

**UNIVERZITET U BEOGRADU
TEHNOLOŠKO-METALURŠKI FAKULTET**

Isaak Trajković

**ODREĐIVANJE OTPORNOSTI PREMA LOMU
MATERIJALA CEVOVODA ISPITIVANJEM
NOVE EPRUVETE OBLIKA PRSTENA
IZLOŽENE ZATEZANJU**

- Doktorska disertacija -

Beograd, 2024.

**UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF TECHNOLOGY AND METALLURGY**

Isaak Trajković

**DETERMINATION OF FRACTURE
RESISTANCE OF PIPELINE MATERIALS
BY EXAMINATION OF THE NEW
RING-SHAPED SPECIMEN
EXPOSED TO TENSION**

- Doctoral Dissertation -

Belgrade, 2024

Mentor:

dr Bojan Međo, Vanredni profesor
Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet

Članovi Komisije:

dr Slaviša Putić, Redovni profesor
Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet

dr Ljubica Milović, Redovni profesor
Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet

dr Marina Dojčinović, Redovni profesor
Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet

dr Miloš Milošević, Naučni savetnik
Inovacioni centar Mašinskog fakulteta u Beogradu

dr Zorana Golubović, Viši naučni saradnik
Inovacioni centar Mašinskog fakulteta u Beogradu

Kandidat: Isaak Trajković, mast.inž.tehnol.

Datum odbrane: _____

ZAHVALNICA

Za upis na doktorske studije zahvalan sam svojoj majci Nadici koja je na mnogo načina uticala na moj lični i akademski razvoj.

Zahvalan sam čoveku koji je prepoznao potencijal mog razvoja, ponudio mi uslove za isti i još mnogo prostora za učenje a to je dr Miloš Milošević.

Zahvalan sam čoveku koji me je podržao u sportskom i akademskom razvoju, uticao na izbor pravih odluka u mom životu a to je Aco Ćirović.

Zahvalan sam svom mentoru prof. dr Bojanu Među koji je imao strpljenja za moje učenje i navodio me korak po korak do ovog važnog ostvarenja.

Zahvalan sam prof. emeritusu Aleksandru Sedmaku na rešenjima za svaki problem koji sam imao na putu ostvarenja doktorata i podršci na istom.

Zahvalan sam prof. dr Jovanu Tanaskoviću koji je nesebično svojim savetima i ličnim kontaktima pomogao izradu ove doktorske disertacije.

Zahvalan sam kolegama Ivani Jevtić, Milanu Travici i Aleksi Milovanoviću na vremenu i pomoći koju su mi pružili tokom eksperimentalnih ispitivanja.

Zahvalan sam dr Nini Obradović koja je svojim pogledom na akademsku zajednicu i praktičnim savetima za lakši i brži razvoj veoma doprinela mojoj istrajnosti na putu izrade ove doktorske disertacije.

Zahvalan sam dr Nataši Obradović koja je svojim savetima i primerom bila velika podrška u ostvarenju ove doktorske disertacije.

Zahvalan sam svojim sestrama Jeleni Trajković i Ivani Stefanović što su mi bile velika podrška u trenucima slabosti.

Zahvalan sam mom bratu Luki Simjanoviću koji je verovao u mene, u pozitivan ishod mojih doktorskih studija i bio velika podrška u trenucima kada sam bio na korak od prekida studija.

Zahvalan sam mom ocu Draganu Trajkoviću koji je u meni ceo život budio inat a taj inat je doprineo završetku doktorskih studija.

Hvala kolegama prof. dr Nenadu Mitroviću, prof. dr Goranu Mladenoviću, dr Martini Balać i dr Snežani Kirin na svoj pruženoj i ponuđenoj pomoći za izradu ove disertacije.

Zahvaljujem Nenadu Jarakoviću i kompaniji „Servoteh DOO“ na izradi epruveta za eksperimentalno ispitivanje.

Na kraju hvala i slava prof. Marku Rakinu, rodonačelniku ove teme u Srbiji koji nas je prerano napustio prošle godine.

SAŽETAK

Cilj ove disertacije je razvoj metode za određivanje otpornosti prema lomu i oštećenju materijala cevovoda, pre svega namenjene ispitivanju tankozidnih cevi za koje ne postoje standardne procedure za ispitivanje. U ovom radu je prikazan pregled trenutnog stanja istraživanja iz ove oblasti, sa posebnim naglaskom na razvoj nestandardnih epruveta, tehnika i pomoćnih alata za ispitivanje mehanike loma cilindričnih struktura. Takođe, opisana su dosadašnja istraživanja sprovedena primenom eksperimentalnih i numeričkih metoda. U eksperimentalnom delu istraživanja, prikazani su rezultati dobijeni ispitivanjem novih epruveta tipa PRNT (*Pipe Ring Notched Tension*) i epruveta tipa SENT (*Single Edge Notched Tension*) od plastičnih (PLA – polylactide acide i PA12 – polyamide) i metalnih materijala (čelik P235TR1 i P235GH). Epruvete od plastičnih materijala izrađene su tehnikama aditivne proizvodnje: FDM (*Fused Deposition Modeling*) za PLA materijal i SLS (*Selective Laser Sintering*) za PA12 materijal, dok su epruvete od metala izrađene na CNC laserskoj mašini i erozimat. Sve epruvete ispitane su na univerzalnoj mašini za ispitivanje materijala Shimadzu AGS-X 100 kN korišćenjem alata specijalno projektovanog za geometriju epruveta oblika prstena, kao što je PRNT. Rad mašine za ispitivanje materijala pratio je rad Aramis 2M sistema za optička merenja polja pomeranja i deformacija koje se javljaju usled delovanja sila u pravcu zatezanja epruveta. Sistem Aramis 2M bazira se na metodi digitalne korelacije slika (*DIC – Digital Image Correlation*), što je omogućilo precizno merenje parametara čije su vrednosti zasnovane na trodimenzionalnom kretanju jednog segmenta. Zahvaljujući eksperimentalnim ispitivanjima došlo se do uvodnih parametara za numerička ispitivanja koja su sprovedena na modelima PRNT i SENT a to su sila, pomeranje, *CMOD* (*Crack Mouth Opening Displacement*) i *CTOD- δ_5* (*Crack Tip Opening Displacement*). Numeričkim putem, primenom metode konačnih elemenata na navedene dve geometrije pri različitim dimenzijama došlo se do vrednosti parametara mehanike loma (*J*-integral, *K_I* - faktor intenziteta napona) čiji je uporedni prikaz dat u ovom radu. Formirani su dijagrami zavisnosti odnosa parametra *K_I* za PRNT i SENT modele za različite geometrije epruvete i inicijalnog oštećenja. Numeričkim putem dobijene su vrednosti parametra η_{pl} za različite dimenzije modela PRNT i SENT. Dobijene vrednosti rezultata merenja i proračuna, kao i ponovljivost postupka, daju značajne dokaze da je razvijena metoda pogodna za primenu na tankozidnim cilindričnim geometrijama. Na osnovu navedenog može se zaključiti da postupak ispitivanja PRNT epruveta ima potencijal za korišćenje kao nestandardna metoda za ispitivanje tankozidnih cevi.

Ključne reči: *epruvete oblika prstena izložene zatezanju, ravna epruveta za zatezanje sa ivičnom prslinom, digitalna korelacija slika, faktor intenziteta napona, J-integral, mehanika loma, cevovod*

Naučna oblast: Tehnološko inženjerstvo

Uža naučna oblast: Inženjerstvo materijala

ABSTRACT

The goal of this dissertation is the development of a method for determining the resistance to fracture and damage of pipeline materials, primarily intended for the testing of thin-walled pipes for which there are no standard testing procedures. This dissertation contains an overview of the current state of research in this area, with special emphasis on the development of non-standard test specimens, techniques and auxiliary tools for testing the fracture mechanics of cylindrical structures. Also, previous research conducted using experimental and numerical methods is described. In the experimental part of the research, the results obtained by testing new test specimens of the PRNT (*Pipe Ring Notched Tension*) type and SENT (*Single Edge Notched Tension*) type made of polymer materials (PLA - *polylactide acid* and PA12 - *polyamide*) and metal materials (steel P235TR1 and P235GH) are presented). Test specimens made of plastic materials are made using additive manufacturing techniques such as FDM (*Fused Deposition Modeling*) for PLA material and SLS (Selective Laser Sintering) for PA12 material, while metallic specimens are made on a CNC laser machine and erosimat. All specimens were tested on a Shimadzu AGS-X 100 kN universal material testing machine using a tool specially designed for ring-shaped specimen geometry, such as the PRNT. The operation of the material testing machine was accompanied by the operation of the Aramis 2M system for optical measurements of displacement fields and deformations that occur due to the action of forces in the direction of the tensile loading. The Aramis 2M system is based on the method of digital image correlation (DIC), which enabled the precise measurement of parameters whose values are based on the three-dimensional movement of one segment. Thanks to the experimental tests, the initial parameters for the numerical calculations that were carried out on the PRNT and SENT models were obtained: force, displacement, *CMOD* (*Crack Mouth Opening Displacement*) and *CTOD- δ_5* (*Crack Tip Opening Displacement*). Numerically, using the finite element method, the values of the parameters of the fracture mechanics (*J*-integral, K_I - stress intensity factor) were obtained for the mentioned two geometries with different dimensions, the comparative presentation of which is given in this paper. Diagrams of the dependence of the ratio of the K_I parameter for PRNT and SENT models for different test specimen geometries and initial damage were formed. Values of the parameter η_{pl} were obtained numerically for different dimensions of the PRNT and SENT models. The obtained values of the measurement and calculation results, as well as the repeatability of the procedure, provide significant evidence that the developed method is suitable for application on thin-walled cylindrical geometries. Based on the above, it can be concluded that the test procedure of PRNT test tubes has the potential to be used as a non-standard method for testing thin-walled pipes.

Keywords: *Pipe Ring Notched Tension Specimen, Single Edge Notch Tension specimen, Digital Image Correlation, Stress Intensity Factor, J-Integral, Fracture Mechanics, Pipeline*

Scientific field: Technological Engineering

Narrower scientific field: Materials Engineering

Sadržaj

1. Uvod	1
2. Pregled literature	3
2.1. Linearno elastična i elasto-plastična mehanika loma	3
2.1.1. Zona naprezanja oko vrha prsline i tipovi otvaranja	3
2.1.2. Elasto-plastično ponašanje materijala	5
2.1.3. Faktor intenziteta napona K	7
2.1.4. J -integral	8
2.1.5. Otvaranje vrha prsline ($CTOD$ i $CTOD-\delta_5$)	10
2.1.6. Veza J -integrala i parametra $CTOD$	12
2.2. Pregled prethodnih radova sa standardnim procedurama za određivanje parametara mehanike loma	13
2.3. Pregled prethodnih radova sa nestandardnim oblicima epruveta za ispitivanje materijala cevovoda	14
2.4. Pregled prethodnih radova sa nestandardnim procedurama za određivanje parametara mehanike loma	19
3. Metodologija i materijali	32
3.1. Ispitani materijali	32
3.1.1. PLA (polylactide acide) – poli(mlečna kiselina)	32
3.1.2. PA12 – Poliamid	34
3.1.3. Čelici P235TR1 i P235GH	36
3.2. Eksperimentalne metode	41
3.2.1. Aditivna proizvodnja i tehnike aditivne proizvodnje	41
3.2.2. Ispitivanje zateznih osobina	45
3.2.3. Ispitivanje mehanike loma	47
3.2.4. Digitalna korelacija slika (DIC – Digital Image Correlation)	48
3.2.5. Ispitivanje prelomnih površina	53
3.3. Numerička analiza	54
3.3.1. Uvod u numeričku analizu	54
3.3.2. Granični uslovi i definisanje izlaznih parametara	57
4. Eksperimentalni rezultati	61
4.1. Rezultati ispitivanja epruveta PRNT i SENT od PLA materijala	61
4.2. Rezultati ispitivanja epruveta PRNT i SENT od PA12 materijala	68
4.3. Rezultati ispitivanja epruveta RHNT i RHNT od P235TR1 materijala	75
4.4. Rezultati ispitivanja epruveta PRNT od P235TR1 i P235GH materijala	80
4.5. Rezultati merenja površina	95
5. Numerički rezultati	100
5.1. Rezultati proračuna na modelima PRNT i SENT sa osobinama materijala PA12	100
5.2. Rezultati proračuna na modelima PRNT i SENT sa osobinama materijala P235TR1	104
6. Zaključak	138
7. Literatura	141

1.Uvod

Transport tečnosti i granuliranih materijala na industrijskom nivou mahom se vrši kroz cevovode, a njihova pouzdanost i dugovečnost imaju ključnu ulogu u održavanju efikasnosti različitih industrijskih procesa. Stoga, inovativne metode za procenu integriteta cevovoda i predviđanje mogućih problema predstavljaju važan fokus istraživanja u ovom polju. Jedan od pristupa proučavanju ove tematike uključuje primenu mehanike loma, naročito koncepta *CTOD- δ_5* (*Crack Tip Opening Displacement*). Ovaj metod je omogućio bolje razumevanje različitih mehanizama otkaza koji se mogu otkriti ispitivanjem bez razaranja (NDE), čime se olakšava procena kada je neophodno preduzeti akciju za popravku cevovoda.

Međutim, postojeće metode ispitivanja čvrstoće često ne uzimaju u obzir specifičnosti geometrije realnih cevovoda, naročito onih sa tankim zidovima. Za standardne procedure obično se koriste kompaktne epruvete na zatezanje (CT – *Compact Tension*) ili epruvete sa žlebom opterećene na savijanje (SENB – *Single Edge Notched Bending*) prema standardu Američkog društva za testiranje i materijale ASTM E1820, za koje u većini slučajeva nije moguće dobiti ispitne epruvete iz cevovoda proizvedenih prema standardima EN-10216-2 i EN-10217-2. Kako bi se rešio ovaj problem, istraživači nastoje da definišu i prilagode nove geometrije epruveta koje bi mogle da obezbede merodavne rezultate prilikom ispitivanja otpornosti na lom cevovoda. Jedna od definisanih geometrija epruveta oblika prstena jeste PRNB – *Pipe Ring Notch Bending* tip epruvete koji je Dr Darko Damjanović u svojoj disertaciji koristio u cilju određivanja uticaja zaostalih napona na lomna svojstva materijala cevi nastalih kao posledica tehnologije proizvodnje cevi. Njegova disertacija predstavlja nastavak istraživanja novog tipa epruveta oblika prstena koji su prvi formirali prof. Dr Nenad Gubelj (University of Maribor, Slovenia) i prof. Dr Yury Matvienko (Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia).

Tri godine kasnije na Univerzitetu u Beogradu, Tehnološko-metalurškom fakultetu svoju tezu Walid Musrati je odbranio na temu karakterizacije oštećenja i loma materijala cevovoda korišćenjem epruveta oblika prstena, pod mentorstvom prof. Marka Rakina. Doktorska disertacija Dr W. Musratija bila je ključna u definisanju naučnog interesa ove disertacije, prepoznat je problem i značaj rešavanja problema ispitivanja materijala cevovoda, kao i definisanja novog tipa epruveta i procedure za ispitivanje istih.

U ovom radu, predstavljen je novi pristup proceni loma kroz razvoj eksperimentalno-numeričke procedure. Fokus ove disertacije je na analizi oštećenja i razvoja loma u tankozidnim polimernim, a pre svega čeličnim cevima koje se često koriste u industrijskim sektorima poput hemijske, naftne i gasne industrije. Razvoj procedure koristeći specijalno dizajnirane epruvete oblika prstena sa oštrim žlebom opterećene na zatezanje PRNT (*Pipe Ring Notch Tension*). Radi bržeg razvoja procedure korišćene su epruvete proizvedene FDM (*Fused Deposition Modeling*) tehnikom aditivne proizvodnje, a potom SLS (*Selective Laser Sintering*) tehnikom proizvodnje koje su zbog homogenije strukture materijala dale bolje rezultate i značajnije uticale na razvoj same procedure. Nakon ispitivanja i analize polimernih 3-D štampanih epruveta, ispitane su epruvete dobijene iz cevi od čelika P235TR1 i P235GH.

Ispitivanja sprovedena kroz ovu disertaciju omogućila su bolje razumevanje procesa loma u navedenim materijalima određivanjem parametara mehanike lome kao što su *J*-integral, K_I , otvaranje usta prsline (*CMOD – Crack Mouth Opening Displacement*), otvaranje vrha prsline (*CTOD- δ_5 – Crack Tip Opening Displacement*) i rast prsline Δa .

Cilj istraživanja je razvoj nove nestandardne epruvete oblika prstena izložene zatezanju, sa oštrim koncentраторom napona u uzdužnom pravcu, što uključuje razvoj procedure ispitivanja, metodologije određivanja parametara mehanike loma i obrade rezultata ispitivanja, čijom primenom će se prevazići problemi koji se javljaju pri primeni postojećih postupaka ispitivanja otpornosti prema lomu na materijale tankozidnih cevovoda.

Rezultati obuhvataju određivanje uticaja više faktora na otpornost prema lomu, pre svih broja koncentratora napona (jedan ili dva) i njihove dužine, dimenzija epruvete, kao i načina opterećenja (zatezanje i savijanje). Verifikovana je primenljivosti epruveta oblika prstena sa jednim koncentраторom napona, koje se mogu ispitati zatezanjem, ali ne i savijanjem. Uticaj navedenih faktora je kvantitativno određen preko polja deformacija, vrednosti parametara mehanike loma, krivih zavisnosti opterećenja od $CMOD$ i $CTOD-\delta_5$ i krivih otpornosti prema rastu prsline.

Razvijen je celovit postupak za određivanje vrednosti faktora intenziteta napona i J -integrala na geometriji epruvete oblika prstena izložene zatezanju. Imajući u vidu da se radi o nestandardnoj epruveti, primenjivan je kombinovani eksperimentalno-numerički postupak kojim je omogućeno određivanje otpornosti prema lomu za cevi različite geometrije, izražene preko odnosa prečnika i debljine zida cevi, i zateznih osobina materijala.

Određen je i uticaj cilindričnog oblika geometrije na rezultate, uporednom analizom nove epruvete oblika prstena PRNT i ravne epruvete za zatezanje sa ivičnom prslinom SENT. Za obe geometrije su korišćene i različite dužine početnog koncentratora napona, čime su varirani uslovi ograničenog deformisanja oko vrha koncentratora.

Razvoj postupka ispitivanja i određivanja parametara mehanike loma za epruvete oblika prstena izložene zatezanju uključio je primenu tehnika aditivne proizvodnje, odnosno razvoj i optimizacija postupka su urađeni na 3D štampanim polimernim epruvetama, nakon čega su ispitivanja rađena na čeličnim epruvetama isećenim iz cevi. Nova epruveta će stoga biti primenljiva u ispitivanju materijala, kako metalnih tako i nemetalnih, koje karakterišu različiti mehanizmi otkaza.

U disertaciji je obrađen novi pristup u analizi parametara mehanike loma na aditivno proizvedenim epruvetama oblika prstena (PRNT), koristeći 3D štampu, kao i konvencionalno pripremljenim PRNT epruvetama od metala - čelika P235TR1 i P235GH.

Prolazeći kroz literaturu, disertacija pruža uvid u prethodne radove koji su se bavili standardnim i nestandardnim procedurama za određivanje parametara mehanike loma. Ovde se posebno fokusira na ASTM E1820 standard, razmatrajući njegovu primenu i ograničenja u kontekstu novih materijala i geometrija epruveta.

Kada se radi o metodologiji i materijalima, disertacija razmatra upotrebu različitih polimera, kao što su PLA i PA12, kao i čeličnih materijala P235TR1 i P235GH. Ovde se pažnja posvećuje ne samo svojstvima ovih materijala, već i razlozima njihovog odabira, dajući čitaocu jasan uvid u njihovu relevantnost i primenu u kontekstu istraživanja.

Eksperimentalni segment disertacije bavi se ispitivanjem epruveta izrađenih 3D štampom i epruvetama od metala. Svaki aspekt ispitivanja je pomno razmatran, sa posebnim osvrtom na metodu digitalne korelacije slika (*Digital Image Correlation* - DIC) za analizu deformacija i pomeranja.

Segment eksperimentalnih rezultata donosi i detaljnu analizu i uporedni prikaz svojstava epruveta napravljenih od različitih materijala i tehnika. Ovaj deo je ključan za razumevanje praktične

primene i efikasnosti nove geometrije epruveta na zatezanje za razne materijale.

Nakon eksperimentalnog dela, disertacija se okreće simulaciji metodom konačnih elemenata. Ovaj deo se bavi detaljima simulacije, poređenjem rezultata sa eksperimentalnim i analizom dobijenih podataka. Ovde se istražuje kako simulacije mogu doprineti razumevanju i unapređenju procesa ispitivanja epruveta kroz analizu napona, vrednosti J -integrala i faktora intenziteta napona K_I .

Zaključno, disertacija se fokusira na diskusiju dobijenih rezultata i tumačenje u kontekstu šireg područja istraživanja. Ovde se razmatraju implikacije istraživanja na praksu i buduće istraživačke pravce, ističući kako nova metodologija predstavljena u disertaciji može oblikovati buduće pristupe u inženjerstvu materijala.

Kroz ova poglavlja, disertacija pruža obuhvatan i detaljan pregled svih aspekata istraživačkog procesa, od početnih koraka u razvoju prototipova epruveta, preko eksperimentalnih ispitivanja, do širokog spektra simulacija. Cilj je pružiti celovitu sliku o potencijalu nove geometrije i procedure u inženjerstvu materijala i srodnim oblastima, otvarajući vrata za nove primene.

2. Pregled literature

2.1. Linearno elastična i elasto-plastična mehanika loma

Linearno elastična mehanika loma (LEML) se bavi ponašanjem materijala sa prslinom sve dok se nelinearna deformacija materijala oko vrha prsline ograničava na mali region, odnosno ne ulazi u zonu plastičnog deformisanja. Imajući u vidu da je mnoge materijale nemoguće okarakterisati modelom LEML, isti je proširen na elasto-plastičnu mehaniku loma (EPML) kako bi uključio i materijale sa izraženom plastičnom deformacijom koja se javlja pre otkaza. [2.1]

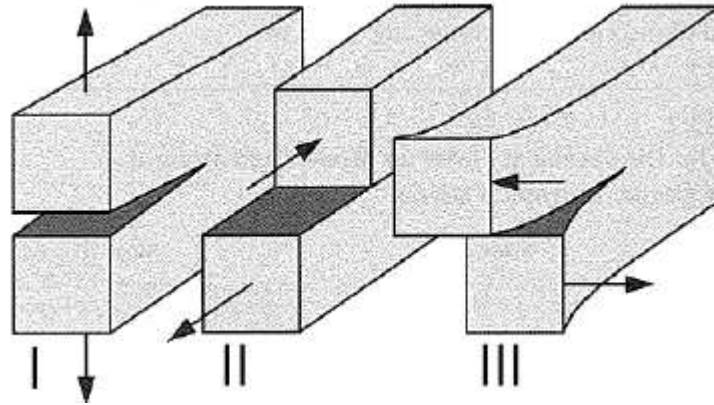
Elasto-plastična mehanika loma predstavlja sofisticirani pristup za analizu i predviđanje loma materijala koji prolaze kroz elastične i plastične faze deformacije pod uticajem opterećenja. Ovaj konceptualni okvir integriše teorije linearne elastičnosti i plastičnosti, kako bi se obuhvatili složeni mehanizmi deformacije i loma u materijalima pod dejstvom opterećenja. U kontekstu strukturnih analiza i ocena integriteta, elasto-plastična mehanika loma koristi parametre poput J -integrala i $CTOD$ za kvantifikaciju otpornosti materijala prema lomu. Kroz teorijske, eksperimentalne i numeričke tehnike, ova disciplina omogućava visok nivo preciznosti u oceni kritičnih stanja napona i deformacija, a time i u predviđanju životnog veka inženjerskih struktura.

2.1.1. Zona naprezanja oko vrha prsline i tipovi otvaranja

U oblasti vrha prsline postoji specifična zona koja ima dominantan uticaj na stanje materijala. Ukoliko se posmatra izotropan materijal sa linearno-elastičnim svojstvima i prslinom, moguće je analizirati i kvantifikovati komponente napona σ_{ij} kroz matematičke izraze. Ove formule koriste polarne koordinate r i θ da bi locirale tačke u blizini vrha prsline i uključuju faktore koji zavise od geometrije i orijentacije prsline (f_{ij} , $g_{ij}(m)$, A_m). Ključni element ovih formula je obrnuto proporcionalan korenu radijusa r , što ukazuje na poznatu singularnost napona kod vrha prsline. Ovo je jedan od temeljnih aspekata linearno-elastične mehanike loma. Za opisivanje ovog fenomena koristi se faktor intenziteta napona, označen sa K , koji daje sveobuhvatan uvid u stanje materijala u blizini prsline, uključujući napone, pomeranja i deformacije. Ova jednoparameterska metoda je standardizovana i široko prihvaćena u nauci o lomu [2.1 – 2.7].

$$\sigma_{ij} = \left(\frac{k}{\sqrt{r}}\right) f_{ij}(\theta d) \sum_{m=0}^{\infty} A_m r^{\frac{m}{2}} g_{ij}^{(m)}(\theta) \quad (2.1)$$

Otvaranje prsline zavisi najviše od načina opterećenja elementa sa prslinom. Oblici opterećenja u mehanici loma su kategorizovani u tri osnovna tipa, poznata kao oblik I, oblik II i oblik III (slika 2.1). Ovi oblici opisuju različite načine na koje se materijal može deformisati oko vrha prsline usled različitih oblika opterećenja, i svaki ima specifične efekte na raspodelu napona u blizini prsline.



Slika 2.1. Oblici opterećenja: I (otvaranje prsline); II (smicanje u ravni prsline) i III (smicanje van ravni prsline). [2.1]

Oblik I (Otvaranje prsline): Ovaj oblik se odnosi na napone koji deluju normalno na prslinu i pokušavaju da je otvore. U ovom slučaju, raspodela napona je takva da su najveći naponi usmereni normalno na površinu prsline. Faktor intenziteta napona K_I je najčešće korišćen parametar za kvantifikaciju ovog tipa opterećenja.

Oblik II (Smicanje u ravni prsline): Naponi su usmereni duž ravni prsline i pokušavaju da je prošire horizontalno. Raspodela napona je takva da su komponente smicanja najjače duž ravni prsline. Faktor intenziteta napona K_{II} se koristi za ovaj oblik.

Oblik III (Smicanje van ravni prsline): U ovom slučaju, naponi smicanja su usmereni van ravni prsline. Ovaj oblik je često relevantan za prsline koje su podvrgnute torzionim opterećenjima. Faktor intenziteta napona K_{III} je relevantan ovde [2.8].

Faktor intenziteta napona K je ključni parametar u linearno-elastičnoj mehanici loma (LEML) koji opisuje stanje napona i deformacije u blizini vrha prsline. U materijalima sa linearno-elastičnim ponašanjem, ovaj faktor je koristan za ocenu uslova pod kojima će doći do rasta prsline. Matematički, faktor intenziteta napona K je povezan sa singularnom raspodelom napona oko vrha prsline prema formuli [2.8]:

$$\sigma = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f(\theta) \quad (2.2)$$

Kritična vrednost faktora intenziteta napona, često označena kao K_{IC} , je posebno važna jer predstavlja granicu iznad koje se očekuje da će prsline početi da raste kroz materijal. Ovaj prag je svojstvo materijala (pod uslovima koji će biti detaljnije objašnjeni) i često se koristi kao mera otpornosti materijala prema lomu. Kada faktor intenziteta napona dostigne ili premaši K_{IC} , u materijalu će verovatno doći do kritičnog rasta prsline, što može dovesti do otkaza konstrukcije.

Ovaj parametar je stoga od suštinskog značaja u projektovanju i oceni integriteta konstrukcije materijala i komponenti i njegovo određivanje za krte materijale definisano je standardom ASTM E399.

Standard uključuje kriterijume koji se moraju zadovoljiti kako bi se osiguralo da su dobijeni K_{IC} vrednosti merodavne, uključujući veličinu uzorka - epruvete, geometriju, način opterećenja i brzinu opterećenja. Takođe, ASTM E399 opisuje načine analize podataka kako bi se odredila K_{IC} vrednost, koja predstavlja svojstvo materijala i koristi se za ocenu njegove otpornosti na lom - žilavost loma u uslovima ravnog stanja deformacije. Upravo iz zahteva za postizanje ravnog stanja deformacije sledi zahtev za dovoljnu debljinu epruvete; tek kada je ovaj uslov zadovoljen eksperimentalno određena kritična vrednost K se može smatrati žilavošću loma u uslovima ravnog stanja deformacije. Minimalna potrebna debljina nije poznata unapred, već se može odrediti tek nakon eksperimentalnog ispitivanja i obrade rezultata.

2.1.2. *Elasto-plastično ponašanje materijala*

Elasto-plastično ponašanje materijala predstavlja odziv materijala na mehanička opterećenja. U elastičnoj fazi, materijal se deformiše na način koji je potpuno reverzibilan, što znači da će se materijal vratiti u prvobitno stanje kada se opterećenje ukloni. Nasuprot tome, plastična faza podrazumeva trajne, ireverzibilne deformacije koje ostaju i nakon uklanjanja opterećenja.

U analizi loma materijala, dva pristupa koji su od suštinskog značaja su koncepti ravnog stanja napona i ravnog stanja deformacije. U slučaju ravnog stanja napona, trodimenzionalni naponi su redukovani na dvodimenzionalni problem zanemarivanjem komponente napona duž jedne ose, obično z -ose. Slično tome, u slučaju ravnog stanja deformacije, komponenta deformacije duž iste ose se zanemaruje, što omogućava pojednostavljenje problema. I ravno stanje napona i ravno stanje deformacije predstavljaju idealizaciju: ravno stanje napona zastupljeno je na površini strukture nezavisno od njene debljine, dok se ravno stanje deformacije javlja u strukturama veće debljine daleko od površine.

Kada je u pitanju modelovanje elasto-plastičnog ponašanja materijala u blizini vrha prsline, metode Irwina i Dugdalea zauzimaju značajna mesta u literaturi. Irwinova metoda proširuje klasični koncept faktora intenziteta napona (K) kako bi se obuhvatili elasto-plastični efekti. Ova metoda omogućava kvantifikaciju kako elastičnih tako i plastičnih zona oko vrha prsline. Irwinovo rešenje za približno izračunavanje veličine zone plastične deformacije r_y uz pretpostavku ravnog stanja napona glasi:

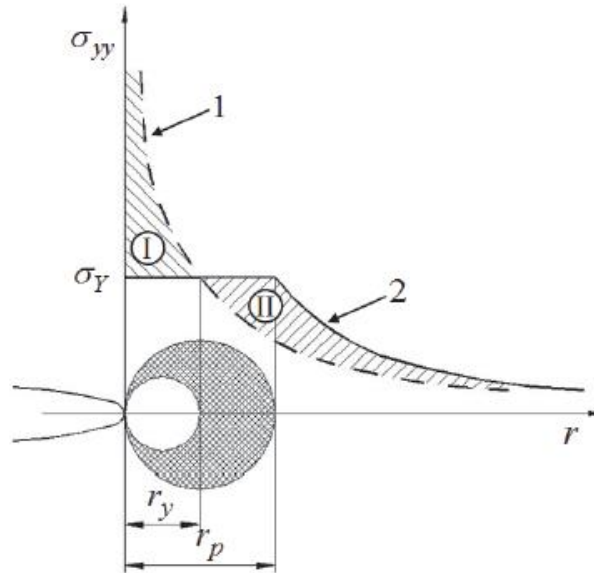
$$r_y = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_I}{R_e} \right)^2 \quad (2.3)$$

dok se veličina zone plastične deformacije pri ravnom stanju deformacija izračunava prema formuli koja uvećava granicu tečenja materijala faktorom $\sqrt{3}$ [2.9]:

$$r_y = \frac{1}{6\pi} \left(\frac{K_I}{R_e} \right)^2 \quad (2.4)$$

S druge strane, Dugdaleova metoda se fokusira na pojednostavljeni model plastične zone koja se formira blizu vrha prsline. Ova zona je karakterisana granicom tečenja materijala i pruža uvide u raspodelu napona i deformacija u materijalu koji pokazuje elasto-plastično ponašanje [2.10].

Navedene jednačine za proračun veličine zone plastične deformacije r_y ne uzimaju u obzir deformaciono ojačavanje materijala pa je tako raspodela napona σ_y unutar područja plastične deformacije konstantna i iznosi R_e , što znači da ne može da pređe vrednost granice tečenja. Kada se ta granice dostigne pri izjednačavanju koeficijenta deformacionog ojačavanja materijala sa nulom ($n = 0$) tada je vrednost $\sigma_y = R_e$ na udaljenosti r_y od vrha prsline (slika 2.2).



Slika 2.2. Raspodela vertikalne komponente napona za linearno elastičan (kriva 1) i elasto-plastičan materijal (kriva 2) [2.11].

Na slici 2.2 predstavljen je dijagram napona koji se javljaju oko vrha prsline za linearno elastičan i elasto-plastičan materijal.

U radu iz 1957. Godine [2.1] Irwin je predstavio ideju ravnoteže napona ispred fronta prsline, čiju bi šrafiranu površinu sa slike 2.2. (površina I, ispod krive 1) izjednačio sa površinom II ispod linije 2 za elasto-plastičan materijal prema formuli:

$$R_e * r_{pl} = \int_0^{r_y} \sigma_y dr = \int_0^{r_y} \frac{K_I}{\sqrt{2*\pi*r}} dr \quad (2.5)$$

r – radijalna osa polarnog koordinatnog sistema, mm

r_{pl} - veličina zone tečenja u slučaju elasto-plastičnog ponašanja materijala, mm

σ_y – komponenta napona duž Y ose, MPa

dr – diferencijalna dužina duž Y ose, mm

Rešavanjem integrala zona tečenja za elasto-plastično ponašanje materijala dobija dvostruko veće vrednosti od one za linearno-elastično ponašanje materijala [2.8]. Za slučaj ravnog stanja napona:

$$r_{pl} = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_I}{R_e} \right)^2 \quad (2.6)$$

za slučaj ravnog stanja deformacije:

$$r_{pl} = \frac{1}{3\pi} \left(\frac{K_I}{R_e} \right)^2 \quad (2.7)$$

2.1.3. Faktor intenziteta napona K

Elasto-plastična mehanika loma igra ključnu ulogu u analizi i projektovanju opreme pod pritiskom; takva oprema, kao što su rezervoari, cevovodi i kotlovi su izrađeni od materijala sa izrazitim elasto-plastičnim ponašanjem. Ključni parametri elasto-plastične mehanike loma, poput otvaranja vrha prsline (*CTOD*), otvaranja “usta” prsline (*CMOD*), *J*-integrala i krive otpornosti prema rastu prsline omogućavaju inženjerima da precizno kvantifikuju i predvide ponašanje materijala pod različitim uslovima opterećenja. Razumevanje ovih parametara je neophodno za osiguranje dugotrajnosti, integriteta i bezbednosti ovakvih sistema.

Faktor intenziteta napona je mera elastičnog polja napona u blizini vrha prsline i može se definisati za svaki od tri osnovna oblika opterećenja prsline.

Za oblik 1 otvaranja prsline, faktor intenziteta napona nosi oznaku K_I i njegova vrednost je direktno zavisna od normalnog napona (σ) i dužine prsline za slučaj ravnog stanja napona (a) prema formuli:

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a} \quad (2.8)$$

gde su:

σ – normalni napon, MPa

a – dužina prsline, mm

Kod tela sa konačnim dimenzijama ili nestandardnom geometrijom potrebno je uvođenje korekcionog koeficijenta (C) koji uzima u obzir odstupanja od beskonačne ploče sa centralnom prslinom i za dvoosni slučaj zatezanja iznosi $\pi^{1/2}$. Uvođenje korekcionog koeficijenta čije su vrednosti definisane za neke od slučajeva zasniva se na množenju istog sa proizvodom jednačine (2.8) što rezultira sledećom jednačinom [2.8]:

$$K_I = C\sigma\sqrt{a} \quad (2.9)$$

ovako formirana jednačina može biti korišćena za dvoosne slučajeve koji odstupaju od slučaja zategnute beskonačne ploče sa centralnom prslinom. Faktor K_I se izražava u jedinicama $N \cdot m^{-3/2}$ ili $Pa \cdot m^{1/2}$ i u slučajevima kada je poznato polje napona u okolini ili ravni prsline moguće je odrediti vrednost K_I prema sledećim jednačinama [2.8]:

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} \{ \sigma_{ij} \sqrt{2\pi r} f_{ij}(\theta) \} \quad (2.10)$$

σ_{ij} – polje napona u okolini vrha prsline, MPa

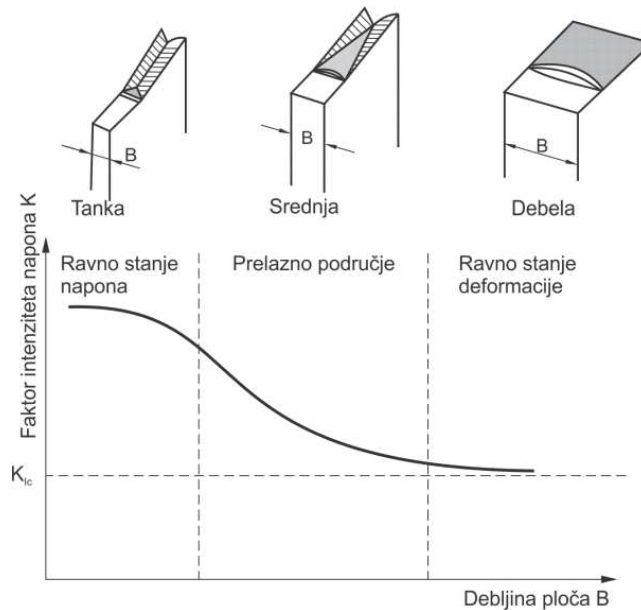
$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} \{ \sigma_y \sqrt{2\pi r} \} \quad (2.11)$$

σ_y – polje napona u ravni prsline ($r, \theta = 0$), MPa

Faktor intenziteta napona je ključan element u linearno elastičnoj mehanici loma (LEML) i ima suštinsku ulogu u analizi prsline. Ne samo da kvantifikuje intenzitet napona u blizini vrha prsline,

već pruža i sveobuhvatnu sliku o raspodeli napona, deformacija i pomeranja u okolini vrha prsline koja se još naziva i K -dominantna zona.

Kritična vrednost faktora intenziteta napona (K_{IC}) je ključna komponenta u mehanici loma poznatija i kao žilavost loma, pokazuje promenljivost zavisno od vrste materijala, debljine materijala, dužine prsline i uticaja okoline. Posebno značajan je njegov odnos sa debljinom materijala jer ona direktno utiče na vrednost K_{IC} (slika 2.3) [2.12].



Slika 2.3. Zavisnost K_{IC} od debljine epruvete [2.12].

Važan aspekt u ovoj analizi je trenutak kada K_{IC} postane konstantan. To se dešava kada stanje napona na vrhu prsline dostigne ravno stanje deformacije, što ukazuje na to da je debljina materijala dovoljno velika da ne utiče na promenu vrednosti K_I . Ova minimalna konstantna vrednost označena kao K_{IC} odnosi se na oblik I - otvaranje prsline i ima ključnu ulogu u praktičnoj primeni.

2.1.4. J – integral

J -integral je jedan od ključnih koncepta u mehanici loma, posebno kada je reč o elasto-plastičnom ponašanju materijala. Ideja iza J -integrala je da pruži veličinu koja karakteriše stanje napona i deformacije u blizini vrha prsline, uzimajući u obzir elasto-plastične efekte. Tvorac J -integrala je James R. Rice. Riceov rad na J -integralu je pružio odličnu osnovu za opisivanje elasto-plastičnog ponašanja materijala u blizini vrha prsline [2.14].

J -integral je opisan sledećom jednačinom:

$$J = \int_{\Gamma} \left(W dy - T_i \frac{\partial u_i}{\partial x} ds \right) \quad (2.12)$$

W – gustina energije deformacije, J/m^3

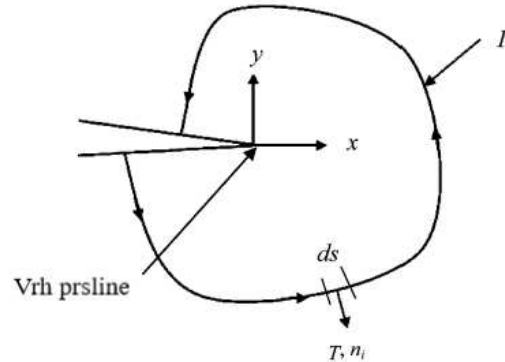
u_i – komponenta vektora pomeranja

ds – diferencijalna dužina putanje Γ , mm

T_i – napon na konturi, MPa

Gustina energije u tenzorskom obliku definisana je prema sledećoj jednačini:

$$W = \int \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} \quad (2.13)$$



Slika 2.4. Putanja integracije za J -integral [2.15].

Istraživanja Hutchinsona, Ricea i Rosengrena pokazala su da HRR polje predstavlja polje gde je zapravo vrednost J -integrala jednaka amplitudi ovog polja. Ovaj uvid omogućava povezivanje J -integrala i parametra $CTOD$ ukoliko je eksponent ojačavanja materijala poznat. Dodatno, primena J -integrala u analizi lokalne zone procesa loma ne zahteva samo teorijsko razumevanje mehanike kontinuuma, već i poznavanje mehanizma žilavog loma [2.14, 2.16, 2.17].

Kako računskim putem i metodom konačnih elemenata, tako je i eksperimentalno moguće odrediti vrednost J -integrala za tela od materijala sa elasto-plastičnim osobinama. Proračun J -integrala se može razložiti na deo koji predstavlja elastičnu komponentu i deo koji predstavlja plastičnu komponentu prema jednačini [2.18]:

$$J = J_{el} + J_{pl} \quad (2.14)$$

Elastična komponenta J -integrala se može izračunati izrazom:

$$J_{el} = \frac{(1-\nu^2)K_e^2}{E} \quad (2.15)$$

gde se K_e izračunava preko jednačine:

$$K_e = \left(\frac{P}{(B \cdot B_n \cdot W)^{1/2}} \right) * f \left(\frac{a_0}{W} \right) \quad (2.16)$$

pri čemu je:

B – debljina epruvete, mm

B_n – neto debljina epruvete, mm

P – sila, N

a_0 – početna dužina prsline, mm

W – širina epruvete, mm

gde se parametar $f\left(\frac{a_0}{W}\right)$ za CT epruvetu prema ASTM 1820-20 [2.18] izračunava na osnovu jednačine

$$f\left(\frac{a_0}{W}\right) = \frac{\left(2 + \frac{a_0}{W}\right)}{\left(1 - \frac{a_0}{W}\right)^{3/2}} \left[0.866 + 4.64 \left(\frac{a_0}{W}\right) - 13.32 \left(\frac{a_0}{W}\right)^2 + 14.72 \left(\frac{a_0}{W}\right)^3 - 5.6 \left(\frac{a_0}{W}\right)^4 \right] \quad (2.17)$$

Standard [2.18] sadrži i izraze za druge standardne epruvete, npr. SENB.

Plastična komponenta J -integrala direktno zavisi od geometrijskog koeficijenta η i površine ispod krive $F - v_{LL}$ i to prema jednačini [2.18]:

$$J_{pl} = \frac{\eta A_{pl}}{B_N b_0} \quad (2.18)$$

gde su:

b_0 – početna dužina ligamenta, mm

η – geometrijski koeficijent

A_{pl} – površina ispod krive $F - v_{LL}$, mm²

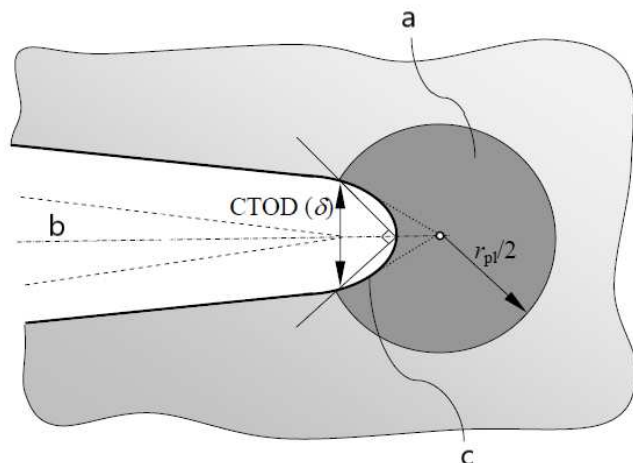
2.1.5. Otvaranje vrha prsline (CTOD i CTOD- δ_5)

Otvoranje vrha prsline, poznatije kao *CTOD* (*Crack Tip Opening Displacement*), predstavlja prekretnicu u razumevanju mehanike loma. Ovaj parametar je promenio način na koji inženjeri pristupaju analizi i predviđanju loma, omogućavajući preciznije i pouzdanije ocene integriteta struktura sa oštećenjima. [2.19]

Ideja o *CTOD* se rodila iz rada Wellsa [2.19] u ranim 1960-im godinama u Ujedinjenom Kraljevstvu. Wells je primetio značaj kvantifikovanja deformacija oko vrha prsline kao načina predviđanja ponašanja materijala.

Različiti međunarodni standardi, kao što su ASTM E1290 i BS 7448 uključuju metodologije za merenje i interpretaciju *CTOD*, čime se obezbeđuje doslednost i pouzdanost u analizi loma. Standard ASTM E1820 [2.18] pruža opširan okvir za merenje faktora intenziteta napona i *CTOD*, dok britanski standard BS 7448 [2.23] nudi specifične smernice za određivanje *CTOD* u metalnim materijalima.

Prema Wellsu [2.19], rastu prsline prethodi rast zone ojačavanja ispred vrha prsline. Rast zone ojačavanja je ograničen početkom zatupljivanja vrha prsline, pojavom koja se može iskoristiti za definisanje kritične vrednosti otvaranja vrha prsline. Ovaj princip je primenjiv isključivo na materijalima sa elasto-plastičnim ponašanjem prilikom loma. Fiktivni vrh prsline, prema pretpostavkama Wellsa nalazi se u elasto-plastičnom polju napona i to u plastičnoj zoni r_{pl} (slika 2.5) [2.19].



Slika 2.5. Otvaranje vrha prsline: a-plastična zona; b-oštar vrh prsline; c- zatupljivanje vrha prsline (eng. blunting)[2.19].

Parametar $CTOD$ je određen parametrima K_I , R_e i E u području srazmerno malog tečenja materijala poznatijeg kao SSY (eng. *Small Scale Yielding*). S obzirom da i faktor stanja napona oko vrha prsline utiče na odnos K_I i $CTOD$, parametar $CTOD$ je proširen do velikih trajnih deformacija poznatijih kao LSY (*Large Scale Yielding*). Proširenje $CTOD$ parametra omogućeno je korišćenjem standardne epruvete za savijanje $SENB$ (*Single Edge Notched Bending*) preko sličnosti trouglova na osnovu vrednosti otvaranja usta prsline ($CMOD$) u elastičnom i plastičnom području. U slučaju kada su vrednosti parametra $CMOD$ pretežno u elastičnom polju tada koncept ne daje precizna merenja parametra $CTOD$, što je prouzrokovalo dalju modifikaciju izraza za proračun parametra $CTOD$ [2.18]:

$$CTOD = \delta = \delta_{el} + \delta_{pl} = \frac{K_I}{m * R_e * E'} = \frac{r_p(W-a_0)*CMOD}{r_p(W-a_0)+a_0+z} \quad (2.19)$$

δ – otvaranje vrha prsline, mm

δ_{el} – elastična komponenta otvaranja vrha prsline, mm

δ_{pl} – plastična komponenta otvaranja vrha prsline, mm

m – bezdimenzioni faktor ($m = 1$ za RSN i $m = 2$ za RSD),

W – visina $SENB$ epruvete, mm

r_p – faktor rotacije (za standardni $SENB$ iznosi $0.4 \div 0.44$ za $0.45 \leq a_0/W \leq 0.55$),

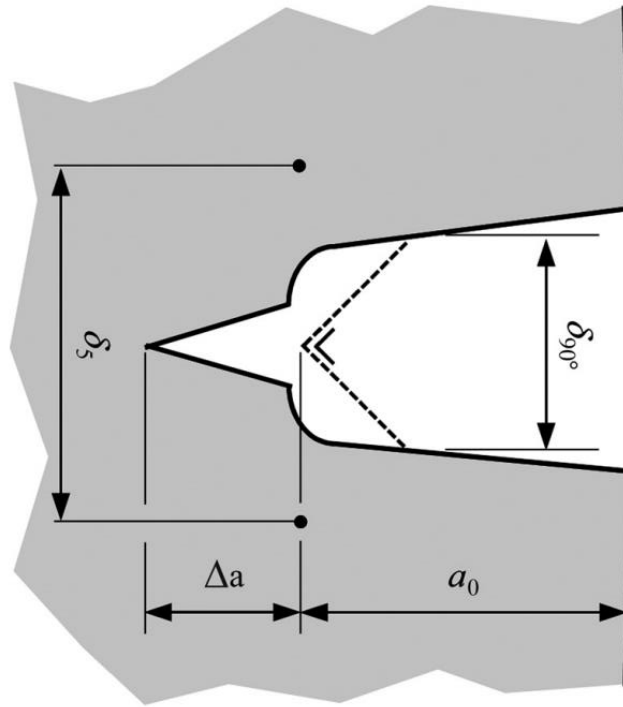
$CMOD$ – otvaranje usta prsline, mm

z – udaljenost pozicije merenja parametra $CMOD$ od površine ispitivane epruvete, mm

E' – modul elastičnosti, MPa ($E' = E$ za RSN i $E' = E / (1-\nu^2)$ za RSD)

Merenje parametra $CTOD$ indirektnim putem kao što propisuju standardi BS i ASTM pokazalo je nedostatak u smislu faktora r_p . Ovaj problem je prevaziđen u institutu GKSS, koji je razvio koncept određivanja parametra $CTOD$ nazvan $CTOD-\delta_5$ [2.20]. Ovaj koncept zasnovan je na merenju razdaljine dveju tačaka međusobno udaljenih 5 mm u nedeformisanom stanju. Vrednost na kojoj su tačke međusobno udaljene izabrana je zbog najboljeg podudaranja sa vrednostima otvaranja

vrha prsline dobijenih korišćenjem navedene standardnog postupka. *CTOD- δ_5* koncept je pokazao primenljivost kako za eksperimentalnu tako i za numeričku primenu. Eksperimentalnim putem parametar *CTOD* je na ovaj način moguće izmeriti kontaktnim merenjem, postavljanjem ekstenzometra ili mernih traka [2.20], kao i beskontaktnim merenjem korišćenjem DIC metode, što je primenjeno u ovoj disertaciji.



Slika 2.6. Ilustracija merenja otvaranja vrha prsline *CTOD* δ_5 konceptom; Δa – promena dužine prsline, a_0 - inicijalna dužina prsline [2.22].

2.1.6. Veza *J*-integrala i parametra *CTOD*

Veza između parametra otvaranja vrha prsline i *J*-integrala dolazi iz povezanosti sa parametrom K_I naročito u slučaju srazmerno malog tečenja (SSY – *Small Scale Yielding*) oko vrha prsline pri ravnom stanju napona kada su vrednost *J*-integrala i K_I u direktnoj vezi prema jednačini:

$$J = \frac{K_I^2}{E'} \quad (2.20)$$

Imajući u vidu vezu *CTOD* i faktora intenziteta napona predstavljenu kroz jednačinu:

$$\delta = \frac{K_I^2}{R_e * E'} \quad (2.21)$$

primenom bezdimenzionog faktora m (različito za RSD i RSN) na ove dve jednačine moguće je

doći do direktne veze između J -integrala i parametra $CTOD$ jednačinom:

$$J = m * \delta * R_e \quad (2.22)$$

2.2. Pregled prethodnih radova sa standardnim procedurama za određivanje parametara mehanike loma

ASTM E1820 [2.18] predstavlja sveobuhvatan standard koji se odnosi na eksperimentalne tehnike i matematičke formulacije potrebne za karakterizaciju mehaničkih svojstava materijala i otpornosti prema otkazu. Ovaj standard postavlja metodološki okvir za ispitivanje i interpretaciju parametara kao što su faktor intenziteta napona (K), J -integral i R -krive (krive rasta prslina), koji su od suštinskog značaja za kvantitativnu analizu linearno elastičnog i elasto-plastičnog ponašanja materijala u prisustvu prslina.

Standard ASTM E1820 ne obuhvata samo eksperimentalne tehnike, već i numeričke metode za analizu podataka. Ovde je bitno naglasiti da interpretacija eksperimentalnih rezultata često zahteva napredne metode analize, kao što su metoda konačnih elemenata (MKE), koje omogućavaju dublju analizu i bolje razumevanje mehanizama loma. Primarno je formiran za metale, ali može se prilagoditi i za kompozitne materijale i polimere uz odgovarajuće modifikacije. ASTM E1820 igra nezamenljivu ulogu u inženjerskoj analizi materijala, omogućavajući preciznu karakterizaciju mehaničkih svojstava i ponašanja materijala u prisustvu prslina. Ovo je od kritične važnosti za projektovanje i optimizaciju struktura u mnogim industrijama, uključujući vazduhoplovnu, automobilsku industriju, građevinu i mnoge druge.

Određivanje J - R krive ASTM E1820 standardom je omogućeno korišćenjem jedne od dve razvijene tehnike koje se razlikuju pre svega po broju ispitivanih epruveta [2.18]. Najpre je razvijena tehnika koja podrazumeva više ispitanih epruveta da bi se odredila J - R kriva ciljanog materijala okarakterisana je kao neekonomična u pogledu troškova materijala i rada. U cilju smanjenja troškova iz navedene tehnike, razvojem je proizašla tehnika za određivanje potpunog raspona J - R krive korišćenjem jedne epruvete.

Tehnika za određivanje merenja dužine prslina zasnovana na ispitivanju jedne epruvete oslanja se na automatsko merenje dužine prslina i to korišćenjem metode elastične popustljivosti (*elastic unloading compliance*) ili metode pada električnog potencijala [2.24 – 2.28]. Uprkos tome što obe metode zahtevaju sofisticiranu opremu i što postoje ozbiljne poteškoće automatskih metoda merenja, metoda elastične popustljivosti je uvrštena u ASTM E1820 standard.

Kako bi se prevazišli zahtevi za automatskom opremom za merenje rasta prslina, razvijena je metoda normalizacije u cilju direktnog određivanja krive J - R uz pomoć podataka dobijenih merenjem opterećenja u odnosu na pomeranje. Korišćenjem krive dobijene na ovaj način moguće je određivanje trenutne dužine prslina koja je u direktnoj vezi sa podacima o opterećenju i pomeranju. [2.29 – 2.34].

U istraživanju Xian-Kui Zhu i James Joyce-a, metoda normalizacije je uspešno primenjena za razvoj J - R krivih čelika HY80, koristeći standardne i nestandardne SENB epruvete. Rezultati su pokazali da metoda normalizacije može precizno odrediti J - R krive, čak i za epruvete sa većom dužinom prslina nego što to ASTM E1820 standard dozvoljava. Metoda je validirana poređenjem sa već uspostavljenom metodom popustljivosti sa elastičnim rasterećenjem i pokazala se kao

efikasan alat za oba tipa epruveta. Dodatno, ustanovljeno je da se kritične vrednosti pri početnoj dužini prsline (J_{IC}) i pri rastu prsline od 1 mm (J_{1mm}) linearno menjaju sa dužinom prsline i zavise od uslova ograničenog deformisanja [2.35].

Prema istraživanju B. Gludovatz i sar. ASTM standard E1820 nije u potpunosti pouzdan za metalna stakla (BMG) iz nekoliko razloga. Manje epruvete su pokazale širi raspon vrednosti otpornosti na otkaz i moguće precenjene vrednosti, što dovodi do nepouzdanosti u inženjerskim procenama. Takođe, postoji veća varijabilnost u rezultatima kada se koriste manje dimenzije ligamenta. U ovom ispitivanju dokazano je da različite metode daju različite rezultate: analiza preko J -integrala dozvoljava manje epruvete, ali daje značajno veće vrednosti otpornosti prema otkazu u poređenju sa rezultatima dobijenim preko K_{IC} . Ovi faktori zajedno čine da je ASTM E1820 standard manje pouzdan za metalna stakla u poređenju sa metalima [2.36].

Kada je reč o određivanju J -integrala i faktora intenziteta napona K_I , ASTM standard se pokazao kao adekvatan i precizan u mnogobrojnim ispitivanjima kako metala, tako polimera i raznih vrsta legura [2.38 – 2.43].

ASTM E1820 standard, iako uspešno primenjivan na mnogobrojnim materijalima, kada je reč o određivanju parametara mehanike loma na epruvetama dobijenim iz cevi za transport fluida pod pritiskom nailazi se na niz problema. Problemi se prevashodno ogledaju u nemogućnosti zadovoljenja standarda kada su u pitanju dimenzije epruveta, pre svega odnos debljine i širine epruvete (kod tankozidnih cevi), a potom i odnos dužine i širine epruveta (kod cevi manjeg prečnika).

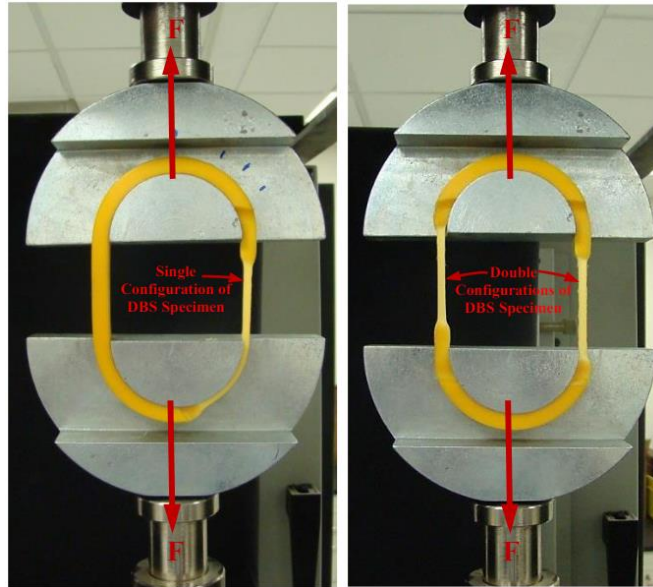
U cilju prevazilaženja navedenih problema, nekoliko istraživačkih grupa je pokušalo da definiše nove procedure za ispitivanje cevovoda pod pritiskom.

2.3 Pregled objavljenih radova sa nestandardnim oblicima epruveta za ispitivanje materijala cevovoda

U dosadašnjim istraživanjima autori su pokazali kreativnost u svojim eksperimentalnim postavkama i na nekoliko načina pokušali da definišu nestandardne metode za ispitivanje osobina materijala cevovoda. Pored metoda za ispitivanje, autori su dolazili do raznih rešenja kada su u pitanju geometrije epruveta.

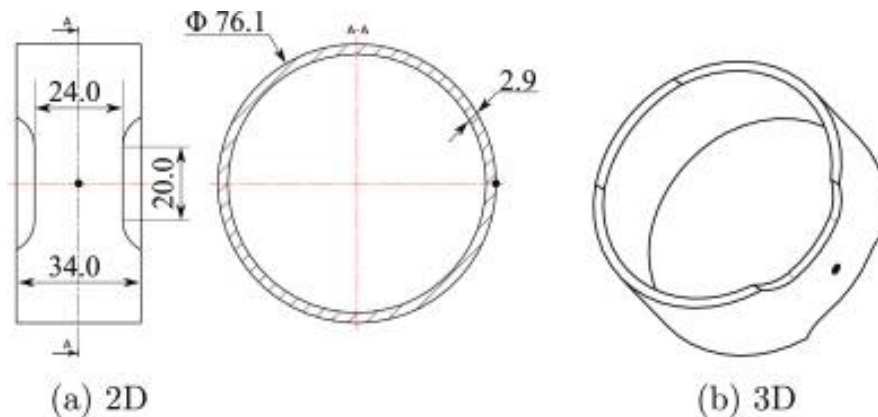
Epruvete oblika prstena su noviji tip geometrije koji je sve češći u istraživanjima kada je u pitanju ispitivanje cevovoda pod pritiskom. U ovom potpoglavlju navedeno je nekoliko primera epruveta koje se koriste za određivanje mehaničkih osobina materijala cevovoda, uticaja korozionih oštećenja i dr. Epruvete sa oštrim koncentratorima napona razmotrene su u narednom potpoglavlju.

Tarek i sar. su na epruvetama oblika prstena RHTT (*Ring Hoop Tensile Test*) sa konfiguracijom oblika bučice (DBS - *dumb-bell-shaped*) analizirali mehanička svojstva polietilena visoke gustine poznatijeg kao HDPE (*High Density Polyethylene*) (slika 2.7).



Slika 2.7. RHTT epruveta sa jednostrukom konfiguracijom DBS (levo) i dve konfiguracije DBS (desno).

Uslovi ispitivanja su varirani u pogledu brzine ispitivanja, što je pored geometrije pokazalo uticaj na mehanička svojstva epruveta. Povećanje brzine uzrokuje povećanje modula elastičnosti i granice tečenja za sve konfiguracije, dok jednostruka konfiguracija epruveta DBS pokazuje veći modul elastičnosti i granicu tečenja pri svim brzinama ispitivanja. Epruvete sa dvostrukom konfiguracijom DBS pokazale su veću deformaciju do otkaza materijala u poređenju sa jednostrukom konfiguracijom [2.44]. Ovim ispitivanjem su Tarek i sar. dokazali da se epruveta RHTT može koristiti za predviđanje mehaničkih svojstava materijala cevi duž obimnog pravca.

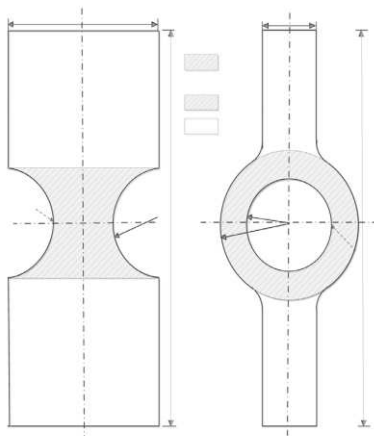


Slika 2.8. Geometrija epruveta oblika prstena sa šupljinom koja simulira oštećenje nastalo korozijom (a) u 2D i (b) u 3D prikazu [2.45].

Jedna od pojava koja je eksperimentalno analizirana primenom epruveta oblika prstena jeste korozija koja može biti uzrok otkaza cevovoda pod pritiskom. Autor Bianchetti i sar. razvili su model epruvete oblika prstena (slika 2.8) sa šupljinama koje oponašaju geometriju korozionih oštećenja, [2.44].

Ispitivanje ovih epruveta oblika prstena bilo je praćeno metodom digitalne korelacije slika uz pomoć koje su praćena pomeranja i rast inicijalnog oštećenja na epruveti - simuliranog oštećenja usled korozije. Autori ovog rada su takođe koristili i metodu konačnih elemenata kako bi definišali kriterijum nastanka žilavog loma u analiziranim epruvetama [2.45].

Nove metode za ispitivanje epruveta oblika prstena predložene su i za ispitivanje ponašanja materijala u oblasti niskocikličnog zamora LCF (*low-cycle-fatigue*). U radu autora Q. Liu i sar. [2.46] prikazan je razvoj nove metode na nestandardnim epruvetama ispitivanim na zatezanje (slika 2.9) čije su zone od interesa oblika cilindra sa žlebom (HP) i prstena [2.46].

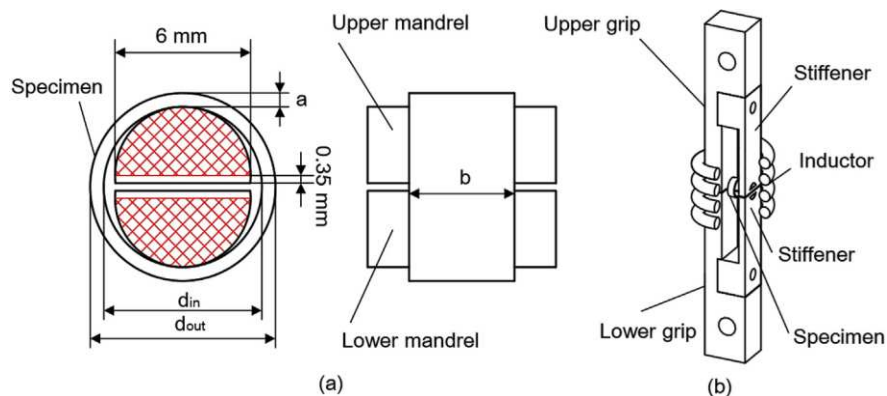


Slika 2.9. Geometrija HP i epruvete oblika prstena [2.46].

Ispitivanje ovih epruveta uključuje metodu za rešavanje odnosa cikličnih napona i deformacije materijala prema krivoj ciklične stabilnosti amplitude opterećenja i amplitude pomeranja. Pored toga, korišćena je i metoda za dobijanje odnosa između amplituda pomeranja i lokalnih amplituda deformacija epruveta. [2.46].

Pored navedenih razloga za formiranje novih metoda za ispitivanje epruveta oblika prstena za autora B.A. Gurocivha i sar. [2.47] je ta geometrija poslužila za određivanje žilavosti legure na bazi nikla (42XNM) od koje su izrađene cevi u nuklearnom postrojenju. Problem se prilikom određivanja žilavosti loma javlja u temperaturnom opsegu od 500 do 900 °C, u kom nije moguće precizno odrediti žilavost materijala iz dijagrama zatezanja [2.47].

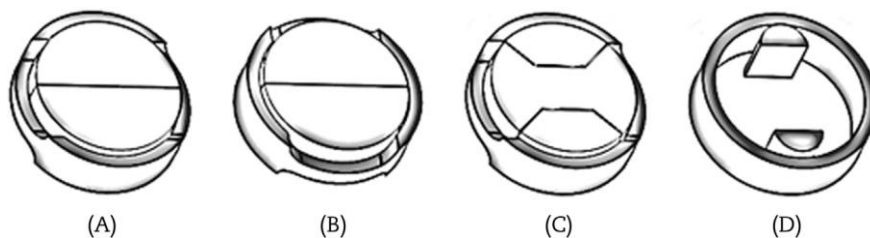
Autori ovog rada su korišćenjem epruveta oblika prstena opterećenih na zatezanje (slika 2.10), uz metodu digitalne korelacije slika i numeričku analizu, došli do rezultata alternativnom metodom koja je detaljno objašnjena u [2.47].



Slika 2.10. Šema epruveta oblika prstena i hvataljki (a) (šrafirani deo prikazuje presek alata u obliku slova D) i šema hvataljki za ispitivanje zatezanja prstena (b) [2.47].

Na taj način dokazana je mogućnost određivanja žilavosti legure na bazi nikla (42XNM) za razliku od standardnih metoda čijom primenom to nije bilo moguće.

Sličnom problematikom koja je takođe vezana za transport opasnog materijala (nafta), bavio se Kiraly M. sa sar. [2.48] koji su uz pomoć nestandardne metode došli do zatezne čvrstoće cirkonijumskih cevi. Ispitivanja su izvođena na obložnim cevima za gorivo izrađenim od legura cirkonijuma E110 i E110G, na epruvetama oblika prstena (slika 2.11). Epruvete su ispitane pomoću dve različite eksperimentalne metode, aksijalnog i obimnog ispitivanja, uz primenu numeričke analize MKE [2.48].

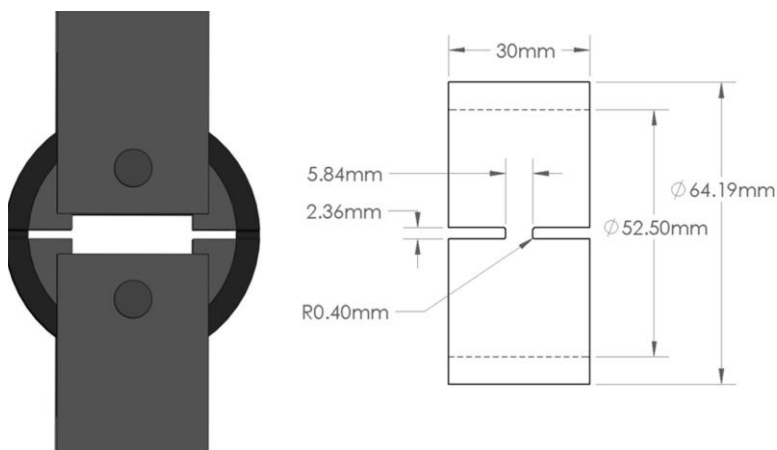


Slika 2.11. Skica četiri različite geometrije za ispitivanje obimnog zatezanja A) bočno obrađen prsten; B) prsten obrađen sa gornje i donje strane; C) bočno obrađen prsten – postavka sa dodatnim alatom; D) pomoću malih trnova na neobrađenom prstenu [2.48].

Na osnovu rezultata, autori smatraju da se razmatrane geometrije mogu usvojiti kao relevantne za ispitivanje obložnih cevi za goriva [2.48].

Nestandardne metode su kao alternative standardnim u prethodnom periodu pokazale veoma značajan doprinos kada je reč o ispitivanju svojstava materijala cevovoda.

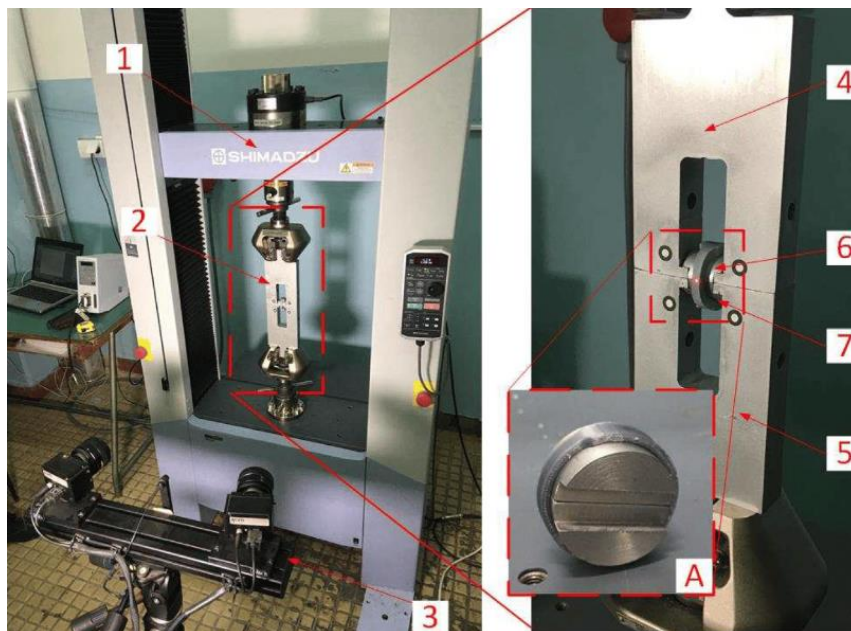
Jedno od istraživanja koje ima sličnosti sa ovim radom u pogledu korišćenja kombinovane metode ispitivanja, eksperimentalne i numeričke korišćenjem simulacije metodom konačnih elemenata, jeste istraživanje Zhang i Ben Jar. Autori su eksperimentalna ispitivanja vršili na epruvetama iz cevi od polietilena korišćenjem modifikovanog D-split testa (slika 2.12) pri tri različite brzine zatezanja; rezultati ovog ispitivanja bili su osnova za numeričku simulaciju [2.49].



Slika 2.12. Šematski prikaz postavke D-split testa i dimenzije modifikovanih epruveta [2.49].

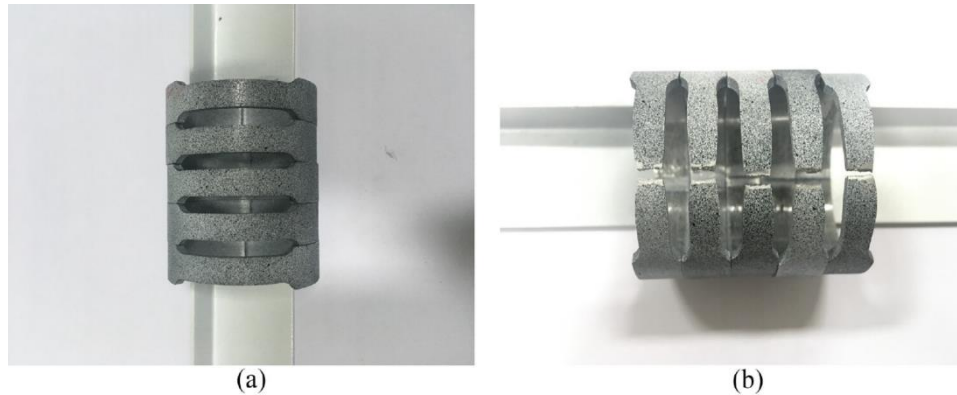
Dokazano je da na osnovu hibridnog, fenomenološkog pristupa, zasnovanog na simulaciji metodom konačnih elemenata i eksperimentalnim ispitivanjima može uspešno predvideti deformisanje i otkaz mehanizmom žilavog loma [2.49].

Epruvete oblika prstena na zatezanje za potrebe karakterizacije materijala ispitivane su i na Univerzitetu u Beogradu, Mašinskom fakultetu na kom su Travica i sar. 2022. eksperimentalnim putem određivali stanje napona i deformacija na 3D štampanim epruvetama oblika prstena opterećenim na zatezanje (PRTS – Pipe Ring Tension Specimens) čija geometrija ima najveće sličnosti sa RHTT epruvetama (slika 2.13) [2.50].



Slika 2.13. Detaljan prikaz postavke za ispitivanje: (1) mašina za ispitivanje; (2) PRTS alat za ispitivanje; (3) Aramis 2M; (4) gornja viljuška; (5) donja viljuška; (6) dva D-bloka; (A) PRTS; (7) sklop PRTS i D-bloka [2.50].

Nakon sprovedenih ispitivanja na polimernim epruvetama sa standardnom konfiguracijom (suženje sa jedne strane) i na epruvetama sa suženjima čiji je međusobni ugao 180° došli su do zaključaka da je predložena metodologija ispitivanja primenljiva na konkretnu PRTS epruvetu sa jednostranim suženjem i da rezultati ukazuju na pouzdanost karakterizacije ovog modela [2.50]. Ovo istraživanje je bilo samo uvod za sledeće istraživanje Travice i sar. koje je rađeno na metalnim epruvetama od čelika S235JRH (nominalnog prečnika DN32) sa jednostranim suženjem (slika 2.14) pri istim uslovima ispitivanja. [2.51]. Slične epruvete ispitane su i u okviru ove disertacije, što će biti detaljnije prikazano u narednom poglavlju.



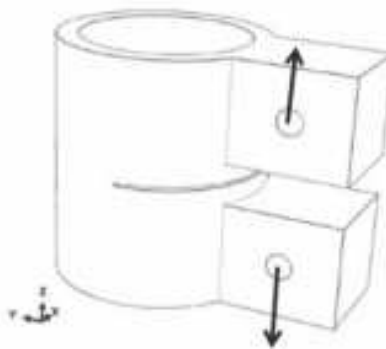
Slika 2.14. Epruvete PRTS od S235JRH materijala: a) sa stohastičkom šarom spremni za ispitivanje, b) ispitane epruvete [2.51].

Dobijeni rezultati pokazali su da je vrednost odstupanja između eksperimentalno dobijene granice tečenja ($R_{p0.2}$) za 19.2% viša u poređenju sa nominalnom vrednošću granice tečenja. Takođe, razlika u vrednostima između eksperimentalno izmerene zatezne čvrstoće (inženjerski napon) i nominalne vrednosti zatezne čvrstoće iznosi 0.4%, dok je za eksperimentalnu zateznu čvrstoću (izraženu kroz stvarni napon) zabeleženo odstupanje od 26.6% u odnosu na nominalnu vrednosti [2.51].

2.4 Pregled objavljenih radova sa nestandardnim procedurama za određivanje parametara mehanike loma

U prethodnom tekstu prikazano je nekoliko nestandardnih epruveta za ispitivanje materijala cevovoda bez početne prsline ili oštrog žleba. Imajući u vidu da je u ovom radu osnovni cilj razvoj nove epruvete sa oštrim koncentраторom napona i odgovarajuće metodologije ispitivanja, u ovom potpoglavlju je prikazan pregled do sada objavljenih istraživanja o ovoj temi.

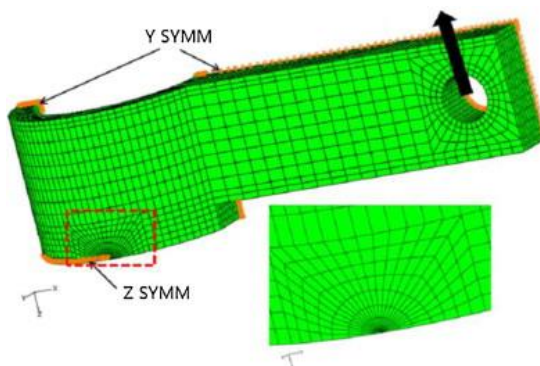
Jedan od pristupa koji se koristi pri projektovanju cevovoda je LBB (*leak-before-break* – procurivanje pre loma), koji je zasnovan na krivoj otpornosti prema lomu dobijenoj na različitim tipovima epruveta. Autor Koo J.M. i sar. razvili su novu geometriju epruveta za ispitivanje žilavosti loma pod nazivom kompaktna cev (CP – *Compact pipe*) (slika 2.15) [2.52].



Slika 2.15. Kompaktna epruveta iz cevi (CP) sa polugama za prenos opterećenja [2.52].

Prema njihovom istraživanju, dobijene vrednosti Q-napona su niže u odnosu na vrednosti napona u stvarnim cevima prilikom savijanja u četiri tačke i veće su od napona izmerenih u cevima lukovima. Zaključeno je da se kontrolom dužine poluga zavarenih za epruvetu (slika 2.15) mogu simulirati različiti uslovi naprezanja, kao i da se projektovanje cevovoda primenom principa procurivanja pre loma može izvesti pomoću ove vrste epruvete [2.52].

Mahajan G. i sar. su na osnovu numeričkih proračuna MKE na modelima CP (*Compact pipe*) epruveta proučavali uticaj promene parametara kao što su debljina zida epruvete, vrsta prslina (aksijalna i radijalna) na širinu zone razvlačenja SZW (*stretched zone width*) (slika 2.16) [2.53].



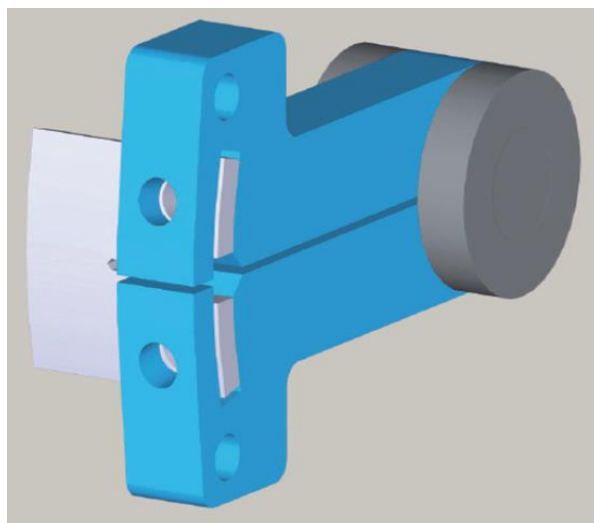
Slika 2.16. Model CP epruvete sa definisanom mrežom konačnih elemenata [2.53].

Na osnovu dobijenih rezultata došlo se do zaključka da kritična vrednost SZW pokazuje značajne razlike sa varijacijom odnosa a i W , kao i za različite tipove prslina [2.53].

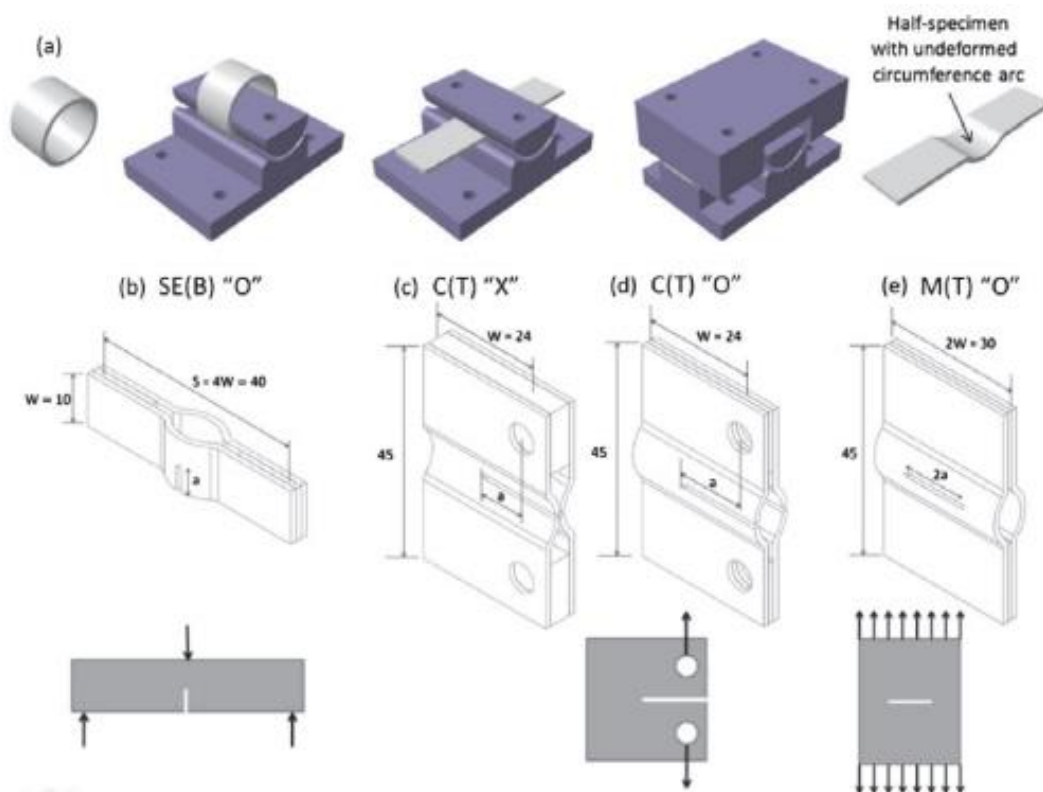
Još jedan pokušaj da se definiše metoda za procenu ponašanja loma tankozidnih cevi je bio izrada CT epruveta sa zakrivljenjem koju su predložili autori Gajdos L. i Sperl M. [2.54]. Autori ovog rada su ispitivali dve vrste epruveta, zakrivljene CT epruvete (slika 2.17) i spljoštene CT epruvete (isečene iz cevi, a potom plastično deformisane) [2.54].

Na ovaj način postignuto je opterećenje u obimnom pravcu, koje je glavni razlog izrade ovakvih epruveta. Ova vrsta opterećenja je za oštećenja u aksijalnom pravcu veoma značajna i na taj način je postignuto simuliranje unutrašnjeg pritiska u cevima. Na osnovu dobijenih rezultata zaključeno je da odstupanja između dve vrste CT epruveta nisu velika i da su zakrivljene epruvete pogodnije za ovu vrstu ispitivanja [2.54]. Zakrivljene CT epruvete su prilično zahtevne sa stanovišta pripreme

za ispitivanje; pomoćni alat za prenos opterećenja potrebno je prilagoditi prečniku ispitivane cevi. Slično važi i za prethodno opisane CP epruvete, kod kojih je potrebno za svaku epruvetu zavariti poluge za prenos opterećenja.



Slika 2.17. Ispitivanje zakrivljenih CT epruveta uz pomoć alata za prenos opterećenja [2.54].

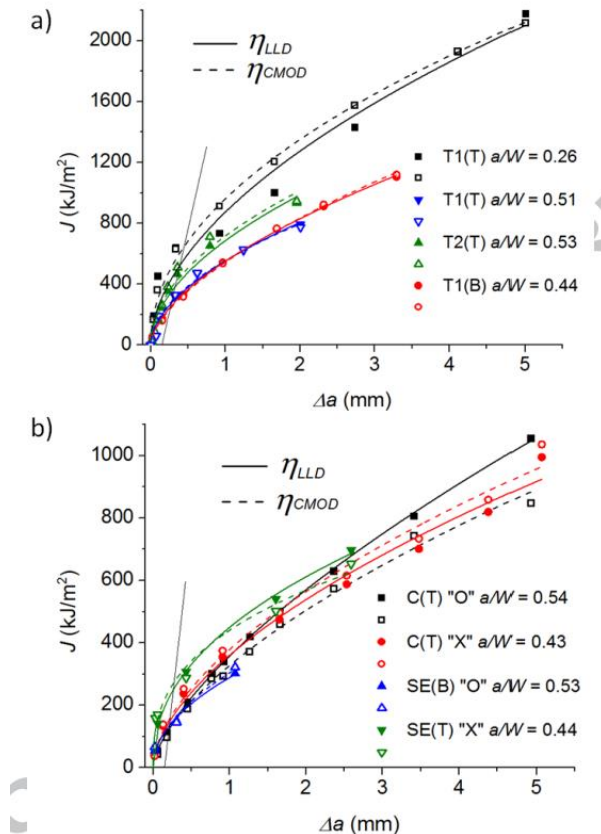


Slika 2.18. Epruvete sa uzdužnim prslinama: Metoda izrade (a) i različite vrste epruveta (b)-(e) [2.55].

M. Bergant i sar. [2.55] su došli do nešto drugačijeg rešenja, koje se zasniva na formiranju geometrija sličnih standardnim epruvetama mehanike loma, ali izrađenih od po dva segmenta tankozidne cevi, (slika 2.18.). Zastupljene su geometrije koje odgovaraju SENB, CT i MT epruvetama (MT - panel za zatezanje sa centralnom prolaznom prslinom); na slici 2.18 vidi se postupak izrade, dimenzije i opterećenje predloženih epruveta [2.55]. Sve prikazane epruvete imaju početno oštećenje (oštar žleb ili prslinu) u uzdužnom pravcu, a u istom radu su razmatrane i epruvete – segmenti cevi sa oštećenjem u obimnom pravcu (oznake T1 i T2).

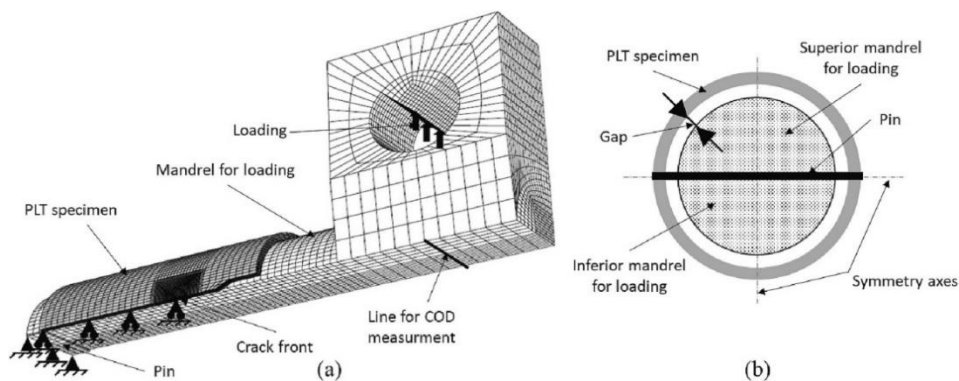
Na osnovu krivih otpornosti prema rastu prsline, autori ovog rada zaključuju da su date geometrije (osim M(T) O) pogodne za eksperimentalno određivanje parametara mehanike loma i mogu se koristiti u oceni integriteta cilindričnih konstrukcija [2.55].

Ovom zaključku u prilog idu i krive zavisnosti J -integrala od promene rasta prsline korišćenih za izračunavanje faktora η_{pl} na osnovu pomeranja napadne tačke v_{LL} (druga oznaka: *LLD – Load line displacement*) i parametra *CMOD* (slika 2.19).



Slika 2.19. Krive otpornosti prema rastu prsline za (a) obimne i (b) uzdužne prsline [2.55].

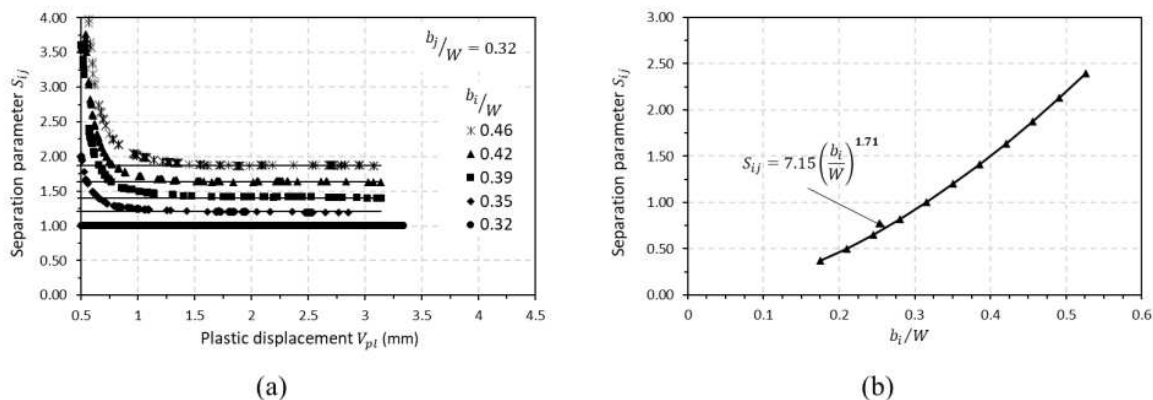
U radu Rais i sar. [2.56] razvijen je *Pin Loading Tension* (PLT) test za procenu ponašanja prsline u materijalu tankozidnih cevi, posebno fokusirajući se na 9Cr ODS (*Oxide Dispersion Strengthened*) čelične cevi za primenu u brzim neutronskim reaktorima. Korišćeni su proračuni metodom konačnih elemenata za određivanje geometrijskih funkcija, kao i elastičnih i plastičnih komponenta J -integrala, slika 2.20.



Slika 2.20. Model konačnih elemenata PLT epruvete sa graničnim uslovima (a); Pogled sleva (b) [2.56].

Posebna pažnja tokom istraživanja posvećena je kontaktu i trenju između epruvete i alata za prenos opterećenja. Pokazano je da uslovi pod kojima dolazi do ovog kontakta utiču na rezultate, kao i da postoji savijanje duž prsline. Metodologija pokazuje potencijal za primenu na ozračenim materijalima, sa daljim planovima za ispitivanje na visokim temperaturama kako bi se na adekvatan način uzeli u obzir uslovi u eksploataciji. Preporuka je da se svede na najmanju moguću meru zazor između unutrašnje površine PLT epruvete i alata za prenos opterećenja, kako bi se smanjio progresivni kontakt i povećala tačnost [2.56].

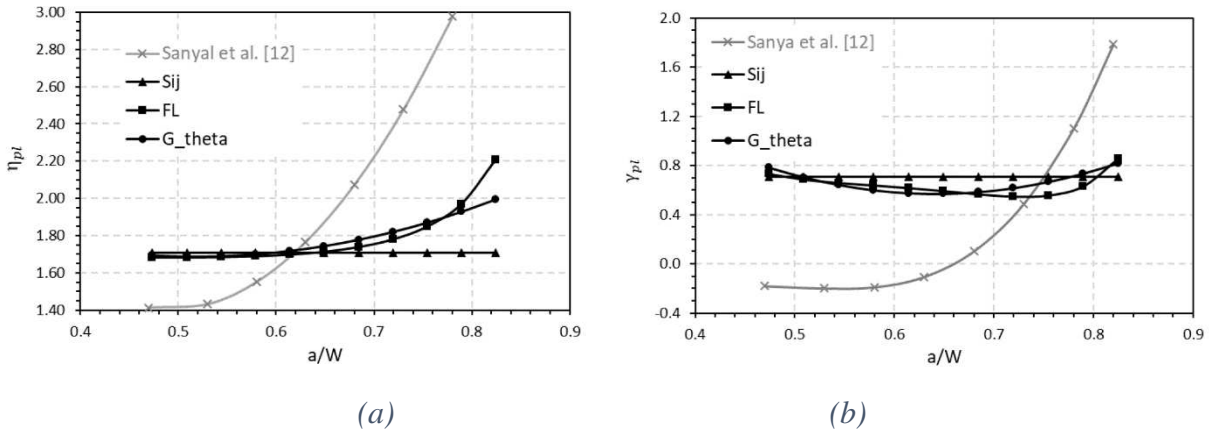
Rezultati ovog istraživanja ukazuju na nekoliko mogućnosti određivanja faktora η_{pl} na osnovu različitih parametara. Grupa autora je između ostalog koristila S_{ij} metodu (metodu razdvajanja opterećenja) gde je uz pomoć parametra razdvajanja S_{ij} izračunala vrednosti faktora η_{pl} (slika 2.21).



Slika 2.21. (a) Parametar razdvajanja za referentni odnos $b_i/W = 0.32$; (b) Određivanje parametra η_{pl} [2.56].

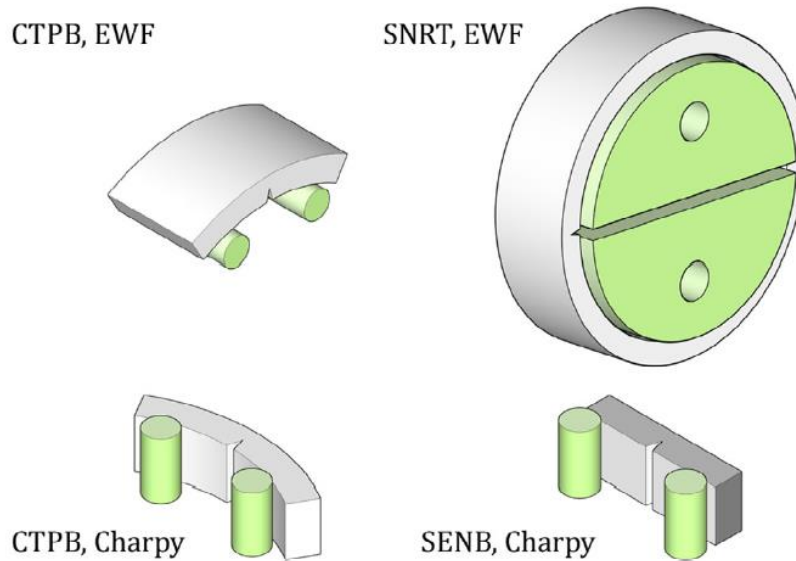
Osim primene metode razdvajanja opterećenja, primenjene su još dve metode za određivanje faktora η_{pl} : primenom graničnog plastičnog opterećenja (F_L – limit load) i preko odnosa površina ispod krive sila-pomeranje u oblasti plastičnosti i J -integrala u oblasti plastičnosti (G_θ). Rezultati dobijeni primenom tri navedene metode su prikazani na slici 2.22; za faktor η_{pl} dobijena su veća odstupanja za veoma velike dužine prsline ($a_0/W > 0.7$), a vrednosti faktora γ_{pl} ne pokazuju izraženu zavisnost od metode određivanja (slika 2.22). Autori su uporedili ove rezultate sa onima

dobijenim u [2.57], pri čemu se vidi znatno manja zavisnost oba faktora od dužine prsline u odnosu na [2.57].



Slika 2.22. (a) Određivanje parametra η_{pl} za $a_0/W=0.47$; (b) Poređenje η_{pl} i γ_{pl} [2.56].

Autori Rodolfo Jr. i Vanderely [2.58] pokušali su poređenjem 4 geometrije uz varijaciju debljine (slika 2.23) da definišu ponašanje epruvete oblika prstena primenom mehanike loma i daju dokaze o podobnosti epruvete oblika prstena za procenu vrednosti faktora intenziteta napona pri plastičnom otkazu materijala.



Slika 2.23. Šematski prikaz epruveta za ispitivanje mehanike loma materijala korišćenih u studiji Rodolfa i Vanderely-a. (CTPB – zakrivljeni epruveta za savijanje u tri tačke; SNRT – epruveta sa jednim žlebom opterećen na zatezanje; SENB – epruveta za savijanje u tri tačke [2.58].

Kao što se vidi na slici 2.23, razmatrane su četiri epruvete, od kojih su tri zakrivljene i isečene iz cevi a jedna je ravna, standardna SENB epruveta. Epruveta oblika prstena (SNRT) ima sličnosti sa geometrijom razmatranom u ovom radu. Početno oštećenje je u uzdužnom pravcu, a prslina sa

porastom opterećenja raste od unutrašnje ka spoljašnjoj površini prstena. Samim tim, ova geometrija je pogodna za cevi veće debljine zida.

Autori su došli do zaključka da epruvete sa većom debljinom zida pokazuju viši nivo sprečenog deformisanja (*constraint*) u zoni plastičnosti, ali da su vrednosti K_{IC} približno istog reda veličine za svaku od geometrija. Rezultati istraživanja su takođe potvrdili podobnost epruveta oblika prstena za ispitivanje parametara mehanike loma, uz određene nedostatke koji su posledica skladištenja veće količine elastične energije tokom ispitivanja, što dovodi i do određenih odstupanja u ponašanju $F-v_{LL}$ kao i u vrednostima J_{IC} [2.58].

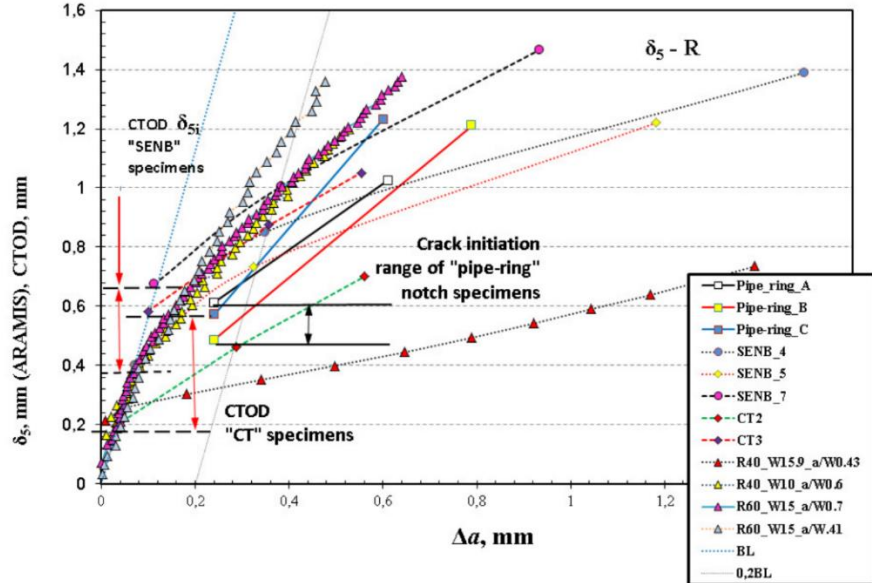
U prethodnom tekstu prikazano je nekoliko nestandardnih geometrija koje se koriste za ispitivanje materijala cevovoda. Neke od njih su geometrije bez početne prsline, tj. ne koriste se u ispitivanjima mehanike loma. Kada je reč o epruvetama sa početnim prslinama, primećuje se da većina prikazanih geometrija zahteva relativno složen postupak pripreme ili ispitivanja.

U periodu od 2014. godine predložen je i ispitan novi tip epruvete oblika prstena sa oštrim žlebom i prslinom izložen savijanju PRNB (*Pipe Ring Notched Bending*). Epruvetu su u Rusiji patentirali Matvienko i Gubeljak [2.59]. Rezultati analize uslova loma prikazani su u nekoliko naučno-istraživačkih radova Matvienka i Gubeljaka. Istraživanja su zasnovana na eksperimentalnom ispitivanju epruveta savijanjem u tri tačke i stereometrijskom merenju deformacija i pomeranja epruveta. Prve uporedne rezultate epruveta PRNB, CT i SENB Gubeljak i sar. predstavili su u radu [2.60] gde je utvrđeno slična žilavost loma za sve tri vrste epruveta. Na slici 2.24 prikazana je postavka ispitivanja.



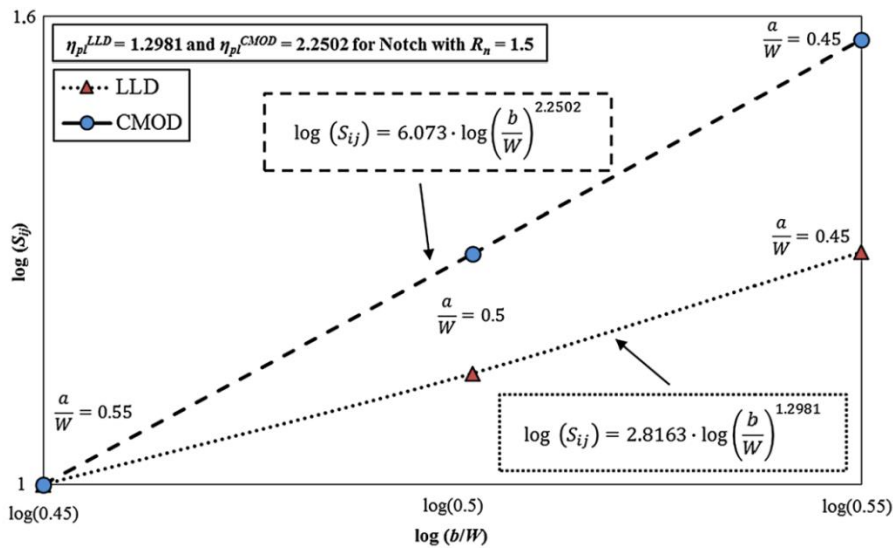
Slika 2.24. Ispitivanje SENB i PRNB epruveta savijanjem u tri tačke uz Aramis sistem [2.60].

Tokom navedenog istraživanja rezultati krivih *CTOD-R* (slika 2.25) pokazali su sličnu žilavost loma epruveta u opsegu početka rasta prsline.



Slika 2.25. Poređenje inicijalnih i konačnih vrednosti parametra CTOD (δ_5) za SENB, CT i PRNB epruvete [2.60].

Na osnovu rezultata prikazanih na slici 2.25 koja predstavlja dijagrame CTOD-R za navedena tri tipa epruveta, autori ovog rada zaključili su zaključili da epruvete u obliku prstena isečene iz cevovoda mogu biti pogodna zamena za ispitivanje otpornosti na loma materijala cevovoda sa oštećenjima u uzdužnom pravcu u slučajevima kada nije moguće zadovoljiti zahteve standarda za ispitivanje žilavosti loma materijala [2.60].



Slika 2.26. Logaritamski prikaz zavisnosti parametra razdvajanja S_{ij} i odnosa b/W (b - širina ligamenta; W - ukupna širina epruveta [2.61]).

Iste godine, ista grupa autora objavila je još jedan rad na temu izračunavanja korekcionog faktora za epruvete PRNB za različite poluprečnike vrha žleba korišćenjem parametra razdvajanja S_{ij} dobijenog na osnovu parametra $CMOD$ ili pomeranja napadne tačke dejstva opterećenja v_{LL} (slika

2.26) [2.61].

Na osnovu rezultata dobijenih izračunavanjem korekcionog faktora η_{pl} za epruvete PRNB, autori ovog rada zaključili su se vrednosti korekcionog faktora linearno smanjivale za vrednosti poluprečnika na vrhu žleba ispod 0.5 mm i linearno povećavale sa vrednostima poluprečnika većim od 0.5 mm.

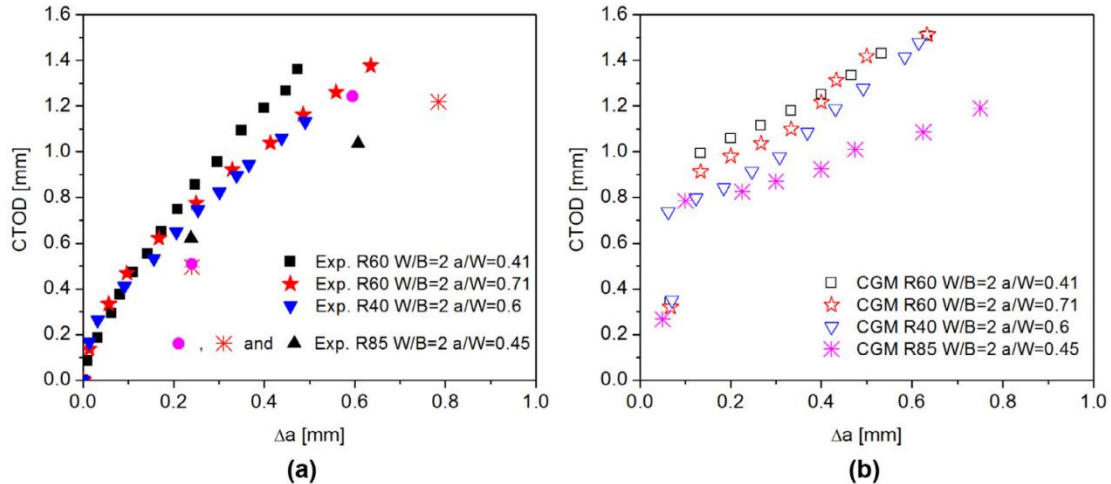
Dalji tok istraživanja nestandardne epruvete oblika prstena nastavljen je u saradnji sa istraživačima sa Univerziteta u Beogradu, Tehnološko-metalurškog i Mašinskog fakulteta. Iz ove saradnje je proisteklo nekoliko naučno-istraživačkih radova na ovu temu među kojima je rad iz 2015. godine koji predstavlja istraživanje procene integriteta cevnih segmenata sa aksijalnim površinskim prslinama izloženih unutrašnjem pritisku. U tom cilju ispitivane su i epruvete za određivanje otpornosti materijala cevi prema lomu. Upoređeni su rezultati standardnih SENB epruveta i novih, epruveta oblika prstena opterećenih na savijanje u tri tačke (slika 2.27) [2.62].

U ovom istraživanju autori su na osnovu dijagrama $CTOD(\delta_5) - \Delta a$ dobijenih eksperimentalnim i numeričkim proračunom došli do zaključka da nova geometrija epruveta pokazuje određene prednosti pri proračunu integriteta cevovoda [2.62].



Slika 2.27. Ispitivanje epruvea oblika prstena savijanjem u tri tačke [2.62].

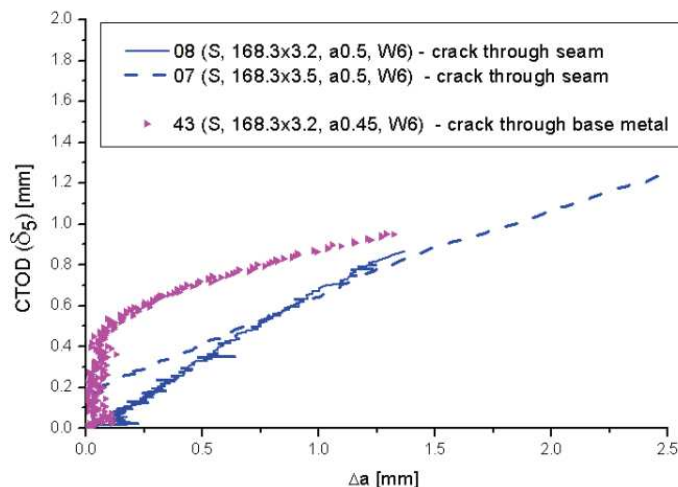
Nastavak istraživanja na temu epruveta oblika prstena sproveden je u okviru doktorskih disertacija Walida Musratija [2.63] i Darka Damjanovića [2.64]. 2017. godine Musrati i sar. su eksperimentalno i primenom mikromehaničkog modela (CGM – Complete Gurson Model) analizirali rast prslina na epruvetama PRNB uzimajući u obzir dužine i oblik koncentratora napona, kao i veličinu ispitivanih epruveta. Uporedni dijagrami zavisnosti $CTOD-\delta_5 - \Delta a$ dobijeni eksperimentalnim putem i primenom mikromehaničkog modela prikazan je na slici 2.28 [2.61].



Slika 2.28. (a) Krive rasta prsline u PRNB epruvetama: eksperimentalno; (b) CGM [2.63].

Na osnovu rezultata prikazanih na slici 2.28 zaključeno je da dimenzije epruvete, oblik i početna veličina koncentrata napona (oštećenja) nisu pokazale znatan uticaj na krive rasta prsline. Ovo važi samo pod uslovom da odnos širine i debljine epruvete ostane konstantan. Istraživači su takođe zaključili i da se mikromehaničkom analizom predviđa promena otpornosti prema lomu sa promenom geometrije epruvete i prsline [2.64].

Istraživanja vezana za ovu geometriju nastavljena su 2018. i 2019. godine kad su objavljena još dva rada ove istraživačke grupe, [2.65, 2.66]. U radu [2.66] istraživači su određivali otpornost prema lomu materijala cevi namenjenih za primenu u hemijskim i energetskim postrojenjima. Koristili su PRNB epruvete sa oštrim koncentrorima napona postavljenim u zavarenom spoju i u osnovnom materijalu. Na slici 2.29 prikazan je dijagram zavisnosti $CTOD(\delta_5) - \Delta a$ za PRNB epruvete sa žlebovima na šavu i u osnovnom metalu [2.66].



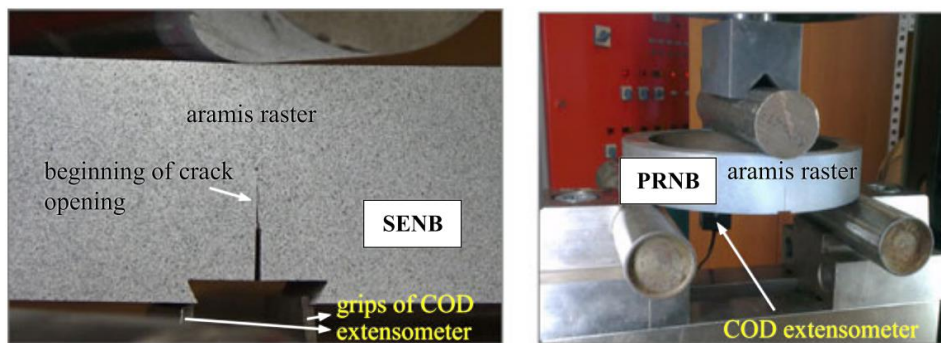
Slika 2.29. Krive rasta prsline - početni defekt u šavu i u osnovnom metalu [2.66].

Zaključeno je da na krive otpornosti prema rastu prsline epruveta sa početnim defektom u zavarenom spoju nisu značajno uticala povećanja debljine zida kao ni promena odnosa širine i debljine epruvete. Ovo ukazuje na još jednu prednost primene PRNB epruveta u inženjerskoj

praksi za različite metalne cevi [2.66].

Daljom analizom PRNB epruveta, u [2.67] je razmatrano ponašanje pri lomu tankozidnih bešavnih i šavnih čeličnih cevi. Razmatrane su razlike u otpornosti na otkaz materijala cevi, kao i heterogenost materijala na primeru šavnih cevi sa oštrim žlebovima u osnovnom materijalu i u šavu. Primenom eksperimentalno-numeričkog pristupa određene su krive otpornosti $CTOD(\delta_5) - \Delta a$. Ovo je postignuto formiranjem niza modela CT epruveta sa svojstvima odgovarajućim ispitivanim šavnim cevima pri čemu je postignuta sveobuhvatna procena ponašanja materijala pri lomu i zaključeno da PRNB epruvete mogu biti uspešno korišćene za procenu otpornosti na lom materijala tankozidnih cevi. [2.67].

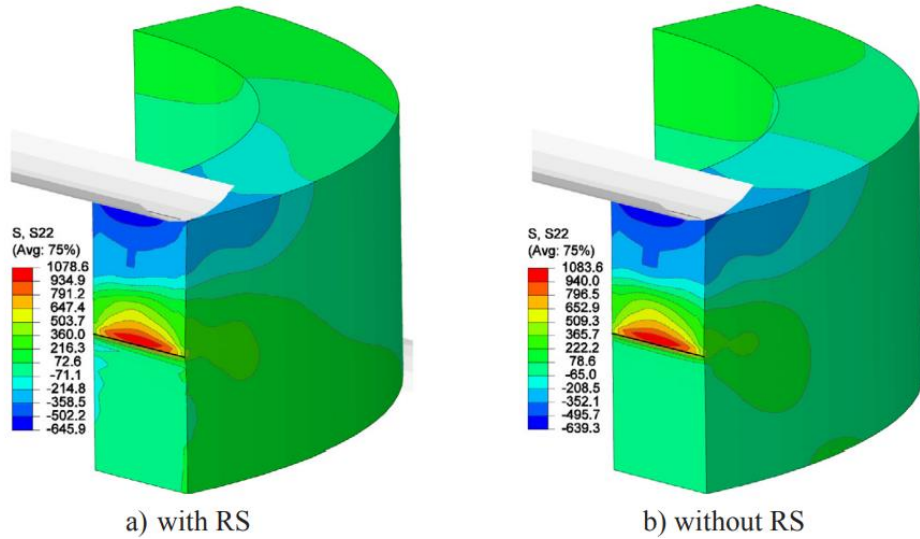
Damjanović i sar. [2.68] su ispitivali vezu između epruveta PRNB i SENB u određivanju žilavosti loma materijala cevi (slika 2.30).



Slika 2.30. SENB i PRNB epruvete u toku ispitivanja [2.68].

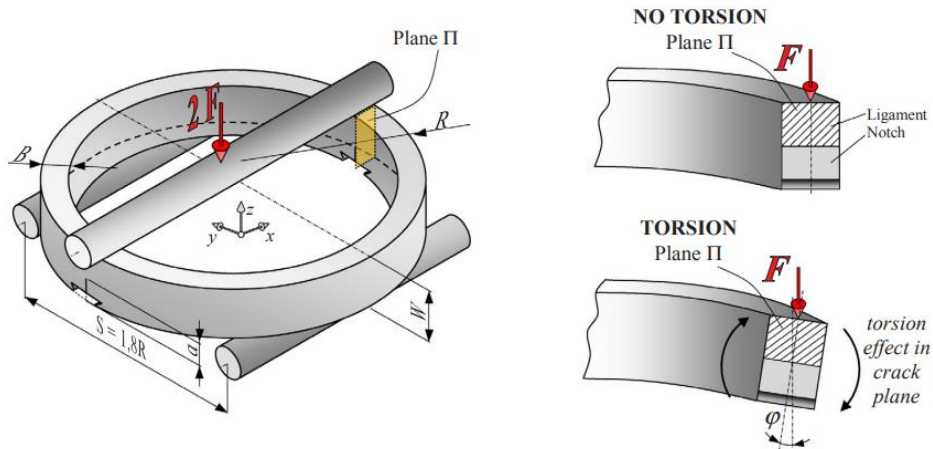
Istraživači su tokom analize loma ova dva tipa epruveta od čelika 16Mo3 bešavne cevi došli do zaključka da se rasponi početnih dimenzija prslina kod SENB i PRNB epruveta blisko podudaraju. Vrednosti CTOD merene na PRNB epruvetama su nešto veće od vrednosti CTOD merenih na SENB epruvetama u slučaju postojanja zamorne prslina umesto nanesenog oštrog žleba [2.68].

Damjanović i sar. su nastavak istraživanja usmerili ka određivanju uticaja zaostalih napona koji se često javljaju kao posledica proizvodnih procesa kao što su livenje, mašinska obrada ili termička obrada a mogu znatno uticati na mehaničko ponašanje cevi. Istraživanje je sprovedeno na cima bešavnih cevi od 16Mo3 materijala korišćenjem tri metode: metoda inkrementalnog bušenja rupa, difrakcija rendgenskih zraka i metoda razdvajanja ("Splitting") [2.67]. Korišćena je kombinovana eksperimentalno-numerička metoda na modelima sa i bez zaostalih napona (slika 2.31). Rezultati eksperimentalno-numeričke analize su doveli do zaključka da zaostali naponi nemaju značajan uticaj na ponašanje loma PRNB epruveta [2.69].



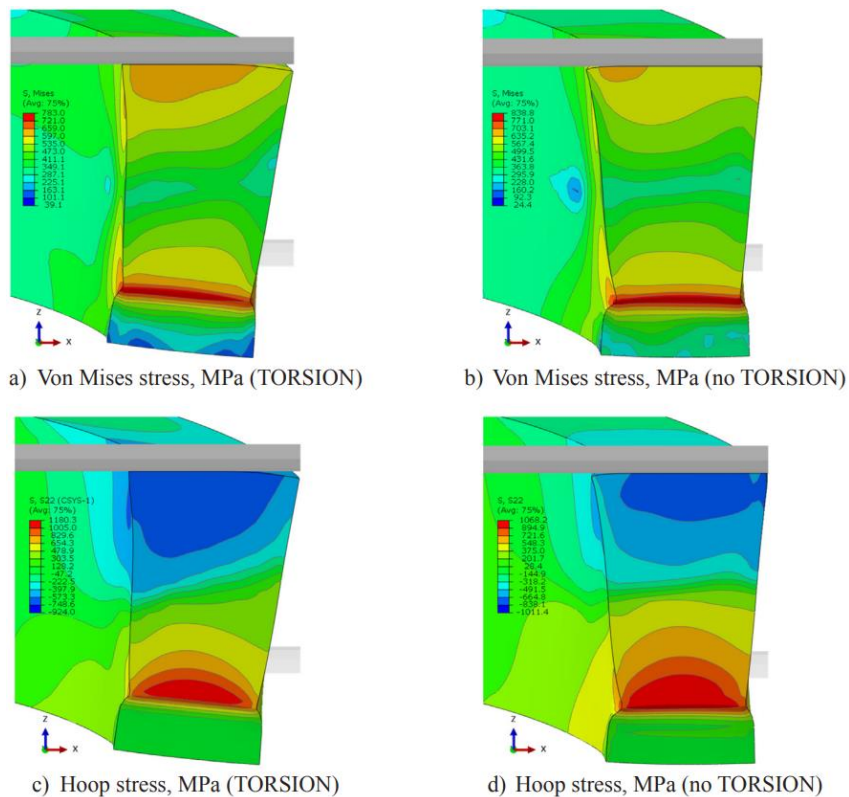
Slika 2.31. (a) Polje obimnog napona na modelima sa zaostalim naponima; (b) bez zaostalih napona [2.69].

Dalja analiza ovih epruveta išla je u pravcu analize uticaja uvijanja na ponašanje pri lomu. Damjanović i sar. su kroz modele za numerički proračun analizirali PRNB sa i bez prisustva efekata uvijanja u zoni prsline, slika 2.32 [2.70].



Slika 2.32. Efekat uvijanja u ravni prsline na PRNB modelu [2.70].

Kroz numeričke proračune na PRNB modelu ($D = 114.3$ mm; $B = 12.5$ mm i $W = 25$ mm) istraživači su došli do rezultata koji ukazuju na značajan uticaj efekta torzije na ponašanje pri lomu PRNB modela, naročito onih koje ASTM E1820 standard ne obuhvata a to su modeli čiji je odnos a_0/W od 0.20 do 0.45. Sa povećanjem ovog odnosa smanjuje se značaj torzionog efekta (slika 2.33) [2.70].



Slika 2.33. Raspodela ekvivalentnog von Misesovog i obimnog napona za model PRNB sa i bez efekta uvijanja pri odnosu $a/W = 0.2$ i uslovom $U3 = -10$ [2.70].

U ovom poglavlju dat je pregled objavljenih rezultata za različite nestandardne geometrije epruveta za određivanje otpornosti prema lomu i oštećenju materijala cevovoda. Naročita pažnja posvećena je epruvetama oblika prstena opterećenim na savijanje u tri tačke (PRNB), imajući u vidu da ova geometrija i postupak predstavljaju polaznu osnovu za rad na ovoj disertaciji.

3. Metodologija i materijali

3.1 Ispitani materijali

3.1.1 PLA (*polylactide acide*) – *poli(mlečna kiselina)*

Poli(mlečna kiselina) PLA, *poly(lactic acid)*, je polimerni materijal korišćen u prvim koracima razvoja nove geometrije epruveta primenom aditivne proizvodnje, tačnije FDM (*Fused Deposition Modeling*) tehnike izrade koja se bazira na spajanju materijala topljenjem. PLA je jedan od najkorišćenijih materijala kada je u pitanju FDM tehnika aditivne proizvodnje, naročito u procesima brze izrade prototipova (*rapid prototyping*).

Polimer PLA dobijen od mlečne kiseline je zbog svog biološkog porekla i svojstva materijala jedan od najzastupljenijih predstavnika biopolimera, čija je proizvodnja za 2019. godinu bila približno 0.3 miliona tona [3.1]. Ovaj biopolimer predstavlja ključnu komponentu u tranziciji prema cirkularnoj ekonomiji u oblasti primene plastičnih materijala. Iako je PLA razgradiv u industrijskim uslovima, postoji rastući interes za njegovo hemijsko recikliranje, putem metoda kao što su hidroliza, alkoholiza i piroliza. Ovi procesi, posebno kada su efikasni i primenljivi u industrijskim razmerama, mogu predstavljati konkurenciju tradicionalnim metodama odlaganja i podržavaju ideju cirkularne ekonomije u industriji plastike [3.2].

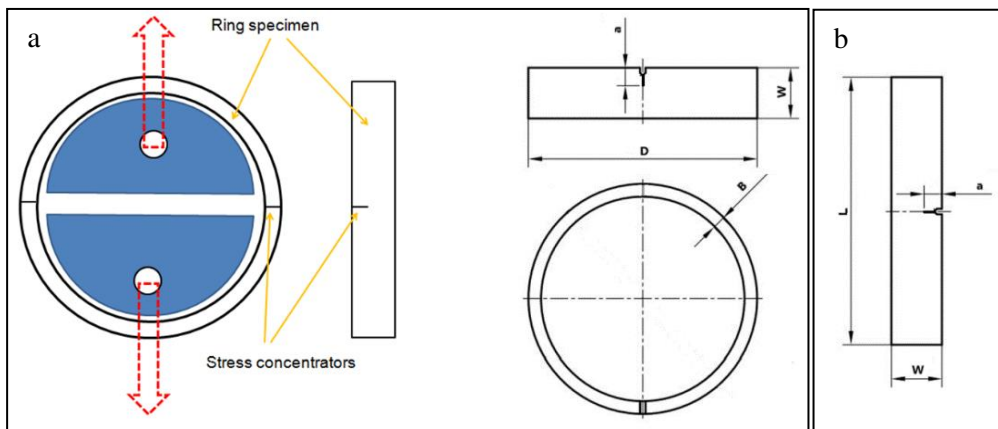
Zbog zastupljenosti PLA polimera u različitim industrijama [3.3-3.5] određivanje njegovih fizičkih i mehaničkih svojstava bila je tema istraživanja nekoliko istraživačkih grupa čijim sumiranjem rezultata je dobijena tabela 3.1 [3.6-3.12].

Tabela 3.1. Fizička i mehanička svojstva polimera PLA [3.6-3.12]

Svojstva	PLA
Gustina (g/cm ³)	1.21 – 1.30
Zatezna čvrstoća (MPa)	15.5 – 150
Modul elastičnosti (GPa)	2.7 – 16
Deformacija pri lomu (%)	2 – 10
Temperatura staklastog prelaza (°C)	60 – 65
Temperatura topljenja (°C)	130 – 180

Zbog velike zastupljenosti polimera PLA u mehaničkim sklopovima, nekoliko istraživačkih grupa je doprinelo boljem razumevanju otpornosti prema lomu 3D štampanih objekata korišćenjem standardnih procedura [3.13,3.14].

Za potrebe razvoja procedure ispitivanja, u ovoj disertaciji je korišćen materijal PLA (German, RepRap) zbog njegovih dobrih osobina prilikom izrade modela 3D štampom. Prvi korak u izradi bio je crtanje i definisanje dimenzija epruveta. Na Slici 3.1 prikazana je skica epruveta oblika prstena sa oštrim žlebom opterećene na zatezanje (PRNT – *Pipe Ring Notched Tension*) i ravne epruvete za zatezanje sa ivičnom prslinom (SENT – *Single Edge Notched Tension*) sa naznačenim veličinama, dok su u tabeli 3.2 i 3.3 prikazane dimenzije.



Slika 3.1. (a) Skica PRNT modela; (b) SENT modela.

Tabela 3.2. Dimenzije i oznake epruveta PRNT i SENT – za ispitivanje dve nedelje nakon izrade.

Dimenzije	Spoljašnji prečnik D (mm)	Debljina zida B (mm)	Širina epruvete W (mm)	Inicijalna dužina oštrog žleba a_0 (mm)
PRNT(PLA) 1-5	42.2	2.3	9.2	2.8
PRNT(PLA) 6-7	42.2	2.3	9.2	4.6
	Dužina L (mm)	Debljina zida B (mm)	Širina epruvete W (mm)	Inicijalna dužina oštrog žleba a_0 (mm)
SENT(PLA) 1-4	80.0	2.3	9.2	2.6
SENT(PLA) 5-8	80.0	2.3	9.2	4.6

Tabela 3.3. Dimenzije i oznake epruveta PRNT i SENT – za ispitivanje jedan dan nakon izrade.

Dimenzije	Spoljašnji prečnik D (mm)	Debljina zida B (mm)	Širina epruvete W (mm)	Inicijalna dužina oštrog žleba a_0 (mm)
PRNT(PLA) 1.1-3.1	42.2	2.3	9.2	2.8
PRNT(PLA) 4.1-6.1	42.2	2.3	9.2	4.6

Izrađene PRNT i SENT epruvete za ispitivanje prikazane su na slikama 3.2 i 3.3. Ispitano je po tri epruvete iz svake serije.



Slika 3.2. PRNT epruvete izrađene FDM tehnikom od PLA materijala.



Slika 3.3. SENT epruvete izrađene FDM tehnikom od PLA materijala.

3.1.2 Poliamid PA12

Za potrebe ove disertacije korišćen je i poliamid PA12 (EOS, PA2200) u vidu praha za sinterovanje. Poliamid je jedan od polimera najčešće korišćenih za SLS tehniku proizvodnje. Zbog svojih povoljnih hemijskih, fizičkih i mehaničkih svojstava njegova primena je veoma široka u medicinskoj, automobilskoj, vazduhoplovnoj i mnogim drugim industrijama [3.15-3.17].

Mehanička svojstva poliamida PA12 prikazana su u Tabeli 3.4, a određena su kroz nekoliko studija koje su se bavile uticajem orijentacije tokom proizvodnje SLS tehnikom i uticajem dodatnih komponenata kao što su aluminijum i staklo [3.17-3.24].

Tabela 3.4. Mehanička svojstva PA12. [3.21]

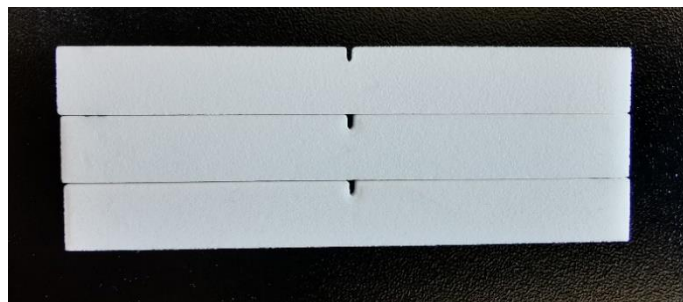
Svojstvo	Vrednost
Zatezna čvrstoća	51.2 MPa
Gustina materijala	0.951 kg/dm ³
Modul elastičnosti	2171 MPa
Deformacija pri lomu	15.6%

Kao osnova za ispitivanja parametara mehanike loma poslužili su standardi poput ISO 13586 i ASTM D5045 [3.25-3.28]. Ispitivanje cevovoda od poliamida PA12 opisano je u nekoliko radova grupe autora iz Austrije i Nemačke [3.29,3.30].

U okviru rada na ovoj disertaciji, izrađene su po tri epruvete u dve grupe PRNT epruveta i u dve grupe SENT epruveta slika 3.4 i slika 3.5.



Slika 3.4. PRNT epruvete izrađene SLS tehnikom od materijala PA12 .



Slika 3.5. SENT epruvete izrađene SLS tehnikom od materijala PA12 .

Dimenzije epruveta prikazane su u tabeli 3.5.

Tabela 3.5. Dimenzije PRNT i SENT epruveta od materijala PA12 .

Dimenzije	Spoljašnji prečnik D (mm)	Debljina zida B (mm)	Širina epruvete W (mm)	Inicijalna dužina oštrog žleba a_0 (mm)
PRNT(PA12) 1-3	42.2	2.3	9.3	3.2
PRNT(PA12) 4-6	42.2	2.3	9.3	4.6
	Dužina L (mm)	Debljina zida B (mm)	Širina epruvete W (mm)	Inicijalna dužina oštrog žleba a_0 (mm)
SENT(PA12) 1-3	80.0	2.3	9.3	3.2
SENT(PA12) 4-6	80.0	2.3	9.3	4.6

3.1.3 Čelici P235TR1 i P235GH

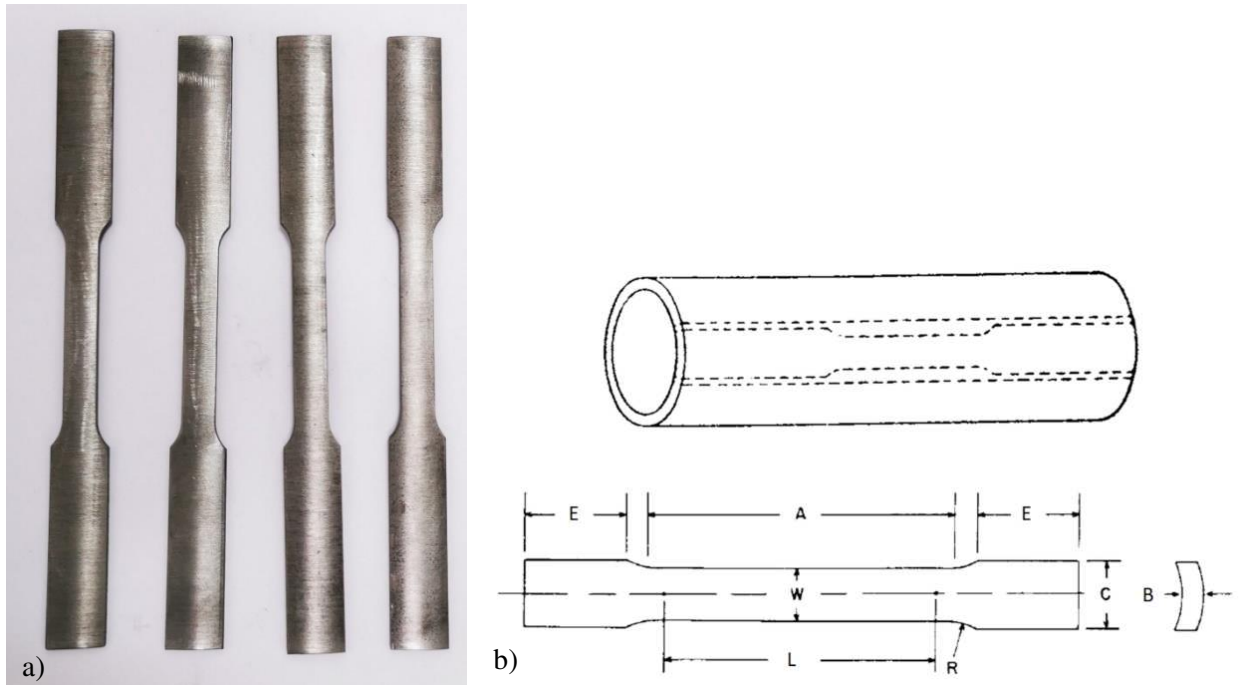
Metalne epruvete ispitivane u eksperimentalnoj postavci ove disertacije dobijene su sečenjem iz cevi od čelika P235TR1 i P235GH (SRPS EN 10216-1 i SRPS EN 10216-2), koje se koriste pri povišenim pritiscima i temperaturama. Hemijski sastav ovih materijala prikazan je u Tabeli 3.6.

Tabela 3.6. Hemijski sastav materijala cevi - čelici P235TR1 i P235GH, maseni %, prema SRPS EN 10217-1

	C [%]	Mn [%]	S [%]	P [%]	Si [%]	Ni [%]	Cr [%]	Mo [%]	Cu [%]	Al [%]
P235TR1	max. 0.16	max. 1.2	max. 0.02	max. 0.025	max. 0.35	max. 0.3	max. 0.3	max. 0.08	max. 0.3	
P235GH	max. 0.16	0.4- 1.2	max. 0.025	max. 0.03	max. 0.35	max. 0.3	max. 0.3	max. 0.08	max. 0.3	min. 0.02

Čelik P235GH ima deklarirana mehanička svojstva na povišenim temperaturama, pa je iz tog razloga pogodniji za transport fluida pri povišenim temperaturama (parovode i dr.) u poređenju sa P235TR1. Takođe, i način izrade je drugačiji: cevi od P235GH su bešavne, dok su one od P235TR1 šavne.

Ispitivane epruvete od materijala P235TR1 i P235GH pripremljene su u tri grupe. Prva grupa su standardne epruvete (prema standardu ASTM E8/E8M) za zatezanje, dimenzija mernog dela $W = 12$ mm, $L = 100$ mm i $B = 3$ mm, slika 3.6.



Slika 3.6. Standardne epruvete za zatezanje: a) od P235TR1 (dve levo) i P235GH (dve desno); b) skica standardne epruvete za zatezanje dobijene iz cevi.

Radi karakterizacije materijala cevovoda, pored standardnih epruveta sa slike 3.6 pripremljene su i epruvete oblika prstena za zatezanje bez početnog koncentrata napona. Pripremljena su dva tipa epruveta sa po tri uzorka. Prvi tip epruveta je RHTT (*Ring Hoop Tension Test*) (Slika 3.7).



Slika 3.7. RHTT epruvete od materijala P235TR1 .

Drugi tip epruveta označen kao RHNT (slika 3.8) su epruvete izrađene na isti način kao RHTT

epruvete ali sa radijusom. Epruvete su izrađene radi poređenja rezultata i boljeg razumevanja ponašanja epruveta oblika prstena.



Slika 3.8. RHNT epruvete od materijala P235TR1 .

Dimenzije epruveta RHTT i RHNT izrađenih sečenjem iz šavne cevi su date u tabeli 3.7.

Tabela 3.7. Dimenzije RHTT i RHNT epruveta od materijala P235TR1 .

Tip epruvete	Mesto na kom se očekuje otkaz	Debljina zida B [mm]	Širina mernog dela epruvete [mm]	Spoljni prečnik D [mm]
RHTT 1	U zoni šava	2.79	5.19	88.0
RHTT 2	Naspram šava	2.80	5.18	88.0
RHTT 3	Naspram šava	2.78	5.21	88.0
RHNT 1	U zoni šava	2.79	5.20	88.0
RHNT 2	Naspram šava	2.79	5.21	88.0
RHNT 3	Naspram šava	2.78	5.19	88.0

Obe grupe epruveta korišćene su za karakterizaciju materijala i formiranje krive stvarni napon - stvarna deformacija, potrebne za numeričku simulaciju metodom konačnih elemenata. Od materijala P235TR1 i P235GH izrađene su i epruvete za određivanje otpornosti prema lomu – PRNT, Tabela 3.8. Epruvete od rednog broja 1 do 11 pripremane su na erozimat (debljinom žice 0.25 mm) i poseduju dva žleba jednakih dimenzija na suprotnim stranama epruveta (slika 3.9).

Epruvete od rednog broja 21 do 30 pripremane su na CNC laserskoj mašini i poseduju jedan žleb (slika 3.10).



Slika 3.9. PRNT epruvete pripremljene na erozimat.



Slika 3.10. PRNT epruvete pripremljene na CNC laseru.

Tabela 3.8. Dimenzije epruveta sa jednim i dva oštra žleba od materijala P235TR1 i P235GH .

R. br.	Materijal	Spoljni prečnik D [mm]	debljina zida B [mm]	W/B	R/W	Napomena	Dužina žleba a [mm]	Širina epruvete W [mm]	a_0/W	Širina ligamenta b [mm]
1	P235TR1	88.00	2.70	4.00	4.07	kroz šav; $a_0/W=0.5$	5.3	10.62	0.50	5.32
2	P235TR1	88.00	2.70	4.00	4.07	kroz šav; $a_0/W=0.5$	5.45	10.58	0.52	5.13
3	P235TR1	88.00	2.70	4.00	4.07	normalno na šav; $a_0/W=0.5$	9.13	10.7	0.85	1.57
4	P235TR1	88.00	2.70	4.00	4.07	normalno na šav; $a_0/W=0.5$	5.42	10.7	0.51	5.28
5	P235TR1	88.00	2.70	4.00	4.07	kroz šav; $a_0/W=0.35$	3.84	10.67	0.36	6.83
6	P235TR1	88.00	2.70	2.00	8.15	kroz šav; $a_0/W=0.5$	2.72	5.25	0.52	2.53
7	P235TR1	88.00	2.70	2.00	8.15	kroz ZUT; $a_0/W=0.5$	2.66	5.29	0.50	2.63
8	P235TR1	88.00	2.70	2.00	8.15	kroz ZUT; $a_0/W=0.5$	2.68	5.2	0.52	2.52
9	P235GH	88.00	2.70	4.00	4.07	$a_0/W=0.5$	5.39	10.6	0.51	5.21
10	P235GH	88.00	2.70	4.00	4.07	$a_0/W=0.5$	5.4	10.66	0.51	5.26
11	P235GH	88.00	2.70	4.00	4.07	$a_0/W=0.35$	3.76	10.65	0.35	6.89
21	P235TR1	88.00	2.70	4.00	4.07	kroz ZUT; $a_0/W=0.5$	6.3	11.94	0.53	5.64
22	P235TR1	88.00	2.70	4.00	4.07	kroz ZUT; $a_0/W=0.5$	6.28	11.74	0.53	5.46
23	P235TR1	88.00	2.70	4.00	4.07	kroz ZUT; $a_0/W=0.5$	6.3	12	0.53	5.7
24	P235TR1	88.00	2.70	2.00	8.15	kroz šav; $a_0/W=0.5$	3.13	6	0.57	2.6
25	P235TR1	88.00	2.70	2.00	8.15	kroz šav; $a_0/W=0.5$	3.36	6.45	0.52	3.09
26	P235TR1	88.00	2.70	4.00	4.07	normalno na šav; $a_0/W=0.5$	6.47	12	0.54	5.53
27	P235TR1	88.00	2.70	4.00	4.07	normalno na šav; $a_0/W=0.5$	6.46	12	0.54	5.53
28	P235TR1	88.00	2.70	4.00	4.07	normalno na šav; $a_0/W=0.5$	6.48	12.2	0.53	5.72
29	P235GH	88.00	2.70	2.00	8.15	kroz šav; $a_0/W=0.35$	1.9	6.8	0.28	4.9
30	P235GH	88.00	2.70	4.00	4.07	normalno na šav; $a_0/W=0.35$	4.5	12.21	0.37	7.71

3.2 Eksperimentalne metode

3.2.1 Aditivna proizvodnja i tehnike aditivne proizvodnje

Aditivna proizvodnja je proces koji omogućava brzu proizvodnju delova direktno iz digitalnih modela. Pionirski rad na ovom području započeo je 1980-ih; prva tehnika bila je stereolitografija. Razvoj tehnologija kao što su *Fused Deposition Modeling* (FDM), *Selective Laser Sintering* (SLS) i ostalih dogodio se u narednim decenijama, proširujući mogućnosti primene aditivne proizvodnje.

Jedna od osnovnih prednosti aditivne proizvodnje je njena sposobnost brze izrade prototipova. Tradicionalne metode proizvodnje često zahtevaju izradu kalupa i dugotrajne procese podešavanja pre nego što se mogu proizvesti delovi. Sa aditivnom proizvodnjom, prototipovi se mogu izraditi za samo nekoliko sati ili dana, u zavisnosti od dimenzija i složenosti geometrije dela. Ovo omogućava inženjerima i istraživačima da brzo menjaju/prilagođavaju izgled proizvoda kroz iterativni proces, čime se značajno ubrzava proces razvoja. Neke od prednosti koje takođe odlikuju aditivnu proizvodnju su: izrada kompleksnih geometrija, izrada delova širokog raspona dimenzija (od onih reda veličine mikrona do onih čije dimenzije se mere u metrima), izrada funkcionalnih sklopova, izrada objekata sa različitom strukturom ispune, ušteda materijala primenom generativnog dizajna [3.31,3.32].

Nekoliko najpoznatijih tehnika aditivne proizvodnje su:

1. **Fused Deposition Modeling (FDM) / Fused Filament Fabrication (FFF):**
 - Ove tehnike koriste topljenje termoplastičnih filamenata koje se zatim talože sloj po sloj da bi se formirao objekat.
2. **Stereolithography (SLA):**
 - SLA koristi ultraljubičasti (UV) laser koji se fokusira na rezervoar fotoreaktivne smole, formirajući objekte sloj po sloj.
3. **Selective Laser Sintering (SLS):**
 - Koristeći laser, SLS sinteruje prah materijala sloj po sloj da bi se stvorio čvrst objekat.
4. **Selective Laser Melting (SLM):**
 - Slično kao SLS, ali laser potpuno topi prah, omogućavajući izradu čvršćih i potpuno gustih objekata.
5. **Direct Metal Laser Sintering (DMLS):**
 - Varijanta tehnika SLM i SLS za primenu na metalnim materijalima.
6. **PolyJet / MultiJet Printing (PJP / MJP):**
 - Ove tehnike koriste jet-šampače za nanošenje fotopolimernih materijala, koji se zatim učvršćuju primenom UV zračenja.
7. **Digital Light Processing (DLP):**
 - Slično kao SLA, ali koristi digitalni projektor umesto lasera za učvršćivanje smole.
8. **Binder Jetting (BJ):**
 - Pritiskom se nanosi vezivno sredstvo na prah materijala, povezujući čestice zajedno sloj po sloj.
9. **Electron Beam Melting (EBM):**
 - Koristi elektronski snop umesto lasera za topljenje praha materijala;

posebno je korisno za izradu metalnih delova u svemirskoj i avio industriji zbog mogućnosti izrade delova visoke gustine i čvrstoće.

10. **Material Jetting (MJ):**

- Materijal se dovodi kroz mlaznice, slično kao kod ink-jet štampe, omogućavajući visoku rezoluciju i korišćenje više materijala u jednom objektu.

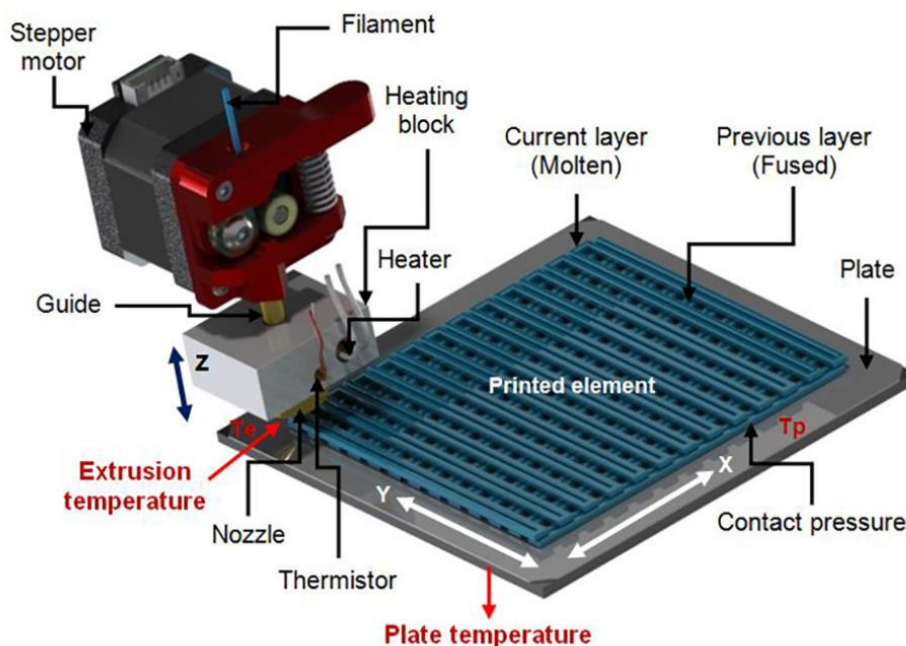
11. **Laminated Object Manufacturing (LOM):**

- Listovi materijala se lepe i seckaju u obliku predmeta koji se izrađuje, prema digitalnom modelu.

Svaka od ovih tehnika ima svoje jedinstvene prednosti i nedostatke, i optimalno je prikladna za različite primene i materijale. Izbor prave tehnologije aditivne proizvodnje zavisi od specifičnih potreba konkretnog projekta, uključujući materijale, troškove, brzinu, rezoluciju i mehaničke zahteve [3.33].

Za potrebe ove disertacije korišćene su dve tehnike aditivne proizvodnje za brzi razvoj epruveta PRNT a to su FDM i SLS tehnika. *Fused Deposition Modeling* (FDM), ili *Fused Filament Fabrication* (FFF), je vodeća tehnika brze izrade prototipa i proizvodnje. Obe tehnike pripadaju grupi *additive manufacturing* tehnologija prema ASTM 52900 standardu.

Proces FDM je jednostavan, ali efikasan. Počinje sa definisanjem 3D digitalnog modela objekta u softveru, koji se zatim konvertuje kroz proces segmentacije u vidu G-koda. Tokom štampanja, termoplastični materijal u filamentima se topi i istiskuje kroz precizno kontrolisanu glavu ekstrudera, taložeći materijal sloj po sloj na radnu površinu. Kako se svaki sloj materijala taloži i deformaciono ojačava, postepeno se stvara konačni izgled objekta (slika 3.11).



Slika 3.11. Princip rada FDM štampača [3.34].

Ono što FDM čini posebno privlačnim u kontekstu razvoja novih epruveta za ispitivanje i procedura, jeste njegova sposobnost brze izrade prototipa. Moguće je efikasno iterirati dizajne, prilagoditi geometrije i eksperimentisati sa različitim materijalima dok se ne postignu željeni rezultati. Uz to, FDM pruža mogućnost da koriste različiti termoplastični materijali, što može biti kritično za određivanje performansi epruveta u realističnim uslovima.

Definisanje mehaničkih osobina prevashodno kreće od izbora materijala. Pored opštih mehaničkih svojstava za svaki od materijala postoji određena varijacija u zavisnosti od načina proizvodnje i pakovanja. Pored toga, dokazan je i značajan uticaj boje na mehanička svojstva materijala koji nije zanemarljiv i predstavlja ozbiljan izazov za proizvodnju [3.35-3.37].

Pored izbora materijala veliki uticaj na svojstva izrađenih objekata imaju parametri štampe koji se definišu unutar softvera. Najčešće kontrolisani parametri koji utiču na mehanička svojstva objekata izrađenih FDM tehnikom su visina i širina sloja, brzina štampe, širina dizne, orijentacija štampe, vazdušni zazor i dr. o čemu je diskutovano u nekoliko naučno-istraživačkih radova [3.38-3.42].

Preciznost FDM tehnike po z osi varira od 50 do 200 μm što ponovo zavisi od moda rada 3D štampača. Prednosti FDM tehnike su cena, kvalitet materijala i mogućnost štampe više materijala istovremeno. FDM tehnika ne zahteva kompleksnu dodatnu obradu što pored bezbednosti za rad predstavlja jednu od najvećih prednosti ove tehnike proizvodnje. Uređaji koji se baziraju na principima FDM tehnike su razvijani kako u pogledu preciznosti tako i u pogledu zapremina za izradu modela pa se danas na tržištu mogu pronaći i modeli čija se zapremina meri u metrima [3.42-3.44].

Nedostaci tehnike ogledaju se u anizotropnosti izrađenih objekata i nemogućnosti izrade objekata sa tankim zidovima. Izrađene objekte takođe odlikuje vodopropusnost, hrapavost koja se ne može uvek korigovati i zatupljenost uglova [3.44-3.48].

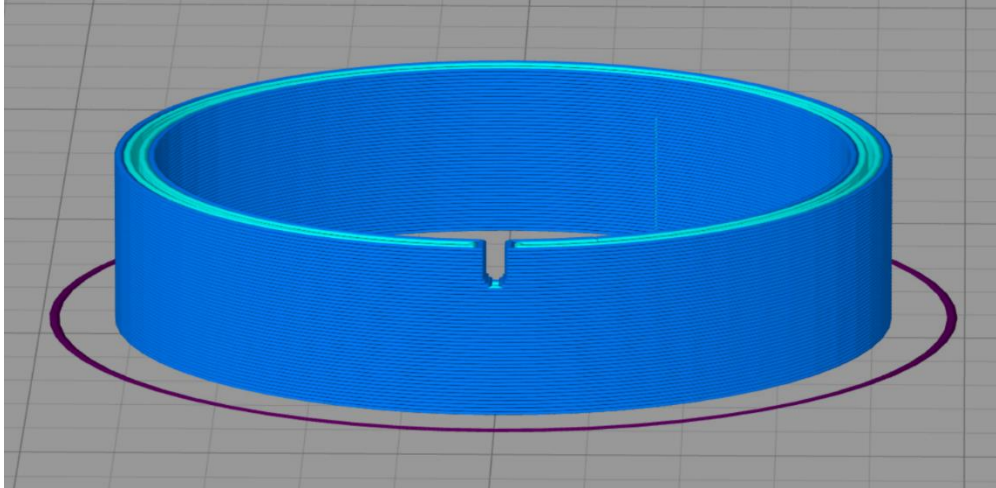
Za potrebe ove teze izrađene su epruvete oblika prstena sa oštrim žlebom i SENT epruvete na uređaju nemačkog proizvođača German RepRap (model X400). Parametri izrade, kao i orijentacija modela, definisani su kroz softver Simplfy3D i prikazani su u tabeli 3.9.

Tabela 3.9. Parametri izrade epruveta korišćeni u istraživanjima u okviru disertacije

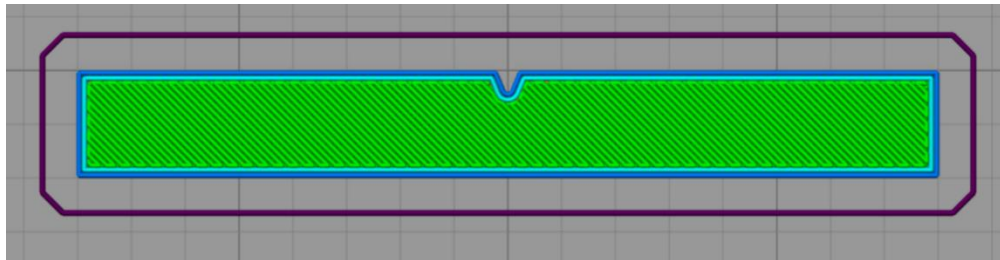
Prečnik dizne	0.4 mm
Brzina ekstrudiranja	60 mm/s
Osnovna visina sloja	0.2 mm
Količina ispune	100%
Tip ispune	saćast
Temperatura ekstrudera	210°C
Temperatura podloge	60°C

Na slici 3.12 prikazana je orijentacija PRNT epruveta prilikom štampe dok je na slici 3.13 prikazana orijentacija štampe SENT epruveta.

Izrada epruveta orijentisana je tako da vlakna budu usmerena u pravcu opterećenja kako bi se dobila maksimalna nosivost. Kako bi se obezbedio što horizontalniji pravac koncentracije napona u ravni prsline, epruvete su izrađene sa ukupno dva sloja spoljašnjih zidova.



Slika 3.12. PRNT model prikazan u softveru Simplify3D.



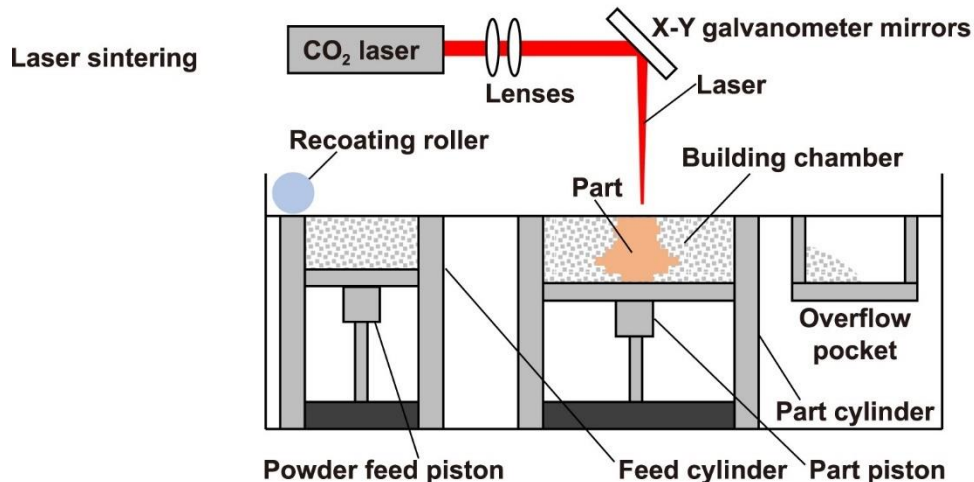
Slika 3.13. SENT model prikazan u softveru Simplify3D.

Selektivno lasersko sinterovanje (SLS) temelji se na sinterovanju čestica praškastih materijala u čvrste forme, sloj po sloj, korišćenjem lasera. Ovaj proces se razlikuje od drugih tehnologija aditivne proizvodnje, kao što je stereolitografija (SLA), koja zahteva potporne strukture tokom proizvodnje. Osnova SLS postupka je kontrola lasera visoke energije koja omogućava precizno sinterovanje praška u željenom obliku (slika 3.14) [3.49-3.52].

Širok spektar materijala dostupan je za SLS, uključujući polimere, metale i keramike. Najčešće korišćeni polimeri uključuju poliamid (PA), dok su među metalima popularni aluminijum, titan i nerđajući čelik. Sposobnost rada sa različitim materijalima čini SLS izrazito prilagodljivim u različitim industrijskim primenama. SLS ima značajnu ulogu u proizvodnji prototipova, alata i gotovih delova. U vazduhoplovnoj, automobilskoj i medicinskoj industriji, SLS je postao nezamenljiv zbog svoje sposobnosti da brzo proizvede visoko funkcionalne delove sa složenim geometrijama. Preciznost i čvrstoća delova proizvedenih SLS tehnologijom omogućili su brzo iteriranje dizajna, što značajno ubrzava razvojni ciklus proizvoda [3.52].

Jedna od najvećih prednosti SLS-a je smanjenje vremena potrebnog za proizvodnju. Ova ušteda vremena dolazi sa dodatnim benefitom smanjenja troškova, naročito kada su u pitanju složeni delovi. Izrađeni delovi imaju bolju završnu obradu i vodonepropusniji su od onih izrađenih FDM tehnikom. S druge strane, izazovi kao što su visoki troškovi opreme i ograničenje u izboru materijala često se navode kao mane. Pored toga promena materijala zahteva čišćenje mašine a sam proces rada može dovesti do ispuštanja toksičnih gasova koji zahtevaju dodatne troškove i infrastrukturu za odvođenje. Naročito akcenat je bezbednost operatera koji mora imati odgovarajuću opremu (pre svega mantil, masku i naočare) kako ne bi došao u direktan kontakt sa prahom [3.52].

Standardi i norme razvijeni od strane organizacija kao što su ASTM i ISO omogućili su doslednost i kvalitet u sektoru aditivne proizvodnje, postavljajući temelj za širu primenu i prilagođavanje SLS tehnologije. Razvoj standarda kao što su ASTM F2792 i ISO/ASTM 52900 pomogli su u definisanju okvira koji obezbeđuju sigurnost i efikasnost u proizvodnji [3.53, 3.54].



Slika 3.14. Šema rada SLS štampača [3.49].

3.2.2 Ispitivanje zateznih osobina

Ispitivanje zateznih osobina jedan je od ključnih metoda za određivanje mehaničkih svojstava materijala. Ova ispitivanja pružaju inženjerima i istraživačima uvid u to kako se materijal ponaša kada je podvrgnut zateznom opterećenju, što može biti od presudne važnosti pri projektovanju i proizvodnji komponenata i struktura. Postoji niz međunarodnih i nacionalnih standarda koji opisuju kako se sprovode ispitivanja zatezne čvrstoće. Neki od najpoznatijih međunarodnih standarda uključuju:

ASTM E8 / E8M: Standardne metode ispitivanja za zatezna ispitivanja metalnih materijala.

ISO 6892-1: Metalni materijali - Ispitivanje zatezne čvrstoće - Deo 1: Metoda ispitivanja pri sobnoj temperaturi.

ASTM D638: Standardna metoda ispitivanja za zatezne svojstva plastičnih materijala.

Kroz ispitivanje zatezne čvrstoće, moguće je dobiti niz ključnih parametara koji opisuju mehanička svojstva materijala, uključujući:

Zatezna čvrstoća (R_m): Maksimalni napon koji materijal može podneti pre konačnog otkaza.

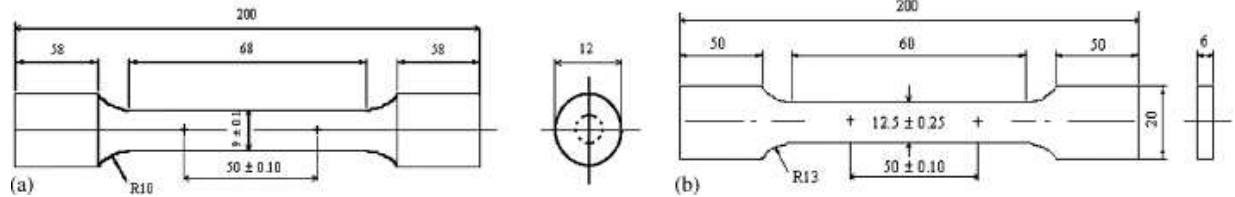
Granica tečenja (R_e): Napon pri kojem materijal počinje da se trajno deformiše bez povećanja opterećenja.

Izduženje pri lomu (ΔL_u): Procentualno izduženje materijala u trenutku konačnog otkaza.

Modul elastičnosti (E): Odnos između napona i deformacije u elastičnoj zoni.

Odabrani standard za ispitivanje zavisi od vrste materijala i specifičnih zahteva primene. Dobijeni parametri iz ovih testova pružaju informacije koje mogu uticati na projektovanje, selekciji materijala i proizvodne procese.

Standardni oblik epruveta za karakterizaciju zateznih osobina materijala opisan je Slikom 3.15.



Slika 3.15. Skica epruveta za zatezanje a) cilindričnih i b) pločastih (dimenzije izražene u mm) [3.55].

Kao rezultat ispitivanja zateznih svojstava materijala dobija se dijagram zavisnosti inženjerskog napona (σ) od deformacije (ϵ). Napon je izvedena veličina koja predstavlja odnos aksijalnog opterećenja (F [N]) i početne poprečne površine epruvete A_0 [mm²] dok deformacija predstavlja odnos trenutnog (ΔL) i početnog (L_0) izduženja [3.55].

σ_n = Nominalni napon [MPa]

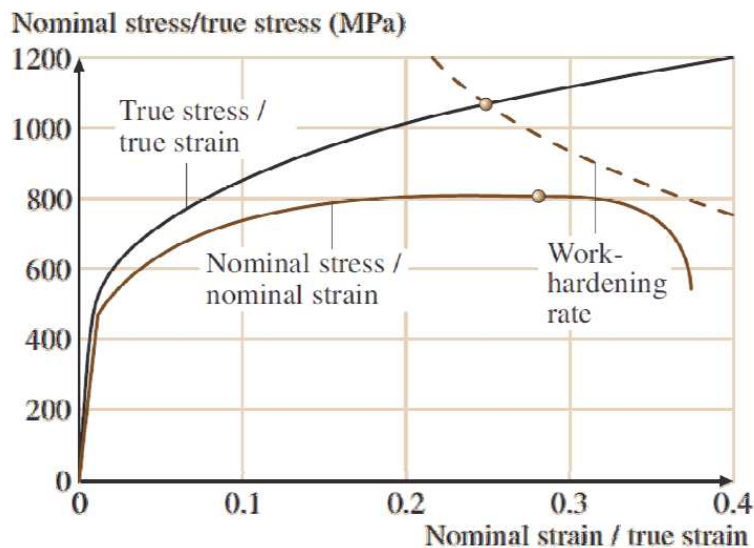
e = Nominalna deformacija [%]

F = Sila (aksijalno opterećenje) [N]

A_0 = Početna poprečna površina [mm²]

$$\sigma_n = F / A_0$$

$$e = \Delta L / L_0 * 100\%$$



Slika 3.16. Dijagram stvarni napon/deformacija i nominalni napon/deformacija [2.23].

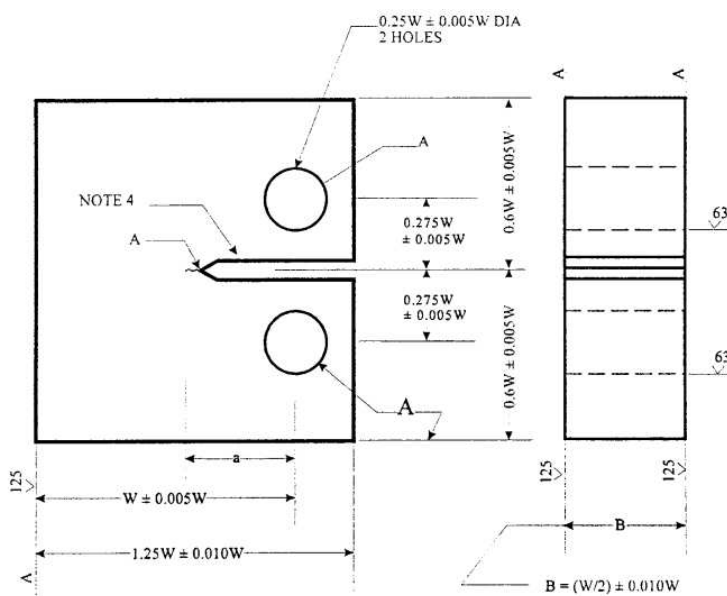
Za razliku od nominalnog (inženjerskog) napona i deformacije, koji se zasnivaju na početnim dimenzijama epruveta, stvarni napon se izračunava kao sila podijeljena trenutnim presekom epruvete, dok se stvarna deformacija računa uzimajući u obzir trenutnu (L) i početnu dužinu epruvete (L_0). Kako se epruveta deformiše tokom zateznog ispitivanja, njena površina se smanjuje, što dovodi do povećanja stvarnog napona (σ). Ovi stvarni parametri pružaju tačniju sliku ponašanja materijala, posebno u fazi kada se približava lomu. Obe krive prikazane su na Slici 3.16.

3.2.3 Ispitivanje mehanike loma

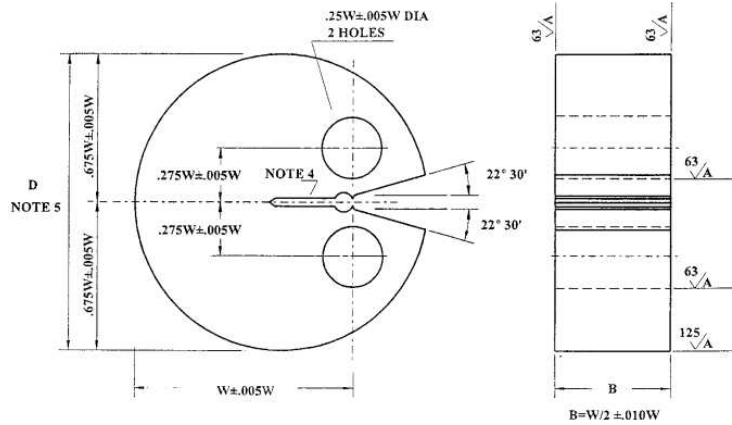
Mehanika loma, kao specifična oblast mehanike čvrstih tela, bavi se ponašanjem materijala kada je izložen spoljašnjim opterećenjima, posebno u situacijama kada su prisutni defekti oblika prsline. Ova naučna oblast pruža uvid u to kako prsline nastaju, rastu i dovode do konačnog loma materijala. Jedan od ključnih aspekata mehanike loma je standardizacija geometrija epruveta i metoda/procedura ispitivanja.

Jedan od najčešće korišćenih standarda za ispitivanje mehanike loma materijal je ASTM E1820. On definiše procedure za određivanje faktora intenziteta napona, otpornosti na rast prsline, J -integrala kao i geometriju ispitivane epruvete i uslove.

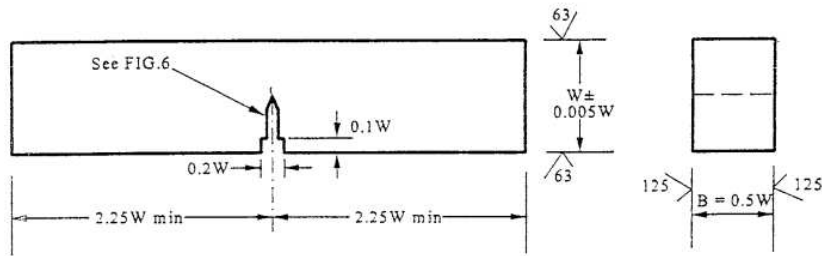
Kada je reč o standardnim epruvetama za ispitivanje, koriste se kompaktne epruvete za zatezanje (CT – slika 3.17), kompaktne disk epruvete za zatezanje (DC(T) – slika 3.18) ili epruvete sa jednim žlebom opterećene na savijanje (SENB – slika 3.19). Ove epruvete i procedure njihovog ispitivanja su razvijene tako da pruže konzistentne rezultate pri različitim uslovima ispitivanja [2.23].



Slika 3.17. Kompaktna epruveta za zatezanje (CT) [2.23].



Slika 3.18. Kompaktne disk epruvete za zatezanje (DC(T)) [2.23].



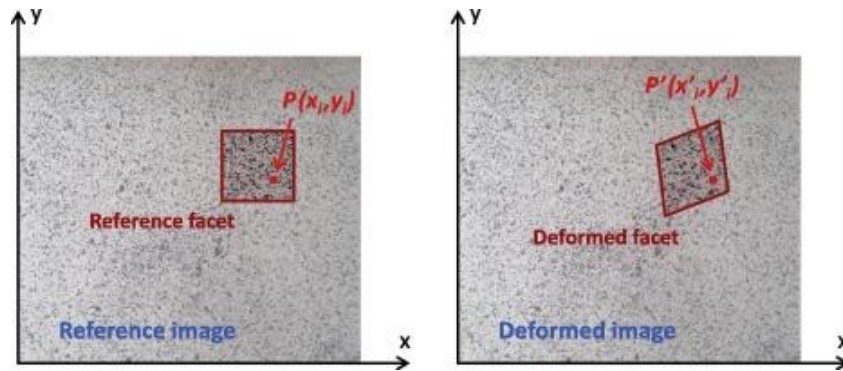
Slika 3.19. Epruveta sa jednim žlebom opterećena na savijanje (SENB) [2.23].

Određivanje parametara mehanike loma u ovom radu zasniva se na standardnim procedurama ali na epruvetama oblika prstena. Sama postavka i način određivanja parametara u ovom radu je u određenoj meri zasnovan na ispitivanju CT epruvete zbor načina opterećivanja.

3.2.4 Digitalna korelacija slika (DIC – Digital Image Correlation)

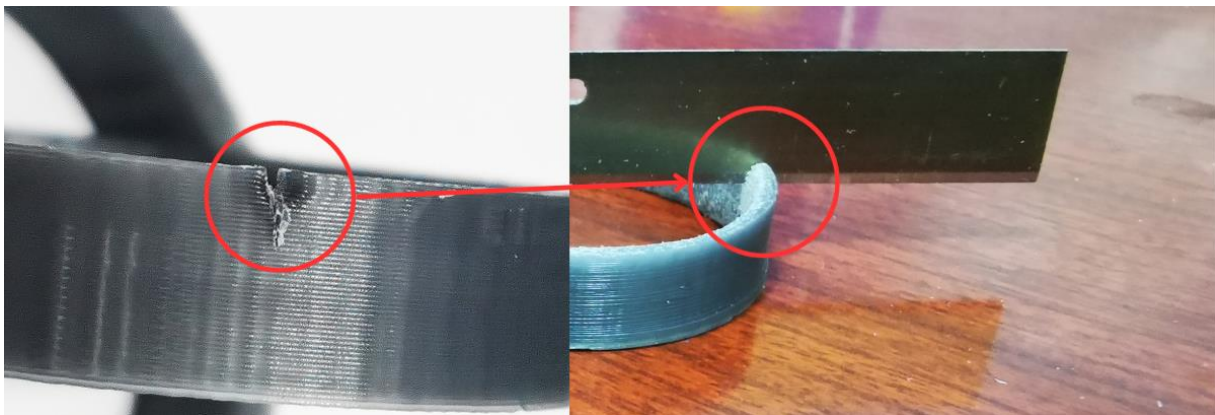
Metoda digitalne korelacije slika je poznata beskontaktna optička metoda za merenje polja deformacija i pomeranja na ispitivanim epruvetama u cilju određivanja mehaničkih svojstava materijala i parametara mehanike loma. Metoda digitalne korelacije slika zasniva se na lokalnom pristupu korelacije koji poredi položaj mernih tačaka u toku opterećivanja epruvete. Lokalni pristup se u ovom slučaju odnosi na polja u okviru mernog područja čiju površinu čini svega nekoliko piksela. Polja čija se površinska deformacija prati zovu se fasete (eng. *Facette*) i razlikuju se na osnovu intenziteta sive boje čija se raspodela razlikuje od fasete do fasete, slika 3.20. Kako bi softver lakše razlikovao fasete potrebno je naneti stohastičku šaru na površini ispitivane epruvete [3.57].

Merenja vršena ovom metodom sprovedena su korišćenjem Aramis GOM 2M sistema. Rad ovog sistema zasniva se na fotografisanju ispitane epruvete korišćenjem dve kamere koje rade po principu stereo kamera. Kamere su povezane na računar sa softverom za obradu snimljenih fotografija. Da bi se postigao odgovarajući kvalitet fotografija, tj. osvetljenost epruveta, koriste se reflektori sa mogućnošću finog podešavanja svetla.



Slika 3.20. Merno područje sa obeleženim fasetama u nedeformisanom (dijagram levo) i deformisanom stanju (dijagram desno) [3.57].

Prvi korak u pripremi epruveta za merenja vršena Aramis sistemom, na PRNT i SENT epruvetama polimernog porekla nanošeni su početni oštri žlebovi korišćenjem skalpela debljine 0.25 mm (slika 3.21).



Slika 3.21. Priprema polimerne PRNT epruvete zasecanjem.

Zasecanje epruveta je vršeno utiskivanjem sečiva u polimer laganim tapkanjem čekićem do probijanja prva dva reda polimera odnosno postizanja željene dužine žleba. Ovakav način dobijanja početne prsline u svom istraživanju primenili su Stoia i sar. [3.28] Nakon zasecanja epruveta usledila je priprema epruveta za merenja beskontaktnom metodom za merenje polja pomeranja i deformacija na ispitivanim epruvetama (DIC).

Kako bi se postigla zadovoljavajuća vidljivost objekata i smanjila refleksija usmerenog osvetljenja na epruvete je najpre nanešena mat bela boja koja je činila osnovu za disperziju crnih tačaka po površini epruvete. Disperzija crnih tačaka koje čine šablon za uspostavljanje sistema za merenje dobijena je prskanjem mat crnog spreja po suvoj beloj osnovi (slika 3.22).



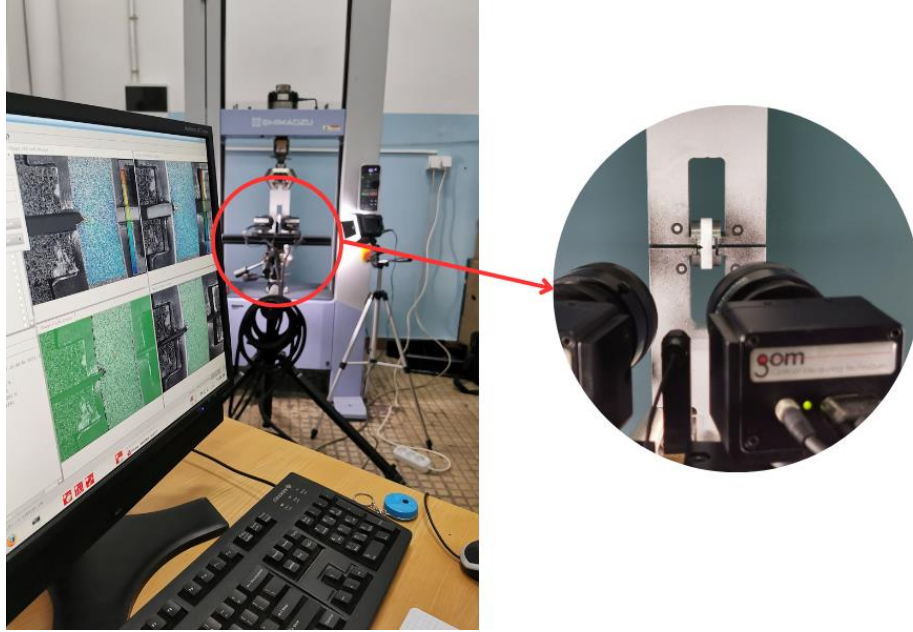
Slika 3.22. Polimerni prstenovi sa nanešenom stohastičkom šarom.

I na čelične epruvete (materijali: P235TR1 i P235GH) takođe je nanešena stohastička šara (slika 3.23).

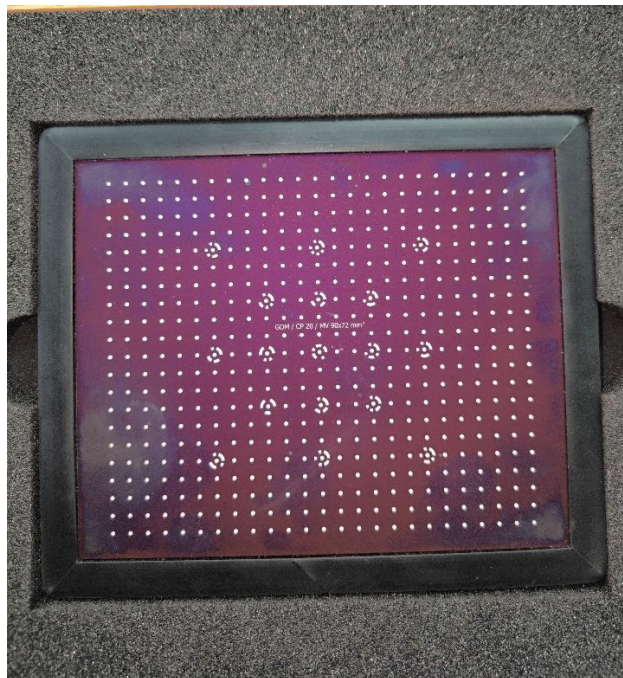


Slika 3.23. Čelične epruvete PRNT sa nanešenom stohastičkom šarom.

Postavka ispitivanja je smeštena u laboratoriji za zavarivanje broj 33, Mašinskog fakulteta pri konstantnim uslovima za rad: temperaturi od 25° C i prosečnoj vlažnosti vazduha od približno 50% (slika 3.24). Rad softvera Aramis sistema baziran je na algoritmu koji se temelji na principima mikrostrukturne analize i omogućuje digitalnu korelaciju slika kroz ceo proces merenja [3.57 - 3.65].



Slika 3.24. Postavka Aramis sistema u toku merenja.



Slika 3.25. Kalibraciona ploča Aramis 2M sistema.

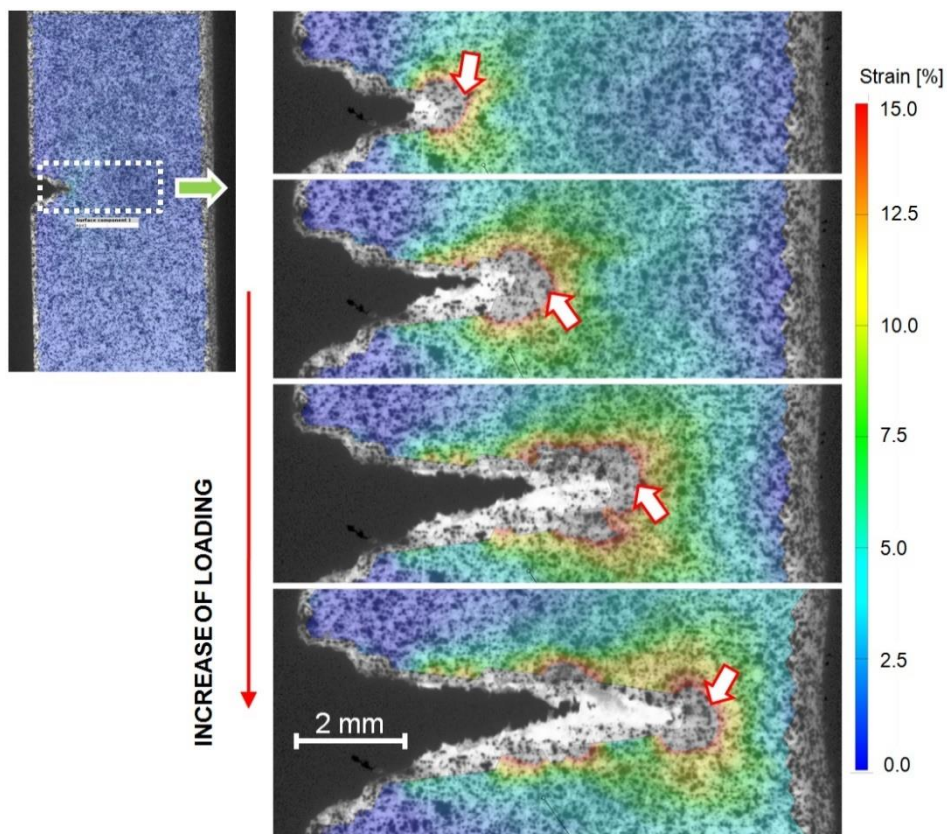
Metoda digitalne korelacije slika je zbog svoje preciznosti uveliko korišćena u naučno-istraživačkim radovima koji se baziraju na merenjima parametara mehanike loma kao što su *CMOD* i *CTOD- δ_5* [3.63 – 3.69].

Ispitivanje epruveta vršeno je na mašini za ispitivanje mehaničkih svojstava materijala Shimadzu AGS-X 100 kN pri različitim brzinama za polimerne i metalne materijale. Epruvete polimernog porekla ispitivane su brzinom od 0.5 mm/min što se nakon probnog ispitivanja rađenog na 0.2, 0.5

i 1 mm/min ispostavilo kao najoptimalnije zbog usklađivanja sa Aramis sistemom. Epruvete od metala ispitivane su brzinom od 1 mm/min Za svaku ispitivanu epruvetu u softveru TrapeziumX primenjena je i opcija Pre-test koja obezbeđuje početak merenja sile kada mašina registruje silu od 10 N što daje garanciju da vrednosti pomeranja neće biti registrovane u toku dostizanja punog kontakta. Sistem Aramis 2M je kalibrisan na ploči dimenzija 90 x 72 mm (slika 3.25) pri veličini faseta od 15 x 13 piksela. Sistem je kalibrisan pri kalibracionom odstupanju od 0.034 piksela.

Sve epruvete ispitivane na mašini za ispitivanje materijala snimane su kamerama Aramis sistema pri brzini uzorkovanja od jedne fotografije po sekundi, što je dalo jasnu sliku polja pomeranja i deformacija u softveru Aramis sistema.

Pored navedenih parametara, u ovoj disertaciji je primenim DIC određivan i rast prsline na polimernim epruvetama merenjem deformacija koje se javljaju ispred trenutnog vrha prsline. Na slici 3.26 prikazana je raspodela polja deformacija sa predviđanjem trenutnog vrha prsline a to je oblast u kojoj deformacija dostiže vrednost od 15%.



Slika 3.26. Raspodela deformacija i predviđanje trenutnog vrha prsline (označeno strelicama, kriterijum za rast prsline je dostizanje deformacije od 15%) [3.70, 3.71].

Ovaj način određivanja rasta prsline u datom trenutku prilagođen je iz istraživanja u kome je primenjena ova metoda ali za vrednosti deformacija od 10% [3.72]. Ovaj metod poslužio je za formiranje krivih rasta prsline za PRNT i SENT epruvete izrađene od polimera PA12.

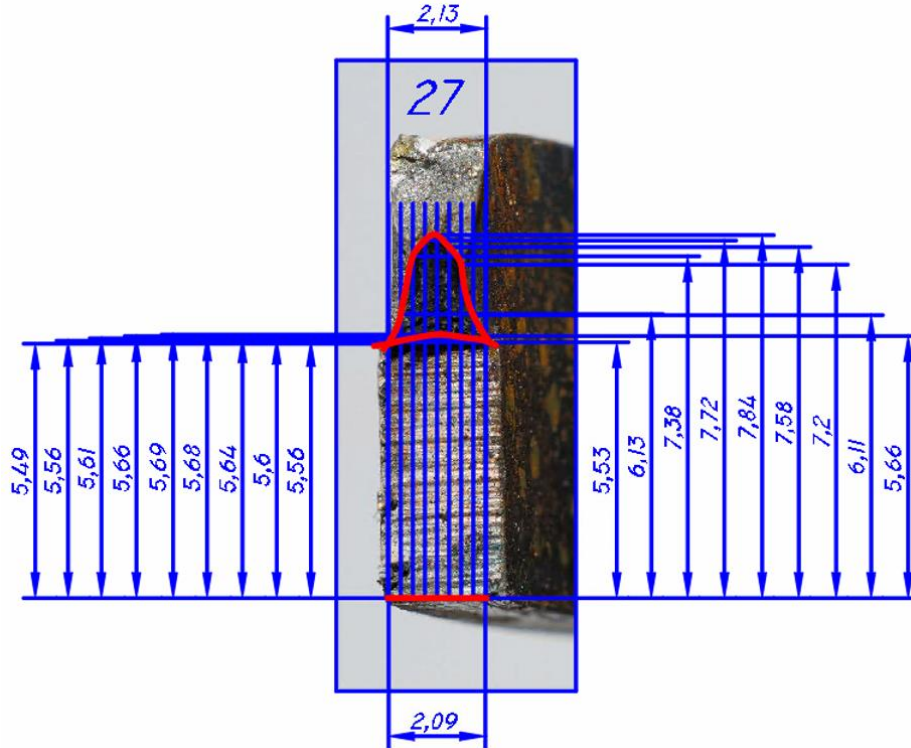
3.2.5 Ispitivanje prelomnih površina

Određivanje rasta prsline na ispitivanim epruvetama od materijala P235TR1 i P235GH rađeno je korišćenjem fotoaparata (Nikon Coolpix P1000) sa uvećanjem (optički zum 125x, digitalni zum 4x) (slika 3.27).



Slika 3.27. Fotografisanje prelomnih površina ispitanih PRNT epruveta.

Prelomne površine dobijene nakon potapanja epruveta u tečni azot i krtog lomljenja istih poslužile su za merenje rasta prsline. Rast prsline je meren korišćenjem softvera AutoCAD 2021 (slika 3.28).



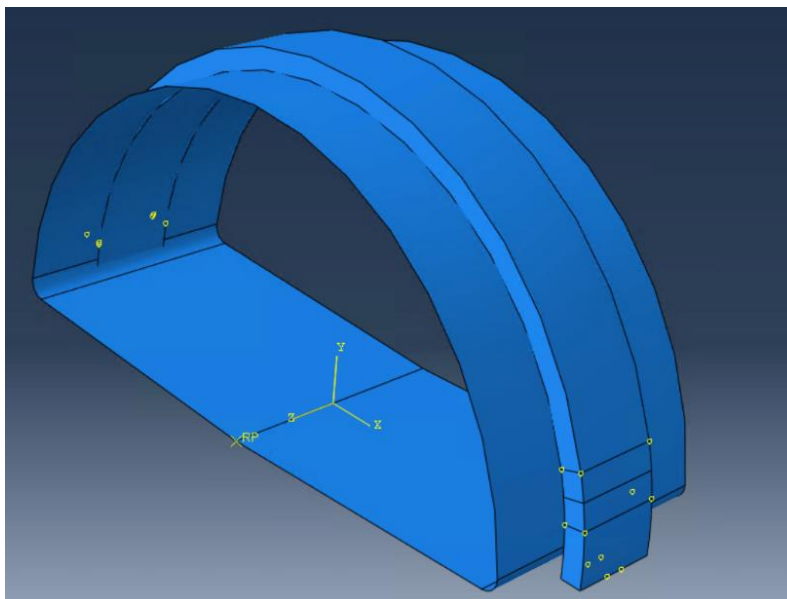
Slika 3.28. Merenje konačne dužine prsline.

3.3 Numerička analiza

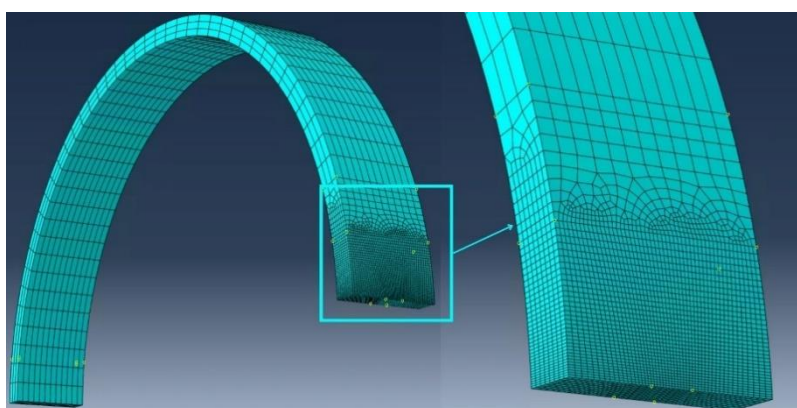
3.3.1 Uvod u numeričku analizu

Numerička analiza je za potrebe ove disertacije rađena na 3D modelima koji predstavljaju polovinu epruvete oblika prstena i polovinu D-bloka kojim se prenosi opterećenje sa čeljusti mašine na unutrašnju površinu prstena (slika 3.29).

Koristeći softver Simulia Abaqus sprovedene su numeričke analize zasnovane na metodi konačnih elemenata (MKE). Elementi mreže modela definisani su kao kvadratni (sa dvadeset čvorova) sa redukovanom integracijom. Dimenzije elemenata variraju u zavisnosti od zone modela, pa su u zoni od interesa (oko prsline) definisani elementi veličine 0.15 mm, a u ostatku modela su dimenzije elemenata znatno veće (slika 3.30).

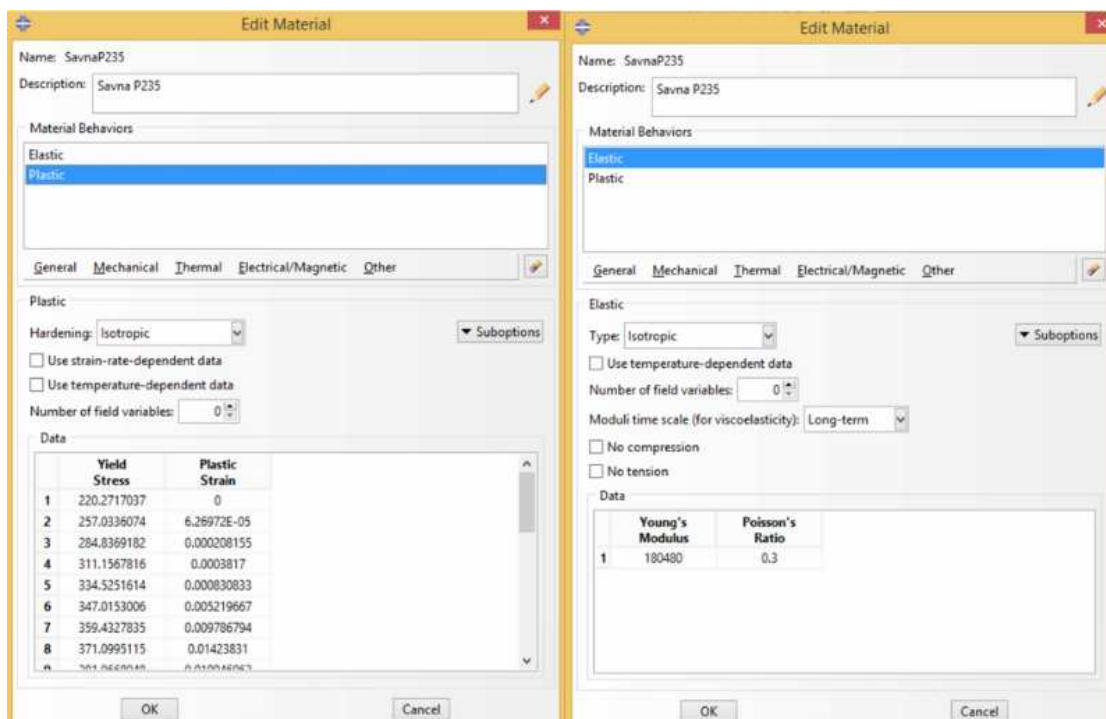


Slika 3.29. Sklop 3D modela polovine prstena i D-bloka.



Slika 3.30. Mreža elemenata na 3D modelu polovine PRNT epruvete.

Model sa slike 3.30 je deformabilan i ima definisana svojstva materijala u “stablu” modela. Za potrebe numeričke simulacije deformisanja modela sa linearno elastičnim ponašanjem (PA12) definisani su modul elastičnosti i Poissonov koeficijent dok je za potrebe modela sa elasto-plastičnim ponašanjem (P235TR1) definisano i plastično ponašanje materijala (slika 3.31).



Slika 3.31. Definisane osobine materijala za model PRNT.

Model D-bloka definisan je kao “analitičko kruto telo”, jer je materijal od kog je izrađen D-blok korišćen u eksperimentu daleko veće čvrstoće od materijala cevi P235TR1.

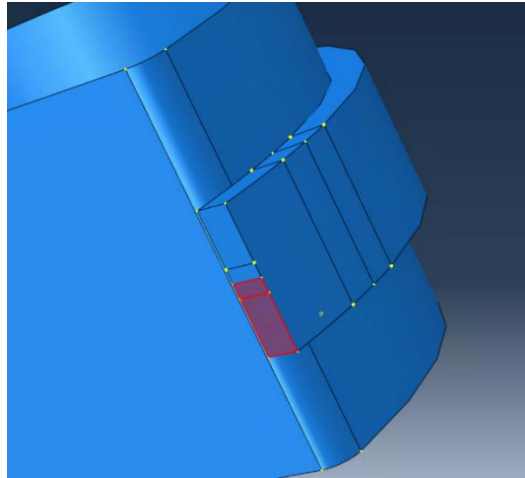
U tabeli 3.10 prikazane su dimenzije modela korišćenih za proračun.

Tabela 3.10. Dimenzije modela korišćenih za proračun MKE.

D (unutrašnji prečnik) [mm]	W (širina modela) [mm]	B (debljina zida modela) [mm]	(odnos dužine prslina i širine modela)	Definisana svojstva materijala	MODEL
42.2	9.2	2.3	0.4; 0.5 ;0.6	PA 12	PRNT
42.2	9.2	3.45	0.4; 0.5 ;0.6	PA 12	PRNT
42.2	9.2	4.6	0.4; 0.5 ;0.6	PA 12	PRNT
82.6	10.8	2.7	0.45; 0.5; 0.55	P235TR1	PRNT
82.6	10.8	4.05	0.45; 0.5; 0.55	P235TR1	PRNT
82.6	16.2	2.7	0.45; 0.5; 0.55	P235TR1	PRNT
124	10.8	2.7	0.45; 0.5; 0.55	P235TR1	PRNT
L_0 (dužina modela) [mm]	W (širina modela) [mm]	B (debljina zida modela) [mm]	(odnos dužine prslina i širine modela)	Definisana svojstva materijala	MODEL
80	9.2	2.3	0.4; 0.5 ;0.6	PA 12	SENT
80	10.8	2.7	0.45; 0.5; 0.55	P235TR1	SENT
80	10.8	4.05	0.45; 0.5; 0.55	P235TR1	SENT

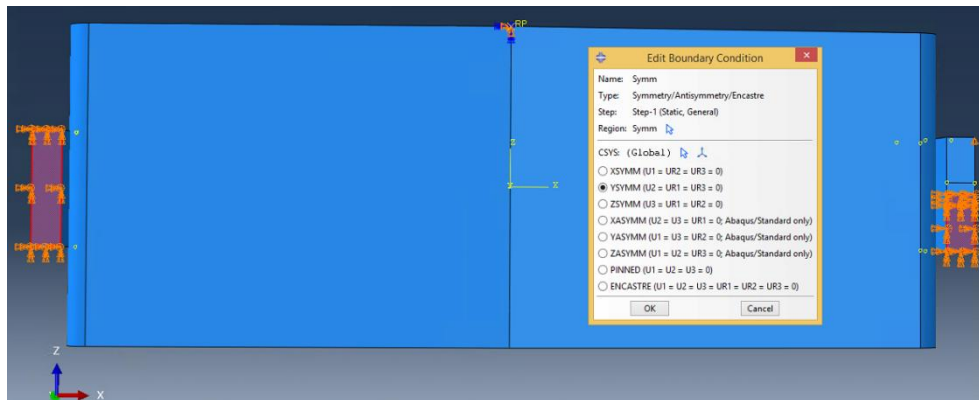
3.3.2 Granični uslovi i definisanje izlaznih parametara

Razmatrana su tri slučaja kada je u pitanju dužina početne prsline na modelu PRNT i to u odnosima $a_0/W = 0.45; 0.50; 0.55$ (Slika 3.32).



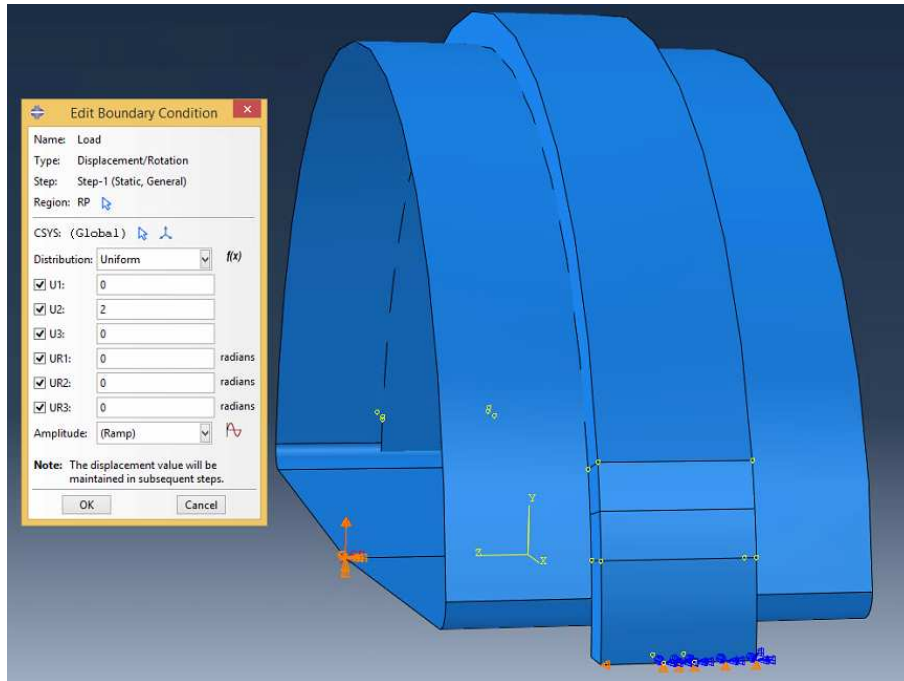
Slika 3.32. Definisanje prsline za $a_0/W = 0.5$; označena je površina ispred fronta prsline - ligament.

Na osnovu definisanja dužine prsline definisani su i uslovi simetrije. Na površini poprečnog preseka modela PRNT definisana je simetrija na onim površinama koje ne pripadaju početnoj dužini prsline (slika 3.33).



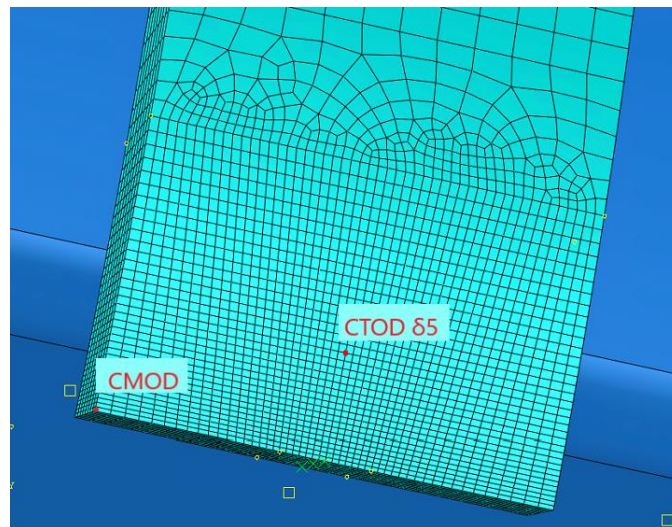
Slika 3.33. Definisana simetrija u Y pravcu za model PRNT pri $a_0/W = 0.5$.

Na ovaj način definisana simetrija modela daje ponašanje celog modela PRNT epruvete. Kako bi opterećenje modela simuliralo opterećenje primenjeno tokom eksperimentalnog ispitivanja, zadato je pomeranje D-bloka u Y pravcu: 2 mm. Pomeranja u ostalim pravcima su onemogućena (slika 3.34).



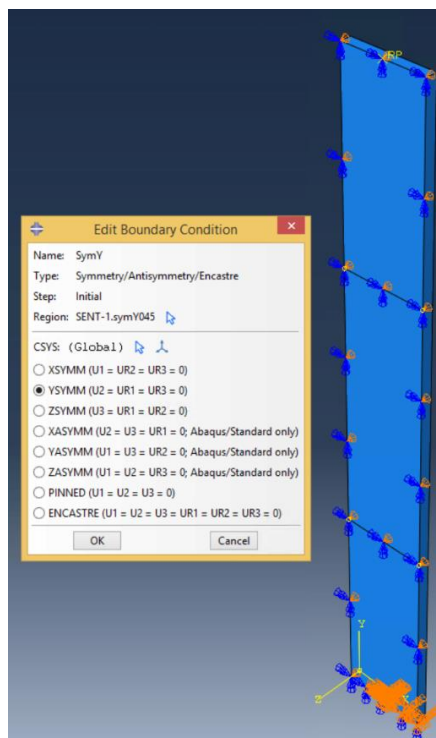
Slika 3.34. Granični uslov pomeranja D-bloka.

Navedeni granični uslovi obezbeđuju da ponašanje numeričkog modela odgovara eksperimentalnom ispitivanju epruveta prilikom čega evidentno nije došlo do pomeranja prstena u pogledu klizanja kao ni do deformacije D-bloka. Izlazni parametri koji su u ovim numeričkim simulacijama definisani su sila u pravcu Y, vrednost parametra $CMOD$, $CTOD-\delta_5$ kao i J -integrala u prvih 10 kontura oko vrha prsline. Vrednost sile u Y pravcu merena je na površinama definisanim simetrijom kao što je prikazano na slici 3.33. Parametri $CMOD$ i $CTOD-\delta_5$ su definisani na spoljašnjoj strani prstena (gde su mereni i eksperimentalnim putem) (slika 3.35).



Slika 3.35. Tačke merenja parametara $CMOD$ i $CTOD-\delta_5$ na PRNT modelu.

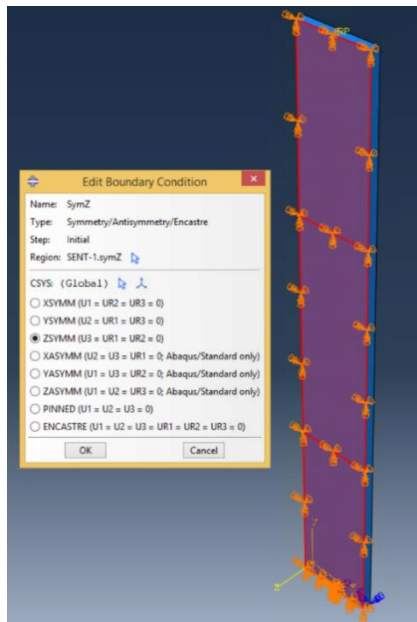
Granični uslovi za model SENT epruvete korišćene u proračunima su se razlikovali od onih zadatih PRNT modelima dok je veličina elemenata i struktura mreže elemenata ostala ista. Odnosi dužine inicijalne prsline i širine modela su isti kao i dimenzije poprečnog preseka modela. Takođe, simetrija u Y pravcu definisana nalik onoj kod PRNT epruveta obezbedila je smanjenje broja elemenata u proračunu kako bi olakšala i ubrzala postupak proračuna (slika 3.36).



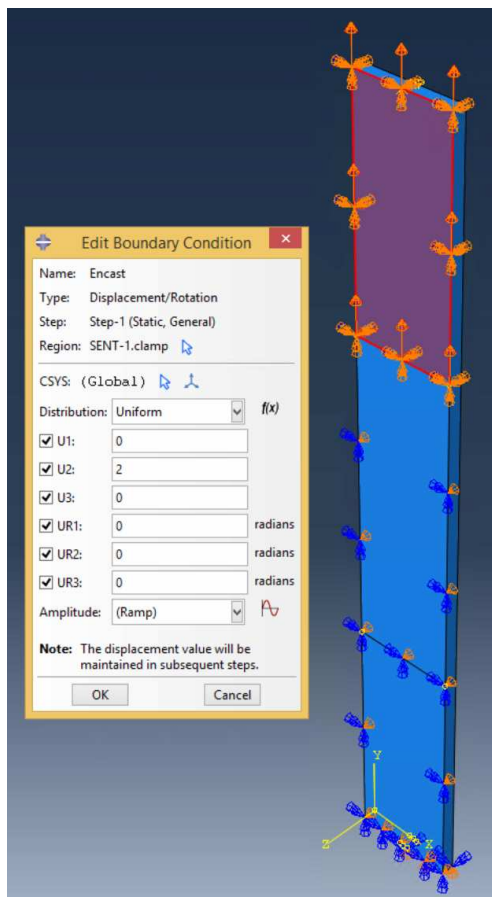
Slika 3.36. Definisana simetrija u Y pravcu za $a_0/W = 0.45$.

Kako bi se broj elemenata dodatno smanjio i olakšao proračun, model je podeljen vertikalno (jer geometrija to dozvoljava) pri čemu je definisana simetrija u Z pravcu (slika 3.37).

Kako bi se verodostojno simulirao prihvat SENT epruvete, model je u gornjem delu fiksiran i zadato mu je pomeranje u Y pravcu za vrednost od 2 mm (slika 3.38).



Slika 3.37. Definisana simetrija u Z pravcu.



Slika 3.38. Definisan prihvat modela i pomeranje u pozitivnom pravcu Y ose.

4. Eksperimentalni rezultati

4.1. Rezultati ispitivanja epruveta PRNT i SENT od PLA materijala

U ovom poglavlju opisani su rezultati ispitivanja epruveta opisanih u potpoglavlju 3.1.1 po navedenom redosledu materijala. Deo epruveta izrađenih od poli(mlečne kiseline), PLA, je ispitivan istog dana kada su izrađene, a deo je ispitan nakon 14 dana, da bi se odredio uticaj starenja na ponašanje materijala pri lomu.

Ispitivanjem PRNT epruveta starih 14 dana primećen je neravnomeran lom prstenova (slika 4.1).



Slika 4.1. Ispitane PRNT epruvete stare 14 dana.

U ovom slučaju rast prsline nije bilo moguće ispratiti ali su zabeležene vrednosti maksimalnih sila i vrednosti sila neposredno pre konačnog otkaza Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Vrednosti maksimalnih sila i sila pri lomu PRNT epruveta starih 14 dana.

Epruvete	Maksimalna sila [N]	Sila pri lomu [N]
PRNT-1	1110.1	683.1
PRNT-2	1105.6	760.3
PRNT-3	1004.4	631.4
PRNT-4	1109.3	689.1
PRNT-5	1217.6	652.6
PRNT-6	732.1	732.1
PRNT-7	988.6	929.1

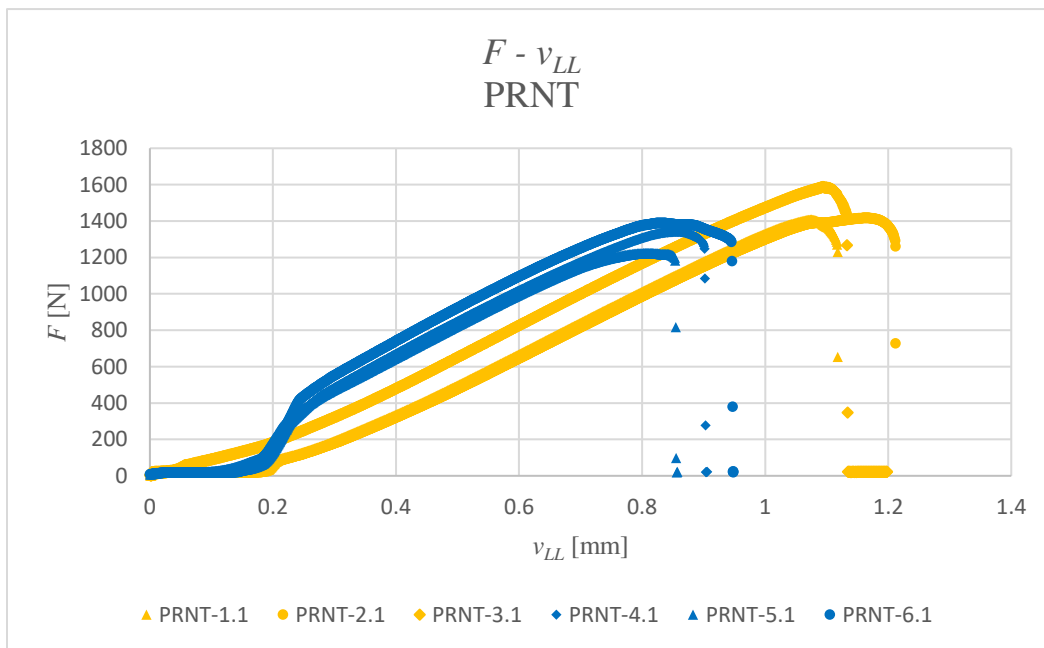
Kao što je navedeno ranije, ispitivanje je urađeno i istog dana kada su epruvete izrađene (za sve epruvete korišćeni su isti parametri 3D štampe). Ove epruvete su pokazale nešto bolja svojstva i za razliku od grupe epruveta izrađene 14 dana pre ispitivanja bilo je moguće izmeriti pored vrednosti maksimalnih sila i sila pri lomu (tabela 4.2) i vrednosti $CMOD$ i $CTOD-\delta_5$.

Tabela 4.2. Vrednosti maksimalnih sila i sila pri lomu PRNT epruveta starih 1 dan.

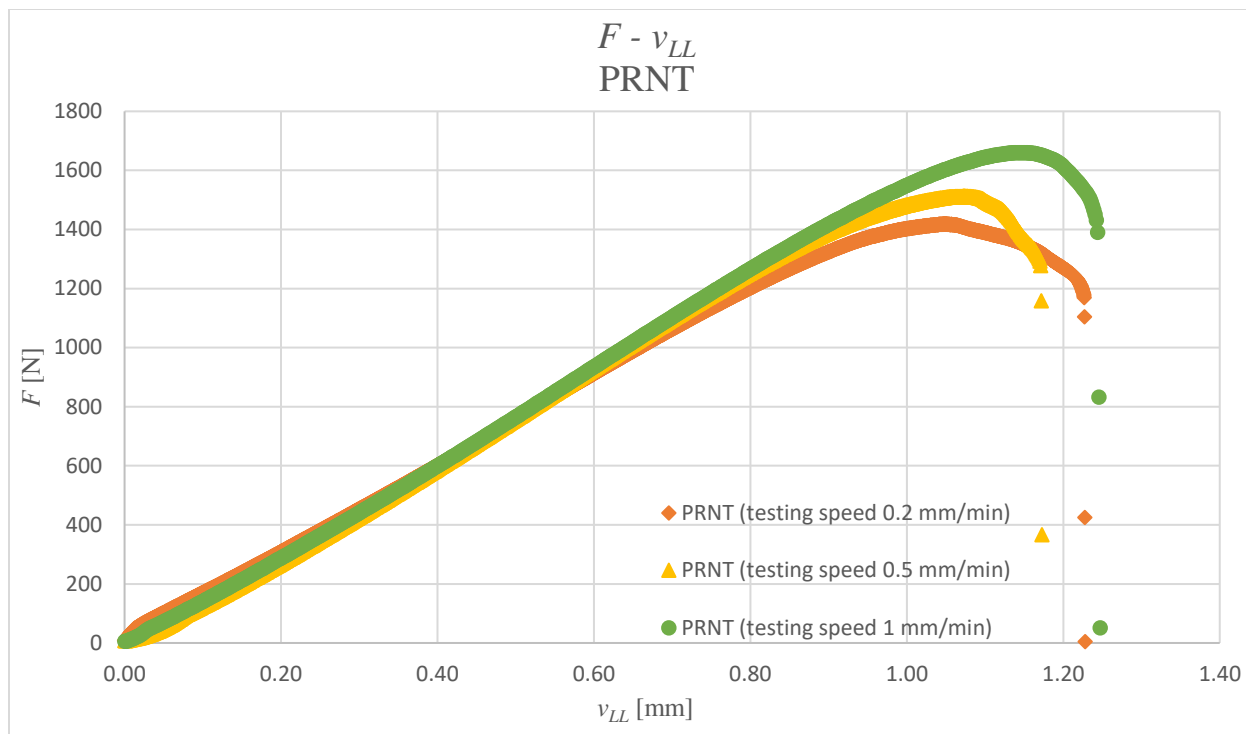
Epruvete	Maksimalna sila [N]	Sila pri lomu [N]
PRNT-1.1	1406.1	1228.5
PRNT-2.1	1416.2	1259.7
PRNT-3.1	1586.8	1265.6
PRNT-4.1	1340.6	1083.5
PRNT-5.1	1222.2	815.6
PRNT-6.1	1388	1178.8

Srednja vrednost maksimalnih sila za epruvete oznaka PRNT1.1 do PRNT-3.1 iznosi **1470 N** dok je srednja vrednost sila pri lomu epruveta **1251 N**. Srednja vrednost max. sila za epruvete iz grupe PRNT-4.1 do PRNT-6.1 iznosi **1316 N** a srednja vednost sile pri lomu **1025 N**. U poređenju sa rezultatima epruveta starih 14 dana prosečna maksimalna vrednost dobijena ispitivanjem epruveta starih jedan dan veća je za približno 32% za epruvete sa manjim odnosom a_0/W . Razlika u srednjoj maksimalnoj vrednosti kod epruveta sa većim odnosom a_0/W iznosi približno 53%.

Na slici 4.2 prikazan je dijagram zavisnosti sile od pomeranja koje je registrovala univerzalna mašina za ispitivanje materijala prilikom ispitivanja epruveta starih jedan dan.

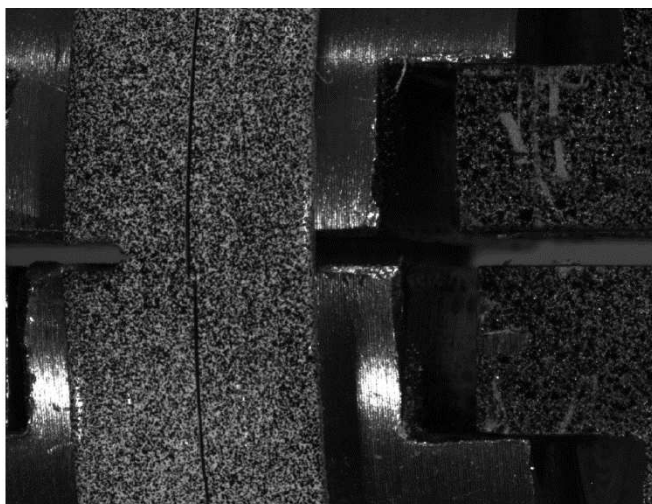


Slika 4.2. Uporedni dijagram zavisnosti sile od pomeranja za epruvete serije PRNT1 – PRNT6.

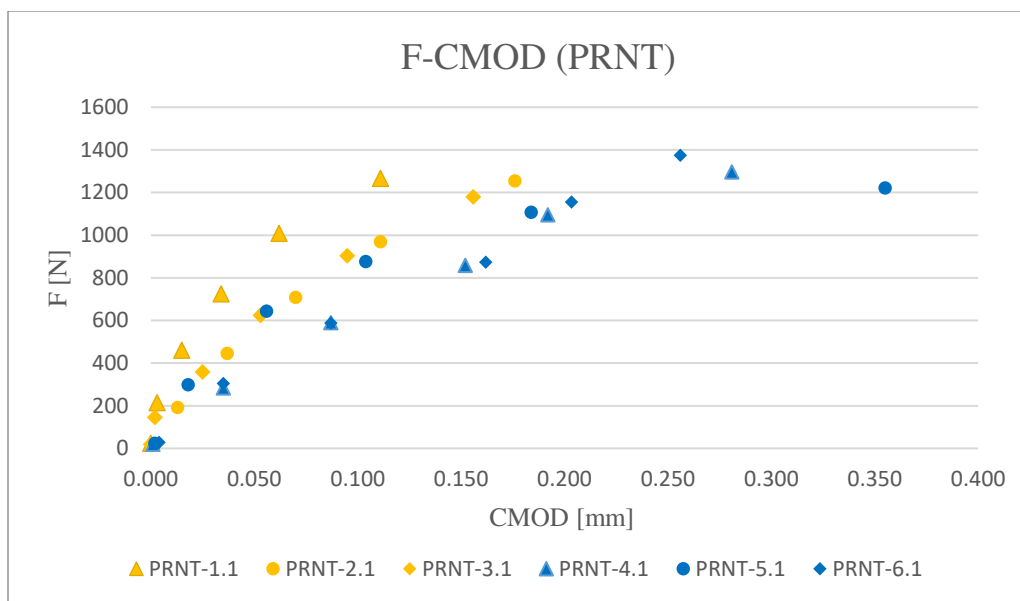


Slika 4.3. Dijagram zavisnosti sile od pomeranja za tri različite brzine deformisanja 0,2 mm/min, 0,5 mm/min i 1 mm/min.

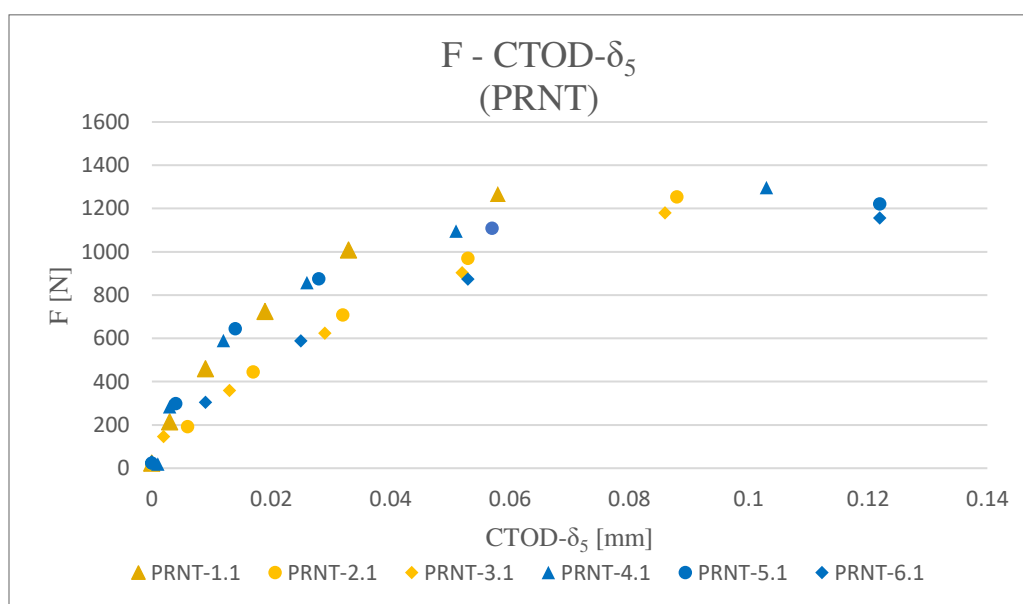
Na osnovu ovih dijagrama možemo zaključiti da je lom epruveta dominantno krt. Kod epruveta izrađenih FDM tehnikom u toku ispitivanja pojavile su se određene nepravilnosti u lomu, čijih je naznaka bilo na samom početku kada su ispitivane epruvete stare 14 dana. Dakle, neravnomerna raspodela opterećenja zbog nepravilnosti prilikom 3D štampe odrazila se delaminacijom materijala u predelima preostalog ligamenta epruvete. Slika 4.4 predstavlja reprezentativni primer delaminacije koja se desila usled ispitivanja pri višim vrednostima sile. U ostalim slučajevima zabeležene su slične promene do kojih je došlo usled delaminacije.



Slika 4.4. Delaminacija ligamenta epruvete.



Slika 4.6. Dijagram zavisnosti sile od $CMOD$.



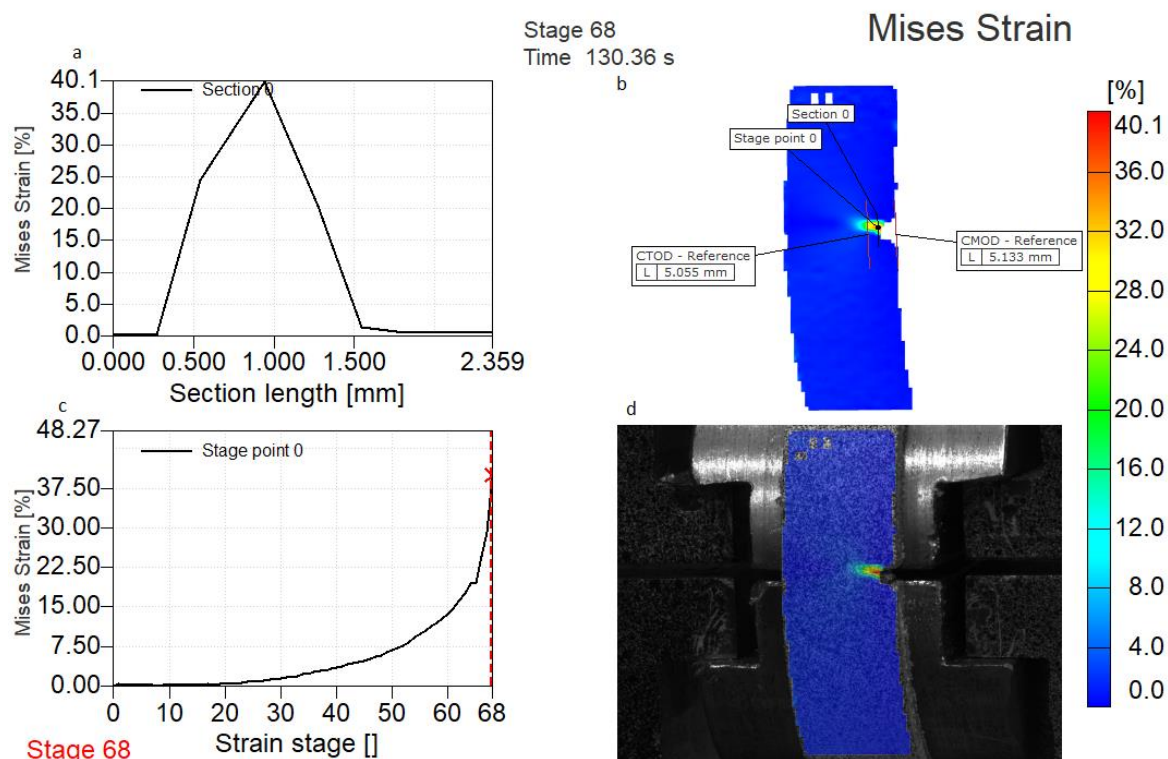
Slika 4.7. Dijagram zavisnosti sile od $CTOD-\delta_5$.

Na osnovu slika 4.6 i 4.7 uviđa se isti trend krivih za epruvete oblika prstena, kako one sa manjom dužinom koncentratore napona, tako i one kod kojih je ova dužina veća. Jedina razlika koja se može uvideti su vrednosti za $CMOD$ za epruvete PRNT-4.1 do 6.1, koje su približno 50% veće.

Podaci sa ovih dijagrama ne ukazuju na maksimalne vrednosti $CMOD$ i $CTOD-\delta_5$ iz razloga što su dijagrami formirani na osnovu podataka koji su učitani po vremenskim intervalima od 1 s kako bi se uskladio rad Aramis 2M sistema sa univerzalnom mašinom za ispitivanje materijala. Kako su maksimalne vrednosti ova dva parametra dostizane veoma brzo uz pad sile za ovu vrstu dijagrama taj podatak neće imati velikog uticaja. Pored informacija o pomeranju epruveta snimanog Aramis 2M sistemom učitavane su vrednosti ekvivalentne von Misesove deformacije za

obe vrste epruveta.

Maksimalne vrednosti ekvivalentne von Misesove deformacije izmerene u toku eksperimenta prilikom loma obe vrste epruveta su ujednačene i njihova srednja vrednost iznosi približno **43%**. Slika 4.8 oslikava realan izgled dijagrama dobijenih beleženjem promene u vrednostima ekvivalentne von Misesove deformacije.



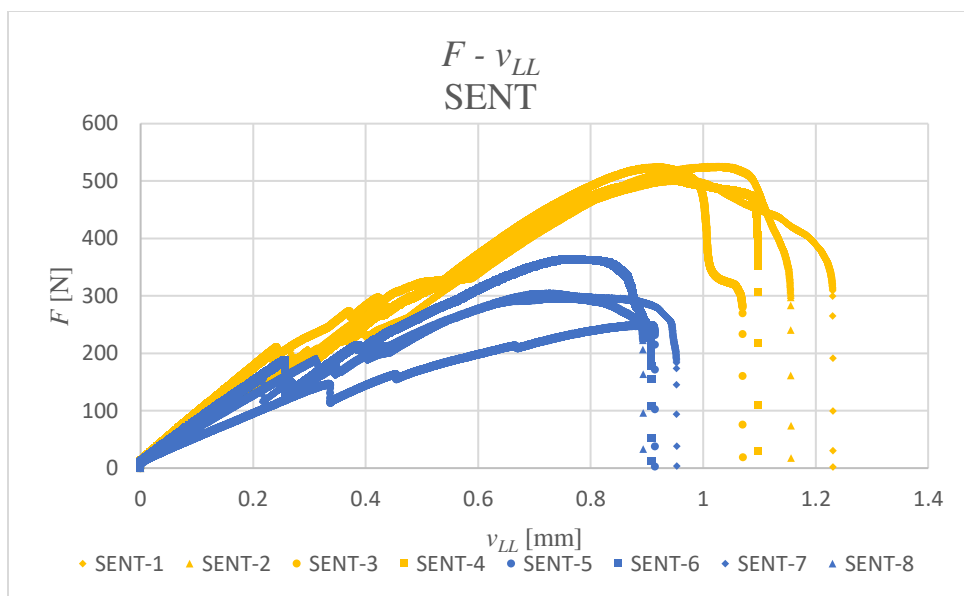
ARAMIS

gom
www.gom.com

Slika 4.8. Vrednosti ekvivalentne von Misesove deformacije za PRNT epruvete od materijala PA12.

Na osnovu dijagrama (b) na slici 4.8. možemo zaključiti da se najveće vrednosti ekvivalentne von Misesove deformacije javljaju na mestu rasta prsline, bez indicija o nepravilnom rastu prsline s obzirom na način izrade epruveta, što potvrđuje i izgled dijagrama (a). Dijagram (a) na istoj slici ukazuje na pojavu velikih vrednosti ekvivalentne von Misesove deformacije isključivo oko zone prsline, uključujući maksimalnu vrednost na samom vrhu.

Rezultati ispitanih SENT epruveta prikazani su na slici 4.9 i predstavljene su zavisnosti sile od pomeranja dobijene iz softvera mašine za ispitivanje.



Slika 4.9. Dijagram zavisnosti sile od pomeranja napadne tačke opterećenja za SENT epruvete.

Prikazane krive pokazuju nagle padove sile kao i nastavak rasta sile u nekoliko iteracija. Zbog prethodnog iskustva u ispitivanju PRNT epruveta koje su pokazale nepravilnosti prilikom otkaza pretpostavka je da se ovi padovi odnose na otkaze pojedinačnih vlakana unutar materijala.

Za istu grupu epruveta predstavljene su konačne vrednosti parametara $CMOD$ i $CTOD-\delta_5$, jer zbog krivosti materijala nije moguće uspostaviti dijagram zavisnosti sile od navedenih parametara.

Tabela 4.3. Maksimalne vrednosti parametara $CMOD$ i $CTOD-\delta_5$ za seriju SENT epruveta.

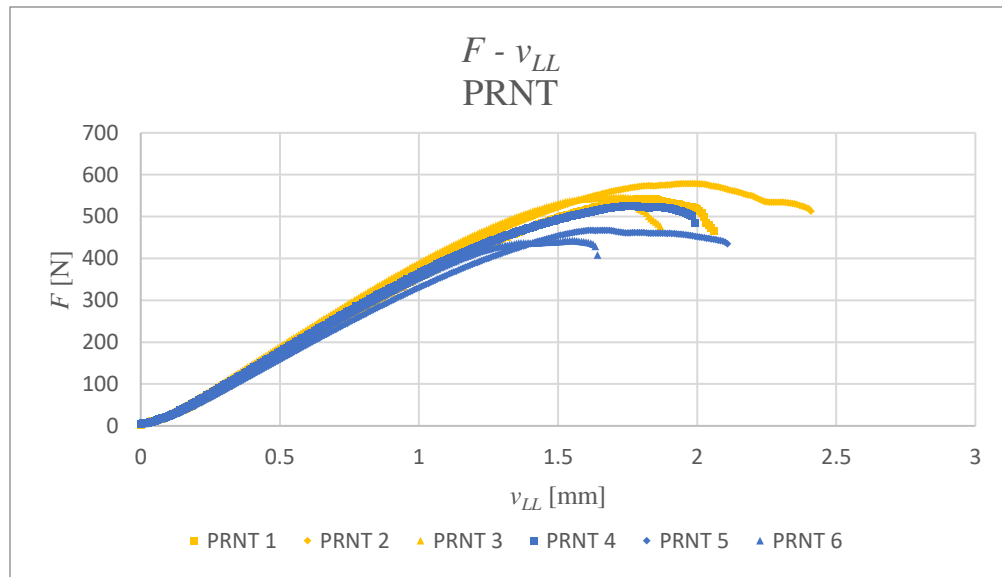
Epruvete	Max. $CMOD$ [mm]	Max. $CTOD-\delta_5$ [mm]
SENT-1	0.989	0.631
SENT-2	0.962	0.611
SENT-3	0.912	0.681
SENT-4	0.730	0.442
SENT-5	0.930	0.677
SENT-6	0.847	0.602
SENT-7	0.906	0.642
SENT-8	0.898	0.590

4.2. Rezultati ispitivanja epruveta PRNT i SENT od materijala PA12

Dimenzija žleba sa prslinom za epruvete PRNT 1-3 i SENT 1-3 je $a_0 = 3.2$ a za PRNT 4-6 i SENT 4-6 je $a_0 = 4.6$.

Epruvete PRNT i SENT su u toku ovog istraživanja ispitivane pod istim uslovima, a dobijeni rezultati daju informacije o merenjima sile, pomeranja, parametra $CMOD$, $CTOD-\delta_5$, kao i rasta prsline.

Na slici 4.10 prikazani su rezultati merenja sile u zavisnosti od pomeranja napadne tačke dejstva v_{LL} za PRNT epruvete dobijeni na Shimadzu mašini. Rezultati ukazuju na sličan trend porasta sile u odnosu na pomeranje.

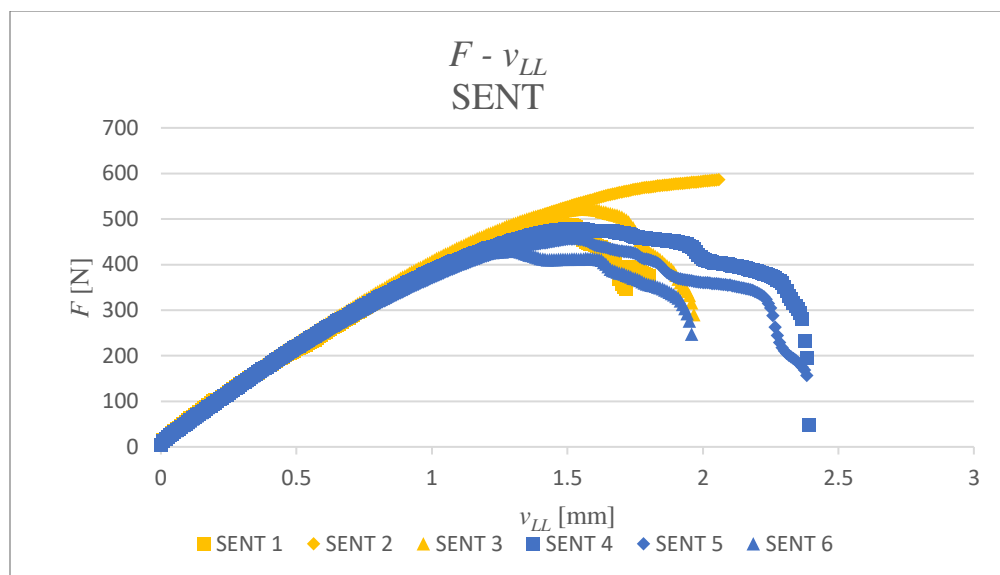


Slika 4.10. Dijagram zavisnosti sile od pomeranja napadne tačke dejstva opterećenja za epruvete iz serije PRNT1-6.

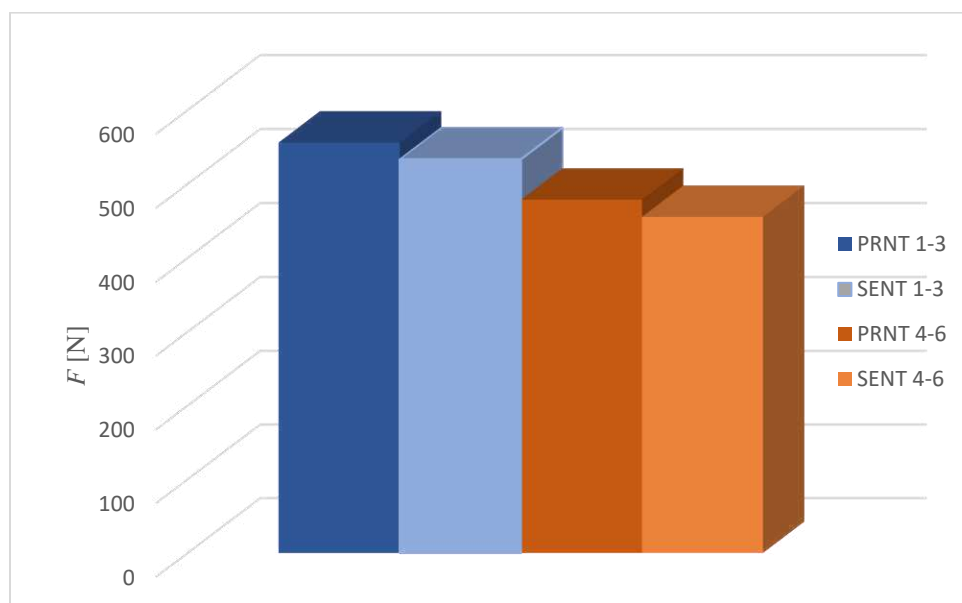
Na slici 4.11. prikazani su rezultati ispitivanja SENT epruveta.

Na slici 4.12 prikazane su maksimalne (usrednjene) vrednosti sila za tipove epruveta PRNT i SENT po serijama sa kraćim i dužim oštrim žlebom. Na dijagramu su prikazane vrednosti polovine maksimalnih vrednosti za epruvete PRNT, zbog geometrije epruveta, tj. kako bi rezultati bili poredivi. Na osnovu dobijenih rezultata vidi se jasna razlika u vrednostima između epruveta sa istom dužinom, ali se takođe vidi i uticaj geometrije epruveta. PRNT epruvete pokazuju veću otpornost prema lomu u odnosu na SENT epruvete, što bi se moglo pripisati geometriji.

Na slici 4.13 dat je prikaz izveštaja iz Aramis sistema (DIC) za merenja na PRNT epruvetama. Na izveštaju su prikazane sekcije - linije od 0 do 5, na kojima su praćena pomeranja u Y (vertikalnom) pravcu. U toku merenja praćene su i tačke u tri različite zone: *Stage point* 0, 1 i 2. Vrednosti parametara $CMOD$ i $CTOD-\delta_5$ praćene su korišćenjem opcije *Point-point distance*. $CMOD$ parametar je praćen na samoj ivici epruvete prateći pomeranja tačaka u vertikalnom pravcu dok je parametar $CTOD-\delta_5$ praćen na kraju prsline sa početnim rastojanjem od 5 mm iznad i ispod ravni prsline.



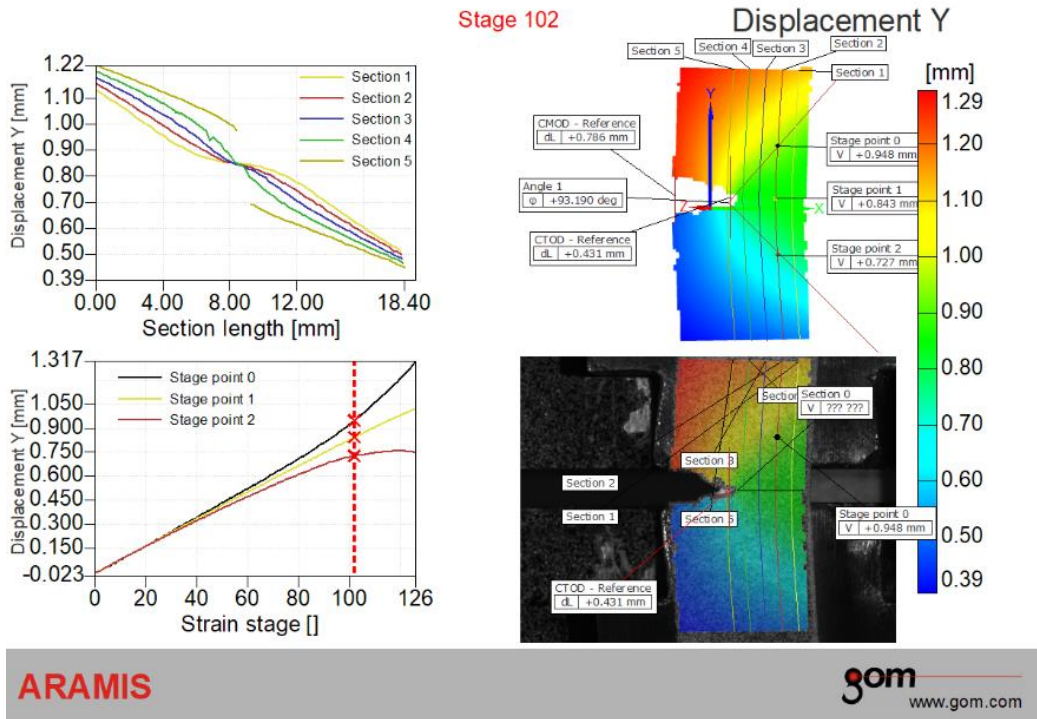
Slika 4.11. Dijagram zavisnosti sile od pomeranja napadne tačke dejstva opterećenja za epruvete iz serije SENT1-6.



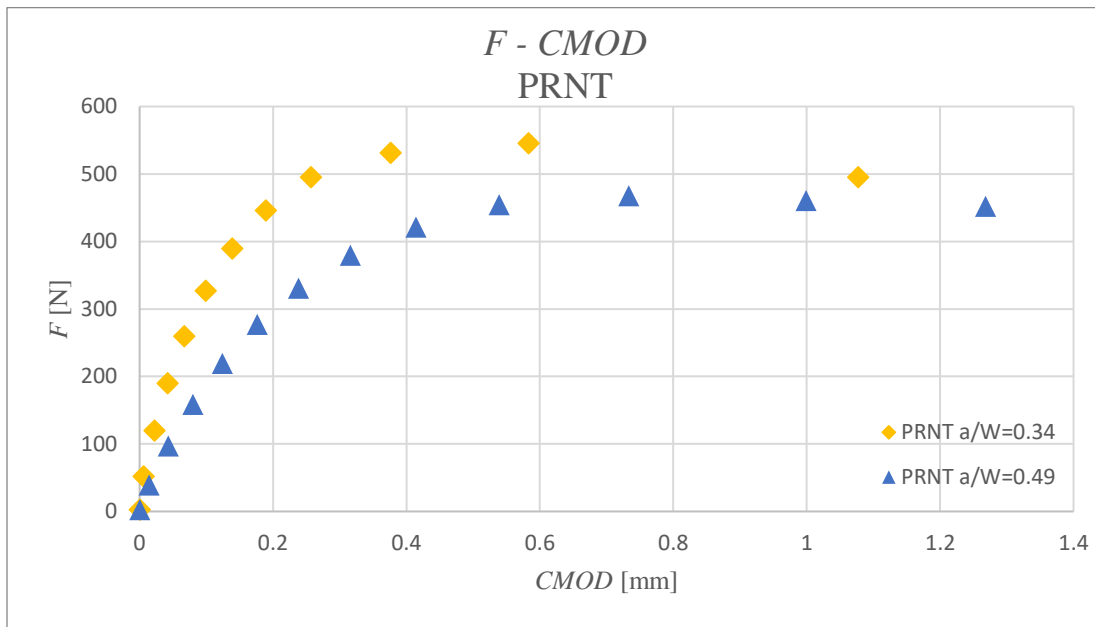
Slika 4.12. Usrednjene maksimalne vrednosti PRNT i SENT epruveta sa različitim dužinama oštrog žleba (1-3 manja dužina, 4-6 veća dužina).

Na slikama 4.14 i 4.15 uočava se jasna razlika u izmerenim vrednostima parametra $CMOD$ pri različitim vrednostima početne dužine koncentratora napona. Za epruvete sa većom dužinom koncentratora (oštrog žleba) dobijane su veće vrednosti parametra $CMOD$; ovakav trend je kod epruveta tipa SENT izraženiji. Razlika u maksimalnoj vrednosti parametra $CMOD$ je kod epruveta sa dužom prslinom veća približno 35%, dok je kod PRNT epruveta taj procenat niži i iznosi približno 15%.

Pored $CMOD$ meren je takođe i parametar $CTOD-\delta_5$, a razlike u vrednostima ovog parametra u zavisnosti od sile za reprezentativne PRNT epruvete date su na slici 4.16.



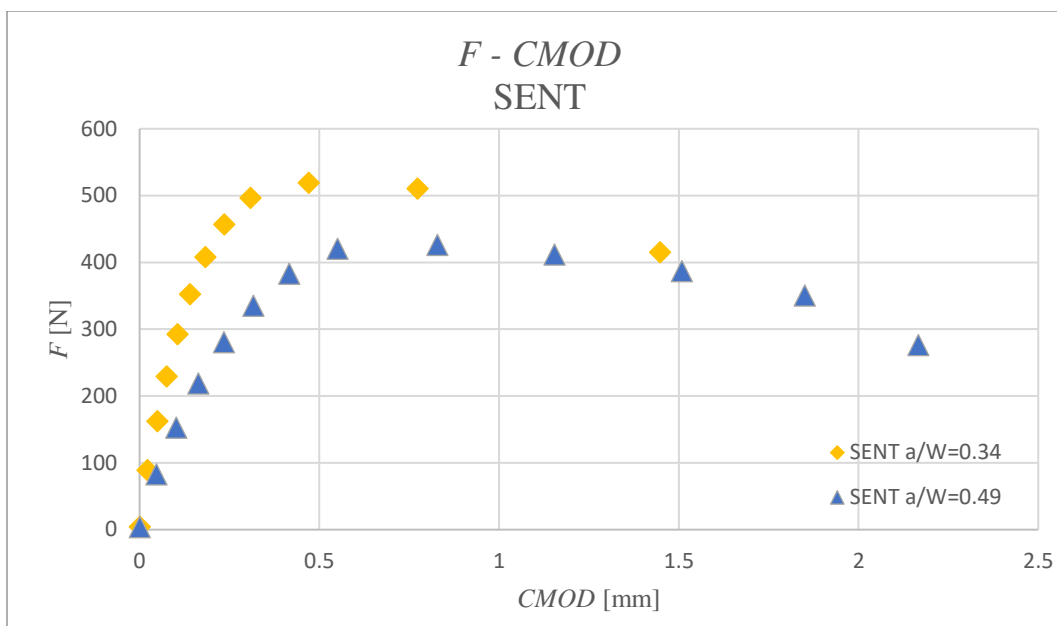
Slika 4.13. Izveštaj iz softvera sistema Aramis 2M; merenja na epruvetama PRNT 4-6.



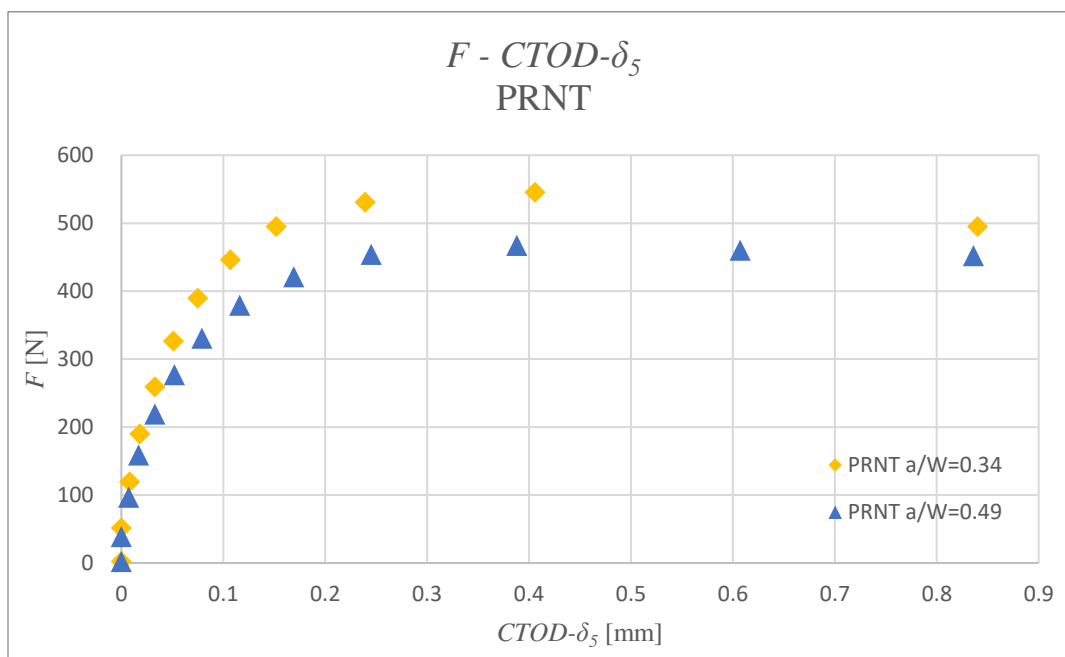
Slika 4.14. Zavisnosti sile od parametra CMOD za PRNT epruvete.

Na slici 4.14 date su vrednosti sile u zavisnosti od parametra *CMOD* za reprezentativne epruvete PRNT sa većom i manjom dužinom koncentrata napona.

Razlika u zavisnosti sile od parametra *CMOD* pri različitim vrednostima dužine početnog koncentrata napona za SENT tip epruveta prikazana je na slici 4.15.

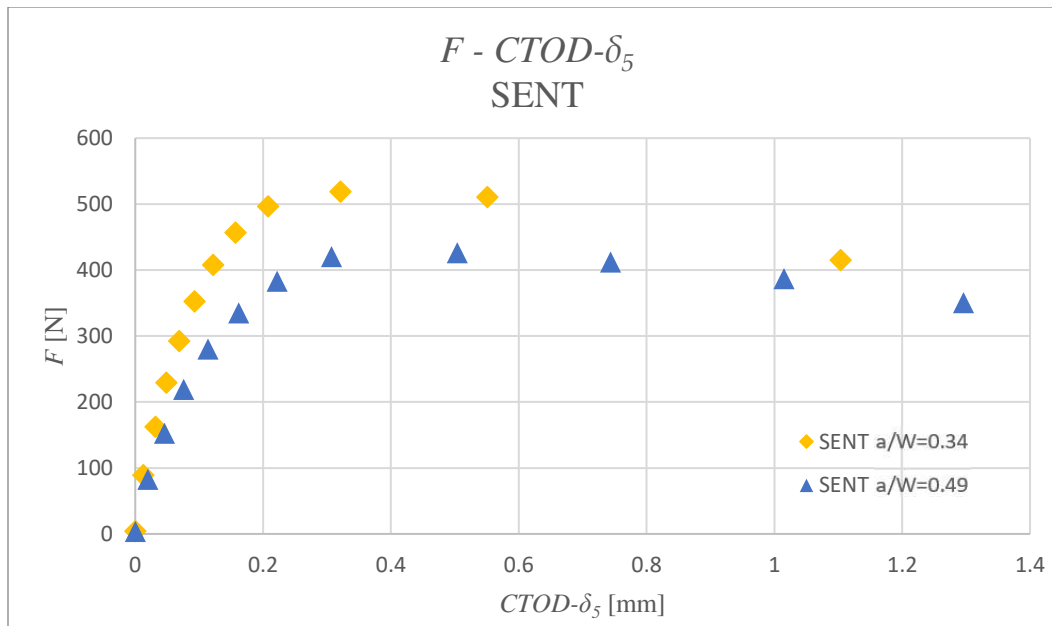


Slika 4.15. Zavisnosti sile od parametra $CMOD$ za SENT epruvete.



Slika 4.16. Zavisnosti sile od $CTOD-\delta_5$ za PRNT epruvete.

Na slici 4.17 prikazana je zavisnost sile od parametra $CTOD-\delta_5$ za SENT epruvete, za obe dužine početnog koncentratora napona.

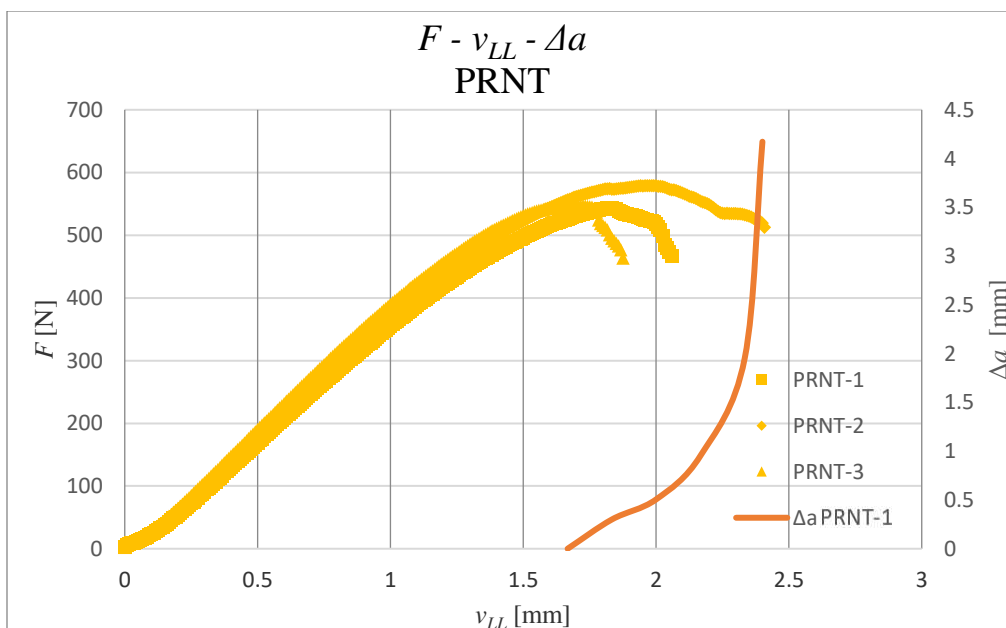


Slika 4.17. Zavisnosti sile od $CTOD-\delta_5$ za SENT epruvete.

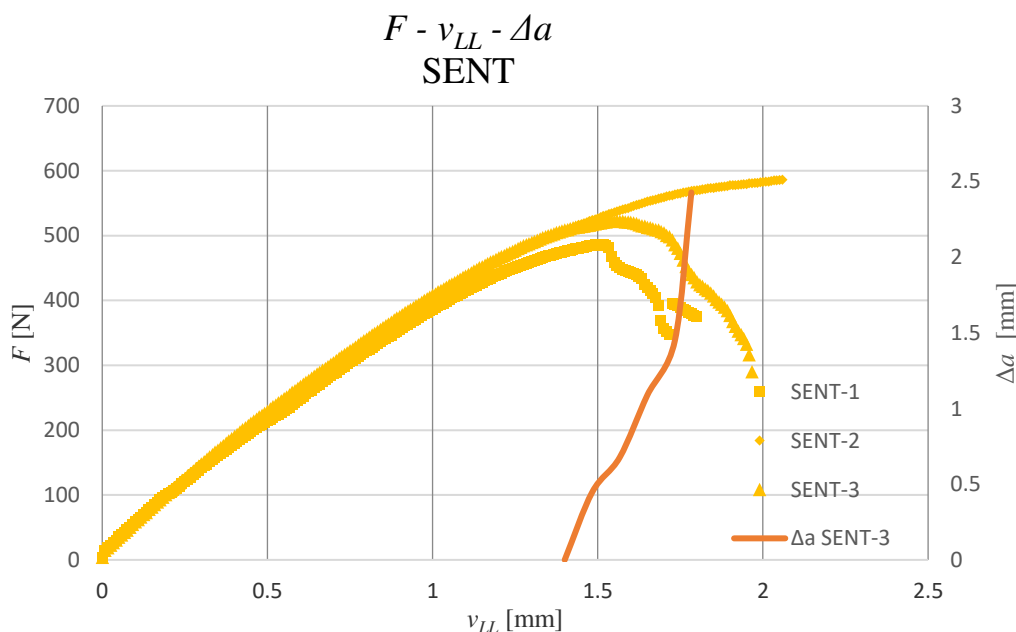
Razlika u vrednostima parametra $CTOD-\delta_5$ za različite dužine prsline na PRNT epruvetama pokazuje je ponovo manja u odnosu na SENT epruvete. Kod PRNT epruveta vrednosti ovog parametra su gotovo izjednačene, dok je kod SENT epruveta ta razlika približno 13%.

Određivanje rasta prsline vršeno je korišćenjem sistema Aramis i metode digitalne korelacije slika. Koristeći navedenu metodu dobijena je raspodela deformacija koja je korišćena za određivanje trenutnog vrha prsline, kao što je prethodno opisano u poglavlju Materijali i metode. Na osnovu dobijene raspodele deformacija izmeren je rast prsline za svaku PRNT i SENT epruvetu. Na slici 4.18 prikazane su krive zavisnosti sile od pomeranja napadne tačke dejstva opterećenja, kao i rast prsline kroz epruvetu PRNT-3.

Svi primerci na slici 4.18 pokazuju određena pravila u ponašanju sa određenim razlikama u završnoj fazi, nakon vrednosti pomaka od 1.75 mm. Na dijagramu se jasno vidi da početak rasta prsline počinje neposredno pre dostizanja maksimalne vrednosti sile. Ponašanje SENT epruveta slično je ponašanju PRNT epruveta, sa nešto nižim vrednostima pomeranja napadne tačke dejstva opterećenja prilikom kojih se dostižu maksimalne vrednosti sile i kod kojih neposredno pred taj događaj počinje rast prsline (slika 4.19).



Slika 4.18. Zavisnost sile od pomeranja napadne tačke dejstva opterećenja i rast prsline za PRNT epruvete ($a_0/W = 0.34$).



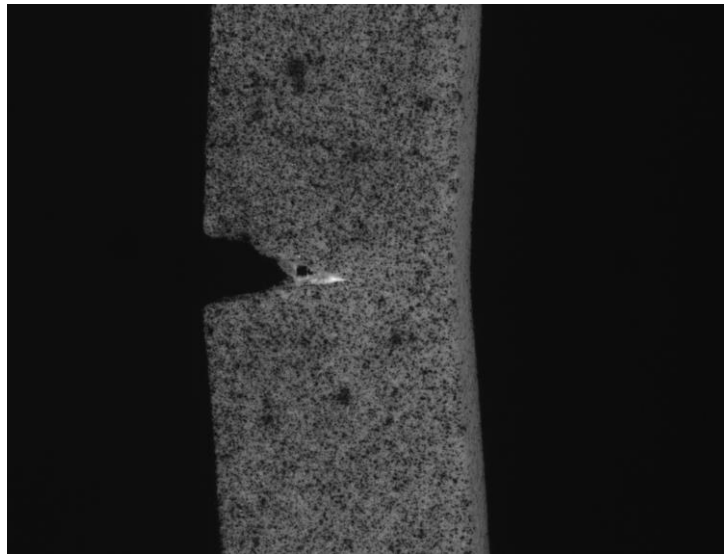
Slika 4.19. Zavisnosti sile od pomeranja napadne tačke dejstva opterećenja i rast prsline za SENT epruvete ($a_0/W = 0.34$)

Na slici 4.20 i 4.21 prikazane su slike nakon 200 s (*Stage 100* u softveru Aramis) od početka ispitivanja za PRNT i SENT epruvete (iz serije PRNT i SENT 4-6). Vrednost pomeranja napadne tačke dejstva opterećenja mereno na uređaju Shimadzu za ove dve epruvete je 1.66 mm. Dobijene vrednosti opterećenja za ove dve epruvete su 467 N za PRNT i 387 N za SENT. Pri ovim vrednostima opterećenja, vrednosti dužine prsline, odnosno njenog rasta, se za ova dva tipa epruvete razlikuju. Za PRNT epruvetu, promena dužine prsline u datom trenutku iznosi 0.35 mm

dok za SENT epruvetu iznosi 1.49 mm. Pored rasta prsline postoji i razlika u vrednostima parametra $CTOD-\delta_5$ koji je u ovom slučaju 2.5 puta veći kod SENT epruvete.

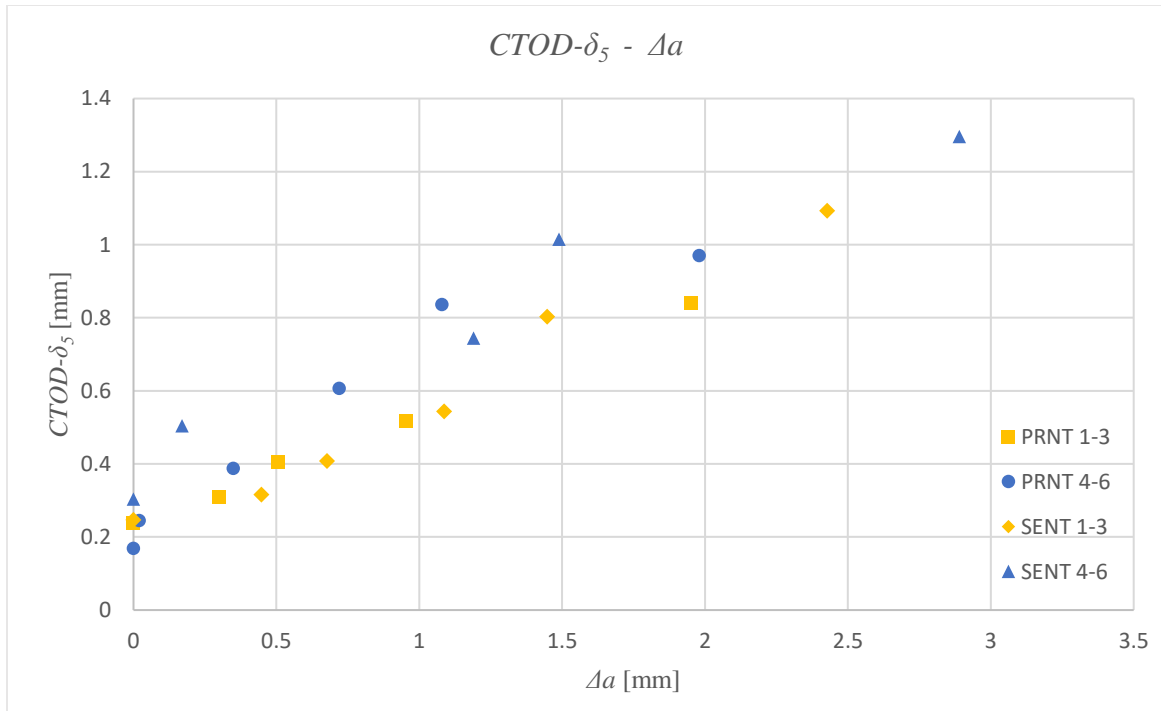


Slika 4.20. Fotografija ispitivanja PRNT epruvete (serija PRNT 4-6) nakon 200s.



Slika 4.21. Fotografija ispitivanja SENT epruvete (serija SENT 4-6) nakon 200s.

Eksperimentalno određene vrednosti parametara $CTOD-\delta_5$ i Δa poslužile su za formiranje krivih otpornosti prema rastu prsline za sve geometrije (slika 4.23).

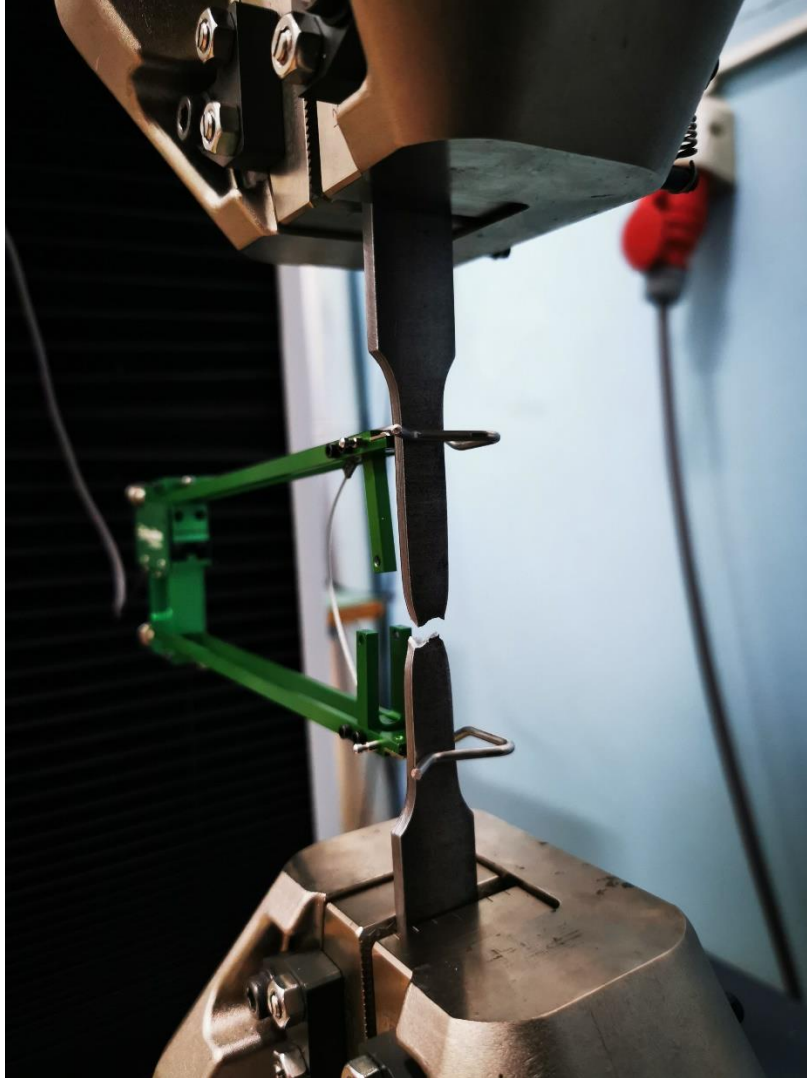


Slika 4.23. Dijagram zavisnosti $CTOD-\delta_5$ od Δa za PRNT i SENT epruvete (reprezentativni uzorci).

Odnos vrednosti sila, pomeranja kao i parametara $CMOD$ u prvom trenutku pokazali su nešto veća odstupanja od očekivanog, ali su krive otpornosti prema rastu prsline za obe geometrije i oba odnosa a_0/W pokazale slično ponašanje pri lomu. Relativno uski pojas krivih rasta ukazuje da se krive rasta za PRNT epruvete ne razlikuju u velikoj meri od krivih rasta SENT epruveta.

4.3. Rezultati ispitivanja standardnih, RHTT i RHNT epruveta izrađenih sečenjem iz čeličnih cevi

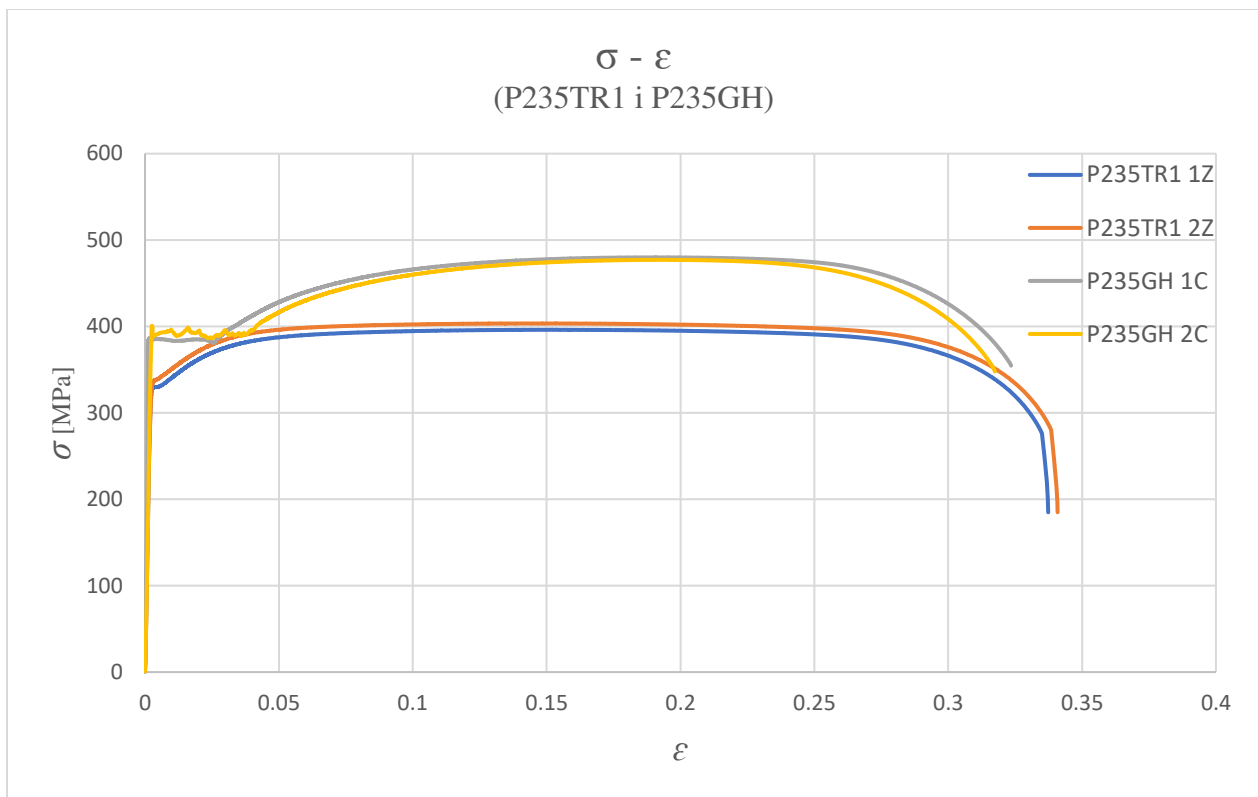
Kao što je navedeno u prethodnom poglavlju, ispitane su standardne epruvete za zatezanje - po dve epruvete izrađene od materijala P235TR1 (šavna cev – osnovni materijal) i P235GH (bešavna cev), slika 4.24. Na slici je prikazan izgled epruvete nakon otkaza – vidi se izražen vrat na mestu loma, što ukazuje na izraženo plastično deformisanje materijala.



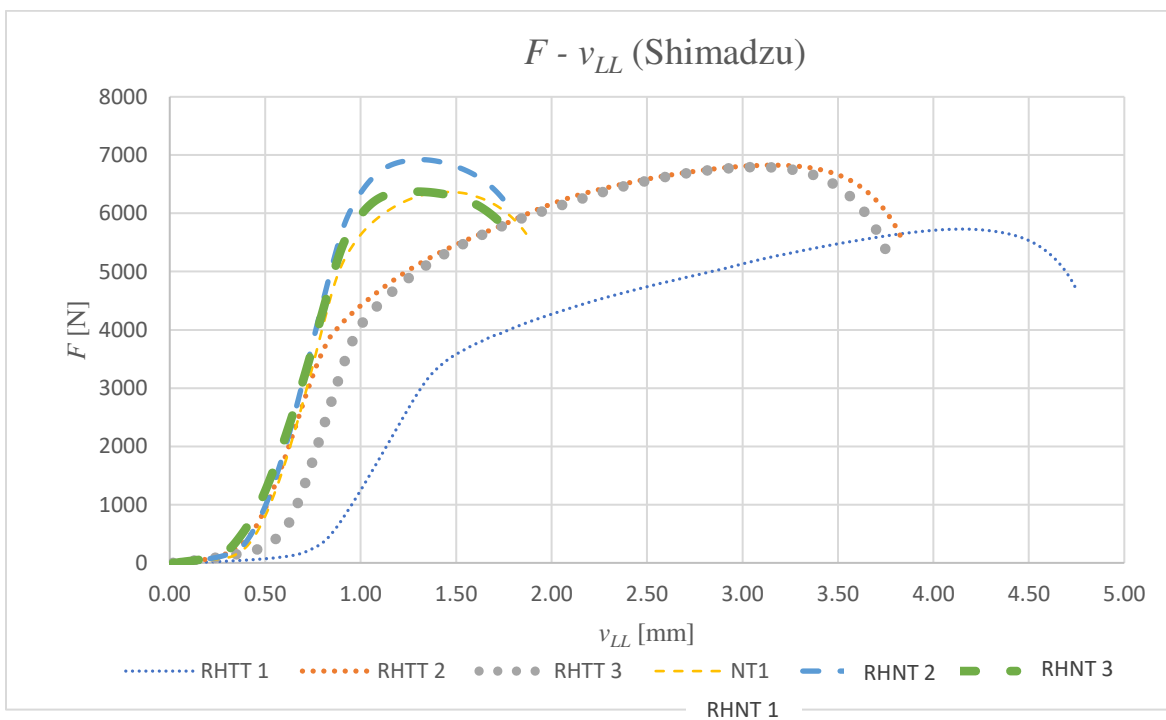
Slika 4.24. Ispitivanje standardne epruvete na zatezanje - materijal P235TR1.

Ispitivanjem epruveta dobijene su krive napon-deformacija za oba materijala (slika 4.25). Oba materijala imaju znatno više vrednosti granice tečenja u poređenju sa zahtevima standarda (235 MPa za razmatrane debljine cevi). Materijal bešavne cevi (P235GH) ima znatno višu granicu tečenja i zateznu čvrstoću od materijala šavne cevi, a izduženje pri lomu im je slično i ukazuje na izraženo plastično ponašanje, što je u skladu sa izgledom vrata na epruveti koji se vidi na slici 4.24.

Ispitivanjem epruveta tipa RHHT i RHNT dobijene su vrednosti sila u zavisnosti od pomeranja napadne tačke dejstva opterećenja. Vrednosti za obe geometrije su dobijene učitavanjem iz softvera mašine Shimadzu (slika 4.26).



Slika 4.25. Kriva napon-deformacija materijala P235TR1 i P235GH.



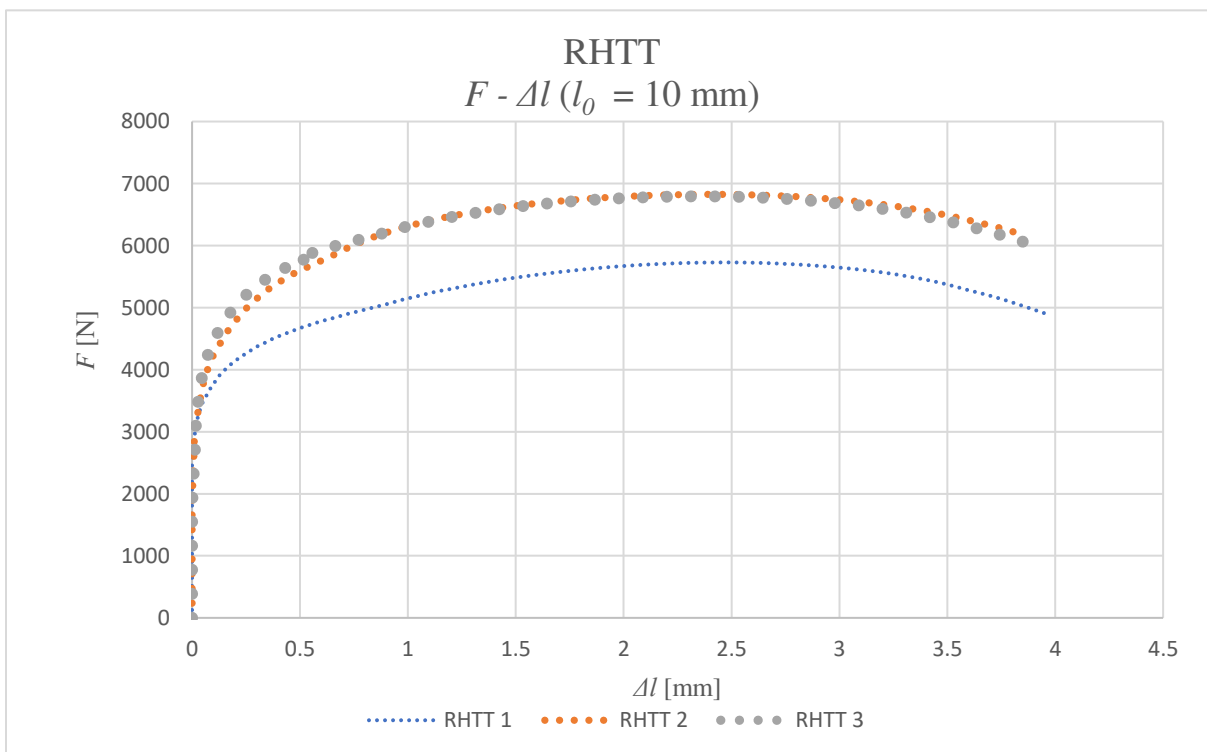
Slika 4.26. Dijagram zavisnosti sile od pomeranja napadne tačke dejstva opterećenja za epruvete RHTT i RHNT od materijala P235TR1.

Na slici 4.26 uočena je razlika u vrednostima sile i pomeranja napadne tačke dejstva opterećenja

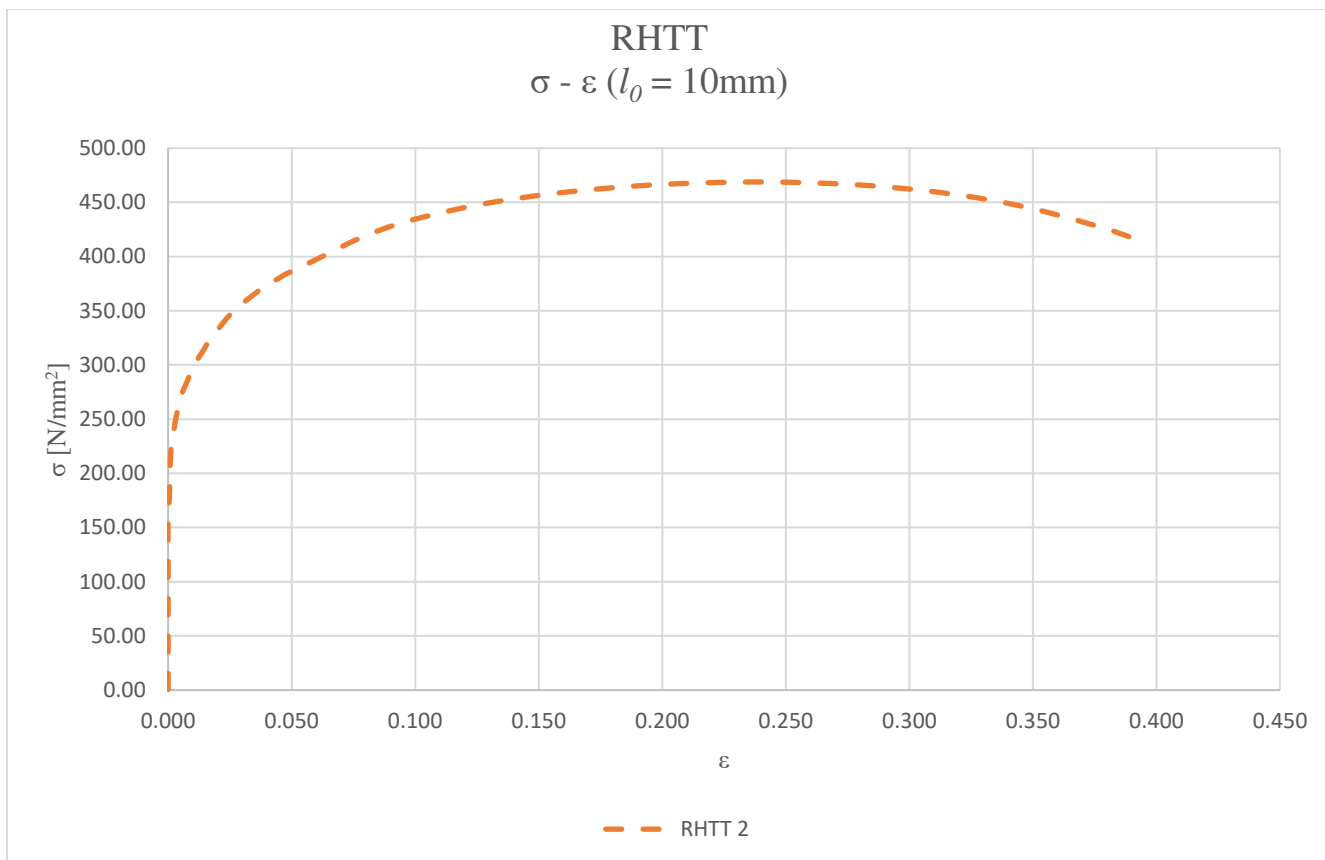
kod epruvete RHTT 1. Vrednosti sile i pomeranja su kod epruveta RHTT 2 i RHTT 3 približno jednake bez značajnog odstupanja. Vrednost maksimalne sile je za epruvetu RHTT 1 (šav u zoni otkaza materijala) u odnosu na RHTT 2 **manja za 16%** dok je maksimalna vrednost pomeranja napadne tačke dejstva opterećenja **veća za 19.3%**. Prosečna maksimalna vrednost sile za ovaj tip epruveta iznosila je približno **7000 N** pri vrednosti standardne devijacije od približno **17%** dok je prosečna vrednost pomeranja za ovaj tip epruveta iznosila **4.12 mm** pri vrednosti standardne devijacije od **13.5%**.

Tri epruvete RHNT su pokazale približno istu prirodu ponašanja. Prosečna maksimalna vrednost sile izmerena na mašini za ispitivanje iznosi **6553.5 N** pri vrednosti standardne devijacije od približno **5%**. Prosečna maksimalna vrednost pomeranja za ovaj tip epruveta iznosi **1.82 mm** pri standardnoj devijaciji manjoj od **1%**.

Praćenje pomeranja je vršeno takođe i korišćenjem sistema softvera sistema Aramis, gde je zadavanjem tačaka po sredini epruvete na početnom rastojanju $l_0=10$ mm (slika 4.27).



Slika 4.27. Dijagram zavisnosti sile od promene početne dužine L (merne dužine) RHTT materijala P235TR1 (vrednosti pomeranja dobijene pomoću Aramis sistema).



Slika 4.28. Dijagram zavisnosti nominalnog napona od nominalne deformacije za epruvetu RHTT 2.

Dijagrami sa slika 4.28 i 4.25 pokazuju približno istu prirodu ponašanja standardnih epruveta za zatezanje i epruveta oblika prstena kada se poredi izduženje pri lomu (koje je iznad 0.3 za obe epruvete). Vrednosti granice tečenja ($R_{p0.2}$) i zatezne čvrstoće (R_m), prikazane u tabeli 4.4, pokazuju značajne razlike između dve vrste epruveta i vrednosti dobijene ispitivanjem RHTT epruveta su znatno manje, mada zadovoljavaju minimalni zahtev standarda (min. 235 MPa). Ovo ukazuje na anizotropiju materijala, pri čemu je čvrstoća viša u uzdužnom pravcu. Međutim, treba imati u vidu i razliku u geometriji epruveta, tako da se ne može smatrati da je anizotropija isključivi razlog za navedene razlike.

Tabela 4.4. Vrednosti granice tečenja ($R_{p0.2}$) i zatezne čvrstoće (R_m) za epruvete P235TR1 2Z i RHTT 2.

Epruveta	$R_{p0.2}$ [MPa]	R_m [MPa]
P235TR1 2Z	330	403
RHTT 2	254	468

Usrednjena maksimalna vrednost pomeranja izmerena Aramis sistemom na epruvetama tipa RHTT iznosi približno **3.75 mm**. Za epruvete tipa RHNT usrednjena vrednost pomeranja iznosi **1.80 mm**. Prosečna vrednost maksimalne sile za ova dva tipa epruveta je **6500 N**. Ovi podaci ukazuju na znatno veću deformaciju epruveta RHTT u odnosu na RHNT, što je i očekivano zbog koncentatora napona oblika žleba.

4.4. Rezultati ispitivanja epruveta PRNT od P235TR1 i P235GH materijala

Nastavak definisanja nestandardne procedure za određivanje integriteta cevovoda podrazumeva je ispitivanje metalnih epruveta dobijenih od toplovaljanih cevi koje imaju primenu u opremi pod pritiskom na sobnim i povišenim temperaturama. U pitanju su šavne cevi tipa P235 TR1 (EN 10216 / DIN 1629/1630 / St 37.0 / ASTM A53 Gr.A/ JIS 12A) i bešavne tipa P235 GH (EN 10216-2 P235GH / DIN 17175 / St 35.8 / ASTM A285 Klasa C / JIS SB410).

Epruvete za ispitivanje pripremane su na dva načina:

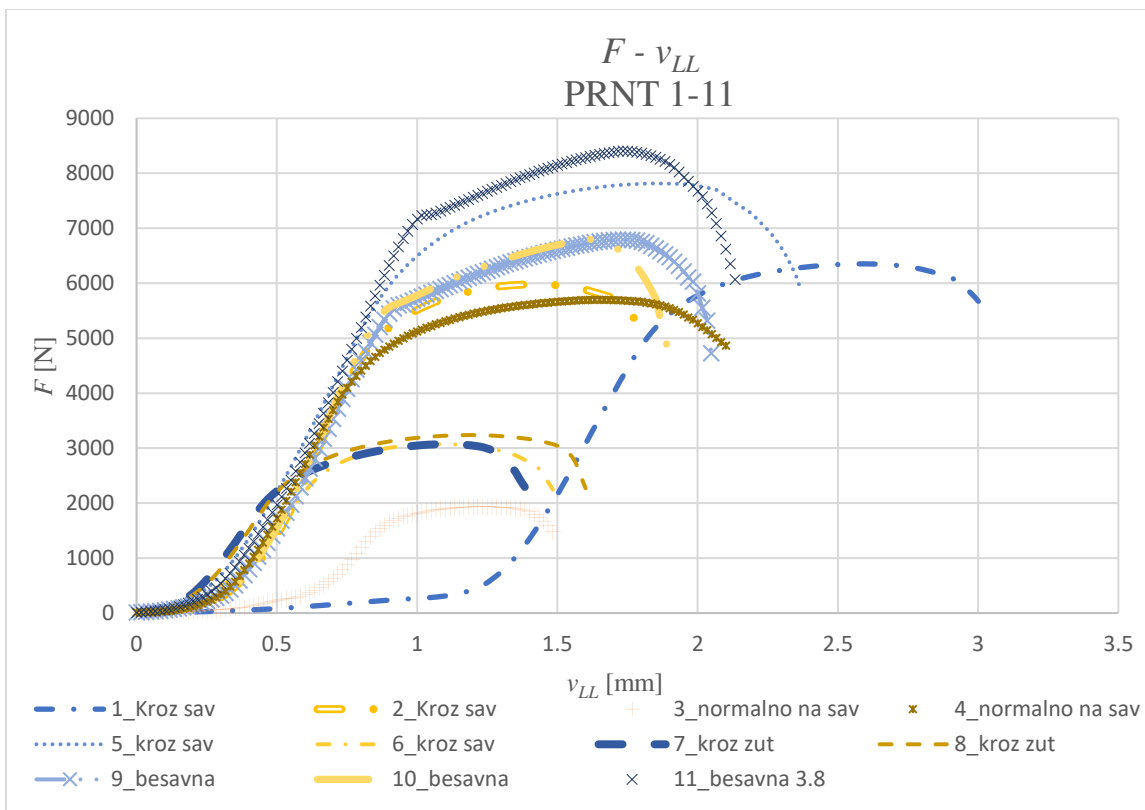
- Isecanjem oštrog žleba korišćenjem lasera (širina žleba 0.35 mm)
- Isecanjem oštrog žleba korišćenjem erozimata (širina žleba 0.25 mm)

Za obe grupe epruveta korišćeno je više odnosa a_0/W (a_0 – početna dužina oštrog žleba, W – širina epruvete), razlika između epruveta isečenih na ova dva načina je u broju nanetih koncentratora napona. Epruvete dobijene isecanjem na laseru poseduju jedan oštar žleb, dok epruvete dobijene isecanjem na erozimatima poseduju dva oštra žleba.

U tabeli 3.8 iz poglavlja Materijali i metode prikazane su dimenzije pripremljenih epruveta, pri čemu su se javila očekivana odstupanja nastala uglavnom zbog preciznosti mašina na kojima su epruvete pripremane. Ova odstupanja će kao takva biti prihvaćena i svi dalji proračuni će uzimati u obzir izmerene vrednosti dimenzija epruveta.

Nakon karakterizacije materijala ispitivane su epruvete tipa PRNT sa jednim i dva koncentratora napona (oštra žleba), prilikom čega su merene vrednosti sile i pomeranja napadne tačke dejstva opterećenja sa mašine za ispitivanje, kao i vrednosti $CMOD$ i $CTOD-\delta_5$ korišćenjem Aramis 2M sistema.

Vrednosti sile u zavisnosti od pomeranja napadne tačke dejstva opterećenja za ispitivane epruvete sa dva žleba date su na slici 4.29; vrednosti su dobijene iz softvera mašine za ispitivanje.



Slika 4.29. Zavisnost sile od pomeranja napadne tačke dejstva opterećenja za epruvete PRNT sa dva žleba.

Epruveta 1 ($a_0/W = 0.50$) i epruveta 2 ($a_0/W = 0.51$) pokazale su približnu prirodu ponašanja uz maksimalne vrednosti sile od **6352 N** i **5978 N** kao i maksimalne vrednosti pomeranja od **3.00 mm** i **1.82 mm**. Razlika u vrednosti pomeranja jasno se može uočiti na slici 4.29 koja potvrđuje gotovo ceo jedan milimetar sporog odziva materijala na zatezanje, što pripisujemo stabilizaciji epruveta usled nedovoljno pribijenog D-bloka uz unutrašnje zidove epruveta.

Epruveta 3 usled neprecizne izrade poseduje veći žleb od planiranog i on čini odnos a_0 i W većim (0.85). Bez obzira na neplaniranu vrednost odnosa a_0 i W epruveta je ispitana. Maksimalna vrednost sile za ovu epruvetu iznosila je **1933 N** a maksimalno pomeranje iznosilo je **1.48 mm**.

Epruveta 4 ($a_0/W = 0.51$) čiji je žleb nanet normalno na šav cevi ispitan je i izmerena je maksimalna vrednost sile od **5697 N**.

Epruvete 5 i 6 dobijene su nanošenjem žleba na mestu šava. Za epruvetu 5 maksimalna izmerena vrednost sile je **7814 N** pri maksimalnom pomeranju od **2.37 mm** za odnos $a_0/W = 0.36$. Za epruvetu 6 izmerena maksimalna sila iznosila **3072 N** dok je izmereno maksimalno pomeranje **1.48 mm** pri čemu je $a_0/W = 0.52$.

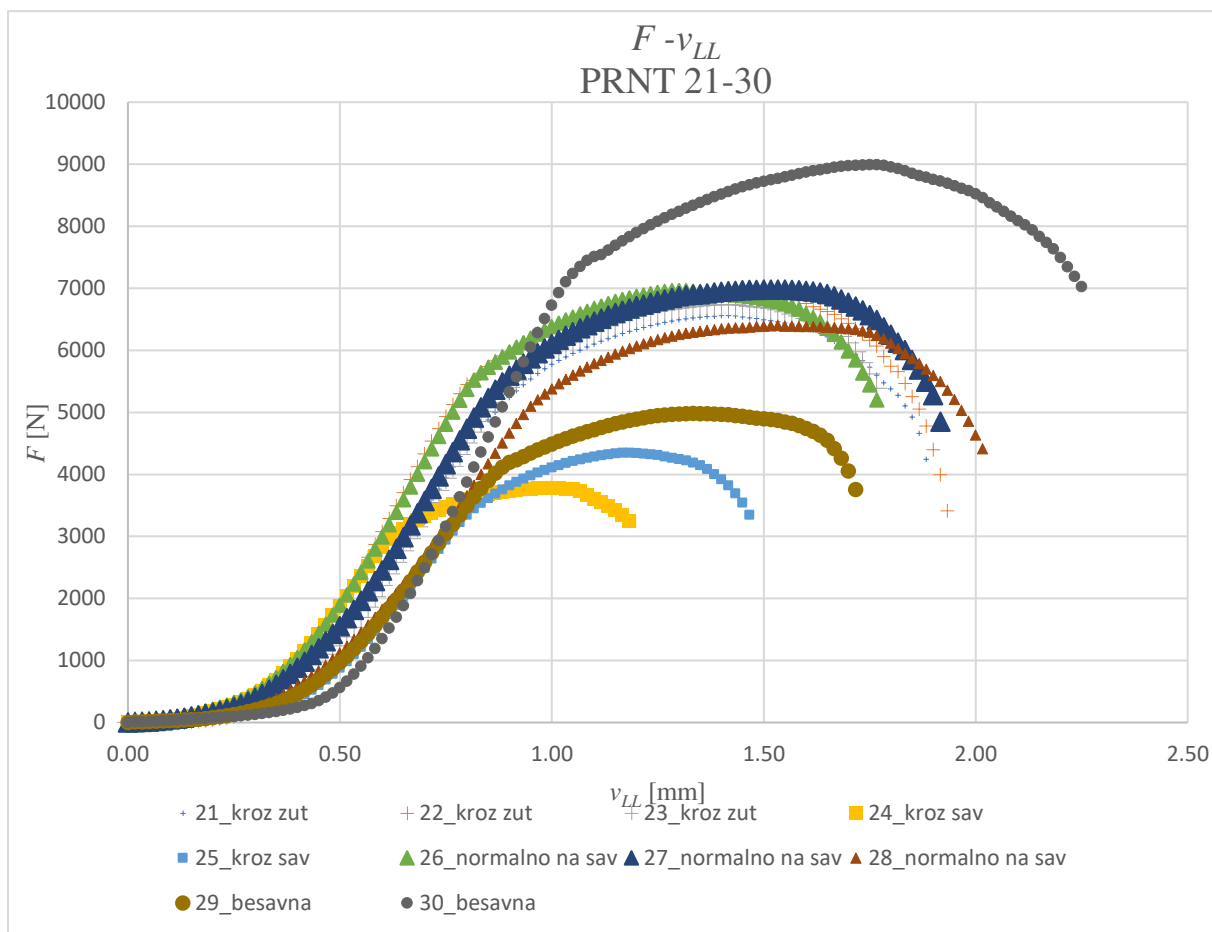
Ispitivane epruvete 7 i 8, čiji je odnos a_0/W 0.50 i 0.51 (žleb u oblasti zone uticaja toplote) dobijene su približne maksimalne vrednosti sile. Za epruvetu 7 maksimalna vrednost sile iznosi **3071 N** i izmereno pomeranje **1.38 mm** dok je za epruvetu 8 maksimalna izmerena sila **3238 N** a maksimalno pomeranje **1.60 mm**.

Epruvete 9 i 10 predstavljaju grupu epruveta dobijenih iz bešavnih cevi sa odnosom dužine žleba

i širine epruvete $a_0/W = 0.51$, sa maksimalnim vrednostima sile od **6792 N** i **6799 N**. Za iste epruvete dobijene su i približne vrednosti pomeranja; za epruvetu 9 vrednost pomeranja je **2.05 mm**, dok je za epruvetu 10 vrednost pomeranja **1.90 mm**.

Epruveta 11 pokazala je prirodu ponašanja sličnu kao i epruvete 9 i 10, s tim što je zbog smanjene vrednosti odnosa dužine prsline i širine epruvete ($a_0/W = 0.35$) očekivano povećana vrednost maksimalne izmerene sile i ona iznosi **8408 N** dok maksimalna vrednost pomeranja iznosi **2.13 mm**.

Na slici 4.30 prikazane su vrednosti sile i pomeranja napadne tačke dejstva opterećenja dobijenih ispitivanjem PRNT epruveta sa jednim žlebom.



Slika 4.30. Dijagram zavisnosti sile od pomeranja napadne tačke dejstva opterećenja za PRNT epruvete sa jednim žlebom.

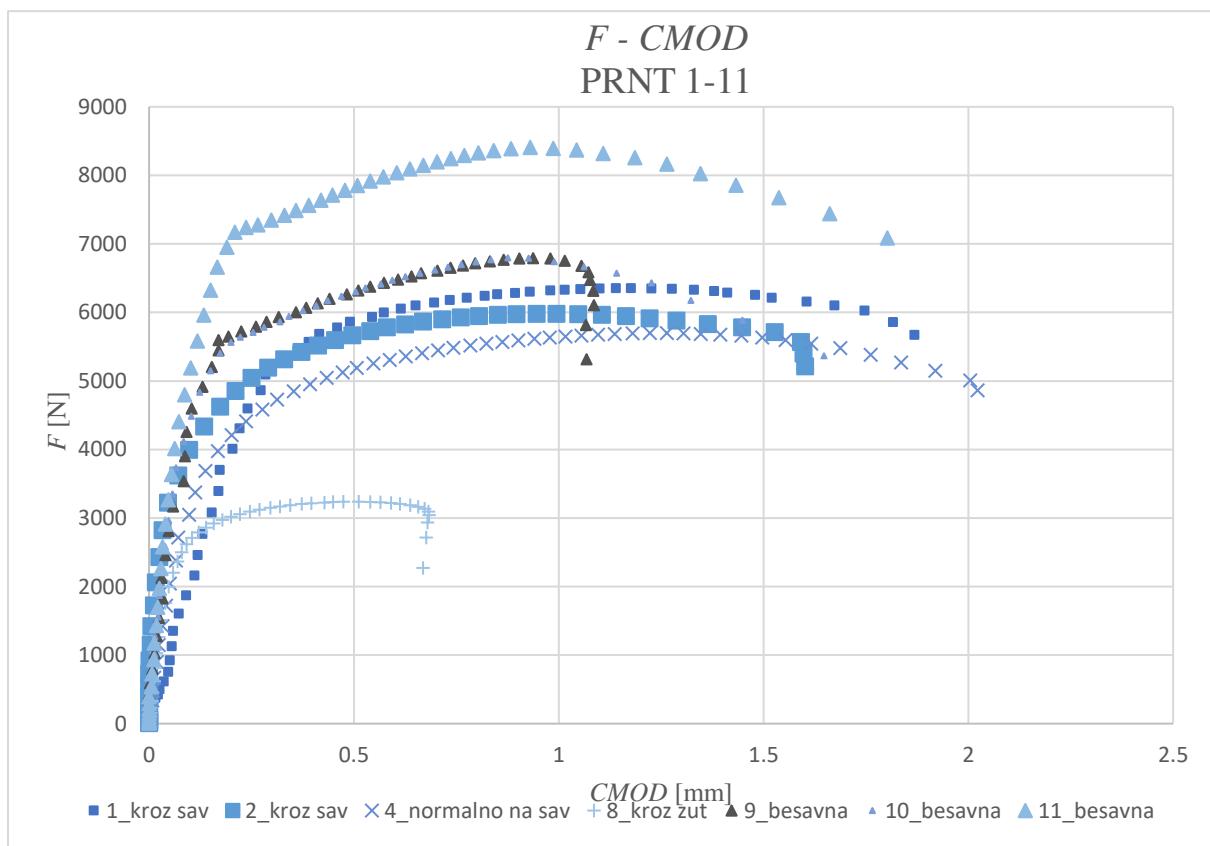
Epruvete 21 22 i 23 izrađene su tako da im je odnos a_0 i W 0.52 / 0.53 / 0.52. Maksimalna srednja vrednost izmerene sile iznosi **6753 N** (standardna devijacija 3%), maksimalna srednja vrednost izmerenog pomeranja **1.86 mm** (standardna devijacija 4.59%).

Epruvete 24 i 25 izrađene su tako da im je odnos a_0 i W 0.58 i 0.52. Za epruvetu 24 izmerena maksimalna sila iznosi **3781 N**, vrednost maksimalnog pomeranja **1.18 mm**. Za epruvetu 25 izmerena maksimalna sila iznosi **4347 N**, vrednost maksimalnog pomeranja **1.47 mm**.

Na epruvete 26, 27 i 28 nanet je žleb u predelu epruvete normalno na šav u odnosu dužine žleba i širine epruvete 0.53/ 0.53/ 0.54. Imajući u vidu da je razlika u odnosu a_0/W , možemo smatrati da se maksimalne vrednosti sile i pomeranja mogu usrednjiti. Usrednjena maksimalna vrednost sile za epruvete 26, 27 i 28 iznosi **6781 N** (4.9% standardna devijacija) pri čemu su vrednosti sile za epruvete 26 i 27 minimalno različite dok je vrednost maksimalne sile za epruvetu 28 približno 10% manja. Usrednjena vrednost maksimalnog pomeranja za ove tri epruvete iznosi **1.90 mm** (6.6 standardna devijacija).

Epruvete 29 i 30 izrađene od bešavnih cevi imaju odnos $a_0/W = 0.28$ i 0.37 . Vrednost maksimalne sile izmerene ispitivanjem epruveta 29 je **4981 N** pri maksimalnoj vrednosti pomeranja od **1.72 mm**. Ispitivanjem epruvete 30 dobijena je maksimalna vrednost sile od **8993 N** a pomeranja **2.25 mm**.

Pored praćenja zavisnosti sile od pomeranja, korišćenjem Aramis sistema, praćena je i zavisnost od parametara $CMOD$ i $CTOD-\delta_5$. Na slici 4.31 prikazane su zavisnosti sile od $CMOD$, dok su na slici 4.32 prikazane vrednosti sile u zavisnosti od $CTOD-\delta_5$.



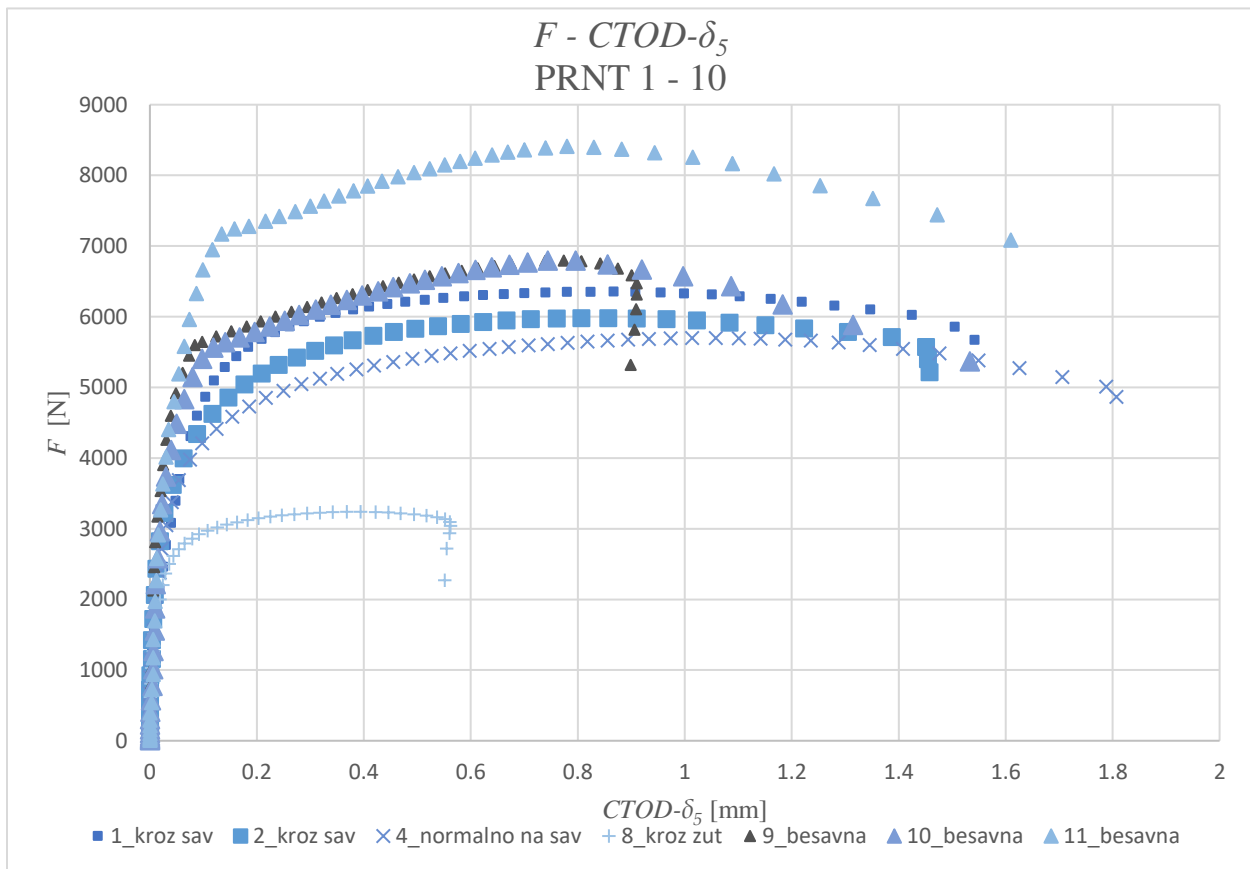
Slika 4.31. Dijagram zavisnosti sile od parametra $CMOD$ za PRNT epruvete sa dva oštra žleba.

U tabeli 4.5 prikazane su maksimalne vrednosti parametra $CMOD$ u zavisnosti od pomeranja napadne tačke dejstva opterećenja za epruvete iz serije PRNT1-11 na kojima je mogla biti izmerena vrednost $CMOD$. Na epruvetama koje nisu prikazane došlo je do otkaza sa suprotne strane u odnosu na kamere Aramis 2M sistema.

Tabela 4.5. Vrednosti parametra $CMOD$ i v_{LL} za seriju epruveta PRNT1-11.

Epruveta	$CMOD$ [mm]	v_{LL} [mm]
PRNT-1	1.87	1.18
PRNT-2	1.60	0.95
PRNT-4	2.02	1.26
PRNT-8	0.68	0.51
PRNT-9 (otkaz na obe strane)	1.09	0.94
PRNT-10 (otkaz na obe strane)	1.65	0.88
PRNT-11	1.80	0.93

Na slici 4.32 prikazana je zavisnost sile od parametra $CTOD-\delta_5$ za epruvete iz serije PRNT1-11.



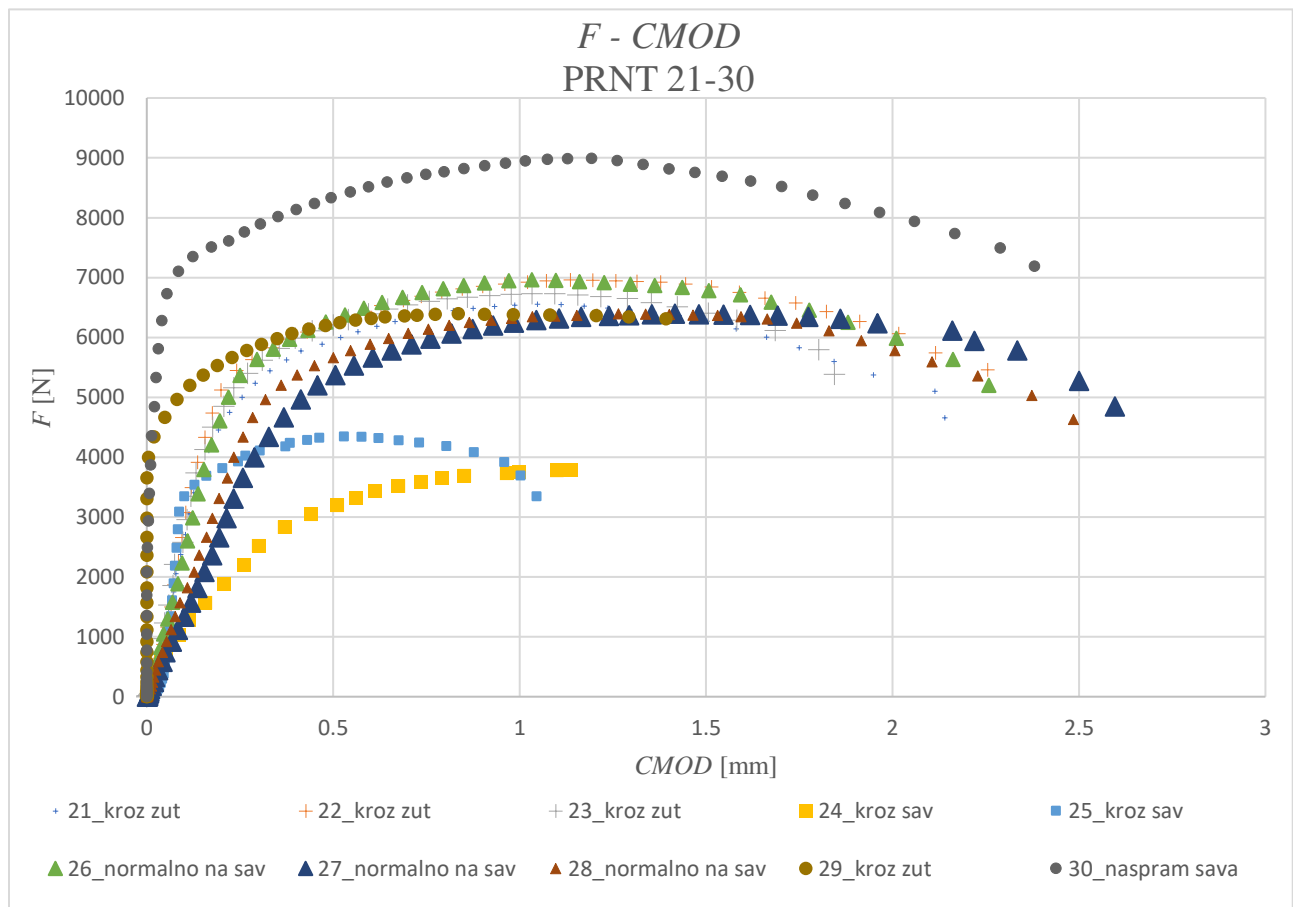
Slika 4.32. Dijagram zavisnosti sile od parametra $CTOD-\delta_5$ za PRNT epruvete sa dva oštra žleba.

U tabeli 4.6 prikazani su rezultati izmerenih vrednosti parametra $CTOD-\delta_5$ u zavisnosti od pomeranja napadne tačke dejstva opterećenja. Vrednosti su izmerene sa jedne strane epruvete i prikazane su samo one gde je došlo do otkaza materijala na strani epruvete sa koje je snimano Aramis 2M sistemom.

Tabela 4.6 Vrednosti parametra $CTOD-\delta_5$ i v_{LL} za seriju epruveta PRNT1-11

Epruveta	$CTOD-\delta_5$ [mm]	v_{LL} [mm]
PRNT-1	1.54	0.87
PRNT-2	1.46	0.81
PRNT-4	1.81	1.06
PRNT-8	0.56	0.39
PRNT-9 (otkaz na obe strane)	0.91	0.77
PRNT-10 (otkaz na obe strane)	1.53	0.74
PRNT-11	1.61	0.78

Priroda ponašanja PRNT epruveta sa dva oštra žleba je bez obzira na širinu epruvete veoma slična, bez većih odstupanja, što možemo uvideti na osnovu dobijenih rezultata. Ispitivanje PRNT epruveta serije 21-30 rađeno je prema istoj proceduri i u istim uslovima. Vrednosti sile u zavisnosti od $CMOD$ prikazane su na slici 4.33, dok su za maksimalne vrednosti $CMOD$ prikazane vrednosti pomeranja napadne tačke dejstva opterećenja u tabeli 4.7.

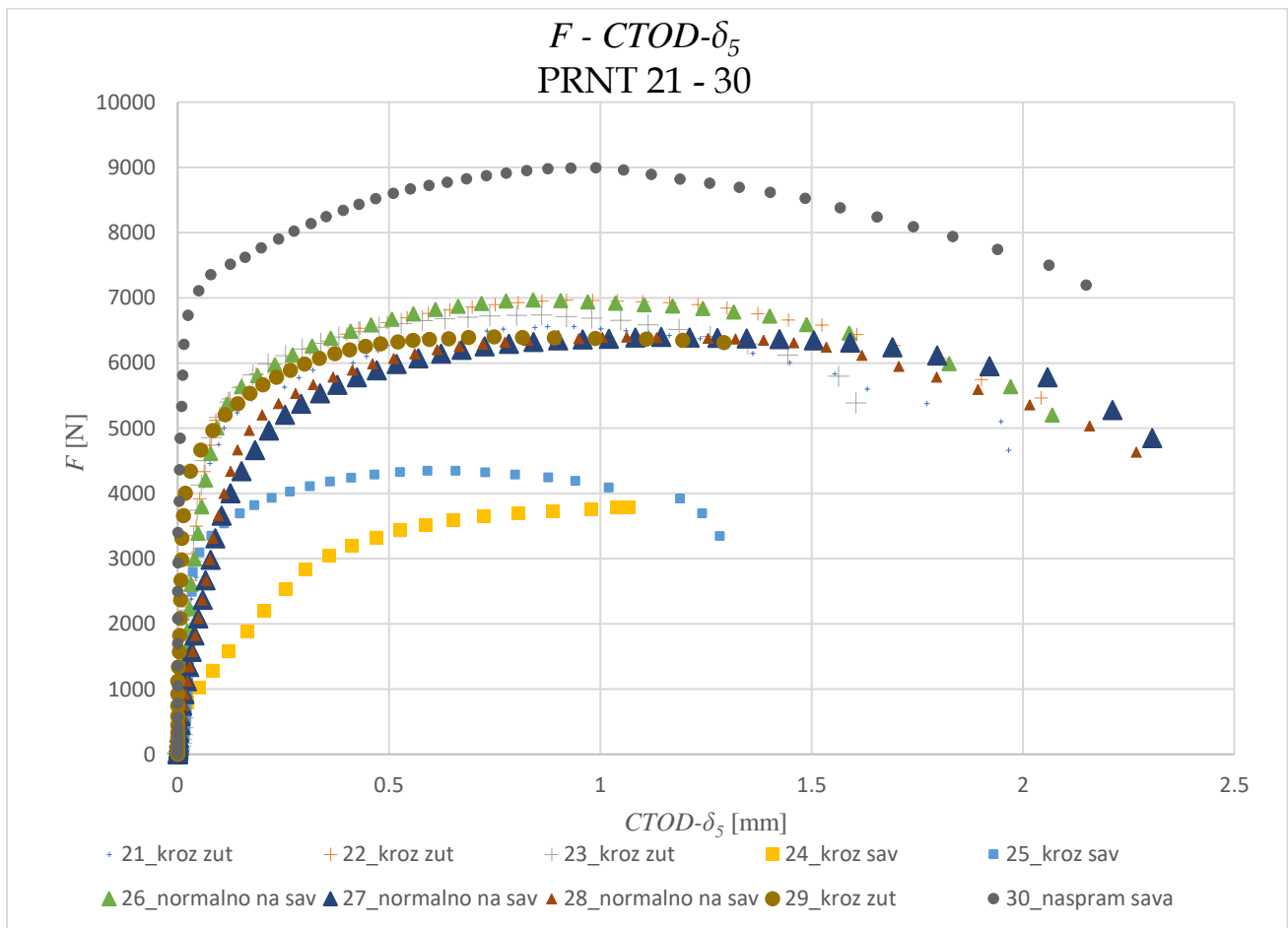


Slika 4.33. Dijagram zavisnosti sile od parametra $CMOD$ za PRNT epruvete sa jednim oštrim žlebom.

Tabela 4.7. Vrednosti parametra $CMOD$ i v_{LL} za seriju epruveta PRNT21-30.

Epruveta	$CMOD$ [mm]	v_{LL} [mm]
PRNT 21	2.14	1.05
PRNT 22	2.26	1.14
PRNT 23	1.84	1.09
PRNT 24	1.18	1.14
PRNT 25	1.05	0.53
PRNT 26	2.26	1.03
PRNT 27	2.60	1.42
PRNT 28	2.46	1.26
PRNT 29	1.39	0.83
PRNT 30	2.38	1.19

Zavisnost vrednosti sile od $CTOD-\delta_5$ prikazana je na slici 4.34, na kojoj se očekivano uočava gotovo identičan trend kao na slici 4.33. U slučaju epruveta PRNT21-30, za svaku epruvetu je uspešno izmerena vrednost parametra $CTOD-\delta_5$ za razliku od serije PRNT1-11 gde je problem u ispitivanju rasta prsline sa strane epruvete koja nije snimana Aramis 2M sistemom.



Slika 4.34. Dijagram zavisnosti sile od parametra $CTOD-\delta_5$ za PRNT epruvete sa jednim oštrim

žlebom.

U tabeli 4.8 prikazane su maksimalne vrednosti parametra $CTOD-\delta_5$ i njima odgovarajuće vrednosti pomeranja napadne tačke dejstva opterećenja.

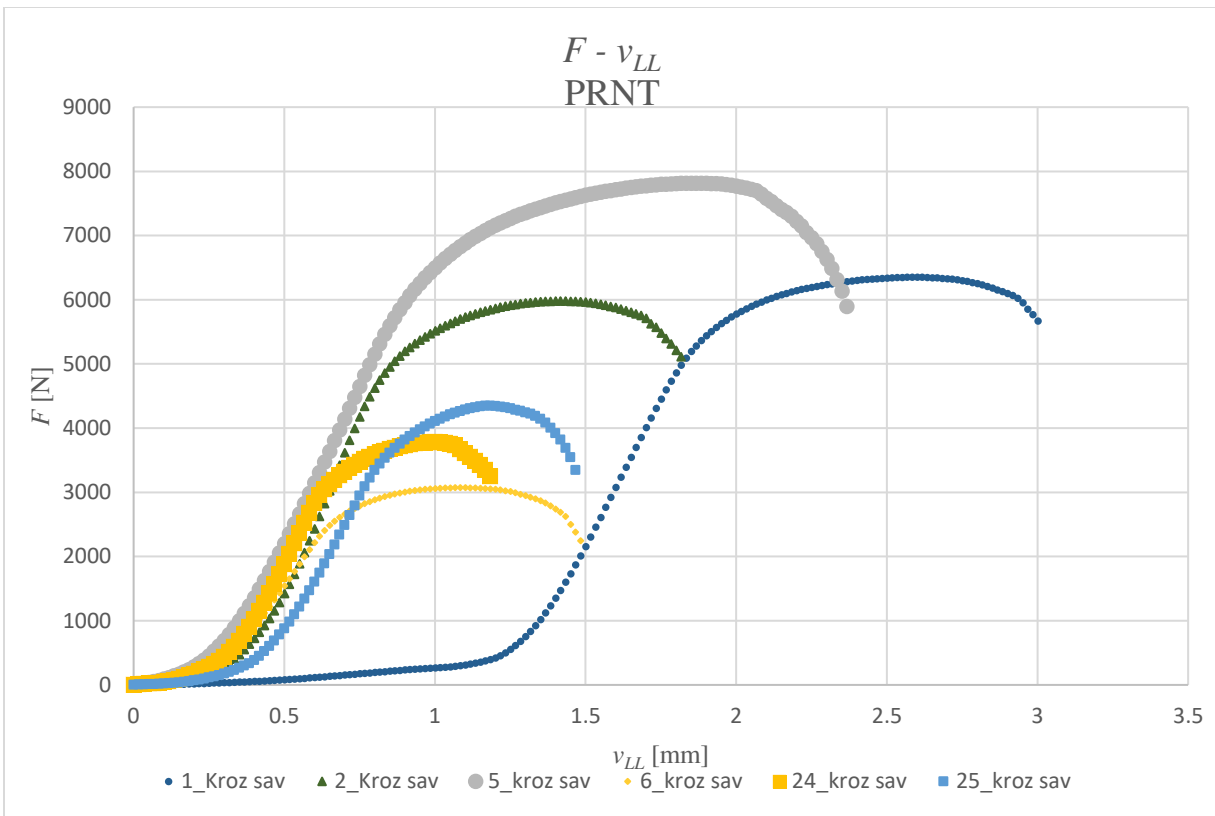
Tabela 4.8. Vrednosti parametra $CTOD-\delta_5$ i v_{LL} za seriju epruveta PRNT21-30.

Epruveta	$CTOD-\delta_5$ [mm]	v_{LL} [mm]
PRNT-21	1.37	0.92
PRNT-22	2.04	0.86
PRNT-23	1.61	1.07
PRNT-24	1.07	1.04
PRNT-25	1.28	0.59
PRNT-26	2.07	0.84
PRNT-27	2.31	1.14
PRNT-28	2.27	1.06
PRNT-29	1.29	0.75
PRNT-30	2.15	0.99

Rezultati ispitivanja epruveta čiji se oštri žleb/ovi nalaze **na mestu šava** prikazani su u tabeli 4.9.

Tabela 4.9 Rezultati ispitivanja epruveta čiji se oštri žleb/ovi nalaze na mestu šava.

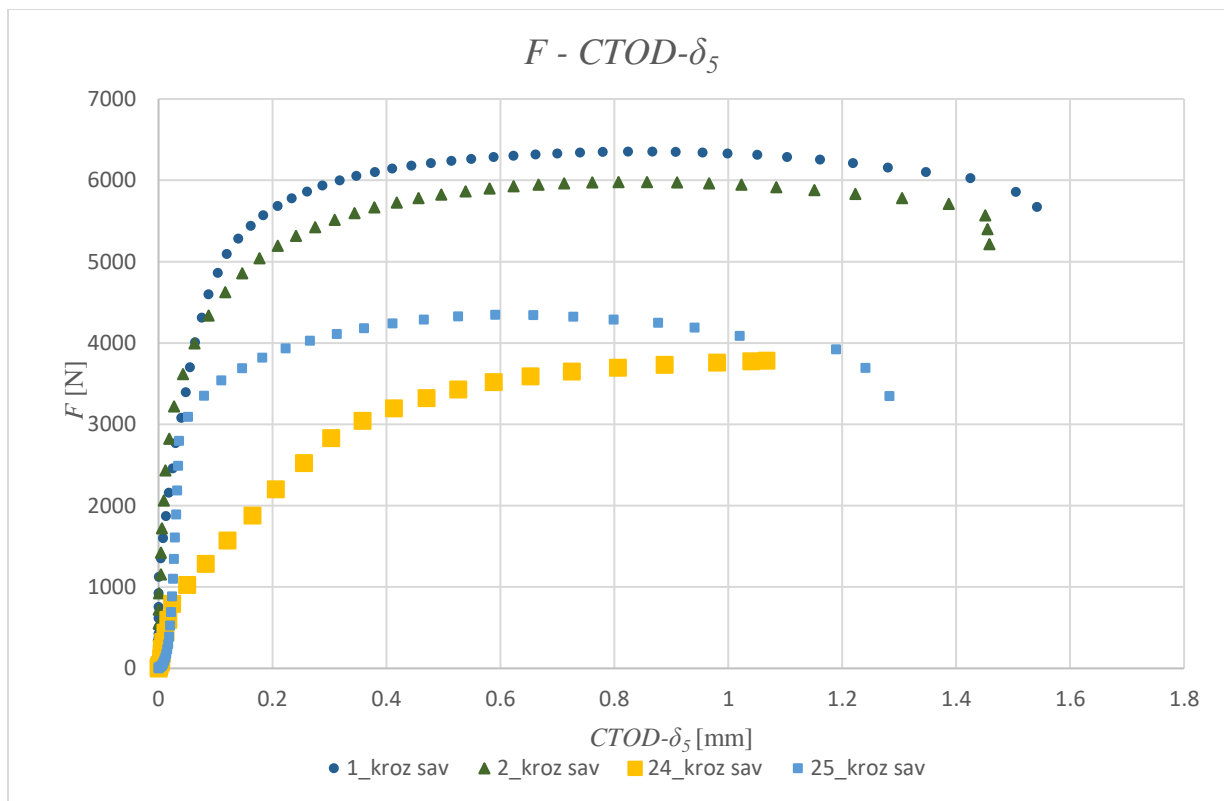
br. epruvete	a_0/W	F [N]	v_{LL} [mm]	$CMOD$ [mm]	$CTOD-\delta_5$ [mm]
1	0.50	6352	3.00	1.18	0.87
2	0.51	5978	1.82	0.95	0.81
5 (uža epruveta)	0.36	7814	2.37	(sa druge strane)	(sa druge strane)
6 (uža epruveta)	0.52	3072	1.48	(sa druge strane)	(sa druge strane)
24 (uža epruveta)	0.58	3781	1.18	1.14	1.07
25 (uža epruveta)	0.52	4347	1.47	0.53	0.59



Slika 4.35. Dijagram zavisnosti sile od pomeranja napadne tačke dejstva opterećenja za PRNT epruvete čiji se oštri žlebovi nalaze na mestu šava.

Na slici 4.35 krive zavisnosti pokazuju istu prirodu ponašanja epruveta sa jednim i dva oštra žleba. U ovom slučaju epruvete sa približno istim odnosom a_0/W i istim W , a to su PRNT-1 i PRNT-2 pokazuju uticaj male razlike u odnosu a_0/W ali sa očekivanim ishodom, što se potvrđuje i slikom 4.36.

Kada su u pitanju epruvete PRNT-6 i PRNT-25, one se poklapaju i u odnosu a_0/W i u širini W , jedinu razliku čini broj oštih žlebova što se na osnovu rezultata može i zaključiti. Epruvete sa jednim žlebom pokazale su određenu razliku u vrednostima opterećenja, dakle njihova nosivost je veća.



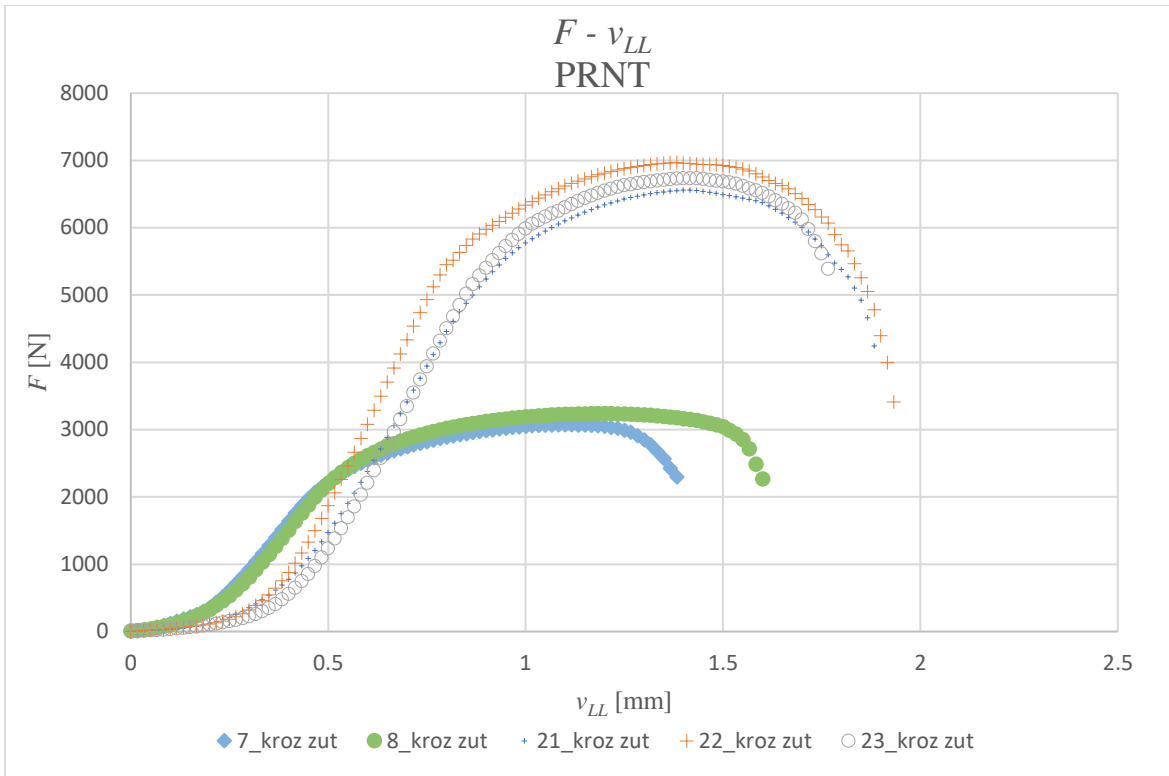
Slika 4.36. Dijagram zavisnosti sile od $CTOD-\delta_5$ za PRNT epruvete čiji se oštri žlebovi nalaze na mestu šava.

Uporedni rezultati ispitivanja epruveta čiji se oštri žleb/ovi nalaze u predelu ZUT-a prikazani su u tabeli 4.10.

Tabela 4.10. Rezultati ispitivanja epruveta čiji se oštri žlebovi nalaze na u predelu ZUT-a.

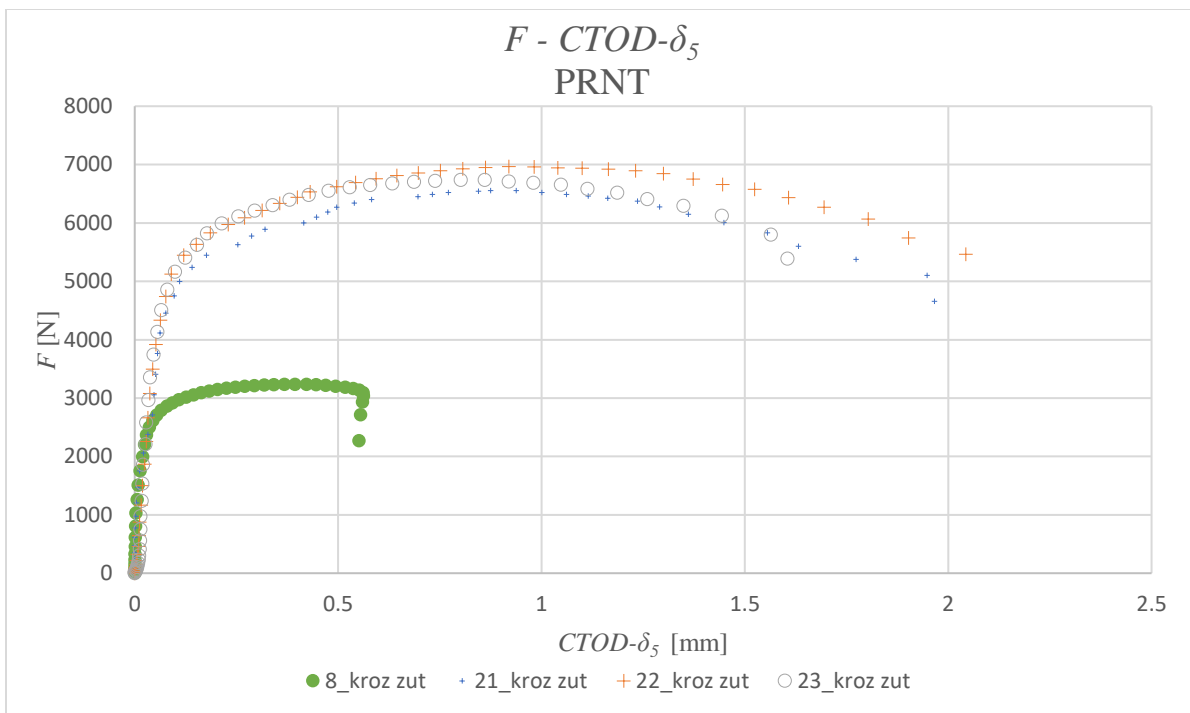
br. epruvete	a_0/W	F [N]	v_{LL} [mm]	$CMOD$ [mm]	$CTOD-\delta_5$ [mm]
7 (uža epruveta)	0.50	3071	1.38	(sa druge strane)	(sa druge strane)
8 (uža epruveta)	0.51	3238	1.60	0.51	0.39
21	0.52	6558	1.88	1.05	0.87
22	0.53	6967	1.93	1.14	0.92
23	0.52	6734	1.77	1.09	0.86

Imajući u vidu da uže epruvete imaju dvostruko manju širinu, rezultati ukazuju na proporcionalno poklapanje vrednosti sa neznatno većom izmerenom silom prilikom ispitivanja epruveta sa jednim oštrim žlebom. Međusobnim poređenjem rezultata i po seriji dobija se određena potvrda merenja koja potvrđuje validnost rezultata, slika 4.37.



Slika 4.37. Dijagram zavisnosti sile od pomeranja napadne tačke dejstva opterećenja za PRNT epruvete čiji se oštri žlebovi nalaze u predelu ZUT-a.

Rezultati izmerenih vrednosti parametra $CTOD-\delta_5$ dobijeni su merenjem Aramis 2M sistemom potpuno nezavisno od merenja sile i pomeranja napadne tačke dejstva opterećenja (slika 4.38).

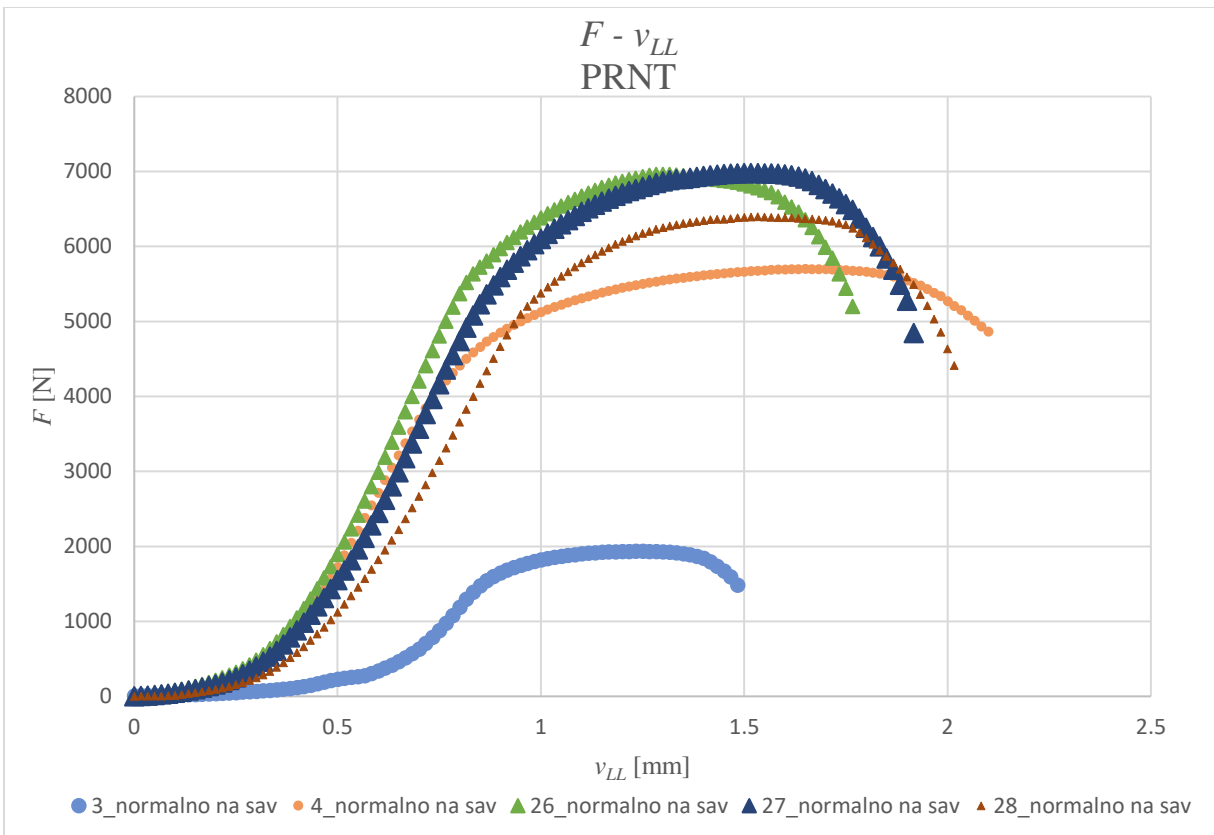


Slika 4.38. Dijagram zavisnosti sile od $CTOD-\delta_5$ za PRNT epruvete čiji se oštri žlebovi nalaze u predelu ZUT-a.

U tabeli 4.11 prikazani su rezultati ispitivanja epruveta čiji se žleb/ovi nalaze **na mestu normalno na šav** odnosno u osnovnom materijalu. Vizualizacija ovih rezultata prikazana je na slici 4.39.

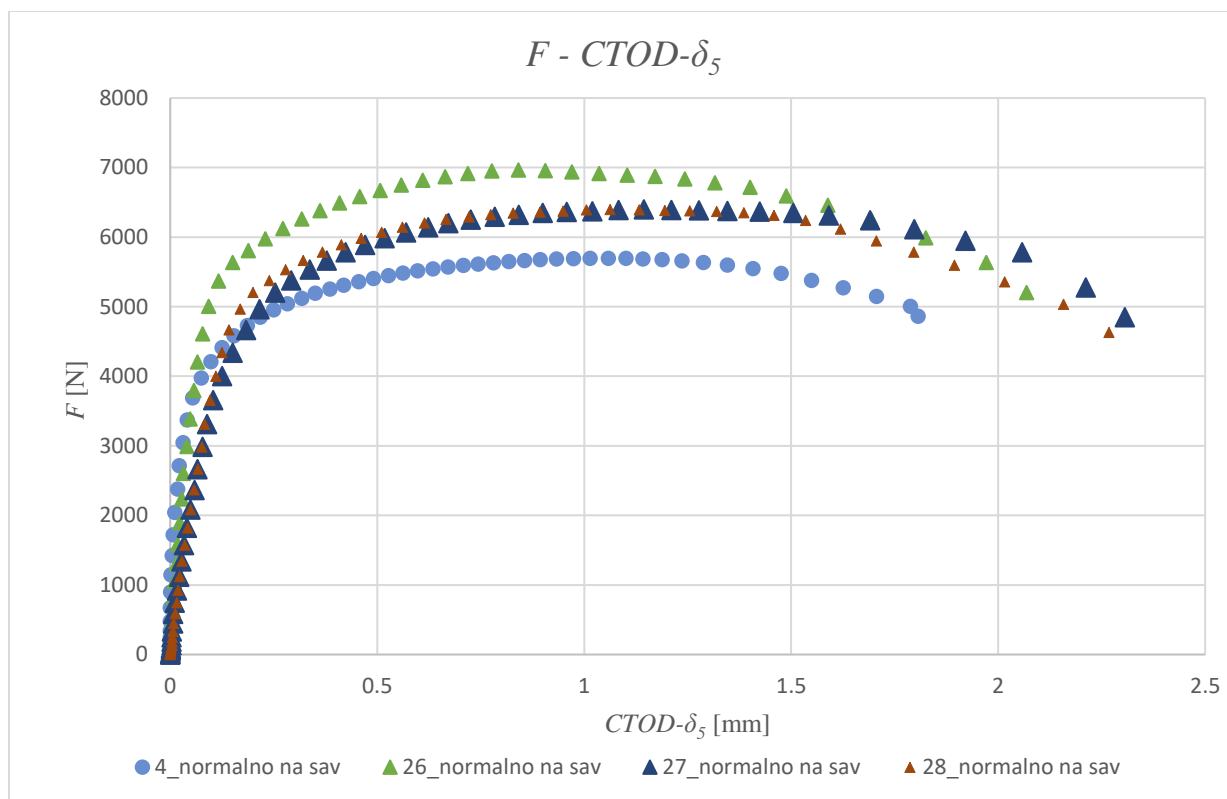
Tabela 4.11. Rezultati ispitivanja epruveta čiji se oštri žlebovi nalaze u osnovnom materijalu/normalno na šav.

br. epruvete	a_0/W	F [N]	v_{LL} [mm]	$CMOD$ [mm]	$CTOD-\delta_5$ [mm]
3	0.85	1933	1.48	(sa druge strane)	(sa druge strane)
4	0.51	5697	2.10	1.26	1.06
26	0.53	6964	1.77	1.03	0.84
27	0.53	6981	1.92	1.42	1.14
28	0.54	6397	2.02	1.26	1.06



Slika 4.39. Dijagram zavisnosti sile od pomeranja napadne tačke dejstva opterećenja za PRNT epruvete čiji se oštri žlebovi nalaze u osnovnom materijalu/ normalno na šav.

Ponašanje epruveta sa jednim i dva oštra žleba ponovo je pokazalo istu prirodu. Ispitane epruvete sa jednim žlebom čiji je odnos a_0/W približan epruveti sa dva žleba dali su ponovo približnu vrednost sile ako se uzme u obzir nešto veća širina epruveta PRNT26 i 27. Odstupanja koja su se javila između epruveta sa odnosom $a_0/W = 0.53$ i jednim ostrim žlebom ponovo su pokazala poklapanja unutar serije. Toj konstataciji u prilog idu i rezultati prikazani na slici 4.40 gde se jasno vidi poklapanje rezultata merenja $CTOD-\delta_5$ optičkom metodom Aramis 2M sistema.



Slika 4.40. Dijagram zavisnosti sile od $CTOD-\delta_5$ za PRNT epruvete čiji se oštri žlebovi nalaze u osnovnom materijalu/ normalno na šav.

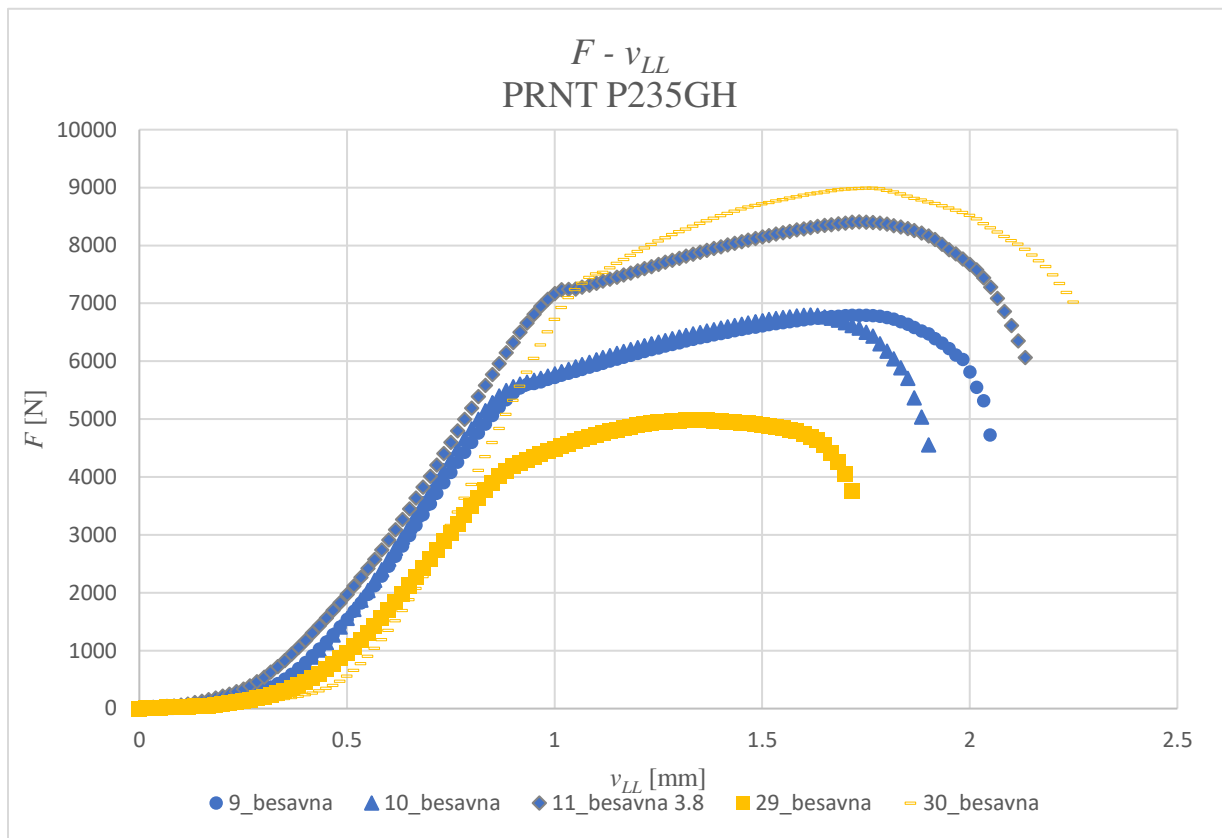
Rezultati ispitivanja epruveta iz bešavnih cevi od materijala P235GH dobijeni su na osnovu ispitivanja 5 epruveta čiji su rezultati prikazani u tabeli 4.12.

Tabela 4.12. Rezultati ispitivanja epruveta čiji se oštri žlebovi nalaze u osnovnom materijalu

br. epruvete	a_0/W	F [N]	v_{LL} [mm]	$CMOD$ [mm]	$CTOD-\delta_5$ [mm]
9 (sa druge strane ali ipak izmereno)	0.51	6792	2.05	0.94	0.77
10 (sa druge strane ali ipak izmereno)	0.51	6799	1.90	0.88	0.74
11	0.35	8408	2.13	0.93	0.78
29 (uža epruveta)	0.28	4981	1.72	0.83	0.75
30	0.37	8993	2.25	1.19	0.99

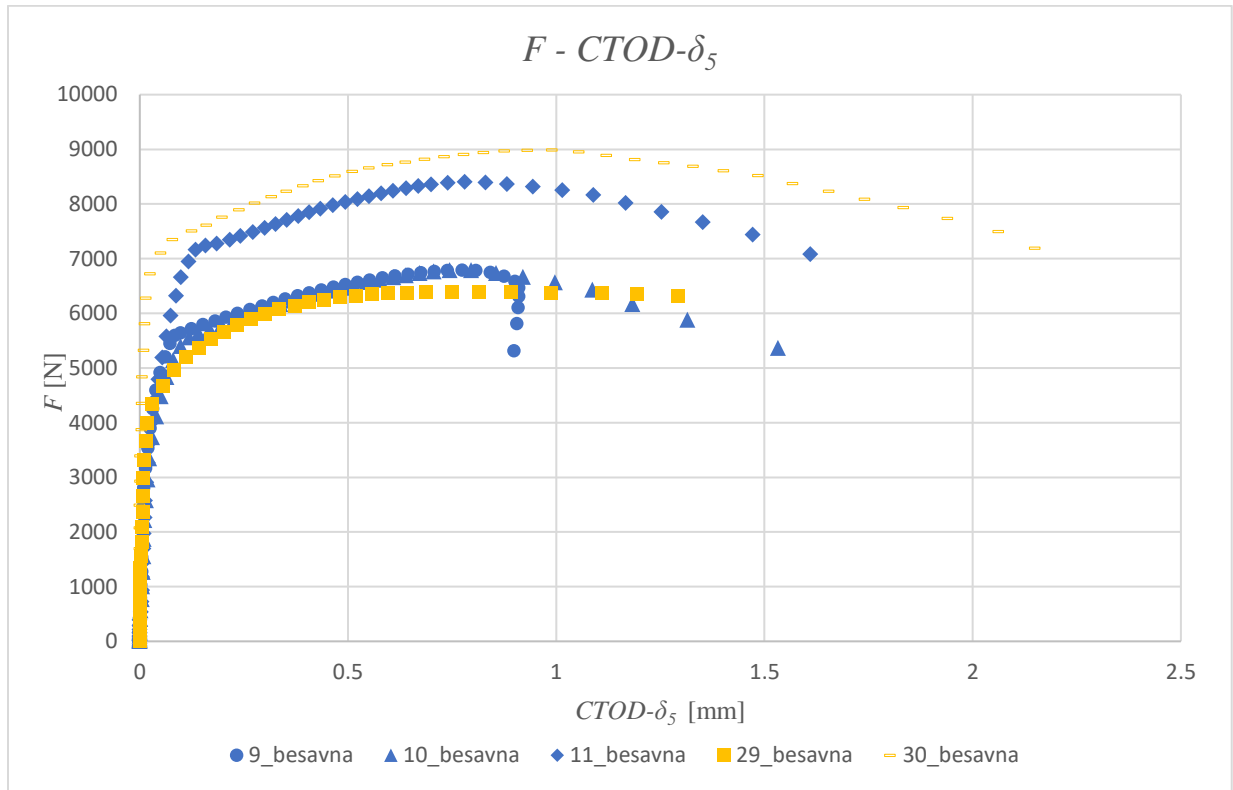
Dobijeni rezultati za ispitane epruvete materijala P235GH i rezultati ispitivanja epruveta materijala

P235TR1 pokazali određena poklapanja i sličnosti u prirodi ponašanja kako ova dva materijala tako i među grupama PRNT epruveta. Unutar grupe ponovo su dobijene veoma bliske vrednosti sile što je prikazano na dijagramu zavisnosti sile od pomeranja napadne tačke dejstva opterećenja (slika 4.41) kao i vrednosti parametra $CTOD-\delta_5$ prikazanog na slici 4.42. Uporedivi rezultati javili su se kod epruveta PRNT11 i PRNT30 čiji je odnos a_0/W bio najpribližniji imajući u vidu razliku u poprečnom preseku ove dve epruvete koja ide u korist epruveti PRNT30 za približno 15%.



Slika 4.41. Dijagram zavisnosti sile od pomeranja napadne tačke dejstva opterećenja za PRNT

epruvete (P235GH)



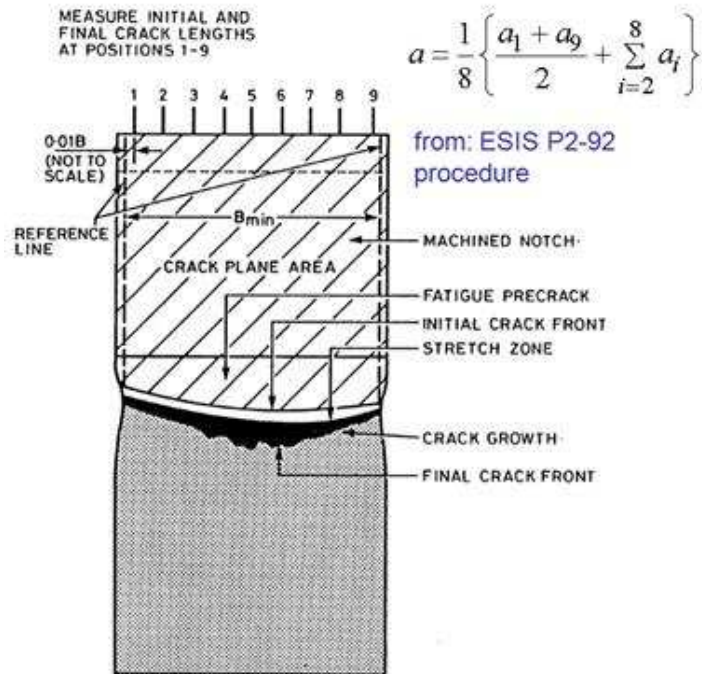
Slika 4.42. Dijagram zavisnosti sile od CTOD- δ_5 za PRNT epruvete (P235GH).

4.5. Rezultati merenja konačne dužine prslina

Nakon ispitivanja epruveta zatezanjem, iste su zagrejane u peći na 400° C prilikom čega je došlo do bojenja površine prslina u tamniju nijansu. Nakon hlađenja epruveta, potopljene su u tečni azot kako bi se postigla krtost materijala i udarnim opterećenjem preostali deo ligamenta razdvojio na dva dela. Ovaj postupak obezbedio je poprečni presek epruveta koji daje jasnu sliku o površini prslina koja je rasla tokom ispitivanja.

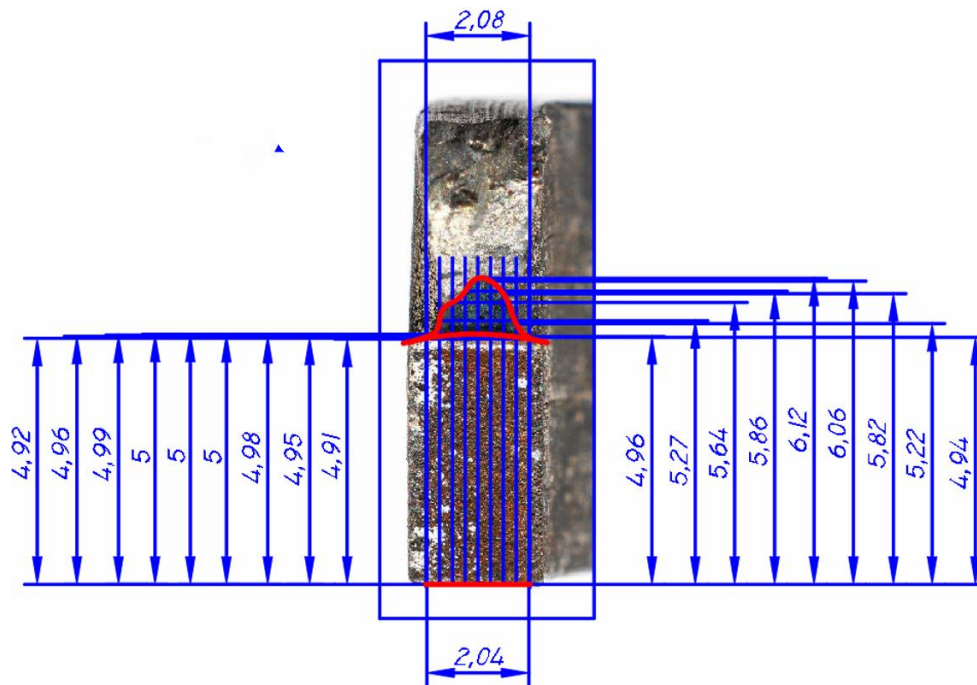
Merenje konačne dužine prslina na polomljenim epruvetama vršeno je u softveru AutoCad korišćenjem fotografija poprečnog preseka ispitanih metalnih PRNT epruveta (slika 4.43). Na fotografijama se jasno vidi granica početnog koncentratora napona (oštrog žleba), žilavog loma i krtog loma epruvete.

Metoda merenja, iz procedure ESIS P2-92, šematski je prikazana na slici 4.43.

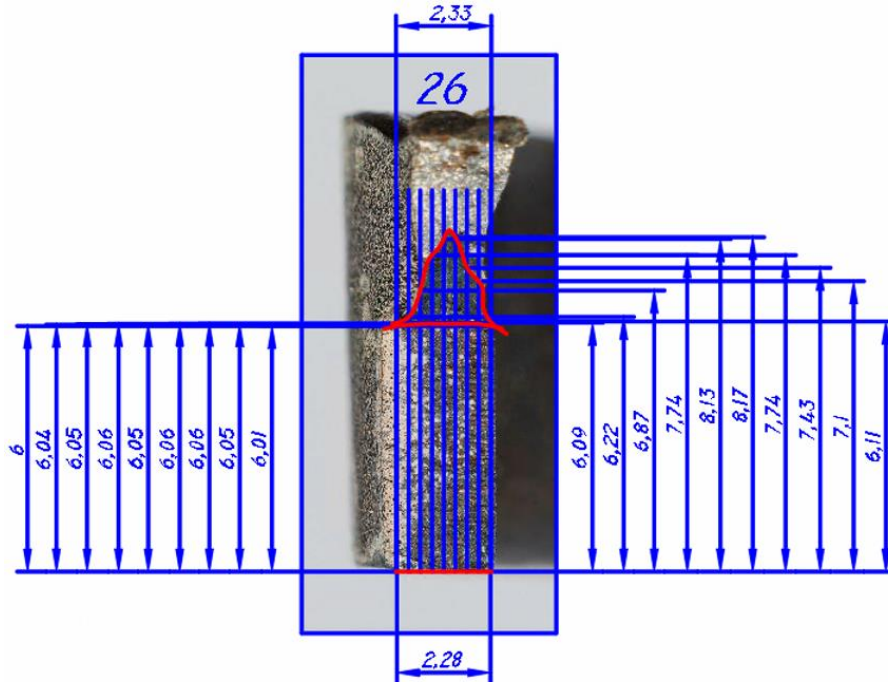


Slika 4.43. Određivanje dužine prsline na površini preloma u skladu sa ESIS procedurom [4.1].

Za svaku PRNT epruvetu izrađene su slike na ovaj način i uvežene u softver AutoCAD gde je merena konačna dužina prsline (slike 4.44 i 4.45).



Slika 4.44. Merenje dužine prsline u AutoCAD-u na PRNT epruveti sa dva oštra žleba.



Slika 4.45. Merenje dužine prslina u AutoCAD-u na PRNT epruveti sa jednim oštrim žlebom.

Korišćenjem izraza 4.1 dobijene su konačne dužine prslina (tabela 4.13) od početka ispitivanja do trenutka kada sila počinje da pada, odnosno zaustavljanja mašine za ispitivanje.

$$\Delta a_f = \frac{(0.5*(a_1+a_9)+a_2+a_3+a_4+a_5+a_6+a_7+a_8)}{8} \quad (4.1)$$

a_1 – vrednost prve dužine na poprečnom preseku (uz ivicu epruvete)

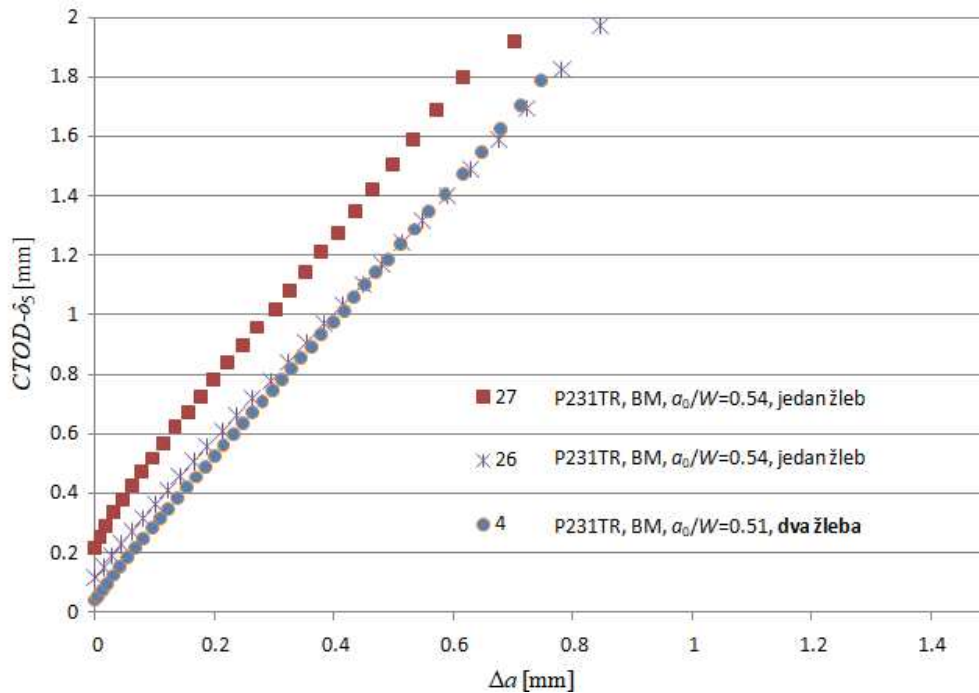
a_9 – vrednost poslednje dužine na poprečnom preseku (uz naspramnu ivicu epruvete)

Tabela 4.13 Konačne dužine prslina izmerene na prelomnim površinama.

Epruvete	Δa_f
PRNT-1	0.88
PRNT-2	0.75
PRNT-4	1.06
PRNT-5	2.08
PRNT-6	0.61
PRNT-7	0.88
PRNT-8	0.64
PRNT-9	2.07
PRNT-22	1.38
PRNT-24	0.79
PRNT-26	1.53
PRNT-27	1.72
PRNT-28	1.75
PRNT-29	0.37
PRNT-30	2.09

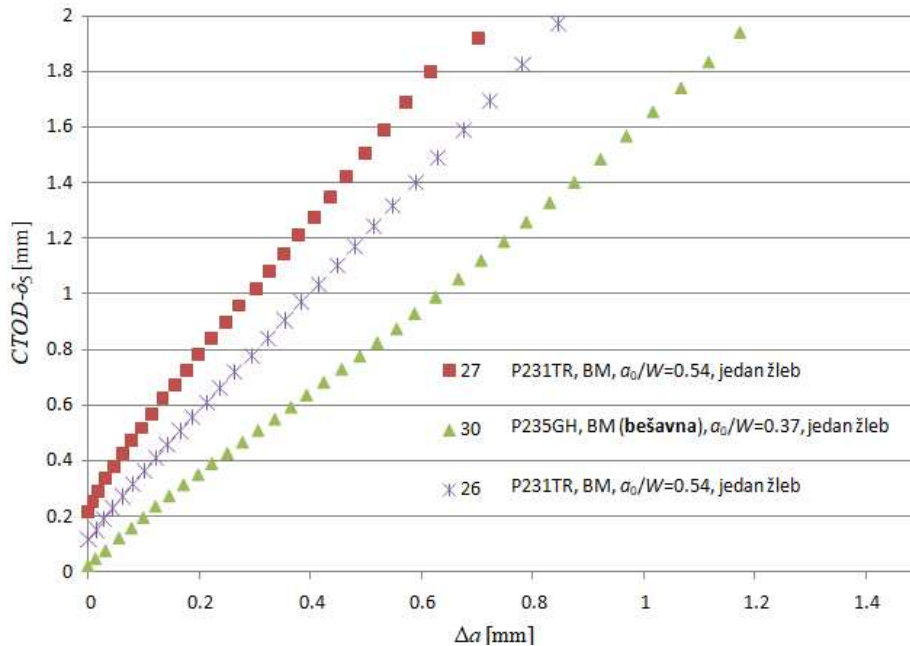
Primenom metode normalizacije dobijene su krive rasta prsline, $CTOD-\delta_5 - \Delta a$ za eksperimentalno ispitane epruvete koje su imale stabilan rast prsline. Prilikom formiranja ovih krivih bile su potrebne i vrednosti parametra η_{pl} i K_I , određene primenom metode konačnih elemenata u narednom poglavlju.

Na slici 4.46 vidi se uticaj broja koncentratora napona za istu geometriju PRNT epruveta; može se zaključiti da nema većih odstupanja. Dve krive dobijene ispitivanjem epruveta sa jednim žlebom (26 i 27) pokazuju izvesno međusobno odstupanje, ali kriva dobijena ispitivanjem epruvete sa dva žleba (4) se gotovo poklapa sa jednom od njih.



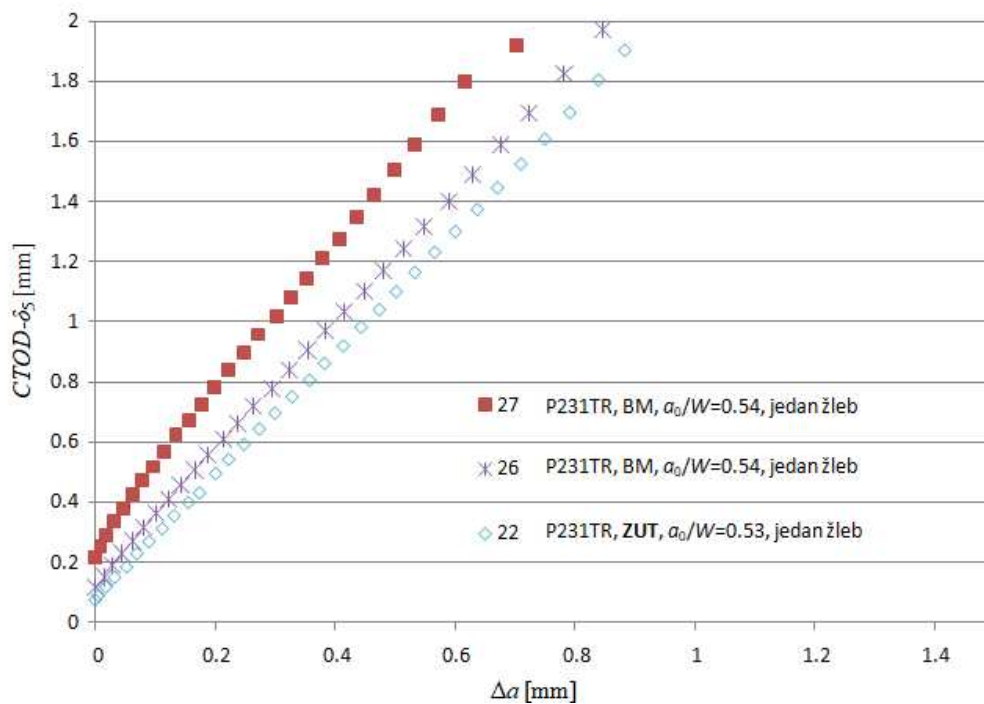
Slika 4.46. Krive otpornosti prema rastu prsline – PRNT epruvete sa jednim i dva žleba.

Uticaj materijala cevi se vidi na slici 4.47. PRNT epruveta isečena iz bešavne cevi (30) pokazala je znatno manju otpornost prema lomu, iako ima manji odnos a_0/W u poređenju sa šavnim (26 i 27). Drugim rečima, ova razlika bi se dodatno povećala ukoliko bi geometrija ovih epruveta bila potpuno ista. Sličan zaključak, tj. niža otpornost prema lomu za cevi od čelika P235GH u poređenju sa P235TR1 (za razmatranu dimenziju cevi) je dobijen i u [2.63].



Slika 4.47. Krive otpornosti prema rastu prsline – PRNT epruvete isečene iz šavne (P235TR1) i bešavne (P235GH) cevi.

Upoređena je i otpornost prema lomu epruveta sa žlebom u osnovnom metalu (26 i 27) i u zoni uticaja toplote (22); vidi se da nema velike razlike u ponašanju ZUT pri lomu, u poređenju sa osnovnim metalom (slika 4.48).



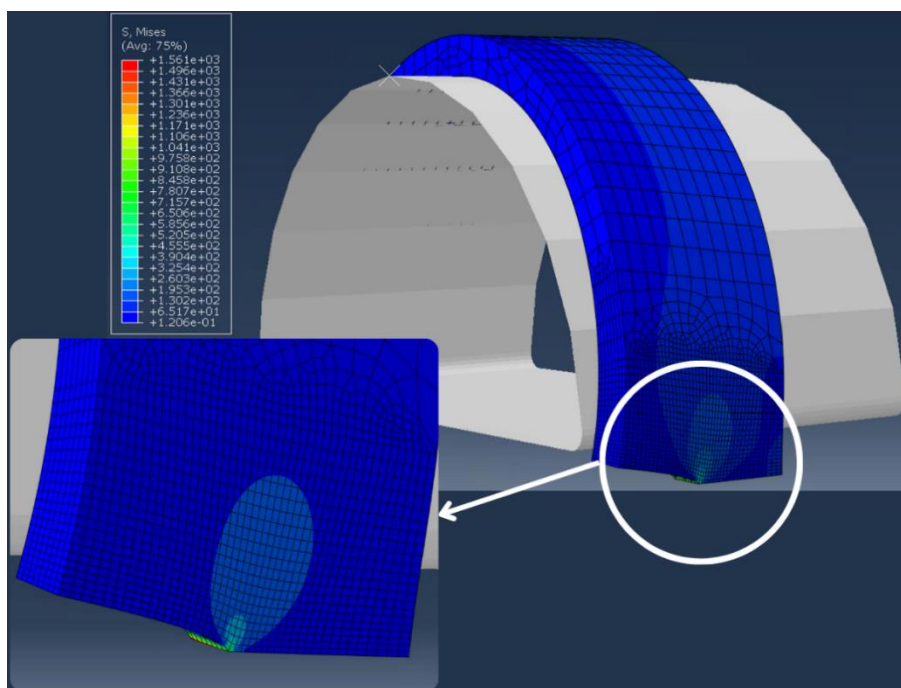
Slika 4.48. Krive otpornosti prema rastu prsline – PRNT epruvete sa žlebom u osnovnom metalu i ZUT.

Iz prikazanih rezultata može se zaključiti da se ispitivanjem PRNT epruveta može odrediti uticaj broja žlebova i osobina materijala na otpornost prema lomu materijala cevovoda.

5. Rezultati numeričke analize

5.1. Rezultati proračuna na modelima PRNT i SENT epruveta sa osobinama materijala PA12

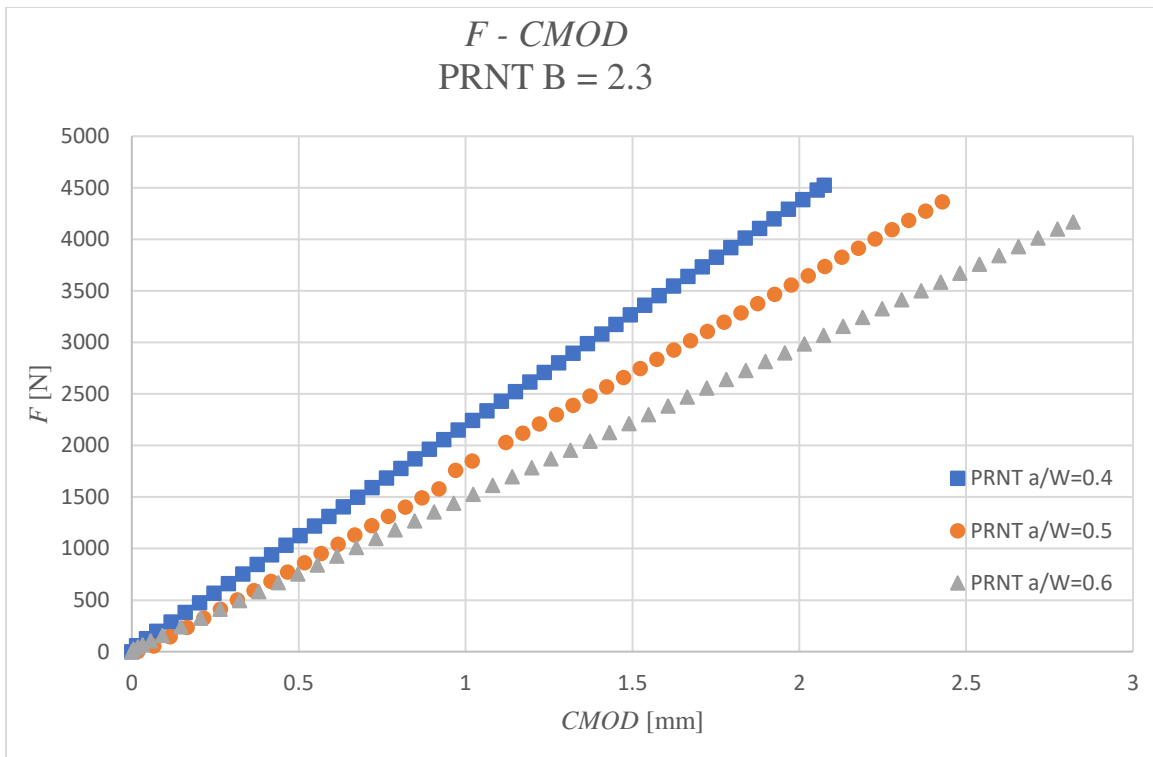
U ovom potpoglavlju prikazani su numerički proračuni urađeni na modelima PRNT i SENT epruveta sa svojstvima PA12 materijala [5.1]. Na slici 5.1. prikazan je model sa raspodelom ekvivalentnog von Misesovog napona.



Slika 5.1. Raspodela ekvivalentnog von Misesovog napona na modelu PRNT - materijal PA12.

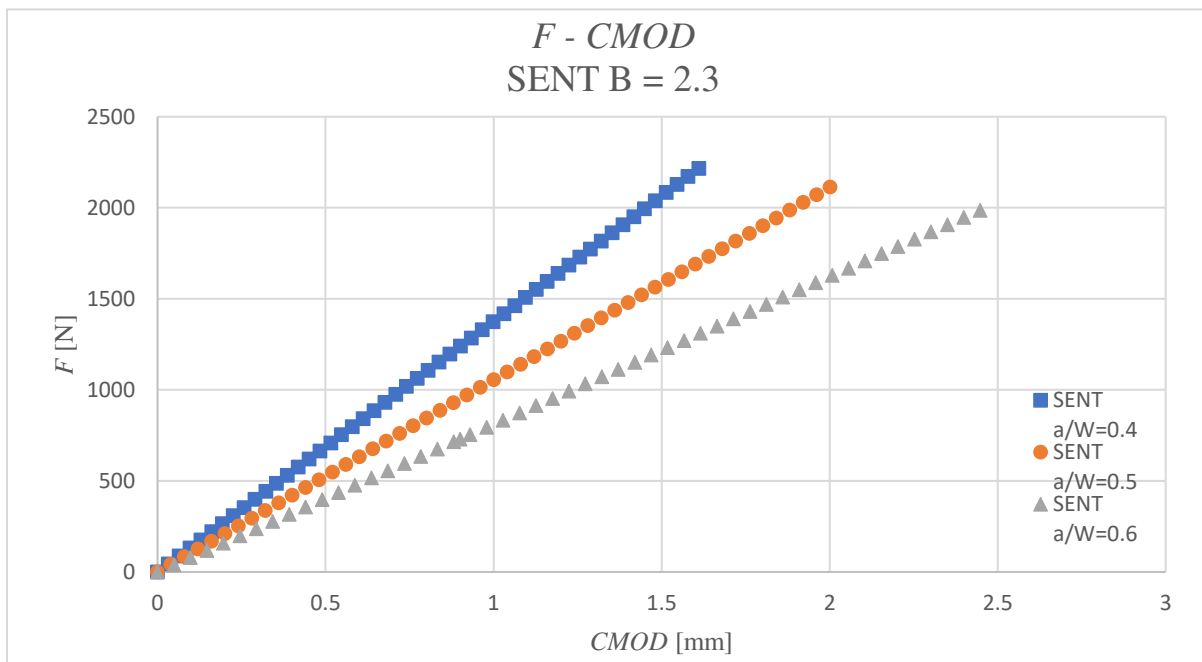
Ispitivanjem modela PRNT sa svojstvima PA12 materijala korišćenog za izradu eksperimentalno ispitanih epruveta dobijene su vrednosti zavisnosti sile od $CMOD$ prikazane na slici 5.2.

Prikazane zavisnosti su očekivane i pokazuju linearno opadanje sile proporcionalno poprečnom preseku ligamenta. Povećanje poprečnog preseka ligamenta sa $a_0/W = 0.5$ na $a_0/W = 0.4$ daje razliku u maksimalnoj vrednosti sile 3.5% u korist modela sa većim poprečnim presekom ligamenta dok se vrednost $CMOD$ smanjuje za približno 16%. Poređenjem maksimalne vrednosti sile i parametra $CMOD$ za modele PRNT pri $a_0/W = 0.5$ i $a_0/W = 0.6$ dobija se smanjenje vrednosti sile za 4.6% pri povećanju maksimalne vrednosti parametra $CMOD$ za 13.8%. Svi modeli su imali isto zadato pomeranje napadne tačke.



Slika 5.2. Dijagram zavisnosti sile od CMOD za PRNT model ($a_0/W = 0.4; 0.5; 0.6$)

Na slici 5.3 prikazani su rezultati numeričkog proračuna na modelima SENT pri istim vrednostima kao u slučaju PRNT modela.



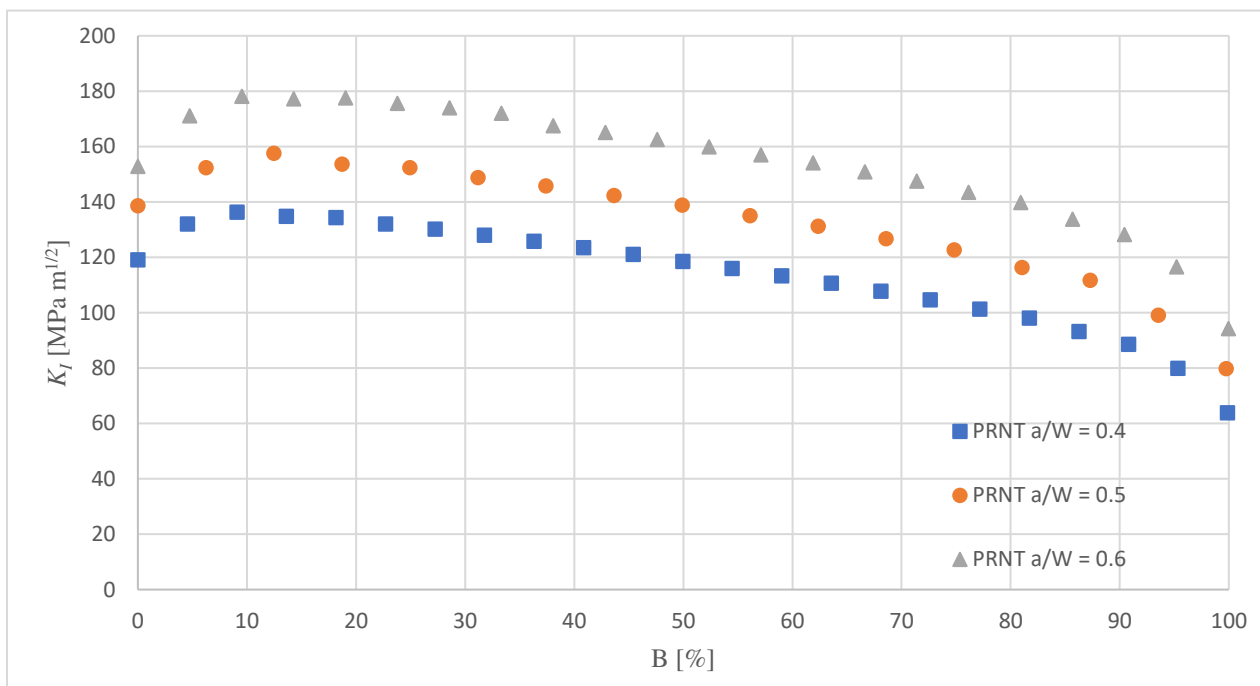
Slika 5.3. Dijagram zavisnosti sile od parametra CMOD za SENT model ($a_0/W = 0.4; 0.5; 0.6$)

Zavisnost vrednosti sile od parametra CMOD za različite poprečne preseke ligamenta SENT

modela u ovom slučaju takođe ima linearan trend. Tako je maksimalna vrednost sile za model sa odnosom $a_0/W = 0.4$ veća za 4.8% dok je maksimalna vrednost parametra $CMOD$ manja za 24% u odnosu na model sa $a_0/W = 0.5$ čije su maksimalne vrednosti sile manje za 6.4% i parametra $CMOD$ veće za 18.3% u odnosu na model sa $a_0/W = 0.6$. Svi modeli su imali isto zadato pomeranje napadne tačke.

Razmatrajući dobijene rezultate za modele PRNT i SENT čija su svojstva materijala definisana samo u linearno elastičnoj oblasti, sa varijacijama odnosa a_0 i W uviđa se neznatna razlika u odnosu maksimalnih sila za modele $a_0/W = 0.4$ i 0.5 kao i za $a_0/W = 0.5$ i 0.6 , dok je odnos vrednosti parametra $CMOD$ nešto veći. Generalni zaključak jeste da odnos a i W u slučaju SENT modela više utiče na razliku na dijagramima sila - $CMOD$ nego što je to slučaj kod PRNT modela.

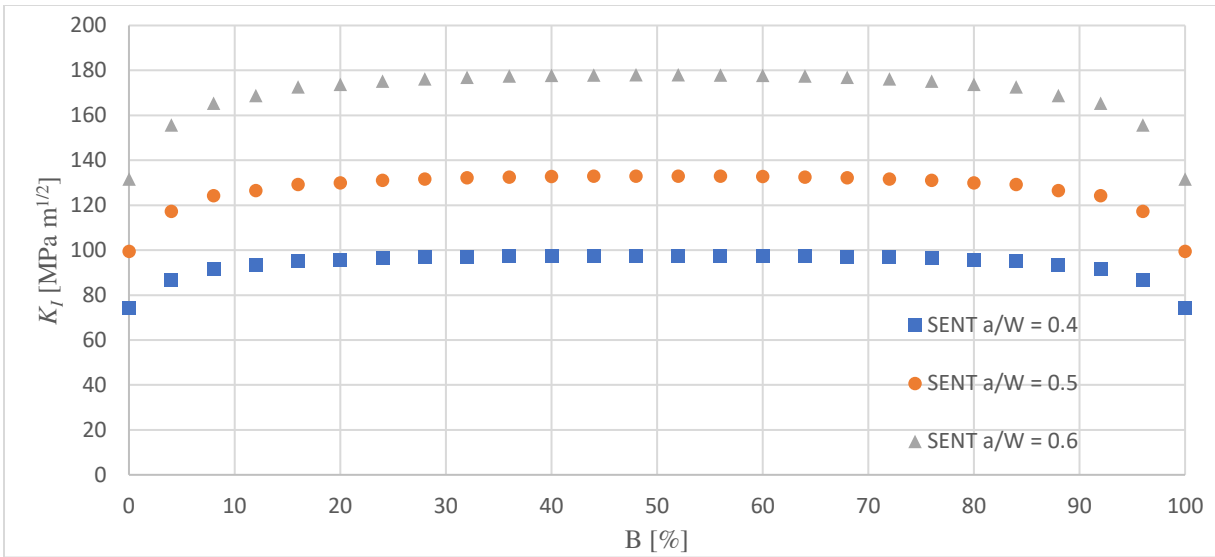
Na slici 5.4 prikazan je profil vrednosti faktora intenziteta napona duž fronta prsline za modele PRNT pri odnosu a_0 i W od 0.4; 0.5; 0.6.



Slika 5.4. Profil vrednosti faktora intenziteta napona duž fronta prsline za PRNT modele.

Profil vrednosti parametra K_I na slici 5.4 za sva tri slučaja (odnosa a_0/W) ukazuje na povećanu vrednost faktora K_I u blizini unutrašnje površine, tj. u blizini modela D bloka, koja je najviša u prvih 10-20% debljine epruvete a potom gotovo linearno opada do 90% širine i konačno dostiže najnižu vrednost u tački spoljašnjeg zida modela.

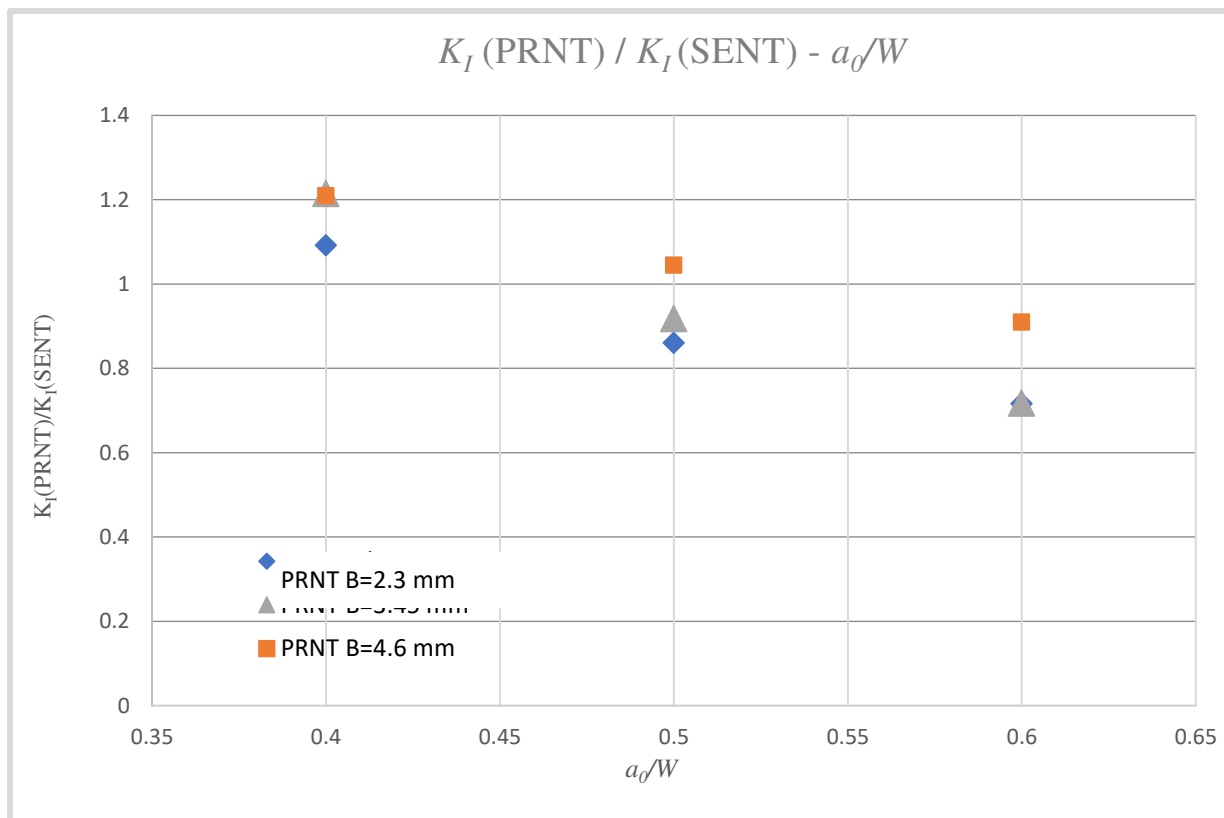
Slika 5.5 predstavlja profile vrednosti faktora K_I duž fronta prsline, za tri odnosa a_0 i W kod SENT modela.



Slika 5.5. Profil vrednosti faktora intenziteta napona duž fronta prsline za SENT modele.

Uticaj odnosa dužine prsline i širine modela ponovo je dokazan na parametru K_I ; razlika u vrednosti faktora K_I sa povećanjem odnosa a_0/W kod modela PRNT raste za približno 15% za svaki korak od 0.1 (a_0/W). Razlika u vrednostima faktora K_I kod modela SENT je veća i sa porastom vrednosti odnosa a_0/W od 0.1 raste za približno 35%, što ponovo potvrđuje razliku u uticaju odnosa a_0/W na parametre mehanike loma.

Uticaj promene debljine modela na parametar K_I prikazan je na slici 5.6. Na slici su predstavljeni odnosi K_I za PRNT i SENT model, proračunati za model PRNT prečnika 55 mm, pri debljinama zida od $B = 2.3; 3.45; 4.6$ mm.

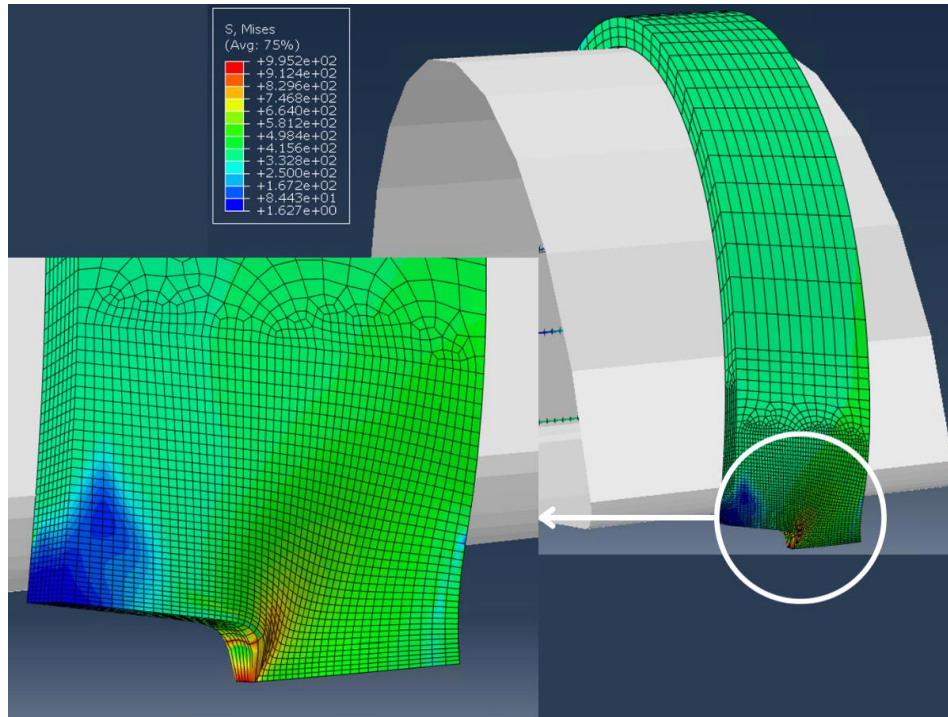


Slika 5.6. Odnos faktora intenziteta napona modela PRNT i SENT ($a_0/W = 0.4; 0.5; 0.6$) pri različitim debljinama zida modela.

Uticaj debljine zida modela na odnos parametara K_I za PRNT i SENT modele nije izražen u pogledu trenda vrednosti odnosa K_I i a_0/W .

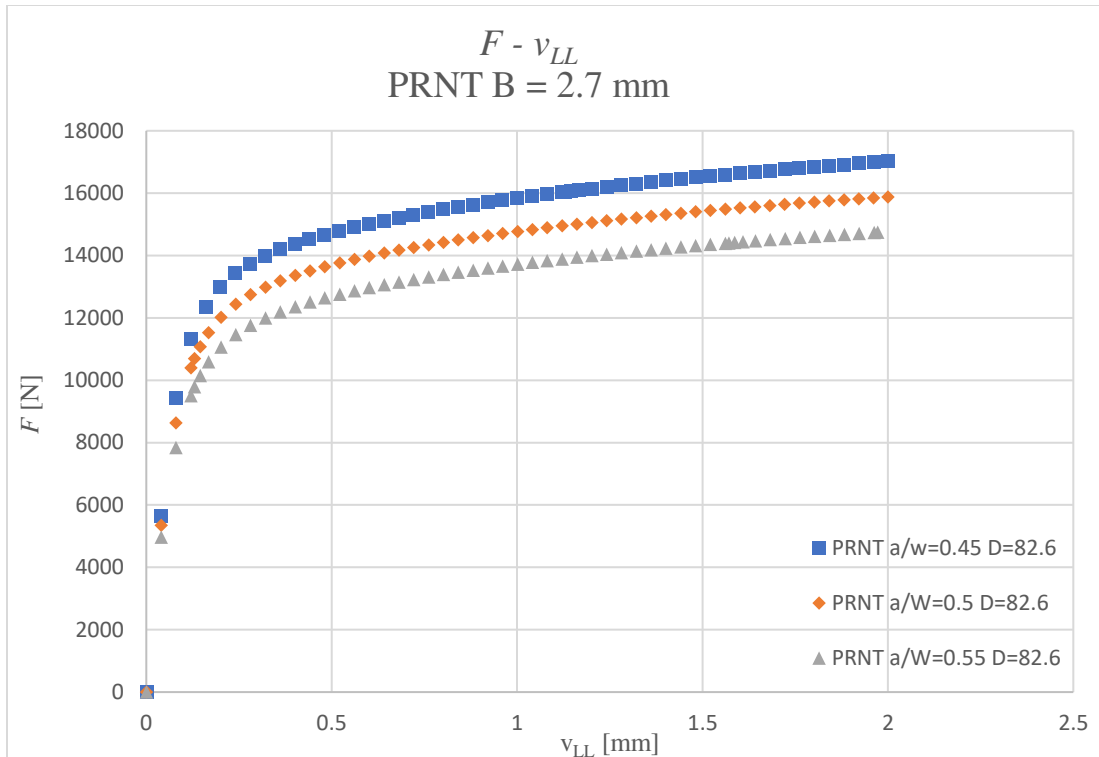
5.2. Rezultati proračuna na modelima PRNT i SENT sa osobinama materijala P235TR1

U ovom potpoglavlju prikazani su rezultati dobijeni numeričkom analizom modela PRNT i SENT koristeći svojstva materijala (čelika) P235TR1, što uključuje elasto-plastično ponašanje materijala. Dimenzije modela su $W = 10.8$ mm, $B = 2.7$ mm i $D = 82.6$ mm (slika 5.7).



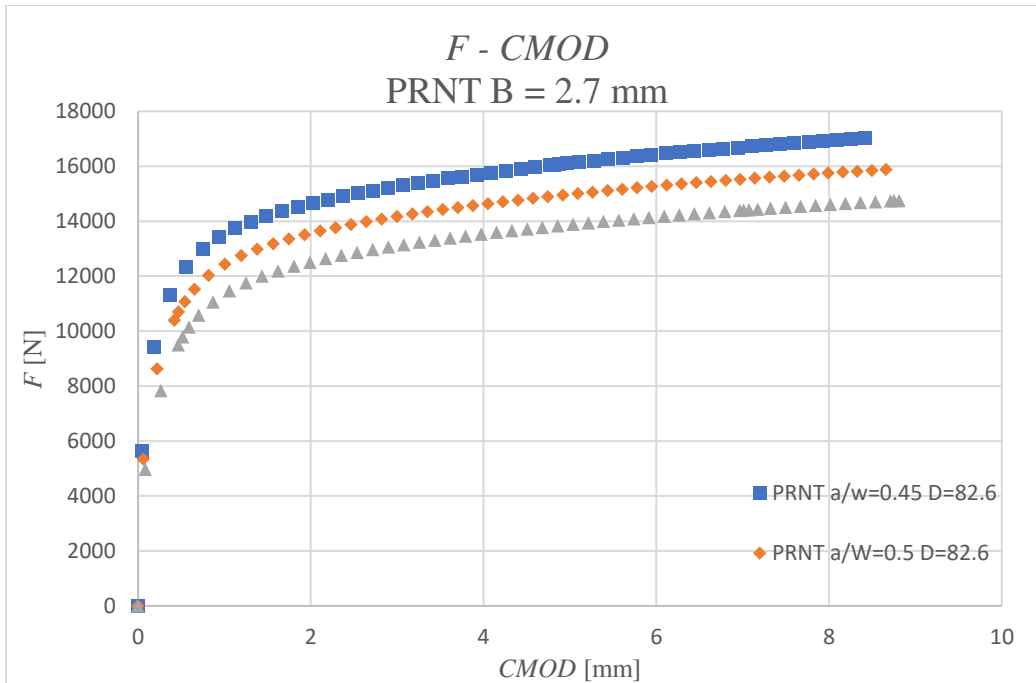
Slika 5.7. Raspodela ekvivalentnog von Misesovog napona na modelu PRNT ($B = 2.70 \text{ mm}$) sa svojstvima P235TR1 materijala.

Na slici 5.8 prikazana je zavisnost sile od pomeranja za model PRNT pri razlicitim vrednostima a_0/W i to 0.45, 0.5 i 0.55.



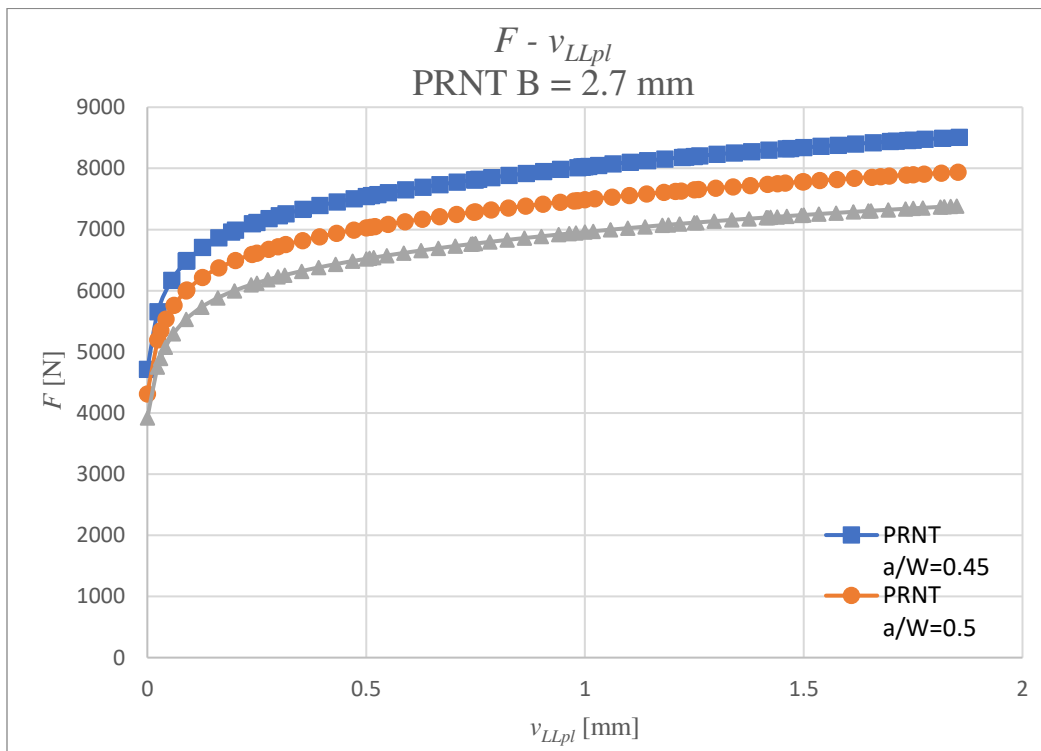
Slika 5.8. Zavisnost ukupne sile od pomeranja za model PRNT. ($a_0/W = 0.45; 0.5; 0.55$)

Zavisnosti ukupne sile od pomeranja napadne tačke dejstva opterećenja prikazane na slici 5.8 ukazuju na očekivano ponašanje modela, gde se sa porastom vrednosti odnosa a_0 i W smanjuju vrednosti sile zbog smanjenja poprečnog preseka ligamenta. Razlike u maksimalnim vrednostima parametra $CMOD$ u odnosu na proračun sile su gotovo zanemarljive i razlika u vrednosti između dva modela sa korakom a_0/W od 0.05 je približno 2.5%, dok je razlika u sili približno 7.5% (slika 5.9).



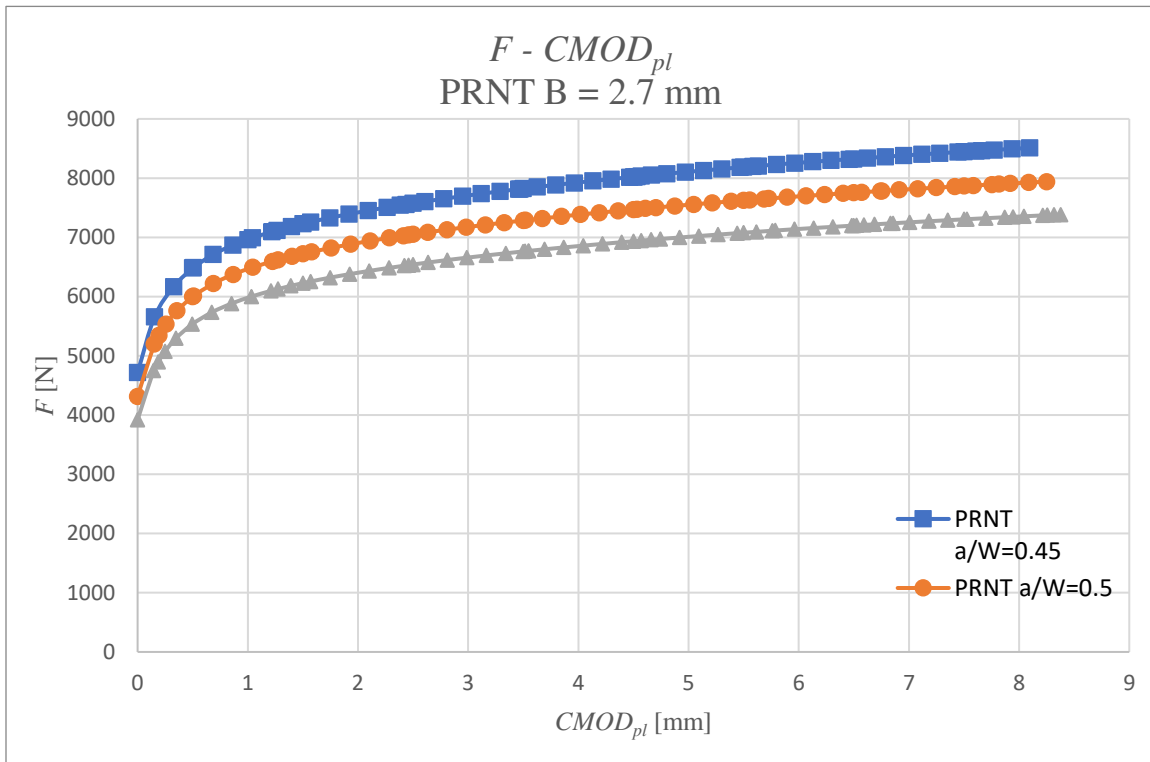
Slika 5.9. Zavisnost ukupne sile od parametra CMOD za model PRNT ($a_0/W = 0.45; 0.5; 0.55$)

Na slici 5.10 prikazana je zavisnost sile na jednom ligamentu prstena od pomeranja plastične komponente napadne tačke.



Slika 5.10. Zavisnost sile od plastične komponente pomeranja za model PRNT ($a_0/W = 0.45; 0.5; 0.55$).

Podaci sa slike 5.10 imaju svrhu u daljem proračunu parametara S_{ij} kao što je slučaj i sa podacima prikazanim na slici 5.11 gde se umesto plastične komponente pomeranja primenjuje plastična komponenta parametra $CMOD$.

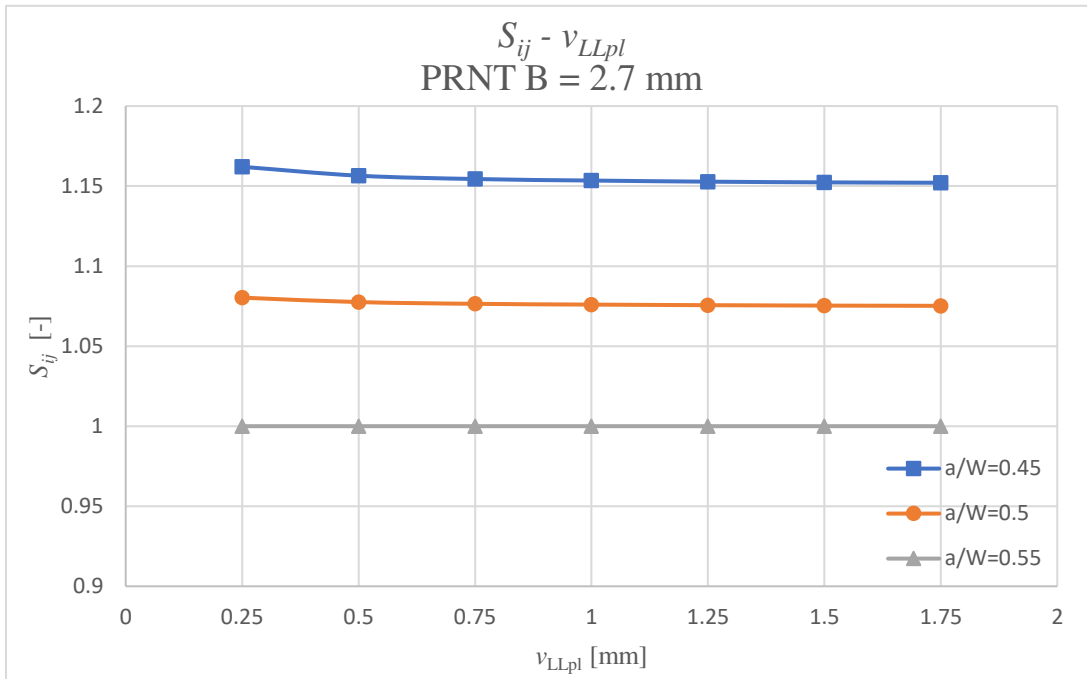


Slika 5.11. Zavisnost sile od plastične komponente parametra $CMOD$ za model PRNT ($a_0/W = 0.45; 0.5; 0.55$).

U tabeli 5.1 prikazane su vrednosti parametra S_{ij} za model PRNT (pri $a_0/W = 0.45; 0.5; 0.55$) u opsegu pomeranja od 0.25 do 1.75 mm sa korakom od 0.25 mm. Vizualizacija ove zavisnosti prikazana je na slici 5.12.

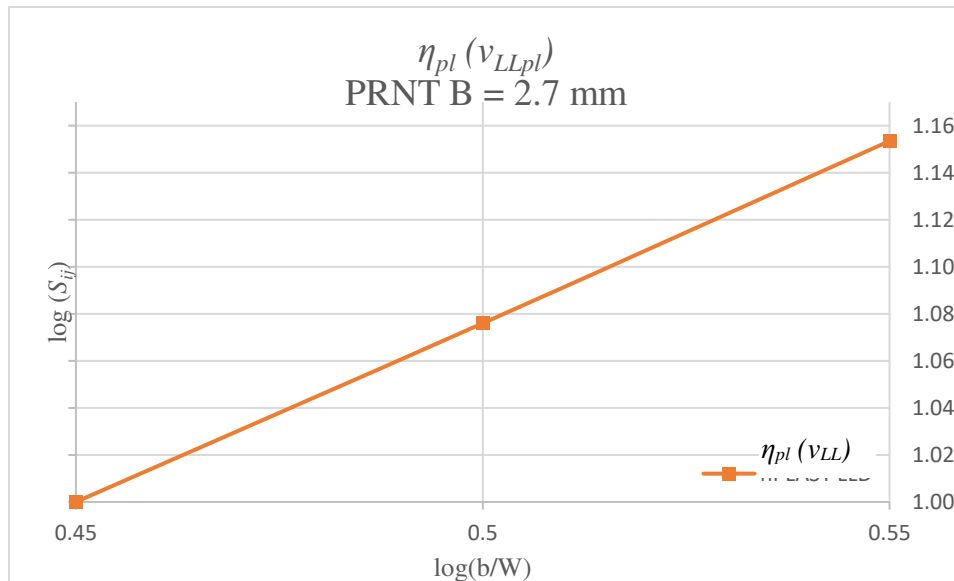
Tabela 5.1. Vrednosti parametra S_{ij} za definisane vrednosti plastične komponente pomeranja za model PRNT.

ν_{LLpl}	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75
$S_{ij} (a_0/W=0.45)$	1.162	1.156	1.154	1.153	1.152	1.152	1.152
$S_{ij} (a_0/W=0.5)$	1.080	1.077	1.076	1.075	1.075	1.075	1.075
$S_{ij} (a_0/W=0.55)$	1	1	1	1	1	1	1



Slika 5.12. Zavisnost parametra S_{ij} od vrednosti plastične komponente pomeranja v_{LLpl} za model PRNT.

Na slici 5.13 dat je logaritamski prikaz zavisnosti parametra S_{ij} od odnosa širine ligamenta modela (b) i širine modela (W) čijim se izračunavanjem nagiba dobila vrednost parametra $\eta_{pl} = 0.7114$.



Slika 5.13. Logaritamski prikaz zavisnosti parametra S_{ij} od odnosa b/W (dobijene na osnovu pomeranja).

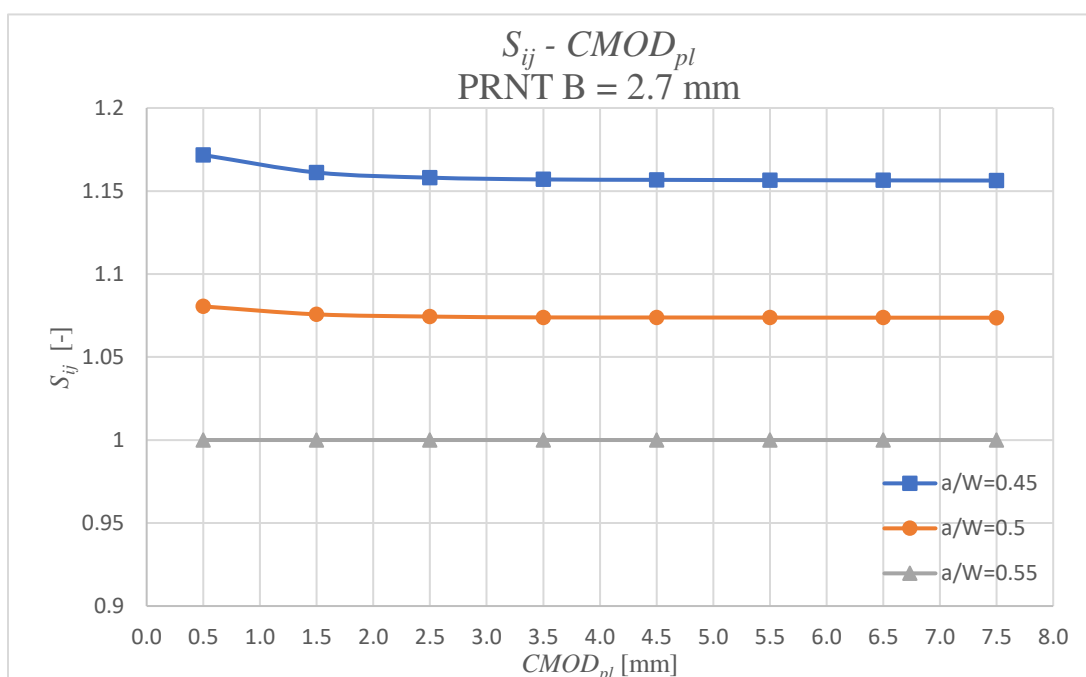
Za razliku od prikaza u tabeli 5.1, gde su vrednosti S_{ij} dobijene na osnovu vrednosti sile u

određenim tačkama pomeranja u plastičnoj zoni, u tabeli 5.2 prikazane su vrednosti parametra S_{ij} dobijene kao odnos vrednosti sila biranih u opsegu vrednosti parametra $CMOD_{pl}$ od 0.5 do 7.5 mm sa korakom 1 mm.

Tabela 5.2. Vrednosti parametra S_{ij} za definisane vrednosti plastične komponente $CMOD$ za model PRNT.

$CMOD_{pl}$	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5
$S_{ij} (a_0/W=0.45)$	1.171	1.161	1.158	1.156	1.156	1.156	1.156	1.156
$S_{ij} (a_0/W=0.5)$	1.080	1.075	1.074	1.073	1.073	1.073	1.073	1.073
$S_{ij} (a_0/W=0.55)$	1	1	1	1	1	1	1	1

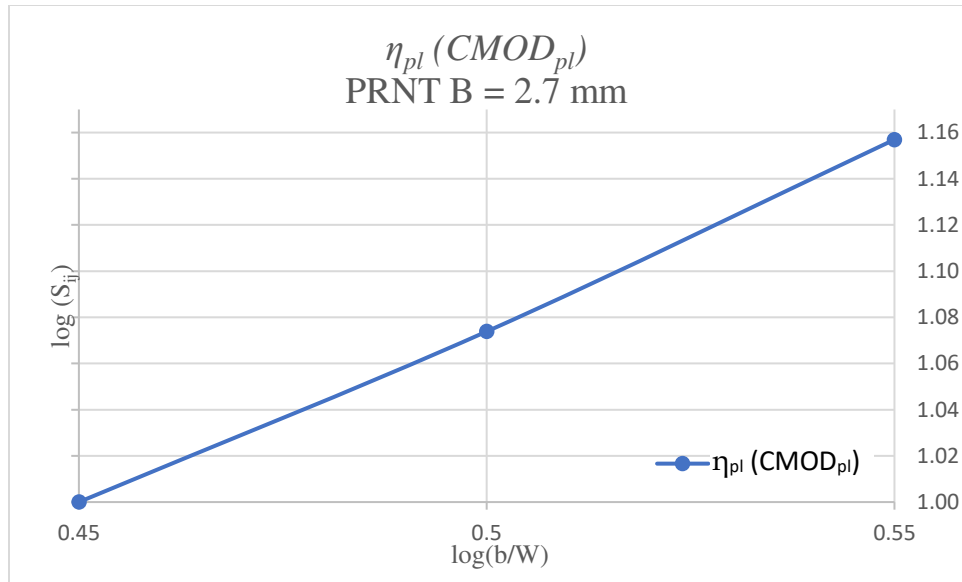
Na slici 5.14. prikazana je zavisnost parametra S_{ij} od vrednosti parametra $CMOD$ iz plastične zone.



Slika 5.14. Zavisnost parametra S_{ij} od vrednosti plastične komponente parametra $CMOD$ za model PRNT.

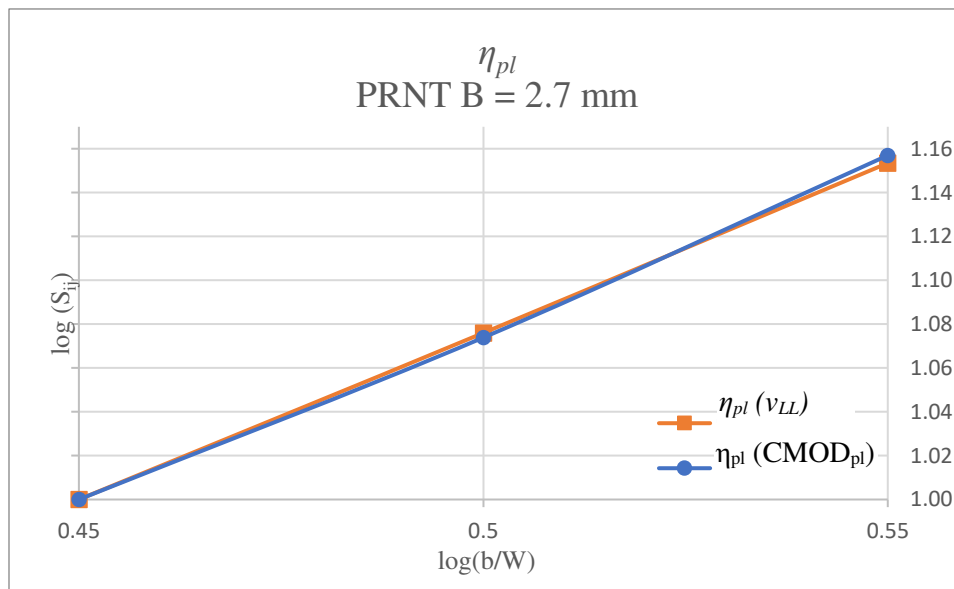
Kao i za parametre S_{ij} dobijene na osnovu odabira pomeranja, vrednosti S_{ij} sa porastom parametra $CMOD$ opadaju i nakon drugog koraka postaju konstantne.

Na slici 5.15 nalazi se logaritamski prikaz parametra S_{ij} u zavisnosti od odnosa b/W čijim se izračunavanjem nagiba dobija vrednost od 0.7265, što odgovara vrednosti parametra η_{pl} .



Slika 5.15. Logaritamski prikaz zavisnosti parametra S_{ij} od odnosa b/W (dobijene na osnovu vrednosti parametra $CMOD$).

Na osnovu dobijenih rezultata za vrednosti parametra η_{pl} , birajući vrednosti sila i njihove odnose na osnovu pomeranja i parametra $CMOD$ dobijaju se vrednosti sa razlikom od približno 2%, što je prikazano na slici 5.16.



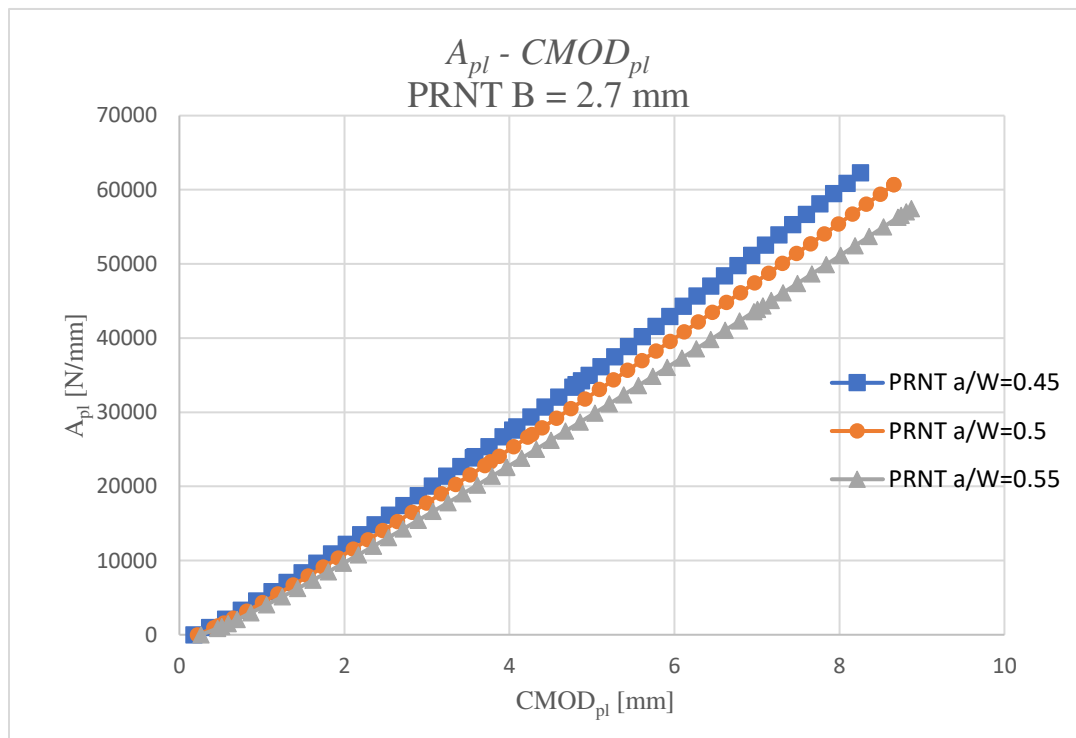
Slika 5.16. Uporedni logaritamski prikaz zavisnosti parametra S_{ij} od odnosa b/W za model PRNT.

Uporedne vrednosti parametra η_{pl} prikazane su u Tabeli 5.3.

Tabela 5.3. Vrednosti parametra η_{pl} za model PRNT ($B = 2.70 \text{ mm}$) računane preko parametara v_{LL} i $CMOD$.

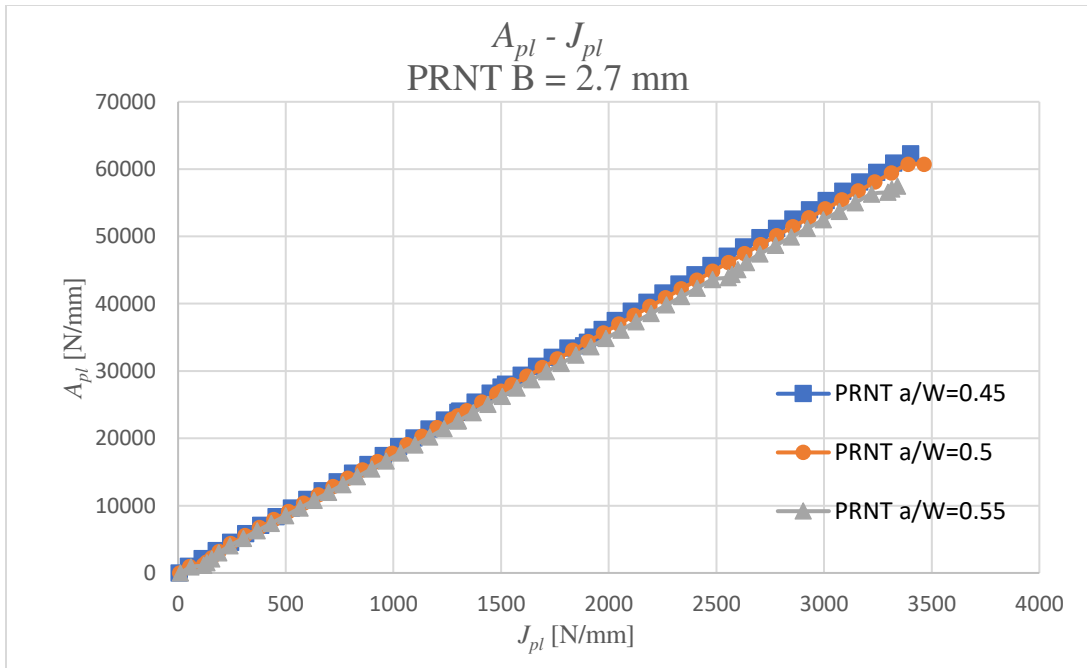
Model	PRNT (v_{LL})	PRNT ($CMOD$)
η_{pl}	0.7114	0.7265

Za isti model i na osnovu istih rezultata proračunate su vrednosti parametra η_{pl} korišćenjem podataka o apsorbovanoj količini energije tokom procesa loma i J -integrala unutar plastične oblasti. Količina apsorbovane energije odnosno površina ispod dijagrama $F - CMOD_{pl}$ izračunata je analitički, nakon čega su rezultati prikazani u odnosu na $CMOD_{pl}$ (slika 5.17) i J_{pl} dobijene numeričkim proračunom u Abaqusu (slika 5.19).



Slika 5.17. Zavisnost plastične komponente površine od plastične komponente parametra $CMOD$ za model PRNT.

Na slici 5.18 prikazana je zavisnost parametra A_{pl} od J_{pl} pri čemu su vrednosti za A_{pl} dobijene analitičkim putem i informacijama dobijenim kroz prethodne proračune.



Slika 5.18. Zavisnost plastične komponente površine od plastične komponente J -integrala za model PRNT.

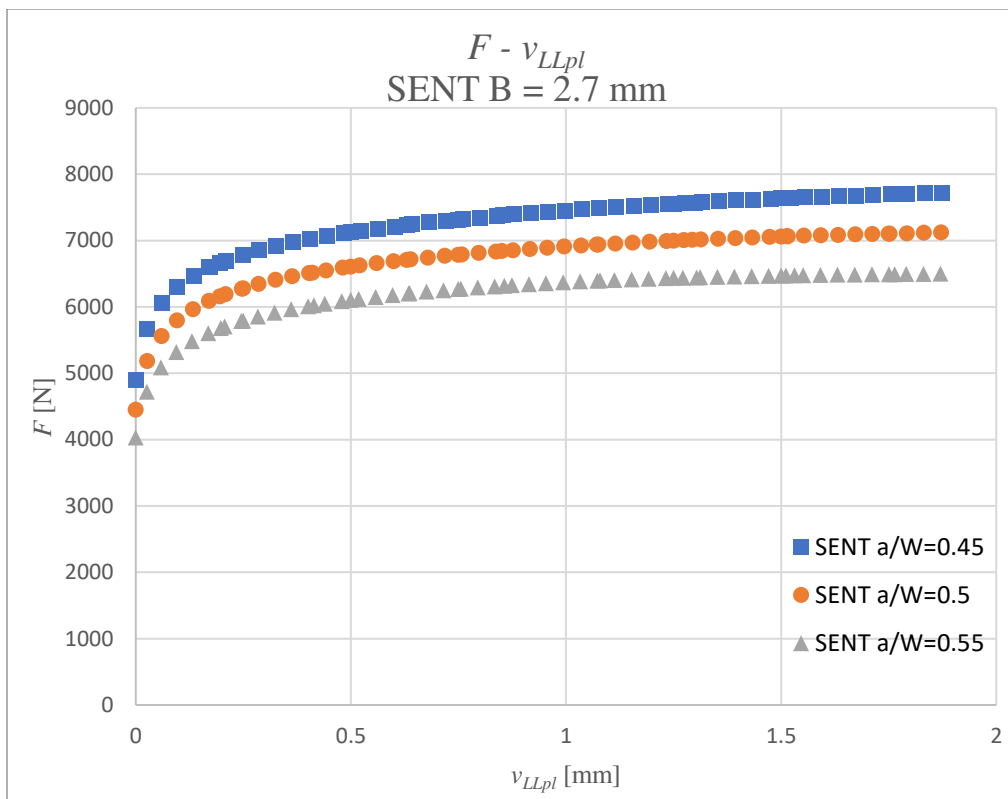
Nakon formiranja dijagrama, proračunate su vrednosti parametra η_{pl} pri numeričkim putem proračunatoj vrednosti parametra J -integrala (1300 N/mm) i dobijeni rezultati prikazani su u tabeli 5.4.

Tabela 5.4. Vrednosti parametra η_{pl} pri različitim vrednostima odnosa a_0/W .

Pri $J = 1300$ N/mm					
Za	$a_0/W=0.40$	$a_0/W=0.45$	$a_0/W=0.5$	$a_0/W=0.55$	$a_0/W=0.60$
η_{pl}	0.9712	0.8730	0.8119	0.7561	0.6892

Rezultati prikazani u tabeli 5.4 ukazuju da na vrednost parametra η utiče odnos a_0/W (za vrednosti od 0.40 do 0.60). Dobijene vrednosti za dva navedena postupka pokazale su razliku u rezultatima za približno 12% u korist parametra η_{pl} proračunatog preko površina A_{pl} .

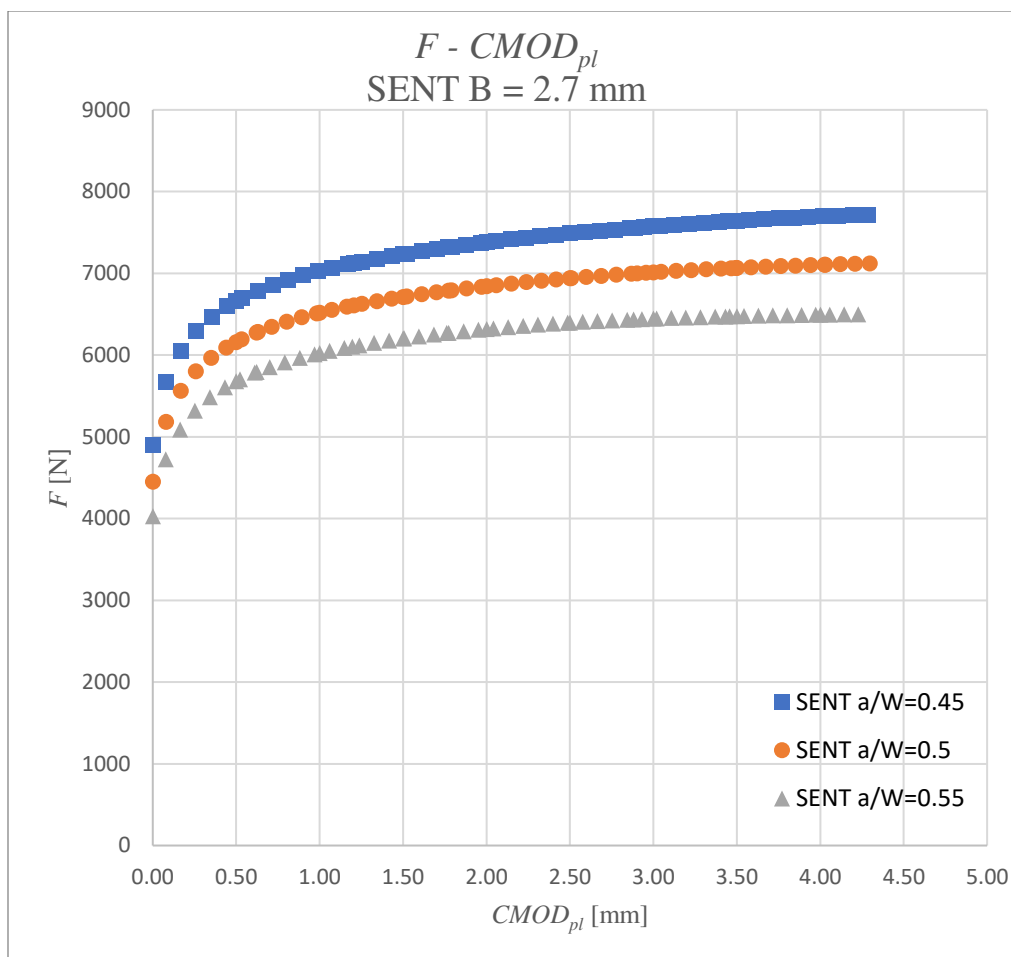
Isti proračun sproveden je i za model SENT sa identičnim poprečnim presekom kao u slučaju modela PRNT i definisanim istim podacima o ponašanju materijala. Na slici 5.19 prikazana je zavisnost sile od pomeranja za model SENT.



Slika 5.19. Zavisnost sile od plastične komponente pomeranja za model SENT ($a_0/W = 0.45; 0.5; 0.55$).

Maksimalne vrednosti sile sa smanjenjem odnosa a_0/W rastu, očekivano, pa je razlika između maksimalne vrednosti sile proračunate na modelu SENT $a_0/W = 0.45$ i 0.5 približno 8.5% dok je razlika tih sila između modela SENT $a_0/W = 0.5$ i 0.55 približno 9.5%. Dobijeni podaci o vrednostima sile u ovom slučaju takođe imaju ulogu u proračunu parametra S_{ij} .

Na slici 5.20 prikazana je zavisnost sile od $CMOD$, pri čemu je vrednost parametra $CMOD$ za sva tri slučaja dužine prsline približno jednaka.



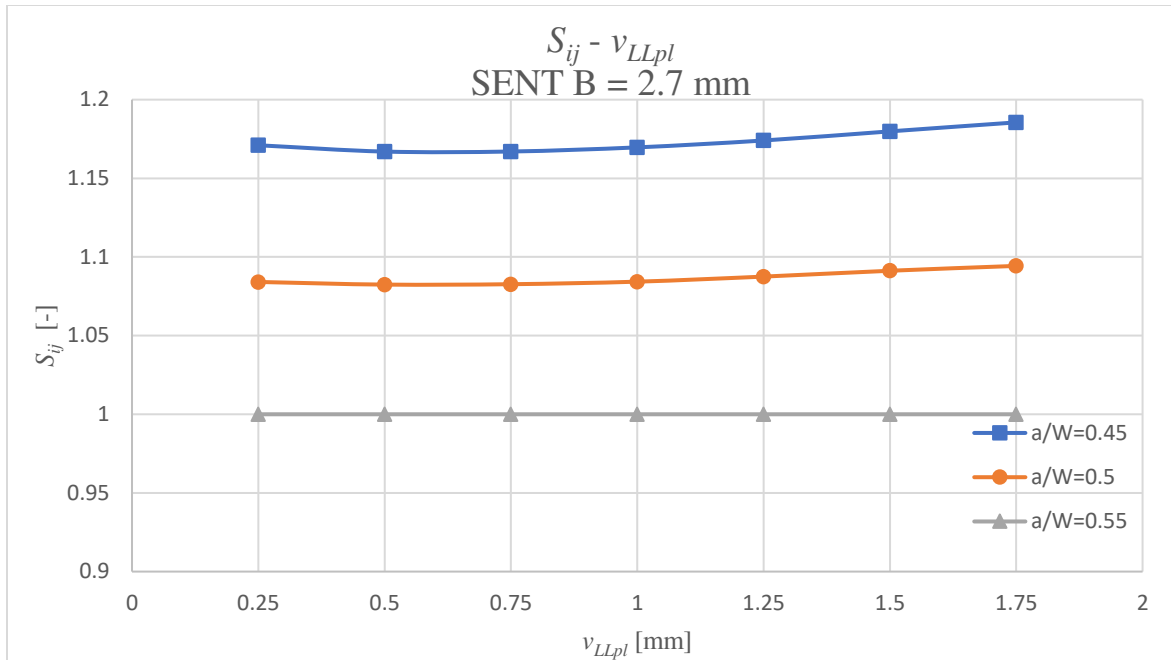
Slika 5.20. Zavisnost sile od plastične komponente $CMOD$ za model $SENT$ ($a_0/W = 0.45; 0.5; 0.55$).

U tabeli 5.5 prikazane su vrednosti parametra S_{ij} proračunate na osnovu dobijenih vrednosti sila u tačkama pomeranja navedenih u tabeli.

Tabela 5.5. Vrednosti parametra S_{ij} za definisane vrednosti plastične komponente pomeranja za model $SENT$.

v_{LLpl}	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75
$S_{ij} (a_0/W=0.45)$	1.170	1.166	1.167	1.169	1.174	1.179	1.185
$S_{ij} (a_0/W=0.5)$	1.084	1.082	1.082	1.084	1.087	1.091	1.094
$S_{ij} (a_0/W=0.55)$	1	1	1	1	1	1	1

Na slici 5.21 prikazana je vizualizacija rezultata iz tabele 5.5. Krive sa dijagrama ukazuju na nešto drugačiji odnos vrednosti sila u odnosu na parametar S_{ij} izračunat na modelu PRNT.

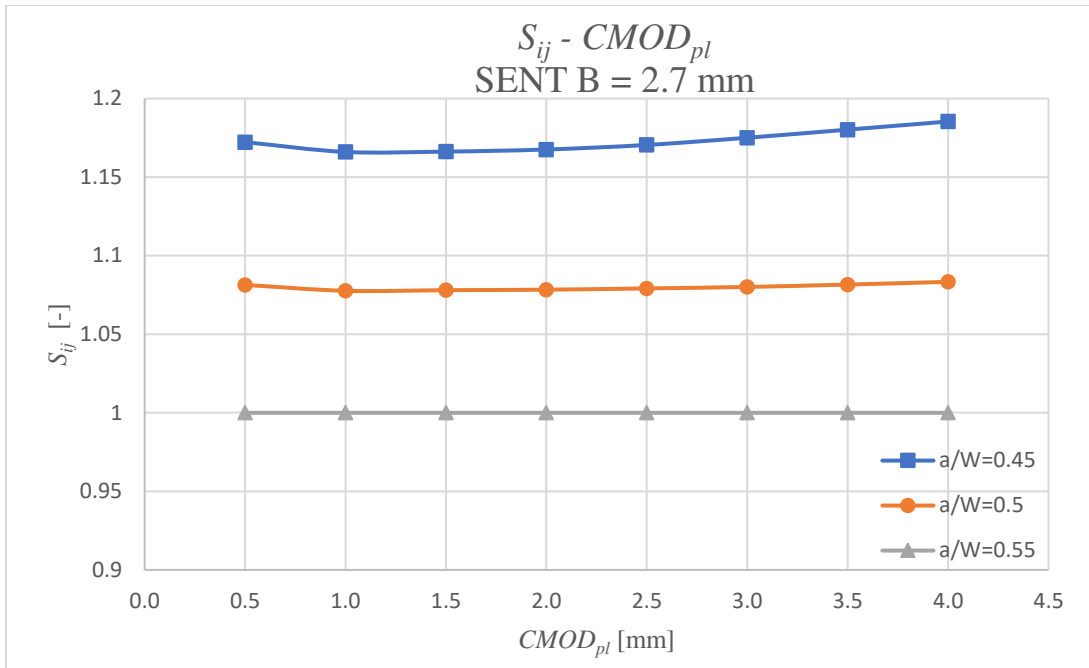


Slika 5.21. Zavisnost parametra S_{ij} od vrednosti plastične komponente pomeranja v_{LLpl} za model SENT.

Kao u slučaju proračuna parametra S_{ij} na modelu PRNT, vrednosti S_{ij} su i za model SENT birane na osnovu zavisnosti od parametra $CMOD$. Rezultati ovog proračuna prikazani su u tabeli 5.6 i vizualizovani na slici 5.22.

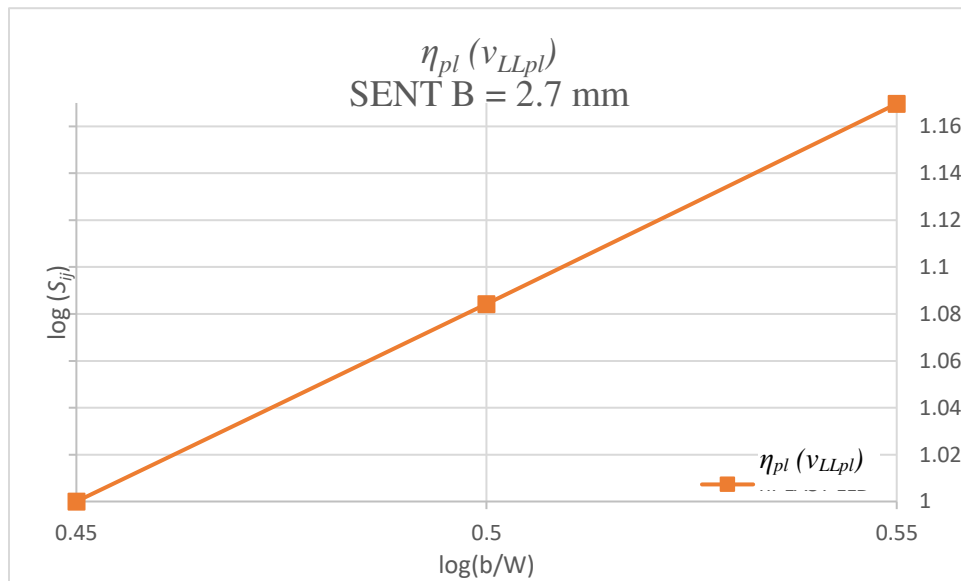
Tabela 5.6. Vrednosti parametra S_{ij} za definisane vrednosti plastične komponente parametra $CMOD$ za model SENT ($B = 2.70$).

$CMOD_{pl}$	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
S_{ij} ($a/W=0.45$)	1.172	1.166	1.166	1.167	1.170	1.175	1.180	1.185
S_{ij} ($a/W=0.5$)	1.081	1.077	1.078	1.078	1.079	1.080	1.081	1.083
S_{ij} ($a/W=0.55$)	1	1	1	1	1	1	1	1



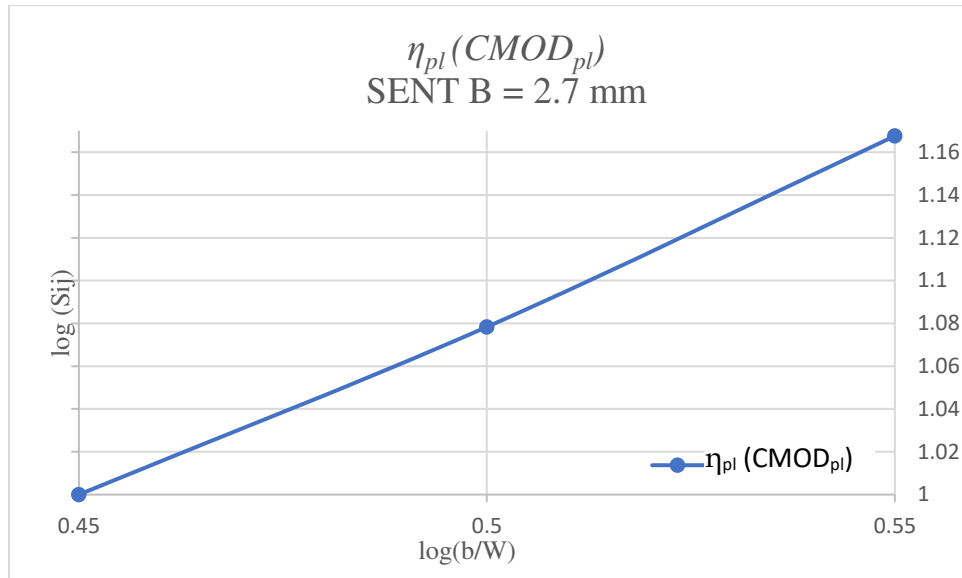
Slika 5.22. Zavisnost parametra S_{ij} od vrednosti plastične komponente parametra $CMOD$ za model SENT.

Na slici 5.23 dat je logaritamski prikaz zavisnosti parametra S_{ij} od odnosa širine ligamenta modela (b) i širine modela (W) čijim se izračunavanjem nagiba dobila vrednost parametra $\eta_{pl} = 0.7809$.



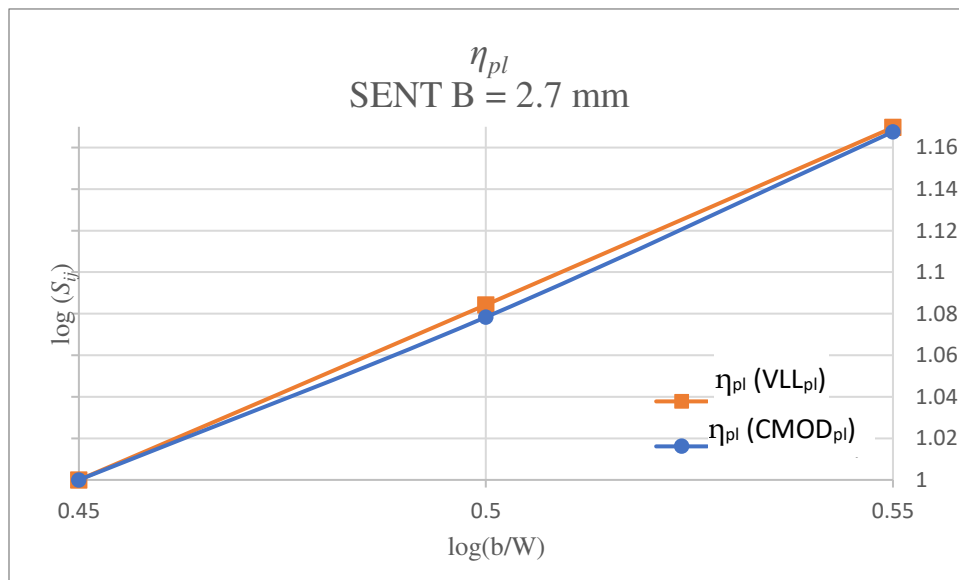
Slika 5.23. Logaritamski prikaz zavisnosti parametra S_{ij} od odnosa b/W (dobijenih na osnovu vrednosti pomeranja).

Na slici 5.24 nalazi se logaritamski prikaz parametra S_{ij} u zavisnosti od odnosa b/W čijim se izračunavanjem nagiba dobija vrednost od 0.7720, što odgovara vrednosti parametra η_{pl} .



Slika 5.24. Logaritamski prikaz zavisnosti parametra S_{ij} od odnosa b/W (dobijenih na osnovu vrednosti parametra $CMOD$).

Odstupanja koja se javljaju u navedena dva načina dobijanja parametra η_{pl} su manja od 1% što je u poređenju sa poklapanjem rezultata dobijenih za model PRNT čini znatno bolje poklapanje (slika 5.25).



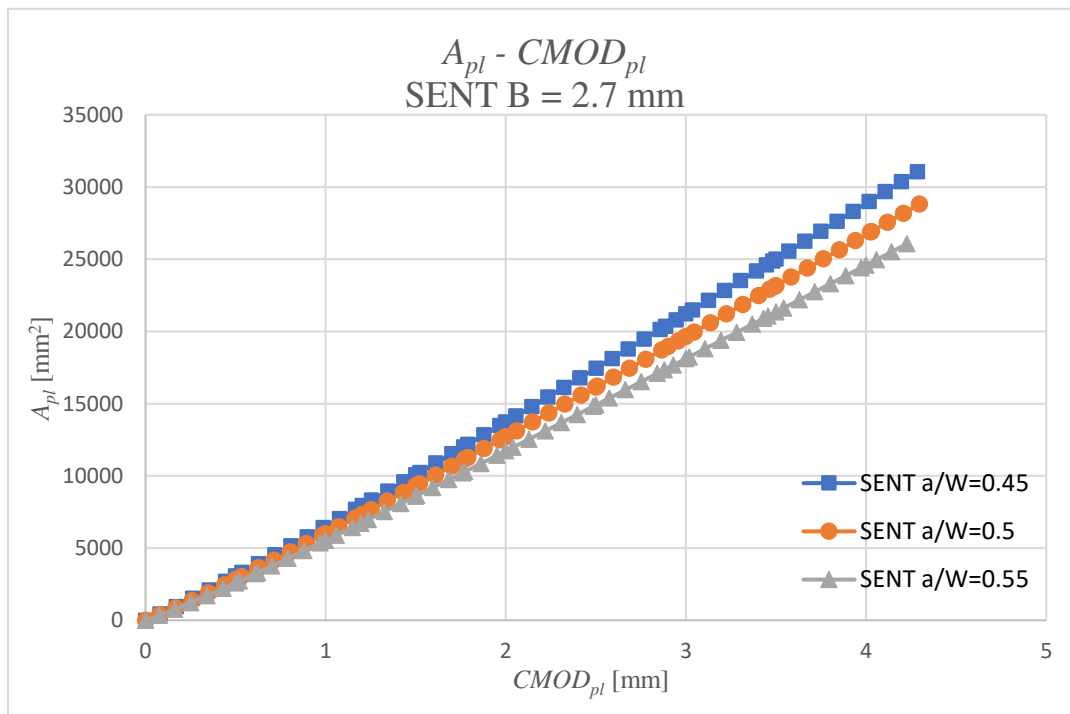
Slika 5.25. Uporedni logaritamski prikaz zavisnosti parametra S_{ij} od odnosa b/W za model SENT.

Vrednosti parametra η_{pl} dobijene na osnovu prikazana dva načina su u proseku za model SENT veće (Tabela 5.7). Poklapanja vrednosti η_{pl} dobijenih na osnovu parametra v_{LL} za PRNT i SENT model su približno 9% dok su za vrednosti η_{pl} dobijene na osnovu parametra $CMOD$ približno 6%.

Tabela 5.7. Vrednosti parametra η za model SENT ($B=2.70$ mm) računat preko parametara v_{LL} i $CMOD$.

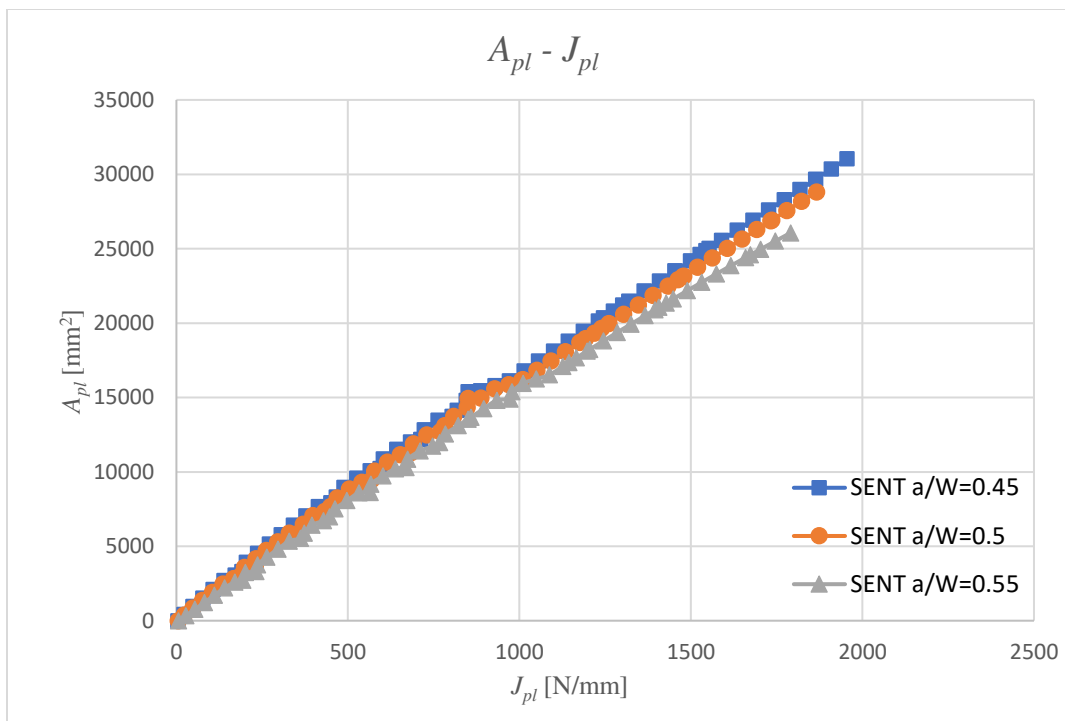
Model	SENT (v_{LL})	SENT ($CMOD$)
η_{pl}	0.7809	0.7720

Nastavak proračuna vrednosti parametra η_{pl} išao je u smeru njegovog određivanja na osnovu površina ispod dijagrama $F - CMOD_{pl}$ kao što je to bio slučaj i kod PRNT modela. Ova površina izračunata je takođe analitički nakon čega su rezultati prikazani u odnosu na parametar $CMOD_{pl}$ (slika 5.26) i J_{pl} (slika 5.27).



Slika 5.26. Zavisnost plastične komponente površine od plastične komponente parametra $CMOD$ za model SENT.

Na slici 5.27 prikazana je zavisnost parametra A_{pl} od J_{pl} pri čemu su vrednosti za plastične komponente J -integrala dobijene iz rezultata numeričkih proračuna i informacijama dobijenim kroz prethodne proračune.



Slika 5.27. Zavisnost plastične komponente površine od plastične komponente J -integrala za model SENT.

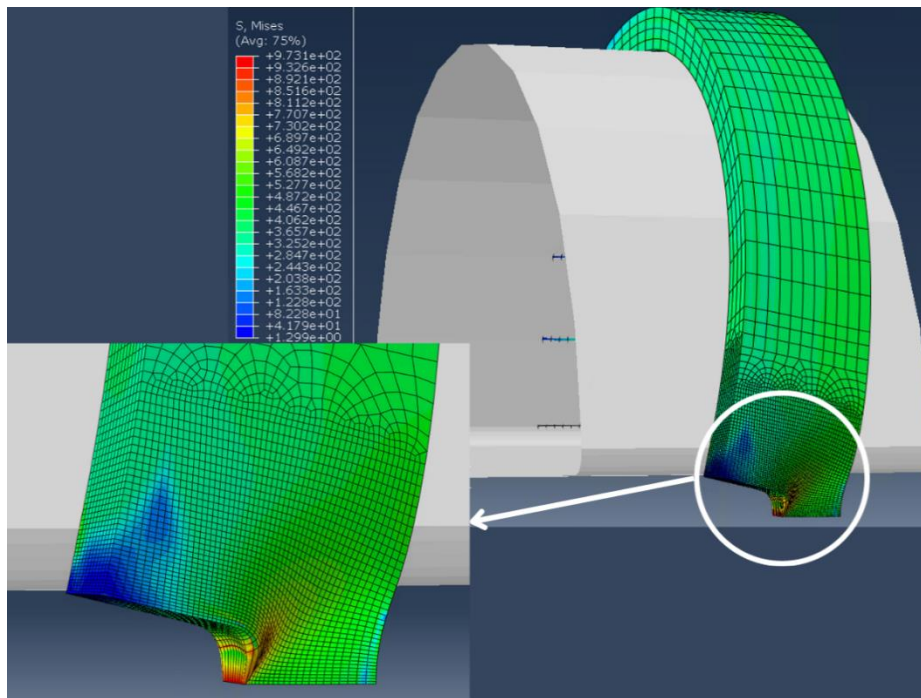
Nakon formiranja dijagrama proračunate su vrednosti parametra η_{pl} pri konstantnoj vrednosti J -integrala (1300 N/mm) i dobijeni rezultati prikazani su u tabeli 5.8.

Tabela 5.8 Vrednosti parametra η_{pl} pri različitim vrednostima odnosa a_0/W za model SENT

Pri $J = 1300$ N/mm			
Za	$a_0/W=0.45$	$a_0/W=0.5$	$a_0/W=0.55$
η_{pl}	0.9830	0.9203	0.8712

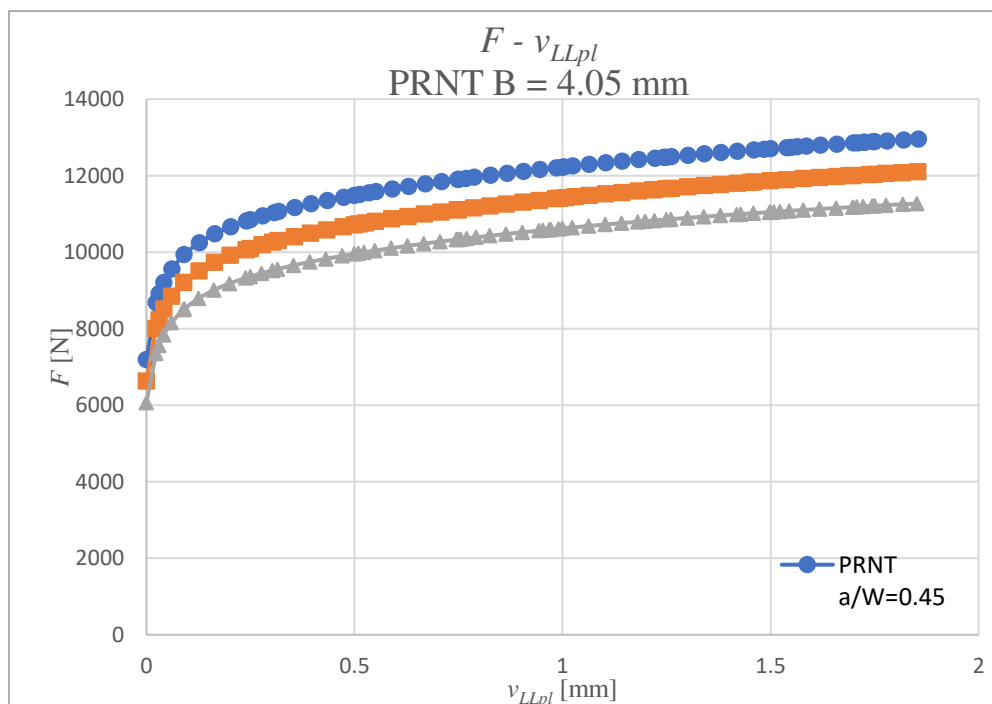
Rezultati prikazani u tabeli 5.8 ukazuju na nepoklapanje u vrednostima η_{pl} pri različitim odnosima a_0/W . Poklapanje sa rezultatom proračuna η_{pl} pri odnosu $a_0/W = 0.5$ kod proračuna parametra η_{pl} korišćenjem parametra $CMOD$ razlikuje se za približno 16 % (slika 5.27).

Nastavak numeričkih proračuna vršen je u smeru provere uticaja debljine zida na parametar η_{pl} radi čega je ponovljena procedura proračuna. Proračuni su rađeni na modelima PRNT i SENT sa varijacijom parametra B - debljine modela. U ovom slučaju parametar B je povećan za 50% što znači da debljina zida modela iznosi 4.05 mm (slika 5.28).



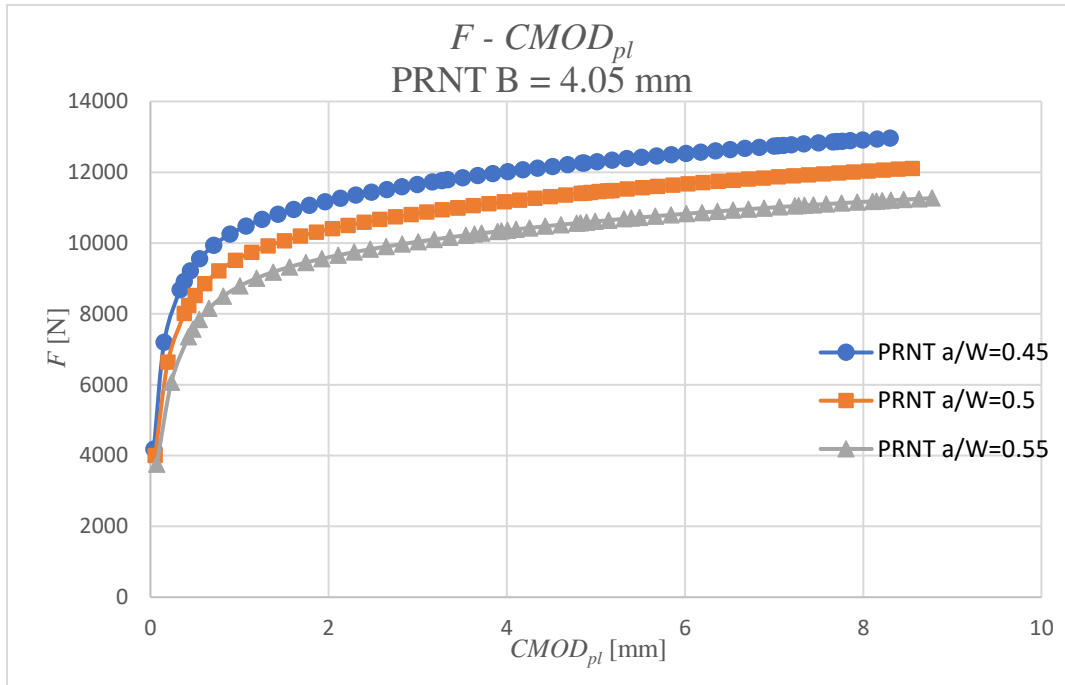
Slika 5.28. Raspodela ekvivalentnog von Misesovog napona na modelu PRNT ($B=4.05$ mm) sa svojstvima P235TR1 materijala.

Najpre su određene zavisnosti sile od pomeranja (slika 5.29) i sile od plastične komponente parametra $CMOD$ (slika 5.30).



Slika 5.29. Zavisnost sile od plastične komponente pomeranja za model PRNT ($a/W = 0.45; 0.5; 0.55$).

Na osnovu rezultata prikazanih na slici 5.29 možemo izvesti zaključak da model sa vrednošću $B = 4.05$ mm pokazuje približno istu razliku u maksimalnoj vrednosti sile u odnosu na model sa vrednošću $B = 2.7$ mm. Tako je razlika između modela $a_0/W = 0.45$ i 0.5 približno 7.2%, kao i između modela $a_0/W = 0.5$ i 0.55 . Rezultati prikazani na slikama 5.29 i 5.30 pre svega imaju ulogu u proračunu odnosa sile, odnosno parametra S_{ij} .

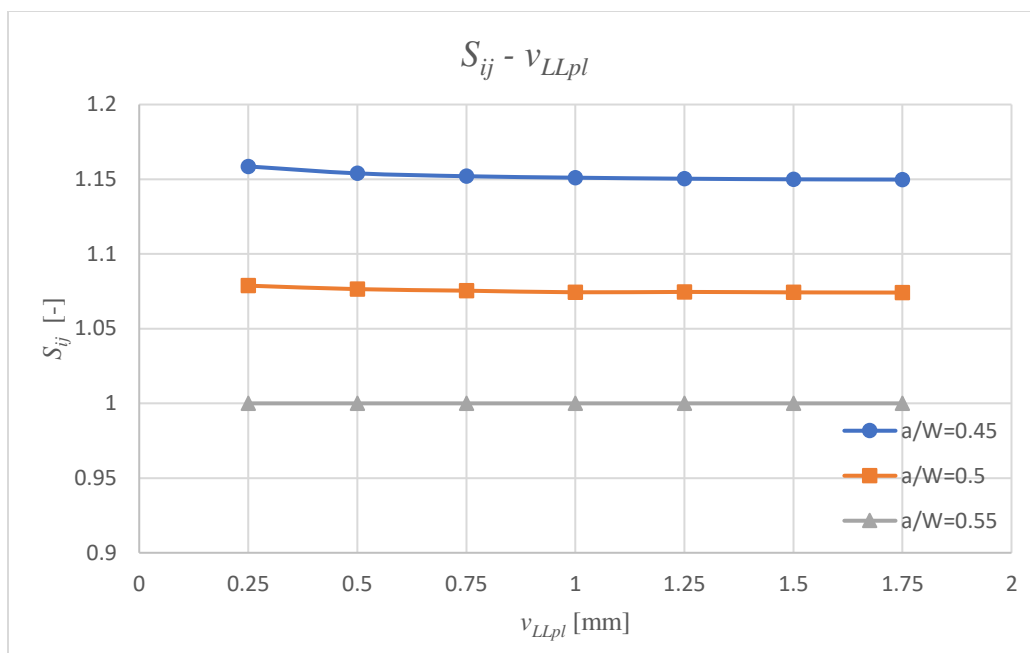


Slika 5.30. Zavisnost sile od plastične komponente parametra $CMOD$ za model PRNT ($a_0/W = 0.45; 0.5; 0.55$).

U tabeli 5.9 prikazane su vrednosti parametra S_{ij} za definisane vrednosti plastične komponente pomeranja za model PRNT čija se vizualizacija rezultata nalazi na slici 5.31.

Tabela 5.9. Vrednost parametra S_{ij} za definisane vrednosti plastične komponente pomeranja za model PRNT ($B = 4.05$ mm).

v_{LLpl}	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75
$S_{ij} (a_0/W=0.45)$	1.158	1.153	1.152	1.151	1.150	1.149	1.149
$S_{ij} (a_0/W=0.5)$	1.078	1.076	1.075	1.074	1.074	1.074	1.074
$S_{ij} (a_0/W=0.55)$	1	1	1	1	1	1	1



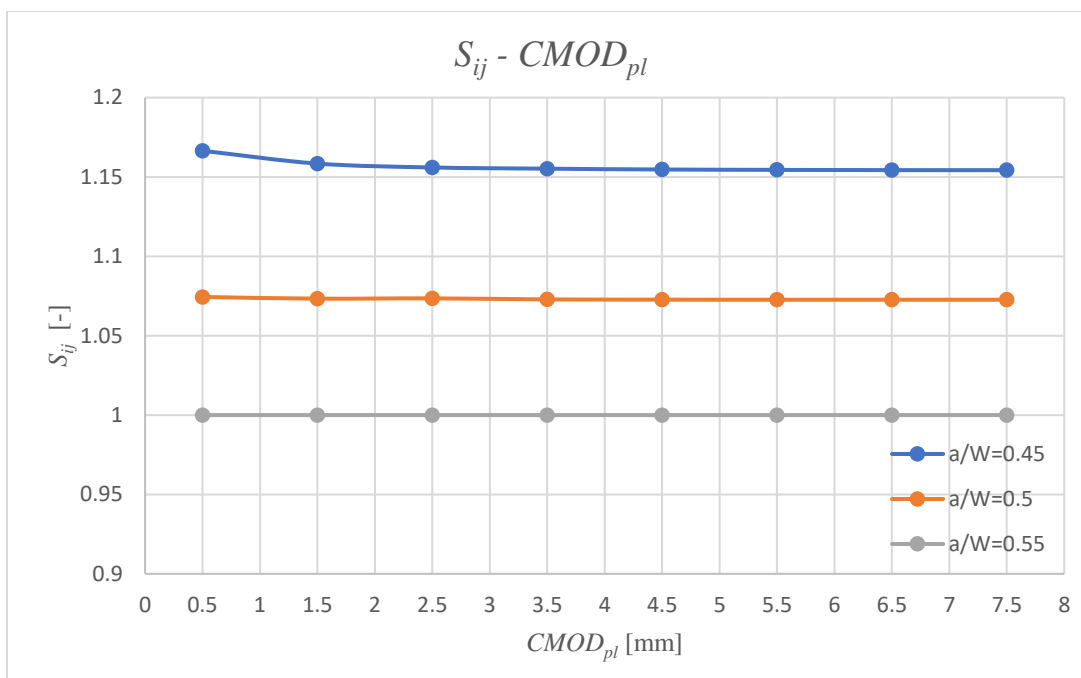
Slika 5.31. Zavisnost parametra S_{ij} od vrednosti plastične komponente pomeranja v_{LLpl} za model PRNT ($B = 4.05$ mm).

Vrednosti parametra S_{ij} dobijenih na osnovu definisanih vrednosti v_{LLpl} ukazuju na odnose sila dobijenih za definisane vrednosti odnosa a_0/W i ukazuju na određenu pravilnost kretanja vrednosti koja se javlja i kod modela PRNT $B = 2.70$ mm. Vrednosti parametra S_{ij} kod modela PRNT $B = 2.7$ mm i 4.05 mm nakon $v_{LLpl} = 0.75$ postaju ujednačene za oba modela i konstantne.

Tabela 5.10 Vrednosti parametra S_{ij} za definisane vrednosti plastične komponente parametra $CMOD$ za model PRNT $B = 4.05$ mm.

$CMOD_{pl}$	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5
S_{ij} ($a_0/W=0.45$)	1.166	1.158	1.155	1.155	1.154	1.154	1.154	1.154
S_{ij} ($a_0/W=0.5$)	1.074	1.073	1.073	1.072	1.072	1.072	1.072	1.072
S_{ij} ($a_0/W=0.55$)	1	1	1	1	1	1	1	1

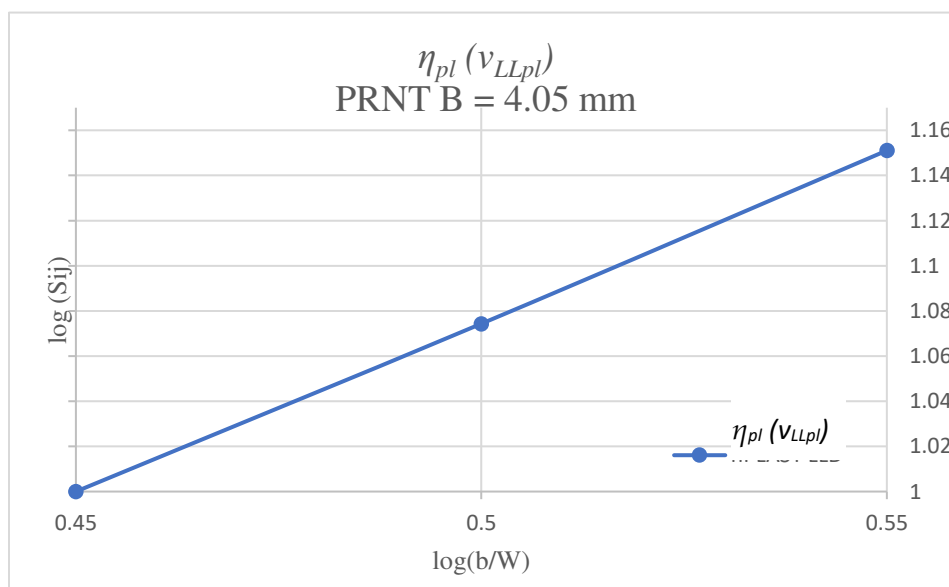
Vizualizacija dobijenih vrednosti parametra S_{ij} iz tabele 5.10 prikazana je na slici 5.32.



Slika 5.32. Zavisnost parametra S_{ij} od vrednosti plastične komponente parametra $CMOD_{vLLpl}$ za model PRNT ($B=4.05$ mm).

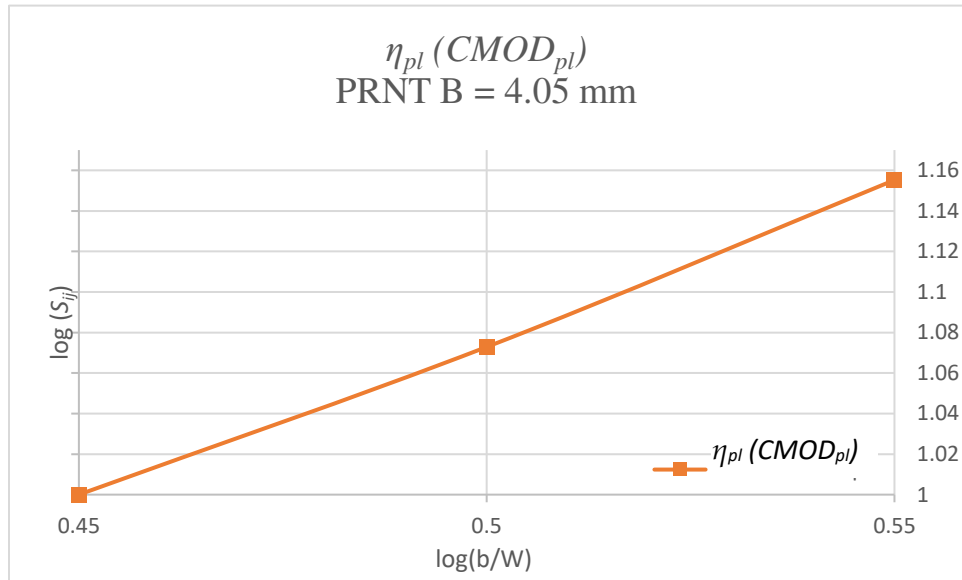
Na slici 5.32 prikazani rezultati takođe pokazuju određene pravilnosti koje se pojavljuju kod modela PRNT $B = 2.70$ mm. Uspostavljanje konstante vrednosti parametra S_{ij} u oba slučaja je pri vrednosti parametra $CMOD_{pl} = 2.5$ mm.

Na slici 5.33 dat je logaritamski prikaz zavisnosti parametra S_{ij} od odnosa širine ligamenta modela (b) i širine modela (W) čijim se izračunavanjem nagiba dobila vrednost parametra $\eta_{pl} = 0.7010$.



Slika 5.33. Logaritamski prikaz zavisnosti parametra S_{ij} od odnosa b/W (dobijenih na osnovu pomeranja).

Na slici 5.34 nalazi se logaritamski prikaz parametra S_{ij} u zavisnosti od odnosa b/W čijim se izračunavanjem nagiba dobija vrednost od 0.7190 što odgovara vrednosti parametra η_{pl} .

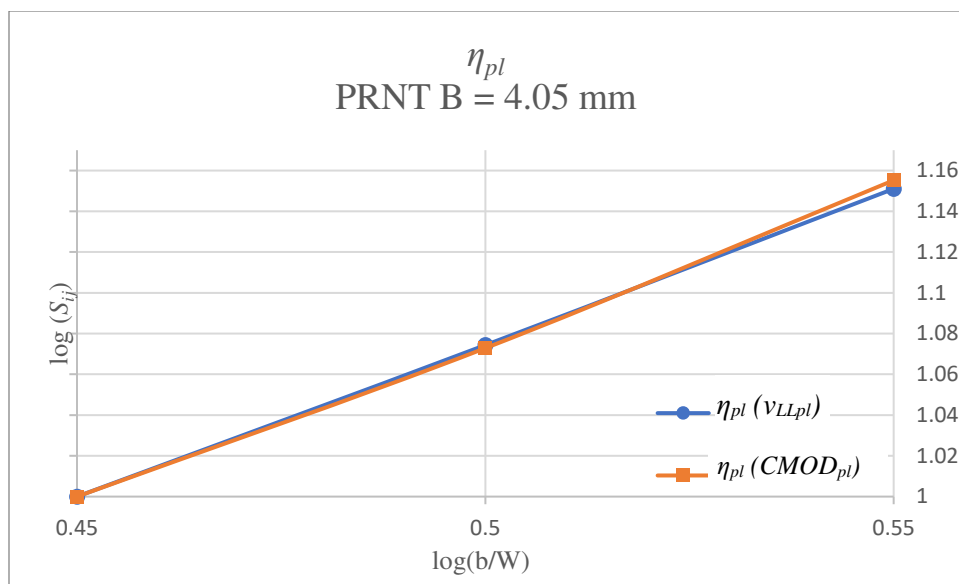


Slika 5.34. Logaritamski prikaz zavisnosti parametra S_{ij} od odnosa b/W (dobijenih na osnovu vrednosti parametra $CMOD$).

Odstupanja koja se javljaju u navedena dva načina dobijanja parametra η_{pl} su približno 3% (tabela 5.11) što u poređenju sa rezultatima dobijenim za model PRNT $B = 2.70$ mm čini nešto slabije poklapanje (slika 5.35).

Tabela 5.11. Vrednosti parametra η_{pl} za model PRNT ($B = 4.05$ mm) računata preko parametara v_{LL} i $CMOD$.

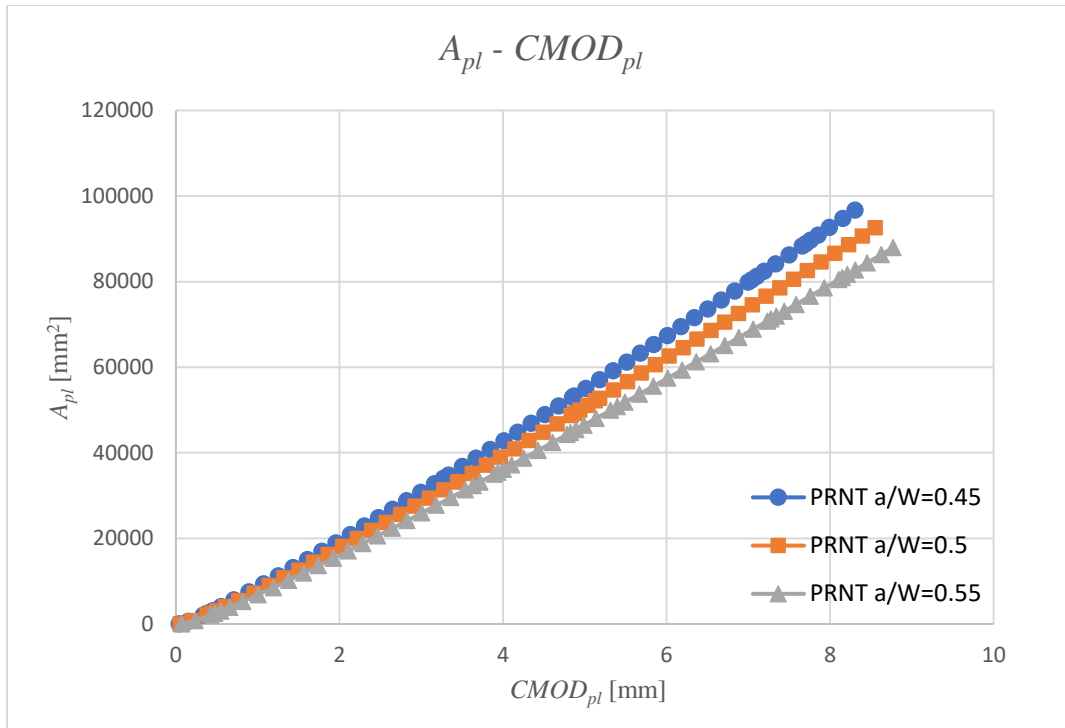
Model	PRNT (v_{LL})	PRNT ($CMOD$)
η_{pl}	0.7010	0.7190



Slika 5.35. Uporedni logaritamski prikaz zavisnosti parametra S_{ij} od odnosa b/W za model PRNT.

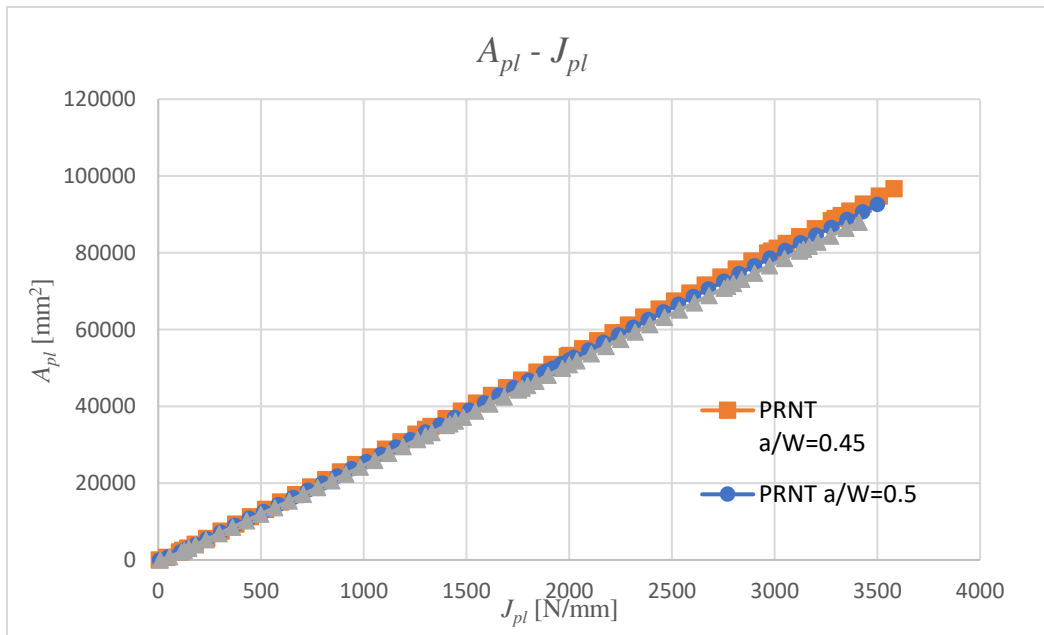
Vrednosti parametra η_{pl} za modele PRNT $B = 2.70$ mm i $B = 4.05$ mm se poklapaju u potpunosti kada se do njihove vrednosti dođe korišćenjem proračuna preko parametra $CMOD_{pl}$ dok se preko parametra vLL_{pl} one razlikuju za približno 1.5%.

Nastavak proračuna vrednosti parametra η_{pl} ponovo je išao u smeru njegovog određivanja na osnovu površina ispod dijagrama $F - CMOD_{pl}$ radi poređenja. Analitički izračunate površine ispod krivih su prikazane u odnosu na $CMOD_{pl}$ (slika 5.36) i J_{pl} (slika 5.37).



Slika 5.36. Zavisnost plastične komponente površine od plastične komponente parametra $CMOD$ za model PRNT ($B = 4.05$ mm).

Na slika 5.37 prikazana je zavisnost parametra A_{pl} od J_{pl} pri čemu su vrednosti plastične komponente J -integrala dobijene analitičkim putem i informacijama dobijenim kroz prethodne proračune.



Slika 5.37. Zavisnost plastične komponente površine od plastične komponente J -integrala za model PRNT ($B = 4.05$ mm).

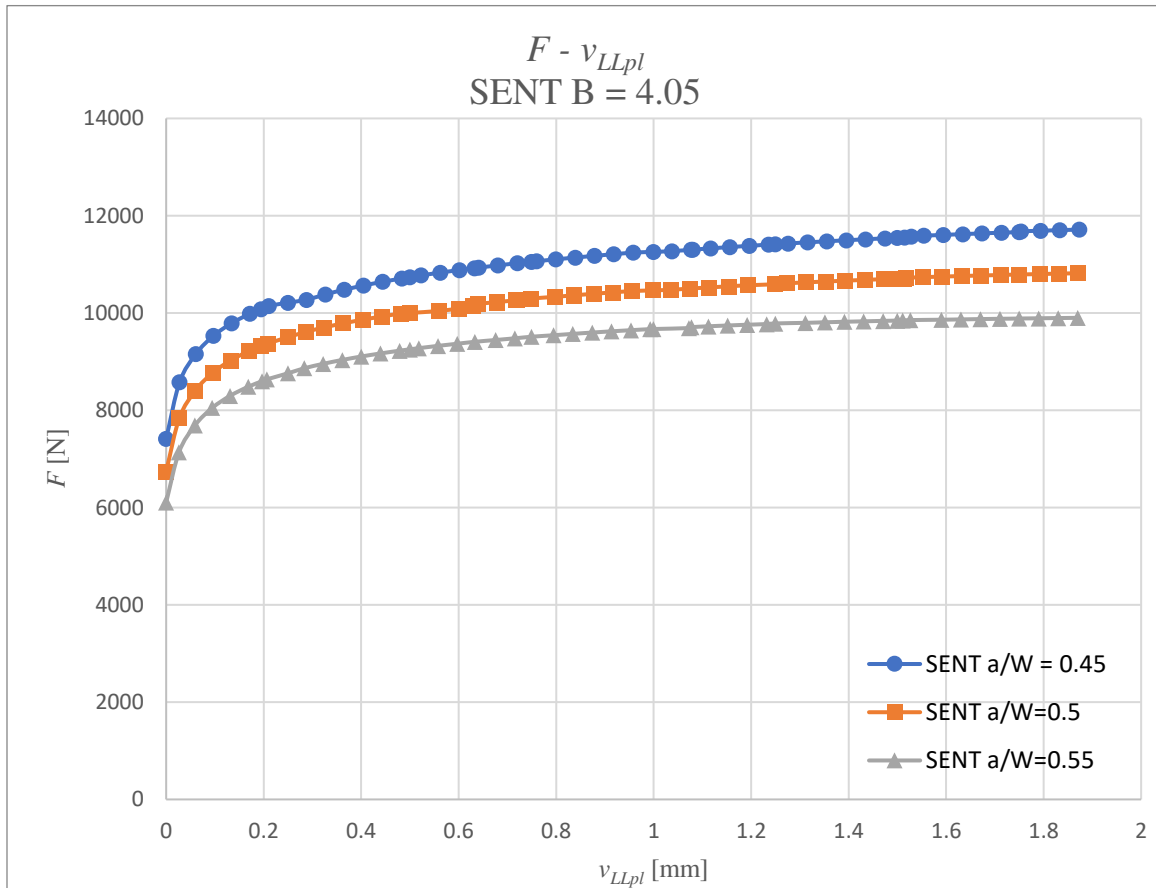
Nakon formiranja dijagrama proračunate su vrednosti parametra η_{pl} pri konstantnoj vrednosti J -integrala (1300 N/mm) i dobijeni rezultati prikazani su u tabeli 5.12.

Tabela 5.12. Vrednosti parametra η_{pl} pri različitim vrednostima odnosa a_0/W .

Pri $J = 1300$ N/mm			
Za	$a_0/W=0.45$	$a_0/W=0.5$	$a_0/W=0.55$
η_{pl}	0.9186	0.8546	0.7910

Dobijeni rezultati u poređenju sa rezultatima dobijenim istim postupkom za model PRNT $B = 2.70$ mm pokazuju poklapanje za sve tri vrednosti odnosa a_0/W sa razlikom od približno 7%. Razlika u rezultatima dobijenim preko parametra S_{ij} je približno 18 %.

Isti proračun sproveden je i za model SENT sa identičnim poprečnim presekom kao u slučaju prethodno obrađenog modela PRNT i definisanim istim podacima o ponašanju materijala. Na slici 5.38 prikazana je zavisnost sile od pomeranja za model SENT.

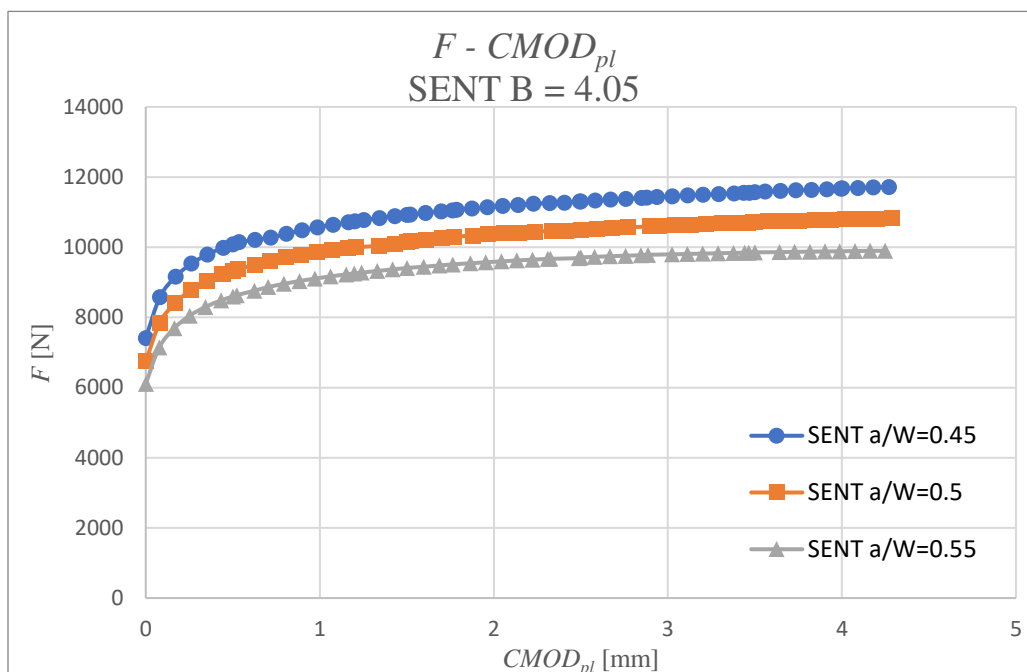


Slika 5.38. Zavisnost sile od plastične komponente pomeranja za model SENT ($a_0/W = 0.45; 0.5; 0.55$).

Maksimalne vrednosti sile sa smanjenjem odnosa a_0/W rastu, pa je razlika između maksimalne vrednosti sile proračunate na modelu SENT $a_0/W = 0.45$ i 0.5 približno 8.5%, dok je razlika tih sila između modela SENT $a_0/W = 0.5$ i 0.55 približno 9.5%. Dobijeni podaci o vrednostima sile u

ovom slučaju takođe imaju ulogu u proračunu parametra S_{ij} .

Na slici 5.39 prikazana je zavisnost sile od parametra $CMOD$, pri čemu je vrednost parametra $CMOD$ za sva tri slučaja dužine prsline približno jednaka.



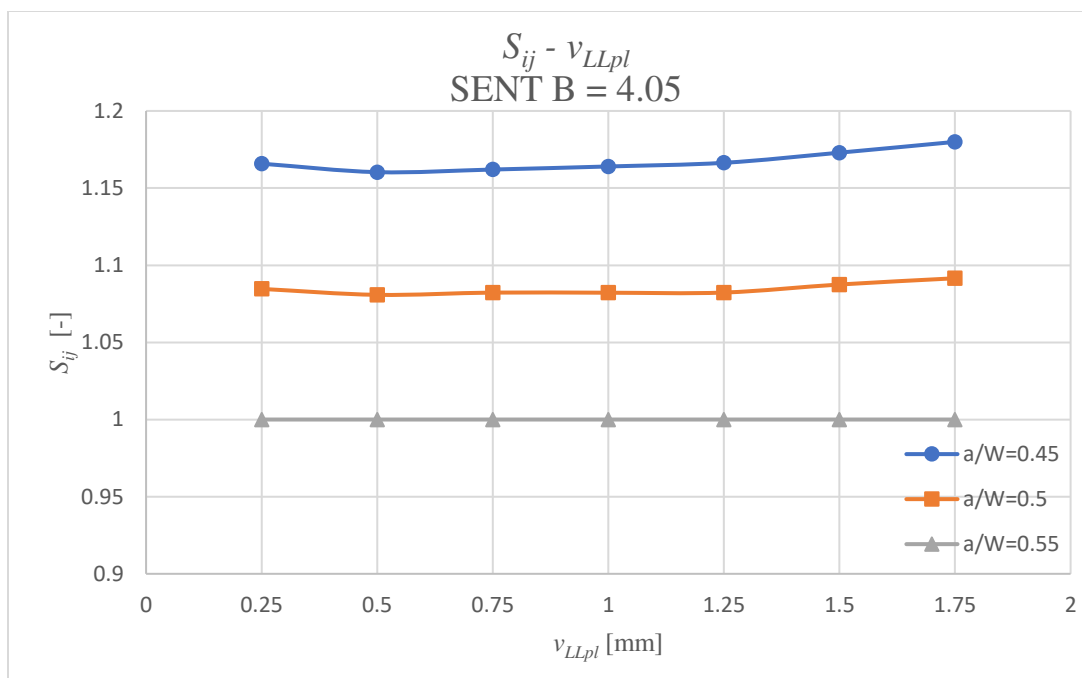
Slika 5.39. Zavisnost sile od plastične komponente parametra $CMOD$ za model SENT ($a_0/W = 0.45; 0.5; 0.55$).

U tabeli 5.13 prikazane su vrednosti parametra S_{ij} proračunate na osnovu dobijenih vrednosti sila u tačkama pomeranja navedenim u tabeli.

Tabela 5.13. Vrednost parametra S_{ij} za definisane vrednosti plastične komponente pomeranja za model SENT ($B = 4.05$).

vLL_{pl}	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75
$S_{ij} (a_0/W=0.45)$	1.165	1.160	1.162	1.164	1.166	1.172	1.179
$S_{ij} (a_0/W=0.5)$	1.084	1.080	1.082	1.082	1.082	1.087	1.091
$S_{ij} (a_0/W=0.55)$	1	1	1	1	1	1	1

Na slici 5.40 prikazana je vizualizacija rezultata iz tabele 5.13. Krive sa dijagrama ukazuju na nešto drugačiji odnos vrednosti sila u odnosu na vrednosti parametra S_{ij} proračunate na modelu PRNT ($B = 4.05$ mm).

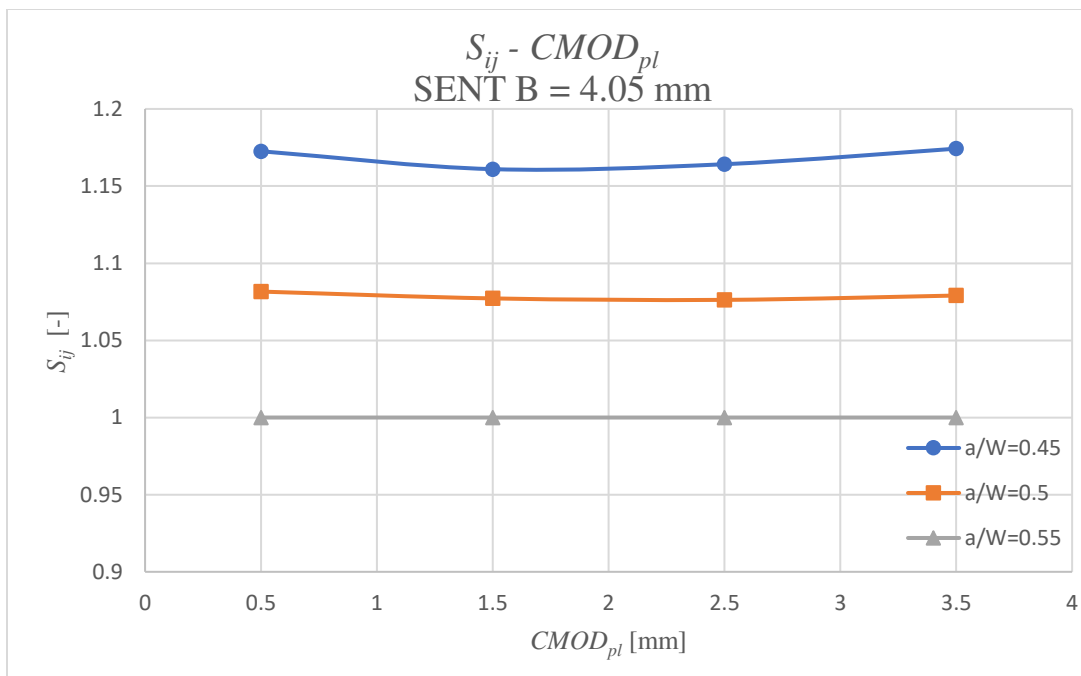


Slika 5.40. Zavisnost parametra S_{ij} od vrednosti plastične komponente pomeranja v_{LLpl} za model SENT.

Kao u slučaju proračuna parametra S_{ij} na modelu SENT ($B = 2.70$ mm), vrednosti S_{ij} su i za model SENT ($B = 4.05$) birane na osnovu zavisnosti od parametra $CMOD$. Rezultati ovog analitičkog proračuna prikazani su u tabeli 5.14 dok su isti vizualizovani na slici 5.41.

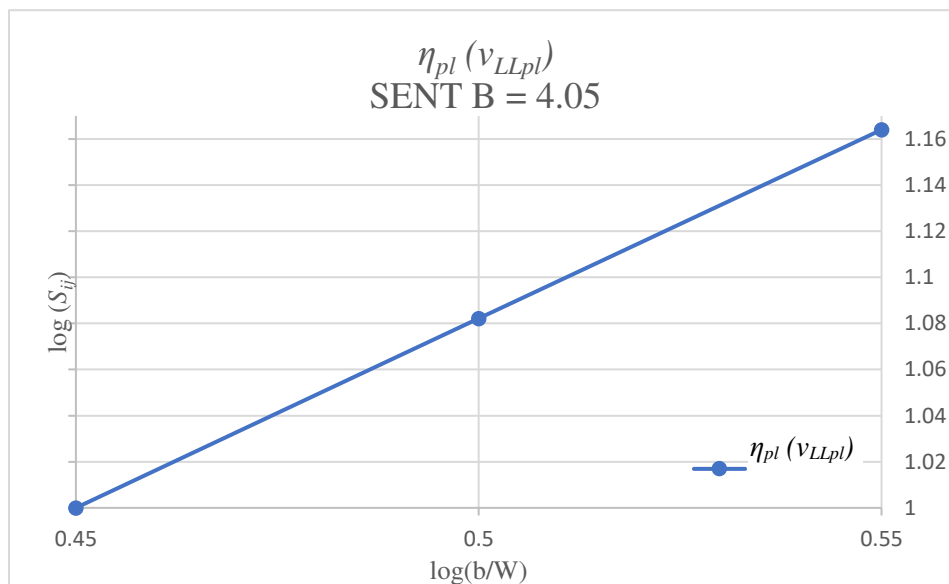
Tabela 5.14. Vrednosti parametra S_{ij} za definisane vrednosti plastične komponente parametra $CMOD$ za model SENT ($B = 4.05$).

$CMOD_{pl}$	0.5	1.5	2.5	3.5
S_{ij} ($a/W=0.45$)	1.172	1.160	1.164	1.174
S_{ij} ($a/W=0.5$)	1.081	1.077	1.076	1.079
S_{ij} ($a/W=0.55$)	1	1	1	1



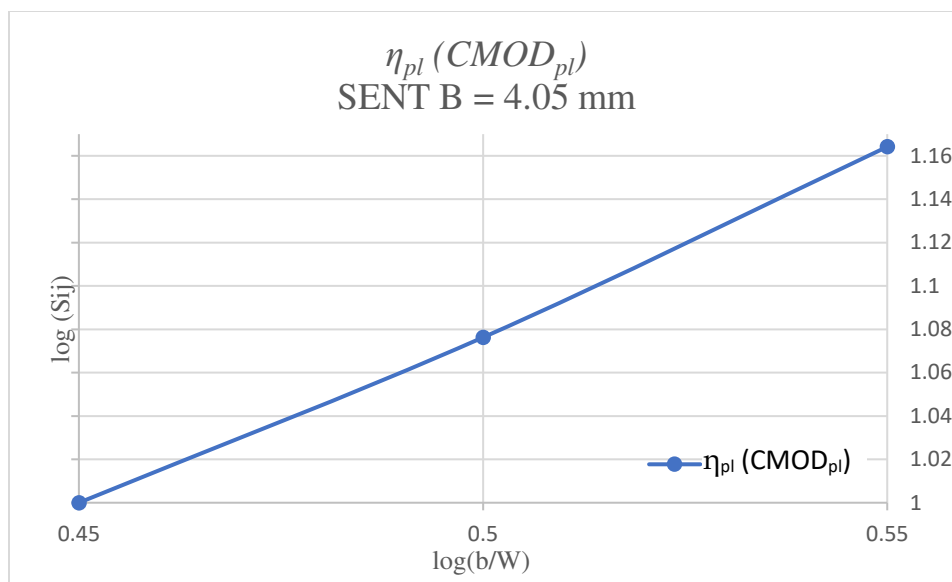
Slika 5.41. Logaritamski prikaz zavisnosti parametra S_{ij} od odnosa b/W (dobijenih na osnovu vrednosti pomeranja).

Na slici 5.42 dat je logaritamski prikaz zavisnosti parametra S_{ij} od odnosa širine ligamenta modela (b) i širine modela (W) čijim se izračunavanjem nagiba dobila vrednost parametra $\eta_{pl} = 0.7568$.



Slika 5.42. Logaritamski prikaz zavisnosti parametra S_{ij} od odnosa b/W (dobijenih na osnovu vrednosti pomeranja).

Na slici 5.43 nalazi se logaritamski prikaz parametra S_{ij} u zavisnosti od odnosa b/W čijim se izračunavanjem nagiba dobija vrednost od 0.8005 što odgovara vrednosti parametra η_{pl} .

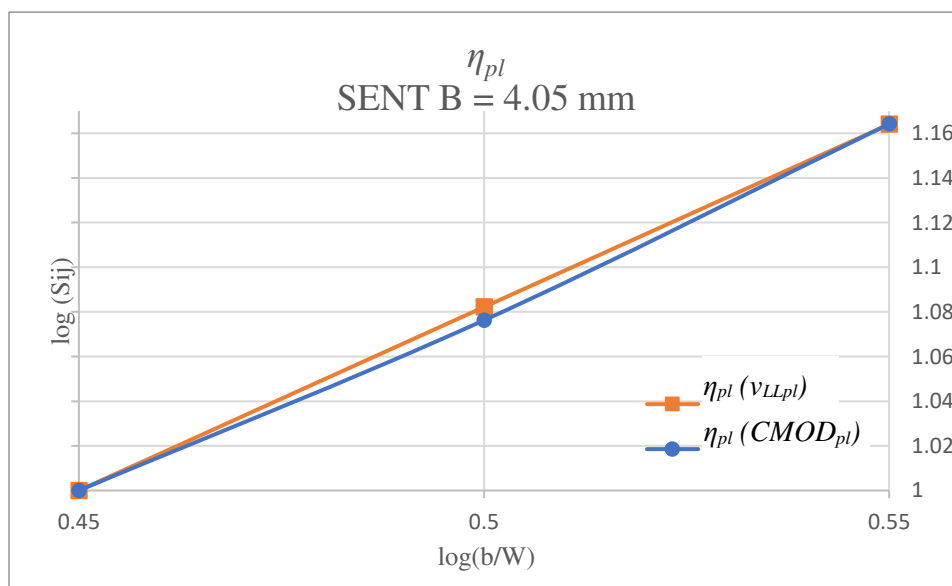


Slika 5.43. Logaritamski prikaz zavisnosti parametra S_{ij} od odnosa b/W (dobijenih na osnovu vrednosti parametra $CMOD$).

Odstupanja koja se javljaju u navedena dva načina dobijanja parametra η_{pl} su približno 5.5% (tabela 5.15) što je u poređenju sa poklapanjem rezultata dobijenih za model PRNT ($B = 4.05$ mm) čini gotovo dvostruko lošije poklapanje (slika 5.44).

Tabela 5.15. Vrednosti parametra η za model SENT ($B=4.05$ mm) računate preko parametara v_{LL} i $CMOD$

Model	SENT (v_{LL})	SENT ($CMOD$)
η_{pl}	0.7568	0.8005

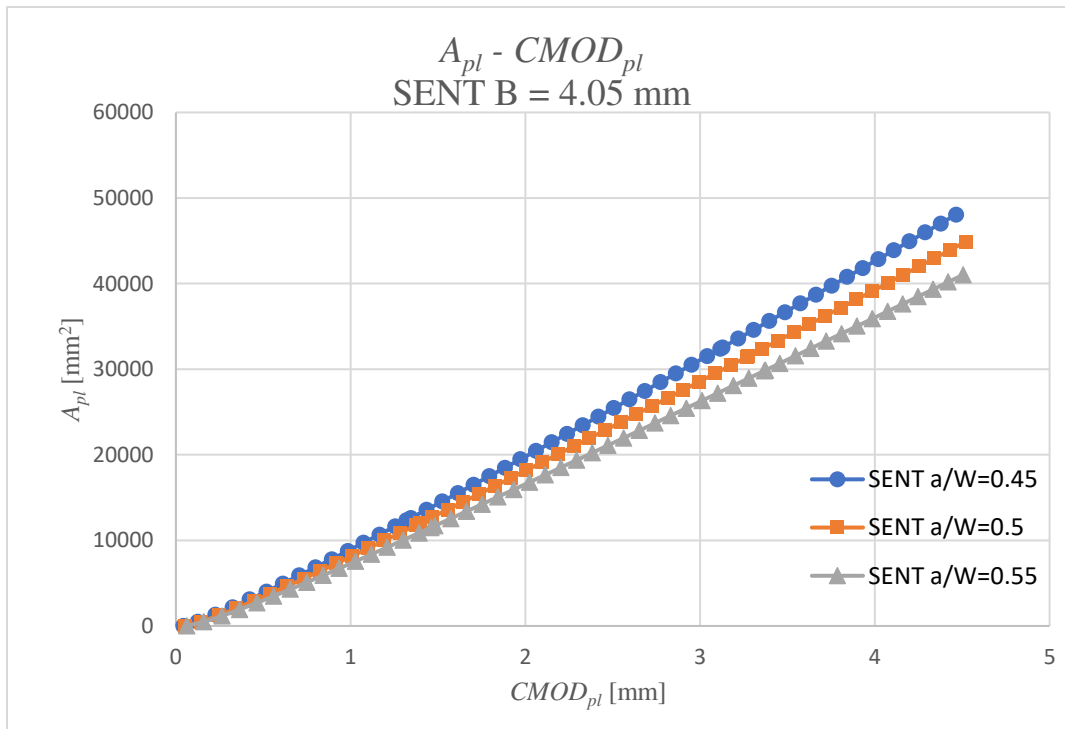


Slika 5.44. Usporedni logaritamski prikaz zavisnosti parametra S_{ij} od odnosa b/W za model

SENT.

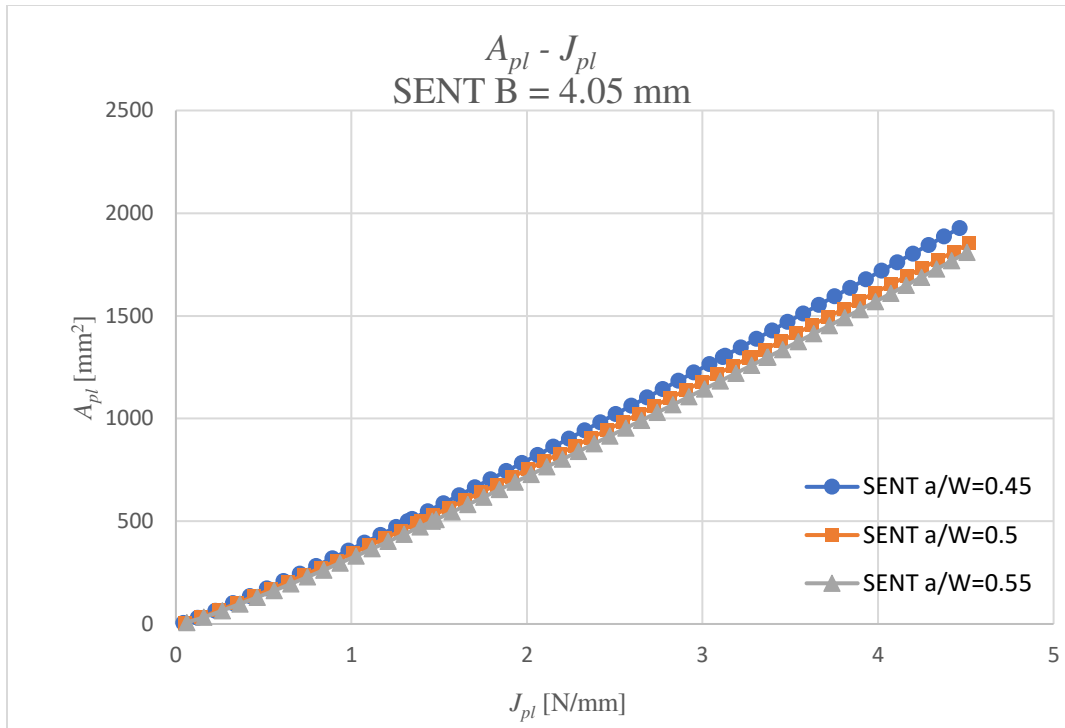
Vrednosti parametra η_{pl} dobijene na osnovu prikazana dva načina su u proseku za model SENT veće, kao što je to bio slučaj i za modele čija je debljina zida 2.70 mm. Poklapanja vrednosti η_{pl} dobijenih na osnovu parametra v_{LL} za PRNT i SENT model su približno 8% dok su za vrednosti η_{pl} dobijene na osnovu parametra $CMOD$ približno 10%, što je dva puta veće u odnosu na modele čija je debljina zida 2.70 mm.

Nastavak proračuna vrednosti parametra η_{pl} išao je u smeru njegovog određivanja na osnovu površina ispod dijagrama $F - CMOD_{pl}$ kao što je to bio slučaj i kod PRNT modela. Ova površina izračunata je takođe analitički nakon čega su rezultati ubačeni u odnos sa parametrima $CMOD_{pl}$ (slika 5.45) i J_{pl} (slika 5.46).



Slika 5.45. Zavisnost plastične komponente površine od plastične komponente parametra $CMOD$ za model SENT ($B = 4.05$ mm).

Na slici 5.46 prikazana je zavisnost parametra A_{pl} od J_{pl} , pri čemu su vrednosti plastične komponente J -integrala dobijene numeričkim proračunom kao u slučaju modela SENT ($B = 2.70$ mm).



Slika 5.46. Zavisnost plastične komponente površine od plastične komponente J -integrala za model SENT ($B = 4.05$ mm).

Nakon formiranja dijagrama proračunate su vrednosti parametra η_{pl} pri konstantnoj vrednosti J -integrala (1300 N/mm) i dobijeni rezultati prikazani su u tabeli 5.16.

Tabela 5.16. Vrednosti parametra η_{pl} pri različitim vrednostima odnosa a_0/W za model SENT ($B = 4.05$ mm).

Pri $J = 1300$ N/mm			
Za	$a_0/W = 0.45$	$a_0/W = 0.5$	$a_0/W = 0.55$
η_{pl}	0.9653	0.9027	0.8567

Dobijeni rezultati pokazuju uticaj odnosa a_0/W kao što je to bio slučaj i kod rezultata istog parametra dobijenog istom metodom proračuna za model SENT ($B = 2.70$ mm) dok je razlika između vrednosti dobijenih na ovaj način i pomoću parametra $CMOD_{pl}$ približno 11%.

Vrednosti parametra η_{pl} dobijenog analitičkim proračunom preko plastične komponente površina i plastične komponente J -integrala je kod modela PRNT pokazao bolje slaganje prilikom promene debljine zida modela u odnosu na SENT modele.

Kako bi se uvidela šira slika o uticaju dimenzija modela, nastavak numeričkih proračuna išao je u pravcu analize uticaja prečnika modela PRNT. Za te potrebe formiran je model PRNT sa većim unutrašnjim prečnikom a istom debljinom zida i širinom modela. U ovom slučaju unutrašnji prečnik modela povećan je za približno 50% što čini 124 mm, dok su odnosi a_0/W bili identični kao na ranijim modelima (0.45; 0.5; 0.55)

Proračuni parametra η_{pl} rađeni su na osnovu podataka o J -integralu iz Abaqusa i površina ispod

krive zavisnosti parametra $CMOD_{pl}$ od sile. U tabeli 5.17 prikazane su vrednosti parametra η_{pl} pri različitim vrednostima odnosa a_0/W .

Tabela 5.17. Vrednosti parametra η_{pl} pri različitim vrednostima odnosa a_0/W za model PRNT ($D = 124$ mm).

Pri $J = 1300$ N/mm			
Za	$a_0/W = 0.45$	$a_0/W = 0.5$	$a_0/W = 0.55$
η_{pl}	0.9294	0.8350	0.7826

Na isti način proračunate su i vrednosti za model PRNT čija je širina 16.4 mm, što čini približno 50% veću širinu u odnosu na početni model. Za ovaj model prikazane su vrednosti parametra η_{pl} u tabeli 5.18.

Tabela 5.18. Vrednosti parametra η_{pl} pri različitim vrednostima odnosa a_0/W za model PRNT ($W = 16.4$ mm)

Pri $J = 1300$ N/mm			
Za	$a_0/W = 0.45$	$a_0/W = 0.5$	$a_0/W = 0.55$
η_{pl}	0.8966	0.8352	0.7516

Dobijene vrednosti parametra η_{pl} za varijacije svake od dimenzija modela PRNT prikazane su u tabelama 5.4, 5.12, 5.17 i 5.18 a njihov uporedni prikaz dat je u tabeli 5.19.

Tabela 5.19. Vrednosti parametra η_{pl} za različite vrednosti W , B i D za PRNT i SENT modele

Pri $J = 1300$ N/mm	$\eta_{pl} (a_0/W = 0.45)$	$\eta_{pl} (a_0/W = 0.5)$	$\eta_{pl} (a_0/W = 0.55)$
PRNT ($D = 82.6$; $B = 2.70$; $W = 10.8$ mm)	0.8730	0.8119	0.7561
PRNT ($D = 82.6$; $B = 2.70$; $W = 10.8$ mm) dve prsline	0.8932	0.8322	0.7386
SENT ($L = 80$; $B = 2.70$; $W = 10.8$ mm)	0.9830	0.9203	0.8712
PRNT ($D = 82.6$; $B = 4.05$; $W = 10.8$ mm)	0.9186	0.8546	0.7910
SENT ($L = 80$; $B = 4.05$; $W = 10.8$ mm)	0.9653	0.9027	0.8567
PRNT ($D = 124$; $B = 2.70$; $W = 10.8$ mm)	0.9294	0.8350	0.7826
PRNT ($D = 82.6$; $B = 2.70$; $W = 16.2$ mm)	0.8966	0.8352	0.7516

Na osnovu rezultata iz tabele 5.19. uviđa se jasan trend opadanja vrednosti parametra η_{pl} sa povećanjem vrednosti odnosa a_0/W kod PRNT sa jednom i dve prsline kao i kod modela SENT.

Proračuni rađeni na modelima PRNT sa jednom i dve naspramne prsline dali su vrednosti parametra η_{pl} sa razlikom ne većom od 2.5% u šta se uklapaju i vrednosti za model PRNT sa jednom prslinom i širinom za 50% većom. Kod modela sa većim prečnikom ($D=124$ mm) vrednosti parametra η_{pl} su veće u odnosu na model sa istim poprečnim presekom ali manjim prečnikom za ne više od 6.5%.

Variranje debljine zida između modela sa istim prečnikom i širinom dalo je takođe približne rezultate koji ne variraju više od 5.5%. Približno isti uticaj imalo je variranje debljine zida i kod modela SENT.

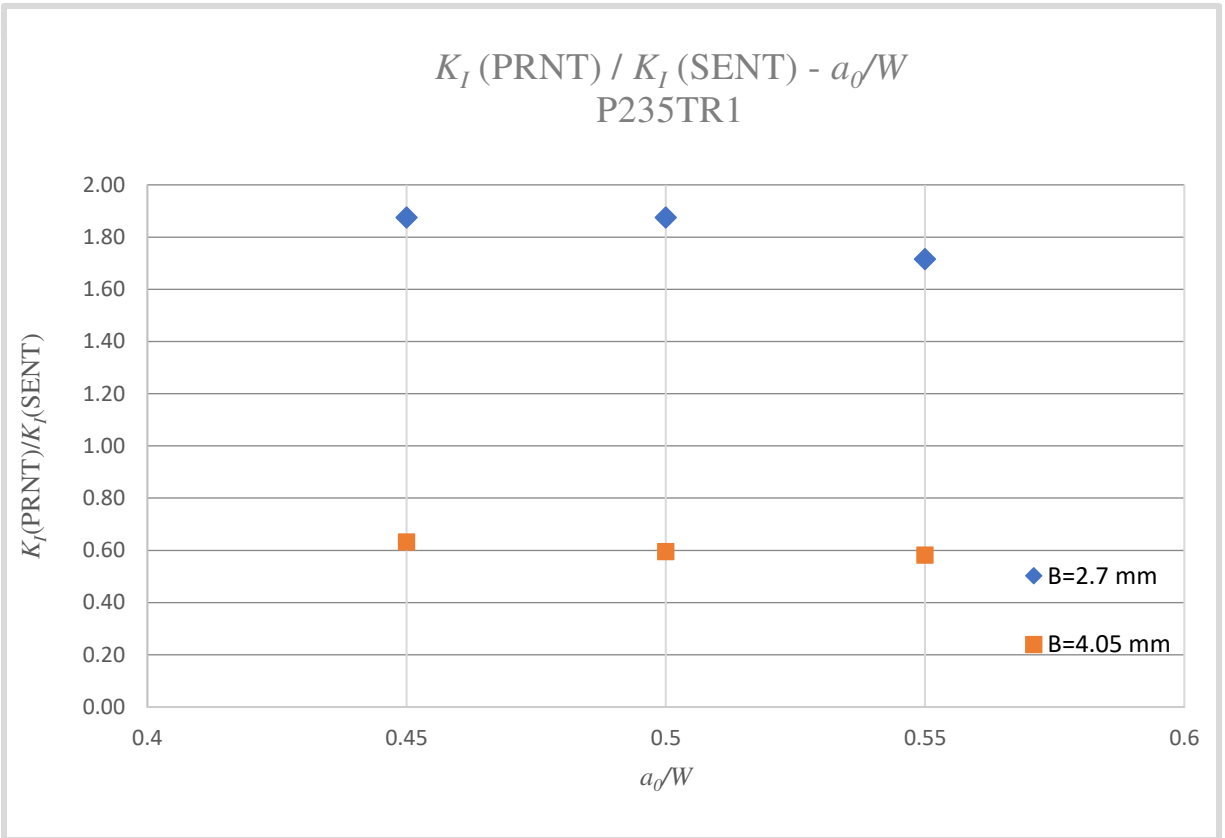
Vrednosti parametra η_{pl} dobijene proračunom za model SENT veće su za 13-15% ($B = 2.7$ mm) i 5-8% ($B = 4.05$ mm) od vrednosti istog parametra za model PRNT pri istom poprečnom preseku.

Parametri γ i η_{pl} analitičkim putem izračunati su korišćenjem izraza (5.1) i (5.2).

$$\eta = 1.7658 - 2.65(a/W) + 1.48(a/W)^2 \quad (5.1)$$

$$\gamma = 3.381 - 4.004(a/W) + 0.614(a/W)^2 \quad (5.2)$$

Na osnovu dobijenih vrednosti J -integrala za PRNT i SENT epruvete čiji je poprečni presek isti a debljina zida $B = 2.70$ mm i $B = 4.05$ mm izračunate su vrednosti faktora intenziteta napona. Kao što je bio slučaj kod modela sa definisanim linearno-elastičnim ponašanjem materijala (PA12, slika 5.7), na slici 5.47 prikazan je odnos vrednosti faktora intenziteta napona ove dve geometrije.



Slika 5.47. Odnos faktora intenziteta napona modela PRNT i SENT ($a_0/W = 0.45; 0.50; 0.55$) pri različitim debljinama zida modela.

Odnosi faktora intenziteta napona PRNT i SENT modela za materijal P235TR1 pokazuju značajno veću razliku u vrednosti za različite dimenzije debljine zida što nije slučaj kod modela sa svojstvima polimera PA12. Pored toga, razlika u vrednostima ovih odnosa između modela sa različitim odnosom a_0/W je za modele sa svojstvima materijala P235TR1 značajno manja u odnosu na modele sa svojstvima materijala PA12 ali uz isti trend opadanja vrednosti sa rastom odnosa. Uticaj na ove razlike najverovatnije čini prisustvo plastičnosti metalnih materijala.

6. Zaključci

U okviru ove disertacije rađena su eksperimentalna i numerička istraživanja epruveta oblika prstena sa oštrim žlebom opterećenih na zatezanje proizvedenih tehnikama aditivne proizvodnje od polimernih materijala PLA i PA12, kao i epruveta dobijenih iz cevi od materijala (čelika za opremu pod pritiskom) P235TR1 i P235GH. Na osnovu rezultata eksperimentalne i numeričke analize navedenih epruveta i njihovih numeričkih 3D modela mogu se izvesti sledeći zaključci.

Epruvete proizvedene FDM tehnikom od PLA materijala pokazale su krta svojstva materijala, naročito one proizvedene 14 dana pre ispitivanja. Vrednosti parametara $CMOD$ i $CTOD-\delta_5$ je u ovom slučaju bilo moguće pratiti samo na nekoliko epruveta starih 1 dan, gde je otkaz materijala praćen otkazom jedne po jedne niti materijala. Rezultat ispitivanja ovih epruveta postavio je osnovu za dalja istraživanja. Izrada epruveta FDM tehnikom je u ovom slučaju dala veliku prednost u brzini izrade epruveta i uspostavljanja procedure za ispitivanje PRNT epruveta. Međutim, može se zaključiti da zbog nepravilnog rasta prsline i načina otkaza ovaj polimer (PLA izrađen primenom FDM tehnike) nije pogodan za ispitivanja koja uključuju analizu loma i oštećenja materijala.

Za razliku od epruveta dobijenih FDM tehnikom, epruvete dobijene SLS tehnikom aditivne proizvodnje od materijala (polimera) PA12 pokazale su svojstva daleko povoljnija za određivanje parametara mehanike loma. Rezultati dobijeni eksperimentalnim ispitivanjem epruveta pokazali su svojstva koja zadovoljavaju potrebe definisanja metode u pogledu optičkih ispitivanja metodom DIC. Na ovim epruvetama uspešno su izmereni parametri $CTOD-\delta_5$, $CMOD$ i Δa kao i raspodela ekvivalentnog von Misesovog napona. Merenja su pokazala da su vrednosti parametara $CMOD$ i $CTOD-\delta_5$ dobijene na PRNT epruvetama najmanje 20% manje u odnosu na vrednosti ovih parametara dobijenih na SENT epruvetama. PRNT epruvete pokazale su veću vrednost odnosa parametra $CTOD-\delta_5$ i Δa u odnosu na SENT epruvete, što znači da trenutnoj dužini prsline odgovaraju veće vrednosti $CTOD-\delta_5$. Kod obe grupe epruveta, rast prsline je praćen primenom beskontaktnog merenja (DIC), pri čemu je kriterijum za rast prsline bila vrednost deformacije dostignuta ispred trenutnog vrha prsline. Dodatna istraživanja na ovu temu bi mogla da daju vrednosti faktora intenziteta napona za još širi raspon geometrija i osobina materijala, za šta je u disertaciji postavljena osnova.

Profil vrednosti faktora intenziteta napona duž fronta prsline kod PRNT epruveta se značajno razlikuje od profila vrednosti kod SENT epruveta, što je pokazano primenom metode konačnih elemenata. Maksimalne vrednosti K_I kod PRNT epruveta dostižu se na približno 10% rastojanja po debljini epruvete od unutrašnje cilindrične površine, dok je kod SENT modela maksimalna vrednost konstantna na velikom delu dužine fronta i ima simetričan oblik u odnosu na ravan simetrije epruvete.

Pokazano je da odnos početne dužine koncentratora napona i širine prstena a_0/W utiče na odnos $K_{I(PRNT)}/K_{I(SENT)}$, čija se vrednost povećava sa smanjenjem odnosa a_0/W . Variranje debljine zida modela nije rezultiralo velikim promenama u trendu vrednosti odnosa $K_{I(PRNT)}/K_{I(SENT)}$, ali jeste dalo nešto veće odstupanje za najveću debljinu zida pri najvećem odnosu a_0/W .

Eksperimentalna ispitivanja standardnih epruveta za zatezanje i epruveta oblika prstena (bez koncentratore napona) od materijala P235TR1 pokazala su razliku u vrednostima napona tečenja

i zatezne čvrstoće 16%, odnosno 21%. Veće vrednosti dobijaju se ispitivanjem standardnih epruveta sečenih iz uzdužnog pravca cevi; dva su moguća razloga za ovakav trend rezultata. Prvi je zakrivljenost geometrije oblika prstena, koja rezultira nesimetričnim poljima napona i deformacija duž debljine zida, a drugi je anizotropija materijala, tj. razlika zateznih osobina u uzdužnom i obimnom pravcu. Može se reći da je nestandardne epruvete oblika prstena PRNT najbolje koristiti u kombinaciji sa standardnim epruvetama, npr. onima za određivanje zateznih svojstava materijala. Ukoliko se radi o cevima sa debelim zidom, moguće je koristiti i standardne i nestandardne epruvete mehanike loma, što čini ispitivanje znatno složenijim ali može dati izolovan uticaj geometrije epruvete na otpornost prema lomu.

Ispitivanjem epruveta sa dva oštra žleba dobija se (u nekim slučajevima) donekle nepredvidivo ponašanje, u smislu strane na kojoj će doći do otkaza materijala, što otežava primenu optičke metode merenja. Naime, ukoliko do otkaza dođe na strani koja se ne snima DIC sistemom, tada se ne dobijaju merodavna polja pomeranja, deformacija, kao ni vrednosti geometrijskih parametara mehanike loma (CMOD i CTOD). Epruvete sa jednim oštrim žlebom i dva oštra žleba su pokazale slično ponašanje pri deformisanju i lomu, pa se tako za buduća ispitivanja mogu koristiti epruvete samo sa jednim oštrim žlebom, pre svega zbog snimanja sistemima zasnovanim na DIC metodi. Ovo je značajna prednost PRNT epruvete u poređenju sa PRNB epruvetom, koja je takođe oblika prstena ali opterećena na savijanje, kod koje su dva koncentrata napona obavezna.

Za određivanje parametara $CMOD$, $CTOD-\delta_5$ i Δa epruvete sa većom širinom pokazale su se kao pogodnije za merenje, i njihovim ispitivanjem dobija se bolja vizuelna kontrola u toku opterećivanja epruveta.

Primenom metode normalizacije dobijene su krive rasta prsline, $CTOD-\delta_5 - \Delta a$ za eksperimentalno ispitane epruvete koje su imale stabilan rast prsline. Na ovaj način, ispitivanjem PRNT epruveta određen je uticaj broja žlebova (jedan, odnosno dva) i osobina materijala na otpornost prema rastu prsline materijala cevovoda.

Numerički modeli sa svojstvima materijala P235TR1 pokazali su manje izražen uticaj odnosa a_0/W na odnos $K_{I(PRNT)}/K_{I(SENT)}$, dok je promena debljine zida modela imala značajan uticaj. Za modele sa debljim zidom vrednosti K_I za SENT modele bile su veće od istih za PRNT modele.

Numeričkim proračunom dobijene su vrednosti korekcionog faktora η_{pl} , na dva načina. Vrednosti dobijene izračunavanjem parametra S_{ij} (metodom razdvajanja opterećenja) su između modela SENT i PRNT istog poprečnog preseka pokazale razliku ne veću od 10% gde su vrednosti za SENT modele bile veće. Povećanje debljine zida modela obe geometrije minimalno je uticalo na promenu vrednosti faktora η_{pl} (manje od 5%).

Vrednosti parametra η_{pl} dobijene analitičkim proračunom odnosa vrednosti površine ispod krive $F - CMOD$ i J -integrala dobijenog numeričkim proračunom u zoni plastičnosti za modele PRNT nisu pokazale značajan uticaj promene dimenzija širine modela, debljine zida i prečnika. Svaka od ovih dimenzija je varirana sa dodavanjem 50% vrednosti dimenzije prvobitno definisanog modela.

Uticaj odnosa a_0/W u ovom slučaju pokazao je isti trend za svih 5 varijacija PRNT modela. Na isti način izračunate su vrednosti faktora η_{pl} za modele SENT čije su vrednosti veće za 13-15% ($B = 2.7$ mm) i 5-8% ($B = 4.05$ mm) u odnosu na vrednosti izračunate za PRNT modele istog poprečnog preseka. Trend pada vrednosti jednak je kao kod PRNT modela.

Za navedene dve metode određivanja vrednosti faktora η_{pl} daju različite rezultate. U slučaju modela PRNT odnos vrednosti je 1.12 za model $B=2.70$ mm dok je za model $B = 4.05$ odnos nešto veći i iznosi 1.18 u korist vrednosti dobijenih preko parametra A_{pl} .

Za modele SENT odnos vrednosti faktora η_{pl} dobijenih na navedena dva načina ima nešto nižu vrednost za model $B=2.70$ mm iznosi 0.87 dok za model SENT $B=4.05$ mm iznosi 0.83. Na osnovu vrednosti odnosa faktora η_{pl} dobijenog na navedena dva načina za navedene dve geometrije možemo doći do zaključka da je vrednost tog odnosa kod PRNT modela znatno veća u odnosu na SENT modele.

7. Literatura:

- 2.1 Anderson T.L. Fracture mechanics. CRC Press, London 1995.
- 2.2 Irwin G.R. Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate. *Journal of Applied Mechanics* 1957;24:361-364.
- 2.3 Sneddon I.N. Distribution of stress in the neighbourhood of a crack in an elastic solid. *Proceedings of the Royal Society of London A* 1946;187:229-260.
- 2.4 Williams M.L. On the stress distribution at the base of a stationary crack. *Journal of Applied Mechanics* 1957;24:109-114.
- 2.5 Westergaard H.M. Bearing pressures and cracks. *Journal of Applied Mechanics* 1939;6:49-53.
- 2.6 Sedmak A. Application of fracture mechanics to structural integrity. Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade 2003.
- 2.7 Berković M.: Determining the stress intensity factors by using the finite element method In: Monograph of the 1st International Fracture Mechanics Summer School, Faculty of Technology and Metallurgy - Goša Institute, Belgrade 1981:107-124.
- 2.8 Anderson T.L. Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications, Third Edition, USA> CRC Press, 2005.
- 2.9 Irwin G.R. Plastic zone near a crack and fracture toughness. *Proceedings of the Sagamore Research Conference, Syracuse University Research Institute, Syracuse, NY* 1961;4: 63-78.
- 2.10 Dugdale D.S. Yielding in steel sheets containing slits. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 1960;8:100-104.
- 2.11 Schwalbe K.H. Basic engineering methods of fracture mechanics and fatigue. GKSS Research Center, Geesthacht 2001.
- 2.12 Campbell F. C. Fatigue and Fracture - Understanding the Basics. ASM International 2012.
- 2.13 ASTM: E399-22: Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials, Baltimore, Jul 2023.
- 2.14 Rice J. R. A path independent integral and the approximate analysis of strain concentrations by notches and cracks. *Journal of Applied Mechanics* 1968;35:379-386.
- 2.15 Ismail A. E, Ariffin A. K, Abdullah S, Ghazali M. J. Stress intensity factors for surface cracks in round bar under single and combined loadings. *Meccanica* 2012;47:1141–1156. DOI: 10.1007/s11012-011-9500-7
- 2.16 Hutchinson J.W. Singular behavior at the end of a tensile crack tip in a hardening material. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 1968;16:13-31. [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(68\)90014-8](https://doi.org/10.1016/0022-5096(68)90014-8)
- 2.17 McMeeking R.M. Finite deformation analysis of crack tip opening in elastic-plastic materials and implications for fracture initiation. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 1977;25:357-381. [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(77\)90003-5](https://doi.org/10.1016/0022-5096(77)90003-5)
- 2.18 ASTM: E1820 – 20: “Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness”, May 2020.
- 2.19 Wells A A. Unstable crack propagation in metals: cleavage and fast fracture, *Proceedings of the crackpropagation symposium, Cranfield, UK, 1961;2:210.*
- 2.20 GKSS, Displacement gauge system for applications in fracture mechanics, Patent Publication, Geesthacht, Germany: GKSS Research Center, 1991.
- 2.21 Kozak D. Doktorska disertacija: Doprinos numeričkom i eksperimentalnom lomnom ponašanju heterogenih struktura, Fakulteta strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu,

- Zagreb, 2000.
- 2.22 Minnebruggen K. V, Verstraete M, Hertelé S, Waele W.D. Evaluation and comparison of double clip gauge method and delta 5 method for CTOD measurements in SE(T) specimens, *JOURNAL OF TESTING AND EVALUATION*, 2016;44:2414-2423. DOI: 10.1520/JTE20150127
 - 2.23 BS 7448 - Fracture mechanics toughness tests, The British Standards Institution
 - 2.24 Joyce J.A. J-Resistance curve testing of short crack bend specimens using unloading compliance. *Fracture mechanics: twenty-second symposium ASTM STP* 1992;1131:904–24.
 - 2.25 Joyce J.A, Hackett E.M, Roe C. Effect of crack depth and mode of loading on the J-R curve behavior of a high-strength steel. *Constraint effects in fracture, ASTM STP* 1993;1171:239–63.
 - 2.26 Joyce J.A, Link R.E. Application of two parameter elastic-plastic fracture mechanics to analysis of structures, *Engineering Fracture Mechanics* 1997;57:431-446. [https://doi.org/10.1016/S0013-7944\(97\)00030-1](https://doi.org/10.1016/S0013-7944(97)00030-1)
 - 2.27 Bakker A. A DC potential drop procedure for crack initiation and R-curve measurements during ductile fracture tests. *Elastic-plastic fracture test methods: the user's experience, ASTM STP* 1985;586:394–410.
 - 2.28 Marscahl C.W, Held P.R, Landow M.P, Mincer P.N. Use of the direct-current electric potential method to monitor large amounts of crack growth in highly ductile metals. *Fracture mechanics: twenty-first symposium, ASTM STP* 1990;1074:581–93. DOI: 10.1115/PVP2019-93144
 - 2.29 Herrera R, Landes J.D. Direct J-R curve analysis of fracture toughness test. *J Test Eval* 1988;16:427-449. DOI: 10.1631/jzus.A0930004
 - 2.30 Herrera R, Landes J.D. Direct J-R curve analysis: a guide to the methodology. In: *Fracture mechanics: twenty-first symposium. ASTM STP* 1990;1074:24–43.
 - 2.31 Orange T.W. Methods and models for R-curve instability calculations. In: *Fracture mechanics: twenty-first symposium, ASTM STP* 1990;1074:545–59.
 - 2.32 Ernst H.A, Paris P.C, Landes J.D. Estimations on J-integral and tearing modulus T from a single specimen test record. *Fracture mechanics: thirteenth conference, ASTM STP* 1981;743:476–502. DOI:10.1520/STP28814S
 - 2.33 Sharobeam M.H, Landes J.D. The load separation criterion and methodology in ductile fracture mechanics. *Int J Fract* 1991;47:81-104.
 - 2.34 Joyce J.A, Ernst H, Paris P.C. Direct J-R curve analysis: a guide to the methodology. *Fracture mechanics: twelfth national symposium, ASTM STP* 1980;700:222–236. DOI:10.1520/STP18987S
 - 2.35 Zhu X.K, Joyce J.A. J-Resistance curve testing of HY80 steel using SE(B) specimens and normalization method. *Engineering Fracture Mechanics* 2007;74(14):2263-2281. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2006.10.018>
 - 2.36 Gludovatz B, Naleway S.E, Ritchie R.O, Kruzic J.J. Size-dependent fracture toughness of bulk metallic glasses. *Acta Materialia* 2014;70:198-207. DOI: 10.1016/j.actamat.2014.01.062
 - 2.37 Li X, Ding Z, Liu C, Bao S, Gao Z. Evaluation and comparison of fracture toughness for metallic materials in different conditions by ASTM and ISO standards. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 2020;187(6):104189. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2020.104189
 - 2.38 Gietl H, Olbrich S, Riesch J, Holzner G, Höschel T, Coenen J.W, Neu R. Estimation of the

- fracture toughness of tungsten fibre-reinforced tungsten composites. *Engineering Fracture Mechanics* 2020;232:107011. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2020.107011
- 2.39 Martin M. L, Connolly M, Buck Z.N, Bradley P. E, Lauria D, Slifka A. J. Evaluating a natural gas pipeline steel for blended hydrogen service. *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 2022;101:104529. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2022.104529>
- 2.40 Fan X.J, Qu R.T, Zhang Z.F. Remarkably high fracture toughness of HfNbTaTiZr refractory high-entropy alloy. *Journal of Materials Science & Technology* 2022;123:70-77. DOI: 10.1016/j.jmst.2022.01.017
- 2.41 Brunner A. J. Can simple estimates from neat polymers provide safe fatigue fracture design limits for fiber-reinforced polymer matrix composites. *Procedia Structural Integrity* 2022;42:1660-1667.
- 2.42 Kim M.K, Kim H.I, Nam J.D, Suhr J. Polyamide-nylon 6 particulate polycarbonate composites with outstanding energy-absorbing properties. *Polymer* 2022;254:125082. DOI: 10.1016/j.polymer.2022.125082
- 2.43 Maksimović A, Petrovski B, Milović Lj, Zečević B, Aleksić V, Bulatović S, Bekrić D. Experimental Determination of J_{Ic} for a HSLA Steel Welded Joint. *Procedia Structural Integrity* 2023;48:190-194. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2023.07.147>
- 2.44 El-Bagory T. M. A. A, Alkanhal T. A. R, Younan M. Y. A. Effect of Specimen Geometry on the Predicted Mechanical Behavior of Polyethylene Pipe Material. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2015;6:061202. DOI: 10.1115/1.4029795.
- 2.45 Bianchetti C., Pino Munoz D., Leble B., Bouchard P.-O., Ductile failure prediction of pipe-ringing notched AISI 316L using uncoupled ductile failure criteria, *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 2021;191:104333. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2021.104333
- 2.46 Liu Q, Cai L.X, Chen H, Bao C, Yin T. A novel test method based on small specimens for obtaining low-cyclefatigue properties of materials, *Jurnal Mechanics of Materials* 2019;138:103153. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2019.103153>
- 2.47 Gurovich B.A, Frolov A.S, Fedotov I.V. Improved evaluation of ring tensile test ductility applied to neutron irradiated 42XNM tubes in the temperature range of (500e1100)C, *Jurnal Nuclear Engineering and Technology* 2020;52:1213-1221. DOI: 10.1016/j.net.2019.11.019
- 2.48 Kiraly M, Antok D. M, Horvath L, Hozer Z. Evaluation of axial and tangential ultimate tensile strength of zirconium cladding tubes. *Jurnal Nuclear Engineering and Technology* 2018;50:425-431. <https://doi.org/10.1016/j.net.2018.01.002>
- 2.49 Zhang Y, Ben Jar P.Y. Phenomenological modelling of tensile fracture in PE pipe by considering damage evolution. *Jurnal Materials and Design* 2015;77:72-82. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.04.011>
- 2.50 Travica M, Mitrović N, Petrović A, I, Milosević M, Sedmak A, Berto F, Experimental Evaluation of Hoop Stress–Strain State of 3D-Printed Pipe Ring Tensile Specimens. *Metals* 2022;12:1560. DOI: 10.3390/met12101560
- 2.51 Travica M, Mitrović N, Petrović A, Jevtić I, Milošević M. Stress-strain analysis of steel S235JRH pipe ring tensile specimens using 3D optical methods. *Measurement and Control* 2023: 265383886. DOI: 10.1177/00202940231212888.
- 2.52 Koo J. M, Park S, Seok C. S. Evaluation of fracture toughness of nuclear piping using real pipe and tensile compact pipe specimens, *Nuclear Engineering and Design* 2013;259:198–204. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2013.03.001>
- 2.53 Mahajan G, Saxena S, Mohanty A. Numerical characterization of compact pipe specimen for stretch zone width assessment. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials*

- andStructures, 2016;32(7):859–865. <https://doi.org/10.1111/ffe.12400>
- 2.54 Gajdos L, Sperl M. Evaluating the integrity of pressure pipelines by fracture mechanics. In: Applied Fracture Mechanics. Tech Publishing 2012;10:283-310. DOI: 10.5772/51804
 - 2.55 Bergant M, Yawny A, Perez Ipiña J. Experimental determination of J-resistance curves of nuclear steam generator tubes. Engineering Fracture Mechanics 2016;164:1-18. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2016.07.008>
 - 2.56 Rais B, Garnier J, Pons E, Marini B, Besson J. Determination of the fracture toughness of a 9Cr ODS steel fuel cladding using the pin loading Tension test. Engineering Fracture Mechanics 2023;290:109499. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2023.109499>
 - 2.57 Sanyal G, Samal M.K, Chakravartty J.K, Suri A.K. Prediction of J–R curves of thin-walled fuel pin specimens in a PLT setup. Engineering Fracture Mechanics 2011; 78:1029-1043. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2011.02.008
 - 2.58 Rodolfo A. Jr, Vanderely J. Application of fracture mechanics for the characterization of poly(vinyl chloride) pipes. II. Evaluation of a ring-type specimen for fracture mechanics testing. Journal of vinyl and additive technology 2021;27:806-820. DOI: 10.1002/vnl.21852
 - 2.59 Matvienko Y.G, Gubeljak N. Model for Determination of crack-resistance of the pipes, Patent No. RU 2564696 C, 2015 (in Russian).
 - 2.60 Gubeljak N, Likeb A, Matvienko Y. Fracture toughness measurement by using pipe-ring specimens, Procedia Materials Science 2014;3:1934–1940. DOI: 10.1016/j.mspro.2014.06.312
 - 2.61 Likeb A, Gubeljak N, Matvienko Y. Finite element estimation of the plastic η_{pl} factors for pipe-ring notched bend specimen using the load separation method. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures 2014;37:1319–1329. DOI: 10.1111/ffe.12173
 - 2.62 Medjo B, Rakin M, Gubeljak N, Matvienko Y, Arsić M, Šarkoćević Ž, Sedmak A. Failure resistance of drilling rig casing pipes with an axial crack. Engineering Failure Analysis 2015;58:429–440. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2015.05.015
 - 2.63 Musrati W. Karakterizacija oštećenja i loma materijala cevovoda korišćenjem epruveta oblika prstena, doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, 2019.
 - 2.64 Damjanović D. Određivanje lomnog ponašanja prstenastog ispitnog uzorka s aksijalnom pukotinom pod utjecajem zaostalih naprežanja, doktorska disertacija, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Slavonski Brod, 2016.
 - 2.65 Musrati W, Medjo B, Gubeljak N, Likeb A, Cvijović-Alagić I, Sedmak A, Rakin M. Ductile fracture of pipe-ring notched bend specimens -micromechanical analysis. Engineering Fracture Mechanics 2017;175:247–261. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.01.022>
 - 2.66 Musrati W, Medjo B, Gubeljak N, Štefane P, Radosavljević Z, Burzić Z, Rakin M. Seam pipes for process industry -fracture analysis by using ring-shaped specimens, Hemijska Industrija/ Chemical Industry, 72 (2018), 1, pp.39-46.
 - 2.67 Musrati W, Medjo B, Gubeljak N, Štefane P, Veljić D, Sedmak A, Rakin M. Fracture assessment of seam and seamless steel pipes by application of the ring-shaped bending specimens. Theoretical and Applied Fracture Mechanics 2019;103:102302. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2019.102302>
 - 2.68 Damjanović D, Kozak D, Matvienko Y, Gubeljak N. Correlation of Pipe Ring Notched Bend (PRNB) specimen and Single Edge Notch Bend (SENB) specimen in determination of fracture toughness of pipe material. FFEMS jurnal 2017;40(8):125-1259. <https://doi.org/10.1111/ffe.12581>

- 2.69 Damjanović D, Kozak D, Gelo I, Gubeljak N. The influence of torsion effect on fracture behavior of Pipe Ring Notched Bend specimen (PRNB), *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 2019;103:102286. DOI: 10.1016/j.tafmec.2019.102286
- 2.70 Damjanović D, Kozak D, Gubeljak N. The influence of residual stresses on fracture behavior of Pipe Ring Notched Bend specimen (PRNB), *Engineering Fracture Mechanics* 2019;205:347-358. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2018.10.016
- 3.1 Feghali E, Tauk L, Ortiz P, Vanbroekhoven K, Eevers W. Catalytic chemical recycling of biodegradable polyesters. *Polym. Degrad. Stab.* 2020;179:109241. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2020.10924>
- 3.2 McKeown P, Matthew J. The Chemical Recycling of PLA: A Review, *MDPI Sustainable chemistry* 2020;1:1-22. <https://doi.org/10.3390/suschem1010001>
- 3.3 Lorite G, Rocha J.M, Miilumäki N, Saavalainen P, Selkälä T, Morales-Cid G, Gonçalves M, Pongrácz E, Rocha C.M, Toth G. Evaluation of physicochemical/microbial properties and life cycle assessment (LCA) of PLA-based nanocomposite active packaging. *LWT* 2017;75:305–315. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.09.004>
- 3.4 Maga D, Hiebel M, Aryan V. A Comparative Life Cycle Assessment of Meat Trays Made of Various Packaging Materials. *Sustainability* 2019;11:5324. <https://doi.org/10.3390/su11195324>
- 3.5 Chitaka T.Y, Russo V, Von Blottnitz H. In pursuit of environmentally friendly straws: A comparative life cycle assessment of five straw material options in South Africa. *Int. J. Life Cycle Assess.* 2020;25:1818–1832. DOI: 10.1007/s11367-020-01786-w
- 3.6 Chen C.C, Chueh J.Y, Tseng H, Huang H.M, Lee S.Y. Preparation and characterization of biodegradable PLA polymeric blends. *Biomaterials* 2003;24:1167–1173. [https://doi.org/10.1016/S0142-9612\(02\)00466-0](https://doi.org/10.1016/S0142-9612(02)00466-0)
- 3.7 Ochi S. Mechanical properties of kenaf fibers and kenaf/PLA composites. *Mechanics of Materials* 2008;40:446–452. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2007.10.006>
- 3.8 Yang S.L, Wu Z.H, Yang W, Yang M.B. Thermal and mechanical properties of chemical crosslinked polylactide (PLA). *Polymer Testing* 2008;27:957–963. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2008.08.009>
- 3.9 Suryanegara L, Nakagaito A.N, Yano H. The effect of crystallization of PLA on the thermal and mechanical properties of microfibrillated cellulose-reinforced PLA composites. *Composites Science Technology* 2009;69:1187–1192. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2009.02.022>
- 3.10 Lim J.S, Park K.I, Chung G.S, Kim J.H. Effect of composition ratio on the thermal and physical properties of semicrystalline PLA/PHB-HHx composites. *Materials Science and Engineering: C* 2013;33:2131–2137. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2013.01.030>
- 3.11 Scaffaro R, Botta L, Maio A, Gallo G. PLA graphene nanoplatelets nanocomposites: Physical properties and release kinetics of an antimicrobial agent. *Composites Part B Engineering* 2017;109:138–146. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.10.058>
- 3.12 Sedničková M, Pekařová S, Kucharczyk P, Bočkaj J, Janigová I, Kleinová A, Johec-Mošková D, Omaníková L, Perd'ochová D, Koutný M. Changes of physical properties of PLA-based blends during early stage of biodegradation in compost. *International Journal of Biological Macromolecules* 2018;113:434–442. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.02.078>
- 3.13 Vălean C, Marşavina L, Mărghitaş M, Linul E, Razavi N, Berto F, Brighenti R. The effect of crack insertion for FDM printed PLA materials on Mode I and Mode II fracture toughness,

- Procedia Structural Integrity 2020;28:1134-1139.
<https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.11.128>
- 3.14 Kizhakkinan U, Rosen D. W, Raghavan N. Experimental investigation of fracture toughness of fused deposition modeling 3D-printed PLA parts. *Materialstoday Proceeding* 2022;70:631-637. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.10.014
 - 3.15 Gao W, Zhang Y, Ramanujan D, Ramani K, Chen Y, Williams C.B, Wang C.C.L, Shin Y.C, Zhang S., Zavattieri P.D. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design* 2015;69:65-89.
<https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001>
 - 3.16 Chen P, Wu H, Zhu W, Yang L, Li Z, Yan C, Wen S, Shi Y. Investigation into the processability, recyclability and crystalline structure of selective laser sintered Polyamide 6 in comparison with Polyamide 12. *Polymer Testing* 2018;69:366-374.
<https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.05.045>
 - 3.17 Goodridge R.D, Hague R.J.M, Tuck C.J. Effect of long-term ageing on the tensile properties of a polyamide 12 laser sintering material. *Polymer Testing*, Vol. 29 (2010) pp. 483-493.
<https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2010.02.009>
 - 3.18 Rosso S, Meneghello R, Biasetto L, Grigolato L, Concheri G, Savio G. In-depth comparison of polyamide 12 parts manufactured by Multi Jet Fusion and Selective Laser Sintering. *Additive Manufacturing* 2020;36:101713. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101713>
 - 3.19 Stoia D. I, Linul E, Marsavina L. Influence of manufacturing parameters on mechanical properties of porous materials by selective laser sintering. *Materials* 2019;16:871. DOI: 10.3390/ma12060871
 - 3.20 Salmoria G. V, Leite J. L, Vieira L. F, Pires A. T. N, Roesler C. R. M. Mechanical properties of PA6/PA12 blend specimens prepared by selective laser sintering. *Polymer Testing* 2012;31:411–416. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2011.12.006>
 - 3.21 Hofland E. C, Baran I, Wismeijer D. A. Correlation of Process Parameters with Mechanical Properties of Laser Sintered PA12 Parts. *Advances in Materials Science and Engineering* 2017;2017: 4953173. DOI: 10.1155/2017/4953173
 - 3.22 Cooke W, Tomlinson R. A, Burguete R, Johns D, Vanard G. Anisotropy, homogeneity and ageing in an SLS polymer. *Rapid Prototyping Journal* 2011;17:269–279. DOI: 10.1108/13552541111138397
 - 3.23 Berti G, D'Angelo L, Gatto A, Iuliano L. Mechanical characterisation of PA-Al₂O₃ composites obtained by selective laser sintering. *Rapid Prototyping Journal* 2010;16:124–129. DOI: 10.1108/13552541011025843
 - 3.24 Zhang W, Melcher R, Travitzky N, Bordia R. K, Greil P. Three-dimensional printing of complex-shaped alumina/ glass composites. *Advanced Engineering Materials* 2009;11:1039–1043. DOI: 10.1002/adem.200900213
 - 3.25 Brugo T, Palazzetti R, Ciric-Kostic S, Yan X. T, Minak G, Zucchelli A. Fracture mechanics of laser sintered cracked Polyamide for a new method to induce cracks by additive manufacturing. *Polimer testing* 2016;50:301-308.
<https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2016.01.024>
 - 3.26 Cano A. J, Salazar A, Rodríguez J. Effect of temperature on the fracture behavior of polyamide 12 and glass-filled polyamide 12 processed by selective laser sintering. *Engineering Fracture Mechanics* 2018;203:66–80.
<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2018.07.035>
 - 3.27 Stoia D. I, Marsavina L. Effect of aluminum particles on the fracture toughness of

- polyamide-based parts obtained by selective laser sintering (SLS). *Procedia Structural Integrity* 2019;18:163–169. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.08.150>
- 3.28 Stoia D. I, Marsavina L, Linul E. Mode I Fracture Toughness of Polyamide and Alumide Samples obtained by Selective Laser Sintering Additive Process. *Polymers* 2020; 12:640. DOI: 10.3390/polym12030640
 - 3.29 Messiha M, Gerets B, Heimink J, Frank A, Arbeiter F, Engelsing K. Slow crack growth resistance of modern PA-U12 grades measured by cyclic cracked round bar tests and strain hardening tests. *Polymer Testing* 2020;86:106468. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106468>
 - 3.30 Messiha M, Frank A, Berger I, Evonik J. H. Determination of the Slow Crack Growth Resistance of PA12 Pipe Grades. *Proceedings of the 19th Plastic Pipes Conference PPXIX 2018*. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-72401-8>.
 - 3.31 Mohamed O.A. Analytical Modeling and Experimental Investigation of Product Quality and Mechanical Properties in FDM Additive Manufacturing. Faculty of Science, Engineering and Technology - Swinburne University of Technology, 2017. DOI: 10.13140/RG.2.2.28847.48807
 - 3.32 Ferreira A. Comprehensive Investigation of Mechanical Properties of Fused Deposition Modelling. 2017.
 - 3.33 Rajaguru K, Karthikeyan T, Vijayan V. Additive manufacturing – State of art. *Materials today: Proceeding* 2020;21:628 – 633.
 - 3.34 Vorkapić M, Mladenović I, Ivanov T, Kovačević A, Hasan M.S, Simonović A, Trajković I. Enhancing mechanical properties of 3D printed thermoplastic polymers by annealing in moulds. *Advances in Mechanical Engineering* 2022;14. <https://doi.org/10.1177/16878132221120737>
 - 3.35 Pandzic A, Hodzic D, Milovanovic A. Influence of material colour on mechanical properties of pla material in fdm technology. *30th DAAAM International Symposium 2019*;30:555–561. 10.2507/30th.daaam.proceedings.075
 - 3.36 Wittbrodt B, Pearce J. M. The effects of PLA color on material properties of 3-D printed components. *Additive Manufacturing* 2015;8:110-116. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2015.09.006>
 - 3.37 Valerga A. P, Batista M, Salguero J, Girot F. Influence of PLA filament conditions on characteristics of FDM parts. *Materials (Basel)* 2018;11:8. <https://doi.org/10.3390/ma11081322>
 - 3.38 Camposeco-Negrete C. Optimization of printing parameters in fused deposition modeling for improving part quality and process sustainability. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Springer* 2020;108:2131-2147. DOI: 10.1007/s00170-020-05555-9
 - 3.39 Feng C, Zhang M, Bhandari B. Materials Properties of Printable Edible Inks and Printing Parameters Optimization during 3D Printing: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 2019;59:3074-3081. DOI: 10.1080/10408398.2018.1481823
 - 3.40 Ferretti P, Leon-Cardenas C, Santi G.M, Sali M, Ciotti E, Frizziero L, Donnici G, Liverani A. Relationship between FDM 3D Printing Parameters Study: Parameter Optimization for Lower Defects. *Polymers* 2021;13:2190. <https://doi.org/10.3390/polym13132190>
 - 3.41 Magri A. E, Mabrouk K. E, Vaudreuil S, Chibane H, Touhami M. E. Optimization of printing parameters for improvement of mechanical and thermal performances of 3D printed poly(ether ether ketone) parts. *Jurnal of applied polymer science* 2020;13:49087. DOI:

- 10.1002/app.49087
- 3.42 Wang P, Zou B, Xiao H, Ding S, Huang C. Effects of printing parameters of fused deposition modeling on mechanical properties, surface quality, and microstructure of PEEK. *Jurnal of Materials Processing Technology* 2019;271:62-74. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.03.016>
 - 3.43 Cattenone A. Analysis and Simulation of Additive manufacturing processes. *Faculty of Engineering - University of Pavia* 2021;13:167-180. DOI: 10.13111/2066-8201.2021.13.4.14
 - 3.44 Rahmatabadi D, Aminzadeh A, Aberoumand M, Moradi M. Mechanical Characterization of Fused Deposition Modeling (FDM) 3D Printed Parts. *Fused Deposition Modeling Based 3D Printing* 2021 517. DOI: 10.1007/978-3-030-68024-4_7
 - 3.45 Dave H. K, Patel S. T. Introduction to Fused Deposition Modeling Based 3D Printing Process. u *Fused Deposition Modeling Based 3D Printing*, H. K. Dave i J. P. Davim, Ur. Springer Nature Switzerland AG 2021:1–21.
 - 3.46 Wang X, Jiang M, Zhou Z, Gou J, Hui D. 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. *Composites Part B* 2017;110:442-458. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.034>
 - 3.47 Solomon I. J, Sevvell P, Gunasekaran J. A review on the various processing parameters in FDM. *Materials Today Proceedings* 2021;37:509–514. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.484>
 - 3.48 Gibson I. Chapter 6: Material Extrusion. *Additive Manufacturing Technologies* 2021:171–201.
 - 3.49 Fina F, Goyanes A, Gaisford S, Basit A.W. Selective Laser Sintering (SLS) 3D Printing of Medicines. *International Journal of Pharmaceutics* 2017;529:285–293. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2017.06.082>
 - 3.50 Awad A, Fina F, Trenfield S, Patel P, Goyanes A, Gaisford S, Basit A. 3D Printed Pellets (Miniprintlets): A Novel, Multi-Drug, Controlled Release Platform Technology. *Pharmaceutics* 2019;11:148. DOI: 10.3390/pharmaceutics11040148
 - 3.51 Allahham N, Fina F, Marcuta C, Kraschew L, Mohr W, Gaisford S, Basit A.W, Goyanes A. Selective Laser Sintering 3D Printing of Orally Disintegrating Printlets Containing Ondansetron. *Pharmaceutics* 2020;12(2):110. DOI: 10.3390/pharmaceutics12020110
 - 3.52 Han W, Kong L, Xu M. Advances in selective laser sintering of polymers, *International Journal of Extreme Manufacturing* 2022;4:042002. DOI 10.1088/2631-7990/ac9096
 - 3.53 Alexander A.E, Wake N, Chepelev L, Brantner P, Ryan J, Kenneth C. W. A guideline for 3D printing terminology in biomedical research utilizing ISO/ASTM standards. *3D Printing in Medicine* 2021;7:8. <https://doi.org/10.1186/s41205-021-00098-5>
 - 3.54 ASTM 8 EM, “Standard test methods for tension testing of metallic materials”, *Annual Book of Standards, Section 3: Metals test methods and analytical procedures, Vol. 03.01.*
 - 3.55 Cabezas E. E, Celentano D. J. Experimental and numerical analysis of the tensile test using sheet specimens. *Finite Elements in Analysis and Design* 2004;40:555-575. [https://doi.org/10.1016/S0168-874X\(03\)00096-9](https://doi.org/10.1016/S0168-874X(03)00096-9)
 - 3.56 Czichos H, Saito T, Smith L. *Handbook of materials measurement methods*. Springer, Berlin (2006). DOI: 10.1007/978-3-540-30300-8
 - 3.57 Gencturk B, Hossain K, Kapadia A, Labib Y-L E. Use of digital image correlation technique in full-scale testing of prestressed concrete structures. *Measurement* 2014;47:505-515. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.09.018>

- 3.58 Milošević M, Milošević N, Sedmak S, Tatic U, Mitrović N, Hloch S, Jovići. R. Digital Image correlation in analysis of stiffness in local zones of welded joints. *Technical Gazette* 2016;23:19-24. DOI: 10.17559/TV-20140123151546
- 3.59 Milošević M, Mitrović N, Jovicic R, Sedmak A, Maneski T, Petrović A, Aburga T. Measurement of local tensile properties of welded joint using digital image correlation method. *Chemicke Listy* 2012;106:485-488.
- 3.60 Tanasić I, Tihacek-Šojić Lj, Mitrović N, Milić-Lemić A, Vukadinovic M, Markovic A, Milošević M. An attempt to create a standardized (reference) model for experimental investigations on implant's sample. *Measurement* 2015;72:37-42. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.04.029>
- 3.61 Mitrović A, Antonović D, Tanasić I, Mitrović N, Bakić G, Popović D, Milošević M. 3D Digital Image Correlation Analysis of the Shrinkage Strain in Four Dual Cure Composite Cements. *BioMed Research International* 2019:1-7. DOI: 10.1155/2019/2041348
- 3.62 Tanasić I, Šarac D, Mitrović N, Tihacek-Šojić L, Mišković Ž, Milić-Lemić A, Milošević M. Digital Image Correlation Analysis of Vertically Loaded Cylindrical Ti-Implants With Straight and Angled Abutments. *Experimental Techniques* 2016;40:1227–1233. DOI: 10.1007/s40799-016-0120-y
- 3.63 Mitrović N, Milošević M, Momcilovic N, Petrović A, Mišković Z, Sedmak A, Popović P. Local Strain and Stress Analysis of Globe Valve Housing Subjected to External Axial Loading. *Key Engineering Materials* 2013;586:214–217. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.586.214>
- 3.64 Younise B, Sedmak A, Milosević N, Rakin M, Medjo B. True Stress-strain Curves for HSLA Steel Weldment – Iteration Procedure Based on DIC and FEM. *Procedia Structural Integrity* 2020;28:1992-1997. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.11.023>
- 3.65 Mitrović A, Tanasić I, Mitrović N, Milošević M, Tihacek-Šojić Lj, Antonovic D. Strain determination of self-adhesive resin cement using 3D digital image correlation method. *Serbian Archives of Medicine* 2018;146:372-377. <https://doi.org/10.2298/SARH170530176M>
- 3.66 Gubelj N, Chapetti M.D, Predan J, Landes J.D. CTOD-R curve construction from surface displacement measurements. *Engineering Fracture Mechanics* 2011;78:2286-2297. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2011.05.002>
- 3.67 Khor W, Moore P.L, Pisarski H.G, Haslett M, Brown C.J. Measurement and prediction of CTOD in austenitic stainless steel. *Fatigue and fracture of Engineering Materials and Structures* 2016;39:1433-1442. DOI: 10.1111/ffe.12487
- 3.68 Samadian K, Hertelé S, Waele W.D. Measurement of CTOD along a surface crack by means of digital image correlation. *Engineering Fracture Mechanics* 2019;205:470-485. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2018.11.015>
- 3.69 Vasco-Olmo J.M, Díaz F.A, Antunes F.V, James M.N. Characterisation of fatigue crack growth using digital image correlation measurements of plastic CTOD. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 2019;101:332-341. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2019.03.009>
- 3.70 Trajkovic I, Rakin M, Milosević M, Mitrović N, Travica M, Sedmak A, Medjo B. Selective laser sintered Pipe Ring Notched Tension specimens for examination of fracture properties of pipeline materials. *Engineering Fracture Mechanics* 2023;292:109573. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2023.109573>
- 3.71 Trajkovic I, Milosević M, Travica M, Rakin M, Mladenovic G, Kurdjacveca Lj, Medjo B.

- Novel Method for Measurement of Pipeline Materials Fracture Resistance-Examination on Selective Laser Sintered Cylindrical Specimens. *Science of Sintering* 2022;54:373-386.
- 3.72 Reu PL, Rogillio BR, Wellman GW. OSTI report SAND2007-0156C, United States 2007:555-556.
- 4.1 ESIS P2-92: Procedure for determining the fracture behaviour of materials. European Structural Integrity Societz – ESIS (1992).
- 5.1 Trajkovic I, Milošević M, Rakin M, Sedmak A, Medjo B. Additively manufactured tensile ring-shaped specimens for pipeline material fracture examination – influence of geometry. *Procedia Structural Integrity* 2022;42:1314-1319.

Biografija autora

Kandidat Isaak Trajković je rođen 03.01.1996. godine u Beogradu, Republika Srbija. Nakon završene osnovne škole u Vladimirovcu i Hemijsko-medicinske škole u Vršcu, upisuje Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu, školske 2014/2015. godine. Osnovne akademske studije odsek biohemijsko inženjerstvo i biotehnologija, završava 2018. godine sa prosečnom ocenom 8,08. Master akademske studije, smer biohemijsko inženjerstvo, završava 2019. godine sa prosečnom ocenom 8,63.

Nakon završetka master akademskih studija upisuje doktorske akademske studije 2019. godine na Tehnološko metalurškom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Od decembra iste godine ja zaposlen u Inovacionom centru Mašinskog fakulteta u Beogradu. Tokom rada u Inovacionom centru, kandidat stiče dodatna iskustva radeći na univerzalnoj mašini za ispitivanje materijala, opremi za optička merenja kao i na 3D štampačima.

Kandidat je uključen u realizaciju međunarodnog projekta pod nazivom „Structural Integrity and Reliability of Advanced Materials obtained through additive Manufacturing“, (H2020-WIDESPREAD-2018-03, No. 857124). Od 2022. godine kandidat aktivno učestvuje u realizaciji projekta Evropske Mreže Preduzetništva kao savetnik za internacionalizaciju poslovanja.

Kandidat je od 2023. godine član radnih grupa sledećih “COST (European Cooperation in Science and Technology)” projekata: CA22143 - European Materials Informatics Network

CA22134 - Sustainable Network for agrofood loss and waste prevention, management, quantification and valorisation

CA22105 - BEEkeeping products valorization and biomonitoring for the SAFETY of BEEs and HONEY (BeSafeBeeHoney) PT)

CA22110 - Cooperation, development and cross-border transfer of Industrial Symbiosis among industry and stakeholders (LIAISE)

CA22123 - European Materials Acceleration Center for Energy

CA20126 - Network for research, innovation and product development on porous semiconductors and oxides (NETPORE)

CA20124 - EU Circular Economy Network for All: Consumer Protection through reducing, reusing, repairing

CA22154 - Data-driven Applications towards the Engineering of functional Materials: an Open Network

Kandidat učestvuje u realizaciji „IPA Interreg: CapTTict (Enhancing capacities for technology transfer, company building and innovations in the field of ICT)“ međunarodnog projekta u ulozi “Project Manager Assistant”. Kandidat je član grupe pronalazača jednog malog nacionalnog patenta zaštićenog pod registracionim brojem 1658 (Pomoćni pribor za ispitivanje aluminijumskih i PVC profila).

Kandidat učestvuje takođe u realizaciji projekta „Dalji razvoj inovacionog eko sistema kroz organizaciju, edukacije i povezivanja zainteresovanih strana“ kroz Program promocije i popularizacije inovacione delatnosti.

Za vreme rada u Inovacionom centru, kandidat stiče dragocena iskustva u radu sa raznim softverskim alatima i programskim jezicima kao što su “Aramis”, “GOM correlate”, “GOM inspect”, “Abaqus”, “SolidWorks”, “AutoCad”, “Simplify3D”, “PreForm”, “HTML”, “CSS”, “JavaScript”, “WordPress”.

Kandidat za vreme rada u Inovacionom centru postaje član društva za integritet i vek konstrukcija, srpskog keramičkog društva i član organizacionih odbora međunarodnih konferencija “CNNTech”, “ACA - ADVANCED CERAMICS AND APPLICATION” i “IRASS - International Symposium on Risk Analysis and Safety of Complex Structures and Components”.

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора Исаак Трајковић

Број индекса 4016/19

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

ОДРЕЂИВАЊЕ ОТПОРНОСТИ ПРЕМА ЛОМУ МАТЕРИЈАЛА ЦЕВОВОДА
ИСПИТИВАЊЕМ НОВЕ ЕПРУВЕТЕ ОБЛИКА ПРСТЕНА ИЗЛОЖЕНЕ ЗАТЕЗАЊУ

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

Потпис аутора

У Београду, 30.05.2024.



Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора _____Исаак Трајковић_____

Број индекса _____4016/2019_____

Студијски програм _____Инжењерство материјала_____

Наслов рада ОДРЕЂИВАЊЕ ОТПОРНОСТИ ПРЕМА ЛОМУ МАТЕРИЈАЛА
ЦЕВОВОДА ИСПИТИВАЊЕМ НОВЕ ЕПРУВЕТЕ ОБЛИКА ПРСТЕНА ИЗЛОЖЕНЕ
ЗАТЕЗАЊУ

Ментор _____Проф. др Бојан Међо_____

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањена у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис аутора

У Београду, 30.05.2024.



Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

**ОДРЕЂИВАЊЕ ОТПОРНОСТИ ПРЕМА ЛОМУ МАТЕРИЈАЛА ЦЕВОВОДА
ИСПИТИВАЊЕМ НОВЕ ЕПРУВЕТЕ ОБЛИКА ПРСТЕНА ИЗЛОЖЕНЕ ЗАТЕЗАЊУ**

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци.
Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

Потпис аутора

У Београду, 30.05.2024.



1. **Ауторство.** Дозвољава се умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољава се умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољава се умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољава се умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољава се умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољава се умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.

**ОЦЕНА ИЗВЕШТАЈА О ПРОВЕРИ ОРИГИНАЛНОСТИ
ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

На основу Правилника о поступку провере оригиналности докторских дисертација које се бране на Универзитету у Београду и налаза у извештају из програма *iThenticate* којим је извршена провера оригиналности докторске дисертације „**Одређивање отпорности према лому материјала цевовода испитивањем нове епрувете облика прстена изложене затезању**” (аутор **Исаак Трајковић**), констатујем да утврђено подударане текста износи 7 %.

Доминантан узрок подударања текста са изворима из литературе су називи појмова који се користе у области инжењерства материјала (нарочито механике лома и оштећења материјала), који се по правилу састоје од три или четири речи. Стога, неминовно је подударане са изворима на српском језику, као и на енглеском језику уколико је у тексту дат превод назива променљиве/параметра. На пример, у резимеу на енглеском језику су готово сви називи параметара и величина означени као подударане, што је и очекивано јер се стандардно користе у области којом се дисертација бави. У тексту постоје и подударане са општим местима из литературе, као и са радовима у којима су објављени резултати докторандовог истраживања који су проистекли из дисертације; све наведено је у складу са чланом 9. Правилника.

На основу свега изнетог, а у складу са чланом 8. став 2. Правилника о поступку провере оригиналности докторских дисертација које се бране на Универзитету у Београду, изјављујем да извештај указује на оригиналност докторске дисертације, те се прописани поступак припреме за њену одбрану може наставити.

5. 6. 2024. године



Ментор
проф. др Бојан Међо
Универзитет у Београду,
Технолошко-металуршки факултет