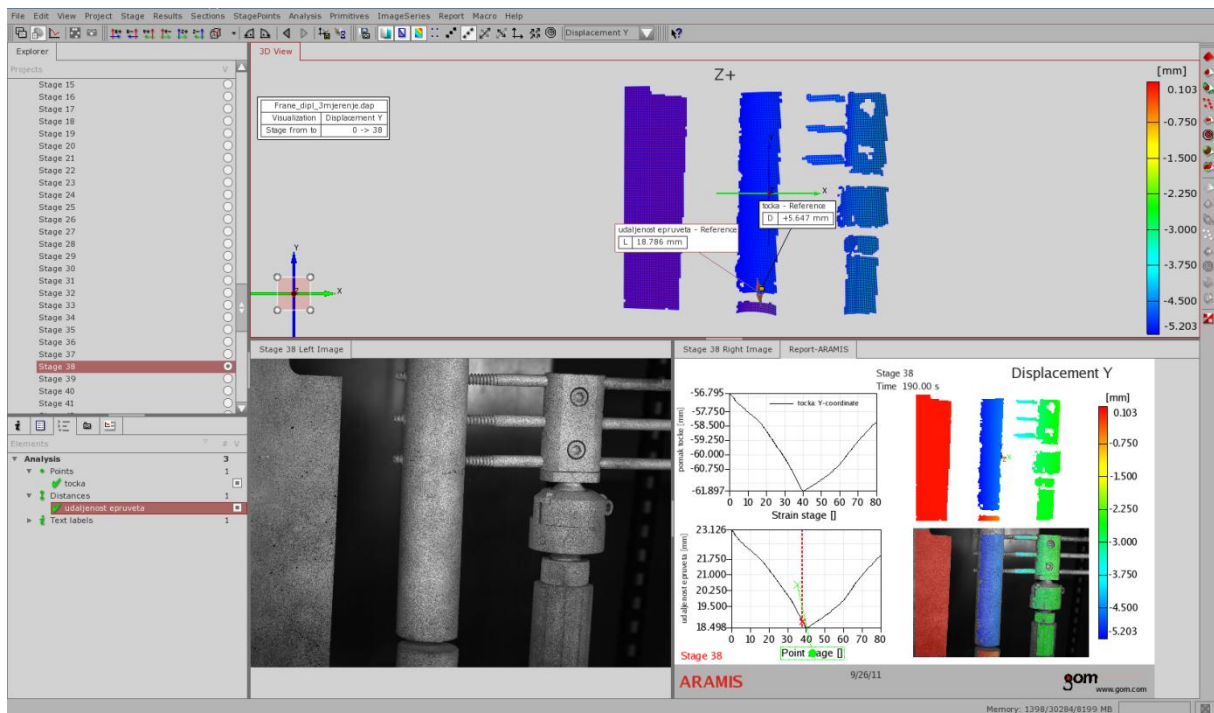
5. Rezultati eksperimentalnog ispitivanja stabilnosti fiksatora

Rezultati eksperimentalnog ispitivanja prikazuju pomake odabranih točaka na epruvetama, a dobiveni su obradom podataka prikupljenih mjerenjem na sustavu Aramis. U narednim poglavljima biti će prikazani rezultati ispitivanja stabilnosti fiksatora pri aksijalnom te pri savojnom opterećenju u četiri točke.

5.1. Rezultati ispitivanja stabilnosti pri aksijalnom opterećenju

Prilikom ispitivanja stabilnosti pri aksijalnom opterećenju praćeni su pomaci točaka na samom rubu gornjih epruveta koje su bile pričvršćene u pomičnu čeljust kidalice. Donje epruvete bile su pričvršćene u donjoj, nepomičnoj čeljusti te su zbog toga pomaci na njima bili zanemarivo mali u odnosu na pomake točaka na gornjim epruvetama.

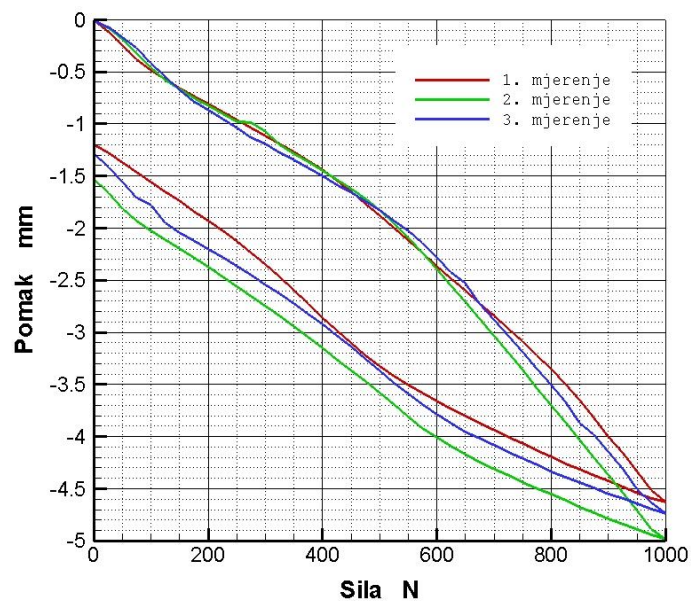
Slika 29 prikazuje sučelje programa mjernog sustava Aramis pri obradi podataka dobivenih mjerenjem pri aksijalnom opterećenju nove konstrukcije fiksatora.



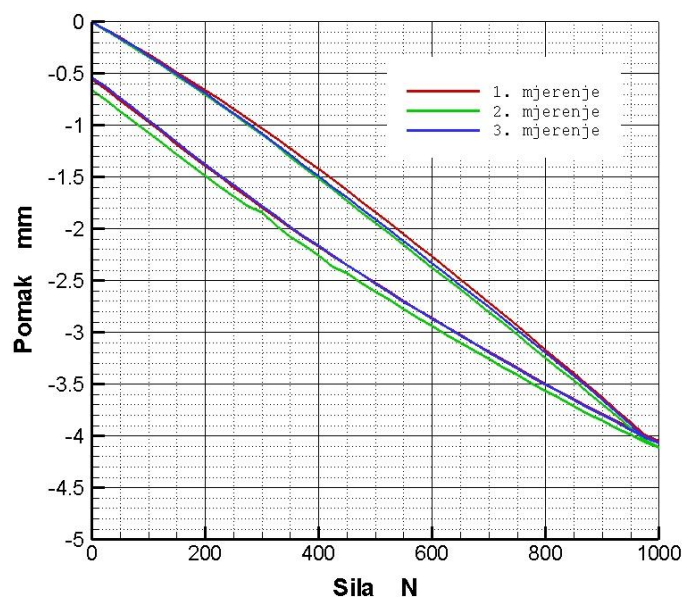
Slika 29. Određivanje pomaka pri aksijalnom opterećenju u programu Aramis v6.2

Na slikama od 31 do 41 prikazani su pomaci na modelima ispitne i kontrolne skupine, najprije za epruvete s prekidom koštane mase, a potom i za epruvete s dodirnom na mjestu prijeloma i tu u smjeru sve tri osi gdje je orijentacija pojedinih osiju vidljiva na slici 29. Na ovim slikama prikazane su faza opterećenja te faza rasterećenja za tri mjerenja po fiksatoru.

Maksimalne vrijednosti pomaka u smjeru sve tri koordinatne osi za svako mjerenje dane su u tablicama.



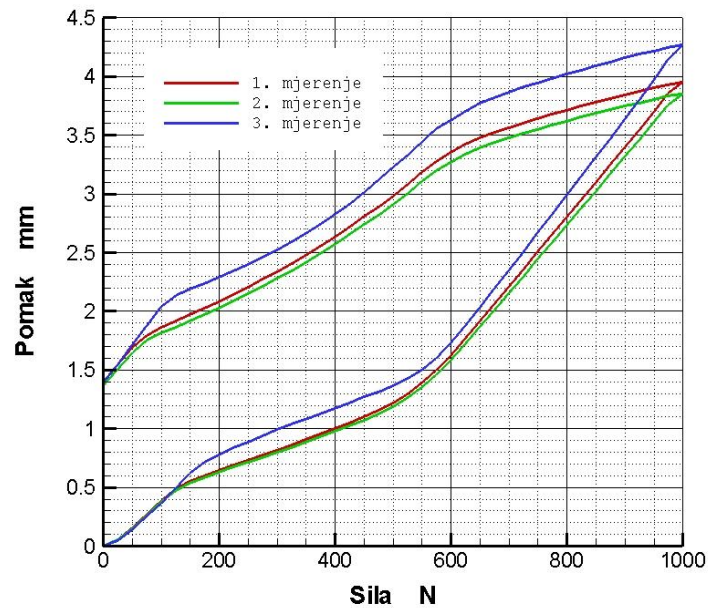
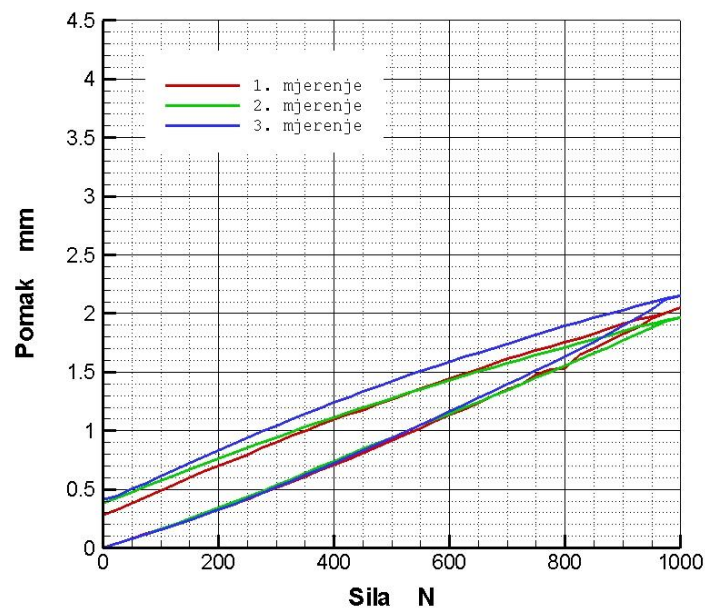
Slika 30. Pomaci u smjeru osi y na modelima ispitne skupine s prekidom koštane mase



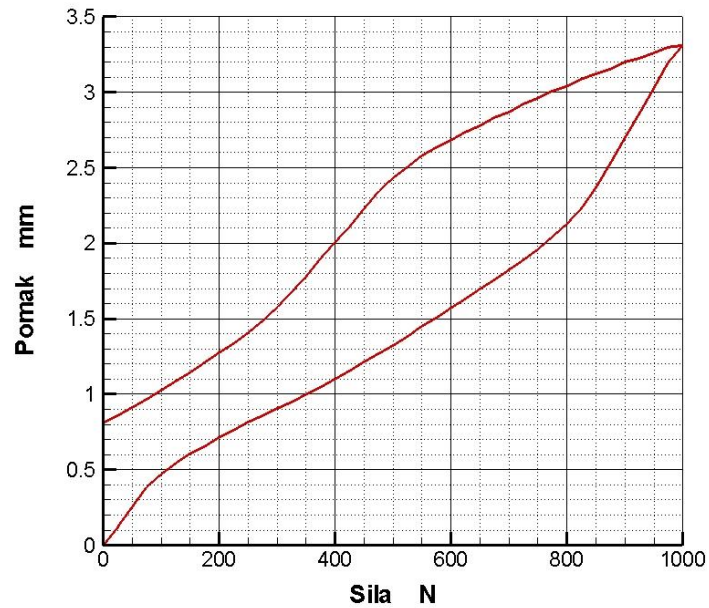
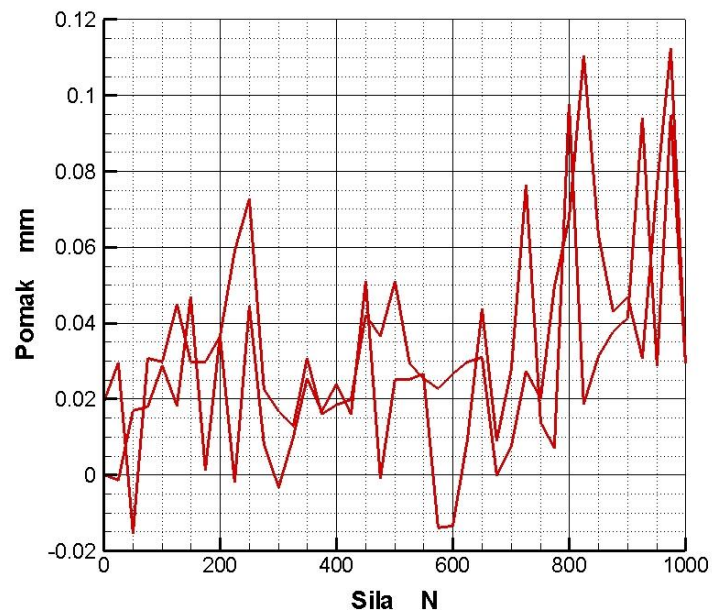
Slika 31. Pomaci u smjeru osi y na modelima kontrolne skupine s prekidom koštane mase

Tablica 1. Maksimalni pomaci u smjeru osi y na modelima s prekidom koštane mase

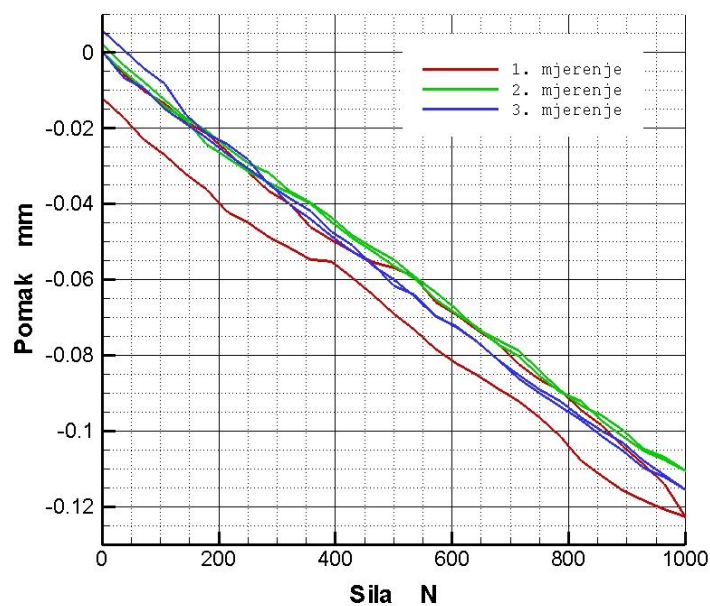
Mjerenje	Pomak mm	
	Ispitna skupina	Kontrolna skupina
1.	4,6273	4,0536
2.	4,9859	4,1147
3.	4,7407	4,0744
Srednja vrijednost	4,7846	4,0809
Standardna devijacija	0,1833	0,0311

Slika 32. Pomaci u smjeru osi x na modelima ispitne skupine s prekidom koštane maseSlika 33. Pomaci u smjeru osi x na modelima kontrolne skupine s prekidom koštane maseTablica 2. Maksimalni pomaci u smjeru osi x na modelima s prekidom koštane mase

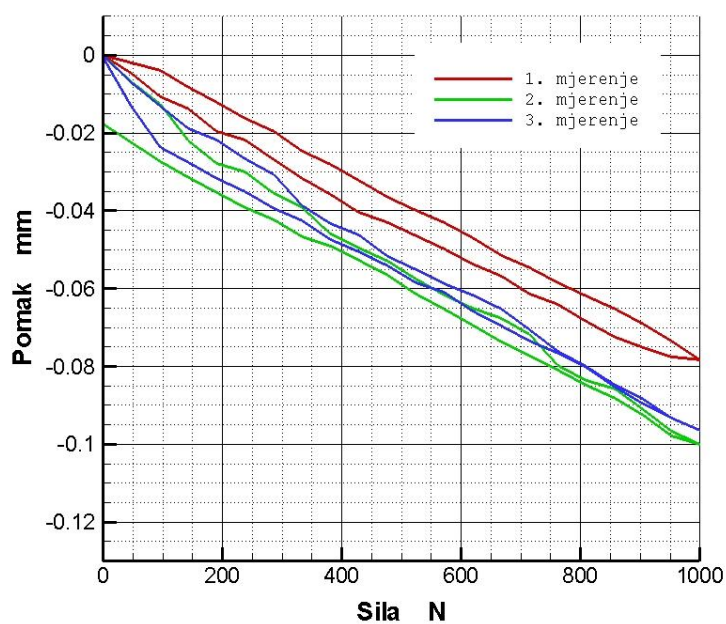
Mjerenje	Pomak mm	
	Ispitna skupina	Kontrolna skupina
1.	3,8535	2,0467
2.	3,8425	1,9678
3.	4,2703	2,1529
Srednja vrijednost	3,9888	2,0558
Standardna devijacija	0,2439	0,0929

Slika 34. Pomaci u smjeru osi z na modelu ispitne skupine s prekidom koštane maseSlika 35. Pomaci u smjeru osi z na modelu kontrolne skupine s prekidom koštane mase

Pomaci u smjeru osi z (os okomita na glavnu os epruveta – os y , a usmjerena je prema kamerama sustava Aramis) izrazito su nepravilno raspodjeljeni što se može objasniti malim pomacima epruveta unutar čeljusti kidalice, ali i relativnim rotacijama epruveta u odnosu na kamere koje Aramis registrira kao translatorne pomake. Iz toga razloga, na gornjim slikama dan je samo po jedan primjer pomaka u smjeru osi z za svaki fiksator.



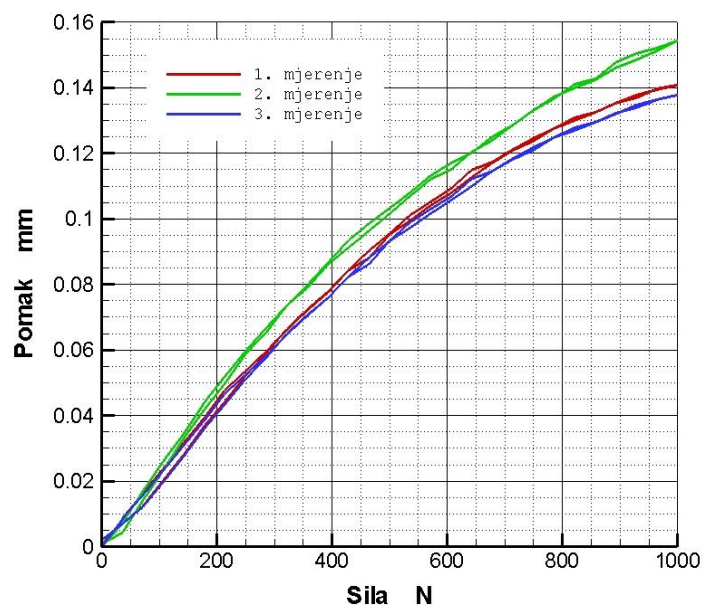
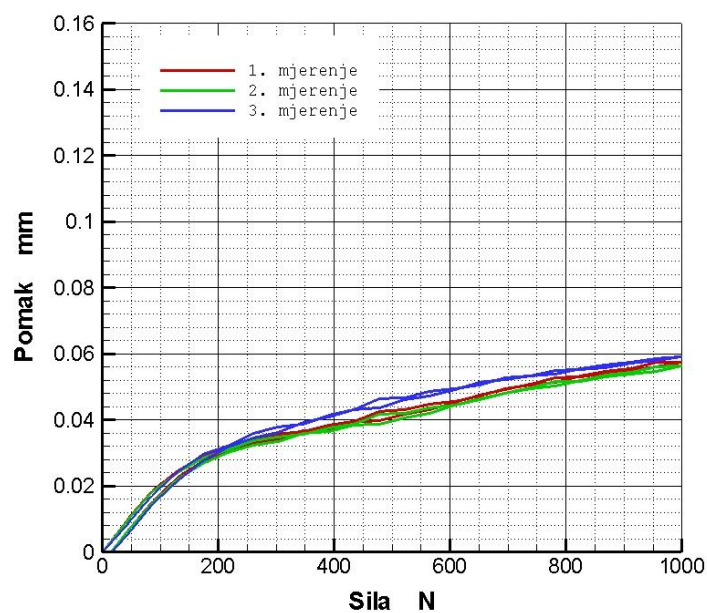
Slika 36. Pomaci u smjeru osi y na modelima ispitne skupine s ulomcima u kontaktu



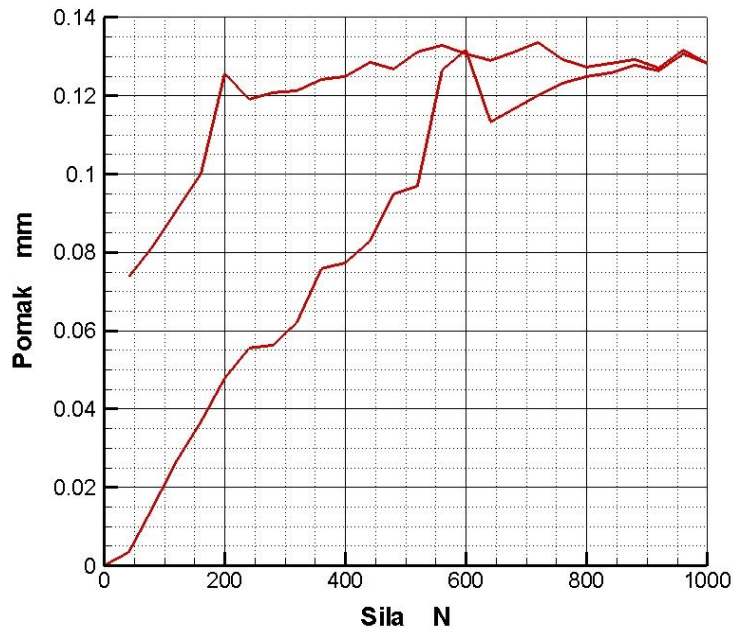
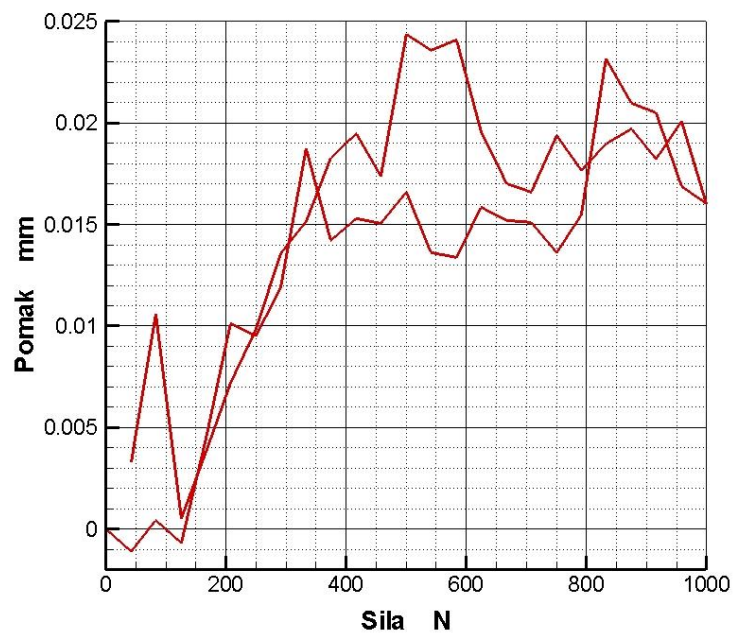
Slika 37. Pomaci u smjeru osi y na modelima kontrolne skupine s ulomcima u kontaktu

Tablica 3. Maksimalni pomaci u smjeru osi y na modelima s ulomcima u kontaktu

Mjerenje	Pomak mm	
	Ispitna skupina	Kontrolna skupina
1.	0,1226	0,0783
2.	0,1105	0,1001
3.	0,1154	0,0963
Srednja vrijednost	0,1162	0,0916
Standardna devijacija	0,0061	0,0116

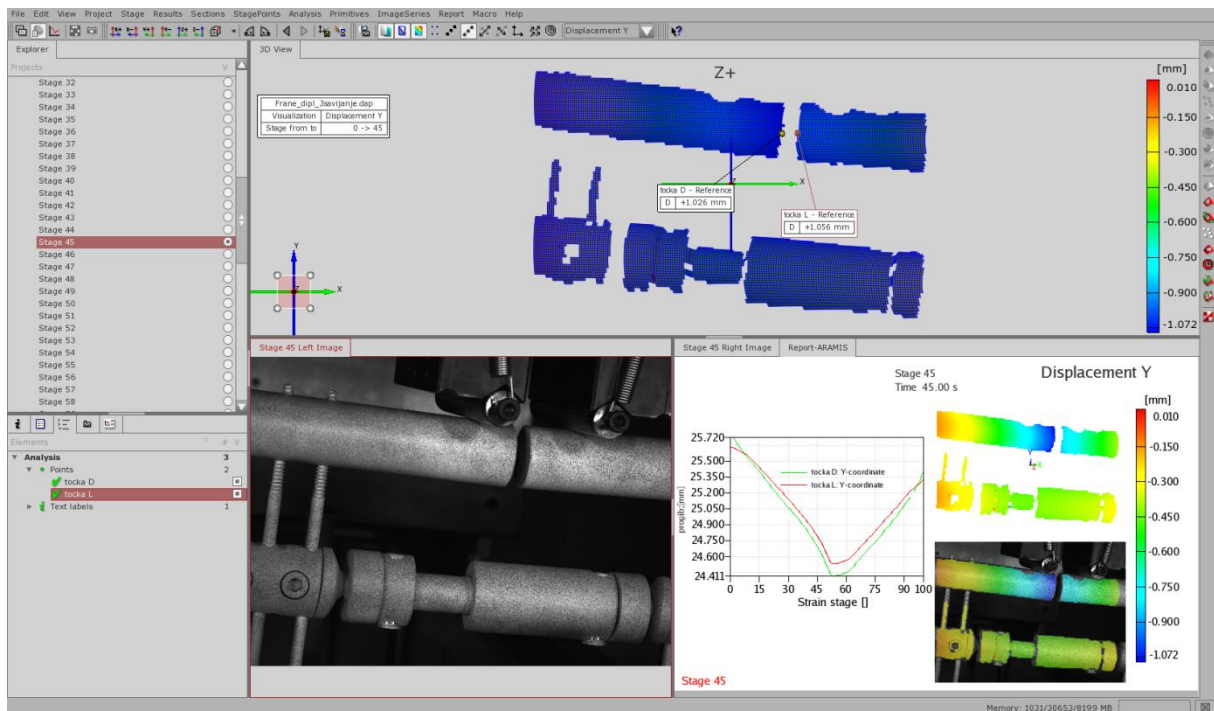
Slika 38. Pomaci u smjeru osi x na modelima ispitne skupine s ulomcima u kontaktuSlika 39. Pomaci u smjeru osi x na modelima kontrolne skupine s ulomcima u kontaktuTablica 4. Maksimalni pomaci u smjeru osi x na modelima s ulomcima u kontaktu

Mjerenje	Pomak mm	
	Ispitna skupina	Kontrolna skupina
1.	0,1377	0,0562
2.	0,1543	0,0556
3.	0,1379	0,0590
Srednja vrijednost	0,1433	0,0569
Standardna devijacija	0,0095	0,0018

Slika 40. Pomaci u smjeru osi z na modelima ispitne skupine s ulomcima u kontaktuSlika 41. Pomaci u smjeru osi z na modelima kontrolne skupine s ulomcima u kontaktu

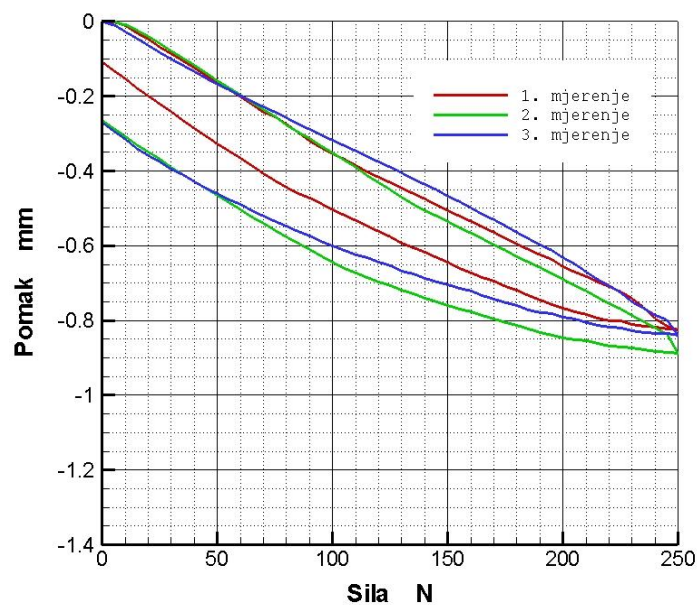
5.2. Rezultati ispitivanja stabilnosti pri savojnom opterećenju

Kada se govori o rezultatima ispitivanja pri savojnom opterećenju, misli se na iznos pomaka epruveta i to u točkama na samom lijevom i desnom rubu epruvete, tj. na mjestu prekida.

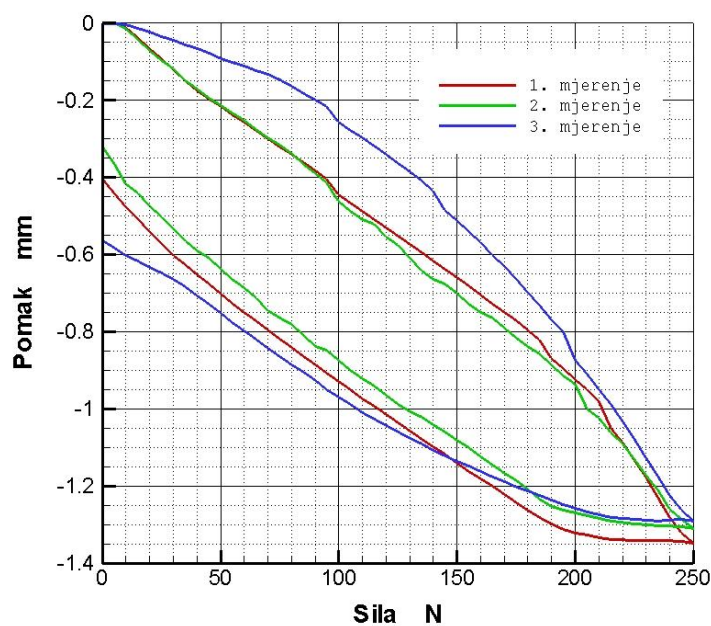


Slika 42. Određivanje pomaka pri savojnom opterećenju u programu Aramis v6.2

Orijentacija koordinatnog sustava vidljiva je na slici 42, a na slikama od 43 do 54 prikazani su pomaci odabranih točaka tijekom tri mjerenja prilikom opterećenja te rasterećenja, najprije za epruvete s prekidom koštane mase, a zatim i za epruvete s kontaktom na mjestu prijeloma. Maksimalne vrijednosti pomaka za svako mjerenje dane su u tablicama nakon prikazanih pomaka u smjeru pojedinih koordinatnih osi.



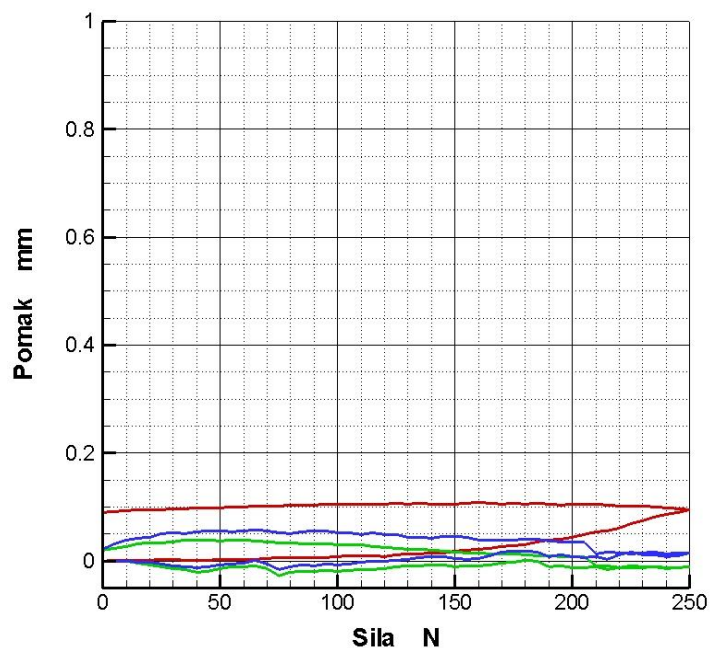
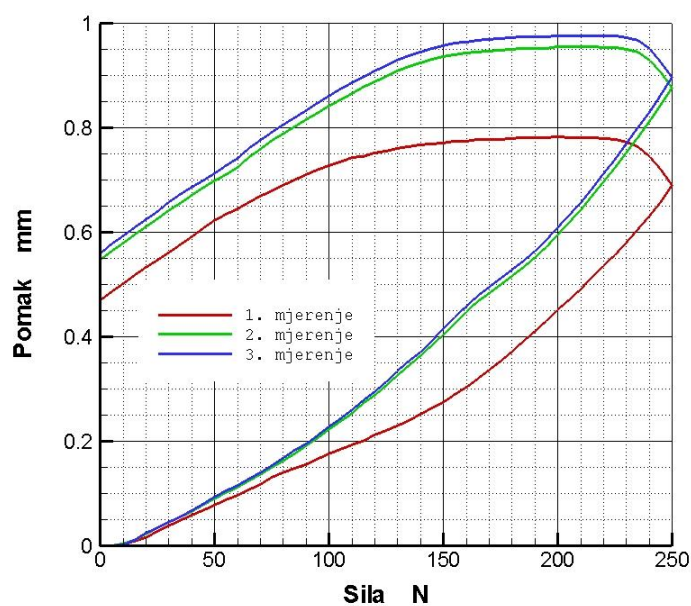
Slika 43. Pomaci u smjeru osi y na modelima ispitne skupine s prekidom koštane mase



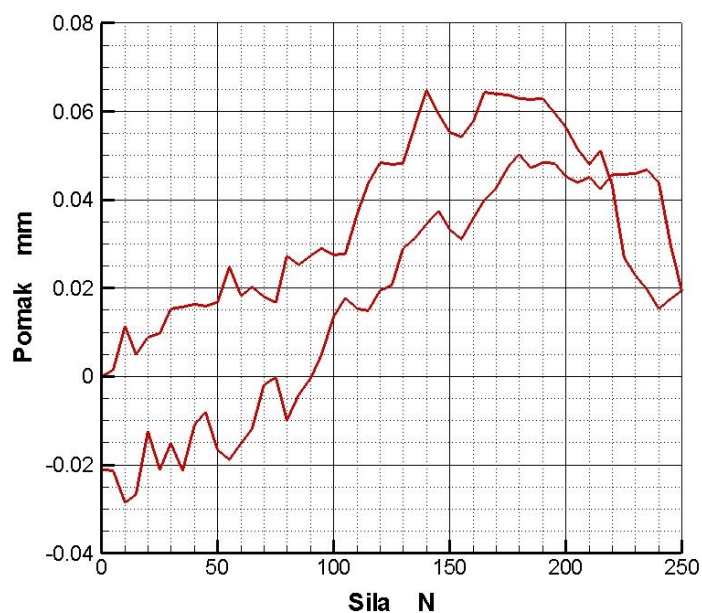
Slika 44. Pomaci u smjeru osi y na modelima kontrolne skupine s prekidom koštane mase

Tablica 5. Maksimalni pomaci u smjeru osi y na modelima s prekidom koštane mase

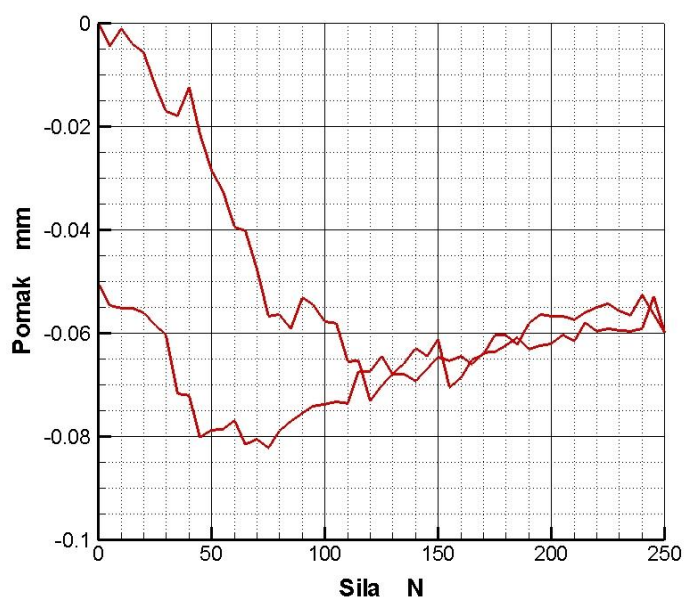
Mjerjenje	Pomak mm	
	Ispitna skupina	Kontrolna skupina
1.	0,815	1,348
2.	0,888	1,309
3.	0,839	1,291
Srednja vrijednost	0,847	1,316
Standardna devijacija	0,037	0,029

Slika 45. Pomaci u smjeru osi x na modelima ispitne skupine s prekidom koštane maseSlika 46. Pomaci u smjeru osi x na modelima kontrolne skupine s prekidom koštane maseTablica 6. Maksimalni pomaci u smjeru osi x na modelima s prekidom koštane mase

Mjerenje	Pomak mm	
	Ispitna skupina	Kontrolna skupina
1.	0,0668	0,6898
2.	0,0944	0,8760
3.	0,0798	0,8761
Srednja vrijednost	0,0803	0,8140
Standardna devijacija	0,0138	0,1075

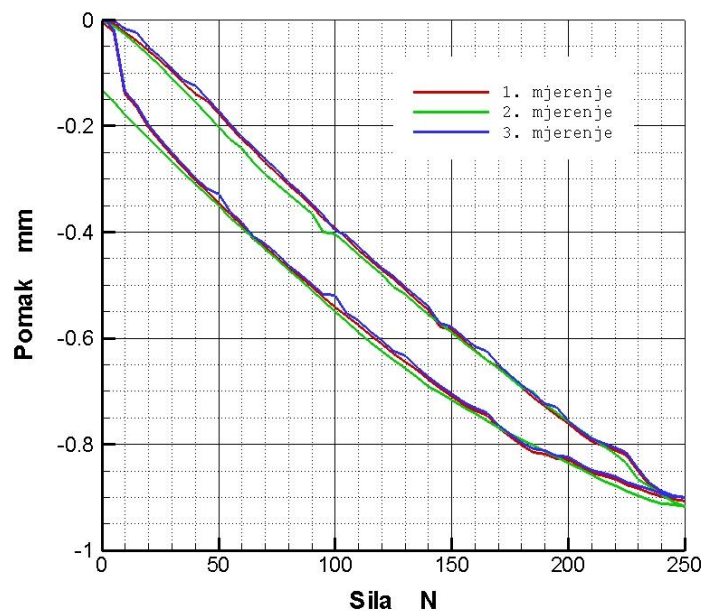


Slika 47. Pomaci u smjeru osi z na modelu ispitne skupine s prekidom koštane mase

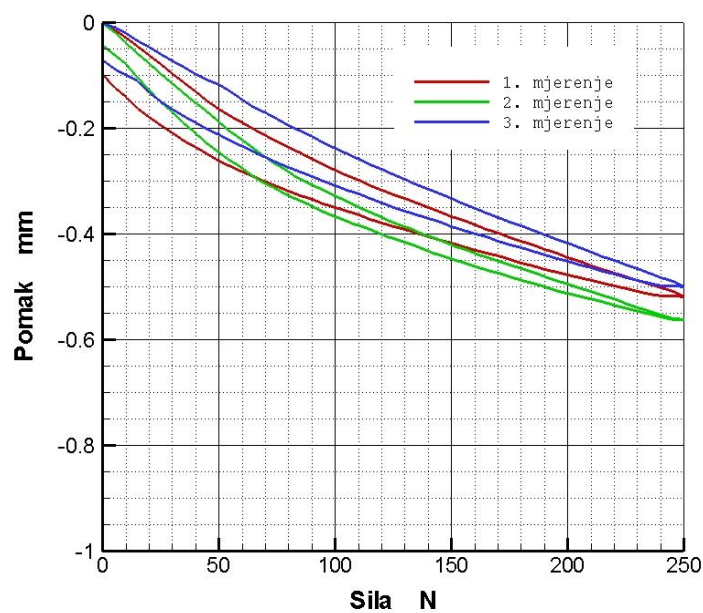


Slika 48. Pomaci u smjeru osi z na modelu kontrolne skupine s prekidom koštane mase

Kao i pri aksijalnom opterećenju, i kod savijanja u četiri točke dolazi do određenih pomaka u smjeru osi z za koje se može pretpostaviti da su posljedica minimalnih pomaka epruveta na postolju te rotacije epruveta tijekom savijanja koje sustav Aramis registrira kao translatorne pomake.



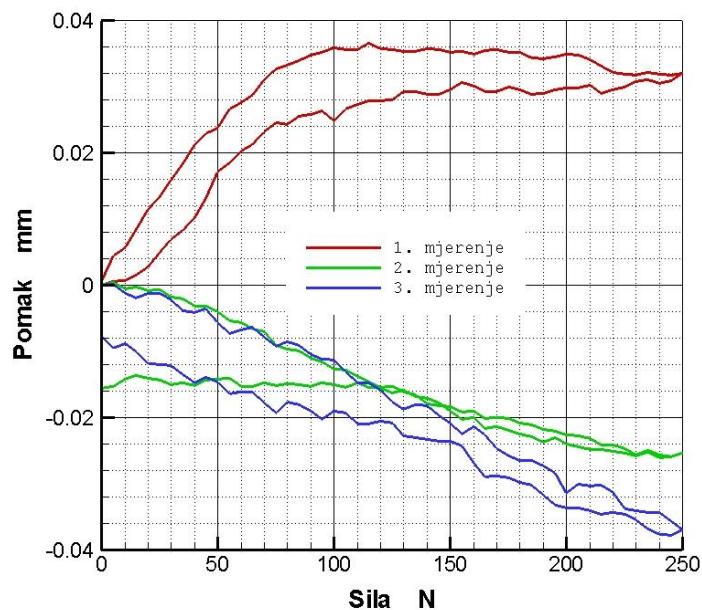
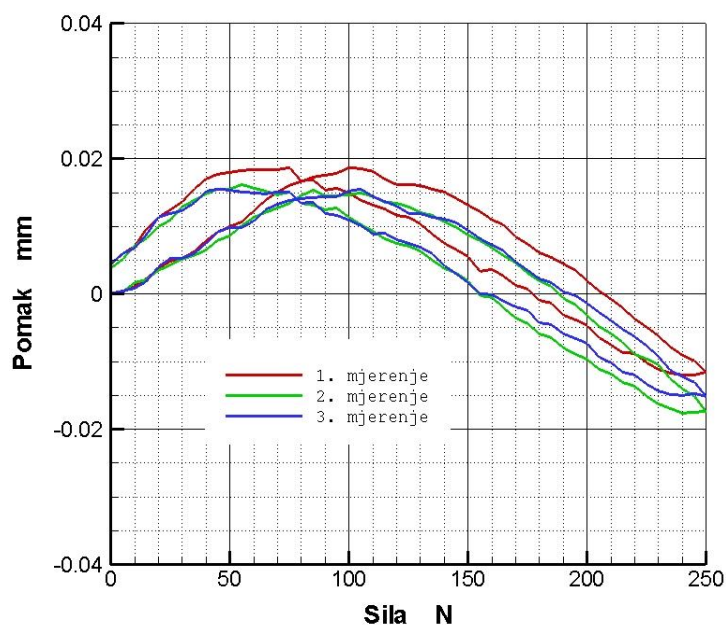
Slika 49. Pomaci u smjeru osi y na modelima ispitne skupine s ulomcima u kontaktu



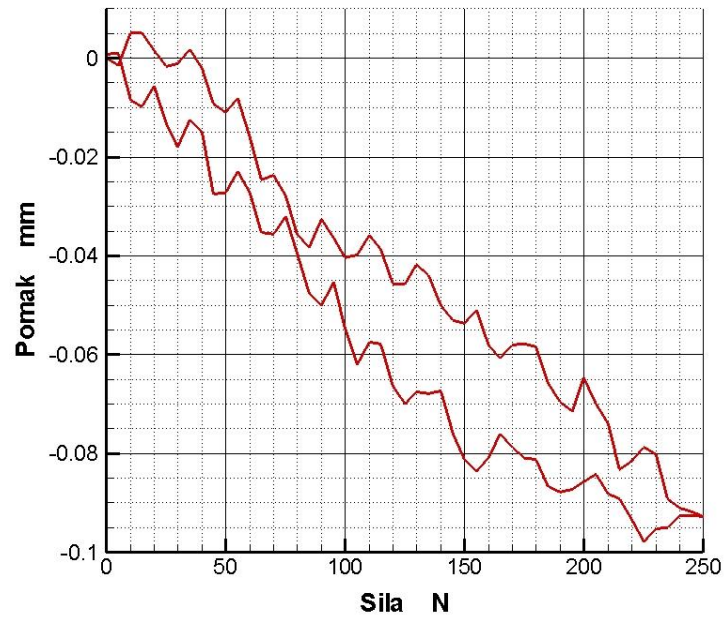
Slika 50. Pomaci u smjeru osi y na modelima kontrolne skupine s ulomcima u kontaktu

Tablica 7. Maksimalni pomaci u smjeru osi y na modelima s ulomcima u kontaktu

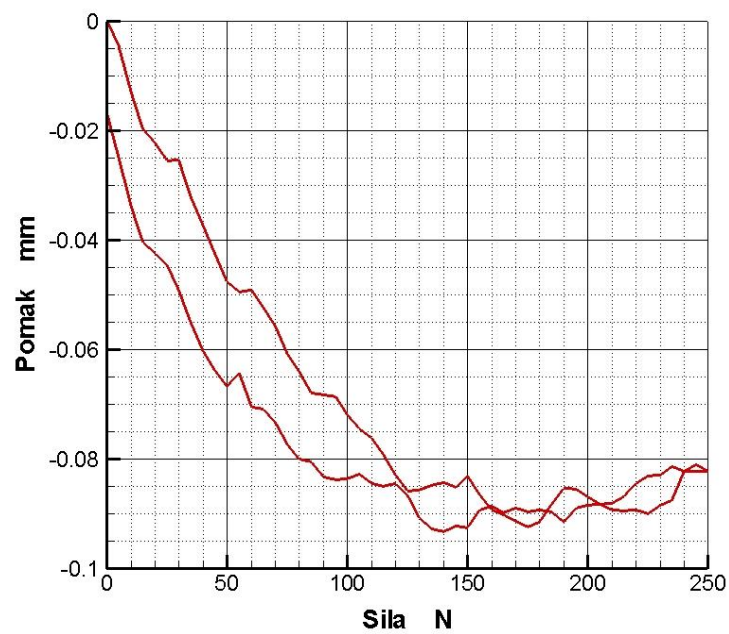
Mjerenje	Pomak mm	
	Ispitna skupina	Kontrolna skupina
1.	0,9063	0,5165
2.	0,9164	0,5593
3.	0,8998	0,4997
Srednja vrijednost	0,9075	0,5252
Standardna devijacija	0,0084	0,0307

Slika 51. Pomaci u smjeru osi x na modelima ispitne skupine s ulomcima u kontaktuSlika 52. Pomaci u smjeru osi x na modelima kontrolne skupine s ulomcima u kontaktuTablica 8. Maksimalni pomaci u smjeru osi x na modelima s ulomcima u kontaktu

Mjerenje	Pomak mm	
	Ispitna skupina	Kontrolna skupina
1.	0,0320	0,0190
2.	0,0253	0,0173
3.	0,0370	0,0151
Srednja vrijednost	0,0314	0,0171
Standardna devijacija	0,0059	0,0020



Slika 53. Pomaci u smjeru osi z na modelu ispitne skupine s ulomcima u kontaktu



Slika 54. Pomaci u smjeru osi z na modelu kontrolne skupine s ulomcima u kontaktu

6. ZAKLJUČAK

Provedbom eksperimentalnog ispitivanja stabilnosti vanjskih fiksatora došlo se do dvojakih rezultata, s jedne strane, nova konstrukcija fiksatora pokazala se boljim izborom prilikom opterećenja na savijanje u četiri točke, dok je po pitanju stabilnosti pri aksijalnom opterećenju Orthofixov fiksator pokazao bolja svojstva, kako u slučaju prekida koštane mase tako i u slučaju kontakta koštanih ulomaka na mjestu prijeloma.

Kod aksijalnog opterećenja Orthofix fiksatora za model s prekidom koštane mase pomaci su se u sva tri mjerenja ponašala prema približno jednakoj krivulji, i ukupno su bila manja od pomaka kod prototipa nove konstrukcije fiksatora, i to za 14,7% u smjeru osi y , 48,5% u smjeru osi x . Istovremeno su pomaci u smjeru osi z kod Orthofixa zanemarivo mali dok su kod nove konstrukcije oni reda veličine pomaka u smjeru osi x odnosno y . Ovakvi rezultati su posljedica kako konstrukcijskih rješenja tako i kvalitete izrade elemenata novog fiksatora.

Prema očekivanjima, kod modela s kontaktom koštanih ulomaka, pomaci su bili manji nego kod modela s prekidom koštane mase. Ovdje je također zapažen manji pomak u smjeru osi x i y kod fiksatora Orthofix nego kod nove konstrukcije, te se i pomaci u smjeru osi z ponašaju slično kao i kod modela s prekidom koštane mase, s tom razlikom da su ovdje kod Orthofixa ti pomaci približno istog reda veličine kao i pomaci u x i y smjeru.

Pri ispitivanju na savijanje nova konstrukcija je dala manje pomake i to za 35,6% u smjeru osi y , dok su pomaci u smjeru osi x manji kod nove konstrukcije za čak 90,1%, te u smjeru osi z za 68,4%. Kod savijanja modela s kontaktom koštanih ulomaka na mjestu prekida, srednja vrijednost pomaka fiksatora Orthofix manja je za 42,1% u smjeru osi y , dok su pomaci u smjeru osi x i z kod oba fiksatora iznimno mali.

Rezultati ispitivanja pokazuju da se novokonstruirani vanjski fiksator može uspješno koristiti u određenim uvjetima, ali isto tako ukazuju na to da su nužna neka konstrukcijska poboljšanja kako bi novi fiksator bio univerzalniji i primjenljiv kod svih vrsta prijeloma i opterećenja.

7. LITERATURA

- [1] http://en.wikipedia.org/wiki/Bone_fracture, siječanj 2012.
- [2] Müller, M. E., Allgöwer, M., Schneider, R., Willenegger, H., Udžbenik osteosinteze, Jugoslavenska medicinska naklada, Zagreb, 1981.
- [3] Pamuković, F., Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.
- [4] Hančević J. i sur., Lomovi i isčaušenja, Naklada Slap, Jastrebarsko, 1998., 89-96
- [5] Brcelj B., Ratna kirurgija, Sanitetska uprava JNA, Beograd, 1953., 5-14
- [6] Tscherne H., The management of open fractures. U: Tscherne H, Gotzen L, Fractures with soft tissue injuries. Springer, Berlin, 1984, 1-162
- [7] Alfirević, I., Nauka o čvrstoći, Tehnička knjiga, Zagreb 1989.
- [8] Aramis User Manual – Software, GOM mbH, Njemačka 2009.
- [9] Drvar, N., Optički postupak digitalizacije oblika projiciranjem kodiranog svjetla, Doktorska disertacija, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2007.
- [10] Aramis User Information – Hardware, GOM mbH, Njemačka 2009.