

# Karakterizacija mehaničkih svojstava perforiranoga valovitoga karonu u svrhu poboljšanja razdvajanja sekundarne ambalaže

---

Šarčević, Iva

Doctoral thesis / Doktorski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Graphic Arts / Sveučilište u Zagrebu, Grafički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:216:527574>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-14**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Graphic Arts Repository](#)





Sveučilište u Zagrebu

Grafički fakultet

Iva Šarčević

**KARAKTERIZACIJA MEHANIČKIH  
SVOJSTAVA PERFORIRANOGA  
VALOVITOGA KARTONA U SVRHU  
POBOLJŠANJA RAZDVAJANJA  
SEKUNDARNE AMBALAŽE**

DOKTORSKI RAD

Mentori:

izv. prof. dr. sc. Dubravko Banić  
prof. dr. sc. Diana Gregor-Svetec

Zagreb, 2023.



University of Zagreb

Faculty of Graphic Arts

Iva Šarčević

**CHARACTERIZATION OF MECHANICAL  
PROPERTIES OF PERFORATED  
CORRUGATED CARDBOARD IN ORDER  
TO IMPROVE THE SEPARATION OF  
SECONDARY PACKAGING**

DOCTORAL DISSERTATION

Supervisors:

Assoc. Prof. Dubravko Banić, PhD

Prof. Diana Gregor-Svetec, PhD

Zagreb, 2023.

**UDK 655:621.798:676.017**

***Imenovano Povjerenstvo za ocjenu doktorskoga rada:***

1. izv. prof. dr. sc. Davor Donevski, Sveučilište u Zagrebu Grafički fakultet, predsjednik
2. prof. dr. sc. Jesenka Pibernik, Sveučilište u Zagrebu Grafički fakultet, član
3. izv. prof. dr. sc. Urška Vrabič Brodnjak, Univerza v Ljubljani Naravoslovnotehniška fakulteta, vanjska članica

***Imenovano Povjerenstvo za obranu doktorskoga rada:***

1. izv. prof. dr. sc. Davor Donevski, Sveučilište u Zagrebu Grafički fakultet, predsjednik
2. prof. dr. sc. Jesenka Pibernik, Sveučilište u Zagrebu Grafički fakultet, članica
3. izv. prof. dr. sc. Urška Vrabič Brodnjak, Univerza v Ljubljani Naravoslovnotehniška fakulteta, vanjska članica
4. izv. prof. dr. sc. Rahela Kulčar, Sveučilište u Zagrebu Grafički fakultet, zamjenska članica
5. doc. dr. sc. Klemen Možina, Univerza v Ljubljani Naravoslovnotehniška fakulteta, zamjenski vanjski član

***Mentori:***

1. izv. prof. dr. sc. Dubravko Banić, Sveučilište u Zagrebu Grafički fakultet
2. prof. dr. sc. Diana Gregor-Svetec, Univerza v Ljubljani Naravoslovnotehniška fakulteta

***Datum obrane doktorskoga rada:*** 26. svibnja 2023.

***Mjesto obrane doktorskoga rada:*** Sveučilište u Zagrebu Grafički fakultet

***Povjerenstvo za obranu doktorskoga rada donijelo je sljedeću odluku:***

„Obrabila s ocjenom summa cum laude (*s najvećom pohvalom*) jednoglasnom odlukom Povjerenstva“

## **INFORMACIJE O MENTORIMA**

Dubravko Banić diplomirao je 1993. godine na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Od 1994 zaposlenik je Grafičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu kao stručni suradnik na Katedri za grafičke strojeve. Doktorsku disertaciju obranio je 2006. godine. U zvanje izvanrednog profesora izabran je 2015 godine. Nositelj je nekoliko kolegija na preddiplomskom, diplomskom i poslijediplomskom studiju Grafičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. U području grafičke tehnologije prvenstveno se bavi uvjetima održavanja, te predlaže modele poboljšanja procesa održavanja grafičkih objekata, ali i projektiranjem mehanizama u konstrukciji grafičkih strojeva i analizom parametara stroja koji utječu na kvalitetu konačnog grafičkog proizvoda. Sudjelovao je na nekoliko znanstvenih projekata i autor je preko 40 znanstvenih i stručnih radova.

Diana Gregor-Svetec diplomirala je 1987. godine, magistrirala 1990. godine, a doktorirala 1997. godine na Univerza v Ljubljani Naravoslvnotehniška fakulteta. Zaposlenica je istog fakulteta. U zvanje redovne profesorice izabrana je je 2010. godine. Njezin rad usmjeren je na karakterizaciju svojstava tiskovnih podloga i materijala za pakiranje. Nedavno je njezino istraživanje usmjereno na područje pametnog pakiranja, recikliranja, eko-dizajna tiskanih proizvoda i održivog pakiranja. Sudjelovala je u nekoliko nacionalnih istraživačkih projekata, Ceepus, europskim transnacionalnim, bilateralnim i COST projektima te je objavila tri poglavlja u knjigama i preko 200 znanstvenih članaka i konferencijskih radova iz područja znanosti o materijalima.

*Zahvaljujem se od srca izv. prof. dr. sc. Dubravku Baniću, mom mentoru, na strpljenju i podršci tijekom izrade ovog doktorskog rada te mojoj mentorici, prof. dr. sc. Diani Gregor-Svetec, koja mi je otvorila vrata laboratorija u Ljubljani. Hvala na pomoći, komentarima i savjetima koje ste mi pružili.*

*Posebno bih se zahvalila Željku Balleru i Tončiju-Anti Lokasu iz Model Pakiranja koji su oživjeli moje ideje, omogućili mi uzorke i spremno komentirati rezultate i analize.*

*Veliko hvala mojim dragim kolegicama, izv. prof. dr. sc. Raheli Kulčar, doc. dr. sc. Marini Vukoje, doc. dr. sc. Katarini Itrić, koje su me usmjeravale i gurale kad god je bilo potrebno. Hvala i mom kolegi doc. dr. sc. Josipu Boti na dijeljenju ideja od kuda je i sve krenulo. Hvala i mojim studentima, Ivanu i Svenu na entuzijazmu i pomoći.*

*Neizmjerne hvala mojoj obitelji kao i mojim curama za vjeru, ljubav i podršku kroz cijeli život. Hvala mojim roditeljima i mojoj braći što su uvijek vjerovali u mene. Mama, hvala ti što si uvijek tu i što sam ja tu gdje jesam. Hvala mom Mati na strpljenju i ljubavi kao i našoj djeci Petru, Niki i Miji. S vama sve ima smisla.*

## SAŽETAK

Perforacije na valovitom kartonu koriste se, između ostalog, za otvaranje komercijalnog tipa sekundarne ambalaže, tzv. ambalaže za izlaganje na police (engl. *Shelf-Ready Packaging*, SRP). Upotreba spomenute ambalaža omogućava zaštitu primarne ambalaže u transportu i skladištenju u jedinici koja je spremna za prodaju. U teoriji moguće ju je jednostavno identificirati, otvoriti, staviti na policu i odložiti. Perforacije označavaju kombinaciju odrezanog i neodrezanog dijela, a trebale bi omogućiti jednostavno, brzo, sigurno i estetski prihvatljivo razdvajanje u predviđenom smjeru. Međutim, perforacije na valovitom kartonu mijenjaju svojstva valovitoga kartona, a time i čvrstoću ambalažne kutije bitne za transport, skladištenje i rukovanje. Jednostavno razdvajanje valovitoga kartona uvjetovano je zadržavanjem već postojećih pozitivnih mehaničkih svojstava. Primjena različitih tipova perforacije ovisno o njezinom pozicioniranju na stranicama kutije od valovitoga kartona predstavlja potencijal koji bi mogao zadovoljiti zadržavanje čvrstoće ambalaže uz jednostavnije razdvajanje. U ovom radu sustavno je istražen utjecaj varijabli perforacija na promjenu mehaničkih svojstava troslojnog valovitoga kartona E vala. Pod varijable perforacije spadaju: tip perforacije (označeno odrezani/neodrezani dio u mm: 1/1, 2/2, 4/2, 6/2 te 10/3.), kut pozicioniranja perforacije (kutovi su definirani u odnosu na MD smjer: 0°, 20°, 45°, 70° i 90°) i kvaliteta perforiranoga valovitoga kartona (pod oznakama: 111, 131, 177 i 177L). Ispitivanja su podijeljena na ona vezana za transport i skladištenje, te ona vezana za razdvajanje. Korelacijskom analizom utvrđen je odnos i kvantificirana povezanost različitih mehaničkih parametara valovitoga kartona s perforacijama. Multivarijantnom analizom utvrđena je varijabla s najvećim utjecajem na pojedino mehaničko svojstvo. Statistički povezana mjerenja omogućuju kombinaciju tipa perforacije s najvećim utjecajem na razdvajanje te pozicioniranje pod čim većim kutom kako bi se zadržale najveće vrijednosti kod mjerenja vezana za transport i skladištenje.

**Ključne riječi:** valoviti karton, tip perforacije, pozicioniranje perforacije, sekundarna ambalaža, otpornost brida na pritisak, otpornost jačine pucanja, otpornost na savijanje, prekidna jakost, otpornost prema cijepanju, lom materijala

## EXTENDED ABSTRACT

Shelf Ready Packaging (SRP) is a type of secondary packaging designed to reduce in-store labour cost of stacking products on shelves. However, most of the problems with SRP are involved in the area of opening and shelving. An easy opening function implies uncomplicated handling with easy separation in a predictable and desirable manner without destroying the structural integrity of the packaging. Perforations on corrugated cardboard are one of the ways for easy opening of Shelf Ready Packaging. They serve as a separation line for converting the transport packaging into the shelf-ready display tray. Obviously, the perforations on corrugated cardboard affect the mechanical properties. Various perforations placed on different sides of the case affect the structural integrity of the transportation box. Better insight in the mechanical properties of perforated corrugated board would improve efficiency in designing SPR.

In this paper the change of corrugated cardboard mechanical properties was analysed under the influence of perforations. The focus was on determining which of the explanatory variables affect the corrugated cardboard properties the most. The explanatory variables are: Type of perforation, Angle of perforation position and Quality of perforated corrugated cardboard. They are used to explain the variability of the response variables, i.e. in a measured property. The specimens with and without perforations were prepared using die cutter with machine-made knives. Five types of perforations (labelled: 1/1, 2/2, 4/2, 6/2 and 10/3 where the first number represents the cut part in millimetres and the second number represents the uncut part in millimetres) were positioned in five defined angles (0°, 20°, 45°, 70°, and 90°, where 0° represents Machine Direction, MD) and tested on four different quality of three-layer E-flute corrugated cardboard (labelled as follows: 111, 131, 177, 177L).

Seven measurements were carried out in order to observe the behaviour of perforated specimens. The measurements were divided into two categories: measurements related to transport and storage: edge crush test, burst strength test, 3-point bending stiffness test in Machine Direction and Cross Direction, and measurements related to the separation of corrugated cardboard by perforation: tensile test: in-plane and out-of-plane, and tear test.

Statistical analysis was performed to quantify the effect of perforation variables on the change of corrugated cardboard mechanical properties. The specimens without perforation were also tested in the first category and compared with the perforated ones. Statistical analysis determined and quantified the reduction in all mechanical properties of perforated corrugated



cardboard. Correlation analysis was used to statistically verify and quantify the relationship between the obtained results. Results of edge crush test and bending stiffness test (CD) are in positive correlation and in negative correlation with the results of bending stiffness test (MD) while results of tensile test in-plane is in positive correlation with tear test. Both last mention tests are in positive correlation with bending stiffness test (CD). The variable with the most significant influence on a particular mechanical property was determined by multivariate analysis. For the measurements in first category that are in statistically significant correlation the analysis showed that the explanatory variable angle of perforation position was the most influential and provided the most significant information to explain the variability on the loss of corrugated cardboard mechanical properties. For measurements in second category the most influential explanatory variable was variable type of perforation. Tensile out-of-plane test has eliminated the positioning of perforation at a 45degree angle. The explanation is in fracture mechanics - the crack propagates in the direction of the least resistance, which, in the case of corrugated board, is in the Machine Direction. By increasing the cut portion of the perforation, the influence of the angle on the change in the mechanical properties of the separation of corrugated cardboard is reduced. Therefore, it is possible to maintain the existing positive properties related to transport and storage by selecting a type of perforation with a larger cut portion and positioning it at an angle of about 70°, while enabling the separation of corrugated cardboard with less force.

**Key words:** corrugated cardboard, type of perforation, perforation position, secondary packaging, edge crush resistance, burst strength resistance, bending stiffness, tensile strength, tear resistance, material fracture

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	<b>1</b>
1.1. Obrazloženje i motivacija istraživanja .....	1
1.2. Cilj i hipoteze istraživanja .....	3
<b>2. TEORIJSKI DIO</b> .....	<b>4</b>
2.1. Ambalaža.....	4
2.1.1. Zahtjevi i funkcije ambalaže .....	5
2.1.2. Ambalažni materijali i održivost .....	6
2.1.3. Učinkovitost ambalaže .....	7
2.2. Komercijalna sekundarna ambalaža .....	8
2.2.1. Funkcionalni zahtjevi ambalaže za izlaganje na police.....	10
2.2.2. Izazovi ambalaže za izlaganje na police.....	11
2.3. Karakterizacija materijala komercijalne sekundarne ambalaže.....	14
2.3.1. Struktura valovitoga kartona .....	14
2.3.2. Sastavnice valovitoga kartona .....	16
2.3.3. Geometrija vala valovitoga sloja.....	18
2.3.4. Broj slojeva kod valovitoga kartona.....	21
2.3.5. Perforiranje valovitoga kartona .....	22
2.4. Mehanička postojanost.....	24
2.4.1. Čvrstoća ambalažnog materijala.....	25
2.4.2. Krutost ambalažnog materijala.....	27
2.4.3. Modul elastičnosti ambalažnog materijala .....	28
2.4.4. Mehanika loma .....	28
2.5. Pregled dosadašnjih istraživanja .....	30
<b>3. PLAN, MATERIJALI I METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA</b> .....	<b>34</b>
3.1. Plan istraživanja .....	34
3.2. Materijali .....	35
3.2.1. Varijable perforacije.....	35
3.2.2. Priprema uzoraka.....	37
3.3. Ispitivanje dimenzija .....	39
3.3.1. Gramatura valovitoga kartona .....	39
3.3.2. Debljina valovitoga kartona .....	40
3.4. Karakterizacija mehaničkih svojstava .....	40
3.4.1. Ispitivanje otpornosti brida valovitoga kartona na tlačnu silu.....	41
3.4.2. Ispitivanje otpornosti jačine pucanja valovitoga kartona .....	42
3.4.3. Ispitivanje otpornosti na savijanje .....	43

3.4.4.	Ispitivanje vlačne čvrstoće .....	45
3.4.5.	Ispitivanje otpornosti prema cijepanju po Elmendorfu .....	47
3.5.	Statističke analize .....	48
<b>4.</b>	<b>REZULTATI ISTRAŽIVANJA I RASPRAVA .....</b>	<b>52</b>
4.1.	Rezultati eksperimentalnih ispitivanja .....	52
4.1.1.	Određivanje otpornost brida na pritisak .....	53
4.1.2.	Određivanje otpornosti jačine pucanja perforiranoga valovitoga kartona.....	57
4.1.3.	Određivanje krutosti perforiranoga valovitoga kartona u smjeru MD .....	61
4.1.4.	Određivanje krutosti perforiranoga valovitoga kartona u smjeru CD .....	65
4.1.5.	Određivanje vlačne čvrstoće u ravnini .....	69
4.1.6.	Određivanje vlačne čvrstoće van ravnine .....	73
4.1.7.	Određivanje otpornosti prema cijepanju .....	76
4.2.	Rezultati statističkih analiza .....	81
4.2.1.	Korelacijska analiza .....	82
4.2.2.	Analiza utjecaja varijabli perforacija na otpornost brida na pritisak .....	85
4.2.3.	Analiza utjecaja varijabli perforacija na otpornost jačine pucanja valovitoga kartona .	87
4.2.4.	Analiza utjecaja varijabli perforacija na krutost valovitoga kartona u smjeru MD.....	89
4.2.5.	Analiza utjecaja varijabli perforacija na krutost valovitoga kartona u smjeru CD.....	92
4.2.6.	Analiza utjecaja varijabli perforacija na vlačnu čvrstoću u ravnini .....	94
4.2.7.	Analiza utjecaja varijabli perforacija na vlačnu čvrstoću van ravnine .....	96
4.2.8.	Analiza utjecaja varijabli perforacija na otpornost prema cijepanju .....	98
4.3.	Rasprava .....	101
4.4.	3D model optimizacije .....	106
<b>5.</b>	<b>ZAKLJUČAK.....</b>	<b>109</b>
<b>6.</b>	<b>LITERATURA .....</b>	<b>112</b>
<b>PRILOZI.....</b>	<b>.....</b>	<b>121</b>
PRILOG 1: POPIS SLIKA.....	.....	121
PRILOG 2: POPIS TABLICA .....	.....	126
PRILOG 3: POPIS KORIŠTENIH STANDARDA .....	.....	129
PRILOG 4: OPŠIRNIJI PRIKAZ REZULTATA ISTRAŽIVANJA .....	.....	130
<b>ŽIVOTOPIS.....</b>	<b>.....</b>	<b>158</b>
<b>POPIS OBJAVLJENIH RADOVA .....</b>	<b>.....</b>	<b>159</b>

# 1. UVOD

## 1.1. Obrazloženje i motivacija istraživanja

S rastom i povećanjem konkurentnosti gospodarstva u posljednjih nekoliko desetljeća, globalno tržište potaknulo je veću potražnju za praktičnijim i sofisticiranijim pakiranjem, što je dovelo do značajnog razvoja ambalažne industrije te jedina bilježi pozitivan trend rasta vrijednosti proizvodnje od svih skupina grafičkih proizvoda [1]. Glavni izazov s kojima se suočava ambalažna industrija je razvoj održivoga pakiranja. Optimizirani dizajn ambalaže mora biti financijski isplativ s uravnoteženim ulogama zaštite i očuvanja proizvoda, zadovoljavati vizualne kriterije potrošača te imati odgovornost prema okolišu [2]. S obzirom na visoke troškove i kadrovske izazove, trgovci traže rješenja koja će smanjiti potrebu za radnom snagom u trgovini što se procjenjuje da je jedan od najvećih izravnih operativnih troškova za trgovca [3]. Potrebe trgovačkih lanaca orijentirane su pojednostavljenju procesa dopunjavanja polica i velik korak ka tome učinjen je razvojem ambalaže koja se direktno izlaže na prodajnom mjestu te ne zahtijeva komplicirano raspakiranje i pojedinačno izlaganje svakog proizvoda. Potaknuta spomenutim maloprodajnim inicijativama, tradicionalna sekundarna ambalaža je doživjela evoluciju koja donosi učinkovitije poslovanje u trgovini i bolju maloprodajnu prezentaciju.

Definicije komercijalnog tipa sekundarne ambalaže pod nazivom maloprodajna ambalaža (*Retail Ready Packaging, RRP*) i ambalaža za izlaganje na polici (*Shelf-Ready Packaging, SRP*) su klasificirane na različite načine, ali imaju isti zajednički koncept. Općenito podrazumijevaju izraze koji se koriste za označavanje sekundarnih ambalažnih kutija s nizom prodajnih jedinica (primarnih ambalaža), a dolaze spremne za prodaju i nakon jednostavnog procesa otvaranja izlažu se na policu (SRP) ili stoje samostalno (RRP). Funkcionalni zahtjevi spomenute ambalaže podrazumijevaju: jednostavnu identifikaciju ambalaže, jednostavno otvaranje, jednostavno dopunjavanje na polici, jednostavno kupovanje i jednostavno zbrinjavanje otpada (engl. „5 easy“). Prednosti su vidljive kroz cjelokupni opskrbeni lanac u smanjenju procesa i operacija u transportu, stvaranju boljih interakcija i iskustava za proizvođače, dobavljače, distributere te prodajno osoblje, uz poboljšavanje iskustva kupnje za potrošača [4].

Prema istraživanju iz 2017. hrvatski proizvođači hrane najčešće koriste ambalažu za izlaganje na polici koja se otvara, odnosno razdvaja pomoću perforacija na kutiji od valovitoga kartona

[5]. Ta vrsta ambalažne kutije nakon otvaranja nudi najveći prostor za prezentaciju poruke i mogućnost isticanja logotipa tvrtke ili bilo koje druge ciljane reklame. Maloprodajna ambalaža (RRP) i ambalaža za izlaganje na police (SRP) zahtijeva veliku pozornost u svim aspektima njezinog kreativnog i funkcionalnog oblikovanja i provedbe, što podrazumijeva znatne troškove. Trošak implementacije komercijalne sekundarne ambalaže isključivo je na proizvođaču [6]. Najveći izazov je dizajnirati izdržljivu i funkcionalnu sekundarnu ambalažu u usporedbi s tradicionalnom zbog perforacija koje oslabljuju kutiju te modularnog pakiranja. Perforacije ne smiju puknuti prilikom formiranja ambalažne kutije ili punjenja, niti prilikom transporta, skladištenja ili rukovanja. Međutim, čvrstoća koju spomenuta ambalaža mora imati u transportu ne smije onemogućiti razdvajanje po perforaciji, odnosno otvaranje ambalaže. Nadalje, tako razdvojena ambalaža mora zadovoljiti estetske uvjete kako bi uopće mogla biti izložena na prodajno mjesto. S marketinškog stajališta, primarna ambalaža se smatra jednim od najvažnijih aspekata koji mogu stvoriti vrijednost robe. Budući da sekundarna ambalaža koja se izlaže na policu može prekriti do 40% primarne ambalaže [7], takva ambalaža ne smije svojim estetskim izgledom umanjiti vrijednost primarne ambalaže.

Krajnji vizualni doživljaj ostatka otvorene sekundarne ambalaže ovisi o konstrukciji kutije, mogućnostima otvaranja te ljudskom faktoru. Uspješnije otvaranje osigurava konstruktor ili dizajner ambalaže odabirom materijala, odabirom tipa perforacije, pozicioniranjem perforacije, vidljivosti i vrstama oznaka za otvaranje koje moraju biti jednostavne i po mogućnosti intuitivne. Optimizirani dizajn ambalažne kutije treba omogućiti brzo i sigurno otvaranje ambalaže bez oštećivanja primarne ambalaže, bez ozljeda radnika, s estetski prihvatljivim izgledom rastvorenog ostatka kutije, što u konačnici pridonosi bržem kretanju robe unutar trgovine [8].

Većina izazova s komercijalnom sekundarnom ambalažom tijekom aktivnosti u maloprodaji vezana je za otvaranje i dopunjavanje polica [9]. Jednostavno otvaranje ambalažne kutije predstavlja izazov sa strane zaštite proizvoda, čemu pridonosi i nepoznavanje mehaničkih svojstava valovitoga kartona oslabljenog perforacijama. Rezultat su moguće ozljede radnika pri otvaranju kutije [8] i neprimjeren izgled ostatka rastvorene kutije što može dovesti s jedne strane do ozljede kupca ili s druge strane do eliminacije takve ambalaže iz maloprodaje te redizajniranja iste što iznova povećava troškove proizvođača [5].

## 1.2. Cilj i hipoteze istraživanja

Cilj istraživanja je optimizacija mehaničkih svojstava valovitoga kartona s perforacijama u svrhu poboljšanja razdvajanja perforiranoga dijela bez narušavanja čvrstoće materijala.

U istraživanju se ispituju, definiraju i kvantificiraju mehanička svojstva valovitoga kartona oslabljenog perforacijama. Zatim se korelacijskom analizom utvrđuje povezanost različitih mehaničkih parametara valovitoga kartona pod utjecajem interakcije varijabli perforacije.

Varijable perforacije označavaju:

1. tip perforacije,
2. pozicioniranje perforacije na ambalaži i
3. kvalitetu perforiranoga valovitoga kartona.

Optimalno kombiniranje različitih tipova perforacije ovisno o njezinom pozicioniranju na stranicama kutije od valovitoga kartona predstavlja potencijal koji će osigurati manju silu potrebnu za razdvajanje linije perforacije uz zadržavanje mehaničke čvrstoće materijala.

Iz navedenog cilja proizlaze sljedeće hipoteze istraživanja:

H<sub>1</sub> – Tip perforacije smješten na različitim pozicijama valovitoga kartona ima različiti utjecaj na promjenu mehaničkih svojstava valovitoga kartona.

H<sub>2</sub> – Tip perforacije ima veći utjecaj na promjenu mehaničkih svojstava nego pozicioniranje perforacije kod svih kombinacija varijabli perforacija na valovitom kartonu.

H<sub>3</sub> – Interakcija tipa perforacije i pozicioniranja perforacije ima jednaki trend promjene mehaničkih svojstava kod različitih kvaliteta valovitoga kartona.

H<sub>4</sub> – Optimalnim odabirom tipa perforacije ovisno o pozicioniranju perforacije na valovitom kartonu moguće je olakšati razdvajanje perforiranoga dijela bez narušavanja ostalih mehaničkih svojstava.

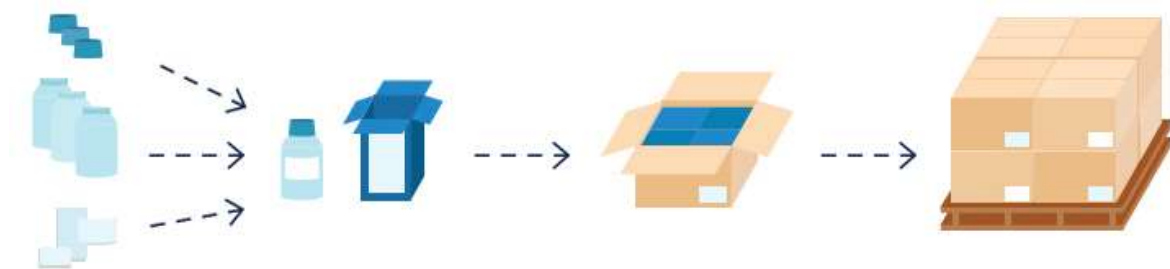
## 2. TEORIJSKI DIO

### 2.1. Ambalaža

Ambalaža je svaki proizvod, bez obzira na prirodu materijala od kojeg je izrađen, koji se koristi za držanje, zaštitu, rukovanje, isporuku i predstavljanje robe, od sirovina do gotovih proizvoda, od proizvođača do potrošača [10].

Ambalaža se može opisati i kao sistem pripreme robe za transport, distribuciju, skladištenje, logistiku, prodaju te krajnju upotrebu. Kao takva ona sadrži robu odnosno proizvod te ga štiti, čuva, transportira, informira i prodaje [11].

Prema Direktivi europskog parlamenta i vijeća 94/62/EZ o ambalaži i ambalažnom otpadu definirane su primarna, sekundarna i tercijarna ambalaža koje zajedno tvore sustav pakiranja [12]. Na Slici 2.1. ilustriran je sustav pakiranja.



Slika 2.1. Sustav pakiranja: primarna, sekundarna i tercijarna ambalaža [13]

Prodajna ambalaža ili primarna ambalaža je ambalaža stvorena da čini proizvod za krajnjeg korisnika ili potrošača na prodajnom mjestu;

Skupna ambalaža ili sekundarna ambalaža je ambalaža stvorena da čini u trenutku kupnje zbir određenog broja proizvoda bilo da je on prodan kao takav krajnjem korisniku ili potrošaču, ili služi samo kao sredstvo kojim se pune police na prodajnom mjestu; ona se može odvojiti od proizvoda bez utjecanja na njegova svojstva;

Transportna ambalaža ili tercijarna ambalaža je ambalaža stvorena da olakša rukovanje i prijevoz određenog broja proizvoda ili skupnih ambalaža u svrhu sprečavanja fizičkog dodira i

transportnih oštećenja. Transportna ambalaža ne uključuje kontejnere za cestovni, željeznički, brodski ili zračni prijevoz [14].

### 2.1.1. **Zahtjevi i funkcije ambalaže**

Zahtjeve ambalaže diktira proizvod. Temeljno svojstvo ambalaže je da preveze, dostavi i proda proizvod što efikasnije s ekonomske strane uzimajući u obzir i ekološki aspekt. Proizvođač mora osmisliti sustav pakiranja na način da proizvod mora dati optimalnu kombinaciju primare, sekundarne i tercijarne ambalaže. U obzir se moraju uzeti i svi zahtjevi vezani uz lanac opskrbe.

Zaštitna funkcija ambalaža mora zaštititi proizvod od raznih mehaničkih naprezanja, atmosferskih utjecaja, od fizičkih i kemijskih utjecaja, od djelovanja mikroorganizama, insekata, glodavaca itd. Također, ambalaža mora zaštititi okolinu od proizvoda koji sadrži. Zaštita proizvoda je bitna i s ekonomskog i ekološkog stajališta [15].

Skladišno transportna funkcija omogućuje jednostavnije i racionalnije iskorištenje skladišnog prostora te također doprinosi bržem i jeftinijem procesu transporta. Ukoliko oblik ambalaže i dimenzije upakiranog proizvoda nisu u optimalnom odnosu, dolazi do neiskorištenog prostora ambalaže, a time i skladišnog odnosno transportnog prostora.

Prodajna funkcija bavi se povećanjem opsega prodaje i olakšavanjem samog čina prodaje. Usklađuje se sa suvremenim razvojem trgovine robom široke potrošnje, odnosno samoposlužnom tehnikom prodaje. Ambalaža treba privući pažnju potencijalnog kupca svojim dizajnom, odgovarajućom količinom te garantiranom kvalitetom kako bi se odlučio na kupnju. Količina robe zapakirana u prodajnu jedinicu ambalaže ovisi o vrsti robe, načinu njezine uporabe, trajnosti, kupovnoj moći i potrebama potrošača [16].

Uporabna funkcija ambalaže zahtjeva mogućnost jednostavnog otvaranja i sigurnog rukovanja kako ambalažom tako i njezinim dijelovima, bez opasnosti od povreda. Svojom uporabnom funkcijom ambalaža bi trebala omogućiti njeno ponovno korištenje, kao na primjer: povratna ambalaža. Sa stajališta zaštite proizvoda i sa stajališta garancije kvalitete, ambalaža bi trebala biti što bolje i sigurnije zatvorena, a što je bolje zatvorena logično je da se teže otvara. Jednostavni principi otvaranja obično zbog nižih troškova imaju prednost, ali oni ne moraju bezuvjetno omogućiti i jednostavno i sigurno otvaranje [15].

Funkcija i izgled ambalaže ovisi o ambalažnom materijalu, o odabranom prostornom obliku ambalaže, o odabranim elementima grafičkog oblikovanja, o njihovoj međusobnoj usklađenosti



te usklađenosti sa robom. Kreiranje ambalaže svodi se na realizaciju funkcija ambalaže. Sve funkcije ambalaže ne mogu se optimalno riješiti. Rješenje mora biti kompromisno.

### 2.1.2. Ambalažni materijali i održivost

Ambalažni materijal je najvažniji element kreiranja ambalaže jer se osobine odabranog materijala prenose i na ambalažu. O ambalažnom materijalu ovisi izbor oblika i postupka prostornog i grafičkog oblikovanja ambalaže, a ovisi i njezina cijena. Izbor ambalažnog materijala izravno utječe i na rok trajanja zapakiranog proizvoda. Ambalažni materijal u kojem se nalazi proizvod mora biti postojan prema svim vanjskim i unutarnjim utjecajima koji ga nastoje prostorno i strukturno deformirati. [15].

Najčešće korišteni ambalažni materijali su papiri, kartoni, polimeri, staklo, aluminij i čelik, dok se u zadnje vrijeme povećala upotreba obnovljivih materijala poput škroba i celuloze. Celuloza i smola povećavaju čvrstoću, a škrob služi kao plinska barijera [17]. Nabrojani materijali mogu se koristiti sami ili u kombinaciji. Kombinacijom različitih materijala suzbijaju se nepovoljna svojstva pojedinačnih materijala.

Odabir ambalažnog materijala povezan je s ekonomskim, ekološkim i socijalnim vrijednostima sustava pakiranja proizvoda. Izbor materijala reflektira povećanu potrebu za ekološki prihvatljivom ambalažom s najmanjom proizvodnjom otpada [11]. Od 2003. godine sektor pakiranja činio je oko 2% bruto nacionalnog proizvoda u razvijenim zemljama. Otprilike polovica tog tržišta odnosila se na ambalažu hrane. Očekuje se da će sve veća potražnja za pakiranom hranom od strane potrošača zbog ubrzanog tempa života i promjena prehrambenih navika imati veliki utjecaj na tržište [17].

Ambalaža može imati ključnu ulogu u svijetu koji se mijenja. Održiva i učinkovita proizvodnja predstavlja odgovornost za budućnost i s ekološkog, ekonomskog i socijalnog aspekta. Ekološki aspekt danas se ističe važnijim od ekonomskog. Upravo ta činjenica podupire i osnažuje upotrebu ambalažnih materijala na osnovi celuloze te povećava upotrebu papira i kartona u ambalažnoj industriji. Papiri i kartoni zadovoljavaju društvenu i ekološku odgovornost, mogu se nadomjestiti pošumljavanjem iskorištenog izvora, tj. održivim gospodarenjem šumama, pogodni su za recikliranje te financijski isplativi [18]. Prema statističkim analizama Europske konfederacije papirne industrije – CEPI, koja predstavlja 91% europske proizvodnje celuloze i papira (ne uključujući Rusiju), u 2021. godini od ukupne proizvodnje papira i kartona 38% se odnosi na valoviti karton namijenjen za ambalažne kutije. U proizvodnji valovitoga kartona

iskoristivost papira za recikliranje iznosilo je 93%, što je u konačnici 63% recikliranih vlakana u valovitom kartonu [19].

Zadaća inovacija i poboljšanja vezanih za ambalažu i pakiranje je bolja zaštita proizvoda, smanjenje rasipnosti i produljenje roka trajanja proizvoda uz korištenje materijala iz održivih izvora [20]. Papir i karton kao ambalažni materijal nema najbolja svojstva, međutim struktura valovitoga kartona omogućuje izvanredan omjer čvrstoće i težine. U usporedbi s ostalim krutim ambalažnim materijalima, valoviti karton ima veliku krutost uz nisku cijenu. To je potvrđeno još davne 1970. godine [21].

S druge strane, ambalažna industrija je i veliki potrošač materijala pa samim tim i značajan proizvođač otpada. Također, značajan je potrošač energije, kako u proizvodnji materijala i ambalaže tako i u transportu robe po svijetu. Bitno je naglasiti da se papiri i kartoni ne mogu reciklirati u nedogled jer se svakim novim procesom recikliranja kvaliteta vlakana pogoršava [11]. Činjenica je da ne postoji savršen materijal, ali tendencija je u optimizaciji korištenih resursa.

### 2.1.3. Učinkovitost ambalaže

Pojam učinkovitost ambalaže označava sposobnost ambalaže da uspješno savlada različite zadatke definirane zadanim uvjetima. Na svojstva konstruirane ambalaže utječu svojstva materijala od kojih je građena te sam oblik ambalaže. Ta svojstva su mjerljiva i mogu se kvantificirati.

Tehnička učinkovitost je kombinacija ambalažnih svojstava koja zadovoljavaju tehničke zahtjeve. Tehnički zahtjevi odnose se na fizikalna svojstva koja štite i omogućavaju distribuciju proizvoda. Ukoliko se mijenjaju svojstva materijala te oblik ambalaže, moguće je utjecati na svojstva ambalaže, a time i na učinkovitost ambalaže. Uspješnost optimizacije sistema ambalaže ovisi o tome koliko dobro su tehnički zahtjevi kvantitativno definirani i u kojoj se mjeri učinkovitost ambalaže može prilagoditi tim zahtjevima.

Optimizacija učinkovitosti ambalaže je zahtjevan i kompleksan proces, zahtjeva holistički pristup koji uključuje i proizvod i lanac distribucije. Ponekad različite potrebe rezultiraju oprečnim zahtjevima ambalažnih svojstava. Kao na primjer: izvrstan tisak nasuprot niske cijene materijala, manje ambalažnog materijala nasuprot visokoj čvrstoći, jednostavno otvaranje nasuprot visokoj krutosti ambalaže [12]. Naglasak je pronaći rješenje ambalaže koje

zadovoljava sve kriterije i zahtjeve. Razumljivo je da je potreban kompromis među oprečnim zahtjevima.

## 2.2. Komercijalna sekundarna ambalaža

Glavni izazovi s kojima se suočava ambalažna industrija je razvoj održivog pakiranja. Optimizirani dizajn ambalaže mora biti financijski isplativ s uravnoteženim ulogama zaštite i očuvanja proizvoda, zadovoljavati vizualne kriterije potrošača te imati odgovornost prema okolišu [2]. S obzirom na visoke troškove i kadrovske izazove, trgovci traže rješenja koja će smanjiti potrebu za radnom snagom u trgovini što se procjenjuje da je jedan od najvećih izravnih operativnih troškova za trgovca [3]. Smanjenjem troškova rada postigla bi se profitabilnost. Potrebe trgovačkih lanaca orijentirane su pojednostavljenju procesa dopunjavanja polica i velik korak ka tome učinjen je razvojem ambalaže koja se direktno izlaže na prodajnom mjestu i koja ne zahtijeva komplicirano raspakiranje i pojedinačno izlaganje svakog proizvoda.

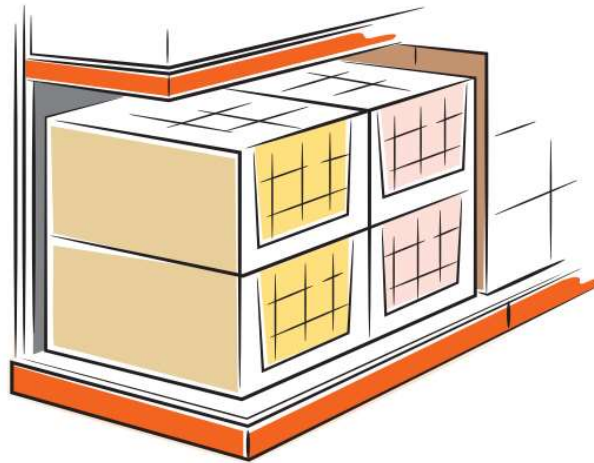
Ambalaža za izlaganje na police (*Shelf-Ready Packaging*, SRP) kao i maloprodajna ambalaža (*Retail Ready Packaging*, RRP) je komercijalni tip sekundarne ambalaže, odnosno skupno pakiranje primarne ambalaže (Slika 2.2.).



Slika 2.2. Primjer ambalaže za izlaganje na police (*Shelf-Ready Packaging*)

Dolazi u jedinici koja je optimizirana za učinkovit transport, skladištenje, ali i prodaju. Time se omogućuje da se proizvod sigurno dopremi u trgovinu, ali i da se minimalnim rukovanjem prenamijeni u paket koji prezentira proizvode na prodajnom mjestu. Nema pojedinačnog

rukovanja primarnom ambalažom ili jediničnim paketima te se osigurava učinkovito prikazivanje proizvoda unutar ostatka sekundarne ambalaže. Da bi se iskoristile prednosti spomenute ambalaže, ista moraju biti pažljivo dizajnirane, u skladu s dimenzijama polica i dimenzijama paleta (Slika 2.3.).



Slika 2.3. Ilustrirani primjer optimiziranih dimenzija ambalažne kutije s obzirom na policu [22]

Sekundarna ambalaža je prvotno imala tri zadatka. Glavni cilj bio je osigurati zaštitu proizvoda tijekom transporta od proizvođača preko distribucijskog centra do police u trgovini. Drugi cilj bio je osmisliti ambalažu koja bi osigurala maksimalnu iskorištenost paleta te punjenje kamiona. Dok je treći cilj bio optimizirati veličinu ambalažne kutije kako bi se smanjilo vrijeme potrebno za preuzimanje proizvoda u skladištu [3]. Danas su očekivanja od sekundarne ambalaže veća, ima dvostruku ulogu i postaje sredstvo prodaje, privlačeći potrošača na prodajno mjesto. Traže se dodatna funkcionalna rješenja same ambalaže. Fokus je na poboljšanju procesa opskrbnog lanca kako bi se smanjili troškovi, povećala profitabilnost, optimizirala kvaliteta proizvoda, očuvali resursi te spriječila oštećenja, krivotvorenja i krađa proizvoda [20].

Smatra se da ambalaža za izlaganje na police (SRP) kao i maloprodajna ambalaža (RRP) može poboljšati profitabilnost od proizvodnog pogona do maloprodajnog objekta osiguravajući niže troškove lanca opskrbe, povećanu dostupnost proizvoda i efikasno dopunjavanje. Maloprodajna ambalaža i ambalaža za izlaganje na polici može pomoći i u uštedi troškova i emisija CO<sub>2</sub> unutar lanca opskrbe. Ušteda se postiže kompaktnijim dizanom ambalaže što omogućava više proizvoda na jednoj paleti i rezultira rjeđim manipulacijama paleta, ali i manjim brojem dostavnih vozila. Iz toga proizlazi i manje skladištenje prazne ambalaže i robe koja čeka da

bude isporučena. Dizajn ambalaže može pridonijeti i učinkovitijem procesu pakiranja, bilo da je automatski ili ručni. Radna skupina koju čine stručnjaci proizvođača, dobavljača ambalaže kao i trgovačkih lanaca, *Efficient Consumer Responde Europe* (ECR Europa) objavila je smjernice za jednostavniju implementaciju SRP-a na tržište, Cjelovit vodič za zajednički pristup rješavanju SRP-a. Potvrdila je također pet funkcionalnih zahtjeva takve ambalaže pod nazivom „5 easy“ koji variraju ovisno o proizvodu, tipu i kompleksnosti ambalaže [23].

### 2.2.1. Funkcionalni zahtjevi ambalaže za izlaganje na police

Na Slici 2.4. ilustrirano je pet funkcionalnih zahtjeva ambalaže za izlaganje na police, a u daljnjem tekstu objašnjeno.

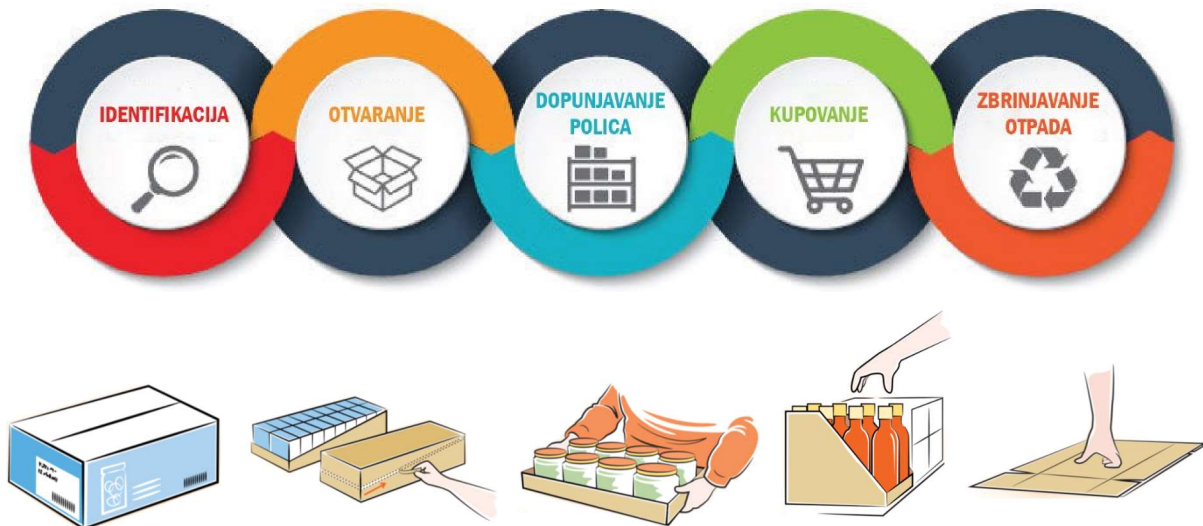
Jednostavna identifikacija ambalaže pomaže prodavačima i radnicima u skladištu prilikom odabira željenog proizvoda. Smanjuju se pogreške odabira koje mogu nastati rukovanjem u trgovinama i skladištima. Jednostavnijem pronalasku i identifikaciji ambalaže pomažu barkodovi, ime proizvoda, te sadržaj i vrijeme do kad se proizvod treba upotrijebiti. Takve informacije otiskuju se na najmanje dvije strane, čitljivo i jasno.

Jednostavno otvaranje ambalaže podrazumijeva da proces otvaranja mora biti brz i jednostavan, isključivo rukama, bez upotrebe oštrih alata poput noževa ili skalpela, ne smije oštetiti ambalažu niti narušiti izgled gotovog proizvoda, dok sama ambalaža mora ostati dovoljno čvrsta da zadovolji uvjete sigurnog transporta. Otvaranje SPR-a moguće je pomoću perforacije ili se kutija sastoji od dna i poklopca kojeg se može maknuti.

Jednostavno dopunjavanje na polici zahtijeva minimalno raspakiranje i postavljanje na police. Stoga prodajno osoblje može zamijeniti prazan SRP puno brže što pomaže u smanjenju troškova osoblja i troškova rada. S obzirom da trenutno ne postoji način na koji bi se ovaj proces mogao automatizirati, velika je prednost što je upotreba SRP-a brža i učinkovitija. Uklanjanjem poklopca, dijelova s perforacijama, folija i sl., savijanje, gužvanje ili trganje preostalih dijelova kutije nije dopustivo. Dimenzije SRP-a trebaju odgovarati polici na kojoj su izložene.

Jednostavno kupovanje podrazumijeva da povećana kvaliteta prezentacije proizvoda poboljšava komunikaciju s potrošačem, povećava vjerojatnost primjećivanja i kupovine određenog proizvoda. Osigurava se manjim paketima što omogućuje potrošačima jednostavnije posezanje za proizvodom, urednim kutijama nakon što se određeni broj proizvoda proda te slobodnim pristupom proizvodu, bez prepreka poput presavijenih preklopa ili omota.

Jednostavno zbrinjavanje otpada zahtijeva da ambalaža prilikom odlaganja otpadnog materijala treba postati ravna i zauzimati što manje mjesta. Prilikom odlaganja treba se poštovati i pridržavati pravila iz EU smjernica za gospodarenje i odlaganje otpadom [14], [24].

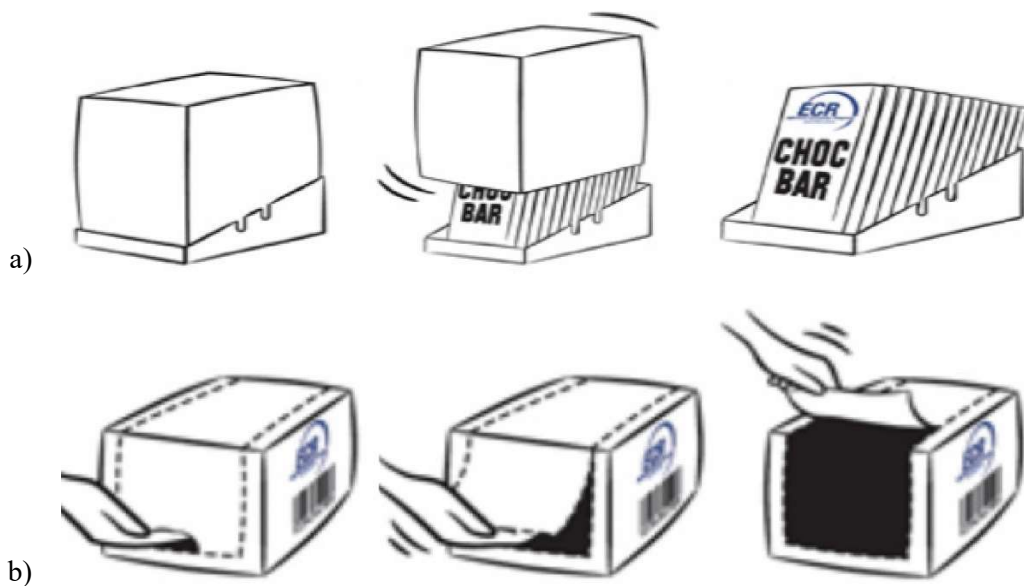


Slika 2.4. Pet zahtjeva komercijalne ambalaže za izlaganje na police, tzv. „5 easy“ [22] [25]

### 2.2.2. Izazovi ambalaže za izlaganje na police

Nedvojbeno je da komercijalna sekundarna ambalaža poboljšava komunikaciju ne samo s krajnjim kupcima već sa svim sudionicima u opskrbnom lancu. Sve dobrobiti trebale bi se postići s jednim glavnim ciljem – povećanje prodaje kroz veću dostupnost na policama što rezultira financijskom dobit i za trgovca i za proizvođača.

Pojedinosti i zahtjevi kako implementirati svaki kriterij od tzv. „5 easy“ razlikuju se od prodavača do prodavača, što otežava dobavljačima isporuku rješenja široke primjene. Između pet funkcionalnih zahtjeva, primjećuje se da je većina izazova s ambalažom tijekom aktivnosti u maloprodaji, vezana za otvaranje i dopunjavanje polica. Razlikuju se dva načina otvaranja takve ambalaže. Prvi način, prikazan na Slici 2.5.a je princip poklopac-dno. Poklopac se na odgovarajući način odvoji od dna, dok se u drugom slučaju ambalaža razdvaja po perforaciji (Slika 2.5.b). Princip poklopac-dno je skuplje, ali i dno koje ostaje na polici je mehanički odrezano stoga nema estetskih nepravilnosti. Otvaranje po perforaciji je financijski isplativije, međutim s određenim izazovima kao što je jednostavnije razdvajanje valovitoga kartona s estetski prihvatljivim rubom, bez narušavanja čvrstoće ambalažne kutije.



Slika 2.5. Otvaranje ambalaže za izlaganje na police: a) princip poklopac-dno; b) po perforaciji

Problemi se javljaju pri rukovanju ambalažom, struktura koja je preteška za nadopunjavanje, prisutna je upotreba noževa i ostalih oštih alata koji mogu oštetiti oblik i dizajn ambalaže, primarnu ambalažu ili ozlijedit radnika [8], [26]. Jednostavno otvaranje komercijalne sekundarne ambalaže detaljno je objašnjeno u Tablici 2.1.

Tablica 2.1. Jednostavno otvaranje ambalaže spremne za police

Jednostavne upute:	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Upute moraju omogućiti internacionalnu implementaciju uz izbjegavanje jezičnim barijera.</li> <li>▪ Brzo lociranje mjesta otvaranja.</li> <li>▪ Upute o otvaranju u jednostavnim slikama/piktogramima i dijagramima korisnije su od riječi.</li> </ul>
Kvaliteta:	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Stabilnost i izgled ambalaže ne smije se umanjiti prilikom otvaranja iste.</li> <li>▪ Treba se izbjegavati upotrebu oštih alata poput noževa i skalpela.</li> <li>▪ Dizajn ambalaže mora omogućiti jednostavno rukovanje pojedinačnim proizvodima unutar ambalaže.</li> </ul>
Otvaranje procesom razdvajanja ili kidanja:	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Otvaranje procesom razdvajanja po perforaciji ne smije ostaviti neuredan rub ambalaže.</li> </ul>
Jednostavno rukovanje:	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ukoliko se koristi rastezljiva folija, mora se lako ukloniti bez bušenja.</li> <li>▪ Proces otvaranja ne bi trebalo obavljati više od jedne osobe.</li> <li>▪ Rukovanja pri procesu otvaranja treba svesti na minimum.</li> <li>▪ Vrijeme otvaranja trebalo bi pridonijeti bržem i jednostavnijem procesu nadopune robe na polici.</li> </ul>
Zaštita osoblja i potrošača:	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Potrebno je izbjegavati korištenje oštih alata radi sigurnosti na radnom mjestu.</li> <li>▪ Ukoliko su oštri alati potrebni, mora se jasno objasniti pomoću piktograma.</li> <li>▪ Dizajn ambalaže mora omogućiti jednostavno rukovanje pojedinačnim proizvodima unutar ambalaže.</li> </ul>



### 2.3. Karakterizacija materijala komercijalne sekundarne ambalaže

Valoviti karton je jedan od najvažnijih materijala za pakiranje i ambalažu danas. Dvije trećine (63%) od ukupne vrijednosti i 73% od ukupne tonaže od sve transportne ambalaže korištene u Sjedinjenim Američkim Državama je u formi valovitoga kartona [27]. Ima najveći volumen od bilo kojeg drugog pojedinačnog ambalažnog materijala na svijetu. Također je najviše recikliran ambalažni materijal s preko 80% iskorištenosti [28].

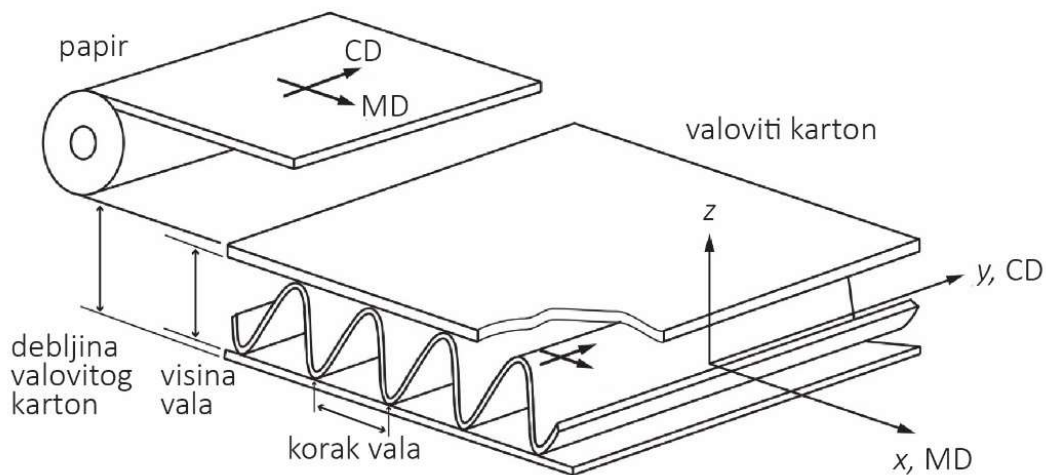
#### 2.3.1. Struktura valovitoga kartona

Valoviti karton je struktura (ambalažni materijal) koja se sastoji od nekoliko slojeva međusobno slijepljenih papira od kojih su neki valoviti. Na valoviti sloj zalijepljen je jedan ili dva ravna papira, ovisno radi li se o dvoslojnom ili troslojnom valovitom kartonu. Moguće je dodati dodatne ravne i valovite dijelove [12]. Kod strukture valovitoga kartona, fizička svojstva papira se koriste na iznimno učinkovit način. Različite kombinacije papira u slojevima valovitoga kartona omogućavaju proizvodnju materijala različitih svojstava. Različiti broj slojeva s različitim kombinacijama, različito podnosi opterećenja. Ambalaža od valovitoga kartona je lagana, čvrsta, jeftina i lako se odlaže u otpad. Nedostatak joj je neotpornost na vlagu. Dodatkom različitih premaza i taj nedostatak se može umanjiti ili čak eliminirati. Prednosti ovakve ambalaže su dobra mehanička svojstva, biorazgradivost, jednostavna grafička obrada i niska cijena. Struktura valovitoga kartona omogućuje izvanredan omjer čvrstoće i težine. Ravni slojevi podnose opterećenja savijanja, dok valoviti sloj podnosi poprečna opterećenja smicanja te pomaže u stabilizaciji otporom na deformacije izvan ravnine. Na ovaj način se učinkovito kombiniraju mehanička svojstva ravnih i valovitih slojeva. Pružaju veći omjer krutosti naprema težini kad bi se usporedili s bilo kojom pločom ekvivalentne težine napravljene od bilo kojih pojedinačnih materijala sastavnice [29]. Također, omjer nosivosti kutije od valovitoga kartona i njezine težina puno je veća nego kod ostalih čvrstih materijala [21]. Upotrebom valovitoga kartona dolazi do uštede materijala i energije te očuvanja okoliša. Smanjenjem težine proizvoda, smanjuje se i potrošnja goriva, manje je ispušnih plinova, zatim i troškovi tijekom transporta padaju.

Kod strojno izrađenih papira, uslijed inercije radi kretanja sita, većina vlakanaca orijentirana je u smjeru u kojem se pokreće traka na papir-stroju. Stoga smjer proizvodnje papirne trake predstavlja uzdužni smjer toka vlakanaca u gotovom papiru, dok je okomito na njega poprečni smjer toka vlakanaca [30]. Orijentacija vlakanaca utječe na sva fizikalna svojstva papira [31],

direktno utječe na mehanička svojstva i dimenzionalnu stabilnost papira [32]. Valoviti karton je papirna tvorena gdje se fizikalna svojstva razlikuju u smjeru pružanja vala od svojstva u smjeru obrnutom od smjera pružanja vala. Razlog tome je također u orijentaciji vlaknaca od kojih su papiri građeni te deformaciji papira prilikom sušenja u proizvodnji [33]. Tijekom sušenja vlakno se u uzdužnom smjeru skuplja samo oko 1 do 2%, dok skupljanje u poprečnom smjeru doseže oko 30% [34]. Posljedica mikro strukture i orijentacije vlaknaca je anizotropija papira, kartona i valovitoga kartona. Anizotropija je svojstvo ovisnosti o smjeru, odnosno osobitost nekog sredstva da njegova fizikalna svojstva poprimaju različite vrijednosti za različite smjerove. Anizotropija papira i papirnih tvorevina je ortotropna, što znači da su svojstva različita u tri međusobno okomita smjera (u x, y i z osi), ali su u svakom smjeru simetrična. Može biti mala devijacija u simetriji osi zbog iskrivljenosti orijentacije vlaknaca [35].

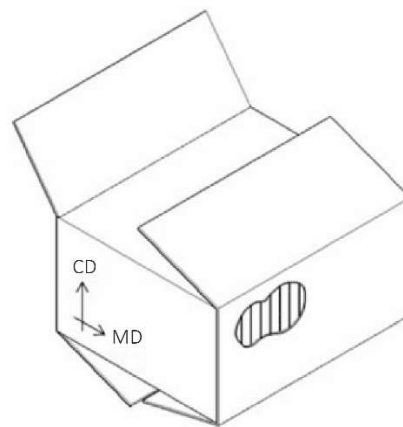
Struktura valovitoga kartona sadrži različita svojstva u 3 glavna smjera (Slika 2.6.): smjer proizvodnje odnosno smjer pružanja vala (engl. *Machine Direction*, MD), zatim smjer okomit na smjer pružanja vala (engl. *Cross Direction*, CD) te smjer debljine (engl. *Thickness Direction*) [36]. Ortotropnost valovitoga kartona uzrokuje bolja mehanička svojstva u smjeru pružanja vala (MD) nego u smjeru okomitom na pružanje vala (CD) [37].



Slika 2.6. Ortotropija valovitoga kartona [38]

Ambalaža od valovitoga kartona se uvijek izrađuje tako da je smjer pružanja vala postavljen paralelno na dno ambalaže, odnosno na podlogu (Slika 2.7.). U tom slučaju opterećenje pada na vrhove valova i samo takvu ambalažu se može opteretiti s najvećim pritiskom. Ambalažu od

valovitoga kartona se može najjače opteretiti na uglovima, a manje na sredini, što ovisi i o dužini stranica. Poznavanje opterećenja ambalaže neophodno je za praksu, tj. transport i skladištenje. Ambalaža se mora slagati tako da uglovi uvijek dođu na uglove, a ne na sredinu stranice, kako bi se iskoristio maksimalni potencijal mehaničkih svojstava ambalažne kutije [39]. Za izradu određenog oblika ambalaže potrebno je odabrati valoviti karton takvih mehaničkih svojstava koji će najbolje moći odoljeti naprezanjima u formiranju kutije, punjenju, a zatim u transportu, rukovanju i skladištenju.

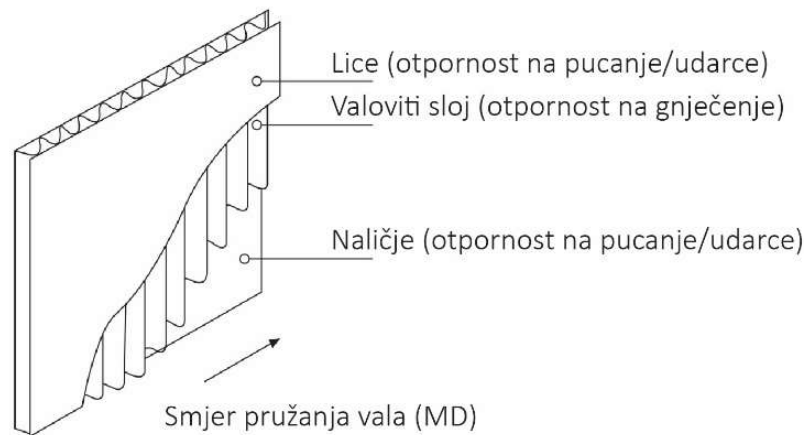


Slika 2.7. Položaj valovitoga kartona kod ambalažne kutije [40]

### 2.3.2. Sastavnice valovitoga kartona

Valoviti karton se sastoji od dvije osnovne komponente: ravni sloj (engl. *liner*) i valoviti sloj (engl. *fluting*) koji su povezani adhezivom. Vanjski ravni sloj naziva se lice, unutarnji ravni sloj je naličje (Slika 2.8.). Osnovne sirovine za izradu valovitoga kartona su papiri čija svojstva utječu na svojstva valovitoga kartona. Svojstva papira ovise o vrsti i duljini vlakancica te vezama između vlakancica. Duža vlakancica imaju više veza s ostalim vlakancima stoga su bolje umrežena nego kratka vlakancica. Odabir papira ovisi o namjeni valovitoga kartona, bilo to transportna ambalaža ili komercijalna ambalaža te o sloju valovitoga kartona koji se izrađuje. Postoji širok izbor papira za svaki sloj. Upotrebljavaju se papiri od čiste celuloze, celuloze miješane s drvenjačom i papiri koji su dobiveni od papirnih ostataka. Kao i u ostalim segmentima dizajniranja i konstruiranja, ne postoji jedan najbolji izbor. Radi se o optimiziranju često proturječnih zahtjeva i odabiru prioriteta za određeni skup okolnosti [29]. Adheziv ili ljepilo je pomoćno sredstvo kojim se povezuju ravni i valoviti slojevi, ali isto tako ljepilom se zatvara ambalaža od valovitoga kartona. Boje i sredstva za impregnaciju smatraju se sredstvom

za oplemenjivanje papira, a služe da valoviti karton bolje otiskuje ili da ne propušta vodenu paru ili vodu [43].



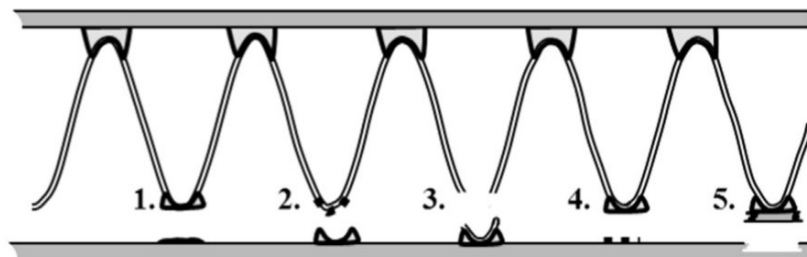
Slika 2.8. Nazivi sastavnica troslojnog valovitoga kartona [41]

Papir za ravne slojeve mora imati otpornost na pucanje, tj. otpornost na udarce. Ravni slojevi su najviše napregnuti na vlak, pa i papir od kojeg se izrađuje mora imati i veliku čvrstoću na vlak. Pri izradi ravnih slojeva valovitoga kartona za transportnu ambalažu koristi se natron-papir koji se odlikuju velikom čvrstoćom na pucanje, kidanje, istezanje i lomljenje. Smatra se najkvalitetnijom vrstom papirom za izradu valovitoga kartona. Glavna karakteristika natron-papira su dugačka celulozna vlakna dobivena sulfatnom celulozom, bijeljenom ili nebijeljenom (smeđa boja). Jedna strana je uvijek glatka i to je vanjska strana budućeg valovitoga kartona što omogućuje kvalitetan tisak, dok je druga strana uvijek hrapava i pogodna za dobro sljepljivanje s valom. Gramatura mu se određuje prema mehaničkim svojstvima valovitoga kartona, najčešće od 125 do 250 g/m<sup>2</sup>, a za specijalne svrhe i 400 g/m<sup>2</sup>. Za proizvodnju valovitoga kartona manje čvrstoće za ravne slojeve može se koristiti lošiji papir kao što je šrenc-papir od sortirano starog papira. Za vanjski sloj komercijalne ambalaže s visokim zahtjevima kvalitetnog otiska koristi se bezdrveni papir koji je strojno gladak, satiniran, bijel ili obojen. U upotrebi su i superir-papiri te sulfitni-papiri [27], [39], [42], [43].

Papir za valovite slojeve mora biti krut i žilav i mora imati određenu otpornost na gnječenje, što će mu omogućiti valovito oblikovanje bez pucanja i drugih oštećenja. Za izradu valovitoga sloja kartona najčešće se koristi polucelulozni papir (fluting-papir) koji je uz navedena svojstva i relativno jeftin pri čemu daje val velike čvrstoće. Proizvodi se od bjelogoričnog tvrdog i mekog drva u gramaturi od 120 do 180 g/m<sup>2</sup>. Također se koristi i jeftiniji šrenc-papir. Ukoliko

se proizvodi od nesortiranog starog papira, mehanička svojstva mu zaostaju, međutim ukoliko se proizvodi od sortiranih otpadaka natron-papira i s povećanim masenim udjelom celuloze tada mu kvaliteta može biti zadovoljavajuća. Šrenc-papir za valovite slojeve izrađuje se u gramaturama od 90 do 230 g/m<sup>2</sup>. Kraft-papir koristi se također za izradu vala kod valovitoga kartona, a karakterizira ga najbolja vrijednost za novac. Kvaliteta papira podrazumijeva visoku mehaničku čvrstoću na kidanje, savijanje, tlačenje te otpornost na vlagu [27], [39], [42], [43].

Adhezivi ili ljepila su pomoćna sredstva za povezivanje ravnih i valovitih slojeva papira u procesu izrade valovitoga kartona. O izboru ljepila ovisi kvaliteta slijepljenog dijela, a iz toga i kvaliteta valovitoga kartona. Slijepljeni dio ravnog i valovitoga sloja papira mora činiti homogenu cjelinu, tako da se slijepljeni dio više ne može odvojiti trganjem, već na mjestu lijepljenja u trenutku odvajanja dolazi do kidanja papira. Ljepila ne smiju prodirati u papir, niti se zbog male viskoznosti smiju razlijevati po papiru. Moraju se brzo sušiti, odnosno brzina vezivanja mora biti velika i usklađena s brzinom rada stroja za proizvodnju valovitoga kartona. Na Slici 2.9. prikazana su mjesta najčešćih primjera neuspjelog vezivanja. Za lijepljenje slojeva valovitoga kartona upotrebljava se natrij silikat pod imenom vodeno staklo, škrobno ljepilo te sintetička ljepila. Funkcija lijepljenja daje materijalu čvrstoću i cjelovitost te omogućuje amortizaciju čime se osigurava zaštita proizvoda unutar ambalaže [39], [43], [44].



Slika 2.9. Poprečni presjek neuspjelog vezivanja kod valovitoga kartona: 1. u ljepilu; 2. kod valovitoga sloja; 3. unutar valovitoga sloja; 4. na spoju ljepila i ravnoga sloja; i 5. unutar ravnoga sloja [45].

### 2.3.3. Geometrija vala valovitoga sloja

Primarna karakteristika valovitoga kartona je dimenzija i oblik vala. Valovi imaju oblik sinusoide, odnosno mosne ovalne konstrukcije. Takav val se jednostavno izrađuje i daje dobra mehanička svojstva valovitom kartonu. Glavna uloga valovitoga sloja je da razdvoji lice od naličja kako bi se dobila struktura s većom krutosti na savijanje. Valoviti sloj također mora osigurati od smicanja među ravnim dijelovima kako bi se uklonila mogućnost klizanja prilikom

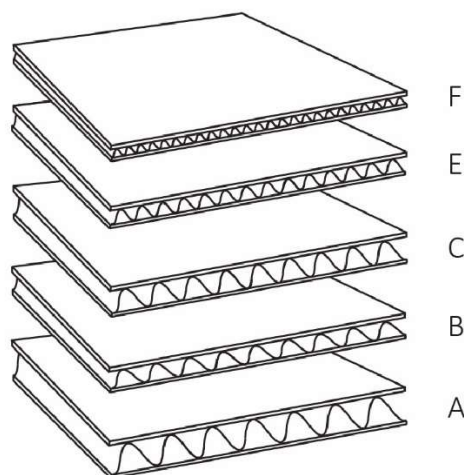
savijanja [38]. Svojim oblikom val se odupire savijanju, izvijanju, probijanju i dalje elastičnost valovitom kartonu što je posebno značajno kod ambalaže. Vrijednost valova dolazi do izražaja ukoliko su dobro slijepljeni za ravne slojeve, pri čemu se tjemena valova lijepljenjem pričvrste na ravni papir [36], [39], [43].

Oblik vala definira:

- visina vala (*flute height*): razmak između vrha i dna šupljine vala
- korak vala (*flute spacing - pitch*): razmak vrhova dvaju susjednih valova
- broj valova (*flutes per meter*): broj valova sadržanih u 1 m valovitoga kartona

O visini vala kod valovitoga kartona ovisi i broj valova u dužinskom metru. Što je visina vala manja, to je broj valova veći. Veći broj valova zahtijeva i veću potrošnju papira za izradu valovitoga sloja valovitoga kartona [39].

Valovi dolaze u nekoliko različitih vrsta, odnosno veličina. Svaka vrsta vala ima karakteristična mehanička svojstva koja prenosi i na valoviti karton. Debljina valovitoga kartona ovisi o veličini vala i broju valova. Iako su valovi nazvani abecednim redom, veličina im nije po tom istom redu, već su nazvani kako su bili povijesno predstavljeni. Standardne veličine vala od najveće do najmanje su: K, A, C, B, E, F, N [27]. Dio standardnih veličina prikazan je na Slici 2.10.



Slika 2.10. Standardne veličine vala [38]

Četiri najčešće vrste vala prikazane su i opisane u Tablici 2.2.

Tablica 2.2. Vrste valova i njihove dimenzije prema DIN 55468–1: 2004-08 [46]

OZNAKA VALA	NAZIV VALA	VISINA VALA (mm)	KORAK VALA (mm)	BROJ VALOVA (u 1m)
A	grubi val	4.0 – 4.9	8.0 – 9.5	110
B	mali val	2.2 – 3.0	5.5 – 6.5	150
C	veliki val	3.1 – 3.9	6.8 – 7.9	130
E	mikro val	1.0 – 1.8	3.0 – 3.5	290

Val A je prvi predstavljani val. Najviši je, a samim time je debljina valovitoga kartona najveća. Zbog najveće debljine, u smjeru pružanja vala najveća je čvrstoća na savijanje i izvijanje, a u smjeru okomitom na smjer pružanja vala najmanja. Osim toga, ovaj valoviti karton ima najveću čvrstoću na probijanje. Ima malu čvrstoću na tlak, ali najbolje ublažava dinamička opterećenja okomita na površinu valovitoga kartona, odnosno najbolje amortizira udarce.

Val B je drugi predstavljani val, proizveden kao odgovor na potrebu za valovitim kartonom veće otpornosti na tlačjenje. Veća tlačna čvrstoća je postignuta nižim valom i većim brojem valova po metru što je također dovelo do valovitoga kartona s glađom površinom što je omogućilo kvalitetniji otisak. Zbog manje debljine smanjuje se i čvrstoća na savijanje i izvijanje u smjeru pružanja valova.

Val C je predstavljen kao kompromis između vala A i vala B. Po svojim dimenzijama, a time i mehaničkim svojstvima nalazi se između dva spomenuta vala. Očekuje se da ima bolju otpornost prema dinamičkim opterećenjima od B vala i bolji otisak od A vala.

Val E (E kao *elite*) je sljedeći val koji je predstavljen, a preskočeno je slovo D. Val E je niži od vala B, sa najvišom čvrstoćom na vlak, a time i povećane kvaliteta mogućeg otiska.

Postoje još i val F, val N i val K. Val F i val N osmišljeni su kao zamjena za sklopivi karton u slučaju potrebe povećanih mehaničkim svojstava uz jednaku kvalitetu otiska. Najnoviji val koji je predstavljen je val K, sa najvećom visinom vala čime stvara najdeblji valoviti karton. Time se poboljšava amortizacija udaraca [27].

Za teže predmete, fleksibilnost se postiže odabirom dvovalnih konstrukcija koje uključuju kombinaciju AB, BA, BC ili CB valova. Kombinacije valova omogućuju konstrukcije koje mogu nadoknaditi svojstva potrebna za podnošenje većih opterećenja [47].

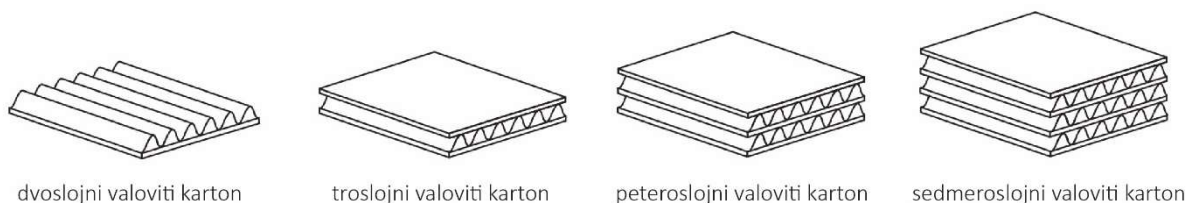
Veća visina vala daje veću otpornost na savijanje valovitoga kartona čime se poboljšava amortizacija udaraca ambalaže. Mali valovi se koriste prilikom potrebe za visokom kvalitetom otiska, ali smanjenje čvrstoće ambalažne kutije. Zbog svega navedenog, val A najčešće se upotrebljava za pakiranje proizvoda osjetljivih na udarce tijekom transporta i skladištenja. Val B koristi se za konzerve i ostalu robu koja ne zahtjeva ambalažu velike otpornosti na opterećenja. Val C se upotrebljava za transportnu ambalažu veće otpornosti na opterećenja i najčešći je korišten val u SAD te Europi. Val E se često koristi u komercijalne svrhe, kao ambalaža spremna za maloprodaju ili ambalaža za izlaganje na police [35].

Valoviti kartoni otporni su na pritisak ovisno o valu od kojeg su izrađeni, što podrazumijeva i broj valova u dužinskom metru te obliku vala. Od četiri najčešće korištenih valova ( val A, B, C i E) valoviti karton s valom E ima najviše valova u dužinskom metru te pruža veći otpor okomitom pritisku nego ostala tri vala. Ukoliko se valoviti karton opterećuje paralelno sa smjerom pružanja vala, tada val A (s najvišim valovima) može podnijeti veće opterećenje nego valoviti kartoni s ostalim valovima [39].

#### 2.3.4. Broj slojeva kod valovitoga kartona

Valoviti karton je kombinacija međusobno slijepljenih ravnih i valovitih slojeva papira. Ovisno o broju slojeva razlikuje se nekoliko vrsta valovitoga kartona (Slika 2.11.):

- jednoslojni valoviti papir
- dvoslojni valoviti karton
- troslojni valoviti karton
- peteroslojni valoviti karton
- sedmeroslojni valoviti karton



Slika 2.11. Valoviti kartoni različitih slojeva [38]



Jednoslojni valoviti papir se proizvodi od različitih vrsta papira, kvaliteta i gramatura, ovisno o namjeni. Visina valova papira ovisi o visini i dubini žljebova na valjcima te se isporučuje u rolama [39].

Dvoslojni valoviti karton ima jedan sloj valovitoga papira slijepljen na ravni sloj. Proizvodi se od raznih vrsta papira s raznim tipovima valova. Izbor vrste papira i vrste vala ovisi o namjeni valovitoga kartona i očekivanim opterećenjima. Koristi se za ojaštavanje proizvoda (za zamatanje boca i drugih proizvoda osjetljivih na dinamička naprezanja) te odvajanje proizvoda unutar ambalažne kutije [39], [43].

Troslojni valoviti karton sastoji se od tri međusobno slijepljena sloja, vanjski ravni sloj, srednji valoviti sloj te unutarnji ravni sloj. Zbog trećeg ravnog sloja, valoviti karton ima svoju čvrstoću i krutost. Prvenstvena mu je namjena izrada transportnih i komercijalnih kutija za lakše osjetljive proizvode. Ponekad koristi i za zaštitu proizvoda unutar pakiranja. Ne može se savijati poput dvoslojnog valovitoga kartona već se tada koristi za izradu pregrada i uložaka za zaštitu osjetljivih proizvoda na udarce izvana ili za zaštitu od međusobnih unutrašnjih dodira.

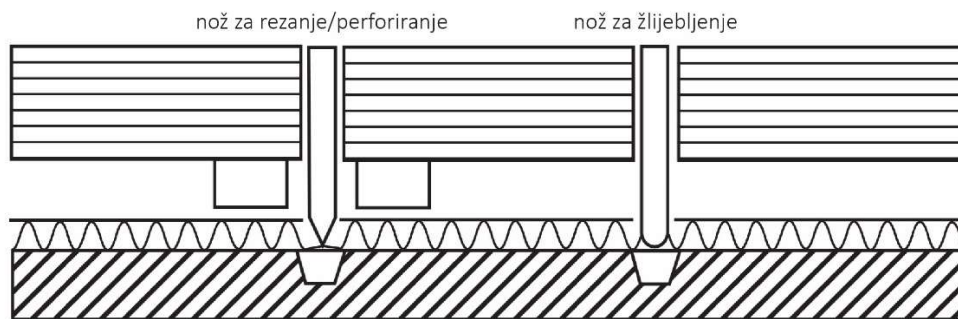
Peteroslojni valoviti karton sastoji se od pet međusobno slijepljenih slojeva papira među kojima su dva valovita sloja smještena između tri ravna sloja papira. Naziva se još i dvovalni karton. Valoviti karton s pet slojeva ima bolja mehanička svojstva od valovitoga kartona s tri sloja. Koristi se za izradu transportnih kutija za pakiranje težih proizvoda. Najčešće se koriste val A ili val B u kombinaciji s C valom [43].

Sedmeroslojni valoviti karton sastoji se od sedam međusobno slijepljeni slojeva papira. Tri valovita sloja nalaze se između četiri ravna sloja. Sve kombinacije visina valova dolaze u obzir: sve tri iste visine vala, dvije iste visine i jedna viša ili niža te sve tri različite visine vala. Ovakva kombinacija slojeva stvara valoviti karton koji zbog svoje krutosti dobiva osobine drveta. Ne može se saviti i teško se probija. Služi za izradu posebnih kutija, isključivo za pakiranje teških strojeva i uređaja.

#### **2.3.5. Perforiranje valovitoga kartona**

Kod pripreme valovitoga kartona za izradu ambalaže strojevi se mogu svrstati u grupe s obzirom na radne operacije koje vrše: pripremne strojeve koji udubljuju, režu, izrezuju, perforiraju i koji označuju mjesta za pregib, spajanje i formiranje ambalaže. Izbor vrste stroja ovisi o konstrukcijskom rješenju, veličini ambalaže, potrebi za tiskanjem, spajanju i slično [39].

Perforiranje je ravnomjerno, isprekidano odvajanje materijala bušenjem rupica i ravnih sječnih crtica. Ovisno o vrsti stroja, razlikuju se ravni i rotirajući noževi. Perforiranje se u kartonažnoj proizvodnji provodi tehnikom štancanja [42]. Štancanje je postupak izrezivanja prireza kutije iz ploče valovitoga kartona. Cijela se kontura prireza izrezuje u jednom zahvatu. Štancanjem se izrađuju svi oblici i vrste ambalaže od valovitoga kartona, kao što su različiti oblici komercijalne ambalaže, ambalaže spremne za maloprodaju i ambalaže spremne za izlaganje na polici, zatim ambalaže za pakiranje voća i povrća te dijelova za unutrašnju zaštitu proizvoda. Prednost je što štanca omogućuje izradu bilo kojeg oblika ambalaže. Alat za štancanje se sastoji od nosača čeličnih traka, gumenih izbacivača te protuploče. Čelične trake, odnosno noževi, tvore linije za žlijebljenje, linije za rezanje i linije za perforiranje (Slika 2.12.).



Slika 2.12. Ilustrirani prikaz nosača čelične trake, gumenih izbacivača i protuploče [38]

Perforacije na valovitom kartonu olakšavaju otvaranje ambalaže i mogu se izvesti na bilo kojem dijelu kutije, ali se uglavnom postavljaju na ono mjesto koje je sa stajališta vađenja robe najpogodnije. Perforacijama se valoviti karton dovoljno oslabi da se na tom mjesto jednostavnije razdvaja, ali perforacije također oslabe i samu ambalažu [43]. Na Slici 2.13. prikazana je linija za perforiranje s kombinacijom dužine noža od 10 mm te 3 mm slobodnog prostora.



Slika 2.13. Linija za perforiranje

## 2.4. Mehanička postojanost

Ambalažni materijal u kojem se nalazi proizvod mora biti postojan prema svim vanjskim i unutarnjim utjecajima. Ambalaža mora zadovoljiti mehaničku, kemijsku, biološku i termičku postojanost dok samo izuzetno kod nekih vrsta ambalažnih materijala i optičku postojanost. Mehanička postojanost ambalaže je sposobnost ambalažnog proizvoda da se suoči sa mehaničkim naprezanjem tijekom transporta, skladištenja i korištenja bez promjene svojih dimenzija ili oblika. Odnosi se također na sposobnost ambalaže da se suoči sa silama koje djeluju na nju, kao što su pritisci, udari, vibracije ili opterećenja tijekom transporta, bez da se lomi, deformira ili raspada. Mehanička postojanost je važna za dizajn i proizvodnju ambalaže kako bi se osigurala sigurnost i dugotrajnost proizvoda. Dizajneri ambalaže moraju uzeti u obzir svojstva materijala koji se koriste, kao i uvjete transporta i skladištenja proizvoda kako bi osigurali da ambalaža ima odgovarajuću mehaničku postojanost [48].

Na ambalažu, kao i na proizvode unutar te ambalaže djeluju statičke i dinamičke sile koje pokušavaju ambalažu na bilo koji način mehanički oštetiti. Statičke sile mogu biti vertikalne ili horizontalne. Ambalaža u skladištima ili vozilima opterećena je vertikalnim statičkim silama. Odnosno donji redovi složene ambalaže izloženi su statičkom tlaku jer ih opterećuje sva ambalaža koja je složena na njih. Horizontalne statičke sile nastaju tokom utovara i istovara, prilikom hvatanja ili držanja ambalaže manipulativnim uređajima, primjerice kran. Dinamičke sile nastaju tokom transporta, prilikom mijenjanja brzine i smjera kretanja i to su dinamičke horizontalne sile. Postoje i vertikalne dinamičke sile koje se obično javljaju kao posljedica pada ambalaže prilikom manipulacije. Dinamičke sile uzrokuju i sekundarne posljedice, najčešće klizanje ili prevrtanje ambalaže zbog djelovanja horizontalnih sila. Sekundarna naprezanja dinamičkim silama su klizanje, prevrtanje, vibracije i trenje ambalaže. Bočne stranice i bridovi ambalaže izloženi su horizontalnim udarcima [15].

Pod utjecajem tih sila dolazi do naprezanja ambalažnog materijala kojima se on suprotstavlja svojim mehaničkim osobinama. Mehanička postojanost ambalažnog materijala podrazumijeva suprotstavljanje mehaničkim silama koje ga nastoje prostorno i strukturno deformirati. Najvažnija mehanička svojstva ambalažnih materijala su čvrstoća, tvrdoća te otpor na habanje.

Čvrstoća materijala izražava se najmanjom silom koja može uzrokovati trajne deformacije materijala. Tvrdoća je svojstvo materijala kojim se on odupire prodiranju određenog tvrdog predmeta. Otpor na habanje je otpor kojim se materijal odupire površinskom trošenju zbog trenja [15].

#### 2.4.1. Čvrstoća ambalažnog materijala

Mehaničke sile djeluju na materijal tako da ga nastoje prekinuti, zdrobiti, saviti, izviti, usukati i probiti. Materijal se odupire djelovanju tih sila svojom čvrstoćom. Prema smjeru djelovanja i vrsti opterećenja kojim se materijal odupire, razlikuju se:

- čvrstoća na vlak ili zatezna ili prekidna čvrstoća je otpor kojom se materijal suprotstavlja sili koja djeluje u smjeru njegove osi i koja ga nastoji prekinuti;
- čvrstoća na tlak kojom se ambalažni materijal odupire djelovanju sile koja ga nastoji plastično deformirati (zgnječiti) ili mu razoriti strukturu (zdrobiti);
- čvrstoća na probijanje je otpor materijala na tlak koji djeluje okomito na njegovu površinu i nastoji ga probiti. Dio površine kružnog oblika se optereti tlakom koji se postepeno povećava sve dok se materijal ne probije;
- čvrstoća na savijanje je otpor kojim se materijal odupire djelovanju sile koja ga nastoji plastično deformirati (saviti) ili mu razoriti strukturu (slomiti). Naprezanje na savijanje je složeno naprezanje pri kojem istovremeno dolazi do naprezanja na tlak i naprezanja na vlak, ovisno od kud djeluje sila;
- čvrstoća na izvijanje je otpor kojim se materijal odupire djelovanju sile koja ga nastoji izviti;
- čvrstoćom na sukanje odupire se materijal djelovanju sile koja ga nastoji usukati [15].

Čvrstoća je mehaničko svojstvo materijala koje pruža otpor djelovanju vanjske sile. Svaka vanjska sila koja djeluje na određeno tijelo zove se opterećenje. Opterećenje uzrokuje deformaciju tijelu, zbog čega tijelo mijenja svoj oblik. Čvrstoća je također sposobnost konstrukcije kako bi podnijelo određeno opterećenje u cjelini i u pojedinim njezinim dijelovima bez opasnosti od rušenja. Opterećenje može biti: mirno ili statičko; jednosmjerno promjenjivo ili dinamičko; izmjenično promjenjivo, titrajuće ili oscilatorno [49].

Čvrstoća ambalažnog materijala je vrlo važna za ambalažu jer osigurava da proizvod unutar ambalaže bude siguran i zaštićen tijekom transporta i skladištenja. Tlačna čvrstoća je jedno od najbitnijih svojstava valovitoga kartona. Kod ploče valovitoga kartona tlačna čvrstoća ravnog i valovitoga sloja kontrolira tlačnu čvrstoću kutije. Kod kartonskih kutija pola tlačne čvrstoće dolazi iz otpornosti na savijanje, a pola od otpornosti brida na pritisak. Međutim, kod kutija od valovitoga kartona tlačna čvrstoća ploče valovitoga kartona je bitnija od otpornosti na savijanje [50]. Vlačna čvrstoća je pokazatelj čvrstoće papira i kartona, koji ovise o čimbenici kao što su duljina, čvrstoća te povezanost vlakana [51].

Veća tlačna čvrstoća označava da je ploča otpornija na gnječenje i izvijanje, dok veća vlačna čvrstoća ukazuje da je ploča otpornija na istezanje i kidanje, odnosno cijepanje. Vrijednost tlačne čvrstoće općenito iznosi između jednu trećinu ili jednu polovinu vrijednosti vlačne (prekidne) čvrstoće. Odnos vlačne i tlačne čvrstoće značajan je kod savijanja. Razlog tome je što ploča valovitoga kartona prvo popušta na strani tlačnog naprezanja, čime se osigurava da druga strana ne pukne prilikom vlačnog naprezanja. Upravo to omogućuje valovitom kartonu da se žlijebi i savija kako bi se izradila ambalaža [52].

Čvrstoća određenog materijala jednaka je onom naprezanju koje uzrokuje slom tog istog materijala. Prema položaju i smjeru vanjske sile prema osi tijela, postoje:

- naprezanje na vlak: kada sila djeluje u smjeru osi tijela i nastoji ga rastegnuti;
- naprezanje na tlak: kada sila djeluje u smjeru osi tijela i nastoji ga stlačiti;
- naprezanje na odrez ili na smik: kada sila djeluje okomito na os tijela i nastoji ga prerezati
- naprezanje na savijanje (naprezanje na vlak s jedne strane i naprezanje na tlak s druge strane)
- naprezanje na torziju ili uvijanje
- naprezanje na izvijanje

Kojim će naprezanjima biti izložen ambalažni materijal i kakav će biti intenzitet tog naprezanja više ovise o smjeru i intenzitetu nego o vrsti sile koja djeluje na ambalažu. Uz to ovise i o položaju ambalažnog materijala u odnosu prema sili i o stabilnosti oblika ambalaže.

Uzdužne ili aksijalne sile djeluju uzduž osi tijela i uzrokuju normalna naprezanja. Takva naprezanja djeluju okomito na presjek tijela, kao što su naprezanje na vlak i naprezanje na tlak. Poprečne ili transverzalne sile djeluju okomito na os tijela i uzrokuju tangencijalna/posmična naprezanja. Takva naprezanja djeluju tangencijalno na presjek tijela kao na primjer kod smika. U praksi obično dolazi do složenih naprezanja, kao savijanje i vlak, savijanje i tlak, savijanje i torzija itd.

Kada na čvrsta tijela djeluje sila dolazi do deformacije. Između naprezanja i deformacija postoji odgovarajuća veza. Veća naprezanja izazivaju veće deformacije, međutim deformacije uz naprezanje ovise i o materijalu. Dopušteno naprezanje je granica do koje se materijal smije napregnuti, a da pri tome ne nastane trajno oštećenje (plastična deformacija). Dopušteno naprezanje je uvijek nekoliko puta manje od čvrstoće materijala što se označava koeficijentom sigurnosti [49]. Deformacije materijala pod utjecajem mehaničkih sila ovise o njihovoj vrsti i

intenzitetu. Deformacije mogu biti trajne (nakon prestanka djelovanja sile tijelo može ostati u deformiranom obliku te se tada govori o njegovoj plastičnosti) i prolazne (nakon prestanka djelovanja sile, tijelo vraća u prvotni oblik, tzv. elastična deformacija), a mogu se očitovati kao deformacije oblika i deformacije strukture. S obzirom na vrstu i oblik deformacije materijal može biti elastičan, žilav i krhak [15].

#### 2.4.2. Krutost ambalažnog materijala

Krutost se definira kao otpornost na deformaciju. Odnosi se na sposobnost materijala da se savije pod određenim silama bez oštećenja ili promjene oblika. Postoje tri vrste krutosti: aksijalna [N/m], fleksijska (krutost na savijanje) [N/m], torzijska (krutost na uvijanje) [Nm/rad].

Krutost na savijanje, odnosno otpornost na savijanje, je sposobnost strukture da se odupre djelovanju sila koje nisu uzdužnog smjera. U praksi, otpornost na savijanje je direktno pod utjecajem gramature: visoka gramatura omogućuje visoku otpornost na savijanje. Međutim gramatura nije svojstvo strukture, dok krutost na savijanje je. Kod valovitoga kartona koji se koristi za ambalažu, otpornost na savijanje je jedno od najvažnijih svojstava. Visoka otpornost na savijanje omogućava tvrdoću i čvrstoću. Također, potrebna je za efikasan rad stroja za izradu ambalaže jer osigurava dobro žlijebljenje. Često se koristi za određivanje kvalitete i stabilnosti različitih materijala. Kada niska otpornost na savijanje uzrokuje problem, uzrok je često u poprečnoj krutosti, okomito na smjera pružanja vala (CD). Zbog kontinuiranog procesa proizvodnje papira te skupljanja pri sušenju, vlakanca su više orijentirana u uzdužnom smjeru (MD). Posljedica toga je anizotropija valovitoga kartona koja utječe na modul elastičnosti pa im je krutost dva do četiri puta veća u uzdužnom (MD) nego u poprečnom smjeru (CD) [37], [53].

Najučinkovitiji način kako bi se zadovoljila i otpornost na savijanje te dobra površinska svojstva s minimalnom gramaturom je u strukturi slojeva valovitoga kartona. Papiri lica i naličja podnose opterećenja savijanja, dok valoviti sloj podnosi poprečna opterećenja smicanja i pomaže stabilizaciji ploče valovitoga kartona otporom na deformacije. Na ovaj način se učinkovito kombiniraju mehanička svojstva ravnih i valovitih dijelova, pružajući veći omjer krutosti i težine od ekvivalentne čvrste ploče izrađene od bilo kojeg pojedinačnog materijala sastavnica. Otpornost na savijanje i tlačna čvrstoća su međusobno povezani, visoka krutost na savijanje sprječava nakupljanje tlačne čvrstoće u kutiji ambalaže [52].

### 2.4.3. Modul elastičnosti ambalažnog materijala

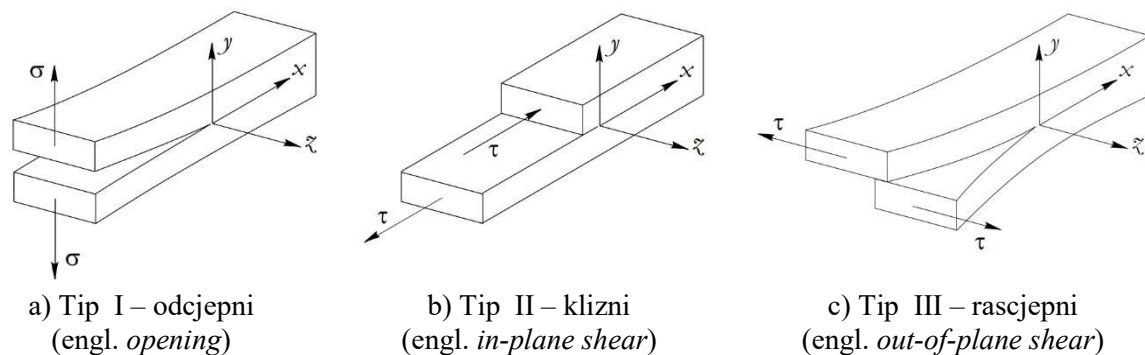
Modul elastičnosti (Youngov modul elastičnosti) je mehanička karakteristika koja predstavlja mjeru krutosti materijala i jednak je omjeru vlačnog naprezanja i linijske vlačne deformacije, u linearnom ili elastičnom dijelu dijagrama naprezanja [54]. Ključna je karakteristika za materijale koji se koriste u konstrukcijama, jer utječe na njihovu čvrstoću i sposobnost da se suprotstave vanjskim silama. Modul elastičnosti važno je svojstvo valovitoga kartona jer kontrolira njegovo ponašanje u praksi, osobito savijanje i krutost. Također može biti praktičan pokazatelj ostalih svojstava kao što je svojstvo čvrstoće te dimenzionalne stabilnosti. Odnos modula elastičnosti i strukture papira razumljiviji je od drugih mehaničkih svojstava. Modul elastičnosti kod valovitoga kartona različit je u tri glavna smjera: uzdužni/u smjeru pružanja vala ( $E_{MD}$  ili  $E_x$ ), poprečni/u smjeru okomitom na pružanje vala ( $E_{CD}$  ili  $E_y$ ) te u smjeru debljine ( $E_{ZD}$  ili  $E_z$ ). Ta razlika izrazito je bitna za ploče valovitoga kartona. Kada je riječ o homogenim materijalima, modul elastičnosti jednak je kod naprezanja na vlak i naprezanja na tlak. Zbog svoje anizotropnosti, konkretno ortotropnosti, kod valovitoga kartona moguće su razlike modula elastičnosti u spomenutim naprezanjima. Razlog tome je što svojstva valovitoga kartona variraju znatno više u CD smjeru nego u MD smjeru. Struktura valovitoga kartona sastoji se od vlaknaca koja se mogu različito saviti ili izviti, ovisno radi li se o vlačnom ili tlačnom naprezanju. Još jedno bitno elastično svojstvo valovitoga kartona je Poissonov omjer ili Poissonov koeficijent,  $\nu$ . Određuje se kao omjer poprečnog smanjenja i uzdužnog produljenja nekog materijala uslijed vlačnog naprezanja. Omjer poprečnog smanjenja uslijed uzdužnog produljenja označava se  $\nu_{MD}, \nu_x, \nu_{xy}$ . Produljenje u smjeru pružanja vala uzrokuje veće poprečno suženje, nego produljenje u smjeru obrnutom od pružanja vala. Modul smicanja,  $G$ , također je elastično svojstvo koje opisuje posmično naprezanje potrebno za posmičnu, tj. kutnu deformaciju. Modul elastičnosti odgovor je na uzdužnu deformaciju dok je modul posmika odgovor na posmičnu deformaciju. Kod pakiranja, modul smicanja javlja se prilikom punjenja ambalaže. U praksi, modul smicanja kod valovitoga kartona se procjenjuje iz uzdužnog,  $E_{MD}$ , i poprečnog,  $E_{CD}$ , modula elastičnosti. U gruboj procjeni odgovara jednoj trećini geometrijske sredine uzdužnog,  $E_{MD}$ , i poprečnog,  $E_{CD}$ , modula elastičnosti [55].

### 2.4.4. Mehanika loma

Mehanika loma je grana mehanike koja se bavi proučavanjem ponašanja materijala koji su izloženi naprezanju i koji mogu doživjeti lom. Lom materijala je razdvajanje koje uzrokuje

gubitak funkcionalnosti i mehaničkih svojstava materijala. Razlog loma su defekti, odnosno pukotine. Pukotine uzrokuju koncentraciju napreznja u vrhovima što dovodi do širenje pukotine, razdvajanje dijelova, a time i konačni lom materijala.

Napreznje u blizini vrha pukotine ovisi o dimenzijama pukotine, orijentaciji pukotine u odnosu na smjer opterećenja te fizikalno – mehaničkim svojstvima materijala. Raspodjela napreznja u blizini vrha pukotine zavisi od tipa otvaranja pukotine. Postoje tri glavna tipa otvaranja, odnosno razvoja pukotine (Slika 2.14.): tip I ili odcjepni tip, tip II ili klizni te tip III ili rascjepni tip [56].



Slika 2.14. Tri osnovna opterećenja s pripadajućim tipovima pukotine

Utjecaj koncentracije napreznja prikazan je na Slici 2.15., a opisan Jednadžbom 1:

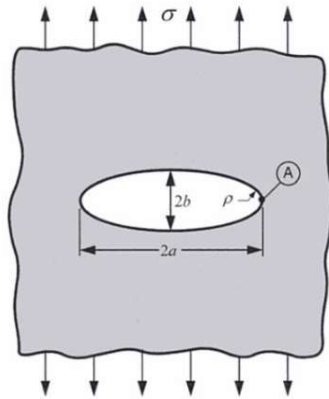
$$\sigma_A = \sigma \left(1 + \frac{2a}{b}\right) \quad (1)$$

gdje je  $\sigma_A$  napreznje pukotine A,  $\sigma$  napreznje materijala,  $a$  dužina pukotina te  $b$  širina pukotine.

Koncentracija napreznja unutar pukotine predstavlja povećanje napreznja u vrhu pukotine u usporedbi s napreznjem u okolnom materijalu. Visoka koncentracija napreznja može dovesti do brzog rasta pukotine i do konačnog loma materijala. Povećava se s odnosom dužina/širina ( $a/b$ ). Najopasniji defekti odnosno pukotine su one koje su okomite na smjer vlačnog napreznja. Smjer širenja pukotine ovisi o vrsti materijala te stanju napreznja u blizini vrha pukotine. Otpornost pukotine ovisi o orijentaciji pukotine. Velika otpornost pukotine kod jednosmjernih kompozitnih materijala, kao što je valoviti karton, je u slučaju kada je maksimalno vlačno napreznje u smjeru vlakanaca. Međutim, kada je smjer vlakanaca pod  $45^\circ$  s obzirom na vlačno napreznje, tada je krutost, tj. otpornost na deformaciju minimalna [57].



Kod materijala uskog presjeka tipičan je prijelom u obliku plastičnog smika. Plastični smik je nepovratno smicanje u zonama visoke koncentracije naprezanja. Obično je veći za pukotine koje su okomite na smjer izrade materijala. Kod valovitoga kartona su to pukotine, odnosno odrezani dio perforacije pozicioniran u poprečnom smjeru (CD).



Slika 2.15. Koncentracija naprezanja kod eliptične pukotine [57]

## 2.5. Pregled dosadašnjih istraživanja

Upotrebom ambalaže za izlaganje na polici (SRP) i maloprodajne ambalaže (RRP) u trgovini se mogu postići sljedeće prednosti: više robe i veća ponuda robe na polici, brže dopunjavanje polica, veća dostupnost, olakšan pristup proizvodima, promotivna komunikacija, poboljšana vidljivost proizvoda, uspješno lansiranje novih proizvoda uz optimizirane procese [23].

Prema Smithers-ovoj studiji iz 2019. prepoznat je značajan utjecaj SRP na globalnoj razini s povećanjem od preko 17 milijardi dolara u 5 godina (vrijednost proizvodnje maloprodajne ambalaže, odnosno ambalaže za izlaganje na polici porast će sa 60 milijardi dolara na 77 milijarde dolara u periodu od 2019. do 2024.) [58].

Međutim, pregledi literature otkrivaju nedostatak znanstvenih istraživanja u smjeru mehaničkih i strukturnih svojstava valovitoga kartona koji bi služili u svrhu učinkovitije konstrukcije navedene ambalaže. Budući da je SRP glavni oblik transportnog pakiranja te ima značajnu ulogu u logistici, većina dostupnih znanstvenih i stručnih radova obrađuje temu iz perspektive trgovaca i usmjereni su na istraživanje logističkih prednosti za trgovce. Smjernice od ECR Europe također su orijentirane na trgovce, dok za proizvođače i konstruktore takve ambalaže nedostaje informacija, tehnički pristup od odabira i pozicioniranja perforacija, utjecaja na liniju

za pakiranje, brzinu linije, produktivnosti i učinkovitosti, mogućnosti slaganja kutija ambalaže, njihova izdržljivost u transportu i skladištenju te ukupni troškovi proizvođača.

U transformaciji sektora maloprodaje, trgovci očekuju više ambalaže koja povećava učinkovitost i smanjuje troškove. Nestručna implementacija ambalaže za izlaganje na police može stvoriti troškove, smanjiti učinkovitost dorade linije, a ponekad zahtijeva i ulaganja. Iako je komercijalna sekundarna ambalaža već neko vrijeme na tržištu, proizvođači i njihovi dobavljači valovitoga kartona nikada nisu prikupili niti specificirali svoje znanje do formalnog oblika, kao što su baze podataka ili dokumenti koji bi jednostavnim korištenjem podržali brži razvoj i implementaciju. Ne postoje ni tehničke smjernice koje bi osigurale dizajn sekundarne ambalaže sa svim prednostima koje se od nje očekuju. Industrijska ispitivanja su skupa, troše financijske resurse i vrijeme, a mnoge specifične značajke moraju biti potvrđene, kao što je jednostavnost otvaranja, kompatibilnost s opremom doradne linije te sposobnost podnošenja opterećenja i mehaničkog naprezanje tijekom transporta [59].

Funkcija jednostavnog otvaranja uz funkciju jednostavnog izlaganja uzrokuje najznačajnije probleme u implementaciji na tržište. Jednostavno otvaranje podrazumijeva otvaranje ambalaže u jednom ili dva koraka, po mogućnosti jednom rukom sa što manje snage i sile, bez upotrebe dodatnih pomagala ili oštih alata poput noževa ili skalpela i bez ozljeđivanja radnika [26].

Najveći izazov za jednostavno otvaranje je kako sačuvati čvrstoću kutije, odnosno zaštitu osnovnog proizvoda [60], [61]. S obzirom na to da je osnovna funkcija transportne ambalaže zaštita, ambalaža spremna za police uglavnom se teško otvara. Komplikacije pri otvaranju uzrokuju ili ozljede radnika ili estetski neprihvatljiv rub razdvojenog dna ambalaže što može rezultirati eliminacijom takvog proizvoda s maloprodajnog mjesta [8]. Jedan od načina otvaranja ambalaže spremne za izlaganje na polici od valovitoga kartona je razdvajanje po perforaciji. Perforacija podrazumijeva određenu kombinaciju odrezanog i neodrezanog dijela [62] i upravo po tom zadanom dijelu kutija mora biti razdvojena na predvidljiv i poželjan način bez narušavanja strukturalnog integriteta ambalaže.

Klasičan pristup dizajnu ambalažne kutije s perforacijama su metode pokušaja i pogreške, koristeći se empirijskim kombinacijama perforacija specifičnih za pojedinog proizvođača. Ove metode su dugotrajne i skupe. Moguće je naći razne patentirane kutije, kombinacije transportne i prodajne ambalaže, s točno određenim dimenzijama, perforacijama, dijelovima koji se uklanjaju [63], [64], [65], [66], [67], [68], [69]. Međutim, ne postoji karakterizacija valovitoga

kartona s perforacijama, niti analize utjecaja pojedinih varijabli na mehanička svojstva kojima bi se omogućio optimalan dizajn SRP prilikom bilo kojeg zahtjeva klijenta.

Većina dosadašnjih istraživanja o perforacijama na ambalaži odnosi se na primarnu ambalažu. Za izradu primarne ambalaže upotrebljavaju se papiri i kartoni koji imaju drugačija mehanička svojstva od valovitoga kartona. Kod primarne ambalaže najčešće korištena perforacija je perforirana traka tzv. ZTS perforacija (engl. *Zipper Tear Strip*) koja se sastoji od dva reda paralelnih perforiranih linija. Ispitivano je njeno pozicioniranje ovisno o dužini neodrezanog dijela s obzirom na tok vlaknaca [70], [71] te struktura dizajna same perforacije kako bi se poboljšalo otvaranje pakiranja [72]. Perforacije na kartonu analizirane su i u svrhu razvijanja nove metode ispitivanja procesa otvaranja perforirane i presavijene kartonske kutije uspješnim mapiranjem procesa otvaranja ljudskom rukom [73], [74].

Značajan utjecaj na nosivost ambalažne kutije nedvojbeno imaju različiti ergonomski i funkcionalno bitni zahtjevi koji smanjuju čvrstoću kutije. Grupa autora ispituje utjecaje različitih faktora kao što su otvori [75], mjesta preklapanja [76], ali i perforacije na kutijama od valovitoga kartona. Upotrijebljena je analitičko-numerička metoda za FEM modeliranje određenih mehaničkih svojstava perforacija na kutijama od valovitoga kartona [77]. Također, numerički je analiziran učinak perforacije na smanjenje krutosti kod valovitoga kartona uz primjenu tehnika homogenizacije [78]. Druga grupa autora mjerila je tlačnu čvrstoću metodom BCT (engl. *Box Compression Test*) na kutijama s različitim tipom perforacije, dimenzijom i pozicioniranjem [79].

Niti u jednom od spomenutih radova nije kombiniran tip perforacije ovisno o pozicioniranju na kutiji u svrhu poboljšanja razdavanja valovitoga kartona po perforaciji.

Na temelju pregleda postojećih istraživanja perforacija na sekundarnoj ambalaži od valovitoga kartona zaključuje se kako je spomenuta tematika premalo istražena. Zbog nedostatka bitnih informacija koje bi olakšale i unaprijedile izradu ambalaže spremne za izlaganje na police postoji opravdana potreba za analizom mehaničkih svojstava valovitoga kartona s perforacijama. Karakterizacijom, a potom i optimizacijom mehaničkih svojstava kod valovitoga kartona s perforacijama osiguralo bi se poboljšanje razdvajanja perforiranoga dijela, bez narušavanja stabilnosti ambalaže. Da bi se ispunili ti zahtjevi potrebno je definirati i kvantificirati utjecaj varijabli perforacije na mehanička svojstva valovitoga kartona, kao što su: tip perforacije i pozicioniranje perforacije na ambalaži i kvaliteta perforiranoga valovitoga kartona.

Uspješnost optimizacije direktno se očituje u kvaliteti gotovih proizvoda, koja je uvjetovana zadržavanjem postojećih pozitivnih svojstava potrebnih za transport, skladištenje i rukovanje te poboljšane mogućnosti razdvajanja dijelova kutije po perforaciji koja bi dovela do manjeg utroška sile prilikom otvaranja, ali i estetski prihvatljivijeg ruba linije razdvojene perforacije.

### 3. PLAN, MATERIJALI I METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA

#### 3.1. Plan istraživanja

Istraživanje ispitivanja utjecaja varijabli perforacija na promjenu mehaničkih svojstava valovitoga kartona se provodilo u četiri faze:

Faza I: Pregled literature i trenutno stanje istraživačkog područja

Prva faza istraživanja obuhvatila je detaljan pregled dostupne nacionalne i međunarodne znanstvene i stručne literature o perforacijama kako na valovitom kartonu kod sekundarne ambalaže, tako i na kartonima kod primarne ambalaže. Posebna pažnja posvećena je istraživanju trenutnih saznanja o mogućnosti uporabe različitih tipova perforacije na ambalaži ovisno o njezinom pozicioniranju te o njihovom utjecaju na mehanička svojstva valovitoga kartona. Također, uključen je i pregled radova općenito vezanih za ambalažu spremnu za police iz perspektive trgovaca te usmjerenih na istraživanje logističkih prednosti, ali i mana za trgovce.

Faza II: Eksperimentalno istraživanje

U eksperimentalnom istraživanju razlikuju se ispitivanja vezana za transport i skladištenje te ispitivanja vezana za razdvajanje valovitoga kartona po perforaciji.

U prvom dijelu eksperimentalnog istraživanja definirane su dimenzije uzoraka te tipovi perforacija i kutovi pozicioniranja perforacije. Testirano je pet tipova najčešće lokalno korištenih perforacija. Perforacija je pozicionirana u odnosu na smjer vala (engl. *Machine Direction*, MD) valovitoga kartona pod pet kutova: 0°, 20°, 45°, 70° i 90°. Uzorci su izrezani iz četiri kvalitete troslojnoga valovitoga kartona E vala, štancom Rabolini Imperia, tvrtke Model Pakiranja d.d.

Drugi dio eksperimentalnog istraživanja su mehanička testiranja pripremljenih uzoraka. Mehanička ispitivanja vršena su uz pomoću dostupnih uređaja u suradnji s tvrtkom Model Pakiranja d.d. iz Zagreba te Katedrom za informacijsku i grafičku tehnologiju, Prirodoslovnotehničkog fakulteta, Sveučilišta u Ljubljani iz Slovenije.

Kod ispitivanja vezanih za transport i skladištenje mjerena je otpornost brida perforiranoga valovitoga kartona na tlačnu silu (Edge Crush Test, ECT) te otpornost perforiranoga valovitoga kartona prema pucanju (engl. *Bursting Strength Test*, BST). Nabrojena mjerenja su testovi

kojima se osigurava siguran transport ambalaže, skladištenje i rukovanje. Ispitivano je također savijanje u tri točke na kidalici Instron 5567 s uzorcima rezanim u: 1. smjeru vala (MD) i 2. obrnuto od smjera vala (CD). Testirani su i uzorci bez perforacija.

Kod mjerenja vezanih za razdvajanje valovitoga kartona po perforaciji ispitivana je vlačna čvrstoća valovitoga kartona s perforacijom smještenom po sredini uzorka: 1. okomito i 2. vodoravno. Za ispitivanje korištena je kidalica Instron 5567. Otpornost prema cijepanju mjerena je na uređaju Elmendorf. Rezultati su prvo validirani [80] jer je metoda prema standardu namijenjena testiranju papira i kartona, a ne valovitih kartona.

### Faza III: Analiza podataka

Analizirani su rezultati dobiveni istraživanjima opisanim u drugom dijelu eksperimentalnog plana. Kvantificirane su promjene u mehaničkim svojstvima nakon perforiranja valovitoga kartona, odnosno određeno je koliko pojedina varijabla perforacije utječe na smanjenje pojedinog mehaničkog svojstva, te definirano koja varijabla ima najveći utjecaj na pojedino mjereno svojstvo. Korelacijskom analizom utvrđeni su odnosi pojedinih mjerenja, a multivarijantnom analizom objašnjeni ti odnosi.

### Faza IV: Zaključak

Na temelju provedenih analiza rezultata ispitivanja mehaničkih svojstava definirane su optimalne vrijednosti varijabli perforacije za uspješnije razdvajanje valovitoga kartona po perforaciji. Odnosno, prema korelacijskoj, a zatim i multivarijantnoj analizi mjerenja vezanih za transport i skladištenje te mjerenja vezanih za razdvajanje valovitoga kartona po perforaciji prikazan je model koji opisuje utjecaj različitih tipova i pozicioniranja perforacije na mogućnost razdvajanja dijelova valovitoga kartona po perforaciji bez narušavanja ostalih mehaničkih svojstava.

## 3.2. Materijali

### 3.2.1. Varijable perforacije

Za potrebe istraživanja definirane su tri nezavisne varijable:

1. Kvaliteta perforiranoga valovitoga kartona (u daljnjem tekstu koristi se i naziv varijabla kvaliteta)

Za potrebe istraživanja uzorci su rezani iz četiri kvalitete troslojnog valovitoga kartona E vala pod oznakama: 111, 131, 177 i 177L. Osnovna svojstva korištenih valovitih kartona, prema tehničkim specifikacijama proizvođača uz pripadajuće oznake za potrebe ovog istraživanja prikazana su u Tablici 3.1. Razlika u kvaliteti valovitih kartona vidljiva je u gramaturi sastavnica i u vrsti papira sastavnica o kojima dalje ovise mehanička svojstva valovitoga kartona. Odabrane kvalitete su lokalno najčešće korišteni troslojni valoviti kartoni E vala za izradu sekundarne ambalaže za izlaganje na polici, koja se otvara pomoću perforacije.

Tablica 3.1. Normativ kvaliteta valovitoga kartona

Kvaliteta	111	131	177	177L
Lice [g/m <sup>2</sup> ]	100 testliner	125 kraftliner	125 testliner	160 lux liner
Val [g/m <sup>2</sup> ]	90 medium	90 medium	90 medium	90 medium
Naličje [g/m <sup>2</sup> ]	100 testliner	100 testliner	125 testliner	125 testliner

## 2. Tip perforacije (u daljnjem tekstu koristi se i naziv varijabla perforacija)

Pet tipova perforacija se analizira u ovom istraživanju. Tipovi perforacije označeni su sljedećim oznakama: 1/1, 2/2, 4/2, 6/2 te 10/3. Perforacija označava kombinaciju odrezanog i neodrezanog dijela, stoga prvi broj u svakoj oznaci označava dužinu reza u milimetrima, dok drugi broj označava dužinu neodrezanog dijela u milimetrima (Slika 3.1.).



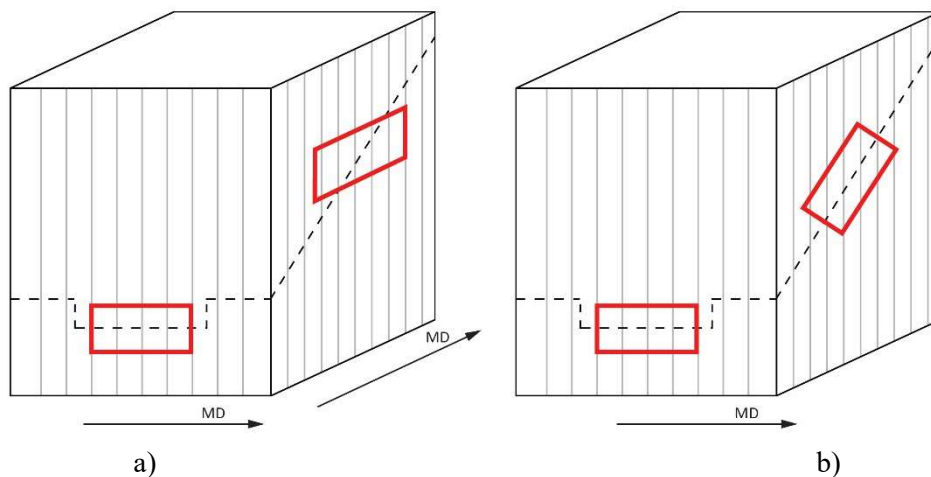
Slika 3.1. Tipovi perforacija

## 3. Kut pozicioniranja perforacije (u daljnjem tekstu koristi se i naziv varijabla kut)

Za potrebe ovog istraživanja odabrano je pet kutova pozicioniranja perforacije: 0°, 20°, 45°, 70° i 90°. Kutovi su definirani u odnosu na smjer pružanja vala (MD). Kut od 0° predstavlja perforaciju u pozicioniranu u smjeru MD, dok kut od 90° predstavlja perforaciju pozicioniranu u smjeru CD.

### 3.2.2. Priprema uzoraka

Ambalažna kutija je uvijek konstruirana na način da joj je smjer pružanja vala kod bočnih stranica paralelan s podlogom na koju je položena. Takva konstrukcija ambalažne kutije osigurava izdržavanje opterećenja najvećeg pritiska [39]. Na Slici 3.2. vidljiv je ilustrirani prikaz ambalažne kutija s perforacijama te način definiranja uzoraka.

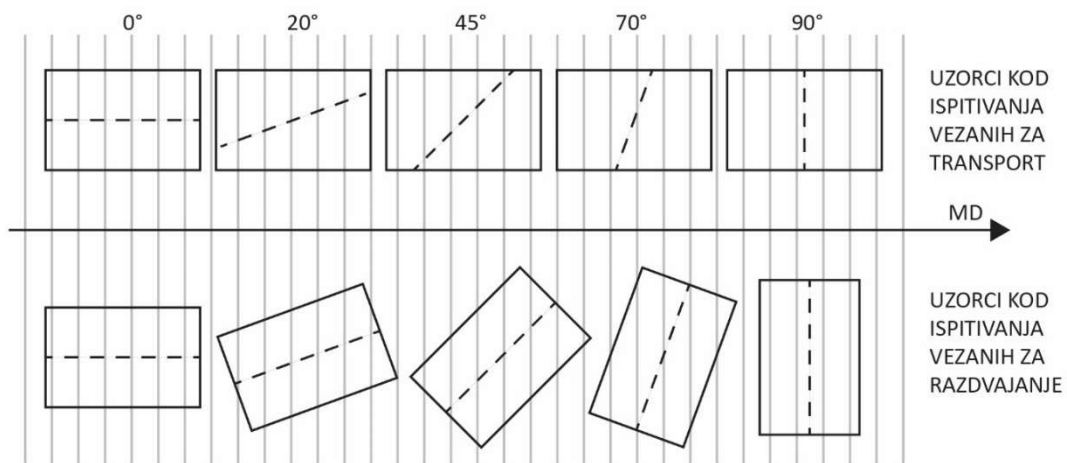


Slika 3.2. Definiranje uzoraka: a) dužina uzorka paralelna sa smjerom vala, perforacija smještena pod definiranim kutom; b) uzorak rezan pod definiranim kutom, perforacija smještena po sredini uzorka

Rezanje uzoraka, odnosno pozicioniranje perforacije na uzorku ovisi o ispitivanju koje se izvodi. Uzorci namijenjeni ispitivanjima vezanima za transport i skladištenje izrezani su tako da je dužina uzorka u smjeru vala (MD), upravo onako kako je i postavljena ambalaža u transportu ili na polici. Perforacija je u odnosu na smjer pružanja vala pozicionirana pod pet kutova:  $0^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $70^\circ$  i  $90^\circ$  kao što je prikazano na Slici 3.3. Kod ispitivanja vezanih za razdvajanje valovitoga kartona po perforaciji uzorak je rezan pod definiranim kutovima, a perforacija je uvijek po sredini uzorka što znači da je i dalje perforacija pod definiranim kutovima ( $0^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $70^\circ$  i  $90^\circ$ ) s obzirom na smjer pružanja vala (Slika 3.3.).

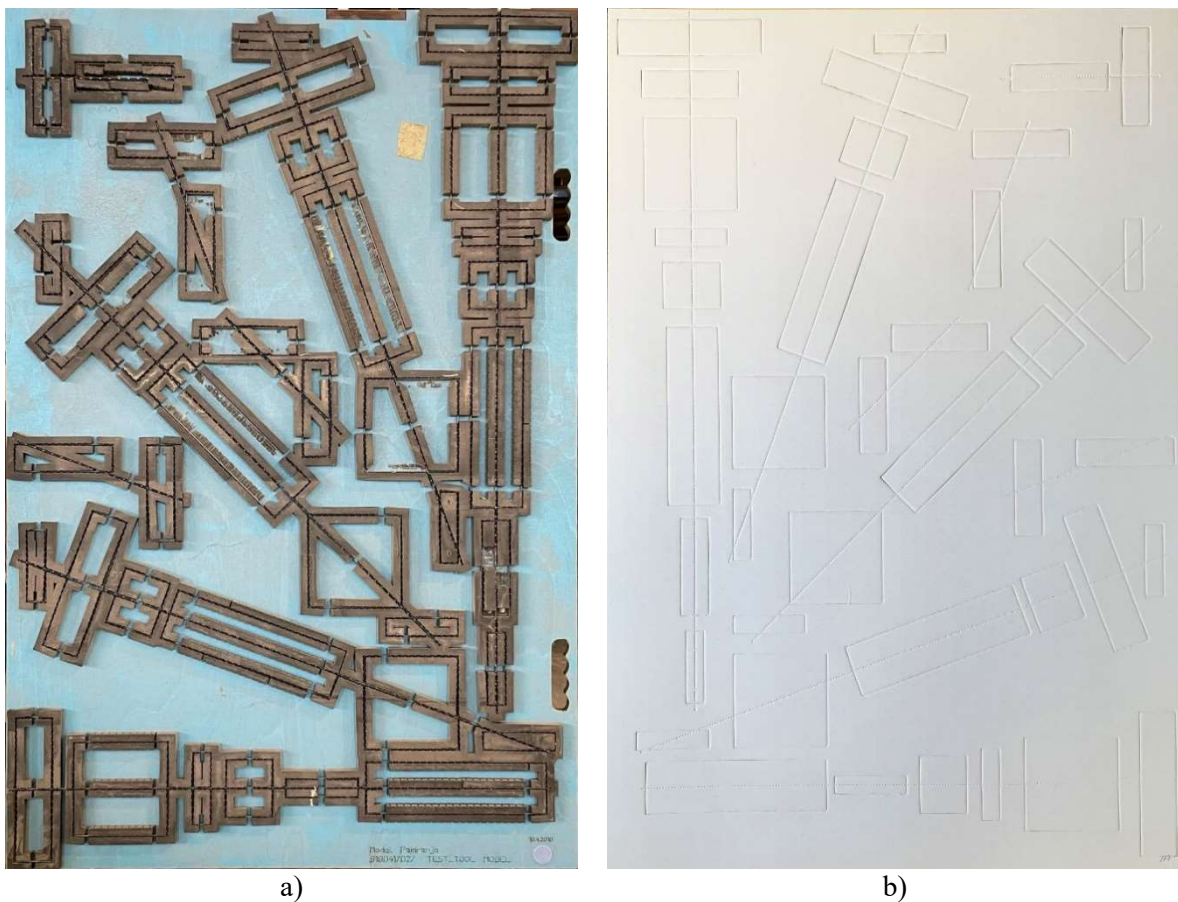
S obzirom na to da ne postoje standardizirana mjerenja za perforirani valoviti karton, modificirana su postojeća mjerenja na dostupnim uređajima. Precizno su definirane metode i uvjeti ispitivanja te način uzorkovanja kako bi se osigurala pouzdanost i ponovljivost dobivenih rezultata.





Slika 3.3. Ilustrirani prikaz uzoraka kod ispitivanja vezanih za transport i skladištenje te kod ispitivanja vezanih za razdvajanje valovitoga kartona po perforaciji

Nosač čeličnih traka s trakama/noževima za rezanje i perforiranje uzoraka te gumenim izbacivačima prikazan je na Slici 3.42.a. Odštancani uzorci na ploči valovitoga kartona u formatu B1 prikazani su na Slici 3.4.b.



Slika 3.4. a) nosač čeličnih traka; b) odštancana ploča valovitoga kartona

Uzorci su pripremljeni u tvrtki Model Pakiranja d.d. koja se bavi proizvodnjom valovitoga papira i kartona te proizvodnjom ambalaže od papira i kartona, a dio je međunarodne Model Group-e. Za izrezivanje uzoraka korištena je zaklopna štanca Rabolini Imperia radne brzine cca. 500 kom/h. Vrsta noža za izradu perforacija bio je mPower, izrađen u Marbach tvrtki za izradu alata.

### 3.3. Ispitivanje dimenzija

#### 3.3.1. Gramatura valovitoga kartona

Gramatura je temeljno materijalno svojstvo papira i kartona, a naziva se još i površinska masa ili masa jedinične površine. Predstavlja masu jednog kvadratnog metra papira, kartona ili valovitoga kartona izražena u gramima. U SI sustavu, jedinica za gramaturu je  $\text{g/m}^2$ . Ispitivanje se provodi prema standardu ISO 536:2019 [81]. Gramatura se najpreciznije određuje gravimetrijski (vaganjem), kao aritmetička sredina mjerenja mase na preciznoj vagi više uzoraka prema Jednadžbi 2:

$$g = \frac{m}{A} \times 10^6 \quad (2)$$

gdje je  $g$  gramatura ( $\text{g/m}^2$ ),  $m$  masa testiranog uzorka (g),  $A$  površina testiranog uzorka ( $\text{mm}^2$ ), a  $10^6$  faktor preračunavanja.

Uobičajena je praksa da se ravni slojevi manje gramature kombiniraju s valovitim slojem također manje gramature kako bi se održala uravnotežena struktura valovitoga kartona. Ravni slojevi većih gramatura uglavnom se kombiniraju s većim gramaturama valovitih slojeva. Utjecaj promjene balansa uslijed kombiniranja različitih gramatura ravnog i valovitoga sloja istraživali su Kellicut [82], Maltenfort [83], Johnson i ostali [84] i Urbanik [85].

Kvaliteta valovitoga kartona manje ovisi o gramaturi papira, a više o kvaliteti papira od kojeg se izrađuje i ljepljiva kojim se slojevi lijepe [39].

### 3.3.2. Debljina valovitoga kartona

Debljina papira ovisi o količini utrošenih sirovina po jedinici površine papira, o zbijenosti papira i o gramaturi. Moguće je da papiri iste gramature zbog različite zbijenosti imaju različitu debljinu, a samim time i različita mehanička i druga svojstva [43].

Što je ravnomjernije oblikovan papir to su mu bolja mehanička svojstva, ali i površinska svojstva (glatkoća površine) te je bolja mogućnost tiska. Vlakanca nikada nisu u potpunosti jednoliko raspodijeljena, a i o tome ovise gramatura i debljina papira [31].

O debljini papira ovisi i debljina valovitoga kartona. Debljina je temeljno svojstvo valovitoga kartona stoga ima veliki utjecaj na otpornost/krutost na savijanje te čvrstoću [50]. Ispitivanje debljine valovitoga kartona provodi se prema standardu ISO 534:2011 [86].

### 3.4. Karakterizacija mehaničkih svojstava

Kako bi se odredila, a zatim i poboljšala primjena perforiranoga valovitoga kartona u industriji, dolazi do potrebe za što preciznijom i opširnijom karakterizacijom svojstava takvog materijala. Karakterizacija materijala vrši se ispitivanjem njihovih mehaničkih svojstava, koja su najvažnija za konstrukcijsko poznavanje materijala. Mehaničkim ispitivanjem dobivaju se neposredni podaci o mogućoj upotrijebiti materijal te o naprezanjima koja se u njemu smiju dopustiti [49].

Sva mehanička svojstva papira pa tako i kartona i valovitoga kartona u direktnoj su vezi sa stupnjem vezivanja vlakanaca, smjerom pružanja vlakanaca i smjerom ispitivanja [55]. Proces proizvodnje valovitoga kartona daje tri karakteristična smjera: uzdužni smjer ili smjer pružanja vala (engl. *Machine Direction*, MD), poprečni smjer ili smjer okomit na smjer pružanja vala (engl. *Cross Direction*, CD) te smjer debljine (engl. *Thickness Direction*). Budući da je valoviti karton ortotropan i nehomogen materijal, potreban je niz testova za ispravnu karakterizaciju njegovih mehaničkih parametara. To znači da se pri ispitivanju i valovitoga kartona i kutija izrađenih od takvog materijala, može očekivati velika disperzija rezultata ispitivanja, stoga je potrebno ispitati veći broj uzoraka uzetih s različitih dijelova valovitoga kartona, ali ponekad je potrebno i ispitivanja obaviti u oba smjera ravnine [43].

### 3.4.1. Ispitivanje otpornosti brida valovitoga kartona na tlačnu silu

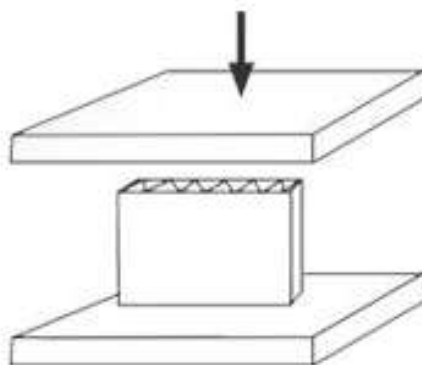
Ispitivanje otpornosti brida valovitoga kartona na tlačnu silu provodi se na Crush Test uređaju, proizvođača Lorentzen & Wettre, metodom *Edge Crush Test* (ECT). Tom se metodom ispituje maksimalna tlačna sila koju može izdržati brid valovitoga kartona, a da ne dođe do deformacije ispitivanog uzorka. Ispitivanje se izvodi prema standardu ISO 3037:2013 [87].

Kod ploče valovitoga kartona tlačna čvrstoća ravnog i valovitoga sloja kontrolira tlačnu čvrstoću ambalažne kutije. ECT metoda je dominantan faktor u definiranju tlačne čvrstoće ambalaže te je u širokoj primjeni za kontrolu kvalitete, ali i dizajna i konstrukcije ambalažne kutije. Izmjerena vrijednost ECT je dio McKee formule [88] koja predstavlja model kojim se predviđa tlačna čvrstoća ambalažne kutije troslojnog valovitoga kartona prema pojednostavljenoj Jednadžbi 3 (brzo i jednostavno rješenje za praktičnu implementaciju, međutim ograničeno je na jednostavne kutije):

$$BCT = 5.87(ECT)\sqrt{h \times Z} \quad (3)$$

gdje je *BCT* maksimalna sila koju kutija može podnijeti (engl. *Box Compression Test*), *ECT* izmjerena vrijednost ECT, *h* debljina valovitoga kartona, a *Z* opseg kutije.

Iz ploče valovitoga kartona izreže se pravokutni uzorak dimenzija 100 x 25 mm. Dužina uzorka mora biti 100 mm ± 0,5 mm u smjeru vala (MD), a visina 25 mm ± 0,5 mm u smjeru okomitom na val (CD). Uzorak valovitoga kartona stavlja se na sredinu donje ploče uređaja (Slika 3.5.) između dva metalna potporna bloka.



Slika 3.5. Shematski prikaz postavljanja uzorka za testiranje ECT metodom [89]

Blokovi poravnavaju uzorak okomito tako da primijenjena sila bude paralelna s poprečnim smjerom (CD). Gornja ploča spušta se brzinom  $12,5 \pm 2,5$  mm/min do trenutka deformacije uzorka kada se očita maksimalna sila pritiska [90]. Otpornost brida valovitoga kartona na tlačnu silu izračunava se iz maksimalne sile pritiska prema Jednadžbi 4:

$$R = \frac{\bar{F}_{max}}{l} \quad (4)$$

gdje je  $R$  otpornost brida valovitoga kartona na tlačnu silu (kN/m),  $\bar{F}_{max}$  je srednja vrijednost maksimalne sile pritiska, a  $l$  dužina testiranog uzorka (mm).

### 3.4.2. Ispitivanje otpornosti jačine pucanja valovitoga kartona

Ispitivanjem otpornosti valovitoga kartona prema statičkom probijanju ili prema prskanju po *Mullenu* određuje se otpornost definirane površine uzorka prema ravnomjerno rastućem pritisku koji djeluje na jednu stranu uzorka sve do trenutka njezina puknuća, odnosno prskanja. Metoda se naziva *Bursting Strength Test* (BST), a ispitivanje se izvodi prema standardu ISO 2759:2014 [91].

Ispitivani uzorak se učvrsti metalnim prstenom određenog promjera. Ispod učvršćenog dijela nalazi se elastična, gumena membrana ispod koje se dovodi stlačeni zrak, tj. glicerol. Glicerol potiskuje membranu, membrana potiskuje ispitivani uzorak, uzorak se ispupčava sve dok ga dovoljno visok tlak ne probije te se na digitalnom zaslonu očita rezultat mjerenja [43].

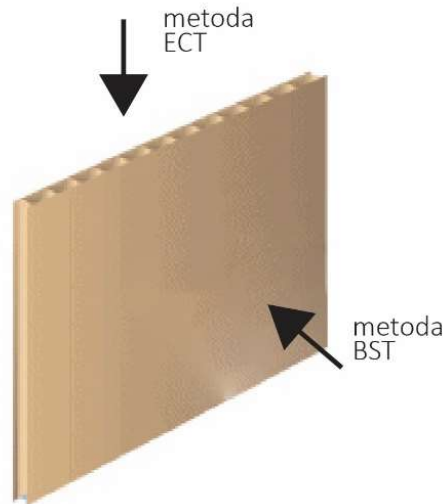
Otpornosti jačine pucanja valovitoga kartona nije materijalno svojstvo jer ovisi o gramaturi materijala. Stoga se indeks pucanja uzima kao materijalno svojstvo koje karakterizira otpornost jačine pucanja valovitoga kartona, a izračunava se prema Jednadžbi 5:

$$x = \frac{p}{g} \quad (5)$$

gdje je  $x$  indeks pucanja ( $\text{kPa} \cdot \text{m}^2/\text{g}$ ),  $p$  srednja vrijednost otpornosti jačine pucanja valovitoga kartona (kPa), a  $g$  gramatura valovitoga kartona ( $\text{g}/\text{m}^2$ ).

Papir je kvalitetniji za izradu valovitoga kartona ukoliko je otporniji na probijanje, odnosno što teže puca. Ukoliko se slabijim papirima želi povećati otpornost na pucanje, mora im se povećati gramatura kako bi otpor na pucanje bio isti kao kod kvalitetnijih papira manje gramature [39].

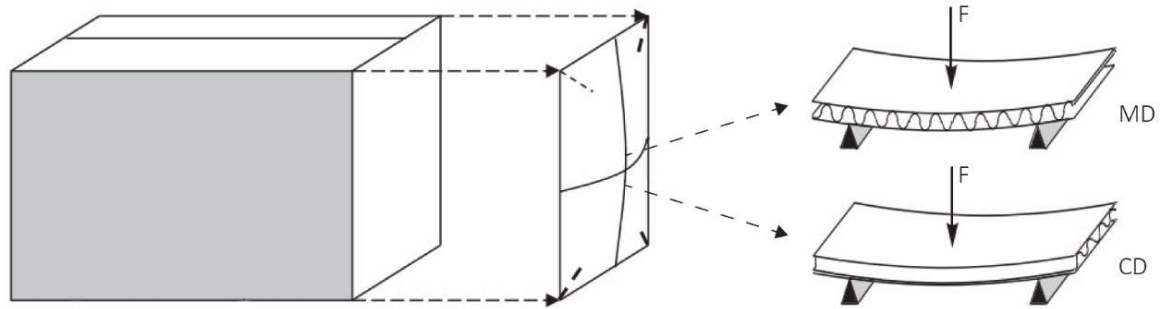
Na Slici 3.6. prikazan je smjer djelovanja sile kod metode za određivanje otpornosti brida valovitoga kartona na tlačnu silu (ECT) te smjer djelovanja tlaka kod metode određivanja otpornosti jačine pucanja valovitoga kartona (BCT). Obje metode od bitnog su značaja za predviđanje mehaničkih svojstava ambalaže u transportu, skladištenju te rukovanju.



Slika 3.6. Prikaz smjera djelovanja sile odnosno tlaka kod metoda ECT i BST

### 3.4.3. Ispitivanje otpornosti na savijanje

Za mjerenje otpornosti na savijanje razlikuju se test savijanja u dvije točke, test savijanja u tri točke te test savijanja u četiri točke. Za potrebe ovog istraživanja koristio se test savijanja u tri točke prema standardu ISO 5628:2019 [92]. Savijanje u tri točke označava uzorak opterećen na svakom kraju te u sredini kako je prikazano na Slici 3.5. Anizotropija valovitoga kartona uzrokuje da je krutost u poprečnom smjeru (CD) dva do četiri puta manja nego u uzdužnom smjeru (MD) [52], [93]. Stoga su uzorci dimenzija 135 x 38 mm mjereni u oba smjera, opterećeni silom brzine spuštanja od 0,1 mm/s. Prikaz savijanja ilustriran je na Slici 3.7.



Slika 3.7. Shematski prikaz savijanja ambalažne kutije od valovitoga kartona i princip testa savijanja u tri točke [94]

Savijanje je određeno u ograničenom rasponu odstupanja u elastičnom području s dogovorenim odstupanjem od 0,2%. Granice linearnosti ne smiju se prekoračiti, a variraju ovisno o materijalu. Maksimalna dozvoljena deformacija izravno je proporcionalna vrijednosti graničnog napreznja i stoga se može jednostavno prilagoditi materijalu (u ovom slučaju kvaliteti valovitoga kartona) koristeći Jednadžbu 6:

$$d_a = \frac{0,33L^2}{t} \quad (6)$$

gdje je  $d_a$  maksimalna dozvoljena (mm),  $L$  duljina testnog uzorka (mm) i  $t$  debljina testnog uzorka (mm).

Za savijanje u tri točke uzima se u obzir daljnje ograničenje kako bi se osiguralo da su pogreške manje od 5% (Jednadžba 7):

$$d_a \geq 0,067L \quad (7)$$

Nakon što se izračuna maksimalna dozvoljena deformacija, računa se otpornost na savijanje prema sljedećoj Jednadžbi 8:

$$S = \frac{FL^3}{48db} \quad (8)$$

gdje je  $S$  otpornost na savijanje ( $\text{mN}\cdot\text{m}$ ),  $F$  je sila savijanja (N) i  $b$  širina testnog uzorka (mm).

#### 3.4.4. Ispitivanje vlačne čvrstoće

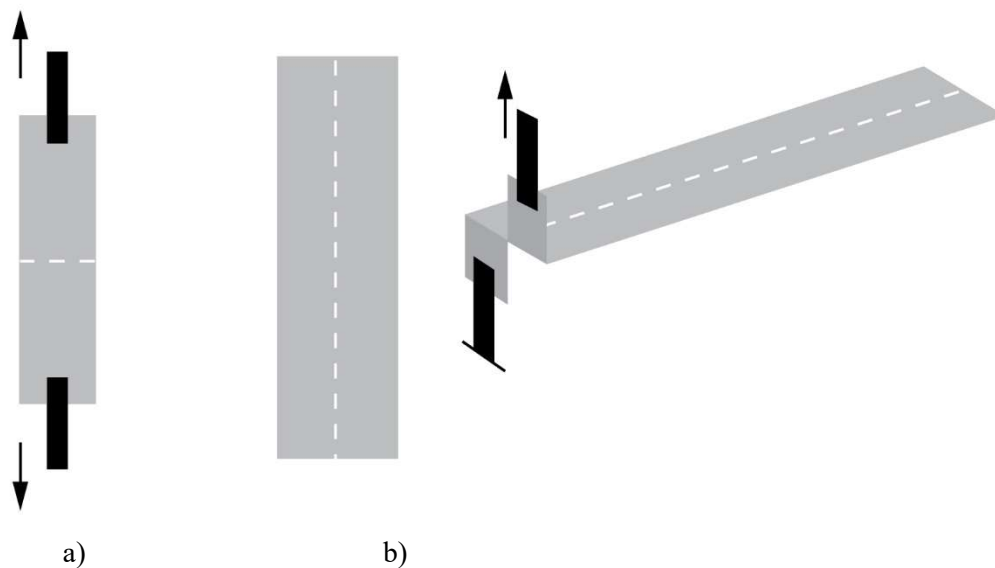
Vlačna čvrstoća ima široku primjenu u karakterizaciji mehaničkih svojstava valovitoga kartona. Vlačno naprezanje nastoji izdužiti tijelo, a javlja se pri djelovanju sile jednakog iznosa, ali suprotnog smjera na istom pravcu. Materijal se zbog rastezanja u duljinu steže u svim smjerovima okomito na smjer rastezanja što znači da kod longitudinalnog rastezanja dolazi do lateralnog stezanja.

Ovisnost naprezanja i deformacija za razne materijale određuje se laboratorijskim pokusima sukladno normama na uređajima kao što je univerzalna hidraulička kidalica. Vlačna čvrstoća perforirane valovitoga kartona mjerena je na kidalici Instron 5567 prema standardu ISO 1924-2:2008 [95]. Za potrebe ovog istraživanja vlačna čvrstoća mjerena je u ravnini i van ravnine.

Za mjerenje vlačne čvrstoće u ravnini definiran je uzorak dimenzija 50x200 mm, rezan pod odabranim kutovima i s perforacijom pozicioniranom na polovici duže stranice pri čemu je perforacija okomita na smjer sile (Slika 3.8.a). Uzorak je bio pričvršćen između dvije hvataljke s razmakom od 100 mm, brzina udaljavanja hvataljki bila je 20 mm/min i intervalom 0,1 mm pri čemu se mjerila vlačna sila potrebna za kidanje ispitivanog uzorka u ravnini.

Za mjerenje vlačne čvrstoće van ravnine definiran je uzorak dimenzija 100x300 mm, rezan pod odabranim kutovima i s perforacijom pozicioniranom po sredini paralelno s dužom stranicom (perforacija paralelna na smjer sile). Uzorak je prvo zarezan definiranih 50 mm. Definirano zarezivanje označava jedan od uvjeta ponovljivosti testa, odnosno jednaku dubinu reza svaki puta za sve uzorke. Svaki od zarezanih dijelova se postavio u hvataljke s tim da je donja hvataljka bila statična, dok se gornja udaljavala brzinom od 150 mm/min i intervalom od 1 mm, pri čemu se mjerila vlačna sila potrebna za kidanje ispitivanog uzorka van ravnine (Slika 3.8.b). Za statističku analizu korištene su vrijednosti izmjerene između 100. i 200. mm uzorka kao još jedan od uvjeta ponovljivosti testa te je iz njih izračunata srednja vrijednost sile potrebne za razdvajanje uzorka van ravnine.





Slika 3.8. a) Uzorak za mjerenje vlačne čvrstoće u ravnini (perforacija okomita na smjer sile);  
 b) Uzorak za mjerenje vlačne čvrstoće van ravnine (perforacija paralelna na smjer sile)

Vlačna čvrstoća, odnosno prekidna jakost predstavlja omjer maksimalne postignute sile na kidalici po jedinici širine ispitivanog uzorka i izračunava se prema Jednadžbi 9:

$$S = \frac{\bar{F}}{w_i} \quad (9)$$

gdje je  $S$  prekidna jakost (kN/m),  $\bar{F}$  srednja vrijednost maksimalne prekidne sile izmjerene na kidalici (N), a  $w_i$  širina ispitivanog uzorka (mm).

S obzirom na to da su kvalitete valovitoga kartona E vala različite gramature potrebno je izračunati indeks kidanja kako bi se vrijednosti mogle međusobno uspoređivati, prema Jednadžbi 10:

$$I = \frac{S}{g} \times 10^3 \quad (10)$$

gdje je  $I$  indeks kidanja (Nm/g),  $S$  prekidna jakost (kN/m),  $g$  gramatura ispitivanog uzorka valovitoga kartona ( $\text{g/m}^2$ ) te  $10^3$  faktor preračunavanja.

### 3.4.5. Ispitivanje otpornosti prema cijepanju po Elmendorfu

Otpornost prema cijepanju predstavlja unutarnji otpor cijepanju materijala. Mjera je jednaka sili okomitij na ravninu materijala koja je potrebna za cijepanje papira ili kartona kroz određenu udaljenost nakon što je cijepanje već počelo, odnosno ispitivani materijal je prethodno zarezan. Mjerenja se izvode na uređaju Elmendorf. Ispitivani uzorak (ili uzorci) pričvrsti se na hvataljke, od kojih je jedna sastavni dio stativa, a druga je sastavni dio klatna. Prije otpuštanja klatna, izvrši se na uzorcima definirano zarezivanje nožem od 20 mm. Definirano zarezivanje i u ovom slučaju označava jedan od uvjeta ponovljivosti testa. Otpušteno klatno izvrši njihaj, a ispitivani uzorci se pocijepaju u nastavku reza. Rad potreban za cijepanje jednog uzorka zadane duljine određuje se postupkom kalibracije. Kada se jedinica rada podijeli s duljinom, dobije se sila cijepanja. Sila potrebna za cijepanje uzorka poistovjećuje se s otpornošću papira prema cijepanju [30][96].

Ukoliko se koriste uzorci veće gramature, na mjerni uređaj se dodaje definirani uteg, a otpornost prema cijepanju računa se prema Jednadžbi 11:

$$F = \bar{F} \times 2 \quad (11)$$

gdje je  $F$  otpornost prema cijepanju (mN),  $\bar{F}$  srednja vrijednost očitane sile (mN), a broj 2 faktor preračunavanja zbog dodanog utega.

Indeks cijepanja računa se kako bi se mogle usporediti vrijednosti uzoraka različite gramature prema Jednadžbi 12:

$$X = \frac{F}{g} \quad (12)$$

gdje je  $X$  indeks cijepanja (mN·m<sup>2</sup>/g), a  $g$  gramatura ispitivanog uzorka (g/m<sup>2</sup>).

Prema standardu ISO 1974:2012 [97] metoda po Elmendorfu koristi se za papire i kartone, ne za valovite kartone. U literaturi je također navedeno da je primjer kidanja u ravnini odvajanje listova duž perforacije dok se oba lista drže na površini stola [96]. Slijedom navedenog istražena je mogućnost korištenja Elmendorf metode za perforirani valoviti karton. Testirani su uzorci perforiranoga valovitoga kartona, dimenzija 80 x 65 mm, na Elmendorf uređaju s dodatno postavljenim utegom zbog veće gramature uzorka. Dobiveni rezultati su zatim uspoređeni s rezultatima mjerenja vlačnog naprezanja u ravnini kako bi se statistički potvrdila mogućnost

daljnjeg korištenja. Korelacijskom analizom utvrđeno je da nema značajne razlike u trendu raspodjele rezultata za dvije promatrane metode te da se rezultati mjerenja Elmendorf testom mogu koristiti u nastavku istraživanja za bolje razumijevanje mehanička svojstva perforiranoga valovitoga kartona [80][98].

### 3.5. Statističke analize

Rezultati svih primijenjenih testova u ovom istraživanju su kontinuirane zavisne varijable, s tri nezavisne varijable: kvaliteta, perforacija, kut. Standardne metode za analizu kontinuiranih zavisnih varijabli, gdje postoji više nezavisnih varijabli su analize varijance (ANOVA) ili kovarijance (ANCOVA), odnosno sve slične metode temeljene na generalnim linearnim modelima (GLM), odnosno na metodi najmanjih kvadrata (eng. *ordinary least squares*). Takve metode između ostaloga zahtijevaju, da bi izračuni i procjene imale smisla, da je greška (tj. reziduali – razlika između opaženih i modelom predviđenih vrijednosti) normalno ili skoro normalno distribuirana, te da je zadovoljen uvjet homogenosti varijance. Uvjet homogenosti varijance tj. uvjet homoskedastičnosti označava da je varijabilnost neke mjere, primjerice iznosa rezultata nekog testa, ista ili vrlo slična u različitim (pod)grupama, primjerice, za različite kvalitete valovitoga kartona, različite kutove pozicioniranja perforacije ili tipove perforacije. Gdje to nije slučaj – rezultati analiza su besmisleni, tj. nisu točna ilustracija ili opis stvarnosti. Stoga, u slučaju kada distribucija greške odstupa znatno od normalne („iskrivljena je“), standardni postupci nisu od koristi, dapače, odvest će zaključke u pogrešnom smjeru.

Nekoliko je mogućih rješenja za takve situacije:

#### 1. Primjena neparametarskih metoda

Neparametarske metode su metode statističkog modeliranja koje se temelje na podacima bez pretpostavki o distribuciji podataka. One su često korisne za analizu podataka koji ne odgovaraju pretpostavkama o normalnosti ili linearnosti. Za slučajeve u kojima su potrebni multivarijantni modeli (tj. više je nezavisnih varijabli koje treba uzeti u obzir, a u ovom istraživanju su tri nezavisne varijable: *kvaliteta*, *kut* i *perforacija*), izbor neparametarskih metoda je vrlo limitiran i svodi se na regresiju medijana (ili nekih drugih kvantila distribucije). Takvi postupci imaju bitno nižu snagu od parametarskih i nerijetko nisu intuitivni za tumačenje. Problem je što ne daju jasnu matematičku formulu za vezu između varijabli, a to dovodi do poteškoća u interpretaciji jer se ne mogu jednostavno identificirati koje varijable su najvažnije

za određenu vezu. Često se neparametarskim metodama dobiju samo kvalitativne informacije o vezi između varijabli, a ne kvantitativne [99], [100].

## 2. Transformacija zavisne varijable

Čitav je niz mogućih postupaka kojima se zavisna varijabla prije analize može numerički transformirati. Numeričke transformacije su metode kojima se podaci transformiraju kako bi se poboljšala linearnost ili distribucija podataka. Kako bi se zadovoljio uvjet normalnosti raspodjele greške i homogenosti varijance, izmjerene vrijednosti se mogu kvadrirati, može se koristiti inverzna vrijednost ili kvadratni korijen izmjerene vrijednosti. Takve transformacije ne moraju nužno polučiti zadovoljavajući rezultat, a ako ga i poluče, problem je u tome što se procjene koje model generira ne mogu „vratiti“ natrag na ishodnu mjernu ljestvicu i zapravo nema jednostavnog intuitivnog tumačenje numeričkih vrijednosti [101]. Vrlo praktična transformacija, međutim, jest logaritmiranje (ln-transformacija). Logaritmiranje je metoda koja se koristi za transformiranje podataka kako bi se pojednostavnila distribucija ili smanjio utjecaj odstupanja. Zavisna se varijabla logaritmirana na bazi  $e$ , a dobivene procjene mogu se antilogaritmiranjem „vratiti“ na izvornu ljestvicu: antilogaritama podešene srednje vrijednosti je jednak geometrijskoj srednjoj vrijednosti; a antilogaritama razlike srednjih vrijednosti logaritama je jednak omjeru geometrijskih srednjih vrijednosti (engl. *Geometric Means Ratio*, GMR). GMR je metoda koja se koristi za analizu razmjera između dvije ili više skupina podataka. Logaritamska transformacija je izrazito pogodna za situacije u kojima je distribucija greške „iskrivljena udesno“ što označava da logaritama greške ima normalnu distribuciju (kaže se da je varijabla „log-normalno distribuirana“). Nakon transformacije zavisne varijable, podaci se analiziraju u generalnim linearnim modelima (GLM) [102], [103].

## 3. Transformacija očekivanih vrijednosti

Katkad, niti jedna od navedenih transformacija ne daje zadovoljavajući rezultat, odnosno, ne omogućuje da se podaci pouzdano analiziraju u generalnim linearnim modelima (GLM). Generalizirani linearni modeli (obično se označavaju kao GzLM) su ekstenzija generalnih linearnih modela (GLM) koji omogućuju puno veću fleksibilnost u pristupu podacima kada je distribucija greške iskrivljena i/ili kada nije zadovoljen uvjet homogenosti varijance. Koriste se za opisivanje metode statističkog modeliranja koja se koristi za proučavanje veze između jedne ili više nezavisnih varijabli i jedne zavisne varijable. Njihova je primjena uobičajena u situacijama kada zavisna varijabla nije kontinuirana, no posve su primjenjivi i za kontinuirane varijable. Ne zahtijevaju nužno da distribucija greške bude normalna, već može biti i gama

distribucija ili inverzna gama distribucija. Također, omogućuju da se modeliraju različiti odnosi varijance i srednje vrijednosti. Primjerice, ako je distribucija normalna, to ujedno znači da iznos varijance ne ovisi o srednjoj vrijednosti (zadovoljen je i uvjet homogenosti varijance), no omogućuje da se modeliraju i drugačije situacije: primjerice, gama distribucija greške podrazumijeva da je varijanca proporcionalna kvadratu srednje vrijednosti. Pri tome, moguće je provesti različite transformacije očekivanih vrijednosti (a ne samih izmjerenih vrijednosti). Funkcija transformacije očekivanih vrijednosti (definiranih linearnom kombinacijom nezavisnih varijabli) obično se označava kao „link funkcija“. Link funkcija povezuje (engl. *links*) očekivane i opažene vrijednosti. Svaka link funkcija ima i svoju inverznu link funkciju: primjerice, ako se u generaliziranim linearnim modelima (GzLM) koristi gama distribucija i log link funkcija (očekivane vrijednosti su log-transformirane na bazi  $e$ , a ne „sirove“ izmjerene vrijednosti, za razliku od opisane logaritamske transformacije), u tom slučaju se „podešena“ vrijednost može „vratiti“ na izvornu ljestvicu antilogaritmiranjem. Za razliku od generalnim linearnim modelima (GLM) koji se temelje na metodi najmanjih kvadrata, procjene u generaliziranim linearnim modelima (GzLM) temelje se na metodi „najveće izglednosti“ (engl. *Maximum Likelihood Estimation*, MLE). MLE je jedna od najčešće korištenih metoda za određivanje parametara jer se može lako primijeniti na različite vrste distribucija i daje dobre rezultate [104], [105], [106].

U istraživanju je korištena i korelacijska analiza koja se koristi za ispitivanje međusobne povezanosti više varijabli. Cilj ovog pristupa je identificirati i kvantificirati odnos između varijabli, kao i utvrditi postoji li neka skrivena struktura u podacima. Ukoliko postoji povezanost, bitno je kakvog je oblika, smjera i jakosti ta povezanost [107].

Vrijednost korelacije brojčano se iskazuje koeficijentom korelacije  $r$ , a značajnost koeficijenta se iskazuje vrijednošću  $P$ . Koeficijent korelacije pokazuje u kojoj su mjeri promjene vrijednosti jedne varijable povezane s promjenama vrijednosti druge varijable. Vrijednosti koeficijenta korelacije kreću se u rasponu od -1 do +1 te upućuju na intenzitet veze dviju varijabli koje su u korelaciji. Vrijednost blizu -1 označava potpunu negativnu korelaciju, što znači da rastući trend u jednom skupu podataka uvijek prati opadajući trend u drugom skupu podataka; vrijednost blizu 0 označava izostanak korelacije, što znači da ne postoji jasan trend uzajamnog odnosa između dva skupa podataka; dok vrijednost blizu 1 označava potpunu pozitivnu korelaciju, što znači da rastući trend u jednom skupu podataka uvijek prati rastući trend u drugom skupu podataka. Najčešće se koriste Pearsonov i Spearmanov koeficijent korelacije [108].

Pearsonov koeficijent korelacije koristi se za varijable koje prate normalnu distribuciju podataka, odnosno kada je zadovoljen uvjet homogenosti varijance. Izračunava se prema Jednadžbi 11:

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (11)$$

gdje je  $r$  Pearsonov koeficijent korelacije,  $x_i$  je vrijednost  $x$  varijable u uzorku,  $\bar{x}$  je srednja vrijednost  $x$  varijable,  $y_i$  je vrijednost  $y$  varijable u uzorku,  $\bar{y}$  je srednja vrijednost  $y$  varijable.

Spearmanov koeficijent korelacije ili korelacija ranga koristi se kada raspodjela podataka značajno odstupa od normalne distribucije. Izračunava se prema Jednadžbi 12:

$$r_s = 1 - 6 \sum_{i=1}^n \frac{d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (12)$$

gdje je  $r_s$  Spearmanov koeficijent korelacije,  $d$  je razlika vrijednosti rangova dvije promatrane varijable,  $n$  je broj različitih serija.

## 4. REZULTATI ISTRAŽIVANJA I RASPRAVA

Istraživanje je uključivalo 100 različitih kombinacija perforiranoga valovitoga kartona, s tri nezavisne varijable: kvaliteta valovitoga kartona, tip perforacije, kut pozicioniranja perforacije. Kvaliteta valovitoga kartona je imala 4 nivoa, odnosno 4 različite kvalitete troslojnog valovitoga kartona E vala. Tip perforacije je imao 5 nivoa, odnosno 5 različitih tipova perforacije, kao i kut pozicioniranja s također 5 nivoa, odnosno 5 različitih stupnjeva ispitivanja. Za svaki uzorak bilo je cca. 10 ponavljanja, kako bi rezultati bilo vjerodostojniji. Mehanička svojstva uzoraka ispitana su kroz 7 različitih testova. Rezultati mjerenja predstavljaju zavisne varijable u kasnijoj statističkoj analizi.

Prije eksperimentalnih analiza, izmjerene su gramatura i debljina određenih kvaliteta troslojnoga valovitoga kartona E vala. Rezultati su prikazani u Tablici 4.1. Najveća gramatura i debljina zabilježene su kod kvalitete valovitoga kartona 177L, dok je najniža vrijednost gramature kod kvalitete 177, a najniža vrijednost debljine valovitoga kartona kod kvalitete 111.

Tablica 4.1. Masa, gramatura i debljina ispitivanih kvaliteta troslojnoga valovitoga kartona E vala

Kvaliteta	111	131	177	177L
m [g]	5,613	6,043	6,177	7,166
g [g/m <sup>2</sup> ]	320,742	345,311	352,973	409,484
d [mm]	1,455	1,493	1,449	1,502

### 4.1. Rezultati eksperimentalnih ispitivanja

Rezultati mjerenja prikazani su ovisno o uređaju na kojemu je mjerenje vršeno, a radi lakšeg snalaženja vrijednosti su dodatno grafički podijeljene prema kvaliteti kartona.

Mjerenja vezana za transport i skladištenje prikazana su zajedno s referentnom vrijednosti, odnosno s vrijednosti valovitoga kartona bez perforacije kako bi se vizualno prikazalo koliko perforacija utječe na promjenu određenog mehaničkog svojstva. Za svaku kvalitetu valovitoga kartona prikazane su srednje vrijednosti ovisno o tipu perforacije, a zatim unutar svakog tipa perforacije po definiranim kutovima.

Kod mjerenja vezanih za razdvajanje valovitoga kartona nije prikazana referenta vrijednost jer se valoviti karton bez perforacije ne razdvaja niti je ta informacija na ikoji način bitna za ovo istraživanje. Kao i kod mjerenja vezanih za transport i skladištenje za svaku kvalitetu valovitoga

kartona prikazane su srednje vrijednosti ovisno o tipu perforacije, a zatim unutar svakog tipa perforacije po definiranim kutovima.

#### 4.1.1. **Određivanje otpornost brida na pritisak**

Rezultati mjerenja otpornosti brida na pritisak ( $R$ ) valovitoga kartona kvalitete 111, 131, 177 i 177L prikazani su u Tablici 4.3. Vrijednosti su prikazane za uzorke bez perforacije (referentna vrijednost) te za uzorke s perforacijom ovisno o tipu perforacije i o kutu pozicioniranja perforacije. Za svaku ispitivanu skupinu uzoraka mjerena je maksimalna sila pritiska iz koje se izračunava otpornost brida na pritisak. Opširni prikaz rezultata srednje vrijednost maksimalne sile pritiska ( $\bar{F}_{max}$ ) te pripadajuće standardne devijacije za svaku pojedinu kvalitetu valovitoga kartona ovisno o tipu perforacije te kutu pozicioniranja iste prikazane su u Prilogu 4. (Tablice P4.1-P4.4)

Rezultati mjerenja otpornosti brida na pritisak za valoviti karton kvalitete 111 grafički su ilustrirani na Slici 4.1. Uspoređena su mjerenja za sve tipove perforacija ovisno o kutovima te prikazani uz referentnu vrijednost uzorka bez perforacije iste kvalitete. Dobivene vrijednosti za kutove  $0^\circ$ ,  $20^\circ$  i  $90^\circ$  više od dva puta su niže od uzorka valovitoga kartona kvalitete 111 bez perforacije za tipove perforacije 1/1 i 2/2, dok su izmjerene vrijednosti kod najnižih kutova i do tri puta niže od referentne vrijednosti za tipove perforacija 4/2, 6/2 i 10/3.

Slika 4.2. prikazuje raspodjelu dobivenih vrijednosti otpornosti brida na pritisak za kvalitetu perforiranoga valovitoga kartona 131. Najviše vrijednosti su kod kuta od  $70^\circ$  za sve tipove perforacija. Najniže izmjerene vrijednosti su uglavnom kod kuta od  $0^\circ$ . Jedino kod tipa perforacije 2/2 vrijednost kod kuta od  $20^\circ$  je neznajno niža od vrijednosti kod kuta od  $0^\circ$ .

Najniže vrijednosti izmjerene kod valovitoga kartona kvalitete 177 su za kut od  $0^\circ$  kod svih tipova perforacija (Slika 4.3.). Vrlo slične vrijednosti su i za kut od  $20^\circ$ . Kut od  $70^\circ$  je i kod ove kvalitete kartona s najvišim vrijednosti, a i vrijednosti za kut od  $45^\circ$  su vrlo blizu. Najveće smanjenje otpornosti brida na pritisak izmjeren je kod tipa perforacije 10/3 pri kutu od  $0^\circ$ , dok je najmanje smanjenje zabilježeno kod tipa perforacije 4/2 pri kutu od  $70^\circ$ . Vrijednosti rastu od kuta od  $0^\circ$  do  $70^\circ$ , s najznačajnijim rastom između kutova  $20^\circ$  i  $45^\circ$ , a zatim padaju kod kuta od  $90^\circ$ .

Prema grafičkom prikazu rezultata za valoviti karton kvalitete 177L (Slika 4.4.) vidljivo je da je vrijednost otpornosti brida na pritisak i dalje najviša je kod kuta od  $70^\circ$  kod svih pet tipova



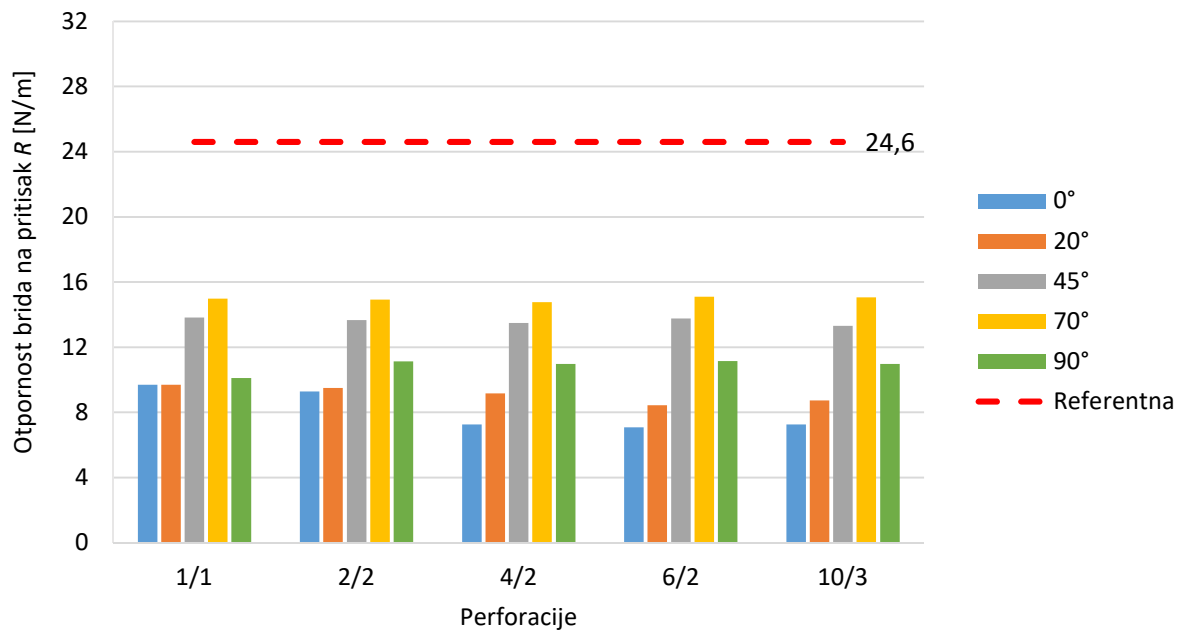
perforacija, s najnižom vrijednosti kod tipa perforacije 1/1. Najniže vrijednosti izmjerene su za kutove 0° i 20°, a najmanji otpor brida na pritisak zabilježen je kod tipa perforacije 6/2.

Tablica 4.2 Otpornost brida na pritisak ( $R$ ) perforiranoga i neperforiranoga valovitoga kartona kvalitete 111, 131, 177 i 177L

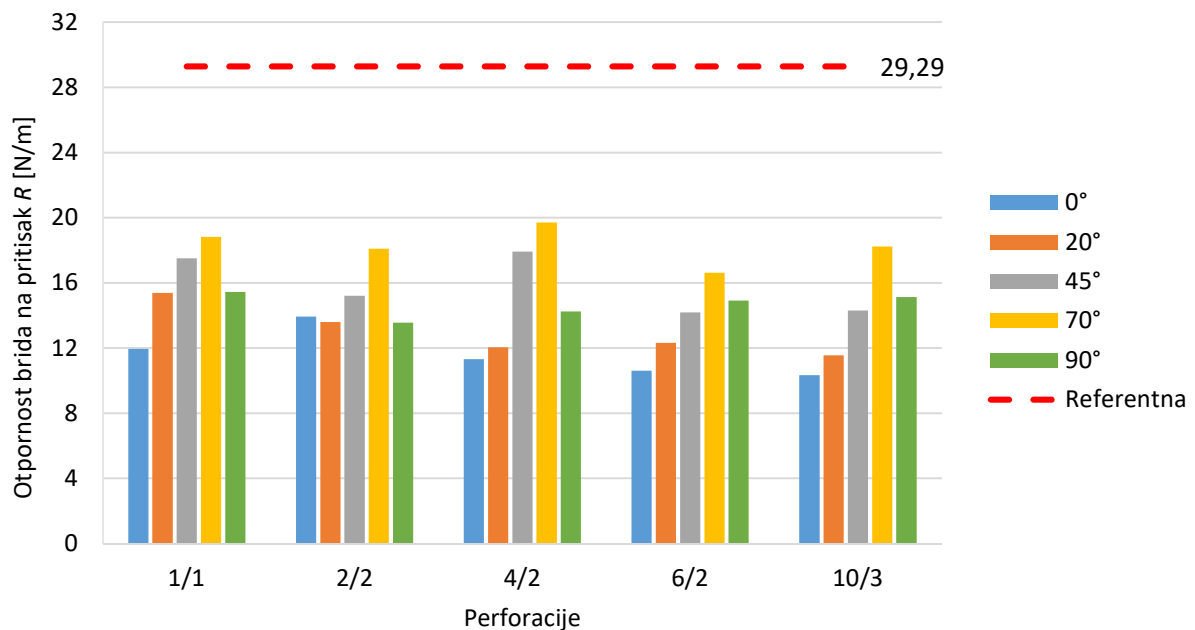
PERFORACIJA		1/1		2/2		4/2		6/2		10/3	
KVALITETA	KUT	$R$ [N/m]	$\sigma$	$R$ [N/m]	$\sigma$	$R$ [N/m]	$\sigma$	$R$ [N/m]	$\sigma$	$R$ [N/m]	$\sigma$
<b>111</b>	<b>REF</b>	24,600	0,767	24,600	0,767	24,600	0,767	24,600	0,767	24,600	0,767
	<b>0°</b>	9,700	0,777	9,290	0,423	7,250	0,389	7,090	0,264	7,250	0,207
	<b>20°</b>	9,690	0,902	9,490	0,453	9,160	0,280	8,430	0,313	8,730	0,258
	<b>45°</b>	13,830	0,221	13,670	0,183	13,480	0,290	13,770	0,189	13,310	1,471
	<b>70°</b>	14,980	0,649	14,930	0,183	14,760	0,255	15,090	0,396	15,050	0,337
	<b>90°</b>	10,100	0,245	11,130	0,368	10,970	0,279	11,150	0,212	10,970	0,206
<b>131</b>	<b>REF</b>	29,290	1,012	29,290	1,012	29,290	1,012	29,290	1,012	29,290	1,012
	<b>0°</b>	11,938	0,725	13,920	0,704	11,311	0,386	10,610	0,672	10,340	0,288
	<b>20°</b>	15,380	0,623	13,600	0,865	12,040	0,747	12,310	0,717	11,550	0,711
	<b>45°</b>	17,510	1,273	15,200	2,408	17,910	2,039	14,190	2,358	14,310	2,613
	<b>70°</b>	18,830	0,846	18,090	2,307	19,710	1,195	16,625	1,581	18,240	2,088
	<b>90°</b>	15,450	1,970	13,560	0,450	14,250	0,350	14,910	0,260	15,120	0,397
<b>177</b>	<b>REF</b>	25,500	0,585	25,500	0,585	25,500	0,585	25,500	0,585	25,500	0,585
	<b>0°</b>	8,920	0,416	9,170	0,406	7,650	0,406	6,990	0,378	7,450	0,375
	<b>20°</b>	10,930	0,696	9,880	0,629	9,260	0,357	8,110	0,513	8,780	0,408
	<b>45°</b>	14,570	0,560	13,300	1,286	13,050	0,246	13,320	0,541	13,460	0,259
	<b>70°</b>	14,970	0,556	14,450	0,591	14,100	0,403	14,660	0,912	14,680	0,418
	<b>90°</b>	10,240	0,207	10,400	0,353	11,180	0,266	11,590	0,348	11,350	0,321
<b>177L</b>	<b>REF</b>	30,940	0,519	30,940	0,519	30,940	0,519	30,940	0,519	30,940	0,519
	<b>0°</b>	11,690	1,207	11,350	0,299	9,050	0,158	8,860	0,759	9,720	0,312
	<b>20°</b>	13,330	1,125	12,510	0,599	11,450	0,635	11,310	1,040	10,960	0,760
	<b>45°</b>	18,020	0,509	14,850	1,679	15,920	0,429	16,450	1,774	16,220	1,885
	<b>70°</b>	19,250	1,245	17,690	0,468	17,860	0,334	18,740	0,458	18,060	0,406
	<b>90°</b>	12,475	3,661	11,980	0,230	12,880	0,371	13,520	0,215	14,070	0,236

Rezultati ispitivanja otpornosti brida na pritisak jasno ukazuju da bilo koji tip perforacije pozicioniran pri bilo kojem kutu kod svih ispitivanih kvaliteta valovitoga kartona dovodi do smanjenja otpornosti brida valovitoga kartona na pritisak. Izmjerene vrijednosti su prilično

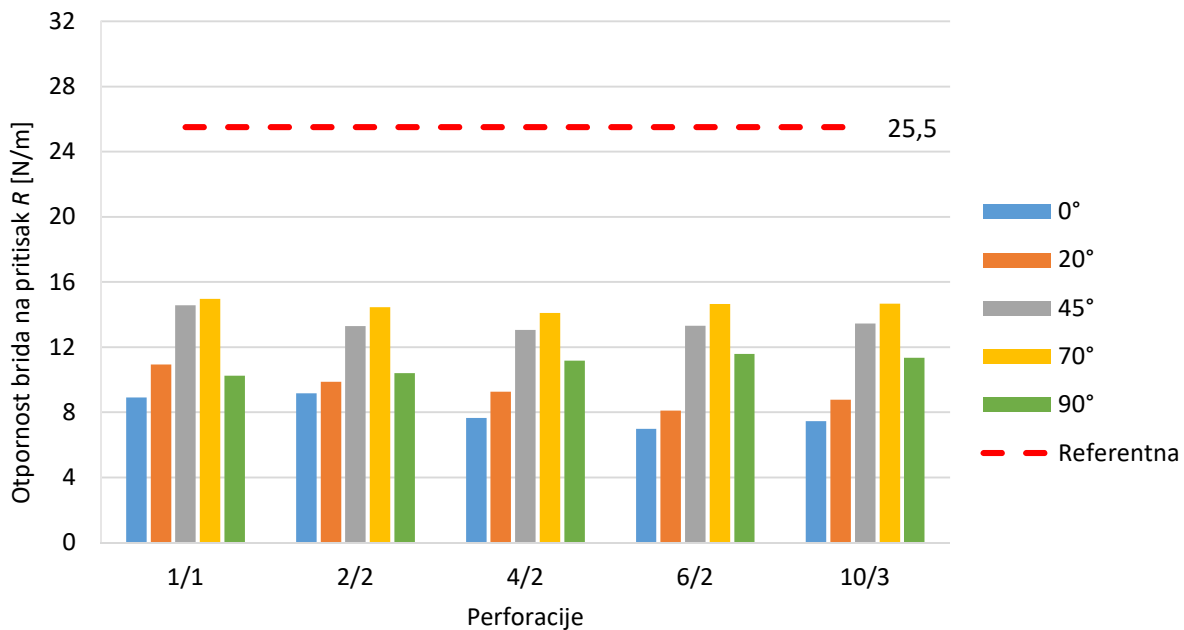
iskrivljene, ali opći trend je očit. Vrijednosti rastu od kuta od 0° do 70°, a zatim padaju kod kuta od 90°.



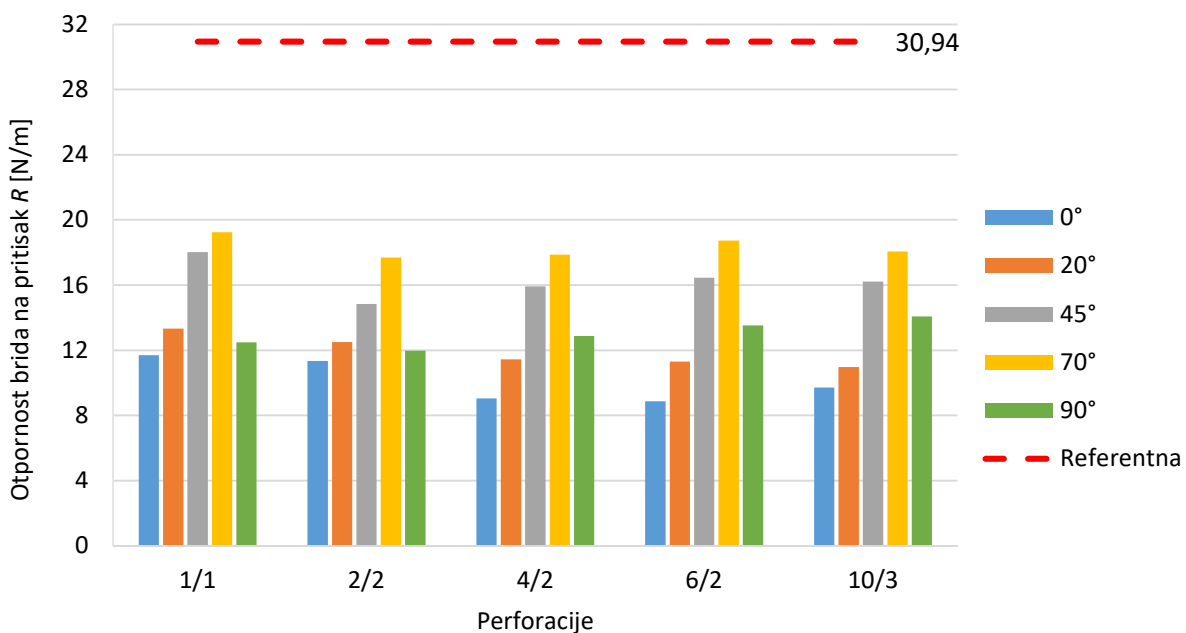
Slika 4.1. Otpornost brida na pritisak valovitoga kartona kvaliteta 111 ovisno o tipu perforacije i kutu pozicioniranja perforacije te usporedba s neperforiranim uzorkom iste kvalitete



Slika 4.2. Otpornost brida na pritisak valovitoga kartona kvaliteta 131 ovisno o tipu perforacije i kutu pozicioniranja perforacije te usporedba s neperforiranim uzorkom iste kvalitete



Slika 4.3. Otpornost brida na pritisak valovitoga kartona kvaliteta 177 ovisno o tipu perforacije i kutu pozicioniranja perforacije te usporedba s neperforiranim uzorkom iste kvalitete



Slika 4.4. Otpornost brida na pritisak valovitoga kartona kvaliteta 177L ovisno o tipu perforacije i kutu pozicioniranja perforacije te usporedba s neperforiranim uzorkom iste kvalitete

#### 4.1.2. **Određivanje otpornosti jačine pucanja perforiranoga valovitoga kartona**

Rezultati mjerenja otpornosti jačine pucanja ( $p$ ) valovitoga kartona kvalitete 111, 131, 177 i 177L prikazani su u Tablici 4.4. kao indeksi pucanja ( $x$ ) kako bi se vrijednosti za različite gramature valovitoga kartona mogle uspoređivati prema standardu ISO 2758:2014 [91]. U spomenutoj tablici vrijednosti su prikazane za uzorke bez perforacije (referentna vrijednost) te za uzorke s perforacijom ovisno o tipu perforacije i o kutu pozicioniranja perforacije. Opširni prikaz rezultata otpornosti jačine pucanja ( $p$ ) neperforiranoga i perforiranoga valovitoga kartona te pripadajuće standardne devijacije za svaku kvalitetu valovitoga kartona ovisno o tipu perforacije te kutu pozicioniranja iste prikazane su u Prilogu 4. (Tablice P4.5.-P4.8.).

Na Slici 4.5. prikazana je usporedba dobivenih vrijednosti indeksa pucanja za neperforirane uzorke valovitoga kartona kvalitete 111, te uzorke svih pet tipova perforacija pozicioniranih na pet definiranih kutova za istu kvalitetu valovitoga kartona. Vrijednosti perforiranih uzoraka očekivano su manje od neperforiranoga uzorka, međutim na slici je također vidljivo da su razlike između svih tipova perforacija i svih kuta pozicioniranja vrlo male. Minimalne vrijednosti zabilježene su kod kuta od  $45^\circ$ , neovisno o tipu perforacije.

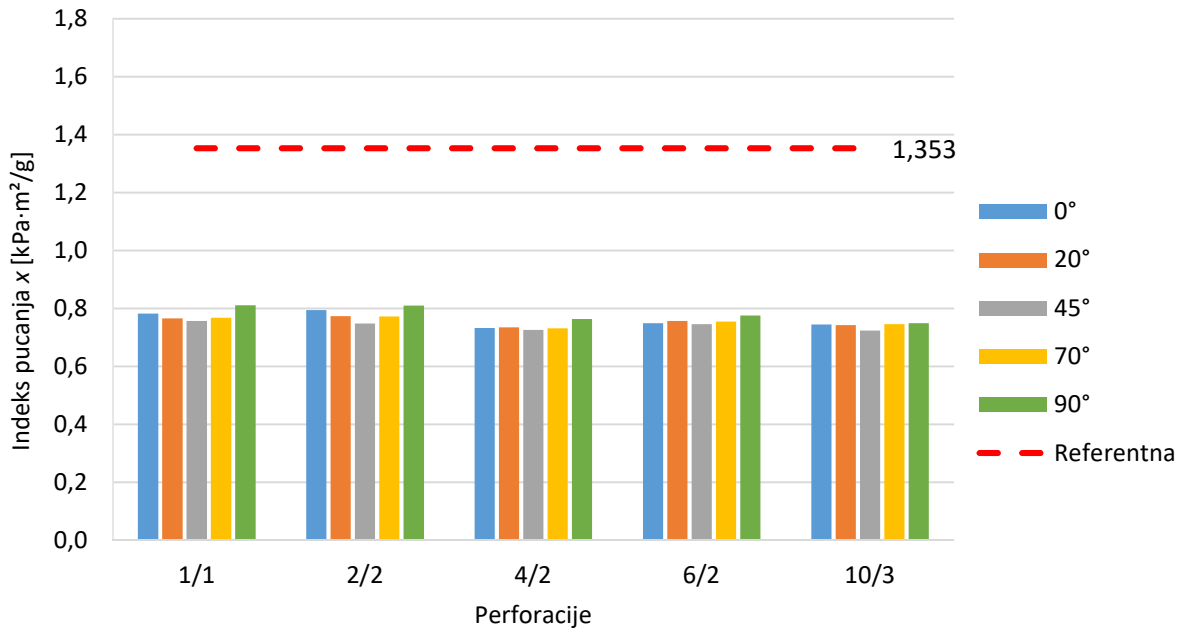
Slika 4.6. prikazuje distribuciju rezultata indeksa pucanja za valoviti karton kvalitete 131. Minimalne vrijednosti izmjenjuju se kod kutova od  $45^\circ$  i  $70^\circ$ , a kod maksimalnih vrijednosti izmjenjuju se kutovi od  $0^\circ$  i  $20^\circ$ , s iznimkom kod tipa perforacije 2/2 gdje su kutovi od  $0^\circ$  i  $90^\circ$  gotovo identični.

Maksimalna vrijednost kod kuta od  $90^\circ$  vidljiva je kod dobivenih rezultata kod kvalitete 177 (Slika 4.7.) kao i kod dobivenih rezultata kvalitete 177L (Slika 4.8.). Najniže vrijednosti referentnih uzoraka upravo su kod spomenutih kvalitete (177 i 177L), međutim utjecaj perforacija na smanjenje otpornosti jačine pucanja je također najmanji.

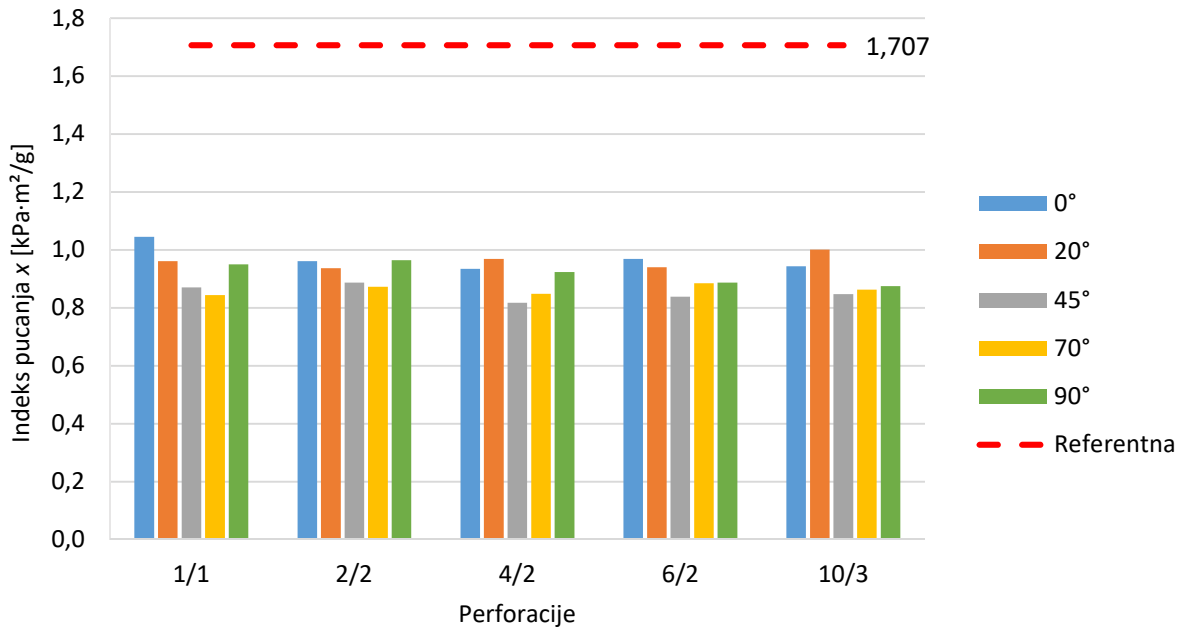
Iz prikazanih rezultata indeksa pucanja čime se opisuje otpornost jačine pucanja različitih kvaliteta valovitoga kartona, vidljivo je da su izmjerene vrijednosti prilično iskrivljene, ali opći trend je ipak očit: vrijednosti imaju tendenciju pada od kuta  $0^\circ$  prema kutu  $45^\circ$  ili  $70^\circ$ , a zatim se nešto povećavaju kod kuta od  $90^\circ$ . Što je veća vrijednost otpornosti jačine pucanja neperforiranoga uzorka, dolazi do većih smanjenja vrijednosti uzoraka s perforacijom nego kod onih kvaliteta uzoraka s nižom referentnom vrijednošću.

Tablica 4.3. Indeks pucanja ( $x$ ) perforiranoga i neperforiranoga valovitoga kartona kvalitete 111, 131, 177 i 177L

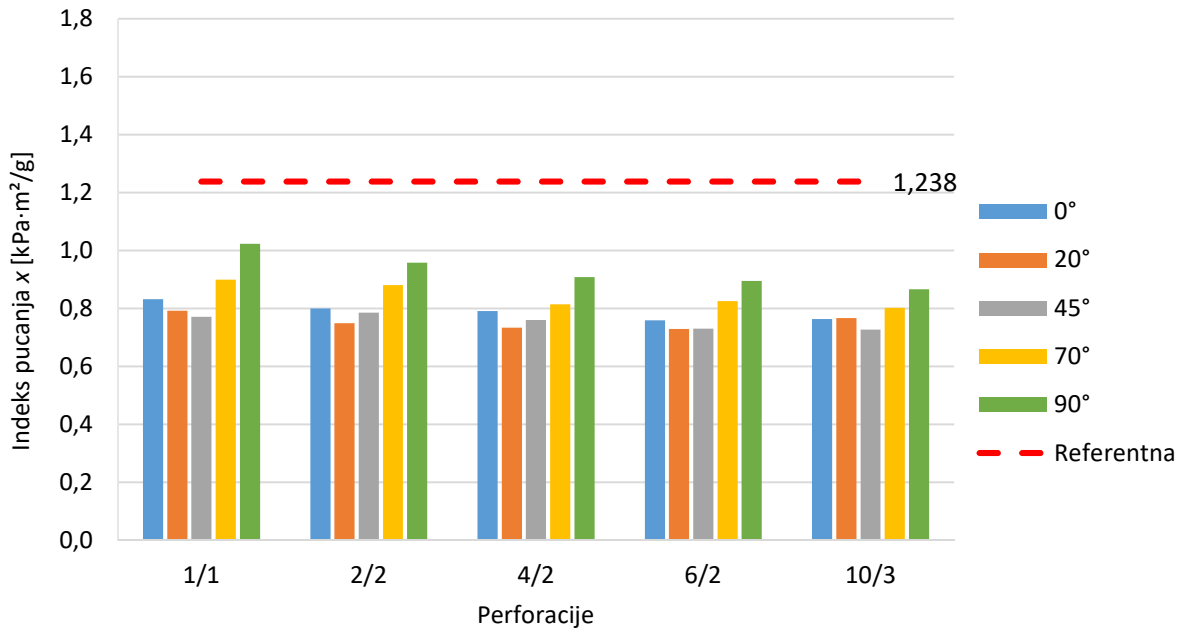
PERFORACIJA		1/1		2/2		4/2		6/2		10/3	
KV.	KUT	$x$ [kPa·m <sup>2</sup> /g]	$\sigma$	$x$ [kPa·m <sup>2</sup> /g]	$\sigma$	$x$ [kPa·m <sup>2</sup> /g]	$\sigma$	$x$ [kPa·m <sup>2</sup> /g]	$\sigma$	$x$ [kPa·m <sup>2</sup> /g]	$\sigma$
<b>111</b>	<b>REF</b>	1,353	0,112	1,353	0,112	1,353	0,112	1,353	0,112	1,353	0,112
	<b>0°</b>	0,782	0,034	0,794	0,055	0,732	0,020	0,749	0,050	0,745	0,044
	<b>20°</b>	0,766	0,043	0,773	0,028	0,735	0,027	0,757	0,034	0,742	0,032
	<b>45°</b>	0,757	0,023	0,748	0,016	0,726	0,019	0,746	0,019	0,724	0,015
	<b>70°</b>	0,768	0,028	0,772	0,019	0,731	0,016	0,754	0,025	0,746	0,019
	<b>90°</b>	0,811	0,026	0,810	0,021	0,764	0,019	0,776	0,025	0,749	0,014
<b>131</b>	<b>REF</b>	1,707	0,088	1,707	0,088	1,707	0,088	1,707	0,088	1,707	0,088
	<b>0°</b>	1,045	0,077	0,962	0,064	0,934	0,080	0,969	0,089	0,944	0,077
	<b>20°</b>	0,961	0,052	0,937	0,058	0,969	0,070	0,940	0,103	1,001	0,041
	<b>45°</b>	0,870	0,042	0,887	0,039	0,818	0,044	0,838	0,040	0,847	0,055
	<b>70°</b>	0,844	0,032	0,873	0,055	0,849	0,035	0,885	0,067	0,862	0,052
	<b>90°</b>	0,951	0,050	0,965	0,065	0,924	0,038	0,887	0,038	0,875	0,049
<b>177</b>	<b>REF</b>	1,238	0,071	1,238	0,071	1,238	0,071	1,238	0,071	1,238	0,071
	<b>0°</b>	0,832	0,071	0,800	0,048	0,791	0,058	0,759	0,027	0,764	0,043
	<b>20°</b>	0,792	0,017	0,749	0,039	0,733	0,034	0,729	0,039	0,767	0,038
	<b>45°</b>	0,771	0,030	0,786	0,038	0,760	0,037	0,730	0,047	0,726	0,035
	<b>70°</b>	0,899	0,023	0,880	0,056	0,814	0,049	0,825	0,064	0,802	0,038
	<b>90°</b>	1,024	0,057	0,958	0,025	0,908	0,037	0,895	0,067	0,866	0,039
<b>177L</b>	<b>REF</b>	1,193	0,065	1,193	0,065	1,193	0,065	1,193	0,065	1,193	0,065
	<b>0°</b>	0,740	0,035	0,812	0,030	0,739	0,034	0,720	0,063	0,741	0,040
	<b>20°</b>	0,715	0,038	0,761	0,034	0,731	0,031	0,723	0,046	0,744	0,027
	<b>45°</b>	0,715	0,022	0,723	0,038	0,703	0,049	0,714	0,044	0,713	0,048
	<b>70°</b>	0,800	0,027	0,772	0,032	0,765	0,045	0,752	0,062	0,761	0,024
	<b>90°</b>	0,923	0,029	0,868	0,031	0,849	0,043	0,794	0,063	0,803	0,050



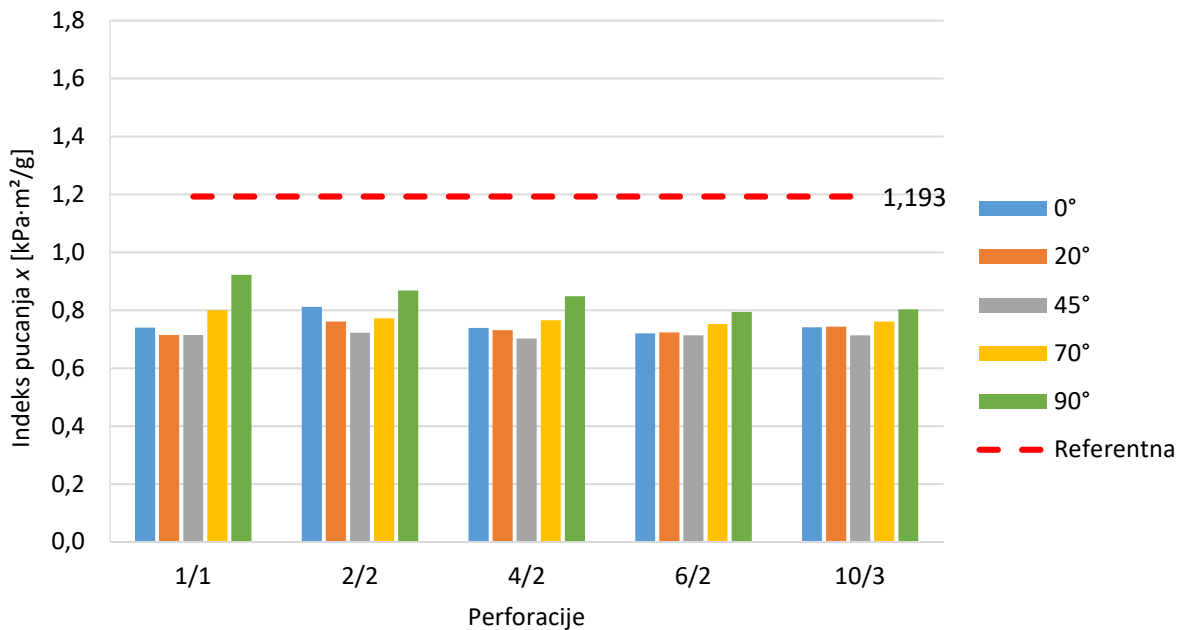
Slika 4.5. Indeks pucanja valovitoga kartona kvaliteta 111 ovisno o tipu perforacije i kutu pozicioniranja perforacije te usporedba s neperforiranim uzorkom iste kvalitete



Slika 4.6. Indeks pucanja valovitoga kartona kvaliteta 131 ovisno o tipu perforacije i kutu pozicioniranja perforacije te usporedba s neperforiranim uzorkom iste kvalitete



Slika 4.7. Indeks pucanja valovitoga kartona kvaliteta 177 ovisno o tipu perforacije i kutu pozicioniranja perforacije te usporedba s neperforiranim uzorkom iste kvalitete



Slika 4.8. Indeks pucanja valovitoga kartona kvaliteta 177L ovisno o tipu perforacije i kutu pozicioniranja perforacije te usporedba s neperforiranim uzorkom iste kvalitete

#### 4.1.3. Određivanje krutosti perforiranoga valovitoga kartona u smjeru MD

Maksimalna dozvoljena deformacija ( $d_a$ ) izravno je proporcionalna vrijednosti graničnog naprezanja i izračunata je koristeći Jednadžbu 6. Izračunate vrijednosti maksimalno dozvoljene deformacije prikazane su u Tablici 4.5.

Tablica 4.4. Maksimalna dozvoljena deformacija ( $d_a$ ) za valoviti karton kvalitete 111, 131, 177 i 177L

KVALITETA	111	131	177	177L
$d_a$ [mm]	2,27	2,21	2,29	2,20

Za savijanje u tri točke uzima se u obzir daljnje ograničenje kako bi se osiguralo da su pogreške manje od 5% [109]. Dužina testnog uzroka bila je 100 mm.

Prema Jednadžbi 7 slijedi:  $d_a \not\geq 6,7$ mm, što potvrđuju sve vrijednosti iz Tablice 4.5.

Mjerenjem uzoraka na uređaju za savijanje u tri točke, dobiva se sila savijanje ( $F$ ). Iz sile savijanja te maksimalne dozvoljene deformacije izračunava se otpornost na savijanje prema standardu ISO 5628:2019 [92]. Dobiveni rezultati otpornosti na savijanje u tri točke za sve četiri kvalitete valovitoga kartona u smjeru pružanja vala (MD) bez perforacije te za iste kvalitete u istom smjeru sa svih pet tipova perforacija pozicioniranih na pet definiranih kutova prikazani su u Tablici 4.6. Opširni prikaz rezultata sila savijanje ( $F$ ) neperforiranoga i perforiranoga valovitoga kartona te pripadajuće standardne devijacije za pojedinu kvalitetu valovitoga kartona ovisno o tipu perforacije te kutu pozicioniranja iste prikazane su u Prilogu 4. (Tablice P4.9.-P4.12.).

Na Slici 4.9. prikazani su rezultati krutosti na savijanje u smjeru pružanja vala (MD) za valoviti karton kvalitete 111. Odstupanja od referentne vrijednosti rastu kako raste kut pozicioniranja perforacije kod svih tipova perforacije. Minimalne vrijednosti su kod kuta od  $90^\circ$ , dok su maksimalne uglavnom kod  $0^\circ$ , osim za tip perforacije 1/1 gdje je vrijednost kuta od  $20^\circ$  malo viša od kuta od  $0^\circ$ . Najveća i najniža vrijednost je kod tipa perforacije 10/3 pri  $0^\circ$ , odnosno najniža pri  $90^\circ$ .

Na Slici 4.10. vidljivo je odstupanje otpornosti na savijanje perforiranih uzoraka valovitoga kartona kvalitete 131 od referentne vrijednosti neperforiranoga uzorka. Najniže vrijednosti izmjerene su kod kuta od  $90^\circ$  za sve tipove perforacije osim tipa perforacije 1/1. Najviše vrijednosti su kod kuta  $0^\circ$ , osim kod tipa perforacije 2/2 gdje je najviša vrijednost za kut od  $20^\circ$ .

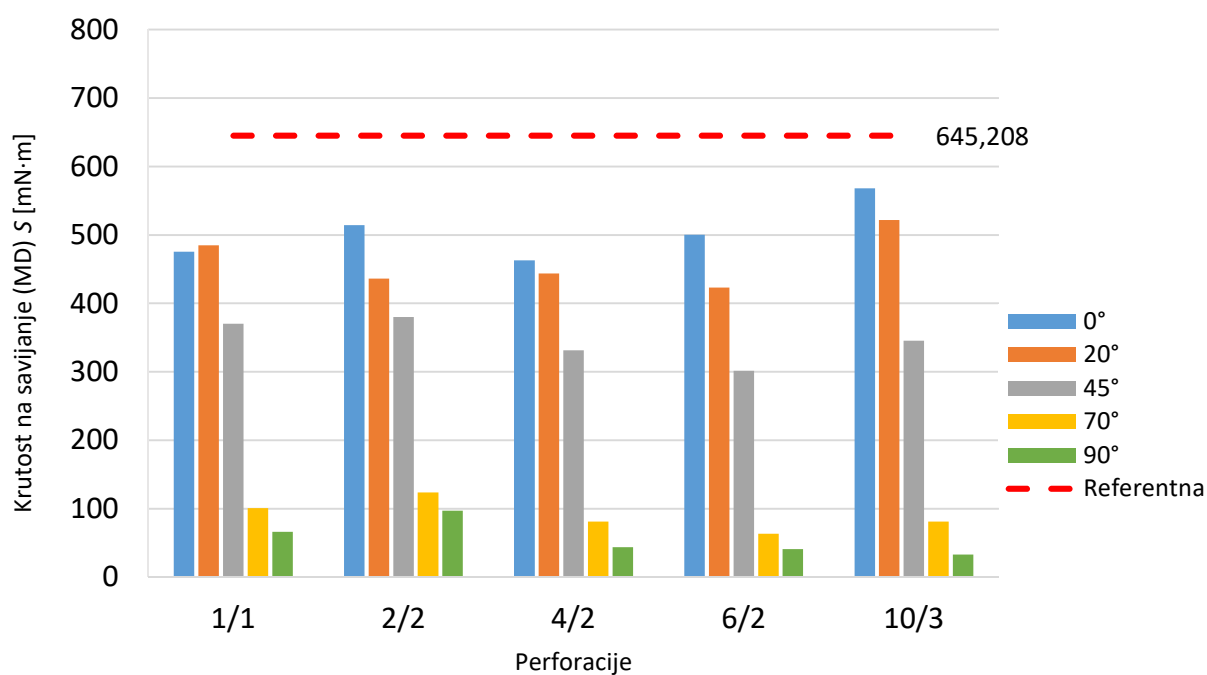


Tablica 4.5. Otpornost na savijanje ( $S$ ) perforiranoga i neperforiranoga valovitoga kartona kvalitete 111, 131, 177 i 177L u smjeru pružanja vala (MD)

PERFORACIJA		1/1		2/2		4/2		6/2		10/3	
KV.	KUT	$S$ [mN·m]	$\sigma$	$S$ [mN·m]	$\sigma$	$S$ [mN·m]	$\sigma$	$S$ [mN·m]	$\sigma$	$S$ [mN·m]	$\sigma$
<b>111</b>	<b>REF</b>	645,208	70,540	645,208	70,540	645,208	70,540	645,208	70,540	645,208	70,540
	<b>0°</b>	475,612	20,568	514,501	52,081	462,758	34,322	500,420	45,446	568,108	40,536
	<b>20°</b>	484,890	40,573	436,232	18,249	443,482	59,930	423,011	20,732	521,886	22,621
	<b>45°</b>	370,025	16,381	380,149	81,892	331,616	32,858	301,525	22,602	345,315	38,199
	<b>70°</b>	100,884	29,643	123,590	15,447	81,279	16,713	63,618	11,516	81,309	25,446
	<b>90°</b>	66,444	29,003	97,308	28,615	43,724	15,181	41,145	14,094	32,945	9,910
<b>131</b>	<b>REF</b>	690,648	44,941	690,648	44,941	690,648	44,941	690,648	44,941	690,648	44,941
	<b>0°</b>	585,028	63,710	506,923	28,976	528,782	25,365	524,215	41,315	588,029	50,047
	<b>20°</b>	538,757	29,937	532,920	23,920	493,270	33,068	488,815	22,537	552,226	34,480
	<b>45°</b>	415,560	29,270	453,285	32,097	382,545	26,365	340,684	20,350	373,157	38,799
	<b>70°</b>	100,627	11,559	175,750	24,341	96,221	18,461	100,428	14,100	96,573	15,299
	<b>90°</b>	120,030	17,944	102,237	15,185	73,199	15,965	63,306	12,875	60,500	18,195
<b>177</b>	<b>REF</b>	614,619	52,625	614,619	52,625	614,619	52,625	614,619	52,625	614,619	52,625
	<b>0°</b>	472,746	35,083	527,039	39,538	432,537	11,003	462,516	48,136	448,173	52,491
	<b>20°</b>	421,129	21,110	418,726	33,812	396,085	17,347	407,622	18,565	401,447	15,837
	<b>45°</b>	362,048	24,474	352,895	25,475	286,139	23,912	288,607	23,103	323,625	14,292
	<b>70°</b>	115,646	24,187	147,145	31,324	107,959	19,559	74,437	19,263	62,768	10,489
	<b>90°</b>	95,527	41,043	108,426	25,197	65,136	22,144	32,526	12,715	43,812	17,855
<b>177L</b>	<b>REF</b>	614,808	130,632	614,808	130,632	614,808	130,632	614,808	130,632	614,808	130,632
	<b>0°</b>	544,144	86,325	488,625	59,944	502,359	34,876	513,342	54,757	499,175	25,898
	<b>20°</b>	469,550	41,039	489,337	31,554	478,173	12,937	455,119	13,971	477,727	12,682
	<b>45°</b>	370,595	34,199	397,562	36,657	318,459	22,051	301,329	32,944	301,015	37,329
	<b>70°</b>	125,825	18,163	128,298	21,922	77,437	19,345	76,159	9,475	73,931	19,824
	<b>90°</b>	118,650	12,539	102,086	22,581	61,159	15,057	59,921	12,093	41,542	14,070

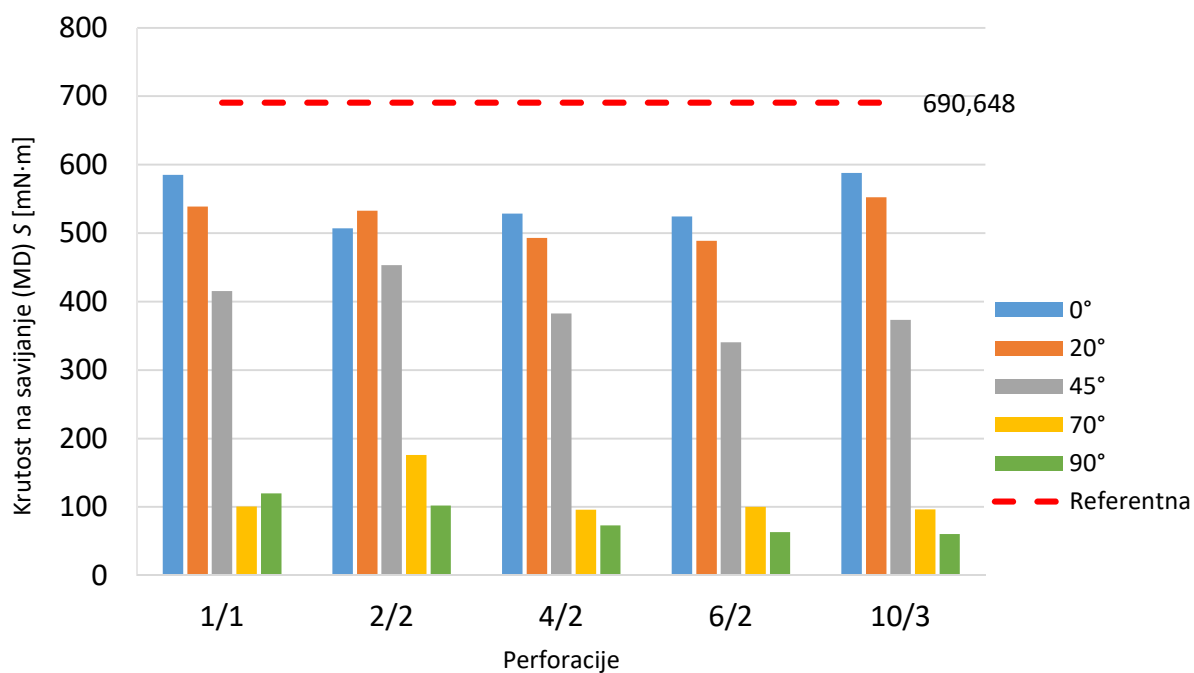
Kod valovitoga kartona kvalitete 177 najniže vrijednosti krutosti na savijanje za sve tipove perforacije nalaze se kod kuta od 90°, dok su najviše vrijednosti izmjerene za kut od 0° (Slika 4.11.). Najmanje odstupanje od referentne vrijednosti je kod tipa perforacije 2/2 pri kutu od 0°.

Kod valovitoga kartona kvalitete 177L najniže vrijednosti su također kod kuta od 90° za sve tipove perforacije, a vrijednost kuta od 0° nije najviša jedino kod tipa perforacije 2/2 (Slika 4.12.).

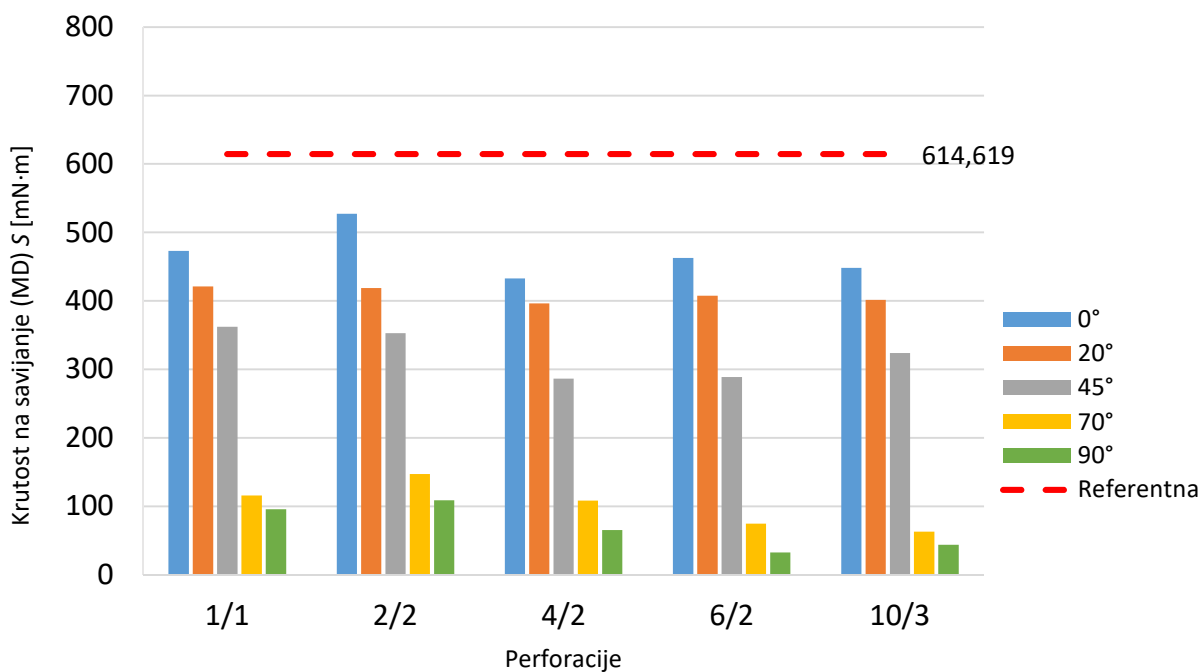


Slika 4.9. Otpornost na savijanje (MD) valovitoga kartona kvaliteta 111 ovisno o tipu perforacije i kutu pozicioniranja perforacije te usporedba s neperforiranim uzorkom iste kvalitete

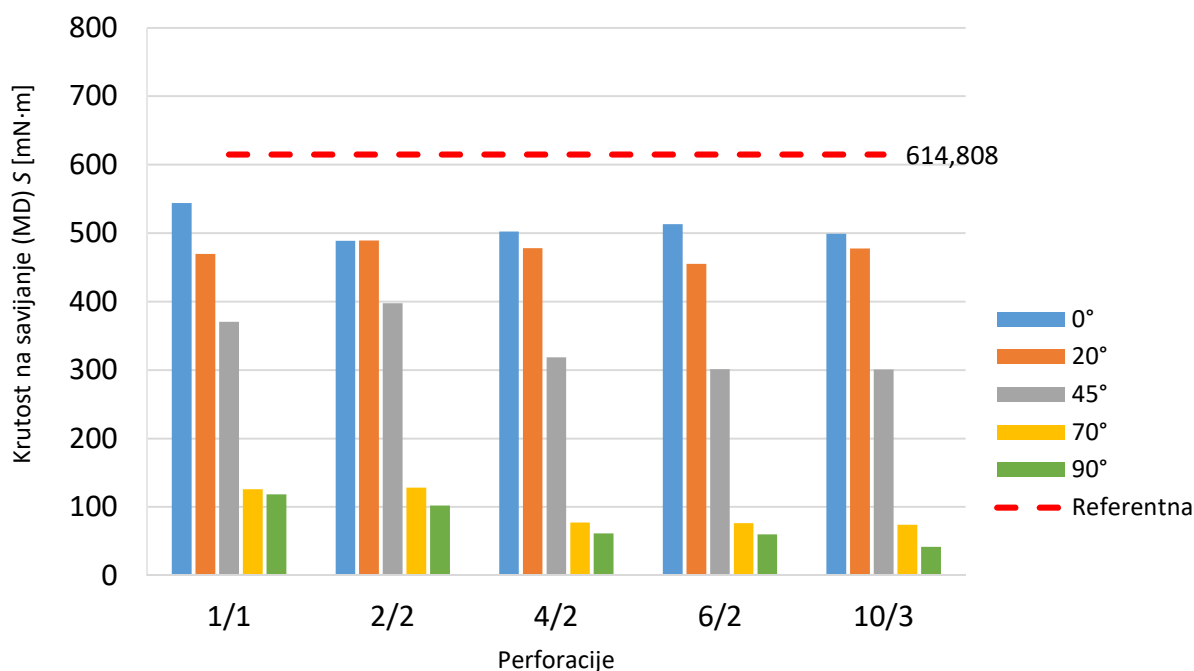
Izmjerene vrijednosti otpornosti na savijanje kod svih kvaliteta valovitoga kartona pokazuju očit opći trend: vrijednosti se smanjuju s povećanjem kuta za sve tipove perforacije i vrste kvalitete.



Slika 4.10. Otpornost na savijanje (MD) valovitoga kartona kvaliteta 131 ovisno o tipu perforacije i kutu pozicioniranja perforacije te usporedba s neperforiranim uzorkom iste kvalitete



Slika 4.11. Otpornost na savijanje (MD) valovitoga kartona kvaliteta 177 ovisno o tipu perforacije i kutu pozicioniranja perforacije te usporedba s neperforiranim uzorkom iste kvalitete



Slika 4.12. Otpornost na savijanje (MD) valovitoga kartona kvaliteta 177L ovisno o tipu perforacije i kutu pozicioniranja perforacije te usporedba s neperforiranim uzorkom iste kvalitete

#### 4.1.4. Određivanje krutosti perforiranoga valovitoga kartona u smjeru CD

Maksimalna dozvoljena deformacija ( $d_a$ ) kod otpornosti na savijanje objašnjena je u Poglavlju 3.3, a izračunata u prijašnjem poglavlju 4.1.3. Rezultati otpornosti na savijanje u tri točke izračunavaju se iz sile savijanja ( $F$ ), koja je dobivena mjerenjem uzoraka na uređaju, te izračunatoj maksimalnoj dozvoljenoj deformaciji prema standardu ISO 5628:2019 [92]. Izračunate vrijednosti otpornosti na savijanje za sve kvalitete valovitoga kartona u smjeru obrnutom od pružanja vala (CD) bez perforacije i za iste kvalitete u istom smjeru sa svih pet tipova perforacija pozicioniranih na pet definiranih kutova prikazani su u Tablici 4.7. Opširni prikaz rezultata sila savijanje ( $F$ ) neperforiranoga i perforiranoga valovitoga kartona te pripadajuće standardne devijacije za pojedinu kvalitetu valovitoga kartona ovisno o tipu perforacije te kutu pozicioniranja iste prikazane su u Prilogu 4. (Tablice P4.13.-P4.16.).

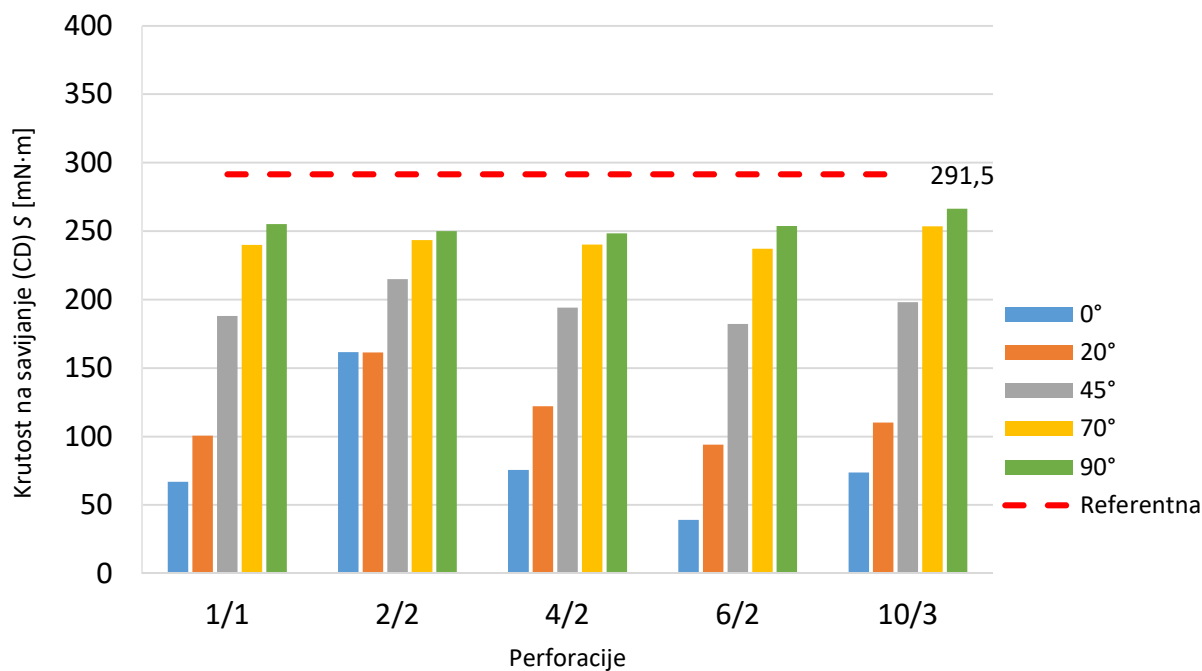
Na Slici 4.13. vidljiva je raspodjela rezultata mjerenja za valoviti karton kvalitete 111. Najniže vrijednosti su za kut od  $0^\circ$ , dok su najviše vrijednosti za kut od  $90^\circ$  kod svih tipova perforacija. Ista distribucija rezultata otpornosti na savijanje (CD) vidljiva je i kod ostalih kvaliteta valovitoga kartona. Na Slici 4.14. prikazani su rezultati mjerenja za kvalitetu 131, na Slici 4.15. rezultati za kvalitetu 177 te na Slici 4.16. za kvalitetu 177L. Prikazani podaci pokazuju očite

trendove povećanja vrijednosti s povećanjem kuta na svim tipovima perforacije te kvaliteti valovitoga kartona. Odstupanja od referentnih vrijednosti najmanje je kod kutova od 70° i 90°.

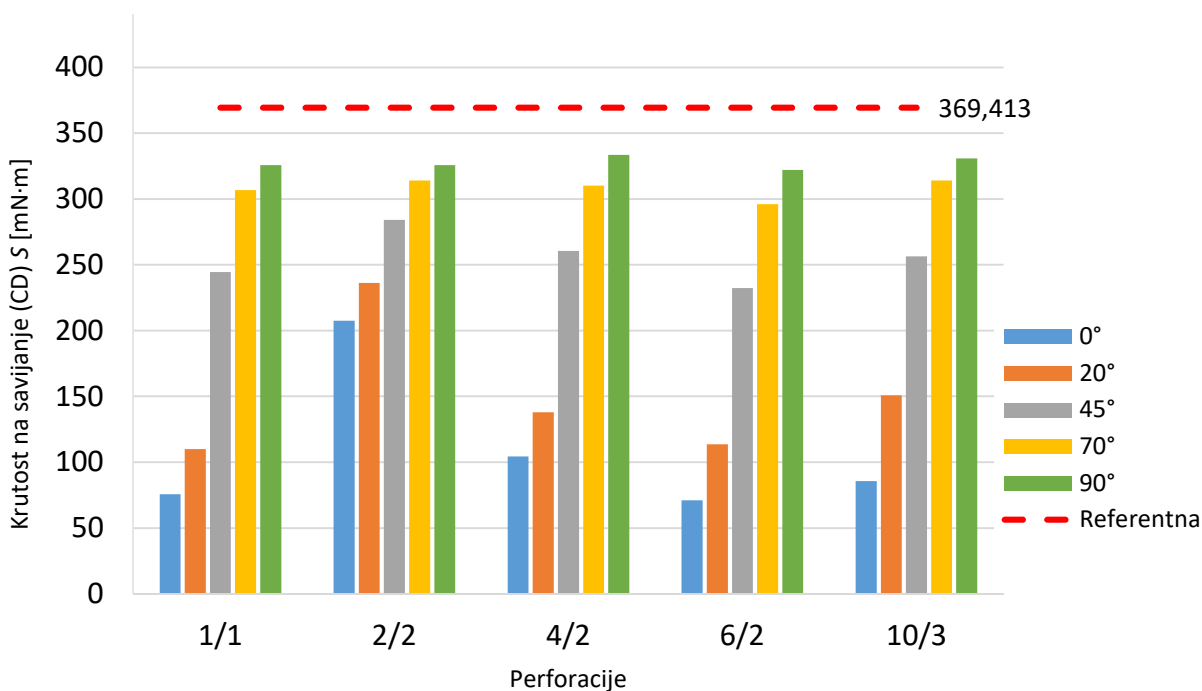
Poznato je da valoviti karton ima veću otpornost na savijanje u smjeru MD, što rezultati ispitivanja pokazuju [53].

Tablica 4.6. Otpornost na savijanje ( $S$ ) perforiranoga i neperforiranoga valovitoga kartona kvalitete 111, 131, 177 i 17L u smjeru okomitom na smjer pružanja vala (CD)

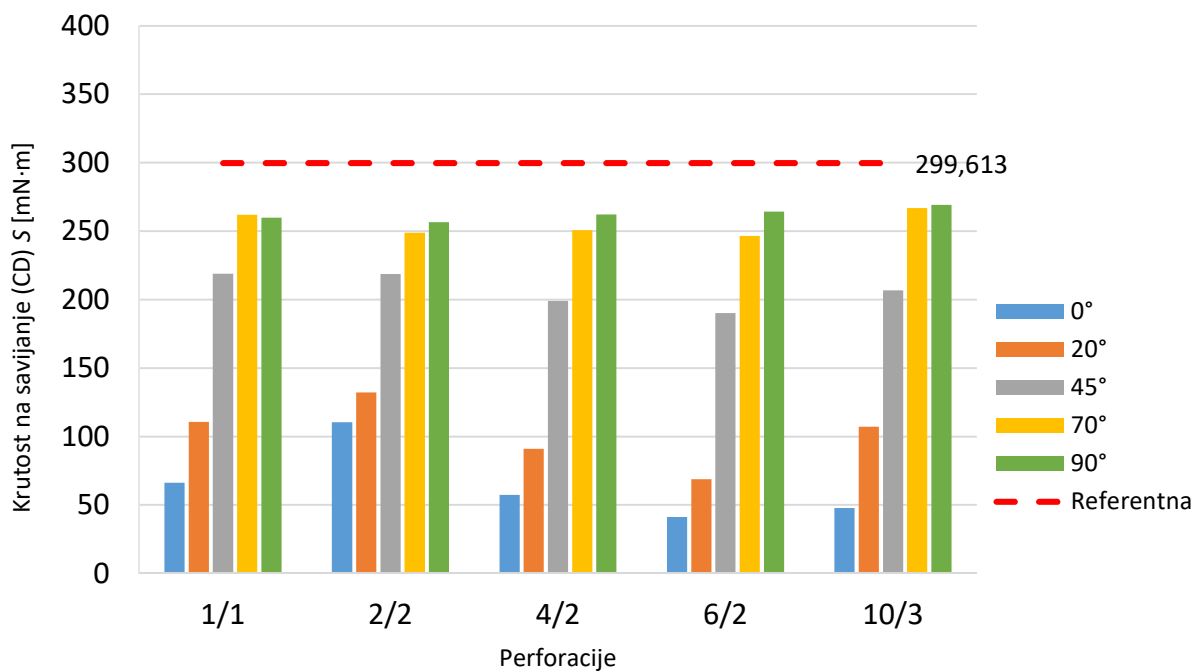
PERFORACIJA		1/1		2/2		4/2		6/2		10/3	
KV.	KUT	$S$ [mN·m]	$\sigma$	$S$ [mN·m]	$\sigma$	$S$ [mN·m]	$\sigma$	$S$ [mN·m]	$\sigma$	$S$ [mN·m]	$\sigma$
<b>111</b>	<b>REF</b>	291,500	16,983	291,500	16,983	291,500	16,983	291,500	16,983	291,500	16,983
	<b>0°</b>	66,932	18,750	161,612	19,372	75,622	18,773	38,995	8,863	73,624	29,960
	<b>20°</b>	100,555	11,784	161,390	17,598	122,126	17,223	94,146	20,031	110,130	12,874
	<b>45°</b>	187,966	9,286	214,997	9,895	194,231	8,792	182,252	14,991	198,081	17,812
	<b>70°</b>	239,938	9,538	243,390	7,390	240,165	10,549	237,216	8,411	253,504	15,263
	<b>90°</b>	255,130	11,650	250,128	5,782	248,329	10,275	253,712	10,650	266,457	14,694
<b>131</b>	<b>REF</b>	369,413	11,390	369,413	11,390	369,413	11,390	369,413	11,390	369,413	11,390
	<b>0°</b>	75,742	10,314	207,531	20,218	104,368	18,468	71,145	18,788	85,702	24,034
	<b>20°</b>	110,080	15,991	236,316	25,557	138,029	28,941	113,679	18,441	150,872	20,843
	<b>45°</b>	244,434	14,613	284,009	6,060	260,561	11,595	232,198	19,445	256,438	12,770
	<b>70°</b>	306,663	9,688	313,986	9,271	310,143	8,988	295,924	10,906	313,919	21,203
	<b>90°</b>	325,735	14,245	325,792	12,084	333,619	13,865	322,083	7,126	330,855	14,068
<b>177</b>	<b>REF</b>	299,613	10,152	299,613	10,152	299,613	10,152	299,613	10,152	299,613	10,152
	<b>0°</b>	66,196	15,233	110,446	23,810	57,243	11,756	41,252	7,618	47,791	11,683
	<b>20°</b>	110,779	8,200	132,213	18,683	91,033	11,125	68,895	7,860	107,106	14,549
	<b>45°</b>	218,846	4,574	218,806	11,081	198,977	11,848	190,157	17,016	206,705	17,316
	<b>70°</b>	261,975	8,251	248,927	8,870	250,785	10,751	246,482	9,356	266,953	9,052
	<b>90°</b>	259,806	7,465	256,497	11,798	262,264	14,410	264,328	6,352	269,289	12,701
<b>177L</b>	<b>REF</b>	391,664	20,356	391,664	20,356	391,664	20,356	391,664	20,356	391,664	20,356
	<b>0°</b>	79,529	12,015	128,204	25,513	64,134	12,740	51,915	10,139	61,525	12,217
	<b>20°</b>	119,413	16,306	160,320	22,244	111,739	12,773	81,492	14,337	108,583	7,995
	<b>45°</b>	232,763	11,126	247,661	9,256	219,572	8,848	205,689	9,944	224,340	10,152
	<b>70°</b>	291,592	11,523	299,604	12,707	292,270	6,419	290,610	7,338	295,938	21,330
	<b>90°</b>	314,244	14,487	323,420	10,164	311,722	14,071	307,167	10,882	317,080	8,720



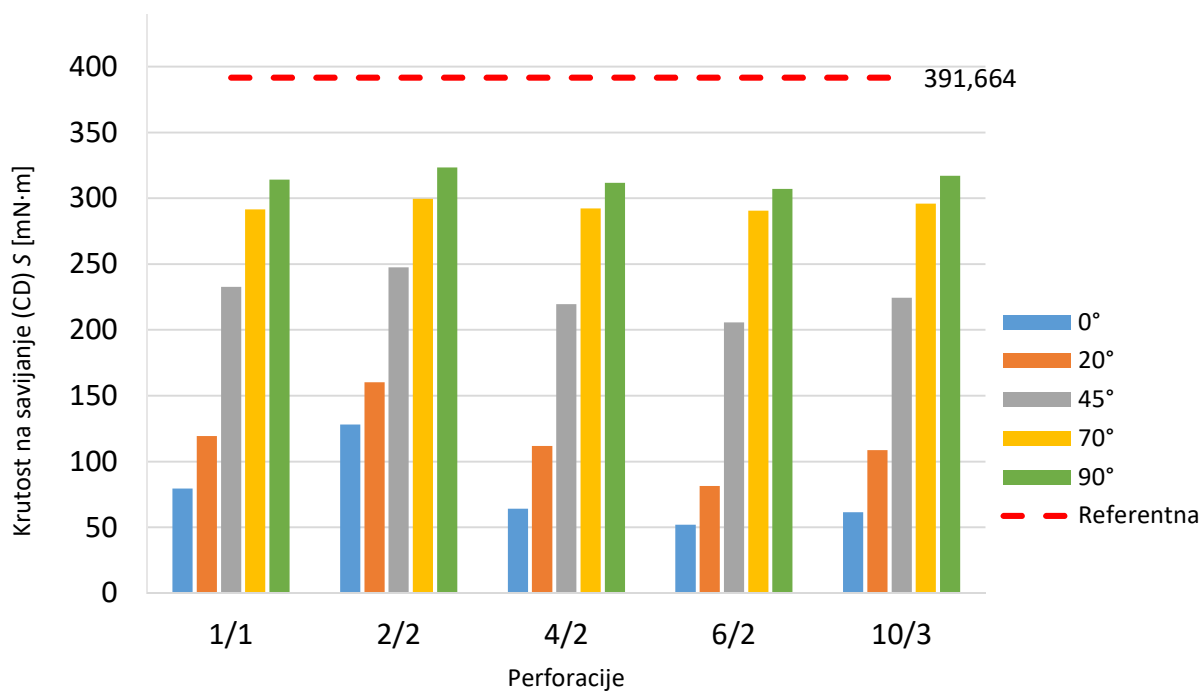
Slika 4.13. Otpornost na savijanje (CD) valovitoga kartona kvaliteta 111 ovisno o tipu perforacije i kutu pozicioniranja perforacije te usporedba s neperforiranim uzorkom iste kvalitete



Slika 4.14. Otpornost na savijanje (CD) valovitoga kartona kvaliteta 131 ovisno o tipu perforacije i kutu pozicioniranja perforacije te usporedba s neperforiranim uzorkom iste kvalitete



Slika 4.15. Otpornost na savijanje (CD) valovitoga kartona kvaliteta 177 ovisno o tipu perforacije i kutu pozicioniranja perforacije te usporedba s neperforiranim uzorkom iste kvalitete



Slika 4.16. Otpornost na savijanje (CD) valovitoga kartona kvaliteta 177L ovisno o tipu perforacije i kutu pozicioniranja perforacije te usporedba s neperforiranim uzorkom iste kvalitete

#### 4.1.5. Određivanje vlačne čvrstoće u ravnini

Za određivanje vlačne čvrstoće koristi se uređaj kidalica. Izmjerene vrijednosti označavaju prekidnu silu ( $\bar{F}$ ) iz koje se izračunava prekidna jakost ( $S$ ). S obzirom na to da se kvalitete valovitoga kartona razlikuju u gramaturi, neophodno je iz prekidne jakosti izračunati i indeks kidanja ( $I$ ) kako bi se rezultati mogli međusobno uspoređivati. Izračunate vrijednosti indeksa kidanja prikazane su u Tablici 4.8. za sve tipove perforacije ovisno o kutu pozicioniranja, a tablica je podijeljena prema kvalitetama valovitoga kartona. Opširni prikaz rezultata prekidne sile ( $\bar{F}$ ) i prekidne jakosti ( $S$ ) perforiranoga valovitoga kartona te pripadajuće standardne devijacije za pojedinu kvalitetu valovitoga kartona ovisno o tipu perforacije te kutu pozicioniranja iste prikazane su u Prilogu 4. (Tablice P4.17.-P4.20.). Kalkulacija standardne devijacije nije preporučena kod indeksa kidanja prema standardu ISO 1924-2:2008 [95].

Najniže vrijednosti indeksa kidanja u ravnini za uzorke valovitoga kartona kvalitete 111 grafički prikazanim na Slici 4.17. imaju kutovi od  $0^\circ$  i  $20^\circ$  kod svih tipova perforacije. Razlika u izmjerenim vrijednostima za ta dva kuta kod svih tipova perforacija je vrlo mala. Maksimalne vrijednosti izmjerene su kod tipova perforacija 4/2, 6/2 i 10/3 za kut od  $70^\circ$  dok kod tipa perforacije 1/1 i 2/2 za kut od  $90^\circ$ . Kod tipa perforacije 6/2 izmjerene su najniže vrijednosti za sve kutove osim za kut od  $70^\circ$ , čija se najniža vrijednost nalazi kod tipa perforacije 10/3.

Kod uzoraka valovitoga kartona kvalitete 131, izmjerene vrijednosti su i dalje najniže kod kutova  $0^\circ$  i  $20^\circ$  u svim skupinama tipova perforacija (Slika 4.18.), dok su vrijednosti indeksa kidanja u ravnini po svim skupinama tipova perforacija za kutove od  $70^\circ$  i  $90^\circ$  znatno veće. Najviše vrijednosti za kutove od  $45^\circ$ ,  $70^\circ$  i  $90^\circ$  izmjerene su kod tipa perforacije 1/1, dok su najniže vrijednosti izmjerene kod tipa perforacije 6/2 za sve definirane kutove, osim kuta od  $20^\circ$  čija se najniža vrijednost nalazi kod tipa perforacije 10/3.

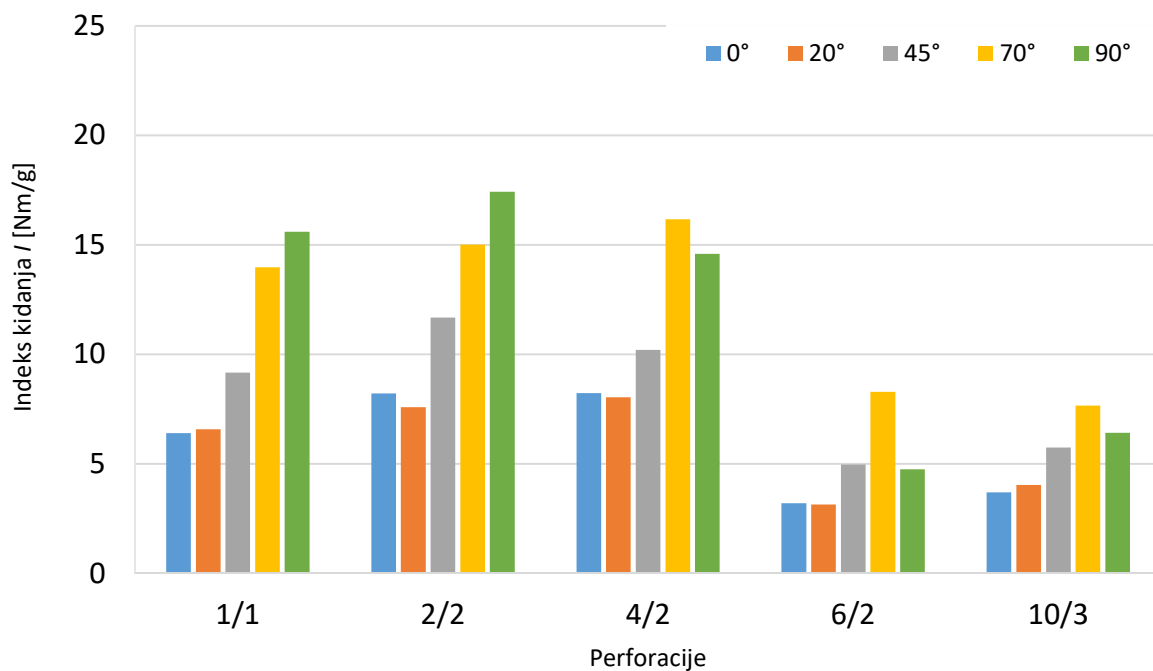
Rezultati mjerenja indeksa kidanja u ravnini za valoviti karton kvalitete 177 prikazani su na Slici 4.19. Vidljivo je da su izmjerene vrijednosti i dalje najniže kod kutova  $0^\circ$  i  $20^\circ$  za sve tipove perforacija. Razlika u izmjerenim vrijednostima za ta dva kuta je i dalje neznatna kod svih tipova perforacija. Najviše izmjerene vrijednosti nalaze se kod kuta od  $70^\circ$  kod svih tipova perforacija, osim kod tipa perforacije 2/2 (najviša izmjerena vrijednost mu je kod kuta od  $90^\circ$ ). Kao i kod valovitoga kartona kvalitete 133, maksimalne vrijednosti indeksa kidanja za kutove od  $45^\circ$ ,  $70^\circ$  i  $90^\circ$  su kod tipa perforacije 1/1, dok su sveukupno najniže vrijednosti izmjerene kod tipa perforacije 6/2 za sve definirane kutove.



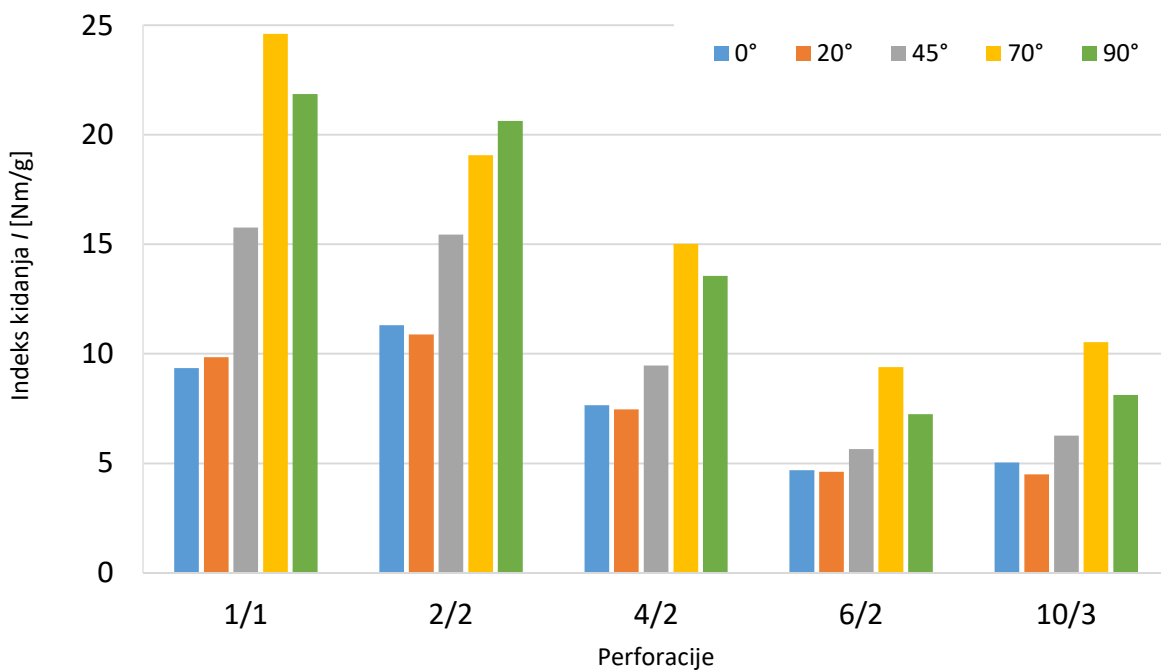
Na Slici 4.20. prikazani su rezultati indeksa kidanja u ravnini za valoviti karton kvalitete 177L. Najniže izmjerene vrijednosti su i dalje za kutove od 0° i 20° kod svih tipova perforacija i razlika u vrijednostima između ta dva kuta i dalje je mala. Maksimalna vrijednost indeksa kidanja je kod kuta od 90° kod tipa perforacije 2/2, dok se maksimalne vrijednosti za kutove od 45° i 70° nalaze kod tipa perforacije 1/1. Tip perforacije 6/2 ima najniže izmjerene vrijednosti za sve kutove osim za kut 70°, čija se najniža izmjerena vrijednost nalazi kod tipa perforacije 10/3.

Tablica 4.7 Indeks kidanja (*I*) perforiranoga valovitoga kartona kvalitete 111, 131, 177, 177L mjenog u ravnini

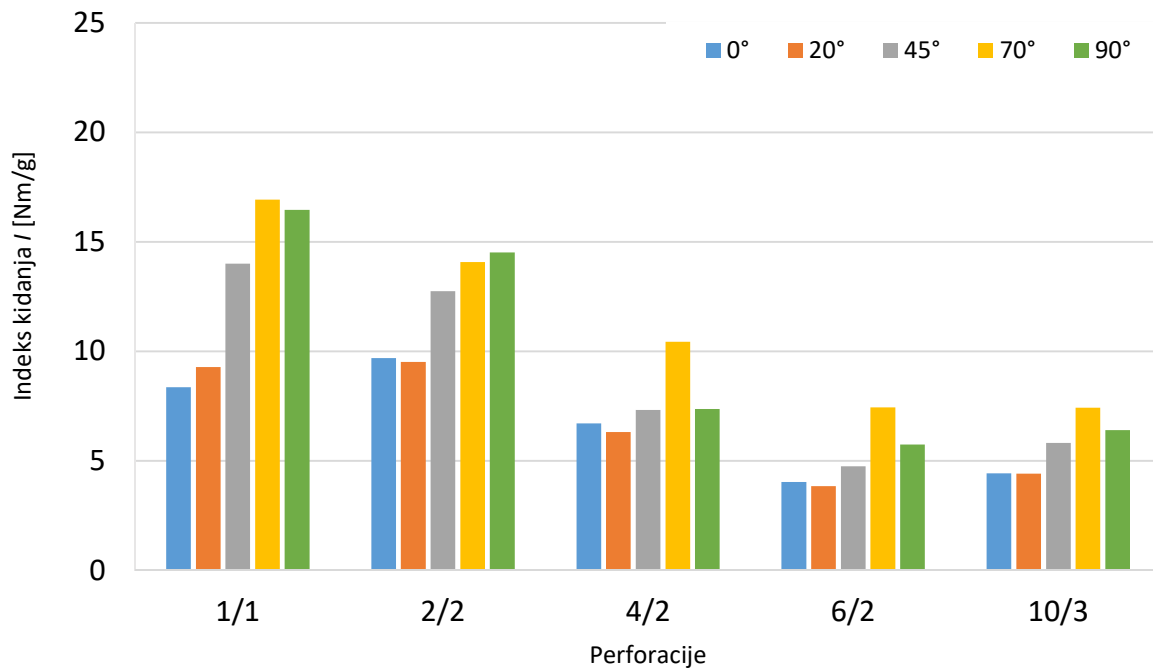
PERFORACIJA		1/1	2/2	4/2	6/2	10/3
KVALITETA	KUT	<i>I</i> [Nm/g]	<i>I</i> [Nm/g]	<i>I</i> [Nm/g]	<i>I</i> [Nm/g]	<i>I</i> [Nm/g]
<b>111</b>	<b>0°</b>	6,402	8,213	8,237	3,211	3,696
	<b>20°</b>	6,582	7,595	8,037	3,141	4,043
	<b>45°</b>	9,162	11,680	10,198	4,967	5,752
	<b>70°</b>	13,976	15,017	16,172	8,295	7,659
	<b>90°</b>	15,604	17,418	14,592	4,748	6,425
<b>131</b>	<b>0°</b>	9,354	11,303	7,651	4,681	5,037
	<b>20°</b>	9,853	10,882	7,465	4,615	4,500
	<b>45°</b>	15,761	15,443	9,472	5,647	6,271
	<b>70°</b>	24,603	19,065	15,021	9,399	10,533
	<b>90°</b>	21,864	20,625	13,554	7,238	8,121
<b>177</b>	<b>0°</b>	8,359	9,695	6,715	4,044	4,436
	<b>20°</b>	9,280	9,513	6,319	3,848	4,413
	<b>45°</b>	13,999	12,750	7,328	4,747	5,818
	<b>70°</b>	16,933	14,078	10,443	7,436	7,430
	<b>90°</b>	16,455	14,515	7,369	5,749	6,401
<b>177L</b>	<b>0°</b>	6,930	8,848	6,281	3,699	4,089
	<b>20°</b>	7,724	8,840	6,023	3,525	3,739
	<b>45°</b>	12,470	12,225	6,705	3,620	4,893
	<b>70°</b>	16,798	12,993	11,727	6,775	5,872
	<b>90°</b>	17,393	17,604	8,921	5,637	6,621



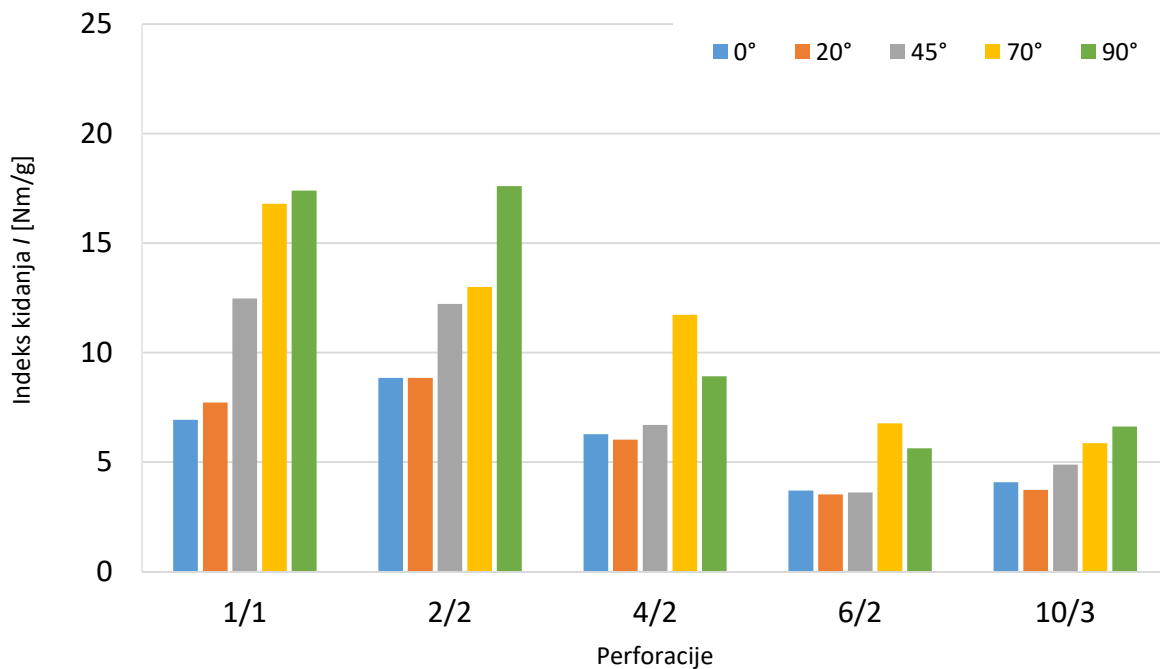
Slika 4.17. Indeks kidanja perforiranoga valovitoga kartona kvalitete 111 u ravni ovisno o tipu perforacije i kutu pozicioniranja perforacije



Slika 4.18. Indeks kidanja perforiranoga valovitoga kartona kvalitete 131 u ravni ovisno o tipu perforacije i kutu pozicioniranja perforacije



Slika 4.19. Indeks kidanja perforiranoga valovitoga kartona kvalitete 177 u ravnini ovisno o tipu perforacije i kutu pozicioniranja perforacije



Slika 4.20. Indeks kidanja perforiranoga valovitoga kartona kvalitete 177L u ravnini ovisno o tipu perforacije i kutu pozicioniranja perforacije

#### 4.1.6. Određivanje vlačne čvrstoće van ravnine

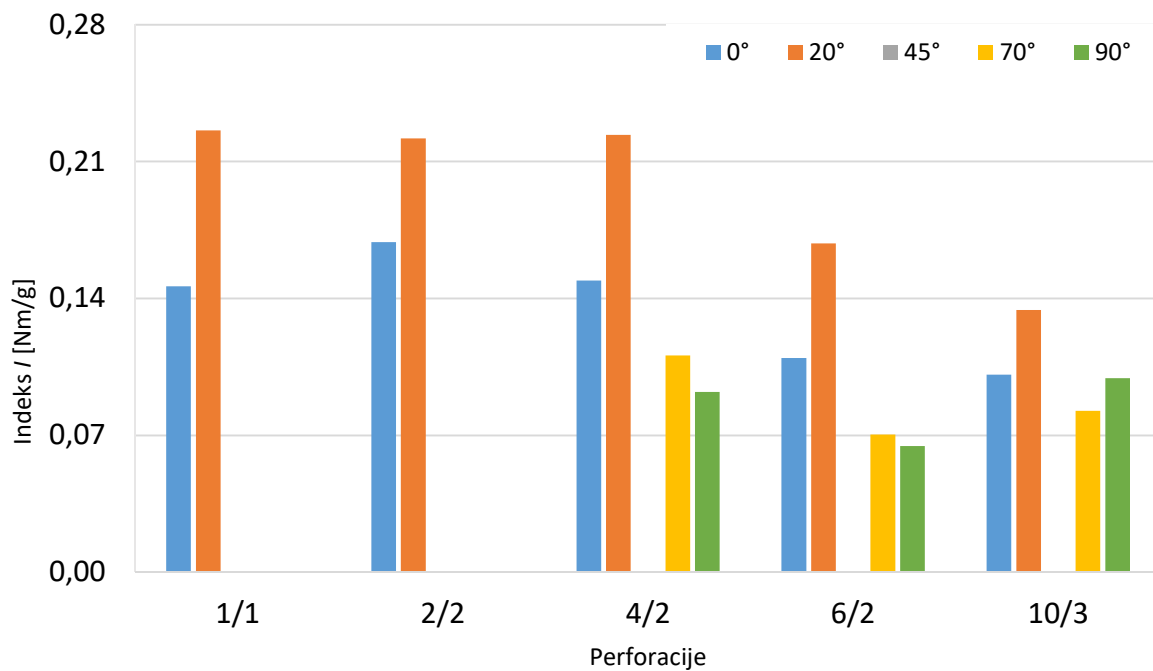
Vlačna čvrstoća mjerena je i van ravnine. Opširni prikaz rezultata prekidne sile ( $\bar{F}$ ) i prekidne jakosti ( $S$ ) perforiranoga valovitoga kartona te pripadajuće standardne devijacije za pojedinu kvalitetu valovitoga kartona ovisno o tipu perforacije te kutu pozicioniranja iste prikazane su u Prilogu 4. (Tablice P4.21.-P4.24.). Kako je spomenuto u ranijem poglavlju, kalkulacija standardne devijacije nije preporučena kod indeksa kidanja prema standardu ISO 1924-2:2008 [95].

Iz Tablice 4.9. vidljivo je da nedostaje priličan broj rezultata. 24 uzorka nisu evidentirana jer se uzorak nije mogao razdvajati po perforaciji, već je pucao van predviđene linije na svih 10 ponavljanja za svaki od 24 kombinacije.

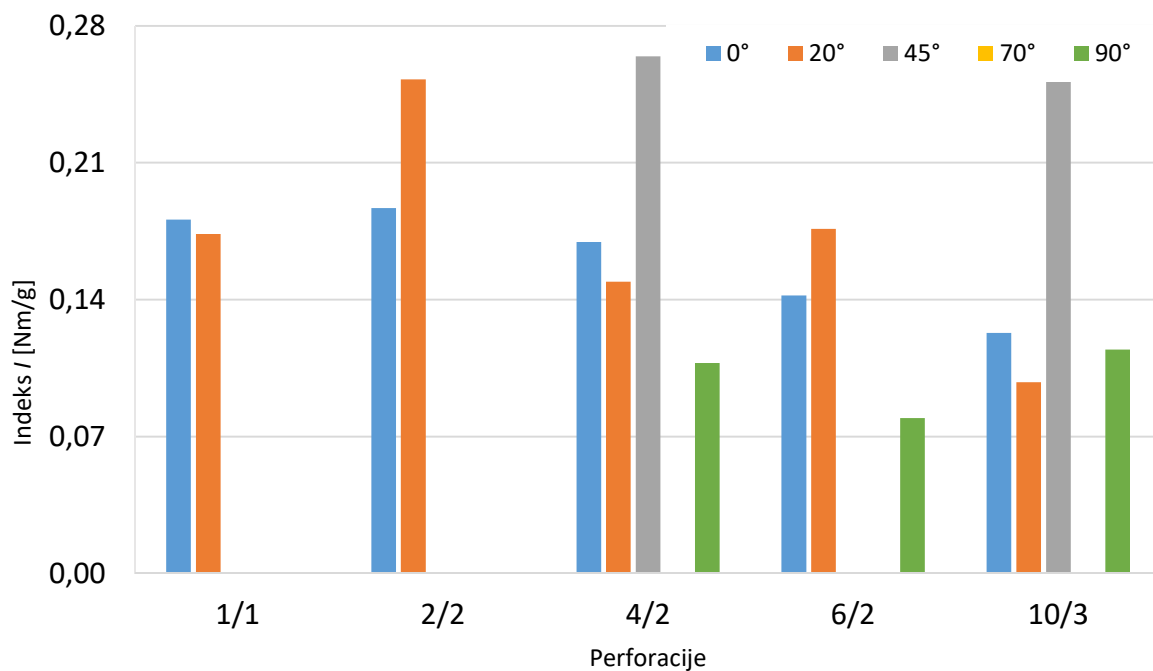
Tablica 4.8. Indeks kidanja ( $I$ ) perforiranoga valovitoga kartona kvalitete 111, 131, 177, 177L mjenog van ravnine

PERFORACIJA		1/1	2/2	4/2	6/2	10/3
KVALITETA	KUT	$I$ [Nm/g]	$I$ [Nm/g]	$I$ [Nm/g]	$I$ [Nm/g]	$I$ [Nm/g]
<b>111</b>	<b>0°</b>	0,146	0,169	0,149	0,110	0,101
	<b>20°</b>	0,226	0,222	0,224	0,168	0,134
	<b>45°</b>					
	<b>70°</b>			0,111	0,070	0,083
	<b>90°</b>			0,092	0,064	0,099
<b>131</b>	<b>0°</b>	0,181	0,187	0,169	0,142	0,123
	<b>20°</b>	0,174	0,253	0,149	0,176	0,098
	<b>45°</b>			0,264		0,262
	<b>70°</b>					
	<b>90°</b>			0,108	0,079	0,114
<b>177</b>	<b>0°</b>	0,171	0,153	0,122	0,106	0,107
	<b>20°</b>	0,203	0,202	0,173	0,171	0,158
	<b>45°</b>				0,172	0,175
	<b>70°</b>	0,153	0,135	0,085	0,069	0,087
	<b>90°</b>	0,099	0,082	0,075	0,063	0,067
<b>177L</b>	<b>0°</b>	0,136	0,165	0,126	0,121	0,124
	<b>20°</b>	0,144	0,151	0,109	0,121	0,070
	<b>45°</b>	0,161	0,209	0,117	0,077	0,093
	<b>70°</b>			0,111	0,063	0,083
	<b>90°</b>	0,119	0,119	0,057	0,062	0,059

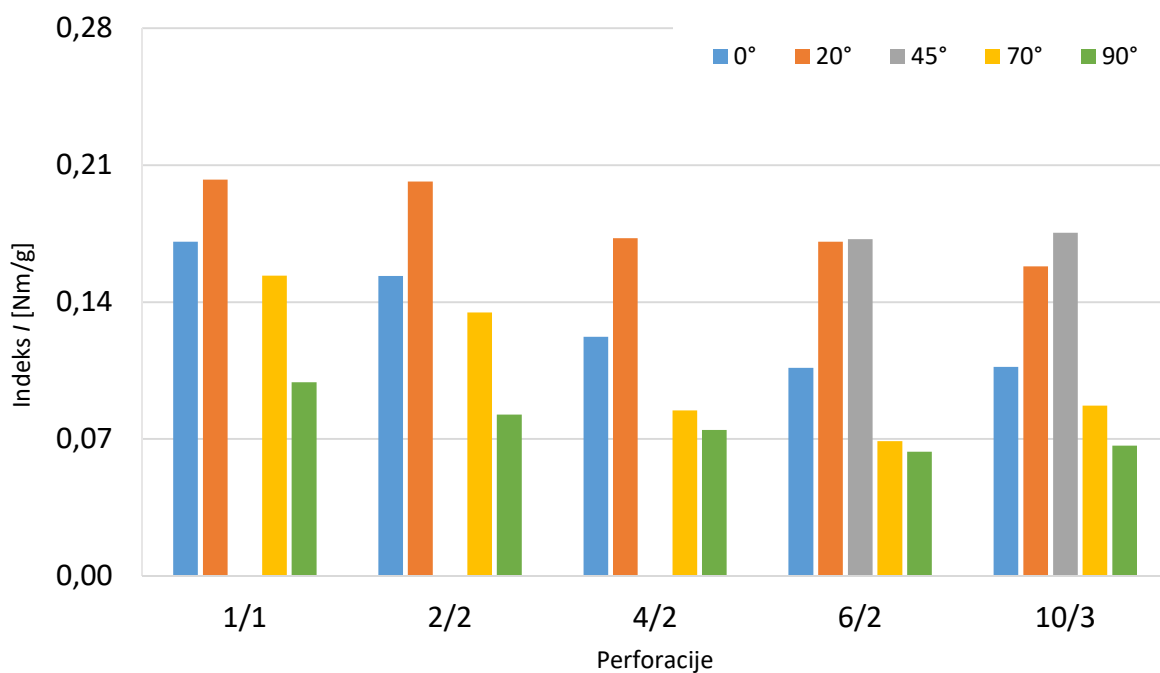
Svaki mjereni kut ima 20 kombinacija s obzirom na tip perforacije i kvalitetu valovitoga kartona. Prema podacima iz Tablice 4.9 najkritičniji je kut od 45° s 11 neuspjelih kombinacija što je 55% uništenih uzoraka. Zatim slijede uzorci za kut od 70° s 9 neuspjelih kombinacija što je 45% uništenih uzoraka, te uzorci za kut od 90° s 4 neuspjele kombinacije što je 20% uništenih uzoraka za spomenuti kut. Kod valovitoga kartona kvalitete 111 nedostaje 9 mjerenja (Slika 4.21.), kod kvalitete 131 nedostaje 10 mjerenja (Slika 4.22.), kod kvalitete 177 nedostaje 3 mjerenja (Slika 4.23.), dok kod kvalitete 177L nedostaju 2 mjerenja (Slika 4.24.).



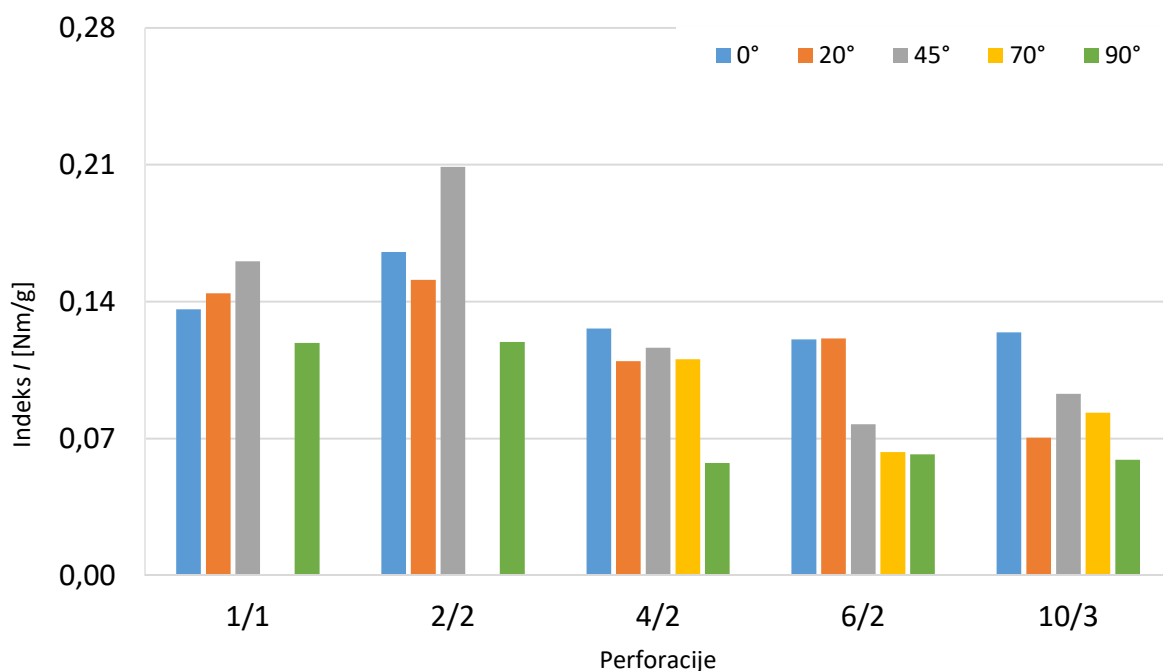
Slika 4.21. Indeks kidanja perforiranoga valovitoga kartona kvalitete 111 van ravnine ovisno o tipu perforacije i kutu pozicioniranja perforacije



Slika 4.22. Indeks kidanja perforiranoga valovitoga kartona kvalitete 131 van ravnine ovisno o tipu perforacije i kutu pozicioniranja perforacije



Slika 4.23. Indeks kidanja perforiranoga valovitoga kartona kvalitete 177 van ravnine ovisno o tipu perforacije i kutu pozicioniranja perforacije



Slika 4.24. Indeks kidanja perforiranoga valovitoga kartona kvalitete 177L van ravnine ovisno o tipu perforacije i kutu pozicioniranja perforacije

#### 4.1.7. Određivanje otpornosti prema cijepanju

Rezultati mjerenja Elmendorf metode predstavljaju silu potrebnu za cijepanje uzoraka koja se poistovjećuje s otpornošću materijala prema cijepanju ( $F$ ). Izmjerene vrijednosti izražene su u obliku indeksa cijepanja ( $X$ ) čime se omogućuje uspoređivanje rezultata uzoraka valovitoga kartona različitih gramatura. U Tablici 4.9. prikazani su rezultati indeksa cijepanja podijeljeni prema kvaliteti valovitoga kartona za sve tipove perforacije pri svim definiranim kutovima. Opširni prikaz rezultata otpornosti prema cijepanju ( $F$ ) perforiranoga valovitoga kartona te pripadajuće standardne devijacije za pojedinu kvalitetu valovitoga kartona ovisno o tipu perforacije te kutu pozicioniranja iste prikazane su u Prilogu 4. (Tablice P4.25.-P4.28.).

Slika 4.21. prikazuje rezultate mjerenja indeksa cijepanja za valoviti karton kvalitete 111. Najniže izmjerene vrijednosti nalaze se kod kutova od  $0^\circ$  (za tipove perforacija 1/1, 6/2 i 10/3) ili  $20^\circ$  (za tipove perforacija 2/2 i 4/2), dok su najviše izmjerene vrijednosti kod kutova od  $70^\circ$  (za tipove perforacija 1/1, 4/2 i 10/3) ili  $90^\circ$  (za tipove perforacija 2/2 i 6/2). Maksimalna izmjerena vrijednost je zabilježena kod tipa perforacije 2/2 za kut od  $90^\circ$ . Maksimalne vrijednosti za kutove od  $45^\circ$  i  $70^\circ$  također se nalaze kod tipa perforacije 2/2.

Rezultati mjerenja indeksa cijepanja za valoviti karton kvalitete 133 grafički su prikazani na Slici 4.22. Najniže vrijednosti izmjerene su kod svih tipova perforacija za kut od 0°, dok su najviše vrijednosti izmjerene za kut od 70° za sve tipove perforacija osim tipa perforacije 10/3 (najviša vrijednost izmjerena je za kut od 90°). Maksimalne vrijednosti za kutove 70° i 90° izmjerene su kod tipa perforacije 1/1.\*, dok je vrijednost kuta od 45° maksimalna kod tipa perforacije 2/2.

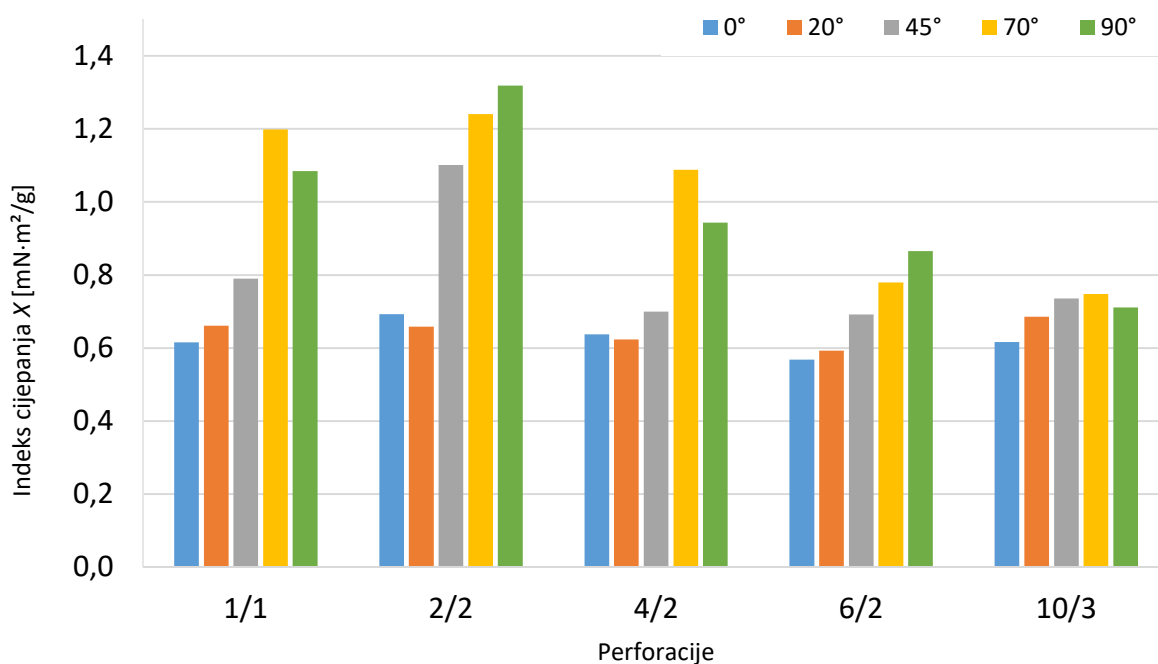
Tablica 4.9. Indeks cijepanja ( $X$ ) perforiranoga valovitoga kartona kvalitete 111, 131, 177, 177L

PERORACIJA		1/1		2/2		4/2		6/2		10/3	
KV.	KUT	$X$ [mN*m <sup>2</sup> /g]	$\sigma$	$X$ [mN*m <sup>2</sup> /g]	$\sigma$	$X$ [mN*m <sup>2</sup> /g]	$\sigma$	$X$ [mN*m <sup>2</sup> /g]	$\sigma$	$X$ [mN*m <sup>2</sup> /g]	$\sigma$
<b>111</b>	<b>0°</b>	0,616	0,040	0,693	0,105	0,637	0,029	0,568	0,165	0,617	0,021
	<b>20°</b>	0,661	0,067	0,658	0,045	0,624	0,000	0,592	0,066	0,686	0,082
	<b>45°</b>	0,790	0,082	1,102	0,125	0,700	0,027	0,692	0,053	0,736	0,077
	<b>70°</b>	1,199	0,052	1,241	0,035	1,088	0,104	0,779	0,104	0,748	0,161
	<b>90°</b>	1,085	0,129	1,318	0,091	0,943	0,165	0,865	0,153	0,711	0,060
<b>131</b>	<b>0°</b>	0,654	0,028	0,695	0,095	0,615	0,061	0,608	0,031	0,647	0,068
	<b>20°</b>	0,678	0,087	0,811	0,130	0,623	0,051	0,629	0,062	0,678	0,093
	<b>45°</b>	1,023	0,058	1,086	0,051	0,840	0,114	0,717	0,116	0,851	0,109
	<b>70°</b>	1,402	0,228	1,258	0,099	1,093	0,048	0,918	0,151	0,927	0,067
	<b>90°</b>	1,316	0,145	1,233	0,064	1,021	0,069	0,898	0,142	0,965	0,100
<b>177</b>	<b>0°</b>	0,567	0,030	0,666	0,104	0,572	0,018	0,502	0,069	0,531	0,052
	<b>20°</b>	0,744	0,126	0,970	0,146	0,611	0,047	0,572	0,018	0,524	0,066
	<b>45°</b>	1,095	0,049	1,111	0,061	0,888	0,075	0,589	0,029	0,545	0,067
	<b>70°</b>	1,221	0,086	1,150	0,047	1,077	0,040	0,758	0,100	0,521	0,045
	<b>90°</b>	1,221	0,110	1,171	0,080	1,033	0,107	0,755	0,094	0,535	0,050
<b>177L</b>	<b>0°</b>	0,738	0,096	0,874	0,102	0,505	0,035	0,537	0,040	0,464	0,026
	<b>20°</b>	0,819	0,094	0,863	0,085	0,640	0,075	0,518	0,025	0,454	0,040
	<b>45°</b>	0,972	0,028	0,962	0,033	0,850	0,066	0,537	0,035	0,474	0,024
	<b>70°</b>	1,172	0,127	1,091	0,085	0,957	0,025	0,743	0,041	0,484	0,028
	<b>90°</b>	1,070	0,109	1,015	0,041	0,957	0,057	0,700	0,069	0,493	0,043

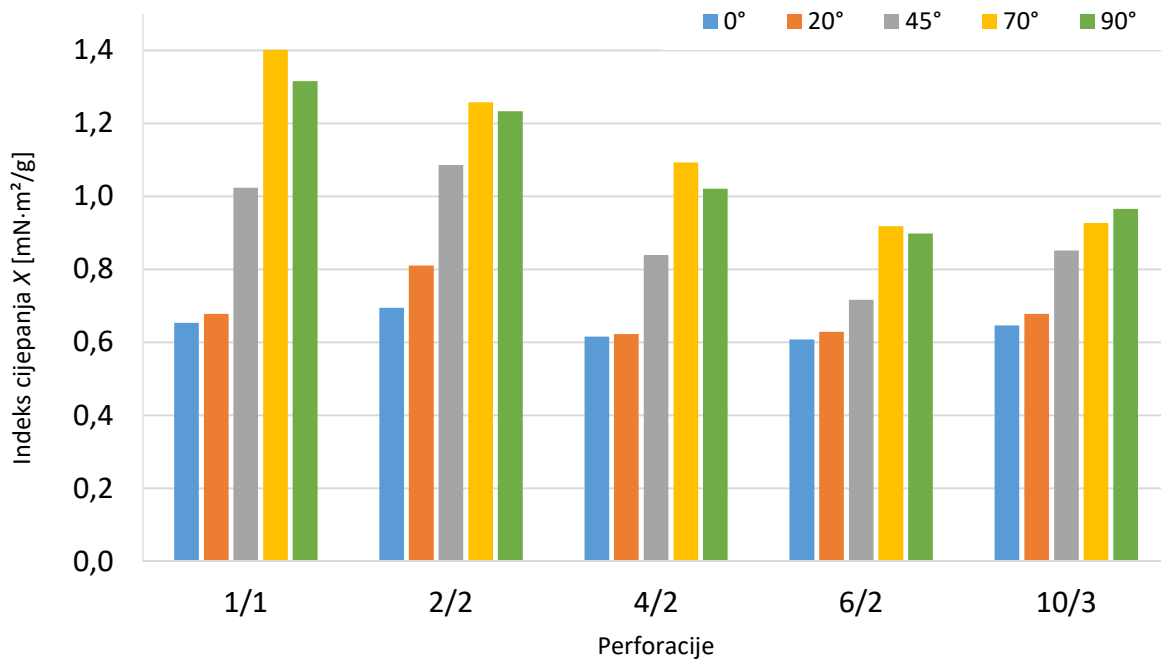


Na Slici 4.23. prikazani su rezultati mjerenja za valoviti karton kvalitete 177. Najniže izmjerene vrijednosti vidljive su za kut od 0° kod svih tipova perforacije, osim tipa perforacije 10/3, gdje je vrijednost kuta od 20° nešto niža. Najviše izmjerene vrijednosti odnose se na kutove od 70° i 90° čije su izmjerene vrijednosti gotove identične za tipove perforacija 1/1, 6/2 i 10/3. Najmanje razlike između mjerenja za pojedine kutove vidljiva je kod tipa perforacije 10/3.

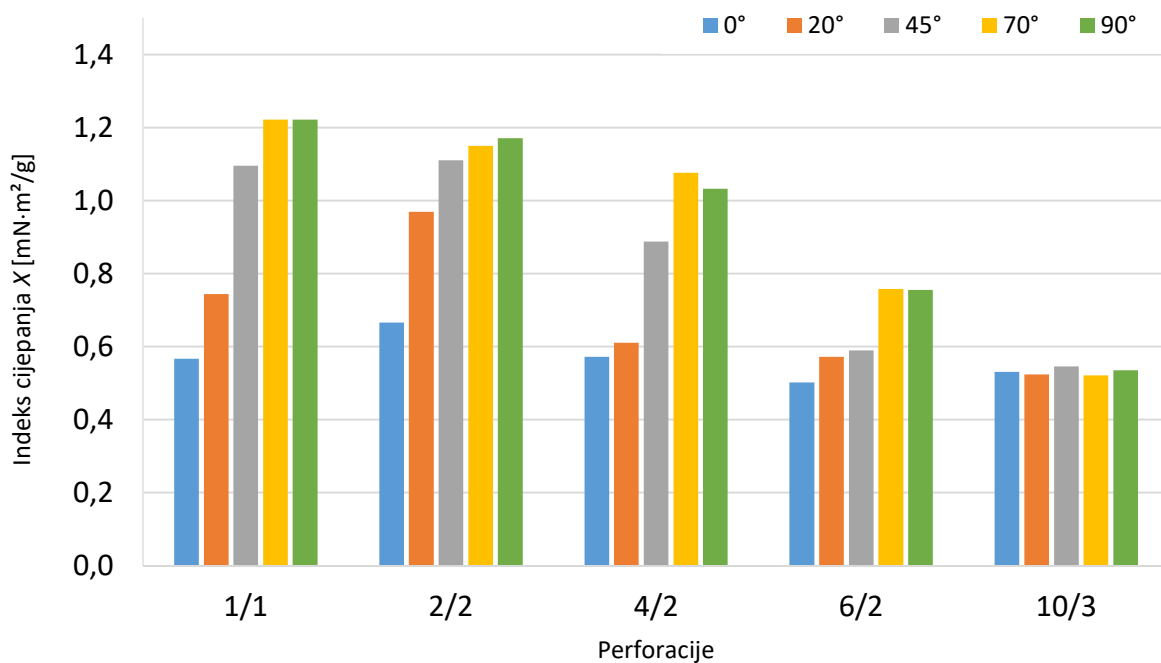
Kod valovitoga kartona kvalitete 177L najmanja razlika u izmjerenim vrijednostima za pojedine kutove također nalazi se kod tipa perforacije 10/3, a vidljivo je da vrijednosti rastu kako rastu kutovi (Slika 4.24.). Kod ostalih četiri tipa perforacije najveće izmjerene vrijednosti su za kut od 70° (maksimalna vrijednost je kod tipa perforacije 1/1), dok su najniže za kut od 0° (osim kod tipa perforacije 6/2 gdje je kut od 20° nešto niži).



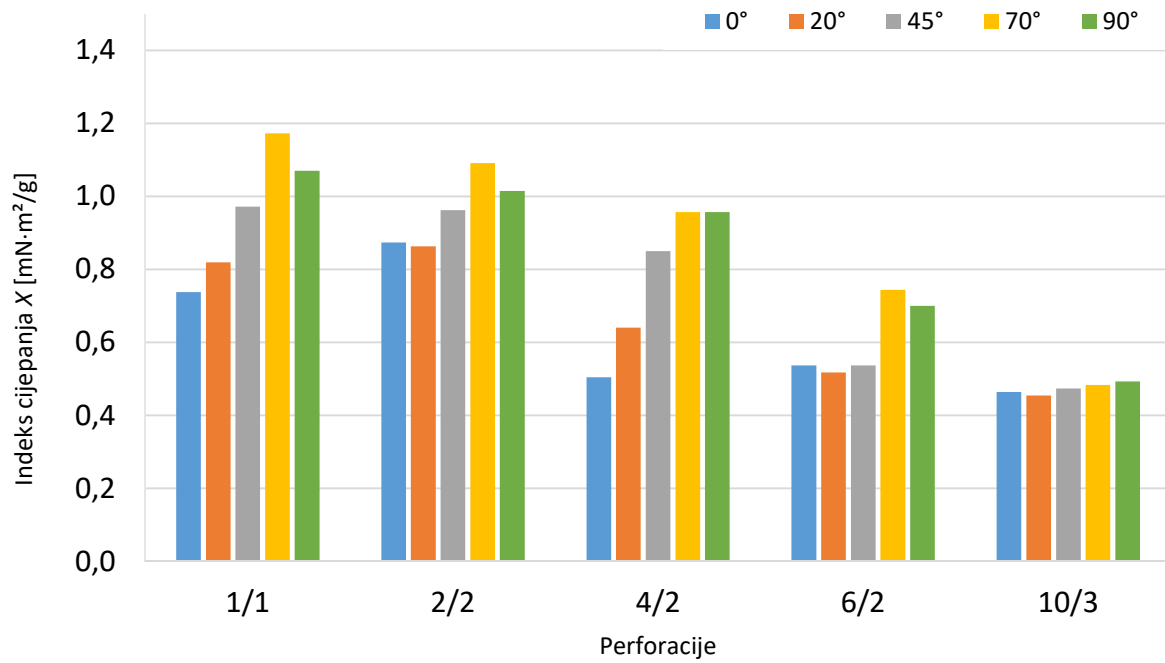
Slika 4.25. Indeks cijepanja perforiranoga valovitoga kartona kvalitete 111 ovisno o tipu perforacije i kutu pozicioniranja perforacije



Slika 4.26. Indeks cijepanja perforiranoga valovitoga kartona kvalitete 131 ovisno o tipu perforacije i kutu pozicioniranja perforacije



Slika 4.27. Indeks cijepanja perforiranoga valovitoga kartona kvalitete 177 ovisno o tipu perforacije i kutu pozicioniranja perforacije



Slika 4.28. Indeks cijepanja perforiranoga valovitoga kartona kvalitete 177L ovisno o tipu perforacije i kutu pozicioniranja perforacije

## 4.2. Rezultati statističkih analiza

U analizi podataka prikupljenih ovim istraživanjem korištene su kako je, ovisno o prirodi podataka bilo primjereno, multivarijantne metode: metode generalnih linearnih modela (GLM) ili generaliziranih linearnih modela (GzLM), o čemu je odlučeno na temelju distribucije greške:

1. Gdje je distribucija greške (netransformiranih) vrijednosti bila normalna, podaci su analizirani u generalnim linearnim modelima (GLM), a rezultirali su podešenim srednjim vrijednostima i standardnim pogreškama/granicama pouzdanosti, odnosno razlikama podešenih srednjih vrijednosti i granicama pouzdanosti.
2. Gdje je greška bila log-normalno distribuirana, izmjereni podaci su prvo ln-transformirani, te analizirani u generalnim linearnim modelima (GLM). Podešene srednje vrijednosti su eksponirane u geometrijske srednje vrijednosti (s granicama pouzdanosti), a razlike su eksponirane u omjer geometrijskih srednjih vrijednosti (GMR) s granicama pouzdanosti.
3. gdje ln-transformacija nije bila primjerena, rabljeni su generalizirani linearni modeli (GzLM) s gama distribucijom i log link funkcijom. Podešene srednje vrijednosti su eksponirane u geometrijske srednje vrijednosti i granice pouzdanosti, a razlike u omjer geometrijskih srednjih vrijednosti (GMR) s granicama pouzdanosti.

Analizom rezultata dobiveni su prvi i drugi model. Prvi model je procijenio glavne ili sveukupne efekte (engl. *main effect*):

- a) glavni efekt varijable kvalitete (podešene za varijable kut i perforacija);
- b) glavni efekt varijable perforacije (podešene za varijable kvaliteta i kut) i
- c) linearni i kvadratični efekt varijable kut.

Glavni efekt je važan jer omogućuje procjenu utjecaja određene varijable na promjenu u drugoj varijabli, bez utjecaja ostalih varijabli. Često se analizira zajedno s interakcijskim efektima, koji se odnose na utjecaj više od jedne varijable na promjenu u drugoj varijabli [110].

Stoga, drugi model je uključio interakcijski efekt (engl. *interaction effect*), dvosmjernu interakciju varijabli (kvaliteta-perforacija) i specifičnu trosmjernu interakciju varijabli (kvaliteta-perforacija-kut) kako bi se mogle kvantificirati razlike između raznih kvaliteta valovitoga kartona E vala pri specifičnim vrijednostima varijabli perforacije i kuta, odnosno kvantificirati razlike između različitih tipova perforacije pri specifičnim (određenim) vrijednostima varijabli kvalitete i kuta.

Rezultati multivarijantnih analiza kontinuiranih zavisnih varijabli izraženi su kao:  $F(df_1, df_2)$ ,  $P = Sig.$  gdje je  $df_1$  = brojnik stupnjeva slobode (engl. *numerator degrees of freedom*);  $df_2$  = nazivnik stupnjeva slobode (engl. *denominator degrees of freedom*);  $Sig.$  = razina značajnosti (engl. *significance level*). Statistički značajnom smatrana je  $P$  vrijednost manja od 5%, tj. manja od 0,05 [111].

Rezultati t-testa izraženi su kao:  $t(df)$ ,  $P = Sig.$ , MD, 95% CI gdje je  $df$  = stupanj slobode (engl. *degrees of freedom*);  $Sig.$  = razina značajnosti (engl. *significance level*); MD = razlika srednjih vrijednosti (engl. *Mean Difference*); CI = interval pouzdanosti (engl. *Confidence Interval*) [111].

Rezultati korelacijskih analiza kontinuiranih zavisnih varijabli brojčano su iskazani Pearsnovim koeficijentom korelacije  $r$ . Korelacijski koeficijent se koristi za kvantifikaciju stupnja korelacije između dvije varijable čije se vrijednosti kreću u rasponu od -1 do +1. One upućuju na intenzitet veze dviju varijabli koje su u korelaciji, pri čemu predznak koeficijenta korelacije opisuje smjer povezanosti (-1 označava potpunu negativnu korelaciju, 1 označava potpunu pozitivnu korelaciju, dok vrijednosti blizu 0 označavaju izostanak korelacije) [112].

Opće prihvaćena razina statističke značajnosti  $P < 0,05$  u vezi je s najčešće korištenim 95% intervalom pouzdanosti. Interval pouzdanosti je komplementaran statistički pokazatelj s  $P$  vrijednosti i međusobno se nadopunjuju.  $P$  vrijednost govori o vjerojatnosti s kojom je moguće da se uočeni fenomen, odnosno razlika, dogodi slučajno, dok interval pouzdanosti nudi granice unutar kojih je moguće očekivati vrijednost tog fenomena.

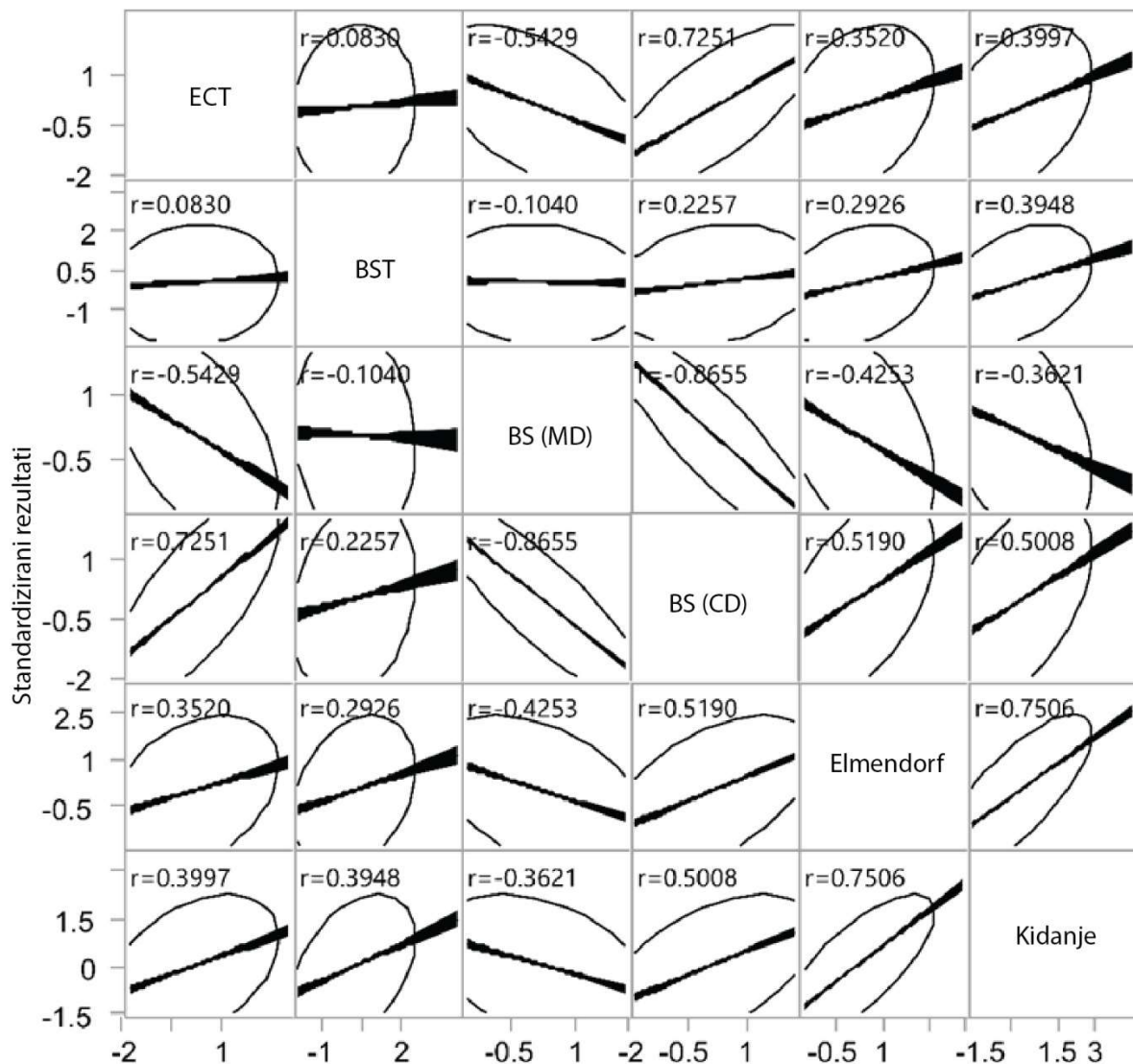
#### 4.2.1. Korelacijska analiza

Na temelju statističkih podataka analizirana je povezanost između pojedinih zavisnih varijabli, odnosno samih mjerenja. U korelacijskoj analizi nisu korišteni rezultati mjerenja prekidne čvrstoće van ravnine. Sve ostale vrijednosti su standardizirane prije analize. Time je zadovoljen uvjet homogenosti varijance te je korišten Pearsonov koeficijent korelacije.

Rezultati korelacijskih analiza prikazani su u obliku korelacijske matrice na Slici 4.29. Elipse označavaju područje najveće gustoće pojedinačnih vrijednosti, brojevi su korelacijski koeficijenti bodovne procjene, a linije su prilagođene korelacije s 95% intervalima pouzdanosti. Nagib linija označava smjer i jakost uspoređenih varijabli. Što je okomitija linija, povezanost

je jača. Pad linije u desno označava negativnu korelaciju, dok rast linije u desno označava pozitivnu korelaciju. Ravna vodoravna crta označava izostanak korelacije.

Koeficijent korelacije pokazuje u kojoj su mjeri promjene vrijednosti jedne varijable povezane s promjenama vrijednosti druge varijable. Tumačenje koeficijenata korelacije značajno se razlikuje između pojedinih područja znanstvenog istraživanja. Ne postoje apsolutna pravila za tumačenje njihove snage. Međutim sve vrijednosti preko 0,400 i sve vrijednosti preko -0,400 ukazuju na smislenu povezanost, odnosno statistički značajnu (pozitivnu ili negativnu).



Slika 4.29. Korelacijska matrica zavisnih varijabli

Kao što je prikazano na Slici 4.29. i Tablici 4.10., postoji:

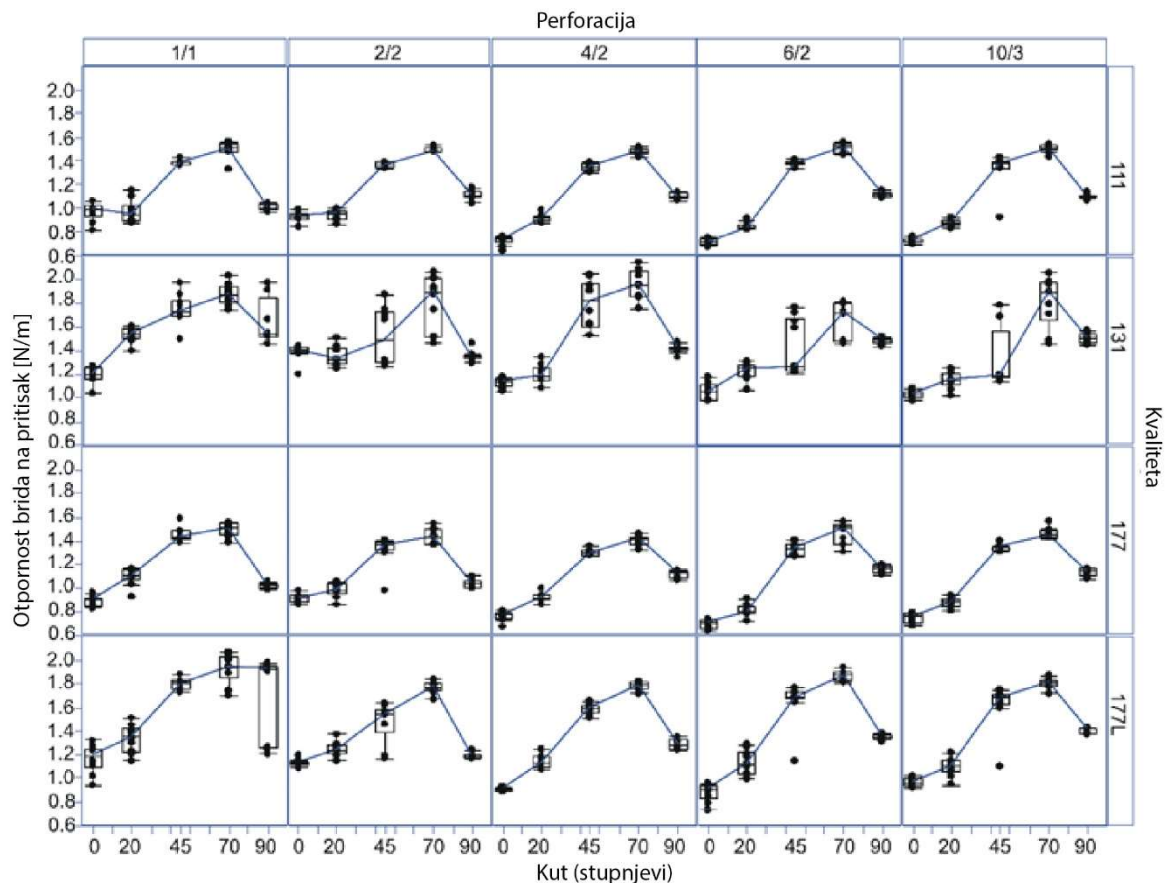
- visoka negativna korelacija između rezultata testa krutosti u smjeru MD i smjeru CD (BS (MD) - BS (CD) - koeficijent oko -0,865);
- značajna negativna korelacija između rezultata testa krutosti u smjeru MD i testa otpornost brida na pritisak (BS (MD) - ECT - koeficijent oko -0,543);
- krutost u smjeru MD je u negativnoj korelaciji, ali u manjoj mjeri, sa svim drugim rezultatima ispitivanja;
- visoka pozitivna korelacija između rezultata testa otpornost brida na pritisak i testa krutosti u smjeru CD (ECT - BS(CD) - koeficijent oko 0,725);
- visoka pozitivna korelacija između rezultata testa otpornost prema cijepanju i testa prekidne čvrstoće u ravnini (E - T - koeficijent oko 0,751);
- značajna pozitivna korelacija između rezultata testa prekidne čvrstoće u ravnini i testa krutosti u smjeru CD (T - BS (CD) - koeficijenti oko 0,500);
- značajna pozitivna korelacija između rezultata testa otpornost prema cijepanju i testa krutosti u smjeru CD (E - BS (CD) - koeficijenti oko 0,519);
- rezultati testa otpornost jačine pucanja (BST) perforiranoga valovitoga kartona nisu u značajnoj korelaciji niti s jednim drugim mjerenjem.

Tablica 4.10. Koeficijenti korelacije  $r$  i 95% intervali pouzdanosti između zavisnih varijabli

Varijabla	S varijablom	$r$	Lower 95%	Upper 95%
BST	ECT	0,0830	0,0115	0,1537
<b>BS (MD)</b>	<b>ECT</b>	<b>-0,5429</b>	<b>-0,5918</b>	<b>-0,4900</b>
BS (CD)	BST	-0,1040	-0,1746	-0,0323
<b>BS (CD)</b>	<b>ECT</b>	<b>0,7251</b>	<b>0,6888</b>	<b>0,7578</b>
BS (CD)	BST	0,2257	0,1558	0,2933
<b>BS (CD)</b>	<b>BS (MD)</b>	<b>-0,8655</b>	<b>-0,8827</b>	<b>-0,8459</b>
E	ECT	0,3520	0,2838	0,4166
E	BST	0,2926	0,2219	0,3602
<b>E</b>	<b>BS (MD)</b>	<b>-0,4253</b>	<b>-0,4855</b>	<b>-0,3610</b>
<b>E</b>	<b>BS (CD)</b>	<b>0,5190</b>	<b>0,4613</b>	<b>0,5723</b>
T	ECT	0,3997	0,3341	0,4613
T	BST	0,3948	0,3291	0,4567
T	BS (MD)	-0,3621	-0,4262	-0,2943
<b>T</b>	<b>BS (CD)</b>	<b>0,5008</b>	<b>0,4415</b>	<b>0,5557</b>
<b>T</b>	<b>E</b>	<b>0,7506</b>	<b>0,7142</b>	<b>0,7829</b>

#### 4.2.2. Analiza utjecaja varijabli perforacija na otpornost brida na pritisak

Dobiveni rezultati mjerenja otpornosti brida valovitoga kartona na tlačnu silu analizirani su u generaliziranim linearnim modelima (GzLM) s gama distribucijom i log link funkcijom. Najprikladniji su bili modeli u kojima je varijabla kut smatrana kontinuiranom varijablom i centrirana je oko medijan vrijednosti, te je zatim tretirana kao linearni i kao kvadratični efekt.



Slika 4.30. Rezultati ispitivanja otpornosti brida na pritisak prikazani po kvaliteti-perforaciji-kutu. Točke su pojedinačni podaci, kvadrati označavaju kvartile, crte su unutarnje ograde, vodoravne linije predstavljaju povezanu medijanu.

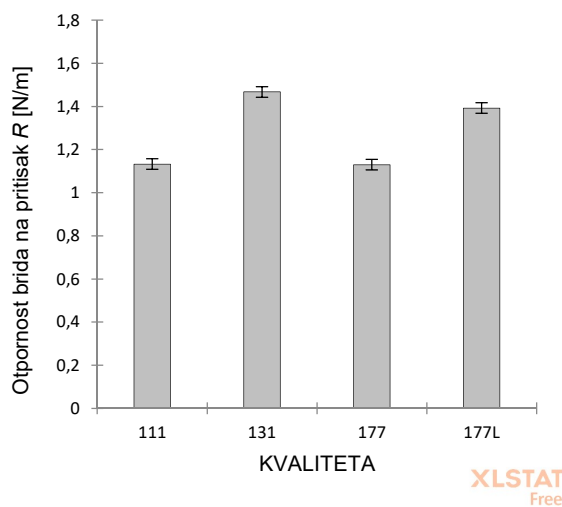
Izmjerene vrijednosti su prilično iskrivljene (Slika 4.30.), ali je opći trend očit: vrijednosti su uvijek rastle od kuta  $0^\circ$  do kuta  $70^\circ$ , a zatim nešto padale kod kuta od  $90^\circ$ . Model za procjenu glavnih efekata (kvaliteta, perforacija, centrirani kut, centrirani kut<sup>2</sup>) generirao je prilagođene srednje vrijednosti prema varijabli kvaliteta, prema varijabli perforacija i prilagođenim linearnim i kvadratnim učinkom varijable kut. Glavni efekti varijabli na otpornosti brida valovitoga kartona na tlačnu silu prikazani su na Slici 4.31.:



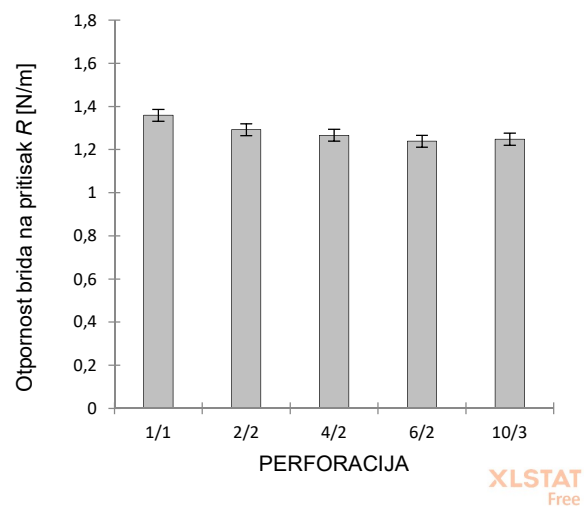
a) glavni efekt varijable kvaliteta ( $F(3,980)=337,88$ ;  $P<0,001$ ) s većim utjecajem kvalitete valovitoga kartona 131 i 177L u odnosu na kvalitete valovitoga kartona 111 i 177);

b) glavni efekt varijable perforacija ( $F(4,980)=31,68$ ,  $P<0,001$ ) s vrlo malim razlikama između tipova perforacija;

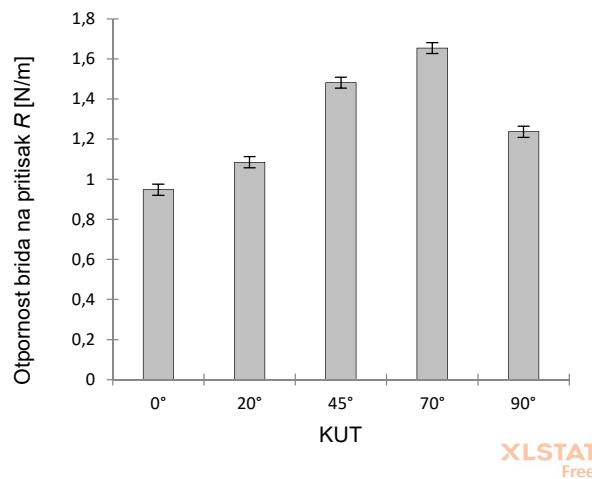
c) linearni efekt varijable kut ( $F(1,980)=1412,16$ ;  $P<0,001$ ) i kvadratični efekt varijable kut ( $F(1,980)=1012,14$ ;  $P<0,001$ ) s jasnim rastućim trendom s povećanjem kuta - vrijednosti otpornosti brida valovitoga kartona na pritisak porasle su od kuta  $0^\circ$  do kuta  $70^\circ$ , a nakon toga se donekle smanjile kod kuta od  $90^\circ$ .



a)



b)



c)

Slika 4.31. Prilagođene srednje vrijednosti otpornosti brida na pritisak prema: a) kvaliteti valovitoga kartona, b) tipu perforacije te c) linearnim i kvadratnim trendovima preko vrijednosti kuta

Između nezavisnih varijabli, najveći utjecaj na promjenu otpornosti brida valovitoga kartona na pritisak ima varijabla kut ( $F(1,980)=1412,16$ ;  $P<0,001$ ).

Kada su u model uvedeni efekt dvosmjerne interakcije (kvaliteta-perforacija) i efekt trosmjerne interakcije (kvaliteta-perforacija-kut), oba su efekta interakcije bila značajna (kvaliteta-perforacija  $F(12,949)=3,49$ ;  $P<0,001$  i kvaliteta-perforacija-kut  $F(19,949)=12,38$ ;  $P<0,001$ ) što ukazuje da su razlike između razina bilo koje varijable u interakciji bile različite na različitim razinama druge dvije varijable. Model je korišten za generiranje prilagođenih srednjih vrijednosti rezultata ispitivanja otpornosti brida valovitoga kartona na pritisak pri različitim kombinacijama kvalitete, perforacije i kuta te za identificiranje razlika.

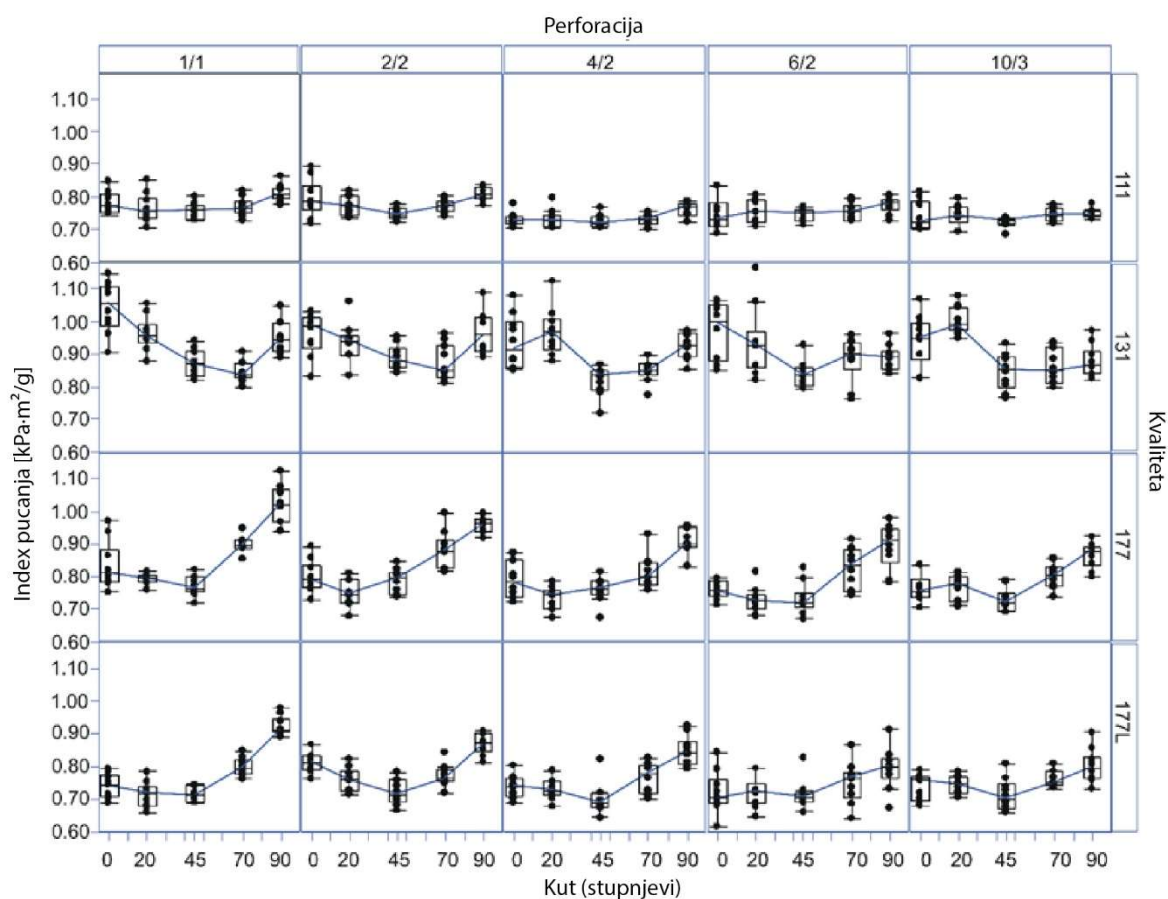
#### 4.2.3. Analiza utjecaja varijabli perforacija na otpornost jačine pucanja valovitoga kartona

Kod analize rezultata dobivenih mjerenjem otpornosti jačine pucanja valovitoga kartona najprikladniji model za procjenu glavnih efekata varijabli kvalitete, perforacije i kuta bio je generalni linearni model (GLM) u kojem su rezultati testa ln-transformirani, a varijabla kut je tretirana kao ordinarna kategorijska varijabla s 5 razina (stupnjevi:  $0^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $70^\circ$ ,  $90^\circ$ ).

Drugi model s dvosmjernom interakcijom varijabli (kvaliteta-perforacija) i trosmjernom interakcijom varijabli (kvaliteta-perforacija-kut) je bio generalizirani linearni model (GzLM) s gama distribucijom i log link funkcijom.

Izmjerene vrijednosti su prilično iskrivljene (Slika 4.32.), ali je opći trend očit: vrijednosti imaju tendenciju pada od kuta  $0^\circ$  prema kutu  $45^\circ$  ili  $70^\circ$ , a zatim se nešto povećavaju kod kuta od  $90^\circ$ . Model glavnih efekata (kvaliteta, perforacija, kut) generirao je prilagođene srednje vrijednosti prema varijabli kvaliteta, prema varijabli perforacija te prema varijabli kut. Ukupno gledano, na otpornost jačine pucanja valovitoga kartona utjecali su (Slika 4.33.):

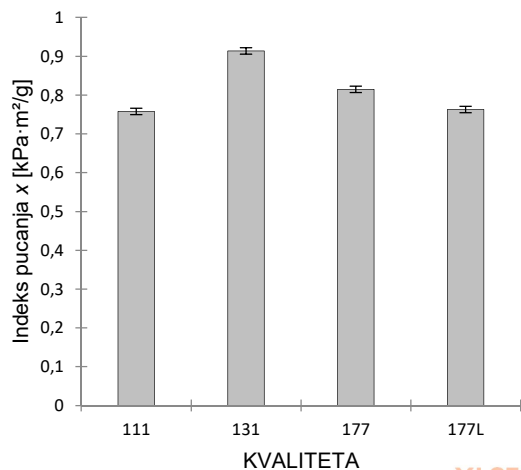
- a) glavni efekt varijable kvaliteta ( $F(3,988)=394,32$ ;  $P<0,001$ ) s većim utjecajem kvalitete valovitoga kartona 131 nego kod ostalih kvaliteta;
- b) glavni efekt varijable perforacija ( $F(4,988)=27,19$ ;  $P<0,001$ ) s većim utjecajem tipa perforacije 1/1 i 2/2 nego s druga tri tipa perforacija;
- c) glavni efekt varijable kut ( $F(4,988)=90,89$ ;  $P<0,001$ ), s jačim kvadratnim trendom (pad od  $0^\circ$  do  $45^\circ$ , zatim porast do  $90^\circ$ ) ( $t(988)=1,88$ ;  $P<0,001$ ) od linearnog trenda (povećanje od  $0^\circ$  do  $90^\circ$ ) ( $t(988)=9,31$ ,  $P<0,001$ ).



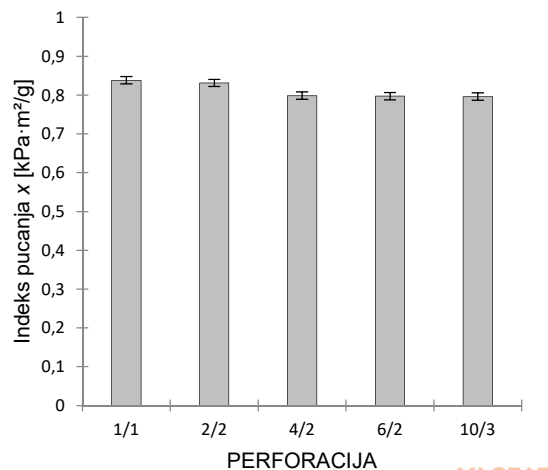
Slika 4.32. Rezultati ispitivanja otpornosti jačine pucanja prikazani po kvaliteti-perforaciji-kutu. Točke su pojedinačni podaci, kvadrati označavaju kvartile, crte su unutarnje ograde, vodoravne linije predstavljaju povezane medijane.

Između nezavisnih varijabli, varijabla kvaliteta ( $F(3,988)=394,32$ ;  $P < 0,001$ ) je najutjecajnija na promjene kod otpornosti jačine pucanja valovitoga kartona.

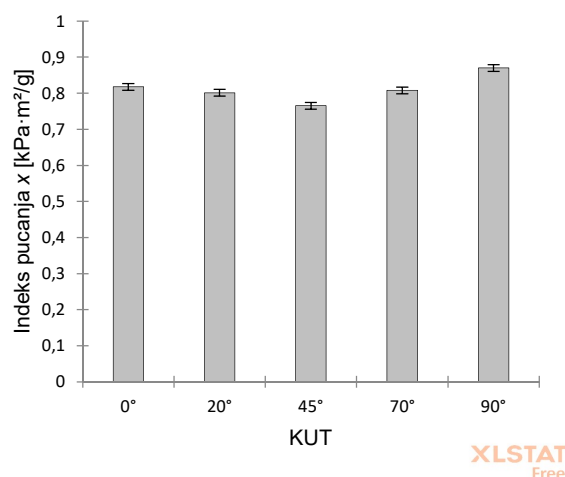
Kada su u model uvedeni efekt dvosmjerne interakcije (kvaliteta-perforacija) i efekt trosmjerne interakcije (kvaliteta-perforacija-kut), oba su efekta interakcije bila značajna (kvaliteta-perforacija  $F(12,900)=3,94$ ;  $P < 0,001$  i kvaliteta-perforacija-kut  $F(76,900)=10,26$ ;  $P < 0,001$ ) što ukazuje da su razlike između razina bilo koje od interakcijskih varijabli bile različite na različitim razinama druge dvije varijable. Model je korišten za generiranje prilagođenih srednjih vrijednosti rezultata ispitivanja otpornosti jačine pucanja valovitoga kartona pri različitim kombinacijama kvalitete, perforacije i kuta te za identificiranje razlika.



a)



b)



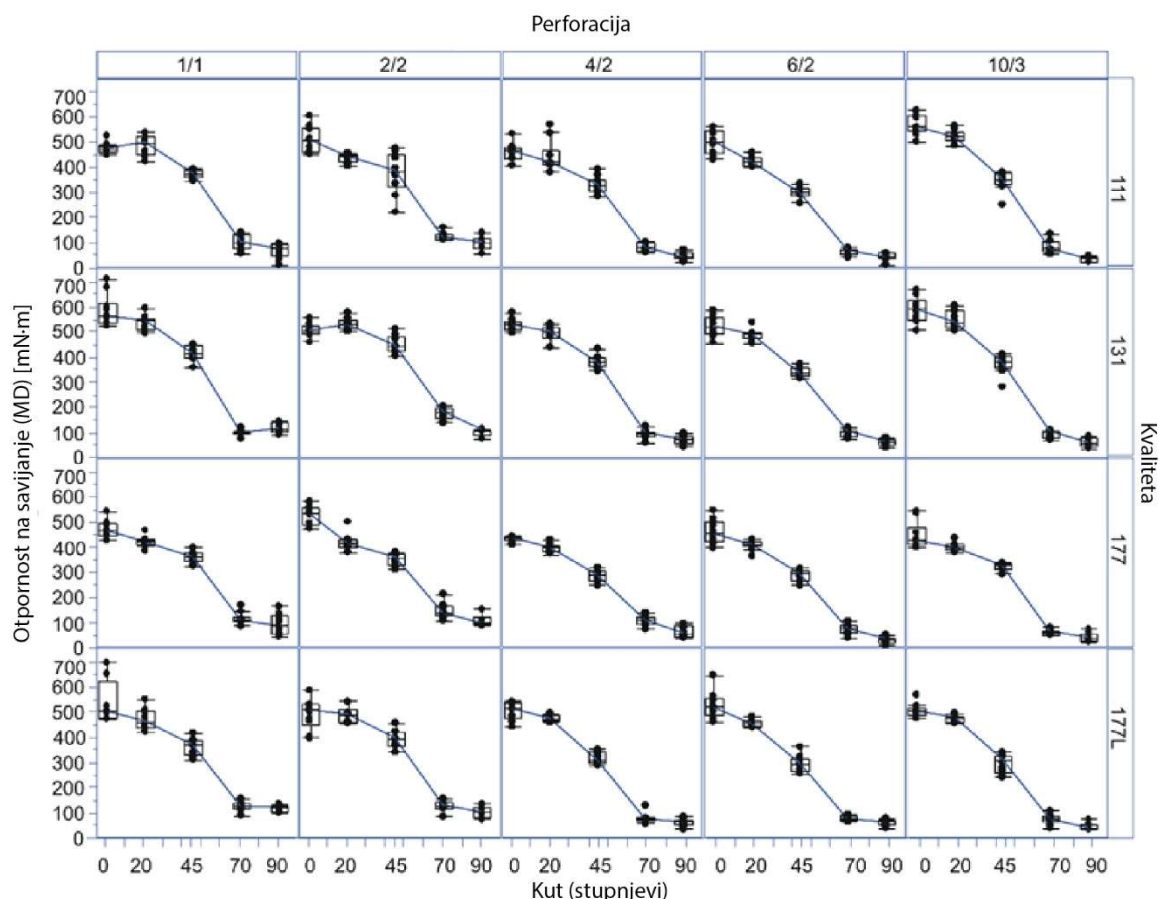
c)

Slika 4.33. Prilagođene srednje vrijednosti indeksa pucanja prema: a) kvaliteti valovitoga kartona, b) tipu perforacije te c) linearnim i kvadratnim trendovima preko vrijednosti kuta

#### 4.2.4. Analiza utjecaja varijabli perforacija na krutost valovitoga kartona u smjeru MD

Kod analize rezultata dobivenih mjerenjem savijanjem valovitoga kartona u tri točke s uzorcima pripremljenim u smjeru MD prvo je analiziran glavni efekt kvalitete, perforacije i kuta gdje je najprikladniji model bio generalni linearni model (GLM), a varijabla kut je tretirana kao kontinuirana varijabla.

Zatim su u drugi model uvedene dvosmjerna (kvaliteta-perforacija) i trosmjerna (kvaliteta-perforacija-kut) interakcija. U oba modela (GLM) greška je bila normalno distribuirana (bez transformacija).

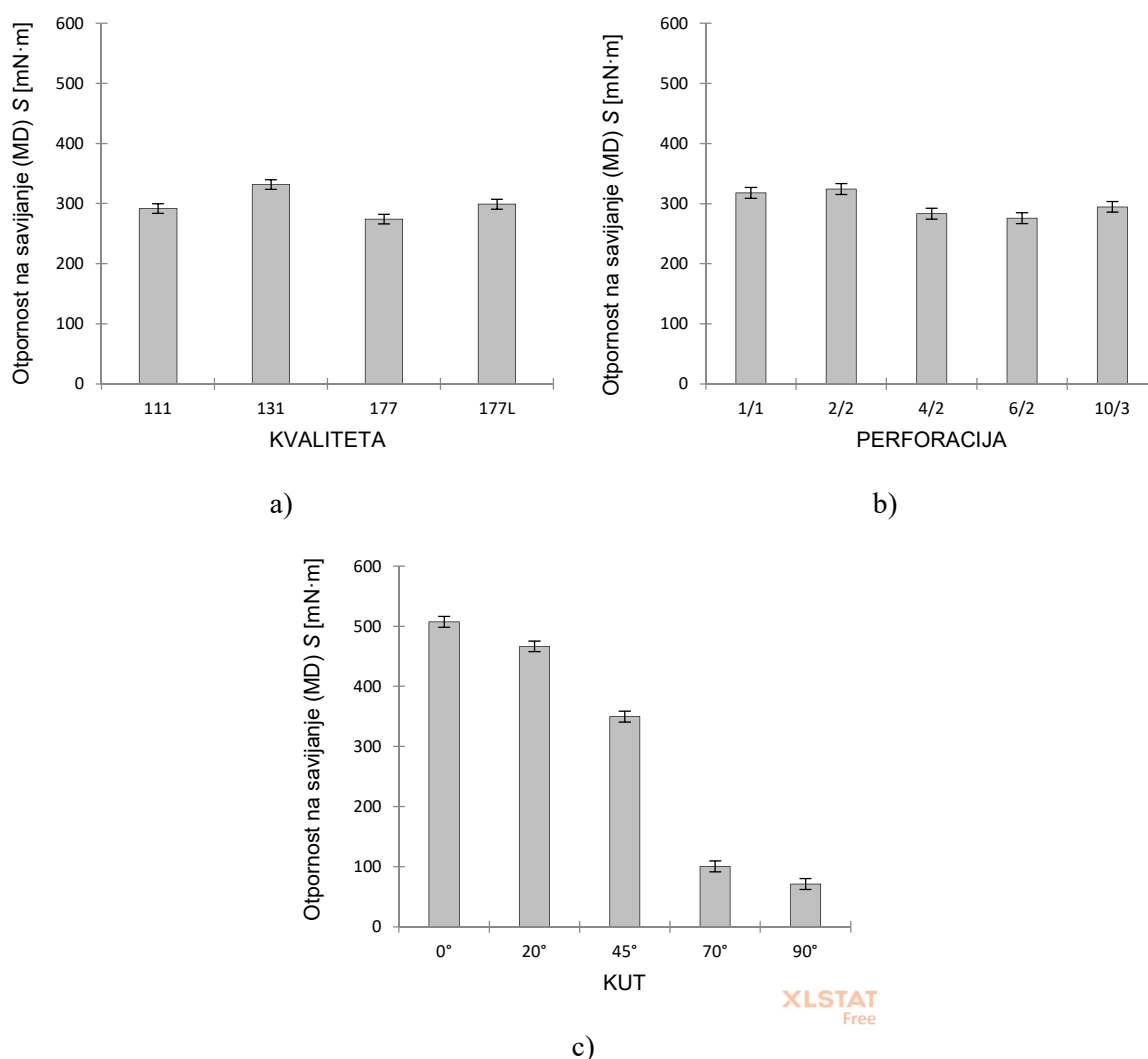


Slika 4.34. Rezultati ispitivanja otpornosti na savijanje u smjeru MD prikazani po kvaliteti-perforaciji-kutu. Točke su pojedinačni podaci, kvadrati označavaju kvartile, crte su unutarnje ograde, vodoravne linije predstavljaju povezane medijane.

Izmjerene vrijednosti (Slika 4.34.) pokazuju očit opći trend: vrijednosti se smanjuju s povećanjem kuta za sve tipove perforacije i vrste kvalitete. Model glavnih efekata (kvaliteta, perforacija, kut) generirao je prilagođene srednje vrijednosti prema varijabli kvaliteta, prema varijabli perforacija te varijabli kut. Ukupni rezultati otpornosti na savijanje u smjeru MD bili su pod utjecajem varijabli kako je prikazano na Slici 4.35.:

- a) glavni efekt varijable kvaliteta ( $F(3,970)=43,61$ ;  $P<0,001$ ) s očitim razlikama između kvalitete valovitoga kartona 131 u odnosu na druge kvalitete valovitoga kartona;
- b) glavni efekt varijable perforacija ( $F(4,970)=26,32$ ;  $P<0,001$ ) s očitim razlikama između tipova perforacija 1/1 i 2/2 u odnosu na druge tipove perforacije;
- c) glavni efekt varijable kut ( $F(1,970)=9155$ ;  $P<0,001$ ) s jasnim linearnim trendom pada vrijednostima s višim stupnjevima kuta.

Između nezavisnih varijabli, najveći utjecaj na promjene kod otpornosti na savijanje u smjeru MD ima varijabla kut ( $F(1,970)=9155$ ;  $P<0,001$ ).



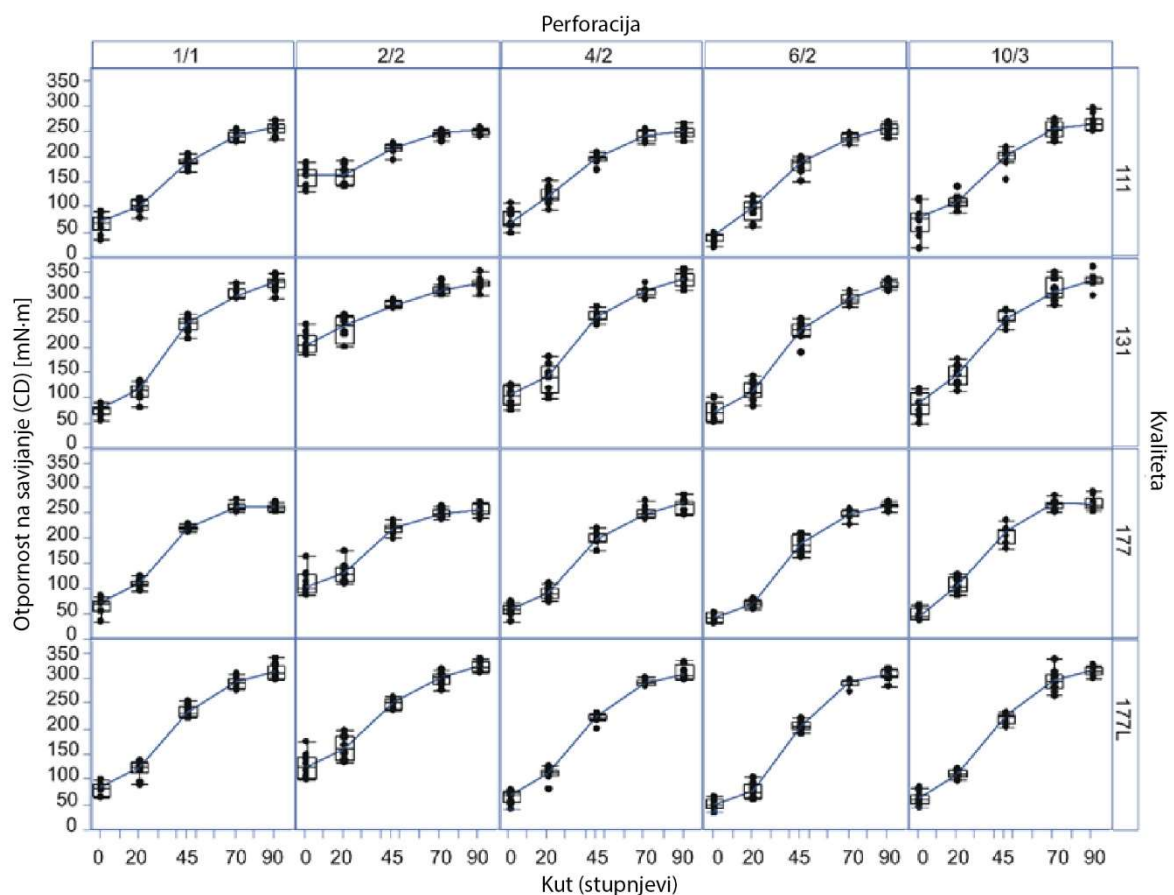
Slika 4.35. Prilagođene srednje vrijednosti otpornosti na savijanje (MD) prema: a) kvaliteti valovitoga kartona, b) tipu perforacije te c) linearnim i kvadratnim trendovima preko vrijednosti kuta

Kada su u model uvedeni efekt dvosmjerne interakcije (kvaliteta-perforacija) i efekt trosmjerne interakcije (kvaliteta-perforacija-kut), oba su efekta interakcije bila značajna (kvaliteta-perforacija  $F(12,939)=2,08$ ;  $P=0,016$  i kvaliteta-perforacija-kut  $F(19,939)=5,97$ ;  $P<0,001$ ) što ukazuje da su razlike između razina bilo koje od interakcijskih varijabli bile različite na različitim razinama druge dvije varijable.

#### 4.2.5. Analiza utjecaja varijabli perforacija na krutost valovitoga kartona u smjeru CD

Kod analize rezultata dobivenih mjerenjem savijanjem valovitoga kartona u tri točke s uzorcima pripremljenim u smjeru CD primijenjena je ista strategija kao i za analizu rezultata u prijašnjem poglavlju s uzorcima pripremljenim u smjeru MD. Najprikladniji model za procjenu glavnih efekata varijabli kvalitete, perforacije i kuta bio je generalni linearni model (GLM), u kojem rezultati testa nisu transformirani jer je greška bila normalno distribuirana, a varijabla kut je tretirana kao kontinuirana varijabla.

Drugi model s dvosmjernom interakcijom varijabli (kvaliteta-perforacija) i trosmjernom interakcijom varijabli (kvaliteta-perforacija-kut) bio je također generalni linearni model (GLM) bez transformacije podataka.



Slika 4.36. Rezultati ispitivanja otpornosti na savijanje u smjeru CD prikazani po kvaliteti-perforaciji-kutu. Točke su pojedinačni podaci, kvadrati označavaju kvartile, crte su unutarnje ograde, vodoravne linije predstavljaju povezane medijane.

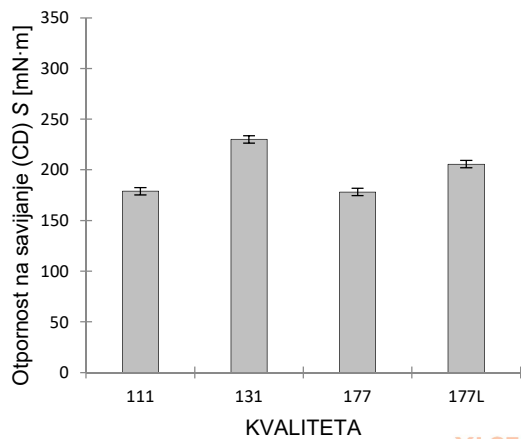
Neobrađeni podaci ispitivanja otpornosti na savijanje u smjeru CD pokazuju očite trendove povećanja vrijednosti s povećanjem kuta pozicioniranja perforacije kod svih tipova perforacije

te svih kvaliteta valovitoga kartona (Slika 4.36.). Model glavnih efekata (kvaliteta, perforacija, kut) pokazao je ukupni učinak varijabli na rezultate otpornosti na savijanje u smjeru CD kao što je vidljivo na Slici 4.37.:

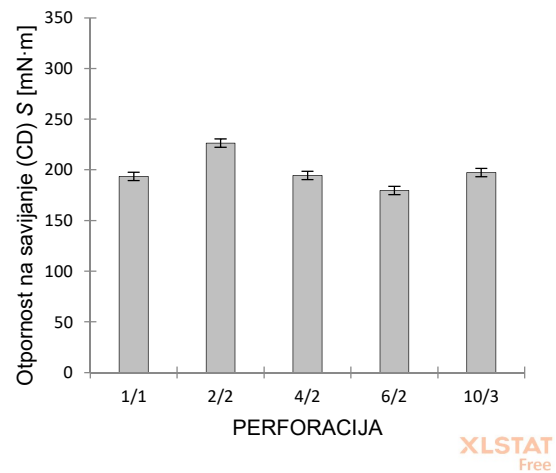
a) glavni efekt varijable kvaliteta ( $F(3,965)=176,6$ ;  $P<0,001$ ) s najvećim utjecajem kvalitete valovitoga kartona 131 zatim kvalitete 177L,

b) glavni efekt varijable perforacija ( $F(4,965)=67,3$ ;  $P<0,001$ ) s najvećim utjecajem tipa perforacije 2/2;

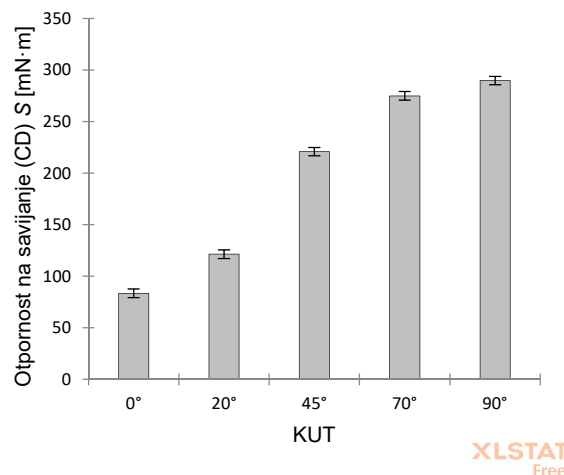
c) glavni efekt varijable kut ( $F(1,965)=7609$ ;  $P<0,001$ ) s jasnim linearnim rastućim trendom s povećanjem kuta.



a)



b)



c)

Slika 4.37. Prilagođene srednje vrijednosti otpornosti na savijanje (CD) prema: a) kvaliteti valovitoga kartona, b) tipu perforacije te c) linearnim i kvadratnim trendovima preko vrijednosti kuta



Između nezavisnih varijabli, najveći utjecaj na promjene kod otpornosti na savijanje u smjeru MD ima varijabla kut ( $F(1,965)=7609$ ;  $P<0,001$ ).

Kada su u model uvedeni termin dvosmjerne interakcije (kvaliteta-perforacija) i termin trosmjerne interakcije (kvaliteta-perforacija-kut), oba su termina interakcije bila značajna (kvaliteta-perforacija  $F(12,934)=6,79$ ;  $P<0,001$  i kvaliteta-perforacija-kut  $F(19,934)=32,5$ ;  $P<0,001$ ) što ukazuje da su razlike između razina bilo koje od interakcijskih varijabli bile različite na različitim razinama druge dvije varijable.

#### 4.2.6. Analiza utjecaja varijabli perforacija na vlačnu čvrstoću u ravnini

Dobiveni rezultati mjerenja prekidne čvrstoće perforiranoga valovitoga kartona analizirani su u generaliziranim linearnim modelima (GzLM) s gama distribucijom i log link funkcijom. Varijabla kut je tretirana kao ordinarna kategorijska varijabla s 5 razina (stupnjevi:  $0^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $70^\circ$ ,  $90^\circ$ ).

Drugi model s dvosmjernom interakcijom varijabli (kvaliteta-perforacija) i trosmjernom interakcijom varijabli (kvaliteta-perforacija-kut) bio je također generalizirani linearni model (GzLM) s gama distribucijom i log link funkcijom.

Neobrađeni podaci su prilično iskrivljeni, ali vidljivo je nekoliko trendova (Slika 4.38.): vrijednosti imaju tendenciju porasta, uglavnom od  $0^\circ$  prema  $70^\circ$  i zatim stagniraju ili se smanjuju kod kuta od  $90^\circ$ ; vrijednosti također imaju tendenciju blagog pada za sve kutove pozicioniranja kod svih kvaliteta valovitoga kartona s povećanjem odrezanog dijela perforacijske linije.

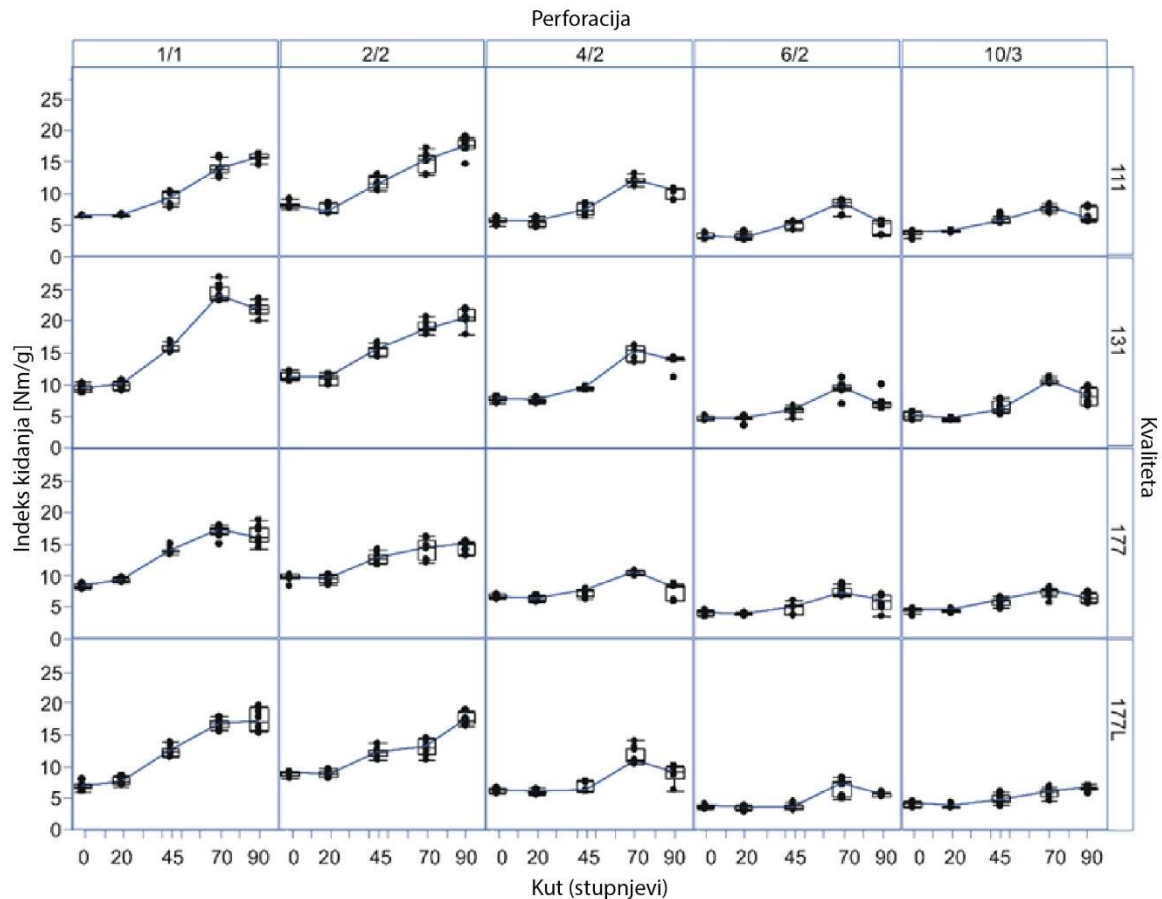
Model glavnih efekata (kvaliteta, perforacija, kut) generirao je prilagođene srednje vrijednosti prema varijabli kvaliteta, prema varijabli perforacija te prema varijabli kut. Ukupno gledano, na vlačnu čvrstoću valovitoga kartona u ravnini utjecali su (Slika 4.39.):

a) glavni efekt varijable kvaliteta ( $F(3,869)=207,88$ ;  $P<0,001$ ) s očitim razlikama između kvalitete valovitoga kartona 131 u odnosu na druge kvalitete valovitoga kartona,

b) glavni efekt varijable perforacija ( $F(4,869)=1639$ ;  $P<0,001$ ) s očitim razlikama između tipova perforacije 1/1 i 2/2 te ostalim tipovima perforacija;

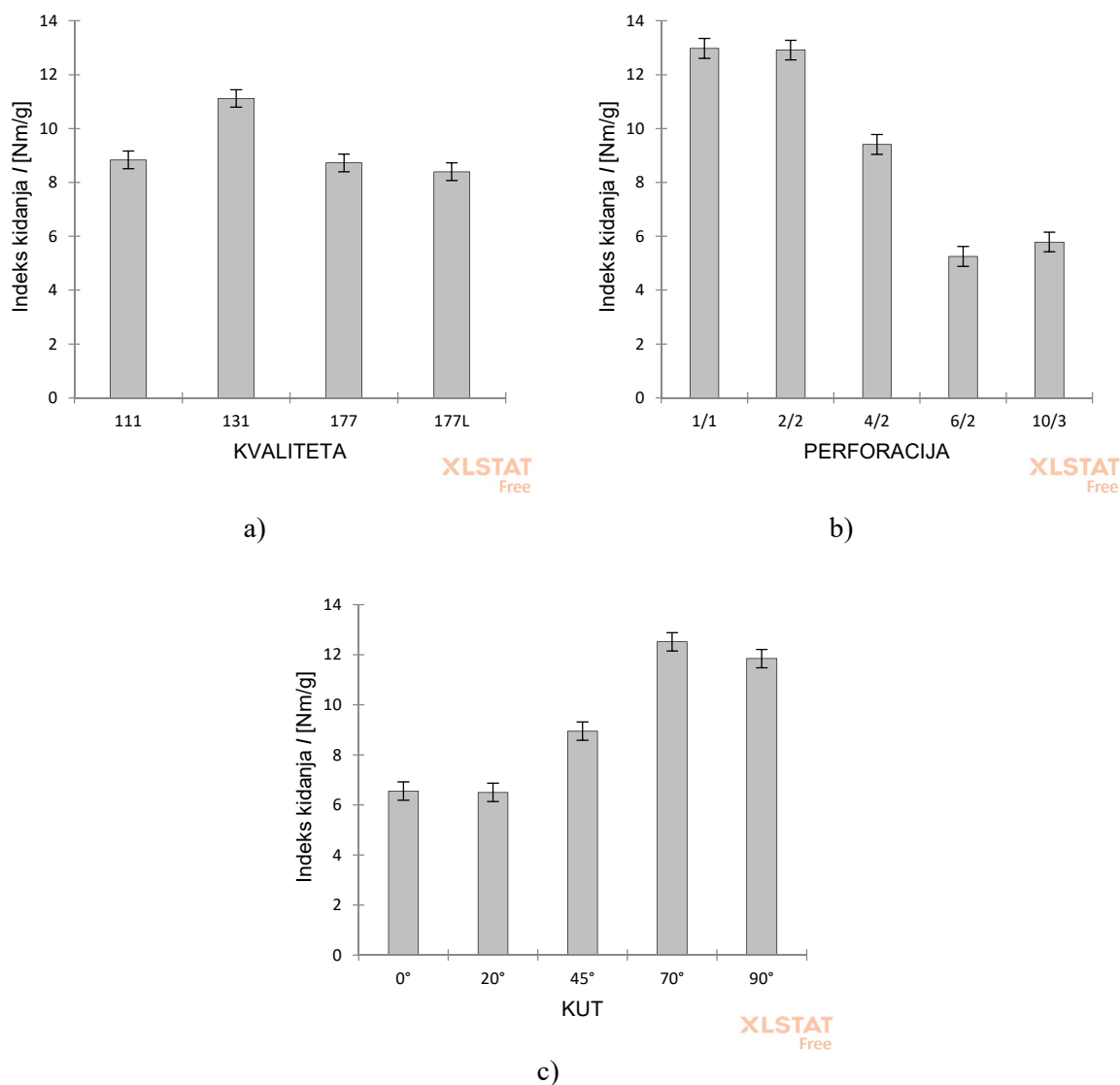
c) glavni efekt varijable kut ( $F(4,869)=854,62$ ;  $P<0,001$ ) sa značajnim linearnim trendom (vrijednosti rastu od kuta  $0^\circ$  do kuta  $70^\circ$ , zatim se smanje kod kuta od  $90^\circ$ ) ( $t=53,6$ ,  $P<0,001$ ) i kvadratnim trendom ( $t=-2,72$ ;  $P=0,007$ ).

Između nezavisnih varijabli, varijabla perforacija ( $F(4,869)=1639$ ;  $P<0,001$ ) je najutjecajnija na promjene kod prekidne čvrstoće.



Slika 4.38. Rezultati ispitivanja prekidne čvrstoće u ravnini po kvaliteti-perforaciji-kutu. Točke su pojedinačni podaci, kvadrati označavaju kvartile, crte su unutarnje ograde, vodoravne linije predstavljaju povezane medijane.

Kada su u model uvedeni efekt dvosmjerne interakcije (kvaliteta-perforacija) i efekt trosmjerne interakcije (kvaliteta-perforacija-kut), oba su efekta interakcije bila značajna (kvaliteta-perforacija  $F(12,781)=16,25$ ;  $P<0,001$  i kvaliteta-perforacija-kut  $F(76,781)=14,36$ ;  $P<0,001$ ) što ukazuje da su razlike između razina bilo koje od interakcijskih varijabli bile različite na različitim razinama druge dvije varijable.

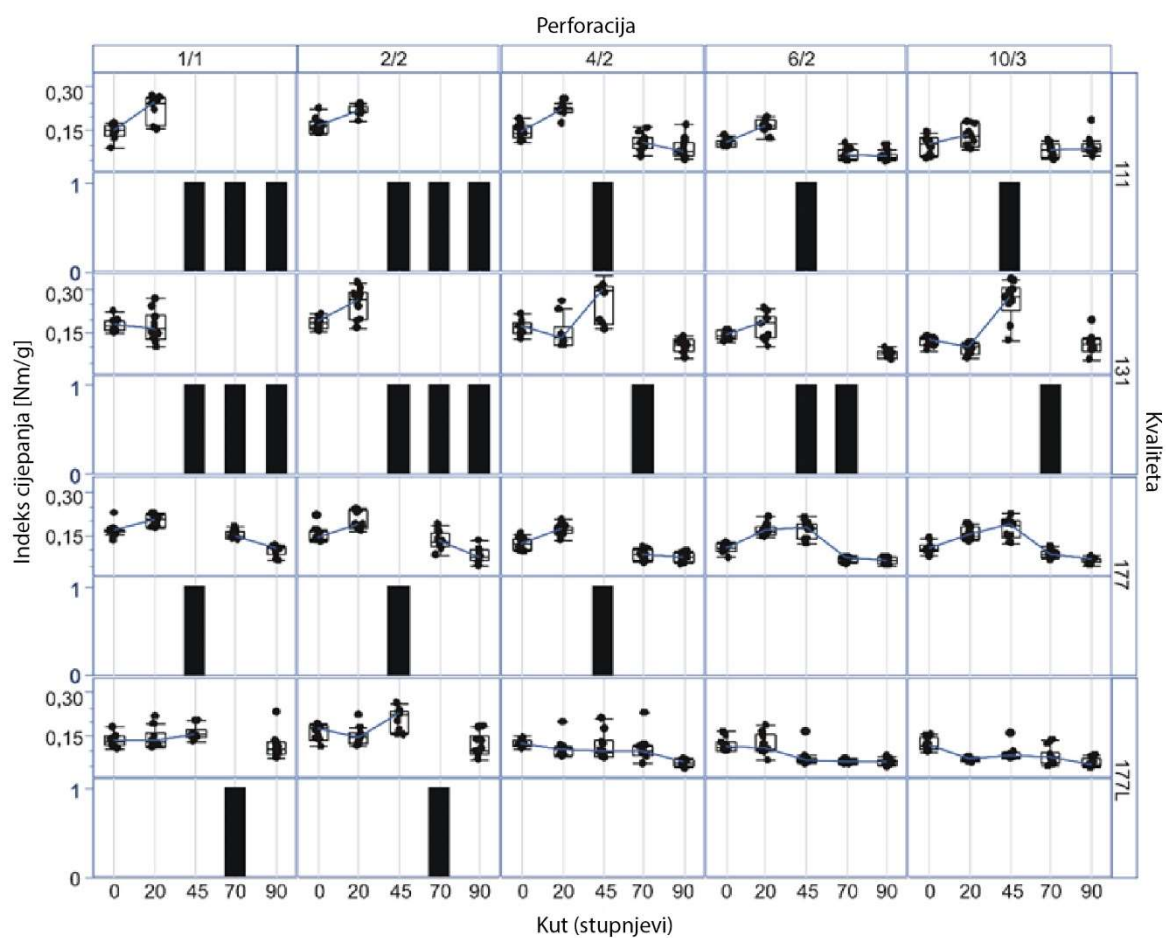


Slika 4.39. Prilagođene srednje vrijednosti indeksa kidanja prema: a) kvaliteti valovitoga kartona, b) tipu perforacije te c) linearnim i kvadratnim trendovima preko vrijednosti kuta

#### 4.2.7. Analiza utjecaja varijabli perforacija na vlačnu čvrstoću van ravnine

Kao što je ilustrirano na Slici 4.40. za neke kombinacije uzoraka ispitivanje je bilo tehnički nemoguće jer su se uzorci razdvajali neovisno o predviđenoj perforaciji. Sveukupno, kvalitete valovitoga kartona 111 i 131 i uzorci s tipom perforacije 1/1 i 2/2, te kutovi od 45° i 70° pokazali su se posebno problematičnima.

Radi jasnoće, u Tablica 4.11 navedene su kombinacije kvalitete, perforacije te kuta pozicioniranja koje nisu prošle ispitivanje vlačne čvrstoće van ravnine.



Slika 4.40. Rezultati ispitivanja prekidne čvrstoće van ravnine po kvaliteti-perforaciji-kutu (povezani box-plotovi) i vjerojatnost nepredviđenog razdvajanja označena s 0 ili 1 (1 prikazani crnim stupcima gdje su se uzorci nepredviđeno razdvojili).

Tablica 4.11. Kombinacije uzoraka za koje je ispitivanje vlačne čvrstoće van ravnine bilo tehnički neizvedivo

KVALITETA	PERFORACIJA	KUT	KVALITETA	PERFORACIJA	KUT	KVALITETA	PERFORACIJA	KUT
111	1/1	45	131	1/1	45	177	1/1	45
111	1/1	70	131	1/1	70	177	2/2	45
111	1/1	90	131	1/1	90	177	4/2	45
111	2/2	45	131	2/2	45	177L	1/1	70
111	2/2	70	131	2/2	70	177L	2/2	70
111	2/2	90	131	2/2	90			
111	4/2	45	131	4/2	70			
111	6/2	45	131	6/2	45			
111	10/3	45	131	6/2	70			
			131	10/3	70			

#### 4.2.8. Analiza utjecaja varijabli perforacija na otpornost prema cijepanju

Kod analize rezultata dobivenih mjerenjem otpornosti perforiranoga valovitoga kartona prema cijepanju primijenjena je ista strategija kao za analizu rezultata svih prethodnih testova. Najprikladniji model za procjenu glavnih efekata varijabli kvalitete, perforacije i kuta bio je generalizirani linearni model (GzLM) s gama distribucijom i log link funkcijom. Varijabla kut je tretirana kao ordinarna kategorijska varijabla s 5 razina (stupnjevi: 0°, 20°, 45°, 70°, 90°).

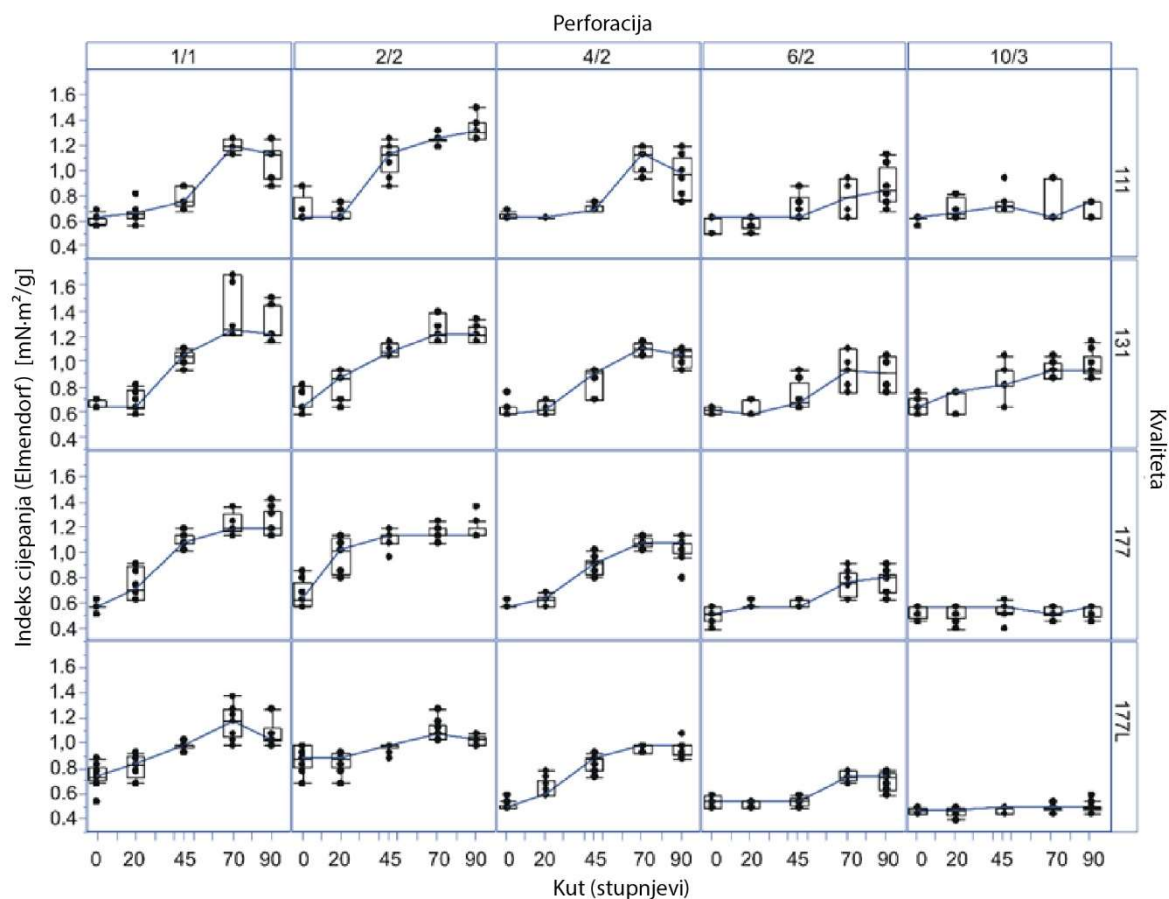
Drugi model s dvosmjernom interakcijom varijabli (kvaliteta-perforacija) i trosmjernom interakcijom varijabli (kvaliteta-perforacija-kut) bio je također generalizirani linearni model (GzLM) s gama distribucijom i log link funkcijom.

Neobrađeni podaci su prilično iskrivljeni (Slika 4.41.), ali ukazuju na izrazito slične trendove kao u slučaju ispitivanja vlačne čvrstoće u ravnini [80], [98]: vrijednosti imaju tendenciju porasta, uglavnom od 0° prema 70° i zatim stagniraju, kao i da vrijednosti imaju tendenciju blagog pada za sve kutove pozicioniranja kod svih kvaliteta valovitoga kartona od tipa perforacije s najmanjim odrezanim dijelom perforacijske linije prema onima s najvećim odrezanim dijelom.

Model za procjenu glavnih efekata (kvaliteta, perforacija i kut) generirao je prilagođene srednje vrijednosti prema varijabli kvaliteta, prema varijabli perforacija i prema varijabli kut. Glavni efekti varijabli na otpornosti prema cijepanju vidljivi su na Slici 4.42.:

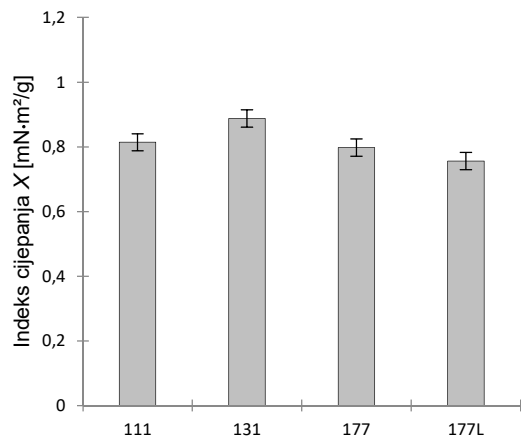
- a) glavni efekt varijable kvaliteta ( $F(3,869)=43,96$ ;  $P<0,001$ ) s najvećim utjecajem kvalitete valovitoga kartona 131,
- b) glavni efekt varijable perforacija ( $F(4,869)=279,1$ ;  $P<0,001$ ) s najvećim utjecajem tipa perforacije 2/2;
- c) glavni efekt varijable kut ( $F(4,869)=267,2$ ;  $P<0,001$ ) sa značajnim linearnim trendom (vrijednosti rastu od kuta 0° do kuta 70°, zatim se smanjuju kod kuta od 90°) ( $t=31,4$ ,  $P<0,001$ ) i kvadratnim trendom ( $t=-4,96$ ;  $P<0,001$ ).

Između nezavisnih varijabli, najveći utjecaj na promjene kod otpornosti prema cijepanju imala je varijabla perforacija ( $F(4,869)=279,1$ ;  $P<0,001$ ).



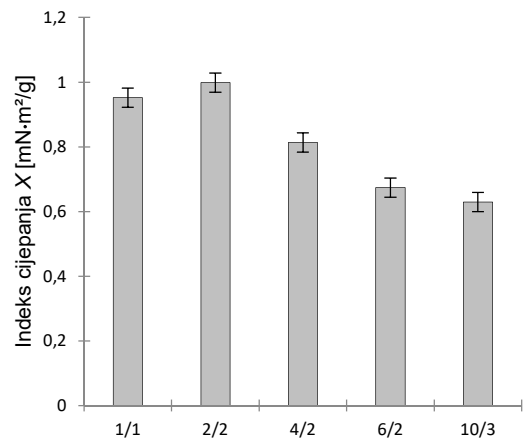
Slika 4.41. Rezultati ispitivanja otpornosti prema cijepanju prikazani po kvaliteti-perforaciji-kutu. Točke su pojedinačni podaci, kvadrati označavaju kvartile, crte su unutarnje ograde, vodoravne linije predstavljaju povezane medijane.

Kada su u model uvedeni efekt dvosmjerne interakcije (kvaliteta-perforacija) i efekt trosmjerne interakcije (kvaliteta-perforacija-kut), oba su efekta interakcije bila značajna (kvaliteta-perforacija  $F(12,781)=55,8$ ;  $P<0,001$  i kvaliteta-perforacija-kut  $F(76,781)=13,5$ ;  $P<0,001$ ) što ukazuje da su razlike između razina bilo koje od interakcijskih varijabli bile različite na različitim razinama druge dvije varijable.



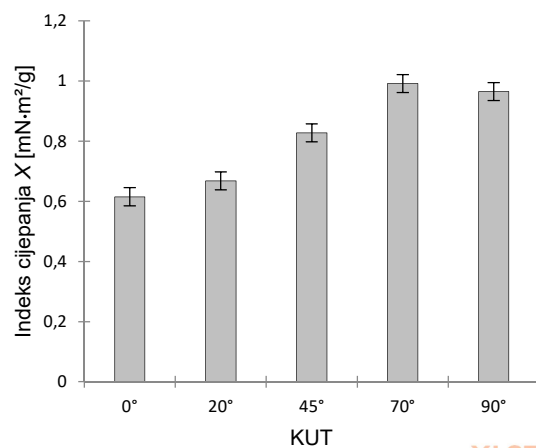
XLSTAT  
Free

a)



XLSTAT  
Free

b)



XLSTAT  
Free

c)

Slika 4.42. Prilagođene srednje vrijednosti indeksa cijepanja prema: a) kvaliteti valovitoga kartona, b) tipu perforacije te c) linearnim i kvadratnim trendovima preko vrijednosti kuta

### 4.3. Rasprava

Četiri provedena ispitivanja vezana su za transport i skladištenje i to su otpornost brida valovitoga kartona na pritisak (ECT), otpornost jačine pucanja valovitoga kartona (BST) te krutost u smjeru MD i smjeru CD (BS(MD) i BS(CD)). Vrijednosti neperforiranih uzoraka, prikazanih u poglavlju 4.1.1 - 4.1.4, su u svakom spomenutom ispitivanju pri svakoj kvaliteti valovitoga kartona više od vrijednosti perforiranih uzoraka, što jasno ukazuje da bilo koji tip perforacije pozicioniran pri bilo kojem kutu kod svih ispitivanih kvaliteta valovitoga kartona uzrokuje smanjenje određenog mehaničkog svojstva.

Korelacijskom analizom kvantificiran je odnos spomenutih mjerenja (Slika 4.29 i Tablica 4.10). Utvrđena je značajna pozitivna korelacija ispitivanja krutosti u smjeru CD te ispitivanja otpornosti brida na pritisak. Oba mjerenja su u značajnoj negativnoj korelaciji s ispitivanjem krutosti u smjeru MD, s tim da je ispitivanje krutost u smjeru CD u visokoj negativnoj korelaciji s ispitivanjem krutosti u smjeru MD. Prema literaturi valoviti karton ima veću otpornost na savijanje u smjeru MD [53], što rezultati ispitivanja i pokazuju (Tablica 4.5 i Tablica 4.6), a proizlazi iz anizotropnosti valovitoga kartona [35]. Za preostalo ispitivanje otpornosti jačine pucanja valovitoga kartona nije identificirana korelacija s ostalim mjerenjima.

Multivarijantnom analizom utvrđeno je da je kod tri povezana mjerenja (ECT, BS (MD), BS(CD)) najutjecajnija nezavisna varijabla kut, što znači da promjenom pozicioniranja perforacije dolazi do najznačajnije varijabilnosti promatrane zavisne varijable. Pozitivno povezana mjerenja (ECT i BS(CD)) pokazuju očit trend izmjerenih vrijednosti kod svih kvaliteta valovitoga kartona i za sve tipove perforacije: vrijednosti imaju tendenciju rasta od kuta od  $0^\circ$  sve do kuta od  $90^\circ$  kod ispitivanja krutosti u smjeru CD, dok kod ispitivanja otpornosti brida na pritisak vrijednosti rastu do kuta od  $70^\circ$ , a zatim padaju kod kuta od  $90^\circ$  (Slika 4.29 i Slika 4.35). Brojčane vrijednosti uzoraka za isti kut drugačije su pri različitim kvalitetama valovitoga kartona kao i pri različitim tipovima perforacija. Međutim, brojčane razlike izmjerenih vrijednosti kod različitih valovitih kartona je samo kvantitativna i proizlazi iz debljine, gramature ili sastavnica valovitoga kartona [29]. Postoje brojčane razlike izmjerenih vrijednosti za kutove pri različitom tipu perforacije, ali sve razlike su uvijek u istom smjeru. Gledajući sveukupni glavni efekt varijable kvalitete valovitoga kartona za svako od spomenutih povezanih mjerenja, ali i svih ostalih mjerenja (Slika 4.31a, Slika 4.33a, Slika 4.35a, Slika 4.37a, Slika 4.39a, Slika 4.42a), valoviti karton 131 uvijek ima najviše vrijednosti što je posljedica najkvalitetnije sastavnice lica (Tablica 3.1) koja podnosi opterećenje savijanja [52]. Glavni efekt varijable perforacije za tipove 1/1 i 2/2 (Slika 4.31b, Slika 4.33b, Slika 4.35b) je



uvijek najviši kod sva tri mjerenja, a kad se usporedi s ostalim tipovima perforacija gdje je omjer odrezanog i neodrezanog dijela dvostruko veći (kod tipa perforacije 4/2) ili trostruko veći (kod tipa perforacije 6/2 i 10/3) razlika je od male praktične važnosti. Kod tri povezana mjerenja vidljivo je da je efekt kuta isti na svakoj razini kvalitete i na svakoj razini perforacije (Slika 4.30, Slika 4.34, Slika 4.36) što upućuje da nema razlike, tj. kvalitativne interakcije.

Konkretno, korelacijskom analizom identificirana je pozitivna povezanost između ispitivanja otpornosti brida na pritisak i ispitivanja krutosti u smjeru CD. Zatim je multivarijantnom analizom utvrđeno da je varijabla kut najznačajnija za promjene kod spomenutih mjerenja. Varijabla kvaliteta uzrokuje kvantitativne razlike, ali ne i kvalitativne, dok varijabla perforacija ima najniži utjecaj. Stoga korištenjem kuta od  $0^\circ$  dobiva se najslabija otpornost na savijanje u smjeru CD kao i najmanja otpornost brida na pritisak, dok povećanjem kuta dolazi do promjena, odnosno povećanja spomenutih mehaničkih svojstava. Odabirom valovitoga kartona kvalitetnijih sastavnica poboljšavaju se mehanička svojstva bez obzira na tip i pozicioniranje perforacije. Otpornost na savijanje u smjeru MD je u negativnoj korelaciji s navedenim mjerenjima tako da će se vrijednosti smanjivati ukoliko se kod negativno povezanih mjerenja vrijednosti povećavaju.

Kod ispitivanja otpornosti jačine pucanja valovitoga kartona utvrđen je statistički značajan utjecaj nezavisnih varijabli, od kojih varijabla kvaliteta ima najveći utjecaj na varijabilnost zavisnih varijabli. Međutim razlike su od male praktične važnosti. Mjerenje nije donijelo relevantne smjernice za daljnju primjenu.

Za razdvajanje perforiranoga valovitoga kartona vezana su tri provedena ispitivanja i to su vlačna čvrstoća u ravnini i van ravnine te otpornost prema cijepanju prema Elmendorfu. Korelacijskom analizom identificirana je visoka pozitivna korelacija ispitivanja vlačne čvrstoće u ravnini i ispitivanja otpornosti prema cijepanju. Multivarijantnom analizom utvrđena je varijabla perforacija kao najutjecajnija varijabla kod oba mjerenja koja uzrokuje najviše varijabilnost kod promatranih zavisnih varijabli. Također je utvrđeno da i varijabla kut ima značajan utjecaj. Rezultati oba mjerenja pokazuju izrazito slične trendove kod svih kvaliteta valovitoga kartona i za sve tipove perforacije gdje vrijednosti imaju tendenciju rasta od  $0^\circ$  prema  $70^\circ$  i zatim stagniraju (Slika 4.38 i Slika 4.41). Brojčane vrijednosti uzoraka za isti kut imaju tendenciju smanjenja kako se povećava odrezani dio perforacijske linije kod svih kvaliteta valovitoga kartona, što znači da se s povećanjem odrezanog dijela perforacijske linije smanjuje prekidna jakost kao i otpornost na cijepanje. Glavni efekt varijable perforacije za

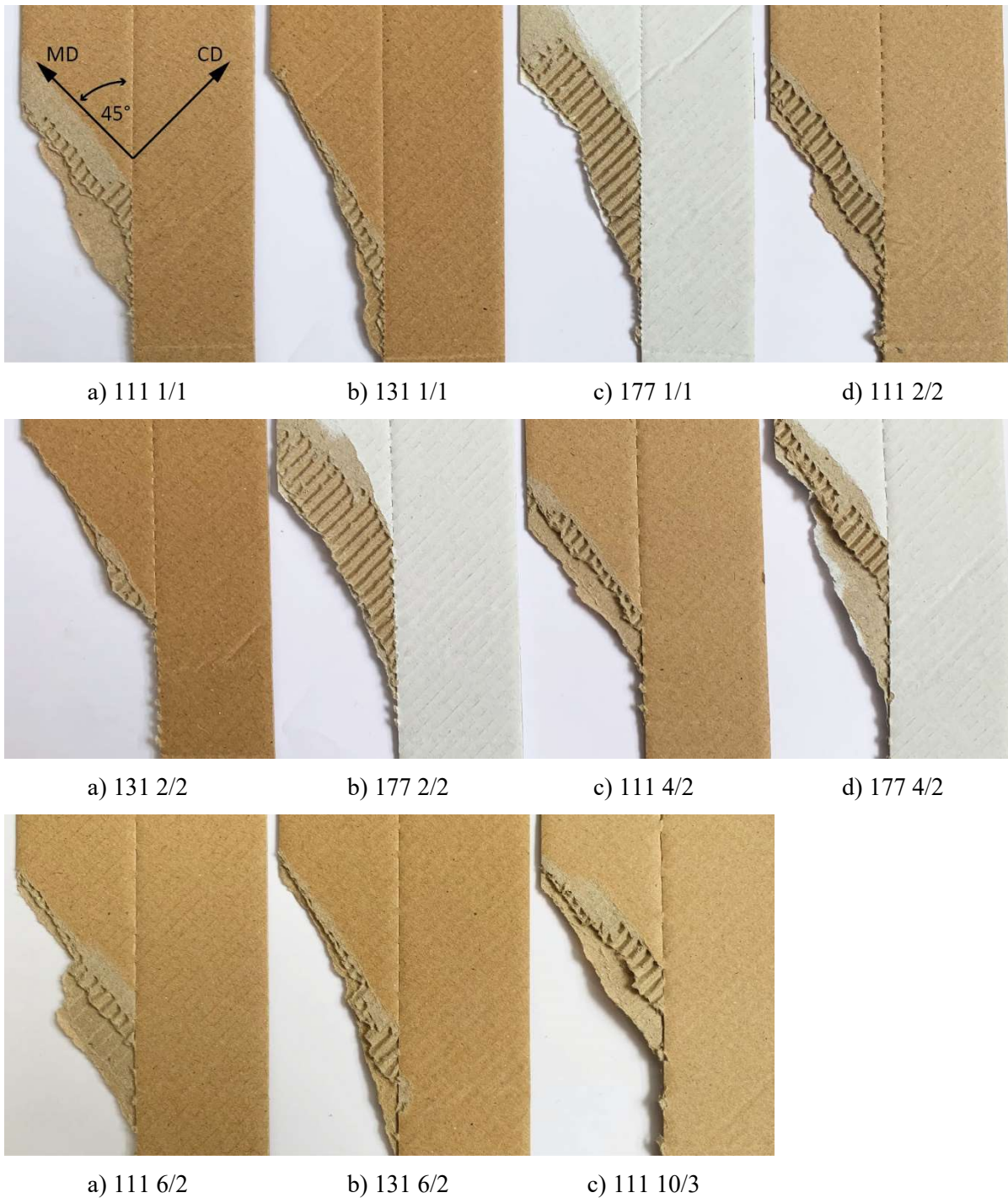
tipove 1/1 i 2/2 je najviši kod oba mjerenja i brojčano vrlo sličan, dok je glavni efekt za tipove 6/2 i 10/3 najniži i također brojčano vrlo sličan (Slika 4.39b, Slika 4.42b). Iz Slike 4.38 i Slike 4.41 također je vidljivo da utjecaj kuta pada kako raste odrezani dio u perforacijskoj liniji. Ukoliko se svaki perforirani dio promatra kao pukotina u materijalu i ako se pravokutni rez perforirane linije pojednostavni s eliptičnim oblikom moguće je objašnjenje pomoću mehanike loma. Iz mehanike loma proizlazi da veći omjer dužine i širine, što bi u ovom istraživanju predstavljalo veći odrezani dio u perforacijskoj liniji, sadrži veću koncentraciju naprezanja što ujedno povećava ukupno naprezanja prilikom razdvajanja materijala. Konkretno kod tipa perforacije s većim neodrezenim dijelom više energije sudjeluje u prekidanju neodrezenog dijela perforacijske linije [57].

Kao što je spomenuto, kvaliteta valovitoga kartona 131 ima najveću vrijednost sveukupnog glavnog efekta varijable perforacije i kod mjerenja vezanih za razdvajanje (Slika 4.39.a, Slika 4.42.a), upravo zbog svojih sastavnica, tj. najkvalitetnije sastavnice lica (Tablica 3.1.) koja je isto tako i pokazatelj čvrstoće papira [51].

Pozitivno povezana ispitivanja vezana za razdvajanje također su u značajnoj pozitivnoj korelaciji s ispitivanjem krutosti u smjeru CD te značajnoj negativnoj korelaciji s ispitivanjem krutosti u smjeru MD.

Ispitivanje vlačne čvrstoće van ravnine eliminiralo je kombinacije kvalitete - kuta - perforacije koje je nemoguće razdvojiti po predviđenoj perforacijskoj liniji. Kritični tip perforacije se pokazao 1/1 i 2/2, kritični kut pozicioniranja perforacije  $45^\circ$  i  $70^\circ$  te kritična kvaliteta valovitoga kartona 131. Kod svih provedenih mjerenja, glavni efekt varijable perforacije uvijek je pokazao najveće vrijednosti upravo za tipove perforacija 1/1 te 2/2 (Slika 4.31.b, Slika 4.33.b, Slika 4.35.b, Slika 4.37.b, Slika 4.39.b, Slika 4.42.b), kao što je i glavni efekt varijable kvalitete uvijek pokazao najveće vrijednosti za kvalitetu 131 (Slika 4.31.a, Slika 4.33.a, Slika 4.35.a, Slika 4.37.a, Slika 4.39.a, Slika 4.42.a). Kod ispitivanja vezanih za razdvajanje također je spomenuti kut od  $70^\circ$  imao najveće vrijednosti glavnog efekta varijable kut (Slika 4.39.c, Slika 4.42.c). Stoga je očekivano da upravo te kombinacije onemoguće razdvajanje.

Međutim, vrijednosti za kut od  $45^\circ$  su uvijek bile u sredini skale, bez kvantitativnog pokazatelja mogućih komplikacija. Na Slici 4.43. prikazane su sve kombinacije kvalitete i perforacije za uzorke rezane pod  $45^\circ$  u odnosu na smjer pružanja vala (MD) kod kojih razdvajanje nije pratilo perforacijsku liniju. Kod svih uzoraka vidljiv je jednak trend. Smjer kretanja razdvajanja

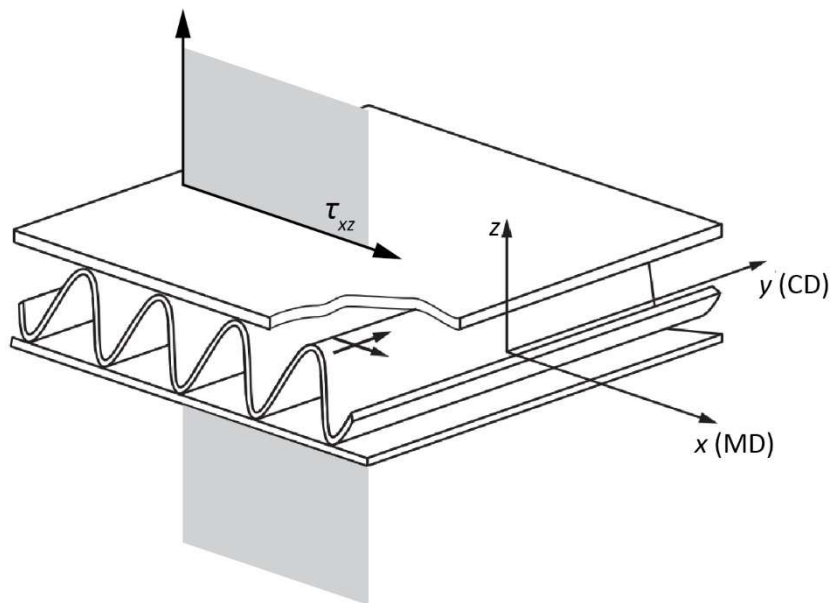


Slika 4.43. Primjeri neuspjelih uzoraka rezanih pod  $45^\circ$  u odnosu na smjer pružanja vala kod mjerenja vlačne čvrstoće van ravnine

kartona prestane pratiti perforacijsku liniju i krene u smjeru pružanja vala (MD). Razlog promjene smjera objašnjen je u mehanici loma. Iz mehanike loma, smjer širenja pukotine ovisi o vrsti materijala te stanju naprezanja u blizini vrha pukotine. Odrezani dio perforacijske linije predstavlja pukotinu. Unutar pukotine, tj. unutar odrezanog dijela perforacijske linije velika je

koncentracija naprezanja koja ima tendenciju širiti se u smjeru najmanjeg otpora. Smjer najmanjeg otpora određuje se kao smjer u kojem je najmanje sile potrebno da se materijal deformira ili da dođe do loma pod djelovanjem opterećenja. Valoviti karton je ortotropni materijal, s različitim svojstvima u tri međusobno okomita smjera [35]. Kada se takav materijal izrezuje pod kutom te podvrgne opterećenju, unutarnja sila otpora dijeli se na normalno naprezanje, ali i na posmično naprezanje [57]. Posmično naprezanje uzrokuje kutnu deformaciju. Opterećenje se prenosi preko mreže vlaknaca, s vlakna na vlakno kroz posmične sile na kemijskim vezama između vlakana. Posmične sile na kemijskim vezama između vlaknaca variraju stohastički, ovisno o strukturi lokalne mreže oko svake veze. Kada posmična sila postane veća od posmične čvrstoće dolazi do prekida kemijskih veza i dolazi do loma u smjeru MD [33].

Također, bitno je napomenut da iako su mehanička svojstva valovitoga kartona sveukupno bolja u smjeru MD nego u smjeru CD [37], što se tiče poprečnog smika, otpornost na deformaciju je najmanja upravo u smjeru MD,  $\tau_{xz}$  [113] (Slika 4.44.).



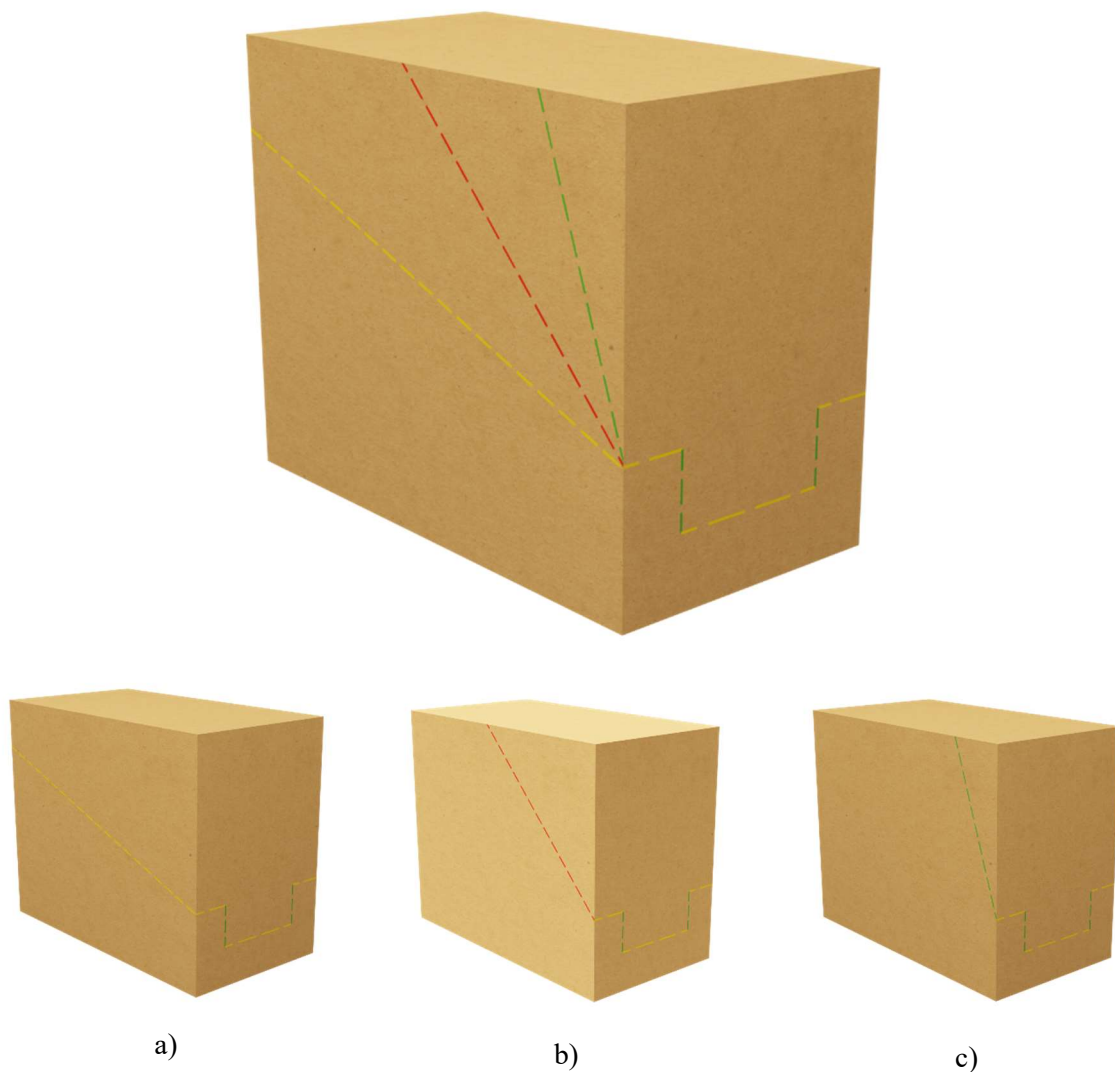
Slika 4.44. Prikaz posmičnog naprezanja  $\tau_{xz}$  u smjeru najmanjeg otpora na deformaciju (smjer MD)

#### 4.4. 3D model optimizacije

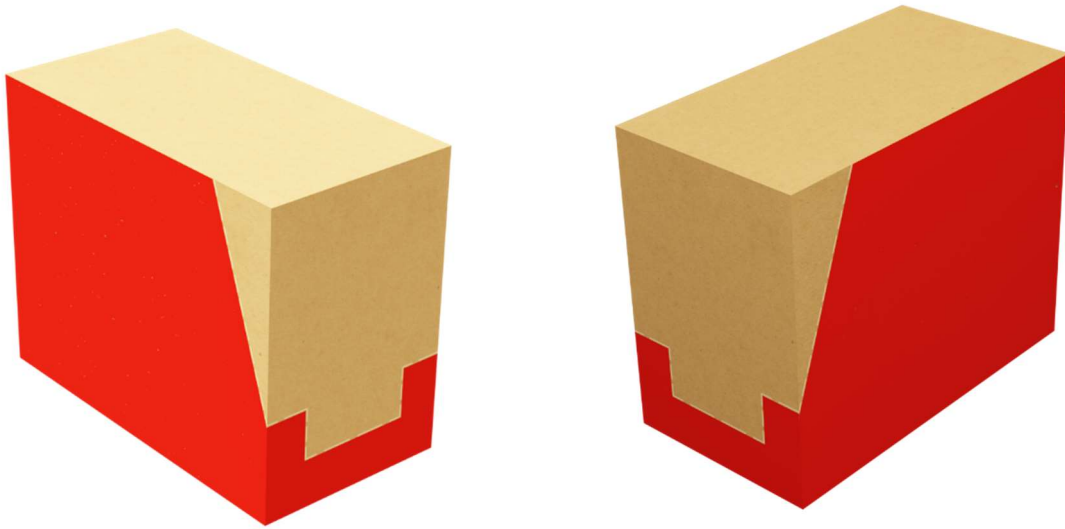
Optimizacijom mehaničkih svojstava perforiranoga valovitoga kartona želi se olakšati razdvajanje valovitoga kartona po perforacijskoj liniji bez da se gube mehanička svojstva bitna za siguran transport i skladištenje. Procijenjeni optimalni uvjeti objašnjeni su kombinacijom tipa perforacije i kuta pozicioniranja. Otpornost brida na pritisak kao i otpornost na savijanje valovitoga kartona direktno je pod utjecajem kuta pozicioniranja perforacije, ali značajno manje pod utjecajem tipa perforacije (Slika 4.30, Slika 4.36). S druge strane prekidna jakost perforiranoga valovitoga kartona najviše je pod utjecajem tipa perforacije dok utjecaj kuta perforacije pada s povećanjem odrezanog dijela u perforacijskoj liniji (Slika 4.38).

Na Slici 4.45 vizualizirani su 3D modeli kutija s tipom perforacije 10/3 koji se prema statističkoj analizi dobivenih rezultata razdvaja primjenom najmanje sile, jednako bez obzira na kut pozicioniranja. Perforacija zelene boje (Slika 4.45c) označava pozicioniranje pod kutom od 70° bočno, odnosno 90° na prednjoj strani kutije. Pod tim kutovima dolazi do najmanjeg gubitka čvrstoće i krutosti bitnih kod transporta i skladištenja. Na Slici 4.45b crvenom bojom je prikazana pozicija perforacije pod kutom od 45°. Crvena boja koristi se kao upozorenje jer takvo pozicioniranje perforacije onemogućuje razdvajanje valovitoga kartona u predviđenom smjeru. Perforacija žute boje (Slika 4.45a) označava pozicioniranje pod kutom od 0° ili 20°. Takvo pozicionirana perforacija najviše utječe na smanjenje čvrstoće materijala. Međutim, pozicioniranje perforacije pod kutom od 0° s prednje strane je neophodno. Prednji dio ambalaže uvijek zahtjeva dio perforacije pozicionirane pod kutom od 0° kako bi se primarna ambalaža mogla vidjeti na polici, a zatim i izvući. S obzirom na to da tip perforacije nema veliki utjecaj na krutost i tlačnu čvrstoću, poželjno je daljnje korištenje perforacija 6/2 ili 10/3 koje omogućavaju otvaranje upotrebom manje sile. Prednja strana ambalažne kutije trebala bi biti kraća od bočnih stranica, kako bi dužina perforacije pod kutom od 0° bila čim manja. Pozicioniranje perforacije pod kutom od 20° moguće je koristiti kada oblik primarne ambalaže osigurava krutost i stabilnost, pri čemu je sekundarna ambalaža prvenstveno u funkciji skupne ambalaže.

Prema karakterizaciji mehaničkih svojstava perforiranoga valovitoga kartona, proizašoj iz rezultata ovog rada, na Slici 4.46 je prikazan 3D model koji predstavlja potencijal koji bi osigurao konstrukciju ambalaže s učinkovitijim rješenjem otvaranja, odnosno razdvajanja troslojnog valovitoga kartona E vala. Tip perforacije 10/3 pozicioniran je pod kutom od 70° na bočnim stranicama kutije, dok je prednji dio uži i perforiran na način da nakon otvaranja čuva primarnu ambalažu od klizanja te da je lako dostupan kupcima.



Slika 4.45 Prikaz 3D modela ambalažne kutije s tipom perforacije 10/3, bočno pozicionirane pod kutom od: a) 20°, b) 45° i c) 70°



Slika 4.46 Prikaz optimiziranog 3D modela perforirane ambalažne kutije: crveno – dio koji ostaje na polici, krem – dio koji se nakon razdvajanja odlaže u otpad

## 5. ZAKLJUČAK

Mehanička čvrstoća perforiranoga valovitoga kartona iznimno je bitna u definiranju fizičkih karakteristika komercijalne sekundarne ambalaže. Razumijevanje ponašanja materijala pod opterećenjem i kako se pukotine šire kroz materijal ključno je za projektiranje trajnih, pouzdanih i sigurnih proizvoda.

Provedenim istraživanjem u okviru doktorske disertacije utvrđeno je da su sve ispitivane varijable: kvaliteta valovitoga kartona, tip perforacije te kut pozicioniranja perforacije; imale statistički vidljiv utjecaj na promjene kod pojedinih ispitivanih mehaničkih svojstava perforiranoga valovitoga kartona. Multivarijantnom analizom definirane su varijable perforacije s najznačajnijim utjecajem. Ispitivanja vezana za transport i skladištenje koja su u statistički značajnoj korelaciji, a to su otpornost brida na pritisak te otpornost na savijanje u smjeru MD i CD (Slika 4.29. i Tablica 4.10.), kao najutjecajniju varijablu na promjene imaju varijablu kut. Kod ispitivanja vezanih za razdvajanje valovitoga kartona po perforaciji koja su također u statistički značajnoj korelaciji, a to su ispitivanje prekidne jakosti u ravnini te ispitivanje otpornosti prema cijepanju po Elmendorfu, najveći utjecaj na promjene zabilježen je kod varijable perforacije dok je i varijabla kut imala također vrlo visoke vrijednosti (Slika 4.29. i Tablica 4.10.). Time je verificirana prva hipoteza koja predviđa da tip perforacije smješten na različitim pozicijama valovitoga kartona ima različiti utjecaj na promjenu mehaničkih svojstava valovitoga kartona. Upravo kod spomenutih ispitivanja u statistički značajnoj korelaciji kut od  $0^\circ$ , a nakon njega i kut od  $20^\circ$  imali su uvijek najveći utjecaj na smanjenje mjerene otpornosti.

Druga hipoteza predviđa da tip perforacije ima veći utjecaj na promjenu mehaničkih svojstava nego pozicioniranje perforacije kod svih kombinacija varijabli perforacija na valovitom kartonu. Ta se hipoteza pokazala pogrešnom, jer kao što je objašnjeno ranije, varijabla perforacija zaista je najutjecajnija kod ispitivanja vezanih za razdvajanje valovitoga kartona po perforaciji, međutim, kod ispitivanja vezanih za transport i skladištenje najutjecajnija varijabla na promjenu mehaničkog svojstva je varijabla kut. Činjenica da je varijabla kut utjecajnija od varijable perforacije isključivo kod ispitivanja vezanih za transport i skladištenje, omogućilo je izvrsno kombiniranje tipa perforacije i njeno pozicioniranje pri čemu tip perforacije omogućava jednostavnije i lakše razdvajanje valovitoga kartona, dok se pozicioniranjem perforacije pazi na stabilnost i čvrstoću potrebnu za transport i skladištenje.



Rezultati eksperimentalnih mjerenja i njihova statistička analiza dokazuju da je bilo statistički značajne promjene vrijednosti pri različitim kvalitetama u interakciji tipa perforacije i pozicioniranja perforacije. Također je dokazano da je interakcija kvantitativno značajna, ali ne i kvalitativno. Kvantitativna razlika proizlazi samo iz sastavnica valovitoga kartona. Valoviti karton 131 sa sastavnicama najboljih mehaničkih svojstava imao je i najviše vrijednosti, međutim, trend raspodjele izmjerenih vrijednosti obzirom na interakciju tipa perforacije i pozicioniranja perforacije jednak je za tu kvalitetu kao i za druge kvalitete. Time je verificirana i treća hipoteza koja predviđa da interakcija tipa perforacije i pozicioniranja perforacije ima jednaki trend promjene mehaničkih svojstava kod različitih kvaliteta valovitoga kartona.

Istraživanjem je također utvrđeno da kod ispitivanja vezanih za transport i skladištenje promjenom tipa perforacije pri istoj kvaliteti valovitoga kartona i istom kutu pozicioniranja nema značajne promjene ispitivanog svojstva. S obzirom da varijabala perforacija ima najznačajniji utjecaj kod ispitivanja vezanih za razdvajanje valovitoga kartona, promjenom tipa perforacije ne utječe se na smanjenje mehaničkih svojstava potrebnih za transport i skladištenje, ali omogućava se primjena manje sile za lakše razdvajanje valovitoga kartona po perforaciji. Time je verificirana i četvrta hipoteza koja predviđa da je optimalnim odabirom tipa perforacije ovisno o pozicioniranju perforacije na valovitom kartonu moguće olakšati razdvajanje perforiranoga dijela bez narušavanja ostalih mehaničkih svojstava.

Tipovi perforacije 1/1 i 2/2 imaju najveće vrijednosti kod glavnih efekata, odnosno sveukupnog učinka ispitivanja vezanih za razdvajanja, a i kod ispitivanja vlačne čvrstoće van ravnine su se također pokazali najkritičnijim. Kada se uzme u obzir da promjena tipa perforacije ne umanjuje otpornost na savijanje, niti otpor brida na pritisak, tada je poželjno da se spomenuti tipovi perforacije eliminiraju ili da se njihovo korištenje svede na minimum kako bi se omogućilo razdvajanje primjenom manje sile. Korištenje kritičnih tipova perforacije prihvatljivo je jedino kod pozicioniranja pri  $0^\circ$  kada dolazi do najvećeg smanjenja kod svih ispitivanih svojstava. Poželjna je eliminacija kuta od  $45^\circ$  s obzirom na rezultate ispitivanja vlačne čvrstoće van ravnine bez obzira koji tip perforacije se koristi. Kutovi od  $70^\circ$  i više pokazuju najmanje smanjenje mjenog svojstava bitnih za transport i skladištenje, dok se kod ispitivanja vezanih za razdvajanje valovitoga kartona povećanjem odrezanog dijela u perforacijskoj liniji smanjuje utjecaj varijable kut. Iz navedenog se zaključuje da se korištenjem kuta od oko  $70^\circ$  u kombinaciji s većim odrezanim dijelom perforacijske linije kao što je tip 6/2 ili 10/3 omogućuje najveća moguća čvrstoća potrebna za transport i istovremeno najmanja sila potrebna za razdvajanje valovitoga kartona po perforacijskoj liniji.

Prikazani rezultati karakterizacije valovitoga kartona oslabljenog perforacijama doprinijeti će proširivanju znanstvene baze podataka u području valovitih kartona. U okviru disertacije ostvareni su sljedeći znanstveni doprinosi:

Po prvi se puta sustavno istražuju čimbenici koji imaju utjecaj na smanjenje čvrstoću, ali i na mogućnost razdvajanja valovitoga kartona oslabljenog perforacijama.

Utvrđen je najznačajniji utjecaj varijabli perforacije na svako mjereno mehaničko svojstvo perforiranoga valovitoga kartona što omogućuje kombiniranje tipa perforacije i pozicioniranja perforacije u svrhu jednostavnijeg razdvajanja uz zadržavanje postojeće čvrstoće.

Utvrđen je odnos i kvantificirana povezanost varijabli perforacije unutar i između mehaničkih svojstava perforiranoga valovitoga kartona. Temeljem utvrđene korelacije može se zaključiti da se jedna varijabla povećava ili smanjuje u skladu s promjenom druge varijable.

Utvrđena je nemogućnost cijepanja valovitoga kartona po perforacijskoj liniji, kod koje je omjer odrezanog i neodrezanog dijela 1:1, kada je smjer sile pod kutom od  $45^\circ$  u odnosu na smjer pružanja vala.

Utvrđeno je da se povećanjem odrezanog dijela u perforacijskoj liniji smanjuje utjecaj kuta pozicioniranja perforacije na vlačna svojstva, odnosno na razdvajanje valovitoga kartona.

Predstavljen je model koji opisuje utjecaj različitih tipova i pozicioniranja perforacija na mogućnost razdvajanja dijelova valovitoga kartona po perforaciji bez ugrožavanja stabilnosti takve sekundarne ambalaže.

Cilj ovog istraživanja je u potpunosti ostvaren. Daljnja istraživanja trebala bi biti u smjeru eksperimentalne provjere dobivenih rezultata. Potrebno je prvo konstruirati i izraditi ambalažne kutije prema smjernicama iz prikazanog istraživanja s točno definiranim tipovima perforacija pozicioniranim pod definiranim kutovima od različitih kvaliteta valovitoga kartona. Zatim je potrebno ispitati čvrstoću takve ambalažne kutije kao i mogućnost otvaranja iste te usporediti rezultate ovisno o kvalitetama valovitoga kartona. Također bi bilo potrebno istražiti ima li visina pozicioniranja perforacije na bočnim stranicama utjecaj na čvrstoću kutije ili na mogućnost razdvajanja po perforacijskoj liniji.

## 6. LITERATURA

- [1] The European Federation for Print and Digital Communication, “Intergraf Economic Report: Evolution of the European graphic industry,” Brussels., Belgium, 2019.
- [2] Nampak, “Sustainability Report 2021,” Sandton, 2021. [Online]. Available: <http://www.nampak.com/Content/Documents/About/sustainability-report-2021.pdf>.
- [3] K. A. Jackson and L. B. Burke, “An Assessment of the Value of Retail-Ready Packaging,” 2008.
- [4] M. J. Kirwan, “Solid board packaging,” in *Handbook of Paper and Paperboard Packaging Technology*, Second., M. J. Kirwan, Ed. John Wiley & Sons, Ltd., 2013, p. 12.
- [5] J. Franjković, D. Dujak, and M. Ferenčić, “Marketing Opportunities of Retail Ready Packaging – the Case of Croatian Food Manufacturers,” *Ekon. misao i praksa časopis Sveučilista u Dubrovniku*, vol. 26, no. 1, pp. 85–106, 2017, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/320584190> Marketing opportunities of Retail Ready Ppackaging - the case of Croatian food manufacturers.
- [6] D. Dujak, M. Ferenčić, and J. Franjković, “Retail Ready Packaging – What ’ S In It For Food Manufacturers?,” 2014, pp. 31–42.
- [7] Smurfit Kappa, “Marketing on the shelf exactly how in control are you?,” 2015. [Online]. Available: [https://www.smurfitkappa.com/gr/-/m/files/product-downloads/services/shopper\\_marketing\\_whitepaper\\_en.pdf?rev=-1](https://www.smurfitkappa.com/gr/-/m/files/product-downloads/services/shopper_marketing_whitepaper_en.pdf?rev=-1).
- [8] J. Fotak, “Interakcija radnika sa sekundarnom ambalažom s dodatnom vrijednosti.” Zagreb, p. 53, 2018.
- [9] T. Tatiya, “Developing a Design Index for Shelf Ready Packaging,” 2014.
- [10] “NN 88/2015: Pravilnik o ambalaži i otpadnoj ambalaži,” Narodne novine d.d., 2015. [Online]. Available: [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2015\\_08\\_88\\_1735.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2015_08_88_1735.html).
- [11] W. Soroka, *Fundamentals of Packaging Technology, fourth edition*. Naperville: Institute of Packaging Professionals, 2009.

- [12] C. Söremark and J. Tryding, "Packaging," in *Pulp and Paper Chemistry and Technology, Paper Products Physics and Technology*, M. Ek, G. Gellerstedt, and G. Henriksson, Eds. Berlin: De Gruyter, 2009, p. 29.
- [13] ECR Europe and EUROPEN, "Packaging in the Sustainability Agenda: A Guide for Corporate Decision Makers." ECR Europe, Brussels, p. 48, 2009, [Online]. Available: [www.ecrnet.org](http://www.ecrnet.org).
- [14] "Direktiva europskog parlamenta i vijeća 94/62/EZ." Službeni list Europske unije, p. 14, 1994.
- [15] N. Stričević, *Suvremena ambalaža I dio Općenito o ambalaži*, 1. izdanje. Zagreb: Školska knjiga, 1982.
- [16] T. Lazibat, "Ambalaža, pakiranje, skladištenje i transport robe," in *Poznavanje robe i upravljanje kvalitetom*, Zagreb: Sinergija - nakladništvo d.o.o., 2005, p. 440.
- [17] K. Vergheese, E. Crossin, and M. Jollands, "Packaging Materials," in *Packaging for Sustainability*, K. Vergheese, H. Lewis, and L. Fitzpatrick, Eds. London: Springer-Verlag, 2012, p. 384.
- [18] S. Jamnicki, "Evaluacija prikladnosti različitih klasa recikliranih papira za izradu zdravstveno ispravne prehrambene ambalaže," University of Zagreb Faculty of Graphic Arts, 2011.
- [19] CEPI, "Key Statistics 2021 European pulp & paper industry," Brussels, 2021. [Online]. Available: <https://www.cepi.org/wp-content/uploads/2022/07/Key-Statistics-2021-Final.pdf>.
- [20] R. Coles, "Paper and paperboard innovations and developments for the packaging of food, beverages and other fast-moving consumer goods," in *Trends in Packaging of Food, Beverages and Other Fast-Moving Consumer Goods (FMCG)*, N. Farmer, Ed. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2013, pp. 187–220.
- [21] B. Steenberg, J. Kubat, and L. Rudstrom, "Competition in rigid packaging materials," vol. 73, no. 4, pp. 77–92, 1970.
- [22] E. Sverige, "Packaging - Guide." ECR Sweden, Stockholom, p. 72, 2018, [Online]. Available: [www.ecr.se](http://www.ecr.se).

- [23] ECR Europe, “Shelf Ready Packaging (Retail Ready Packaging) Addressing the challenge: a comprehensive guide for a collaborative approach.” ECR Europe, p. 51, 2006, [Online]. Available: [https://www.ecr.digital/wp\\_content/uploads/2016/09/ECR-Bericht\\_Shelf\\_Ready\\_Packaging.pdf](https://www.ecr.digital/wp_content/uploads/2016/09/ECR-Bericht_Shelf_Ready_Packaging.pdf).
- [24] Efficinet Consumer Respose Europe, “Shelf Ready Packaging Addressing the challenge: a comprehensive guide for a collaborative approach.” p. 51, 2007.
- [25] L. Flanigan, “Shelf-Ready Packaging Creates Opportunities to Improve Branding,” 2017. <https://www.packagingstrategies.com/articles/94348-shelf-ready-packaging-creates-opportunities-to-improve-branding>.
- [26] T. Theppituck, M. Watanabe, K. Ono, and A. Paskevicius, “Investigation of Shelf Ready Packaging Design Solutions,” pp. 3254–3261, 2013.
- [27] D. Twede, S. E. M. Selke, D.-P. Kamdem, and D. Shires, *Cartons, Crates and Corrugated Board: Handbook of paper and Wood Packaging Technology, Second Edition*. DEStech Publications, Inc., 2015.
- [28] K. Niskanen, *Mechanics of Paper Products*. Berlin/Boston: De Gruyter, 2012.
- [29] A. Dekker, “Corrugated fibreboard packaging,” in *Handbook of Paper and Paperboard Packaging Technology, Second.*, M. J. Kirwan, Ed. A John Wiley & Sons, Ltd., 2013, p. 37.
- [30] A. Golubović, *Svojstva i ispitivanje papira*. Zagreb: Viša grafička škola, 1993.
- [31] C. Fellers, “The Structure of Paper and its Modelling,” in *Pulp and Paper Chemistry and Technology, Paper Products Physics and Technology*, M. Ek, G. Gellerstedt, and G. Henriksson, Eds. Berlin: De Gruyter, 2009, p. 24.
- [32] K. Niskanen and P. Pakarinen, “Paper structure,” in *Paper Physics, Second.*, K. Niskanen, Ed. Helsinki: Finnish Paper Engineers’ Association/Paperi ja Puu Oy, 2008, p. 48.
- [33] J. Sirvio, “Fibres and bonds,” in *Paper Physics, Second.*, K. Niskanen, Ed. Helsinki: Finnish Paper Engineers’ Association/Paperi ja Puu Oy, 2008, p. 34.
- [34] O. Tillmann, “Paper and Board Grades and Their Properties,” in *Handbook of Paper and Board*, H. Holik, Ed. 2006, pp. 446–466.

- [35] K. Niskanen, *Mechanics of Paper Products*. De Gruyter, 2012.
- [36] R. E. Mark, J. C. Habeger, J. Borch, and M. B. Lyne, Eds., *Handbook of Physical Testing of Paper: Volume 1, Second Edition*. Marcel Dekker Inc., 2002.
- [37] V. D. Luong *et al.*, “Finite Element Simulation of the Strength of Corrugated Board Boxes Under Impact Dynamics,” *Proc. Int. Conf. Adv. Comput. Mech.*, pp. 369–380, 2018, doi: 10.1007/978-981-10-7149-2.
- [38] R. Hägglund and L. A. Carlsson, “Packaging performance,” in *Mechanics of Paper Products*, Second Edi., S. Östlund and K. Niskanen, Eds. Berlin/Boston: De Gruyter, 2021, p. 20.
- [39] A. Rodin, *Ambalaža od valovitog kartona*. Zagreb: Progres, 1964.
- [40] J. Park, M. Park, D. S. Choi, and H. M. Jung, “Finite Element-Based Simulation for Edgewise Compression Behavior of Corrugated Paperboard for Packaging of Agricultural Products,” *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 19, 2020, doi: 10.3390/app10196716.
- [41] T. Watkins, “Corrugated board packaging,” in *Packaging technology - Fundamentals, materials and processes*, A. Emblem and H. Emblem, Eds. Woodhead Publishing Limited, 2012, p. 70.
- [42] V. Potisk, *Grafička dorada*. Zagreb: Školska knjiga, 1997.
- [43] N. Stričević, *Suvremena ambalaža II dio Ambalažni materijali*. Zagreb: Školska knjiga, 1983.
- [44] D. K. Sarker, *Packaging Technology and Engineering Pharmaceutical, Medical and Food Applications*. Croydon: John Wiley & Sons Ltd, 2020.
- [45] S. Johnson and R. Popil, “Corrugated board bonding defect visualization and characterization,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 59, pp. 105–114, 2015, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2015.02.003.
- [46] “DIN 55468–1: 2004-08 Packaging materials - Corrugated board - Part 1: Requirements, testing.” .
- [47] J. F. Hanlon, R. J. Kelsey, and H. E. Forcinio, *Handbook of package engineering*, Third. 1998.
- [48] G. Blokdyk, *Packaging engineering*, 2nd ed. Emereo, 2018.

- [49] V. Kruz, *Nauka o čvrstoći*, 6. izdanje. Zagreb: Školska knjiga, 1976.
- [50] C. Fellers, “Paper Physics,” in *Pulp and Paper Chemistry and Technology, Paper Products Physics and Technology*, M. Ek, G. Gellerstedt, and G. Henricsson, Eds. Berlin: De Gruyter, 2009, p. 41.
- [51] Z. Aboura, N. Talbi, S. Allaoui, and M. L. Benzeggagh, “Elastic behavior of corrugated cardboard: experiments and modeling,” *Compos. Struct.*, vol. 63, no. 1, pp. 53–62, Jan. 2004, doi: 10.1016/S0263-8223(03)00131-4.
- [52] I. Kajanto, “Structural mechanics of paper and board,” in *Paper Physics*, Second Edi., K. Niskanen, Ed. Finnish Paper Engineers’ Association/Paperi ja Puu Oy, 2008, p. 360.
- [53] M. Petri, “Orthotropic elastic – plastic material model for paper materials,” vol. 40, pp. 5599–5620, 2003, doi: 10.1016/S0020-7683(03)00318-4.
- [54] J. M. Gere and B. J. Goodno, *Mechanics of Materials*, 8th ed. Global Engineering: Christopher M. Shortt, 2013.
- [55] M. Alava and K. Niskanen, “In-plane tensile properties,” in *Paper Physics*, Second Edi., K. Niskanen, Ed. Finnish Paper Engineers’ Association/Paperi ja Puu Oy, 2008, p. 47.
- [56] S. Podrug, “Mehanika loma.” Sveučilište u Splitu Fakultet elektronike, strojarstva i brodogradnje, Split, p. 44, 2009, [Online]. Available: [http://marjan.fesb.hr/~spodrug/mehanika\\_loma/Mehanika\\_loma - predavanja.pdf](http://marjan.fesb.hr/~spodrug/mehanika_loma/Mehanika_loma_-_predavanja.pdf).
- [57] J. L. Gonzalez-Velazquez, *Fractography and Failure Analysis*, 2nd ed. Springer Nature, 2018.
- [58] Smithers, “The Future of Retail Ready Packaging to 2024.,” 2019.
- [59] E. Boillon, “A Study of Corrugated Shelf-Ready Packaging ( SRP ) Appropriate to Colgate Palmolive Products,” Rochester Institute of Technology, 2007.
- [60] A. Hermansson, “Openability of retail packages,” *Packag. Technol. Sci.*, vol. 12, no. 5, pp. 219–223, 1999, doi: 10.1002/(SICI)1099-1522(199909/10)12:5<219::AID-PTS477>3.0.CO;2-D.
- [61] A. Ybxoll, R. Janson, S. R. Bradbury, J. Langley, J. Wearn, and S. Hayes, “Openability: Producing design limits for consumer packaging,” *Packag. Technol. Sci.*,

- vol. 19, no. 4, pp. 219–225, 2006, doi: 10.1002/pts.725.
- [62] K. L. Yam, *The Wiley Encyclopedia of Packaging Technology*, 3rd ed. John Wiley & Sons, Inc., 2009.
- [63] A. Frey, “US 2004/0071940 A1 - Corrugated paperboard including tear line,” 2004.
- [64] J. S. Brlttaln, “US 2011/0259947 A1 - Retail- Ready Packaging,” 2011.
- [65] Ya-Chen Lu, “US 2016/0318655A1 - Easy Open Carton,” 2016.
- [66] W. D. Keefe and C. Stream, “US 8,752,708 B2 - Shipping Carton Convertible To Display Configuration,” 2014.
- [67] D. G. Couture, “US 2010/0276333 A1 - Shelf-Ready Shipper Display System,” 2010.
- [68] H. Wischusen III, “US 2006/0054676A1 - Easy Open Container,” 2006.
- [69] P. Pezzoli, “US 2008/0078823 A1 - Dual Dispensing Container,” 2008.
- [70] S. Nagasawa, M. Uehara, and C. Matsumoto, “Effects of mechanical conditions on tearing characteristics of zipper band made of white-clay-coated paperboard (Dependency of tearing characteristics on length of connecting portions, width of band and pulling direction),” *J. Adv. Mech. Des. Syst. Manuf.*, vol. 15, no. 1, pp. 1–10, 2021, doi: 10.1299/JAMDSM.2021JAMDSM0009.
- [71] S. Nagasawa, M. Uehara, C. Matsumoto, H. Kambe, and W. Jina, “Estimation of stress and displacement around nick zone of zipper pull tab formed on paperboard,” in *Proceedings of the JSME 2017 International Conference on Materials and Processin*, 2017, pp. 1–6.
- [72] J. Bota and G. Petković, “Evaluation of zipper tear strip design structure for paperboard packaging,” *Int. Symp. Graph. Eng. Des.*, no. November, pp. 299–305, 2020, doi: 10.24867/GRID-2020-p32.
- [73] D. Wang and C. Ge, “Opening of Perforated Folding Cartons: From the Field to Testing,” *Packag. Technol. Sci.*, vol. 30, no. 8, pp. 411–425, Aug. 2017, doi: 10.1002/pts.2266.
- [74] D. Wang and D. Jacobs, “Qualification of Test Method for Package Perforation Evaluation Qualification of Test Method for Package Perforation Evaluation,” 2016.



- [75] T. Garbowski, T. Gajewski, and J. K. Grabski, “Estimation of the Compressive Strength of Corrugated Cardboard Boxes with Various Openings,” *Energies*, vol. 14, no. 155, pp. 1–20, 2021, doi: 10.3390/en14010155.
- [76] D. Mrowczyński, T. Garbowski, and A. Knitter-Piątkowska, “Estimation of the Compressive Strength of Corrugated Board Boxes with Shifted Creases on the Flaps,” *Materials (Basel)*, vol. 14, no. 5181, p. 18, 2021, doi: 10.3390/ma14185181.
- [77] T. Garbowski, T. Gajewski, and J. K. Grabski, “Estimation of the compressive strength of corrugated cardboard boxes with various perforations,” *Energies*, vol. 14, no. 4, pp. 1–14, 2021, doi: 10.3390/en14041095.
- [78] T. Garbowski, A. Knitter-Piątkowska, and D. Mrówczyński, “Numerical homogenization of multi-layered corrugated cardboard with creasing or perforation,” *Materials (Basel)*, vol. 14, no. 14, 2021, doi: 10.3390/ma14143786.
- [79] N. Neidoni, V. Bolos, and M. I. Buzdugan, “Experimental Optimization of Perforations for Corrugated Board Boxes,” *Interdisciplinarity Eng. Int. Conf.*, pp. 287–291, 2009.
- [80] I. Šarčević, D. Gregor-Svetec, and D. Banić, “Validation of Elmendorf Method for Testing Perforated Corrugated Cardboard,” *Teh. Vjesn.*, vol. 29, no. 6, pp. 1883–1888, 2022, doi: 10.17559/TV-20211126090308.
- [81] “ISO 536:2019 Paper and board — Determination of grammage.” .
- [82] K. Q. Kellicutt, “How liner/medium weight relationship affect the strength of corrugated boxboard,” *Fibre Contain.*, vol. 79, no. 8, pp. 51–56, 1972.
- [83] G. G. Maltenfort, “Compression load distribution on corrugated boxes,” *Pap. Packag.*, vol. 65, no. 9, pp. 71–72, 1980.
- [84] M. W. J. Johnson, T. J. Urbanik, and D. W. E., “Maximising top-to-bottom compressive strength,” *Pap. Packag.*, vol. 65, no. 4, pp. 98–108, 1980.
- [85] T. J. Urbanik, “Principle of load sharing in corrugated fibreboard,” *Pap. Packag.*, vol. 66, no. 11, pp. 122–128, 1989.
- [86] “ISO 534:2011 Paper and board — Determination of thickness, density and specific volume.” .
- [87] “ISO 3037:2013 Corrugated fibreboard — Determination of edgewise crush resistance

- (unwaxed edge method).” .
- [88] R. C. McKee, J. W. Gander, and J. . Wachuta, “Compression strength formula for corrugated boxes,” *Pap. Packag.*, vol. 48, no. 8, pp. 149–159, 1963.
- [89] “Crush Test pictures.”  
<https://i.pinimg.com/originals/cc/04/c6/cc04c6687d9728aec5a7ecb268f746db.jpg>.
- [90] T. S. Fadiji, T. M. Berry, and U. L. Opara, “Investigating the Mechanical Properties of Paperboard Packaging Material for Handling Fresh Produce Under Different Environmental Conditions : Experimental Analysis and Finite Element Modelling Investigating the Mechanical Properties of Paperboard Packagi,” *J. Appl. Packag. Res.*, vol. 9, no. 2, pp. 1–32, 2017.
- [91] “ISO 2758:2014 Board — Determination of bursting strength.” .
- [92] “ISO 5628:2019 Paper and board — Determination of bending stiffness — General principles for two-point, three-point and four-point methods.” .
- [93] R. C. McKee, J. W. Gander, and J. . Wachuta, “Flexural stiffness of corrugated board,” *Pap. Packag.*, vol. 46, no. 11, pp. 4–9, 1962, [Online]. Available:  
[https://smartech.gatech.edu/bitstream/handle/1853/1687/1108-4\\_000\\_04031962.pdf](https://smartech.gatech.edu/bitstream/handle/1853/1687/1108-4_000_04031962.pdf).
- [94] B. Frank, “Corrugated Box Compression-A Literature Survey,” *Packag. Technol. Sci.*, vol. 27, no. 2, pp. 105–128, Feb. 2013, doi: 10.1002/pts.2019.
- [95] “ISO 1924-2:2008 Paper and board — Determination of tensile properties — Part 2: Constant rate of elongation method (20 mm/min).” .
- [96] D. Caulfield and D. Gunderson, “Paper Testing And Strength Characteristics,” *TAPPI Proc. 1988 Pap. pereservation Symp.*, pp. 31–40, 1988.
- [97] “ISO 1974:2012 Paper — Determination of tearing resistance — Elmendorf method.” .
- [98] I. Šarčević, D. Gregor-Svetec, and D. Banić, “Correlation between tensile strength and tear resistance of perforated e flute corrugated board,” in *MATRIB 2021. Materials, Tribology and Recycling. Book of Abstracts*, 2022.
- [99] M. Hollander, D. A. Wolfe, and E. Chicken, *Nonparametric Statistical Methods*, 3rd ed. Wiley Global Research (STMS), 2013.
- [100] J. Dickinson Gibbons and S. Chakraborti, *Nonparametric Statistical Inference*, 4th ed.

- Marcel Dekker Inc, 2003.
- [101] R. A. Johnson and D. W. Wichern, *Applied Multivariate Statistical Analysis*, 6th ed. Pearson Prentice Hall, 2007.
- [102] J. Fox, *Applied Regression Analysis and Generalized Linear Models*. SAGE Publ., 2015.
- [103] E. Kulinskaya, S. Morgenthaler, and R. G. Staudte, *Meta Analysis: A Guide to Calibrating and Combining Statistical Evidence*. Wiley Global Research (STMS), 2008.
- [104] V. Ng and R. A. Cribbie, “Using the Gamma Generalized Linear Model for Modeling Continuous, Skewed and Heteroscedastic Outcomes in Psychology,” *Curr. Psychol.*, pp. 198–217, 2017, doi: 10.4324/9781315165547-12.
- [105] A. J. Dobson and A. G. Barnett, *An Introduction to Generalized Linear Models (C & Hall/CRC Texts in Statistical Science)*, 4th ed. Chapman and Hall/CRC, 2018.
- [106] R. B. Millar, *Maximum Likelihood Estimation and Inference: With Examples in R, SAS and ADMB*, 1st ed. Wiley, 2011.
- [107] P. R. Hinton, *Statistics Explained*, 3rd ed. 2014.
- [108] A. G. Asuero, A. Sayago, and A. G. González, “The correlation coefficient: An overview,” *Crit. Rev. Anal. Chem.*, vol. 36, no. 1, pp. 41–59, 2006, doi: 10.1080/10408340500526766.
- [109] M. Dekker, *Handbook of Physical and Mechanical Testing of Paper and Paperboard*. Marcel Dekker Inc, 1983.
- [110] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 10th ed. Wiley, 2019.
- [111] J. Pallant, *SPSS survival manual: a step by step guide to data analysis using SPSS*, 7th Editio. London, 2020.
- [112] M. Udovičić, K. Baždarić, L. Bilić-Zulle, and M. Petrovečki, “What we need to know when calculating the coefficient of correlation?,” *Biochem. Medica*, vol. 17, no. 1, pp. 10–15, 2007, doi: 10.11613/bm.2007.002.
- [113] T. Nordstrand, “Basic testing and strength design of corrugated board and containers,” Lund University, 2003.

# PRILOZI

## PRILOG 1: POPIS SLIKA

Slika 2.1. Sustav pakiranja: primarna, sekundarna i tercijarna ambalaža [13]

Slika 2.2. Primjer ambalaže za izlaganje na police (Shelf-Ready Packaging)

Slika 2.3. Ilustrirani primjer optimiziranih dimenzija ambalažne kutije s obzirom na policu [22]

Slika 2.4. Pet zahtjeva komercijalne ambalaže za izlaganje na police, tzv. „5 easy“ [22] [25]

Slika 2.5. Otvaranje ambalaže za izlaganje na police: a) princip poklopac-dno; b) po perforaciji

Slika 2.6. Ortotropija valovitoga kartona [38]

Slika 2.7. Položaj valovitoga kartona kod ambalažne kutije [40]

Slika 2.8. Nazivi sastavnica troslojnog valovitoga kartona [41]

Slika 2.9. Poprečni presjek neuspjelog vezivanja kod valovitoga kartona: 1. u ljepilu; 2. kod valovitoga sloja; 3. unutar valovitoga sloja; 4. na spoju ljepila i ravnoga sloja; i 5. unutar ravnoga sloja [45].

Slika 2.10. Standardne veličine vala [38]

Slika 2.11. Valoviti kartoni različitih slojeva [38]

Slika 2.12. Ilustrirani prikaz nosača čelične trake, gumenih izbacivača i protuploče [38]

Slika 2.13. Linija za perforiranje

Slika 2.14. Tri osnovna opterećenja s pripadajućim tipovima pukotine

Slika 2.15. Koncentracija naprezanja kod eliptične pukotine [57]

Slika 3.1. Tipovi perforacija

Slika 3.2. Definiranje uzoraka: a) dužina uzorka paralelna sa smjerom vala, perforacija smještena pod definiranim kutom; b) uzorak rezan pod definiranim kutom, perforacija smještena po sredini uzorka

Slika 3.3. Ilustrirani prikaz uzoraka kod ispitivanja vezanih za transport i skladištenje te kod ispitivanja vezanih za razdvajanje valovitoga kartona po perforaciji

Slika 3.4. a) nosač čeličnih traka; b) odštancana ploča valovitoga kartona

Slika 3.5. Shematski prikaz postavljanja uzorka za testiranje ECT metodom [89]

Slika 3.6. Prikaz smjera djelovanja sile odnosno tlaka kod metoda ECT i BST

Slika 3.7. Shematski prikaz savijanja ambalažne kutije od valovitoga kartona i princip testa savijanja u tri točke [94]

Slika 3.8. a) Uzorak za mjerenje vlačne čvrstoće u ravnini (perforacija okomita na smjer sile);  
b) Uzorak za mjerenje vlačne čvrstoće van ravnine (perforacija paralelna na smjer sile)

Slika 4.1. Otpornost brida na pritisak valovitoga kartona kvaliteta 111 ovisno o tipu perforacije i kutu pozicioniranja perforacije te usporedba s neperforiranim uzorkom iste kvalitete

Slika 4.2. Otpornost brida na pritisak valovitoga kartona kvaliteta 131 ovisno o tipu perforacije i kutu pozicioniranja perforacije te usporedba s neperforiranim uzorkom iste kvalitete

Slika 4.3. Otpornost brida na pritisak valovitoga kartona kvaliteta 177 ovisno o tipu perforacije i kutu pozicioniranja perforacije te usporedba s neperforiranim uzorkom iste kvalitete

Slika 4.4. Otpornost brida na pritisak valovitoga kartona kvaliteta 177L ovisno o tipu perforacije i kutu pozicioniranja perforacije te usporedba s neperforiranim uzorkom iste kvalitete

Slika 4.5. Indeks pucanja valovitoga kartona kvaliteta 111 ovisno o tipu perforacije i kutu pozicioniranja perforacije te usporedba s neperforiranim uzorkom iste kvalitete

Slika 4.6. Indeks pucanja valovitoga kartona kvaliteta 131 ovisno o tipu perforacije i kutu pozicioniranja perforacije te usporedba s neperforiranim uzorkom iste kvalitete

Slika 4.7. Indeks pucanja valovitoga kartona kvaliteta 177 ovisno o tipu perforacije i kutu pozicioniranja perforacije te usporedba s neperforiranim uzorkom iste kvalitete

Slika 4.8. Indeks pucanja valovitoga kartona kvaliteta 177L ovisno o tipu perforacije i kutu pozicioniranja perforacije te usporedba s neperforiranim uzorkom iste kvalitete

Slika 4.9. Otpornost na savijanje (MD) valovitoga kartona kvaliteta 111 ovisno o tipu perforacije i kutu pozicioniranja perforacije te usporedba s neperforiranim uzorkom iste kvalitete

Slika 4.10. Otpornost na savijanje (MD) valovitoga kartona kvaliteta 131 ovisno o tipu perforacije i kutu pozicioniranja perforacije te usporedba s neperforiranim uzorkom iste kvalitete

Slika 4.11. Otpornost na savijanje (MD) valovitoga kartona kvaliteta 177 ovisno o tipu perforacije i kutu pozicioniranja perforacije te usporedba s neperforiranim uzorkom iste kvalitete

Slika 4.12. Otpornost na savijanje (MD) valovitoga kartona kvaliteta 177L ovisno o tipu perforacije i kutu pozicioniranja perforacije te usporedba s neperforiranim uzorkom iste kvalitete

Slika 4.13. Otpornost na savijanje (CD) valovitoga kartona kvaliteta 111 ovisno o tipu perforacije i kutu pozicioniranja perforacije te usporedba s neperforiranim uzorkom iste kvalitete

Slika 4.14. Otpornost na savijanje (CD) valovitoga kartona kvaliteta 131 ovisno o tipu perforacije i kutu pozicioniranja perforacije te usporedba s neperforiranim uzorkom iste kvalitete

Slika 4.15. Otpornost na savijanje (CD) valovitoga kartona kvaliteta 177 ovisno o tipu perforacije i kutu pozicioniranja perforacije te usporedba s neperforiranim uzorkom iste kvalitete

Slika 4.16. Otpornost na savijanje (CD) valovitoga kartona kvaliteta 177L ovisno o tipu perforacije i kutu pozicioniranja perforacije te usporedba s neperforiranim uzorkom iste kvalitete

Slika 4.17. Indeks kidanja perforiranoga valovitoga kartona kvalitete 111 u ravnini ovisno o tipu perforacije i kutu pozicioniranja perforacije

Slika 4.18. Indeks kidanja perforiranoga valovitoga kartona kvalitete 131 u ravnini ovisno o tipu perforacije i kutu pozicioniranja perforacije

Slika 4.19. Indeks kidanja perforiranoga valovitoga kartona kvalitete 177 u ravnini ovisno o tipu perforacije i kutu pozicioniranja perforacije

Slika 4.20. Indeks kidanja perforiranoga valovitoga kartona kvalitete 177L u ravnini ovisno o tipu perforacije i kutu pozicioniranja perforacije

Slika 4.21. Indeks kidanja perforiranoga valovitoga kartona kvalitete 111 van ravnine ovisno o tipu perforacije i kutu pozicioniranja perforacije

Slika 4.22. Indeks kidanja perforiranoga valovitoga kartona kvalitete 131 van ravnine ovisno o tipu perforacije i kutu pozicioniranja perforacije

Slika 4.23. Indeks kidanja perforiranoga valovitoga kartona kvalitete 177 van ravnine ovisno o tipu perforacije i kutu pozicioniranja perforacije

Slika 4.24. Indeks kidanja perforiranoga valovitoga kartona kvalitete 177L van ravnine ovisno o tipu perforacije i kutu pozicioniranja perforacije

Slika 4.25. Indeks cijepanja perforiranoga valovitoga kartona kvalitete 111 ovisno o tipu perforacije i kutu pozicioniranja perforacije

Slika 4.26. Indeks cijepanja perforiranoga valovitoga kartona kvalitete 131 ovisno o tipu perforacije i kutu pozicioniranja perforacije

Slika 4.27. Indeks cijepanja perforiranoga valovitoga kartona kvalitete 177 ovisno o tipu perforacije i kutu pozicioniranja perforacije

Slika 4.28. Indeks cijepanja perforiranoga valovitoga kartona kvalitete 177L ovisno o tipu perforacije i kutu pozicioniranja perforacije

Slika 4.29. Korelacijska matrica zavisnih varijabli

Slika 4.30. Rezultati ispitivanja otpornosti brida na pritisak prikazani po kvaliteti-perforaciji-kutu. Točke su pojedinačni podaci, kvadrati označavaju kvartile, crte su unutarnje ograde, vodoravne linije predstavljaju povezane medijane.

Slika 4.31. Prilagođene srednje vrijednosti otpornosti brida na pritisak prema: a) kvaliteti valovitoga kartona, b) tipu perforacije te c) linearnim i kvadratnim trendovima preko vrijednosti kuta

Slika 4.32. Rezultati ispitivanja otpornosti jačine pucanja prikazani po kvaliteti-perforaciji-kutu. Točke su pojedinačni podaci, kvadrati označavaju kvartile, crte su unutarnje ograde, vodoravne linije predstavljaju povezane medijane.

Slika 4.33. Prilagođene srednje vrijednosti indeksa pucanja prema: a) kvaliteti valovitoga kartona, b) tipu perforacije te c) linearnim i kvadratnim trendovima preko vrijednosti kuta

Slika 4.34. Rezultati ispitivanja otpornosti na savijanje u smjeru MD prikazani po kvaliteti-perforaciji-kutu. Točke su pojedinačni podaci, kvadrati označavaju kvartile, crte su unutarnje ograde, vodoravne linije predstavljaju povezane medijane.

Slika 4.35. Prilagođene srednje vrijednosti otpornosti na savijanje (MD) prema: a) kvaliteti valovitoga kartona, b) tipu perforacije te c) linearnim i kvadratnim trendovima preko vrijednosti kuta

Slika 4.36. Rezultati ispitivanja otpornosti na savijanje u smjeru CD prikazani po kvaliteti-perforaciji-kutu. Točke su pojedinačni podaci, kvadrati označavaju kvartile, crte su unutarnje ograde, vodoravne linije predstavljaju povezane medijane.

Slika 4.37. Prilagođene srednje vrijednosti otpornosti na savijanje (CD) prema: a) kvaliteti valovitoga kartona, b) tipu perforacije te c) linearnim i kvadratnim trendovima preko vrijednosti kuta

Slika 4.38. Rezultati ispitivanja prekidne čvrstoće u ravnini po kvaliteti-perforaciji-kutu. Točke su pojedinačni podaci, kvadrati označavaju kvartile, crte su unutarnje ograde, vodoravne linije predstavljaju povezane medijane.

Slika 4.39. Prilagođene srednje vrijednosti indeksa kidanja prema: a) kvaliteti valovitoga kartona, b) tipu perforacije te c) linearnim i kvadratnim trendovima preko vrijednosti kuta

Slika 4.40. Rezultati ispitivanja prekidne čvrstoće van ravnine po kvaliteti-perforaciji-kutu (povezani box-plotovi) i vjerojatnost nepredviđenog razdvajanja označena s 0 ili 1 (1 prikazani crnim stupcima gdje su se uzorci nepredviđeno razdvojili).

Slika 4.41. Rezultati ispitivanja otpornosti prema cijepanju prikazani po kvaliteti-perforaciji-kutu. Točke su pojedinačni podaci, kvadrati označavaju kvartile, crte su unutarnje ograde, vodoravne linije predstavljaju povezane medijane.

Slika 4.42. Prilagođene srednje vrijednosti indeksa cijepanja prema: a) kvaliteti valovitoga kartona, b) tipu perforacije te c) linearnim i kvadratnim trendovima preko vrijednosti kuta

Slika 4.43. Primjeri neuspjelih uzoraka rezanih pod  $45^\circ$  u odnosu na smjer pružanja vala kod mjerenja vlačne čvrstoće van ravnine

Slika 4.44. Prikaz posmičnog naprezanja  $\tau_{xz}$  u smjeru najmanjeg otpora na deformaciju (smjer MD)

Slika 4.45 Prikaz 3D modela ambalažne kutije s tipom perforacije 10/3, bočno pozicionirane pod kutom od: a) 20°, b) 45° i c) 70°

Slika 4.46 Prikaz optimiziranog 3D modela perforirane ambalažne kutije: crveno – dio koji ostaje na polici, krem – dio koji se nakon razdvajanja odlaže u otpad



## PRILOG 2: POPIS TABLICA

Tablica 2.1. Jednostavno otvaranje ambalaže spremne za police

Tablica 2.2. Vrste valova i njihove dimenzije prema DIN 55468–1: 2004-08 [46]

Tablica 3.1. Normativ kvaliteta valovitoga kartona

Tablica 4.1. Masa, gramatura i debljina ispitivanih kvaliteta troslojnoga valovitoga kartona E vala

Tablica 4.2 Otpornost brida na pritisak ( $R$ ) perforiranoga i neperforiranoga valovitoga kartona kvalitete 111, 131, 177 i 177L

Tablica 4.3. Indeks pucanja ( $x$ ) perforiranoga i neperforiranoga valovitoga kartona kvalitete 111, 131, 177 i 177L

Tablica 4.4. Maksimalna dozvoljena deformacija ( $d_a$ ) za valoviti karton kvalitete 111, 131, 177 i 177L

Tablica 4.5. Otpornost na savijanje ( $S$ ) perforiranoga i neperforiranoga valovitoga kartona kvalitete 111, 131, 177 i 177L u smjeru pružanja vala (MD)

Tablica 4.6. Otpornost na savijanje ( $S$ ) perforiranoga i neperforiranoga valovitoga kartona kvalitete 111, 131, 177 i 17L u smjeru okomitom na smjer pružanja vala (CD)

Tablica 4.7 Indeks kidanja ( $I$ ) perforiranoga valovitoga kartona kvalitete 111, 131, 177, 177L mjerenog u ravnini

Tablica 4.8. Indeks kidanja ( $I$ ) perforiranoga valovitoga kartona kvalitete 111, 131, 177, 177L mjerenog van ravnine

Tablica 4.9. Indeks cijepanja ( $X$ ) perforiranoga valovitoga kartona kvalitete 111, 131, 177, 177L

Tablica 4.10. Koeficijenti korelacije  $r$  i 95% intervali pouzdanosti između zavisnih varijabli

Tablica 4.11. Kombinacije uzoraka za koje je ispitivanje vlačne čvrstoće van ravnine bilo tehnički neizvedivo

Tablica P4.1. Srednja vrijednost maksimalne sile pritiska ( $\bar{F}_{max}$ ) i otpornost brida na pritisak ( $R$ ) perforiranoga i neperforiranoga valovitog kartona kvalitete 111

Tablica P4.2. Srednja vrijednost maksimalne sile pritiska ( $\bar{F}_{max}$ ) i otpornost brida na pritisak ( $R$ ) perforiranoga i neperforiranoga valovitog kartona kvalitete 131

Tablica P4.3. Srednja vrijednost maksimalne sile pritiska ( $\bar{F}_{max}$ ) i otpornost brida na pritisak ( $R$ ) perforiranoga i neperforiranoga valovitog kartona kvalitete 177

Tablica P4.4. Srednja vrijednost maksimalne sile pritiska ( $\bar{F}_{max}$ ) i otpornost brida na pritisak ( $R$ ) perforiranoga i neperforiranoga valovitog kartona kvalitete 177L

Tablica P4.5. Srednja vrijednost otpornosti jačine pucanja ( $p$ ) i indeks pucanja ( $x$ ) perforiranoga i neperforiranoga valovitoga kartona kvalitete 111

Tablica P4.6. Srednja vrijednost otpornosti jačine pucanja ( $p$ ) i indeks pucanja ( $x$ ) perforiranoga i neperforiranoga valovitoga kartona kvalitete 131

Tablica P4.7. Srednja vrijednost otpornosti jačine pucanja ( $p$ ) i indeks pucanja ( $x$ ) perforiranoga i neperforiranoga valovitoga kartona kvalitete 177

Tablica P4.8. Srednja vrijednost otpornosti jačine pucanja ( $p$ ) i indeks pucanja ( $x$ ) perforiranoga i neperforiranoga valovitoga kartona kvalitete 177L

Tablica P4.9. Sila savijanje ( $F$ ) i otpornost na savijanje ( $S$ ) perforiranoga i neperforiranoga valovitoga kartona kvalitete 111 u smjeru pružanja vala (MD)

Tablica P4.10. Sila savijanje ( $F$ ) i otpornost na savijanje ( $S$ ) perforiranoga i neperforiranoga valovitoga kartona kvalitete 131 u smjeru pružanja vala (MD)

Tablica P4.11. Sila savijanje ( $F$ ) i otpornost na savijanje ( $S$ ) perforiranoga i neperforiranoga valovitoga kartona kvalitete 177 u smjeru pružanja vala (MD)

Tablica P4.12. Sila savijanje ( $F$ ) i otpornost na savijanje ( $S$ ) perforiranoga i neperforiranoga valovitoga kartona kvalitete 177L u smjeru pružanja vala (MD)

Tablica P4.13. Sila savijanje ( $F$ ) i otpornost na savijanje ( $S$ ) perforiranoga i neperforiranoga valovitoga kartona kvalitete 111 u smjeru okomitom na smjer pružanja vala (CD)

Tablica P4.14. Sila savijanje ( $F$ ) i otpornost na savijanje ( $S$ ) perforiranoga i neperforiranoga valovitoga kartona kvalitete 131 u smjeru okomitom na smjer pružanja vala (CD)

Tablica P4.15. Sila savijanje ( $F$ ) i otpornost na savijanje ( $S$ ) perforiranoga i neperforiranoga valovitoga kartona kvalitete 177 u smjeru okomitom na smjer pružanja vala (CD)

Tablica P4.16. Sila savijanje ( $F$ ) i otpornost na savijanje ( $S$ ) perforiranoga i neperforiranoga valovitoga kartona kvalitete 177L u smjeru okomitom na smjer pružanja vala (CD)

Tablica P4.17. Srednja vrijednost prekidne sile ( $\bar{F}$ ), prekidna jakost ( $S$ ) i indeks kidanja ( $I$ ) perforiranoga valovitoga kartona kvalitete 111 mjenog u ravnini

Tablica P4.18. Srednja vrijednost prekidne sile ( $\bar{F}$ ), prekidna jakost ( $S$ ) i indeks kidanja ( $I$ ) perforiranoga valovitoga kartona kvalitete 131 mjenog u ravnini

Tablica P4.19. Srednja vrijednost prekidne sile ( $\bar{F}$ ), prekidna jakost ( $S$ ) i indeks kidanja ( $I$ ) perforiranoga valovitoga kartona kvalitete 177 mjenog u ravnini

Tablica P4.20. Srednja vrijednost prekidne sile ( $\bar{F}$ ), prekidna jakost ( $S$ ) i indeks kidanja ( $I$ ) perforiranoga valovitoga kartona kvalitete 177L mjenog u ravnini

Tablica P4.21. Srednja vrijednost prekidne sile ( $\bar{F}$ ), prekidna jakost ( $S$ ) i indeks kidanja ( $I$ ) perforiranoga valovitoga kartona kvalitete 111 mjenog van ravnine

Tablica P4.22. Srednja vrijednost prekidne sile ( $\bar{F}$ ), prekidna jakost ( $S$ ) i indeks kidanja ( $I$ ) perforiranoga valovitoga kartona kvalitete 131 mjenog van ravnine

Tablica P4.23. Srednja vrijednost prekidne sile ( $\bar{F}$ ), prekidna jakost ( $S$ ) i indeks kidanja ( $I$ ) perforiranoga valovitoga kartona kvalitete 177 mjenog van ravnine

Tablica P4.24. Srednja vrijednost prekidne sile ( $\bar{F}$ ), prekidna jakost ( $S$ ) i indeks kidanja ( $I$ ) perforiranoga valovitoga kartona kvalitete 177L mjenog van ravnine

Tablica P4.25. Srednja vrijednost očitane sile ( $\bar{F}$ ), otpornost prema cijepanju ( $F$ ) i indeks cijepanja ( $X$ ) perforiranoga valovitoga kartona kvalitete 111

Tablica P4.26. Srednja vrijednost očitane sile ( $\bar{F}$ ), otpornost prema cijepanju ( $F$ ) i indeks cijepanja ( $X$ ) perforiranoga valovitoga kartona kvalitete 131

Tablica P4.27. Srednja vrijednost očitane sile ( $\bar{F}$ ), otpornost prema cijepanju ( $F$ ) i indeks cijepanja ( $X$ ) perforiranoga valovitoga kartona kvalitete 177

Tablica P4.28. Srednja vrijednost očitane sile ( $\bar{F}$ ), otpornost prema cijepanju ( $F$ ) i indeks cijepanja ( $X$ ) perforiranoga valovitoga kartona kvalitete 177L

### **PRILOG 3: POPIS KORIŠTENIH STANDARDA**

DIN 55468-1: 2004-08 Packaging materials - Corrugated board - Part 1: Requirements, testing

ISO 536:2019 Paper and board — Determination of grammage

ISO 534:2011 Paper and board — Determination of thickness, density and specific volume

ISO 2759:2014 Board— Determination of bursting strength

ISO 1924-2:2008 Paper and board — Determination of tensile properties — Part 2: Constant rate of elongation method (20 mm/min)

ISO 1974:2012 Paper — Determination of tearing resistance — Elmendorf method

ISO 5628:2019 Paper and board — Determination of bending stiffness — General principles for two-point, three-point and four-point methods

ISO 3037:2013 Corrugated fibreboard — Determination of edgewise crush resistance (unwaxed edge method)

## PRILOG 4: OPŠIRNIJI PRIKAZ REZULTATA ISTRAŽIVANJA

Tablica P4.1. Srednja vrijednost maksimalne sile pritiska ( $\bar{F}_{max}$ ) i otpornost brida na pritisak ( $R$ ) perforiranoga i neperforiranoga valovitog kartona kvalitete 111

Kvaliteta		$\bar{F}_{max}$ [N]	$\sigma$	$R$ [N/m]	$\sigma$	
111	Bez perforacije		2,460	0,077	24,600	0,767
	1/1	Perforacija	0,970	0,078	9,700	0,777
		Kut				
		0°	0,970	0,078	9,700	0,777
		20°	0,969	0,090	9,690	0,902
		45°	1,383	0,022	13,830	0,221
		70°	1,498	0,065	14,980	0,649
		90°	1,010	0,024	10,100	0,245
	2/2	0°	0,929	0,042	9,290	0,423
		20°	0,949	0,045	9,490	0,453
		45°	1,367	0,018	13,670	0,183
		70°	1,493	0,018	14,930	0,183
		90°	1,113	0,037	11,130	0,368
	4/2	0°	0,725	0,039	7,250	0,389
		20°	0,916	0,028	9,160	0,280
		45°	1,348	0,029	13,480	0,290
		70°	1,476	0,025	14,760	0,255
90°		1,097	0,028	10,970	0,279	
6/2	0°	0,709	0,026	7,090	0,264	
	20°	0,843	0,031	8,430	0,313	
	45°	1,377	0,019	13,770	0,189	
	70°	1,509	0,040	15,090	0,396	
	90°	1,115	0,021	11,150	0,212	
10/3	0°	0,725	0,021	7,250	0,207	
	20°	0,873	0,026	8,730	0,258	
	45°	1,331	0,147	13,310	1,471	
	70°	1,505	0,034	15,050	0,337	
	90°	1,097	0,021	10,970	0,206	

Tablica P4.2. Srednja vrijednost maksimalne sile pritiska ( $\bar{F}_{max}$ ) i otpornost brida na pritisak ( $R$ ) perforiranoga i neperforiranoga valovitog kartona kvalitete 131

Kvaliteta		$\bar{F}_{max}$ [N]	$\sigma$	$R$ [N/m]	$\sigma$
131	Bez perforacije	2,939	0,101	29,290	1,012
	Perforacija	Kut			
1/1	0°	1,194	0,072	11,938	0,725
		1,538	0,062	15,380	0,623
		1,751	0,127	17,510	1,273
		1,883	0,085	18,830	0,846
		1,545	0,197	15,450	1,970
2/2	0°	1,392	0,070	13,920	0,704
		1,360	0,086	13,600	0,865
		1,520	0,241	15,200	2,408
		1,809	0,231	18,090	2,307
		1,356	0,045	13,560	0,450
4/2	0°	1,131	0,039	11,311	0,386
		1,204	0,075	12,040	0,747
		1,791	0,204	17,910	2,039
		1,971	0,119	19,710	1,195
		1,425	0,035	14,250	0,350
6/2	0°	1,061	0,067	10,610	0,672
		1,231	0,072	12,310	0,717
		1,419	0,236	14,190	2,358
		1,663	0,158	16,625	1,581
		1,491	0,026	14,910	0,260
10/3	0°	1,034	0,029	10,340	0,288
		1,155	0,071	11,550	0,711
		1,431	0,261	14,310	2,613
		1,824	0,209	18,240	2,088
		1,512	0,040	15,120	0,397

Tablica P4.3. Srednja vrijednost maksimalne sile pritiska ( $\bar{F}_{max}$ ) i otpornost brida na pritisak ( $R$ ) perforiranoga i neperforiranoga valovitog kartona kvalitete 177

Kvaliteta		$\bar{F}_{max}$ [N]	$\sigma$	$R$ [N/m]	$\sigma$	
177	Bez perforacije		2,550	0,058	25,500	0,585
	Perforacija	Kut				
	1/1	0°	0,892	0,042	8,920	0,416
		20°	1,093	0,070	10,930	0,696
		45°	1,457	0,056	14,570	0,560
		70°	1,497	0,056	14,970	0,556
		90°	1,024	0,021	10,240	0,207
	2/2	0°	0,917	0,041	9,170	0,406
		20°	0,988	0,063	9,880	0,629
		45°	1,330	0,129	13,300	1,286
		70°	1,445	0,059	14,450	0,591
		90°	1,040	0,035	10,400	0,353
	4/2	0°	0,765	0,041	7,650	0,406
		20°	0,926	0,036	9,260	0,357
		45°	1,305	0,025	13,050	0,246
		70°	1,410	0,040	14,100	0,403
		90°	1,118	0,027	11,180	0,266
	6/2	0°	0,699	0,038	6,990	0,378
		20°	0,811	0,051	8,110	0,513
		45°	1,332	0,054	13,320	0,541
70°		1,466	0,091	14,660	0,912	
90°		1,159	0,035	11,590	0,348	
10/3	0°	0,745	0,037	7,450	0,375	
	20°	0,878	0,041	8,780	0,408	
	45°	1,346	0,026	13,460	0,259	
	70°	1,468	0,042	14,680	0,418	
	90°	1,135	0,032	11,350	0,321	

Tablica P4.4. Srednja vrijednost maksimalne sile pritiska ( $\bar{F}_{max}$ ) i otpornost brida na pritisak ( $R$ ) perforiranoga i neperforiranoga valovitog kartona kvalitete 177L

Kvaliteta		$\bar{F}_{max}$ [N]	$\sigma$	$R$ [N/m]	$\sigma$
177L	Bez perforacije	3,094	0,052	30,940	0,519
	Perforacija	Kut			
1/1	0°	1,169	0,121	11,690	1,207
		1,333	0,112	13,330	1,125
		1,802	0,051	18,020	0,509
		1,925	0,124	19,250	1,245
		1,248	0,366	12,475	3,661
2/2	0°	1,135	0,030	11,350	0,299
		1,251	0,060	12,510	0,599
		1,485	0,168	14,850	1,679
		1,769	0,047	17,690	0,468
		1,198	0,023	11,980	0,230
4/2	0°	0,905	0,016	9,050	0,158
		1,145	0,063	11,450	0,635
		1,592	0,043	15,920	0,429
		1,786	0,033	17,860	0,334
		1,288	0,037	12,880	0,371
6/2	0°	0,886	0,076	8,860	0,759
		1,131	0,104	11,310	1,040
		1,645	0,177	16,450	1,774
		1,874	0,046	18,740	0,458
		1,352	0,021	13,520	0,215
10/3	0°	0,972	0,031	9,720	0,312
		1,096	0,076	10,960	0,760
		1,622	0,188	16,220	1,885
		1,806	0,041	18,060	0,406
		1,407	0,024	14,070	0,236



Tablica P4.5. Srednja vrijednost otpornosti jačine pucanja ( $p$ ) i indeks pucanja ( $x$ ) perforiranoga i neperforiranoga valovitoga kartona kvalitete 111

Kvaliteta		$p$ [kPa]	$\sigma$	$x$ [kPa·m <sup>2</sup> /g]	$\sigma$	
111	Bez perforacije	434,030	35,893	1,353	0,112	
	Perforacija	Kut				
1/1	0°	250,730	10,836	0,782	0,034	
		20°	245,610	13,807	0,766	0,043
		45°	242,710	7,406	0,757	0,023
		70°	246,440	8,982	0,768	0,028
		90°	260,200	8,473	0,811	0,026
2/2	0°	254,630	17,746	0,794	0,055	
		20°	247,960	8,934	0,773	0,028
		45°	239,900	5,284	0,748	0,016
		70°	247,670	6,138	0,772	0,019
		90°	259,650	6,710	0,810	0,021
4/2	0°	234,890	6,406	0,732	0,020	
		20°	235,690	8,559	0,735	0,027
		45°	232,840	6,191	0,726	0,019
		70°	234,540	5,118	0,731	0,016
		90°	244,930	5,953	0,764	0,019
6/2	0°	240,100	16,094	0,749	0,050	
		20°	242,740	10,888	0,757	0,034
		45°	239,170	5,981	0,746	0,019
		70°	241,880	8,083	0,754	0,025
		90°	248,760	8,063	0,776	0,025
10/3	0°	238,930	14,124	0,745	0,044	
		20°	238,120	10,375	0,742	0,032
		45°	232,250	4,753	0,724	0,015
		70°	239,340	5,977	0,746	0,019
		90°	240,250	4,480	0,749	0,014

Tablica P4.6. Srednja vrijednost otpornosti jačine pucanja ( $p$ ) i indeks pucanja ( $x$ ) perforiranoga i neperforiranoga valovitoga kartona kvalitete 131

Kvaliteta		$p$ [kPa]	$\sigma$	$x$ [kPa·m <sup>2</sup> /g]	$\sigma$	
131	Bez perforacije	589,410	30,316	1,707	0,088	
	Perforacija	Kut				
1/1	0°	360,680	26,736	1,045	0,077	
		20°	331,930	17,824	0,961	0,052
		45°	300,450	14,570	0,870	0,042
		70°	291,310	10,879	0,844	0,032
		90°	328,220	17,366	0,951	0,050
2/2	0°	332,020	22,067	0,962	0,064	
		20°	323,620	20,162	0,937	0,058
		45°	306,360	13,298	0,887	0,039
		70°	301,450	19,050	0,873	0,055
		90°	333,120	22,338	0,965	0,065
4/2	0°	322,570	27,766	0,934	0,080	
		20°	334,560	24,239	0,969	0,070
		45°	282,360	15,120	0,818	0,044
		70°	293,070	12,192	0,849	0,035
		90°	319,020	13,236	0,924	0,038
6/2	0°	334,620	30,834	0,969	0,089	
		20°	324,650	35,421	0,940	0,103
		45°	289,390	13,702	0,838	0,040
		70°	305,530	23,052	0,885	0,067
		90°	306,380	12,980	0,887	0,038
10/3	0°	325,820	26,504	0,944	0,077	
		20°	345,770	14,175	1,001	0,041
		45°	292,450	19,121	0,847	0,055
		70°	297,770	18,046	0,862	0,052
		90°	302,160	17,034	0,875	0,049

Tablica P4.7. Srednja vrijednost otpornosti jačine pucanja ( $p$ ) i indeks pucanja ( $x$ ) perforiranoga i neperforiranoga valovitoga kartona kvalitete 177

Kvaliteta		$p$ [kPa]	$\sigma$	$x$ [kPa·m <sup>2</sup> /g]	$\sigma$
177	Bez perforacije	437,040	24,985	1,238	0,071
	Perforacija	Kut			
1/1	0°	293,610	25,230	0,832	0,071
		279,720	5,830	0,792	0,017
		272,310	10,666	0,771	0,030
		317,430	8,217	0,899	0,023
		361,300	19,987	1,024	0,057
2/2	0°	282,480	16,972	0,800	0,048
		264,460	13,647	0,749	0,039
		277,380	13,429	0,786	0,038
		310,790	19,694	0,880	0,056
		338,200	8,867	0,958	0,025
4/2	0°	279,170	20,375	0,791	0,058
		258,880	12,092	0,733	0,034
		268,160	13,234	0,760	0,037
		287,270	17,248	0,814	0,049
		320,610	13,084	0,908	0,037
6/2	0°	268,000	9,518	0,759	0,027
		257,350	13,784	0,729	0,039
		257,750	16,759	0,730	0,047
		291,340	22,531	0,825	0,064
		315,830	23,737	0,895	0,067
10/3	0°	269,570	15,106	0,764	0,043
		270,780	13,479	0,767	0,038
		256,420	12,440	0,726	0,035
		283,100	13,254	0,802	0,038
		305,820	13,686	0,866	0,039

Tablica P4.8. Srednja vrijednost otpornosti jačine pucanja ( $p$ ) i indeks pucanja ( $x$ ) perforiranoga i neperforiranoga valovitoga kartona kvalitete 177L

Kvaliteta		$p$ [kPa]	$\sigma$	$x$ [kPa·m <sup>2</sup> /g]	$\sigma$
177L	Bez perforacije	488,490	26,420	1,193	0,065
	Perforacija				
	Kut				
1/1	0°	303,210	14,252	0,740	0,035
	20°	292,810	15,556	0,715	0,038
	45°	292,830	9,018	0,715	0,022
	70°	327,660	10,964	0,800	0,027
	90°	377,800	11,719	0,923	0,029
2/2	0°	332,450	12,160	0,812	0,030
	20°	311,610	13,818	0,761	0,034
	45°	295,960	15,511	0,723	0,038
	70°	316,010	13,305	0,772	0,032
	90°	355,440	12,735	0,868	0,031
4/2	0°	302,550	13,915	0,739	0,034
	20°	299,330	12,583	0,731	0,031
	45°	287,800	20,064	0,703	0,049
	70°	313,420	18,525	0,765	0,045
	90°	347,490	17,797	0,849	0,043
6/2	0°	294,750	25,801	0,720	0,063
	20°	296,050	18,902	0,723	0,046
	45°	292,390	17,999	0,714	0,044
	70°	307,930	25,339	0,752	0,062
	90°	325,210	25,802	0,794	0,063
10/3	0°	303,260	16,188	0,741	0,040
	20°	304,610	11,010	0,744	0,027
	45°	292,050	19,573	0,713	0,048
	70°	311,530	9,971	0,761	0,024
	90°	328,910	20,425	0,803	0,050

Tablica P4.9. Sila savijanje ( $F$ ) i otpornost na savijanje ( $S$ ) perforiranoga i neperforiranoga valovitoga kartona kvalitete 111 u smjeru pružanja vala (MD)

Kvaliteta		$F$ [N]	$\sigma$	$S$ [mN·m]	$\sigma$	
111	Bez perforacije		2,671	0,292	645,208	70,540
	Perforacija	Kut				
	1/1	0°	1,969	0,085	475,612	20,568
		20°	2,008	0,168	484,890	40,573
		45°	1,532	0,068	370,025	16,381
		70°	0,418	0,123	100,884	29,643
		90°	0,275	0,120	66,444	29,003
	2/2	0°	2,130	0,216	514,501	465,236
		20°	1,806	0,076	436,232	18,249
		45°	1,574	0,339	380,149	81,892
		70°	0,512	0,064	123,590	15,447
		90°	0,403	0,118	97,308	28,615
	4/2	0°	1,916	0,142	462,758	34,322
		20°	1,836	0,248	443,482	59,930
		45°	1,373	0,136	331,616	32,858
		70°	0,337	0,069	81,279	16,713
		90°	0,181	0,063	43,724	15,181
	6/2	0°	2,072	0,188	500,420	45,446
		20°	1,751	0,086	423,011	20,732
		45°	1,248	0,094	301,525	22,602
70°		0,263	0,048	63,618	11,516	
90°		0,170	0,058	41,145	14,094	
10/3	0°	2,352	0,168	568,108	40,536	
	20°	2,161	0,094	521,886	22,621	
	45°	1,430	0,158	345,315	38,199	
	70°	0,337	0,105	81,309	25,446	
	90°	0,136	0,041	32,945	9,910	

Tablica P4.10. Sila savijanje ( $F$ ) i otpornost na savijanje ( $S$ ) perforiranoga i neperforiranoga valovitoga kartona kvalitete 131 u smjeru pružanja vala (MD)

Kvaliteta		$F$ [N]	$\sigma$	$S$ [mN·m]	$\sigma$	
131	Bez perforacije	2,784	0,181	690,648	44,941	
	Perforacija	Kut				
	1/1	0°	2,358	0,257	585,028	63,710
		20°	2,172	0,121	538,757	29,937
		45°	1,675	0,118	415,560	29,270
		70°	0,406	0,047	100,627	11,559
		90°	0,484	0,072	120,030	17,944
	2/2	0°	2,043	0,117	506,923	28,976
		20°	2,148	0,096	532,920	23,920
		45°	1,827	0,129	453,285	32,097
		70°	0,708	0,098	175,750	24,341
		90°	0,412	0,061	102,237	15,185
	4/2	0°	2,132	0,102	528,782	25,365
		20°	1,988	0,133	493,270	33,068
		45°	1,542	0,106	382,545	26,365
		70°	0,388	0,074	96,221	18,461
		90°	0,295	0,064	73,199	15,965
	6/2	0°	2,113	0,167	524,215	41,315
		20°	1,970	0,091	488,815	22,537
		45°	1,373	0,082	340,684	20,350
70°		0,405	0,057	100,428	14,100	
90°		0,255	0,052	63,306	12,875	
10/3	0°	2,370	0,202	588,029	50,047	
	20°	2,226	0,139	552,226	34,480	
	45°	1,504	0,156	373,157	38,799	
	70°	0,389	0,062	96,573	15,299	
	90°	0,244	0,073	60,500	18,195	

Tablica P4.11. Sila savijanje ( $F$ ) i otpornost na savijanje ( $S$ ) perforiranoga i neperforiranoga valovitoga kartona kvalitete 177 u smjeru pružanja vala (MD)

Kvaliteta		$F$ [N]	$\sigma$	$S$ [mN·m]	$\sigma$		
177	Bez perforacije		2,567	0,220	614,619	52,625	
	Perforacija	Kut					
	1/1	0°	1,975	0,147	472,746	35,083	
			20°	1,759	0,088	421,129	21,110
			45°	1,512	0,102	362,048	24,474
			70°	0,483	0,101	115,646	24,187
			90°	0,399	0,171	95,527	41,043
	2/2	0°	2,201	0,165	527,039	39,538	
			20°	1,749	0,141	418,726	33,812
			45°	1,474	0,106	352,895	25,475
			70°	0,615	0,131	147,145	31,324
			90°	0,453	0,105	108,426	25,197
	4/2	0°	1,807	0,046	432,537	11,003	
			20°	1,654	0,072	396,085	17,347
			45°	1,195	0,100	286,139	23,912
			70°	0,451	0,082	107,959	19,559
			90°	0,272	0,092	65,136	22,144
	6/2	0°	1,932	0,201	462,516	48,136	
			20°	1,703	0,078	407,622	18,565
			45°	1,206	0,097	288,607	23,103
70°			0,311	0,080	74,437	19,263	
90°			0,136	0,053	32,526	12,715	
10/3	0°	1,872	0,219	448,173	52,491		
		20°	1,677	0,066	401,447	15,837	
		45°	1,352	0,060	323,625	14,292	
		70°	0,262	0,044	62,768	10,489	
		90°	0,244	0,075	60,500	18,195	

Tablica P4.12. Sila savijanje ( $F$ ) i otpornost na savijanje ( $S$ ) perforiranoga i neperforiranoga valovitoga kartona kvalitete 177L u smjeru pružanja vala (MD)

Kvaliteta		$F$ [N]	$\sigma$	$S$ [mN·m]	$\sigma$	
177L	Bez perforacije	2,467	0,524	614,808	130,632	
	Perforacija	Kut				
	1/1	0°	2,184	0,346	544,144	86,325
		20°	1,884	0,165	469,550	41,039
		45°	1,487	0,137	370,595	34,199
		70°	0,505	0,073	125,825	18,163
		90°	0,476	0,050	118,650	12,539
	2/2	0°	1,961	0,241	488,625	59,944
		20°	1,964	0,127	489,337	31,554
		45°	1,595	0,147	397,562	36,657
		70°	0,515	0,088	128,298	21,922
		90°	0,410	0,091	102,086	22,581
	4/2	0°	2,016	0,140	502,359	34,876
		20°	1,919	0,052	478,173	12,937
		45°	1,278	0,088	318,459	22,051
		70°	0,311	0,078	77,437	19,345
		90°	0,245	0,060	61,159	15,057
	6/2	0°	2,060	0,220	513,342	54,757
		20°	1,826	0,056	455,119	13,971
		45°	1,209	0,132	301,329	32,944
70°		0,306	0,038	76,159	9,475	
90°		0,240	0,049	59,921	12,093	
10/3	0°	2,003	0,104	499,175	25,898	
	20°	1,917	0,051	477,727	12,682	
	45°	1,208	0,150	301,015	37,329	
	70°	0,297	0,080	73,931	19,824	
	90°	0,167	0,056	41,542	14,070	



Tablica P4.13. Sila savijanje ( $F$ ) i otpornost na savijanje ( $S$ ) perforiranoga i neperforiranoga valovitoga kartona kvalitete 111 u smjeru okomitom na smjer pružanja vala (CD)

Kvaliteta		$F$ [N]	$\sigma$	$S$ [mN·m]	$\sigma$	
111	Bez perforacije		1,207	0,070	291,500	16,983
	Perforacija	Kut				
	1/1	0°	0,277	0,078	66,932	18,750
		20°	0,416	0,049	100,555	11,784
		45°	0,778	0,038	187,966	9,286
		70°	0,993	0,039	239,938	9,538
		90°	1,056	0,048	255,130	11,650
	2/2	0°	0,669	0,080	161,612	19,372
		20°	0,668	0,073	161,390	17,598
		45°	0,890	0,041	214,997	9,895
		70°	1,008	0,031	243,390	7,390
		90°	1,036	0,024	250,128	5,782
	4/2	0°	0,313	0,078	75,622	18,773
		20°	0,506	0,071	122,126	17,223
		45°	0,804	0,036	194,231	8,792
		70°	0,994	0,044	240,165	10,549
		90°	1,028	0,043	248,329	10,275
	6/2	0°	0,161	0,037	38,995	8,863
		20°	0,390	0,083	94,146	20,031
		45°	0,755	0,062	182,252	14,991
70°		0,982	0,035	237,216	8,411	
90°		1,050	0,044	253,712	10,650	
10/3	0°	0,305	0,124	73,624	29,960	
	20°	0,456	0,053	110,130	12,874	
	45°	0,820	0,074	198,081	17,812	
	70°	1,050	0,063	253,504	15,263	
	90°	1,103	0,061	266,457	14,694	

Tablica P4.14. Sila savijanje ( $F$ ) i otpornost na savijanje ( $S$ ) perforiranoga i neperforiranoga valovitoga kartona kvalitete 131 u smjeru okomitom na smjer pružanja vala (CD)

Kvaliteta		$F$ [N]	$\sigma$	$S$ [mN·m]	$\sigma$	
131	Bez perforacije		1,489	0,046	369,413	11,390
	Perforacija	Kut				
	1/1	0°	0,305	0,042	75,742	10,314
		20°	0,444	0,064	110,080	15,991
		45°	0,985	0,059	244,434	14,613
		70°	1,236	0,039	306,663	9,688
		90°	1,313	0,057	325,735	14,245
	2/2	0°	0,837	0,081	207,531	20,218
		20°	0,953	0,103	236,316	25,557
		45°	1,145	0,024	284,009	6,060
		70°	1,266	0,037	313,986	9,271
		90°	1,313	0,049	325,792	12,084
	4/2	0°	0,421	0,074	104,368	18,468
		20°	0,556	0,117	138,029	28,941
		45°	1,050	0,047	260,561	11,595
		70°	1,250	0,036	310,143	8,988
		90°	1,345	0,056	333,619	13,865
	6/2	0°	0,287	0,076	71,145	18,788
		20°	0,458	0,074	113,679	18,441
		45°	0,936	0,078	232,198	19,445
70°		1,193	0,044	295,924	10,906	
90°		1,298	0,029	322,083	7,126	
10/3	0°	0,345	0,097	85,702	24,034	
	20°	0,608	0,084	150,872	20,843	
	45°	1,034	0,051	256,438	12,770	
	70°	1,265	0,085	313,919	21,203	
	90°	1,334	0,057	330,855	14,068	

Tablica P4.15. Sila savijanje ( $F$ ) i otpornost na savijanje ( $S$ ) perforiranoga i neperforiranoga valovitoga kartona kvalitete 177 u smjeru okomitom na smjer pružanja vala (CD)

Kvaliteta		$F$ [N]	$\sigma$	$S$ [mN·m]	$\sigma$
177	Bez perforacije	1,251	0,042	299,613	10,152
	Perforacija	Kut			
1/1	0°	0,277	0,064	66,196	15,233
		0,463	0,034	110,779	8,200
		0,914	0,019	218,846	4,574
		1,094	0,034	261,975	8,251
		1,085	0,031	259,806	7,465
2/2	0°	0,461	0,099	110,446	23,810
		0,552	0,078	132,213	18,683
		0,914	0,046	218,806	11,081
		1,040	0,037	248,927	8,870
		1,071	0,049	256,497	11,798
4/2	0°	0,239	0,049	57,243	11,756
		0,380	0,046	91,033	11,125
		0,831	0,049	198,977	11,848
		1,048	0,045	250,785	10,751
		1,095	0,060	262,264	14,410
6/2	0°	0,172	0,032	41,252	7,618
		0,288	0,033	68,895	7,860
		0,794	0,071	190,157	17,016
		1,030	0,039	246,482	9,356
		1,104	0,027	264,328	6,352
10/3	0°	0,200	0,049	47,791	11,683
		0,447	0,061	107,106	14,549
		0,863	0,072	206,705	17,316
		1,115	0,038	266,953	9,052
		1,125	0,053	269,289	12,701

Tablica P4.16. Sila savijanje ( $F$ ) i otpornost na savijanje ( $S$ ) perforiranoga i neperforiranoga valovitoga kartona kvalitete 177L u smjeru okomitom na smjer pružanja vala (CD)

Kvaliteta		$F$ [N]	$\sigma$	$S$ [mN·m]	$\sigma$	
177L	Bez perforacije		1,572	0,082	391,664	20,356
	Perforacija	Kut				
	1/1	0°	0,319	0,048	79,529	12,015
		20°	0,479	0,065	119,413	16,306
		45°	0,934	0,045	232,763	11,126
		70°	1,170	0,046	291,592	11,523
		90°	1,261	0,058	314,244	14,487
	2/2	0°	0,514	0,102	128,204	25,513
		20°	0,643	0,089	160,320	22,244
		45°	0,994	0,037	247,661	9,256
		70°	1,202	0,051	299,604	12,707
		90°	1,298	0,041	323,420	10,164
	4/2	0°	0,257	0,051	64,134	12,740
		20°	0,448	0,051	111,739	12,773
		45°	0,881	0,036	219,572	8,848
		70°	1,173	0,026	292,270	6,419
		90°	1,251	0,056	311,722	14,071
	6/2	0°	0,208	0,041	51,915	10,139
		20°	0,327	0,058	81,492	14,337
		45°	0,825	0,040	205,689	9,944
70°		1,166	0,029	290,610	7,338	
90°		1,233	0,044	307,167	10,882	
10/3	0°	0,247	0,049	61,525	12,217	
	20°	0,436	0,032	108,583	7,995	
	45°	0,900	0,041	224,340	10,152	
	70°	1,188	0,086	295,938	21,330	
	90°	1,272	0,035	317,080	8,720	

Tablica P4.17. Srednja vrijednost prekidne sile ( $\bar{F}$ ), prekidna jakost ( $S$ ) i indeks kidanja ( $I$ ) perforiranoga valovitoga kartona kvalitete 111 mjenenog u ravnini

Kvaliteta	Perforacija	Kut	$\bar{F}$ [N]	$S$ [kN/m]	$\sigma$	$I$ [Nm/g]
111	1/1	0°	102,672	2,053	0,026	6,402
		20°	105,558	2,111	0,035	6,582
		45°	146,926	2,939	0,347	9,162
		70°	224,129	4,483	0,345	13,976
		90°	250,237	5,005	0,176	15,604
	2/2	0°	131,706	2,634	0,159	8,213
		20°	121,804	2,436	0,222	7,595
		45°	187,316	3,746	0,301	11,680
		70°	240,828	4,817	0,473	15,017
		90°	279,330	5,587	0,403	17,418
	4/2	0°	132,095	2,642	0,138	8,237
		20°	128,886	2,578	0,178	8,037
		45°	163,543	3,271	0,264	10,198
		70°	259,346	5,187	0,191	16,172
		90°	234,017	4,680	0,260	14,592
	6/2	0°	51,495	1,030	0,111	3,211
		20°	50,369	1,007	0,149	3,141
		45°	79,650	1,593	0,193	4,967
		70°	133,021	2,660	0,267	8,295
		90°	76,144	1,523	0,367	4,748
	10/3	0°	59,267	1,185	0,155	3,696
		20°	64,839	1,297	0,032	4,043
		45°	92,245	1,845	0,166	5,752
		70°	122,821	2,456	0,131	7,659
		90°	103,030	2,061	0,337	6,425

Tablica P4.18. Srednja vrijednost prekidne sile ( $\bar{F}$ ), prekidna jakost ( $S$ ) i indeks kidanja ( $I$ ) perforiranoga valovitoga kartona kvalitete 131 mjenenog u ravnini

Kvaliteta	Perforacija	Kut	$\bar{F}$ [N]	$S$ [kN/m]	$\sigma$	$I$ [Nm/g]
131	1/1	0°	161,507	3,230	0,203	9,354
		20°	170,114	3,402	0,195	9,853
		45°	272,118	5,442	0,188	15,761
		70°	424,783	8,496	0,425	24,603
		90°	377,497	7,550	0,361	21,864
	2/2	0°	195,146	3,903	0,188	11,303
		20°	187,880	3,758	0,245	10,882
		45°	266,627	5,333	0,268	15,443
		70°	329,169	6,583	0,320	19,065
		90°	356,101	7,122	0,470	20,625
	4/2	0°	132,095	2,642	0,146	7,651
		20°	128,886	2,578	0,104	7,465
		45°	163,543	3,271	0,074	9,472
		70°	259,346	5,187	0,402	15,021
		90°	234,017	4,680	0,341	13,554
6/2	0°	80,816	1,616	0,093	4,681	
	20°	79,679	1,594	0,171	4,615	
	45°	97,495	1,950	0,219	5,647	
	70°	162,285	3,246	0,381	9,399	
	90°	124,960	2,499	0,440	7,238	
10/3	0°	86,973	1,739	0,164	5,037	
	20°	77,703	1,554	0,074	4,500	
	45°	108,267	2,165	0,328	6,271	
	70°	181,852	3,637	0,149	10,533	
	90°	140,213	2,804	0,455	8,121	

Tablica P4.19. Srednja vrijednost prekidne sile ( $\bar{F}$ ), prekidna jakost ( $S$ ) i indeks kidanja ( $I$ ) perforiranoga valovitoga kartona kvalitete 177 mjenenog u ravnini

Kvaliteta	Perforacija	Kut	$\bar{F}$ [N]	$S$ [kN/m]	$\sigma$	$I$ [Nm/g]
177	1/1	0°	147,525	2,951	0,124	8,359
		20°	163,771	3,275	0,107	9,280
		45°	247,057	4,941	0,153	13,999
		70°	298,846	5,977	0,317	16,933
		90°	290,412	5,808	0,491	16,455
	2/2	0°	171,107	3,422	0,200	9,695
		20°	167,884	3,358	0,201	9,513
		45°	225,026	4,501	0,282	12,750
		70°	248,454	4,969	0,563	14,078
		90°	256,176	5,124	0,349	14,515
	4/2	0°	118,505	2,370	0,100	6,715
		20°	111,517	2,230	0,123	6,319
		45°	129,331	2,587	0,218	7,328
		70°	184,310	3,686	0,117	10,443
		90°	130,047	2,601	0,463	7,369
6/2	0°	71,369	1,427	0,140	4,044	
	20°	67,911	1,358	0,059	3,848	
	45°	83,770	1,675	0,288	4,747	
	70°	131,243	2,625	0,232	7,436	
	90°	101,466	2,029	0,486	5,749	
10/3	0°	78,294	1,566	0,124	4,436	
	20°	77,876	1,558	0,091	4,413	
	45°	102,671	2,053	0,218	5,818	
	70°	131,133	2,623	0,254	7,430	
	90°	112,975	2,260	0,263	6,401	

Tablica P4.20. Srednja vrijednost prekidne sile ( $\bar{F}$ ), prekidna jakost ( $S$ ) i indeks kidanja ( $I$ ) perforiranoga valovitoga kartona kvalitete 177L mjenenog u ravnini

Kvaliteta	Perforacija	Kut	$\bar{F}$ [N]	$S$ [kN/m]	$\sigma$	$I$ [Nm/g]
177L	1/1	0°	141,879	2,838	0,234	6,930
		20°	158,132	3,163	0,246	7,724
		45°	255,317	5,106	0,315	12,470
		70°	343,913	6,878	0,302	16,798
		90°	356,109	7,122	0,719	17,393
	2/2	0°	181,146	3,623	0,176	8,848
		20°	180,982	3,620	0,192	8,840
		45°	250,296	5,006	0,298	12,225
		70°	266,025	5,320	0,513	12,993
		90°	360,432	7,209	0,382	17,604
	4/2	0°	128,602	2,572	0,154	6,281
		20°	123,322	2,466	0,126	6,023
		45°	137,269	2,745	0,291	6,705
		70°	240,095	4,802	0,551	11,727
		90°	182,654	3,653	0,555	8,921
6/2	0°	75,735	1,515	0,101	3,699	
	20°	72,167	1,443	0,131	3,525	
	45°	74,106	1,482	0,172	3,620	
	70°	138,705	2,774	0,491	6,775	
	90°	115,414	2,308	0,112	5,637	
10/3	0°	83,727	1,675	0,171	4,089	
	20°	76,549	1,531	0,083	3,739	
	45°	100,178	2,004	0,299	4,893	
	70°	120,216	2,404	0,297	5,872	
	90°	135,565	2,711	0,156	6,621	



Tablica P4.21. Srednja vrijednost prekidne sile ( $\bar{F}$ ), prekidna jakost ( $S$ ) i indeks kidanja ( $I$ ) perforiranoga valovitoga kartona kvalitete 111 mjenenog van ravnine

Kvaliteta	Perforacija	Kut	$\bar{F}$ [N]	$S$ [kN/m]	$\sigma$	$I$ [Nm/g]
111	1/1	0°	4,688	0,047	0,008	0,146
		20°	7,247	0,072	0,015	0,226
		45°				
		70°				
		90°				
	2/2	0°	5,415	0,054	0,008	0,169
		20°	7,113	0,071	0,006	0,222
		45°				
		70°				
		90°				
	4/2	0°	4,784	0,048	0,008	0,149
		20°	7,172	0,072	0,007	0,224
		45°				
		70°	3,555	0,036	0,009	0,111
		90°	2,958	0,030	0,011	0,092
	6/2	0°	3,515	0,035	0,004	0,110
		20°	5,395	0,054	0,007	0,168
		45°				
		70°	2,260	0,023	0,007	0,070
		90°	2,069	0,021	0,005	0,064
	10/3	0°	3,238	0,032	0,011	0,101
		20°	4,302	0,043	0,012	0,134
		45°				
		70°	2,648	0,026	0,008	0,083
		90°	3,182	0,032	0,011	0,099

Tablica P4.22. Srednja vrijednost prekidne sile ( $\bar{F}$ ), prekidna jakost ( $S$ ) i indeks kidanja ( $I$ ) perforiranoga valovitoga kartona kvalitete 131 mjenenog van ravnine

Kvaliteta	Perforacija	Kut	$\bar{F}$ [N]	$S$ [kN/m]	$\sigma$	$I$ [Nm/g]
131	1/1	0°	6,248	0,062	0,008	0,181
		20°	5,992	0,060	0,018	0,174
		45°				
		70°				
		90°				
	2/2	0°	6,452	0,065	0,007	0,187
		20°	8,723	0,087	0,018	0,253
		45°				
		70°				
		90°				
	4/2	0°	5,850	0,058	0,009	0,169
		20°	5,149	0,051	0,019	0,149
		45°	9,131	0,091	0,025	0,264
		70°				
		90°	3,715	0,037	0,008	0,108
6/2	0°	4,908	0,049	0,006	0,142	
	20°	6,083	0,061	0,016	0,176	
	45°					
	70°					
	90°	2,742	0,027	0,004	0,079	
10/3	0°	4,247	0,042	0,005	0,123	
	20°	3,373	0,034	0,006	0,098	
	45°	9,043	0,090	0,023	0,262	
	70°					
	90°	3,952	0,040	0,012	0,114	

Tablica P4.23. Srednja vrijednost prekidne sile ( $\bar{F}$ ), prekidna jakost ( $S$ ) i indeks kidanja ( $I$ ) perforiranoga valovitoga kartona kvalitete 177 mjenenog van ravnine

Kvaliteta	Perforacija	Kut	$\bar{F}$ [N]	$S$ [kN/m]	$\sigma$	$I$ [Nm/g]
177	1/1	0°	6,032	0,060	0,008	0,171
		20°	7,152	0,072	0,007	0,203
		45°				
		70°	5,418	0,054	0,005	0,153
		90°	3,494	0,035	0,007	0,099
	2/2	0°	5,414	0,054	0,009	0,153
		20°	7,118	0,071	0,011	0,202
		45°				
		70°	4,757	0,048	0,011	0,135
		90°	2,910	0,029	0,009	0,082
	4/2	0°	4,313	0,043	0,007	0,122
		20°	6,093	0,061	0,007	0,173
		45°				
		70°	2,986	0,030	0,006	0,085
		90°	2,635	0,026	0,005	0,075
6/2	0°	3,757	0,038	0,006	0,106	
	20°	6,030	0,060	0,007	0,171	
	45°	6,079	0,061	0,011	0,172	
	70°	2,433	0,024	0,003	0,069	
	90°	2,240	0,022	0,003	0,063	
10/3	0°	3,774	0,038	0,007	0,107	
	20°	5,584	0,056	0,008	0,158	
	45°	6,193	0,062	0,012	0,175	
	70°	3,073	0,031	0,006	0,087	
	90°	2,351	0,024	0,003	0,067	

Tablica P4.24. Srednja vrijednost prekidne sile ( $\bar{F}$ ), prekidna jakost ( $S$ ) i indeks kidanja ( $I$ ) perforiranoga valovitoga kartona kvalitete 177L mjenenog van ravnine

Kvaliteta	Perforacija	Kut	$\bar{F}$ [N]	$S$ [kN/m]	$\sigma$	$I$ [Nm/g]
177L	1/1	0°	5,573	0,056	0,008	0,136
		20°	5,909	0,059	0,014	0,144
		45°	6,579	0,066	0,010	0,161
		70°				
		90°	4,866	0,049	0,018	0,119
	2/2	0°	6,774	0,068	0,011	0,165
		20°	6,185	0,062	0,013	0,151
		45°	8,551	0,086	0,016	0,209
		70°				
		90°	4,887	0,049	0,016	0,119
	4/2	0°	5,172	0,052	0,006	0,126
		20°	4,483	0,045	0,014	0,109
		45°	4,770	0,048	0,019	0,117
		70°	4,528	0,045	0,019	0,111
		90°	2,354	0,024	0,005	0,057
6/2	0°	4,944	0,049	0,009	0,121	
	20°	4,964	0,050	0,015	0,121	
	45°	3,163	0,032	0,013	0,077	
	70°	2,581	0,026	0,003	0,063	
	90°	2,534	0,025	0,004	0,062	
10/3	0°	5,089	0,051	0,008	0,124	
	20°	2,881	0,029	0,003	0,070	
	45°	3,804	0,038	0,011	0,093	
	70°	3,407	0,034	0,012	0,083	
	90°	2,420	0,024	0,006	0,059	

Tablica P4.25. Srednja vrijednost očitane sile ( $\bar{F}$ ), otpornost prema cijepanju ( $F$ ) i indeks cijepanja ( $X$ ) perforiranoga valovitoga kartona kvalitete 111

Kvaliteta	Perforacija	Kut	$\bar{F}$ [mN]	$\sigma$	$F$ [mN]	$X$ [mN·m <sup>2</sup> /g]	$\sigma$
111	1/1	0°	98,750	6,409	197,500	0,616	0,040
		20°	106,000	10,750	212,000	0,661	0,067
		45°	126,667	13,229	253,333	0,790	0,082
		70°	192,222	8,333	384,444	1,199	0,052
		90°	174,000	20,656	348,000	1,085	0,129
	2/2	0°	111,111	16,915	222,222	0,693	0,105
		20°	105,556	7,265	211,111	0,658	0,045
		45°	176,667	20,000	353,333	1,102	0,125
		70°	199,000	5,676	398,000	1,241	0,035
		90°	211,429	14,639	422,857	1,318	0,091
	4/2	0°	102,222	4,410	204,444	0,637	0,029
		20°	100,000	0,000	200,000	0,624	0,000
		45°	112,222	4,410	224,444	0,700	0,027
		70°	174,444	16,667	348,889	1,088	0,104
		90°	151,250	26,424	302,500	0,943	0,165
6/2	0°	91,111	10,541	182,222	0,568	0,066	
	20°	95,000	8,498	190,000	0,592	0,053	
	45°	111,000	16,633	222,000	0,692	0,104	
	70°	125,000	24,608	250,000	0,779	0,153	
	90°	138,750	24,749	277,500	0,865	0,154	
10/3	0°	98,889	3,333	197,778	0,617	0,021	
	20°	110,000	13,093	220,000	0,686	0,082	
	45°	118,000	12,293	236,000	0,736	0,077	
	70°	120,000	25,820	240,000	0,748	0,161	
	90°	114,000	9,661	228,000	0,711	0,060	

Tablica P4.26. Srednja vrijednost očitane sile ( $\bar{F}$ ), otpornost prema cijepanju ( $F$ ) i indeks cijepanja ( $X$ ) perforiranoga valovitoga kartona kvalitete 131

Kvaliteta	Perforacija	Kut	$\bar{F}$ [mN]	$\sigma$	$F$ [mN]	$X$ [mN·m <sup>2</sup> /g]	$\sigma$
131	1/1	0°	112,857	4,880	225,714	0,654	0,028
		20°	117,000	14,944	234,000	0,678	0,087
		45°	176,667	10,000	353,333	1,023	0,058
		70°	242,000	39,384	484,000	1,402	0,228
		90°	227,143	24,976	454,286	1,316	0,145
	2/2	0°	120,000	16,330	240,000	0,695	0,095
		20°	140,000	22,361	280,000	0,811	0,130
		45°	187,500	8,864	375,000	1,086	0,051
		70°	217,143	17,043	434,286	1,258	0,099
		90°	212,857	11,127	425,714	1,233	0,064
	4/2	0°	106,250	10,607	212,500	0,615	0,061
		20°	107,500	8,864	215,000	0,623	0,051
		45°	145,000	19,748	290,000	0,840	0,114
		70°	188,750	8,345	377,500	1,093	0,048
		90°	176,250	11,877	352,500	1,021	0,069
6/2	0°	105,000	5,345	210,000	0,608	0,031	
	20°	108,571	10,690	217,143	0,629	0,062	
	45°	123,750	19,955	247,500	0,717	0,116	
	70°	158,571	26,095	317,143	0,918	0,151	
	90°	155,000	24,495	310,000	0,898	0,142	
10/3	0°	111,667	11,690	223,333	0,647	0,068	
	20°	117,143	16,036	234,286	0,678	0,093	
	45°	147,000	18,886	294,000	0,851	0,109	
	70°	160,000	11,547	320,000	0,927	0,067	
	90°	166,667	17,321	333,333	0,965	0,100	

Tablica P4.27. Srednja vrijednost očitane sile ( $\bar{F}$ ), otpornost prema cijepanju ( $F$ ) i indeks cijepanja ( $X$ ) perforiranoga valovitoga kartona kvalitete 177

Kvaliteta	Perforacija	Kut	$\bar{F}$ [mN]	$\sigma$	$F$ [mN]	$X$ [mN·m <sup>2</sup> /g]	$\sigma$
177	1/1	0°	100,000	5,345	200,000	0,567	0,030
		20°	131,250	22,321	262,500	0,744	0,126
		45°	193,333	8,660	386,667	1,095	0,049
		70°	215,556	15,092	431,111	1,221	0,086
		90°	215,556	19,437	431,111	1,221	0,110
	2/2	0°	117,500	18,323	235,000	0,666	0,104
		20°	171,111	25,712	342,222	0,970	0,146
		45°	196,000	10,750	392,000	1,111	0,061
		70°	203,000	8,233	406,000	1,150	0,047
		90°	206,667	14,142	413,333	1,171	0,080
	4/2	0°	101,000	3,162	202,000	0,572	0,018
		20°	107,778	8,333	215,556	0,611	0,047
		45°	156,667	13,229	313,333	0,888	0,075
		70°	190,000	7,071	380,000	1,077	0,040
		90°	182,222	17,873	364,444	1,033	0,107
6/2	0°	88,571	12,150	177,143	0,502	0,069	
	20°	101,000	3,162	202,000	0,572	0,018	
	45°	104,000	5,164	208,000	0,589	0,029	
	70°	133,750	17,678	267,500	0,758	0,100	
	90°	133,333	16,583	266,667	0,755	0,094	
10/3	0°	93,750	9,161	187,500	0,531	0,052	
	20°	92,500	11,650	185,000	0,524	0,066	
	45°	96,250	11,877	192,500	0,545	0,067	
	70°	92,000	7,888	184,000	0,521	0,045	
	90°	94,444	8,819	188,889	0,535	0,050	

Tablica P4.28. Srednja vrijednost očitane sile ( $\bar{F}$ ), otpornost prema cijepanju ( $F$ ) i indeks cijepanja ( $X$ ) perforiranoga valovitoga kartona kvalitete 177L

Kvaliteta	Perforacija	Kut	$\bar{F}$ [mN]	$\sigma$	$F$ [mN]	$X$ [mN·m <sup>2</sup> /g]	$\sigma$
177L	1/1	0°	151,111	19,650	302,222	0,738	0,096
		20°	167,778	19,221	335,556	0,819	0,094
		45°	199,000	5,676	398,000	0,972	0,028
		70°	240,000	25,981	480,000	1,172	0,127
		90°	219,000	22,336	438,000	1,070	0,109
	2/2	0°	178,889	20,883	357,778	0,874	0,102
		20°	176,667	17,321	353,333	0,863	0,085
		45°	197,000	6,749	394,000	0,962	0,033
		70°	223,333	17,321	446,667	1,091	0,085
		90°	207,778	8,333	415,556	1,015	0,041
	4/2	0°	103,333	7,071	206,667	0,505	0,035
		20°	131,111	15,366	262,222	0,640	0,075
		45°	174,000	13,499	348,000	0,850	0,066
		70°	196,000	5,164	392,000	0,957	0,025
		90°	196,000	11,738	392,000	0,957	0,057
6/2	0°	110,000	8,165	220,000	0,537	0,040	
	20°	106,000	5,164	212,000	0,518	0,025	
	45°	110,000	7,071	220,000	0,537	0,035	
	70°	152,222	8,333	304,444	0,743	0,041	
	90°	143,333	14,142	286,667	0,700	0,069	
10/3	0°	95,000	5,345	190,000	0,464	0,026	
	20°	93,000	8,233	186,000	0,454	0,040	
	45°	97,000	4,830	194,000	0,474	0,024	
	70°	99,000	5,676	198,000	0,484	0,028	
	90°	101,000	8,756	202,000	0,493	0,043	



## ŽIVOTOPIS

Iva Šarčević (djevojačko Bilušić), rođena je 29. srpnja 1982. u Zagrebu. Nakon završene II. Opće gimnazije u Zagrebu, 2000. godine upisuje Grafički fakultet Sveučilišta u Zagrebu. Diplomirala je 2006. godine kao inženjerka grafičke tehnologije, smjer Dizajn grafičkih proizvoda. Nakon završetka studija radi honorarno na Grafičkom fakultetu kao vanjska suradnica na: Katedri za reprodukciju fotografiju, Katedri za tiskovne forme te Katedri za likovnu kulturu i grafički dizajn. 2008. godine upisuje poslijediplomski znanstveni studij na Grafičkom fakultetu, smjer Oblikovanje grafičkih proizvoda. 2011. godine zapošljava se na Grafičkom fakultetu kao asistentica na Katedri za grafičke strojeve.

Usavršavala se na studijskim boravcima u Stuttgartu, Njemačka te Ljubljani, Slovenija gdje je provela 3 mjeseca kao stipendistica Agencije za mobilnost i programe EU, CEEPUS, na Univerza v Ljubljani Naravoslvnotehniška fakulteta. Sudjeluje na domaćim i međunarodnim znanstvenim i stručnim skupovima kao i znanstveno-istraživačkim projektima (matični broj znanstvenika: 328245). Sudjelovala je na projektu „Standardizacija ekološki prihvatljivih procesa grafičkih komunikacija“. Članica je Hrvatskog ergonomskeg društva.

Bila je službena presenterica za Adobe grafičke programe te kao vanjska suradnica radila za Apple Hrvatsku i Visoku školu za informacijske tehnologije, VSITE. Kao grafička dizajnerica autorica je brojnih vizualnih identiteta kao i prezentacijskih materijala.

# POPIS OBJAVLJENIH RADOVA

## Knjige i poglavlja u knjigama

### Poglavlja u knjigama (1)

Dolić, Jurica; Pibernik, Jesenka; **Šarčević, Iva**

Consumer Interpretation of Recycling Signs on Packaging. // Signs and Symbols for Workplace and Public Use / Ng, Annie W. Y. ; Chan, Alan H. S. (ur.). New York: Nova Science Publishers, Inc., 2013. str. 95-112

## Radovi u časopisima

### Znanstveni i pregledni radovi (4)

**Šarčević, Iva**; Gregor-Svetec, Diana; Banić, Dubravko

Validation of Elmendorf method for testing perforated corrugated cardboard. // Tehnički vjesnik : znanstveno-stručni časopis tehničkih fakulteta Sveučilišta u Osijeku, 29 (2022), 6; 1883-1888 doi:10.17559/TV-20211126090308 (međunarodna recenzija, članak, znanstveni)

**Šarčević, Iva**; Banić, Dubravko; Milčić, Diana

Evaluation of compressive test methods for paper using a mathematical model, based on compressive test for corrugated board. // Acta graphica, 27 (2016), 1; 47-50 (domaća recenzija, članak, znanstveni)

**Šarčević, Iva**; Banić, Dubravko; Milčić, Diana

Colorimetric Differences on Wood Substrate due to Varnishing Influence. // Acta Technica Corviniensis, 1 (2013), 1; 91-94 (podatak o recenziji nije dostupan, članak, znanstveni)

Donevski, Davor; Milčić, Diana; **Šarčević, Iva**

Assessing RGB Device Calibration Control Level. // Tehnicki Vjesnik-Technical Gazette, 19 (2012), 1; 607-610 (međunarodna recenzija, članak, znanstveni)

## Radovi u zbornicima skupova

### Znanstveni radovi u zbornicima skupova (6)

**Sarcevic, Iva**; Gregor-Svetec, Diana; Banic, Dubravko

Influence of perforations on the reduction of the compressive strength of corrugated cardboard. // Journal of Physics: Conference Series 2321 Online: IOP Publishing Ltd, 2022. 012016, 6 doi:10.1088/1742-6596/2321/1/012016 (predavanje, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)

**Šarčević, Iva**; Gregor-Svetec, Diana; Banić, Dubravko

EFFECT OF PERFORATIONS ON THE LOSS OF CORRUGATED CARDBOARD BENDING STIFFNESS. // Proceedings - The Eleventh International Symposium GRID 2022 / Vladić, Gojko (ur.). Novi Sad: UNIVERSITY OF NOVI SAD FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES DEPARTMENT OF GRAPHIC ENGINEERING AND DESIGN, 2022. str. 73-79 doi:.org/10.24867/GRID-2022-p6 (poster, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)

**Šarčević, Iva;** Gregor-Svetec, Diana; Banić, Dubravko

ANALIZA VLAČNE ČVRSTOĆE KOD PERFORIRANE VALOVITE LJEPENKE ZA AMBALAŽU SPREMNU ZA IZLAGANJE NA POLICI. // Zbornik radova, Printing&Design 2021 / Žiljak Gršić, Jana (ur.). Zagreb: Fotosoft d.o.o., 2021. str. 74-80 (predavanje, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)

**Šarčević, Iva;** Banić, Dubravko; Itrić, Katarina

YOUTUBE KAO ALAT ZA UNAPREĐENJE NASTAVE GRAFIČKE TEHNOLOGIJE. // Tiskarstvo i dizajn 2016. / Žiljak Vujić, Jana (ur.). Zagreb: Fotosoft d.o.o., 2016. str. 139-142 (predavanje, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)

Donevski, Davor; Milčić, Diana; **Šarčević, Iva**

Applying Calibration Principles to RGB Printing Devices. // MOTSP2012 Conference Proceedings / Čosić, Predrag ; Barić, Gordana ; Tošić, Marina (ur.). Zagreb: Croatian Association for PLM, 2012. str. 140-144 (predavanje, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)

**Šarčević, Iva;** Banić, Dubravko; Milčić, Diana

Personalization of a Product from Mass Production. // Mass Customization and Open Innovation in Central Europe / Anišić, Zoran ; Freund, Robert (ur.). Novi Sad: Faculty of Technical Sciences in Novi Sad, 2012. str. 203-206 (predavanje, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)

## **Sažeci sa skupova**

### **Sažeci u zbornicima i časopisima (1)**

**Šarčević, Iva;** Gregor-Svetec, Diana; Banić, Dubravko

Correlation between tensile strength and tear resistance of perforated e flute corrugated board. // MATRIB 2021. Materials, Tribology and Recycling. Book of Abstracts / Čorić, Danko ; Šolić, Sanja ; Ivušić, Franjo (ur.). Zagreb: Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, 2021. str. 456-456 (poster, međunarodna recenzija, sažetak, znanstveni)