

Simulacija ispitivanja materijala za izradu ambalaže

Laginja, Emanuel

Undergraduate thesis / Završni rad

2015

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:216:831377>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-10-13**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Graphic Arts Repository](#)



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAFIČKI FAKULTET**

ZAVRŠNI RAD

EMANUEL LAGINJA



Sveučilište u Zagrebu
Grafički fakultet

Smjer: tehničko - tehnološki

ZAVRŠNI RAD
SIMULACIJA ISPITIVANJA MATERIJALA
ZA IZRADU AMBALAŽE

Mentor:
doc. dr. sc. Dubravko Banić

Student:
Emanuel Laginja

Zagreb, 2015.

SAŽETAK

Ovaj rad opisuje razradu procesa izrade kutije u visoko automatiziranom tehnološkom postrojenju. Misao vodilja ovog rada jest softverska analiza i opis principa rada izrade ambalaže određenog proizvoda, koja pruža informacije o ponašanju određenog materijala koji je korišten prije samog početka izrade proizvoda. Takva vrsta analize izvršena je uz pomoć programa CAE tipa koji se koristi za izradu takve ambalaže. Program omogućuje simulaciju otpornosti na određene sile, te napetost unutar samog odabranog materijala (s definiranim modulom elastičnosti, tvrdoćom itd.) što uvelike može pomoći i ukazati na potencijalne probleme koji se mogu pojaviti u procesu izrade te kutije, a samim time i uvelike smanjiti utrošak vremena i materijala izrade prototipa koji bi se kasnije morao podvrgnuti mehaničkim ispitivanjima.

Ključne riječi: Analiza, CAE, automatizacija, prototip

ABSTRACT

This project describes the process of making a cardboard box in a highly automated production. The idea of this project is computer analysing and description of making a package, which provides information about the behaviour of a material used for making the package, before the beginning of the actual producing. This type of analysis is conducted using a CAE software, specialized for this kind of production. This software provides simulation of force effect and material tension (with defined Young's module, hardness etc.) which helps to point out potential problems that can be manifested in the process of making the package and, at the same time, reduce the amount of time and material spent for making the prototype, which would later be used for testing.

Keywords: Analysis, CAE, automatization, prototype

SADRŽAJ

Teoretski dio

1.	Uvod	4
1.1.	O izradi završnog rada	4
2.	Papir	5
2.1.	Papir i klima	5
3.	Ambalaža	7
3.1.	Podjela ambalaže	7
3.2.	Podjela ambalaže prema ambalažnom materijalu	8
3.3.	Podjela ambalaže prema osnovnoj namjeni u prometu robe	10
3.4.	Podjela ambalaže prema trajnosti	11
3.5.	Konstrukcija kartonske ambalaže	12
4.	CAD, CAM i CAE sustavi	14
4.1.	CAE	15
4.2.	Prednosti CAE-a	16
5.	Abaqus	17
5.1.	Abaqus/Standard	18
5.2.	Abaqus/Explicit	18
5.3.	Abaqus/CFD	18
5.4.	Abaqus CAE	18
5.5.	Osnove analize u Abaqus-u	19
5.5.1.	Predprocesuiranje	20
5.5.2.	Simulacija (Abaqus/Standard ili Abaqus/Explicit)	20
5.5.3.	Postprocesuiranje (Abaqus/CAE)	20
5.5.4.	Definiranje tipova konačnih elemenata	20
5.5.5.	Broj čvorova – redoslijed interpolacije	22
5.5.6.	Formulacije	22
5.5.7.	Integracija	22

Eksperimentalni dio

6.	O izradi eksperimentalnog dijela	23
7.	Izrada modela	23
7.1.	Analiza modela	29
8.	Rezultati	32
9.	Zaključak	33
10.	Popis literature	34

Teoretski dio

1. Uvod

Postoji mnogo načina kako ocijeniti kvalitetu ambalaže. Bilo da se radi o situaciji gdje se kvaliteta odnosi na uvjete koje mora izdržati prilikom transporta, kako bi kvalitetno zaštitila proizvod od vanjskih utjecaja, ili se pak odnosi na ponašanje materijala prilikom kontakta s kozumentom. Termin kvaliteta ambalaže vrlo je širok pojam i odnosi se na činjenicu da ambalaža mora bit izrađena na način da služi svrsi.

Predmet ovog rada je razrada procesa izrade ambalaže uz pomoć CAE softvera koji omogućuje vršenje analize nad ambalažom bez potrebe trošenja vremena i materijala za izradu prototipa. To znači da je potrebno samo skicirati oblik ambalaže u programu, definirati materijal, postaviti uvjete odvijanja analize (točke apliciranja sile naprezanja i jačinu) te izvršiti analizu, koju softver zapravo sam vrši te na kraju prikazuje sliku nakon djelovanja sile (spektralnu sliku naprezanja i eventualno izvijanje predmeta pod silom).

1.1 O izradi završnog rada

Prilikom izrade samog završnog rada korišteni su programi iz kolekcije Adobe Master Collection CS6 kao što su: Adobe Illustrator CS6 i Adobe Photoshop CS6, koji su specijalizirani za crtanje ilustracija te obradu slike. Također, prilikom izrade eksperimentalnog dijela korišten je Abaqus CAE 6.14. specijaliziran za izradu takve vrste zadatka, a tijekom pisanja elaborata završnog rada korišten je program Adobe InDesign CS6, program za prijelom teksta.

Na Slici 1. prikazane su ikone programa korištenih za izradu rada.



a)



b)



c)



d)

Slika 1. - a) Adobe Illustrator CS6, b) Adobe Photoshop CS6, c) Adobe InDesign CS6 [1],
d) Abaqus CAE [2]

2. Papir

Papir je tanka plošna tvorevina sastavljena od četiri osnovne komponente: celuloze, punila, bojila i keljiva. Papir se prvi puta pojavio u Kini oko 105. g., a njegova se proizvodnja u početku odvijala ručno. U Europi se pojavio tek oko 1100. g. na Siciliji i u Španjolskoj te se u to vrijeme otvaraju prve radionice za proizvodnju papira. [3]

Papir se dobiva preradom biljaka koje sadrže celulozu točnije celulozna vlakanca. Najčešće korištena biljka jest drvo. Ukupno 90% svjetske proizvodnje celuloze dobiva se iz drveta. Za izradu papira najčešće se koriste višegodišnje biljke četinjara i lišćara zbog svoje građe koja je izrazito vlaknasta što je zapravo rezultat vlaknaste strukture molekule celuloze. Osnovne sirovine za proizvodnju su različite vrste drvenjače, tehničke celuloze, poluceluloza, polutvorevine, pamuk, lan, stari papir, drvo i slama (jednogodišnje biljke). [4]

Na Slici 2. prikazana je jedna od prvih proizvodnja papira u Kini.



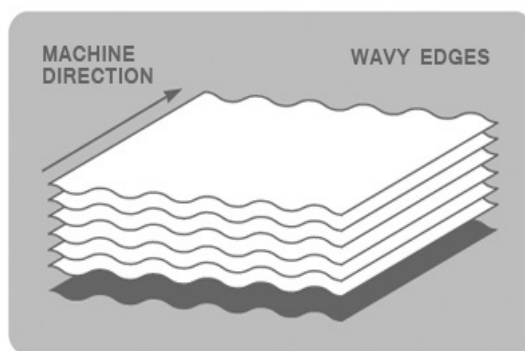
Slika 2. - Proizvodnja papira u Kini [5]

2.1 Papir i klima

Poznato je da je papir, odnosno karton proizvod koji nastaje iz vlakana drvenog podrijetla. Za njihovu proizvodnju koriste se vlakna omorike, bora, breze, bukve itd.

Iz drva se postupkom ravalaknjivanja i miješanjem sa velikom količinom vode izdvajaju vlakna te nastaje masa pod nazivom "drvenjača" koja se koristi na strojevima za proizvodnju papira i kartona. Razlika kod izrade papira i kartona može biti samo u načinu proizvodnje vlakana iz kojih se papir ili karton izrađuje, a mogu biti mehaničkog podrijetla i kemijskog podrijetla. U ovom slučaju govorimo o vlaknima primarnog podrijetla. Papiri i kartoni mogu se proizvesti i iz vlakna sekundarnog podrijetla – reciklažom starog papira i kartona.

Bez obzira na podrijetlo vlakana, osnovna sirovina je drvo, koje je po svojim fizikalnim svojstvima higroskopna masa – lako upija vodu, odnosno veoma osjetljiv na promjene klimatskih uvjeta (temp. i vlaga – toplo i hladno vrijeme s više ili manje vlage). Na modernim strojevima za proizvodnju papira i kartona isti se proizvode s relativnom vlažnošću od $50\% \pm 5\%$. Svaka promjena klimatskih uvjeta izvan navedenih granica dovodi do neželjenih posljedica deformacije papira ili kartona koji za posljedicu mogu imati pojavu problema u procesu grafičke obrade na strojevima (tisak, rezanje, žlijebljenje, lijepljenje itd.). Zbog toga je prilikom skladištenja i dorade papira i kartona iznimno važno voditi računa o klimatskim uvjetima - temperaturi okoline, vlazi. Smatra se da se klimatski uvjeti u kojima se smije skladištiti ili obrađivati papir i karton mora kretati na temp. između $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ uz relativnu vlažnost zraka od $50\% \pm 5\%$, što je prikazano na Slici 3.



Relative humidity of the atmosphere 75%
Relative humidity of paper 50%

Slika 3. - Papir pod utjecajem vlage [6]

Međutim, teško je, a i financijski neisplativo osigurati ovakve uvjete skladištenja, pa su obično papiri i kartoni pritom izloženi promjenjivim klimatskim uvjetima – neklimatizirani prostori. U procesu obrade i prerade papira i kartona svakako je poželjno imati klimatiziran radni prostor. Upravo iz ovog razloga papir i karton se nakon proizvodnje zapakira na palete i obloži PVC folijom koja ga štiti od promjenjivih utjecaja okoline (relativna vlažnost). Stoga je važno da se PVC folija s palete smije skinuti tek nakon što se papir i karton aklimatizirao radnom prostoru. Ukoliko skladišni prostor nije klimatiziran papiru i kartonu potrebno je određeno vrijeme da provede u klimatiziranom prostoru kako bi se aklimatizirao i kako bi, na taj način, spriječili njegovo deformiranje, a samim time i pojavu problema u njegovoj preradi. Važni pojmovi u grafičkoj industriji na koje treba obratiti pažnju su: promjena klimatskih (vremenskih) uvjeta, neklimatizirani i klimatizirani prostor, temperatura okoline, vlažnost zraka (maksimalna, relativna i apsolutna), temp. rosišta, aklimatizacija – klimatska uravnoteženost (prilagodba novim klimatskim uvjetima).

3. Ambalaža

Ambalaža predstavlja sve proizvode, bez obzira na prirodu materijala od kojeg su izrađeni, a upotrebljavaju se za držanje, čuvanje, rukovanje, isporuku i predstavljanje robe tijekom transporta robe od proizvođača do korisnika ili potrošača. Posude različitog oblika i veličine, načinjene od različitih materijala, u kojima se roba drži tijekom transporta, a isto tako i tanji fleksibilni materijali koji su samo izrezani na odgovarajuće dimenzije i eventualno grafički obrađeni a služe za zamatanje roba, zovu se ambalaža. Ambalaža je sredstvo koje prihvaća robu i štiti je do uporabe. Ona štiti robu od mehaničkih, klimatoloških, kemijskih i mikrobioloških utjecaja, ali isto tako štiti okolinu od mogućeg štetnog utjecaja robe. Također, ambalaža aktivno sudjeluje u prodaji same robe, na način da svojom teksturom, grafičkim rješenjem, i identifikacijom komunicira s potrošačem. Osim toga ona mora omogućiti jednostavnu i udobnu uporabu a istodobno biti atraktivna i suvremena. [7]

3.1. Podjela ambalaže

Ambalaža se razlikuje prema ambalažnom materijalu od kojeg je izrađena, dimenzijama, obliku, grafičkoj obradi, namjeni itd. Radi lakšeg sagledavanja proizvodnje i kvalitete ambalaže, njenih funkcija u smislu očuvanja kvalitete upakirane namirnice i uloge u prometu, kao i svih ekonomskih i pravnih pitanja, sva se ambalaža može podijeliti u određene skupine s definiranim zajedničkim svojstvima. Ovisno o svojstvima koja se uzimaju kao osnova podjele, podjela ambalaže se može provesti na više načina.

Ambalaža se može podijeliti u različite skupine s obzirom na odabrano zajedničko svojstvo, a to može biti ambalažni materijal, osnovna namjena u prometu roba, trajnost, funkcija, vrijednost, fizička svojstva itd.

Podjela prema ambalažnom materijalu:

- Papirna i kartonska ambalaža (kutije...)
- Metalna ambalaža
- Staklena ambalaža (staklene boce...)
- Drvena ambalaža
- Tekstilna ambalaža
- Ambalaža od polimernih materijala (PVC boce...)
- Kombinirana ambalaža (Tetrapak...)

Podjela prema osnovnoj namjeni u prometu robe:

- Prodajna ambalaža
- Skupna ambalaža
- Transportna ambalaža

Podjela prema trajnosti

- Povratna ambalaža
- Nepovratna ambalaža [7]

3.2. Podjela ambalaže prema ambalažnom materijalu

Ambalažni materijal je najvažniji element u kreiranju ambalaže o kojem ovisi izbor tehnologije za proizvodnju ambalaže, kvalitete, izgleda, oblika, namjene, načina uporabe i cijena. Prema materijalu od kojeg je izrađena ambalaža može biti papirna i kartonska, metalna, staklena, drvena, tekstilna, ambalaža od polimernih materijala i višeslojnih materijala koji se još nazivaju i laminati, što je prikazano na Slici 4.



Slika 4.- Ambalaža, miješana [8]

Od papira i tanjeg kartona izrađuju se savitljive vrećice različitih dimenzija i prostorno neoblikovana ambalaža za zamatanje roba. Zajedno s drugim materijalima u obliku folija upotrebljavaju se u izradi višeslojne ambalaže. Karton i valovita ljepenka služe za izradu kutija i čaša, što je prikazano na Slici 5. i Slici 6.



Slika 5. - Kartonska čaša [8]



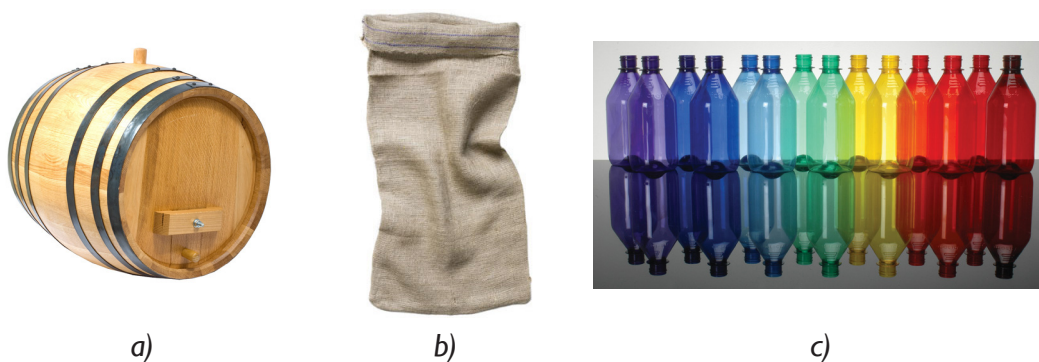
Slika 6. - Kutija od valovite ljepenke [8]

Drvo se upotrebljava za izradu sanduka, bačvi, košara od pruća i transportnih paleta, ali se danas sve više zamjenjuje drugim materijalima.

Tekstilna ambalaža koja se nekad izrađivala od prirodnih vlakana (npr. vreće od jute) danas se zamjenjuje tekstilnim vlaknima i trakama od polimernih materijala. Upotrebljava se za omatanje bala i izradu vreća i mreža.

Polimerni materijali upotrebljavaju se za izradu ambalaže posljednjih 50 godina a zbog svojih dobrih svojstava i niske cijene zamijenili su neke prirodne materijale, osobito metal, drvo i staklo. Mogu se proizvoditi u gotovo svim ambalažnim oblicima. Zahvaljujući svojim specifičnim svojstvima polimerni materijali omogućili su razvoj novih metoda pakiranja, npr. pakiranje u modificiranoj atmosferi u prodajnim jedinicama.

Na Slici 7. prikazani su tipovi ambalaže.

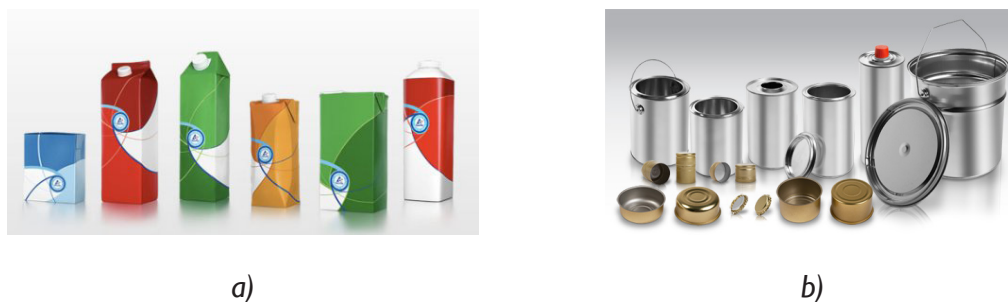


Slika 7. - a) Drvena ambalaža, b) Tekstilna ambalaža, c) Polimerna ambalaža [8]

Kombiniranjem i spajanjem više vrsta različitih materijala u obliku folija dobiju se ambalažni materijali željenih svojstava i relativno niske cijene, a nazivaju se višeslojni materijali ili laminati. Upotrebljavaju se za pakiranje roba kada klasični materijali ne zadovoljavaju, bilo svojim svojstvom, cijenom ili nisu prilagođeni suvremenoj opremi za pakiranje.

Metali koji se koriste za izradu ambalaže su željezo, aluminij, kositar, cink i olovo koji se upotrebljavaju samo za pakiranje radioaktivne robe. Metalna ambalaža izrađuje se u različitim oblicima od kontejnera, cisterni, bačvi, kanti, limenki do poklopaca za staklenke, zatvarača za boce itd. [7]

Na Slici 8. prikazana je višeslojna i metalna ambalaža.



Slika 8. - a) Višeslojna (laminirana) ambalaža, b) Metalna ambalaža [8]

3.3. Podjela ambalaže prema osnovnoj namjeni u prometu robe

Prema osnovnoj namjeni u prometu robe ambalaža se dijeli na prodajnu (primarnu), skupnu (sekundarnu) i transportnu (tercijarnu) ambalažu.

Prodajna ili primarna ambalaža služi za pakiranje robe široke potrošnje u količini koja najbolje odgovara potrebama kupca. Roba upakirana u prodajnu ambalažu predstavlja jedinično pakiranje ili prodajnu jedinicu robe. Ova ambalaža prezentira robu kupcu, mora sadržavati sve potrebne informacije o sastavu i količini robe, uvjetima čuvanja, roku trajanja i načinu uporabe. Prodajna ambalaža mora zaštititi robu i sva njena originalna svojstva do trenutka uporabe, odnosno mora jamčiti kvalitetu i kvantitetu robe. Također svojim atraktivnim izgledom mora privući pažnju kupca i navesti ga da odabere baš taj proizvod. Budući da se roba troši upravo iz prodajne ambalaže ona mora biti funkcionalna, omogućiti lako otvaranje i zatvaranje ambalaže. Ambalažna jedinica koja sadrži više proizvoda u primarnoj ambalaži tako da je proizvod pristupačan kupcu u skupini, a može se izdvojiti i uzeti pojedinačno, naziva se skupna ili sekundarna ambalaža. Ona racionalizira pakovanje robe u transportnu ambalažu i rukovanje robom u trgovini.

Na Slici 9. prikazane su prodajna i skupna ambalaža.



Slika 9. - a) Prodajna ambalaža [9], b) Skupna ambalaža [10]

Transportna ili tercijarna ambalaža omogućava prijevoz, pretovar i rukovanje određenom količinom proizvoda pakiranog u prodajnoj i/ili skupnoj ambalaži. Transportna ambalaža zaštićuje robu od svih oštećenja do kojih može doći tijekom transporta, skladištenja i manipulacije robom, osobito od onih koja nastaju zbog mehaničkih opterećenja i atmosferskih utjecaja. [7]

Na Slici 10. prikazan je izgled transportne ambalaže.



Slika 10. - Transportna ambalaža [10]

3.4. Podjela ambalaže prema trajnosti

Ambalaža se prema trajnosti dijeli na povratnu i nepovratnu. Povratna ambalaža je ona ambalaža koja se, nakon što se isprazni, ponovo upotrebljava u istu svrhu. Budući da je trajnija mora biti izrađena od kvalitetnijeg materijala stoga je i skuplja. Povratna ambalaža se prikuplja, vraća proizvođaču koji je nakon čišćenja i pranja ponovo upotrebljava za pakiranje. Uz transportnu ambalažu, koja je uglavnom povratna (bačve, cisterne, sanduci...), u ovu kategoriju spadaju i neke vrste prodajne ambalaže (npr. boce za komprimirane plinove, staklene boce). Nepovratna ambalaža upotrebljava se za jednokratno pakiranje. Najveći dio prodajne ambalaže je nepovratan iz praktičnih i ekonomskih razloga. Nakon što kupac upotrijebi sadržaj ona predstavlja otpad. Velike količine nepovratne prodajne ambalaže postale su ekološki problem. Stoga se danas različitim mjerama potiču proizvođači da proizvode ambalažu koju je moguće ponovo upotrijebiti ili reciklirati, odnosno da upotrebljavaju biorazgradive ambalažne materijale kako bi se nepovoljni utjecaj na okoliš smanjio na najmanju moguću mjeru. Ambalaža se prema trajnosti dijeli na povratnu i nepovratnu. Povratna ambalaža je ona ambalaža koja se, nakon što se isprazni, ponovo upotrebljava u istu svrhu. Budući da je trajnija mora biti izrađena od kvalitetnijeg materijala stoga je i skuplja. Povratna ambalaža se prikuplja, vraća proizvođaču koji je nakon čišćenja i pranja ponovo upotrebljava za pakiranje. Uz transportnu ambalažu, koja je uglavnom povratna (bačve, cisterne, sanduci...), u ovu kategoriju spadaju i neke vrste prodajne ambalaže (npr. boce za komprimirane plinove, staklene boce). Nepovratna ambalaža upotrebljava se za jednokratno pakiranje. Najveći dio prodajne ambalaže je nepovratan iz praktičnih i ekonomskih razloga. Nakon što

kupac upotrijebi sadržaj ona predstavlja otpad. Velike količine nepovratne prodajne ambalaže postale su ekološki problem. Stoga se danas različitim mjerama potiču proizvođači da proizvode ambalažu koju je moguće ponovo upotrijebiti ili reciklirati, odnosno da upotrebljavaju biorazgradive ambalažne materijale kako bi se nepovoljni utjecaj na okoliš smanjio na najmanju moguću mjeru. [7]

Na Slici 11. prikazane su povratna i nepovratna ambalaža.



Slika 11. - a) Povratna ambalaža, b) Nepovratna ambalaža [11]

3.5. Konstrukcija kartonske ambalaže

Konstrukcija kartonske ambalaže predstavlja niz postupaka koji kao rezultat daju formiranu ambalažu (kutiju).

Složiva kartonska kutija je proizvod izrađen od kartona, proizveden u nekoliko radnih procesa koji objedinjuju tisak, lakiranje, preg, štancanje i žlijebljenje. Naime, kartonska se ambalaža može naći u 2 oblika, a to je oblik kutije, što znači da je formirana te u obliku prireza što znači da je izrezana, ali nije formirana.

Zahtjevi ambalaže na koje treba obratiti pažnju prilikom izrade su sljedeći:

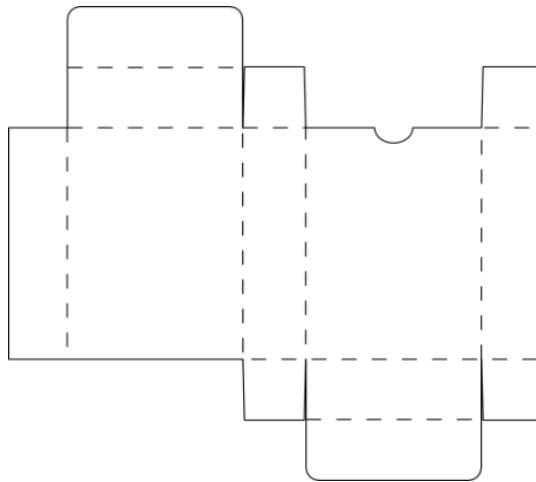
- praktičnost
- svrsishodnost
- prepoznatljivost
- grafičko rješenje koje podiže vrijednost predmeta koji se pakira
- izrada koja zadovoljava zahtjeve ekologije (prirodni materijali)
- materijal koji koristimo mora biti namijenjen proizvodu koji se pakira

Za izradu kutije potrebno je odrediti karton sa svojstvima koja su pogodna za tisak u različitim tehnikama te da ga je moguće površinski obraditi i oblikovati. Nakon toga treba odrediti dimenzije same kutije koje će naravno biti u skladu s onima koje sadrži predmet koji će se u nju pakirati te je uz to potrebno i uračunati i debljinu materijala kojeg ćemo koristiti prilikom izrade.

Iz ovoga je moguće zaključiti da se konstrukcija kartonske ambalaže odvija u 5 faza, i to:

1. Prikupljanje svih relevantnih podataka o sadržaju koji će se pakirati, o tehnologiji pakiranja, razgovor sa stručnim osobljem u cilju dobivanja što većeg broja podataka
2. Konstrukcija u CAD programu u 2D i eventualnoj 3D simulaciji
3. Dostava rješenja kupcu radi prve analize i razjašnjenja eventualnih nejasnoća
4. Izrada finalnog uzorka i testiranje (nosivost i čvrstoća te strojno pakiranje)
5. Izrada alata (štance) na osnovu finalnog crteža, redovna proizvodnja i provjera kvalitete proizvedene ambalaže

Na Slici 12. prikazan je izgled tehničkog crteža prilikom konstrukcije kutije



Slika 12. - Izgled konstrukcije kutije

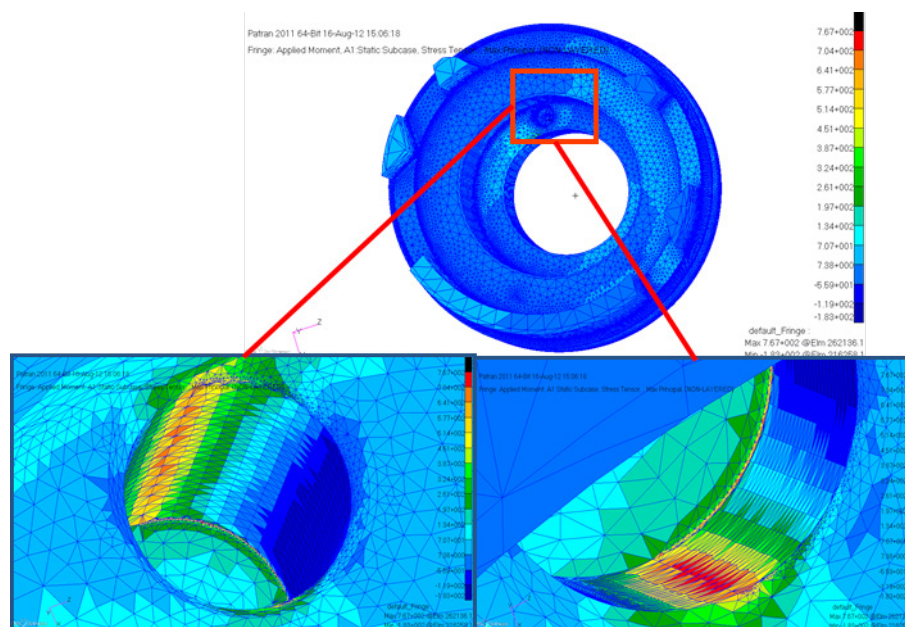


Slika 14. - Izgled CAD/CAM radnog okruženja [13]

4.1. CAE

CAE predstavlja korištenje softvera za unaprjeđenje proizvodnje u području industrijskog dizajna u smislu ranog otkrivanja mogućih problema, s inženjerskog aspekta, u proizvodnji. Uz CAD crtež kao temelj svega, uključuje i simulaciju i optimizaciju proizvoda, procesa i proizvodnih alata.

Na Slici 15. prikazan je izgled CAE analize.



Slika 15. - CAE analiza [14]

Tipični CAE proces sastoji se od predprocesuiranja, simulacije i postprocesuiranja. U fazi predprocesuiranja izrađuje se model proizvoda (geometrija i fizička svojstva te apliciranje tereta i ograničenja). Sljedeća faza je simulacija, gdje se odvija matematička analiza proizvoda pod prethodno zadanim uvjetima. Nakon toga slijedi zadnja faza, postprocesuiranje, gdje softver pokazuje rezultate izvršene analize korisniku.

CAE programi podržavaju širok spektar proizvodnih fenomena uključujući:

- Analiza statičkih i dinamičkih naprezanja na elementima proizvoda koristeći FEA sustav (eng. Finite Element Analysis)
- Analiza termalnih i fluidnih karakteristika koristeći CFD sustav (eng. Computational Fluid Dynamics)
- Zvučne analize uz pomoć FEA sustava ili metode graničnih elemenata BEM (eng. Boundary Element Method)
- Simulacija mehatroničkog sustava, za dizajn više domena
- Simulacija mehaničkog slučaja MES (eng. Mechanical Event Simulation)
- Kontrola sustava analize
- Simulacija proizvodnih procesa poput lijevanja, kalupljenja te formiranja oblika uz pomoć tlaka
- Optimizacija proizvoda ili procesa [15]

4.2. Prednosti CAE-a

Prednosti CAE sustava su prvenstveno smanjenje utroška vremena i novca prilikom izrade te poboljšana kvaliteta i izdržljivost proizvoda što znači da:

- Dizajn proizvoda se temelji na načelu najbolje izdržljivosti i kvalitete
- Dizajn proizvoda može se ocijeniti i preraditi na osnovu računalnih simulacija, umjesto prijašnjih fizičkih testiranja na prototipovima, što ušteduje vrijeme i novac
- CAE sustav omogućuje uvid u proizvodnju u ranim fazama razvoja proizvoda, gdje promjene u dizajnu ne utječu toliko na cjelokupni proces izrade proizvoda
- CAE pomaže inženjerskim timovima u razumijevanju izvedivosti njihovog dizajna te upravljanju eventualnim rizicima
- Garancija smanjenja nesukladnih proizvoda je smanjena zbog prepoznavanja i eliminiranja mogućih problema koji se mogu pojaviti u toku proizvodnje [15]

5. Abaqus

Abaqus predstavlja skup programa za inženjerske simulacije, koji se temelje na metodi konačnih elemenata, koji mogu riješiti probleme u rasponu od relativno jednostavne linearne analize, do najzahtjevnijih nelinearnih situacija. Abaqus sadrži opsežan broj elemenata koji mogu modelirati gotovo svaku geometriju. Također, posjeduje jednako opsežan popis modela materijala koji mogu simulirati ponašanje većine tipičnih inženjerskih materijala, uključujući metale, gume, polimere, kompozite, armirani beton, krte i elastične pjene i geotehničke materijale ko što su tla i stijene. Dizajniran je kao simulacijski alat opće namjene te se uglavnom koristi za proučavanje strukturalnih problema kao što su pomaci, naponi, naprezanja i sl. no može se koristiti i za znatno složenija ispitivanja. Može simulirati probleme u različitim područjima kao što su prijenos topline, difuzija mase, toplinsko djelovanje električnih komponenata (toplinsko-elektro analiza), akustika, mehanika tla, piezoelektrične analize i dinamike fluida. Problemi s više komponenata modeliraju se na temelju suradnje definirane geometrije svake komponente s odgovarajućim modelom materijala i definiranjem interakcije između komponenata. U nelinearnim analizama Abaqus automatski odabire odgovarajuće korake opterećenja i tolerancije konvergencije te stalno ih prilagođava tijekom analize kako bi se osiguralo da se učinkovito dobije točno rješenje.

Abaqus se sastoji od tri osnovna podsustava:

- Abaqus/Standard
- Abaqus/Explicit
- Abaqus CFD

Također postoje i četiri dodatna sustava specijalne namjene za Abaqus/Standard:

- Abaqus/Aqua
- Abaqus/Design
- Abaqus/AMS
- Abaqus/Foundations

Abaqus/CAE je kompletno Abaqus okruženje koje obuhvaća opcije kreiranja Abaqus modela, interaktivno pokretanje i praćenje Abaqus analiza i provjeru rezultata. Abaqus/Viewer je dio Abaqus/CAE –a koje služi za obradu rezultata nakon analize. [16]

5.1. Abaqus/Standard

Abaqus/Standard je podsustav Abaqus software-a koji služi za analizu opće namjene, koji može riješiti čitav niz linearnih i nelinearnih problema, uključuje statičke, dinamičke, toplinske i električne odgovore komponenti. To čini na način da rješava sustav jednadžbi implicitno na svakom rješenju „prirasta“. Nasuprot tome, Abaqus/Explicit ide k rješenju kroz vrijeme malim koracima vremena bez rješavanja sustava jednadžbi zajedno na svakom prirastu vremena. [16]

5.2. Abaqus/Explicit

Ovaj podsustav služi za analizu posebne namjene koji koristi eksplicitnu dinamičku formulaciju konačnih elemenata. Pogodan je za modeliranje kratkih, prolaznih dinamičkih događaja, kao što su problemi udara i eksplozije koji uključuju promjene uvjeta kontakta, kao što je formiranje simulacija. [16]

5.3. Abaqus/CFD

Ovaj podsustav predstavlja proizvod računalne analize dinamike fluida. Može riješiti širok spektar nestišljivih problema protoka, uključujući laminarno i turbulentno strujanje, toplinske konvektivne tokove, te probleme deformacije mreže. [16]

5.4. Abaqus CAE

Abaqus/CAE predstavlja grafičko okruženje Abaqus software-a. Omogućuje brzo kreiranje modela i jednostavno kreiranje ili uvođenje geometrije strukture koja će biti analizirana i diskretizaciju geometrije u konačne elemente. Fizička i materijalna svojstva mogu se pridružiti geometriji, zajedno s opterećenjima i rubnim uvjetima. Sadrži vrlo moćne opcije za diskretizaciju geometrije i provjeru rezultata analize. Nakon što je model potpun, Abaqus/CAE može pokrenuti pratiti i kontrolirati analizu. Modul za vizualizaciju se onda može koristiti za tumačenje rezultata.

Abaqus/Viewer je podskup Abaqus/CAE –a koji sadrži samo dodatne sposobnosti obrade rezultata. U grafičkom sučelju CAE definirani su tzv. moduli pomoću kojih se definiraju elementi modela.

Moduli su:

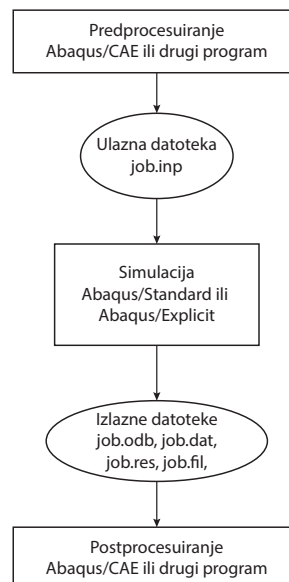
1. Part definiranje geometrije
2. Property definiranje materijala i poprečnih presjeka
3. Assembly formira globalnu geometriju modela
4. Step definira analizu koju treba provesti
5. Interaction definira interakcije između elemenata modela
6. Load definira rubne uvjete modela
7. Mesh omogućuje diskretizaciju modela u konačne elemente
8. Job definira provedbu analize
9. Visualization koristi se za pregled i naknadu obradu rezultata
10. Sketch može se koristiti kao jednostavan CAD program za izradu dodatne geometrije [16]

5.5. Osnove analize u Abaqus-u

Kompletna analiza u Abaqus-u obično se sastoji od tri zasebne razine:

- Predprocesuiranje
- Simulacija
- Postprocesuiranje

Na Slici 16. prikazan je dijagram toka analize u Abaqus-u



Slika 16. - Dijagram toka rada Abaqus CAE softvera [16]

5.5.1. Predprocesuiranje

U ovoj razini potrebno je definirati model fizikalnog problema i kreirati Abaqus ulaznu datoteku. Model se obično kreira grafički uz pomoć Abaqus/CAE ili drugog predprocesora. Abaqus ulazna datoteka se za jednostavne analize može kreirati direktno korištenjem *text editora*. [16]

5.5.2. Simulacija (Abaqus/Standard ili Abaqus/Explicit)

Simulacija, koja se obično pokreće kao pozadinski proces, je razina u kojoj Abaqus/Standard ili Abaqus/Explicit rješavaju numerički problem koji je definiran modelom. Primjeri izlaznih datoteka iz analize naprežanja uključuju pomake i naprežanja koje su spremljene kao binarne i spremne za postprocesuiranje. Ovisno o složenosti problema koji se analizira i snage računala koje se koristi analize mogu trajati od sekunde do nekoliko dana. [16]

5.5.3. Postprocesuiranje (Abaqus/CAE)

Na ovoj razini mogu se vrednovati rezultati. Vrednovanje se obično provodi interaktivno korištenjem modula za vizualizaciju za vrijeme analize. Modul za vizualizaciju, koji čita binarnu izlaznu datoteku ima razne opcije za prikaz rezultata, uključujući obojane prikaze, animacije, deformirane oblike i X-Y zapise. [16]

5.5.4. Definiranje tipova konačnih elemenata

Svaki element karakterizira sljedeće:

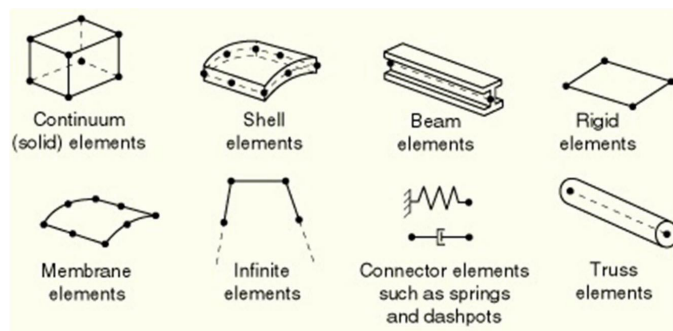
- Obitelj
- Stupnjevi slobode gibanja (izravno se odnosi na obitelj elementa)
- Broj čvorova
- Formulacija
- Integracija

Svaki element u Abaqus-u ima jedinstveni naziv, kao što su T2D2, S4R ili C3D8I. Ime elementa identificira svaki od pet aspekata elementa.

Kada se spominje obitelj elementa onda to može biti:

- Čvrsti elementi
- Ljuske
- Grede
- Kruti elementi
- Membrane
- Beskonačni elementi
- Opruge i amortizacijski elementi
- Krovišta

Na Slici 17. prikazane su obitelji elemenata u Abaqus-u.



Slika 17. - Obitelj elemenata u Abaqus-u [16]

Stupnjevi slobode gibanja mogu biti:

- Translacija u smjeru 1
- Translacija u smjeru 2
- Translacija u smjeru 3
- Rotacija oko 1. osi
- Rotacija oko 2. osi
- Rotacija oko 3. osi
- Savijanje oko presjeka grede
- Zvučni tlak, hidrostatički tlak
- Električni potencijal
- Temperatura za čvrste elemente i temperatura na površini greda i krutih elemenata
- Temperatura unutarnjih točaka presjeka greda i ljuski [16]

5.5.5. Broj čvorova – redosljed interpolacije

Stupnjevi slobode se računaju samo u čvorovima elemenata. U ostalim pozicijama na elementu pomaci se računaju interpolacijom pomaka u čvorovima. Obično je redosljed interpolacije definiran brojem čvorova u korištenom elementu. Elementi koji imaju čvorove samo u uglovima, koriste linearnu interpolaciju u svakom smjeru i često se zovu linearni elementi ili elementi prvog reda.

Elementi s dodatnim čvorovima na stranicama koriste kvadratnu interpolaciju i često se zovu kvadratični elementi ili elementi drugog reda, a modificirani trokutasti ili tetraedarni elementi s dodatnim čvorovima na stranicama, koriste modificiranu interpolaciju drugog reda i često se zovu modificirani elementi ili modificirani elementi drugog reda. [16]

5.5.6. Formulacije

Formulacija elementa odnosi se na matematičku teoriju korištenu za definiranje ponašanja elementa. U nedostatku prilagodljive mreže svi naprezanje/pomak elementi u Abaqus-u se temelje na Lagrange-ovom ili materijalnom opisu ponašanja, materijal povezan s elementom ostaje povezan s elementom tijekom analize, a materijal ne može teći preko granica elementa. Kao alternativa je Eulerov ili prostorni opis, elementi su fiksni u prostoru dok materijal protječe kroz njih. Eulerove metode se obično koristi u simulacijama mehanike fluida. Abaqus/Standard koristi Eulerove elemente za modeliranje konvektivnog prolaza topline. [16]

5.5.7. Integracija

Abaqus koristi numeričke tehnike za integraciju različitih količina preko volumena svakog elementa. Koristeći Gaussovu kvadraturu za većinu elemenata, Abaqus ocjenjuje odgovor materijala u svakoj točki integracije u svakom elementu. Neki elementi u Abaqus-u mogu koristiti punu ili reduciranu integraciju, izbor koji može imati značajan utjecaj na točnost rezultata za dani problem.

Abaqus/Standard nudi punu i reduciranu integraciju elemenata; Abaqus/Explicit nudi samo reduciranu integraciju elemenata s izuzetkom modificiranih tetrahedron i trokutastih elemenata i potpuno integriranih ljusaka prvog reda i *brick* elemenata. [16]

Eksperimentalni dio

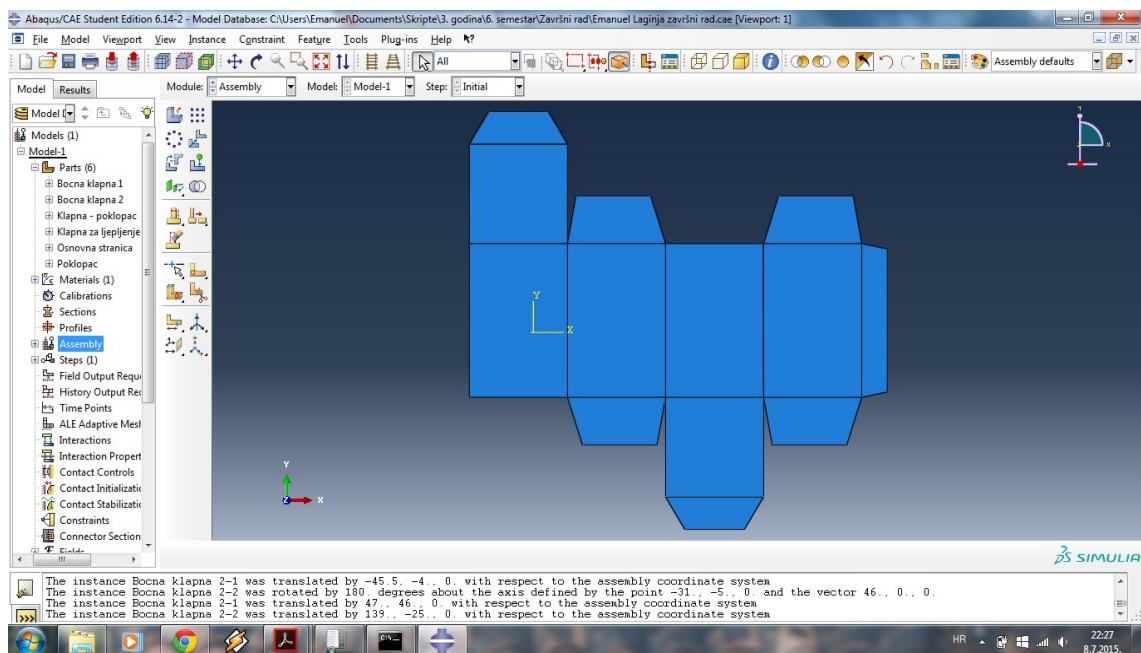
6. O izradi eksperimentalnog dijela

Prilikom izrade eksperimentalnog dijela završnog rada korišteni su parametri iz doktorskog rada: “Stiffness Design of Paperboard using the Finite Element Method”, autora Juana Crespa Amiga, izdanog od strane Kraljevskog Instituta za tehnologiju u Stockholmu, objavljenog u srpnju 2012. godine.

Zadatak je izvršen u studentskoj verziji programa Abaqus CAE 6.14, a kao model korišten je oblik složive kartonske kutije s asimetrički postavljenim poklopcima.

7. Izrada modela

Izrada modela odrađena je na način da je kutija sastavljena od više dijelova, točnije svaka klapna predstavlja pojedini dio (projektiranih u *Part* modulu) koji su kasnije spojeni u cjelinu u modulu *Assembly*, što je prikazano na Slici 18.



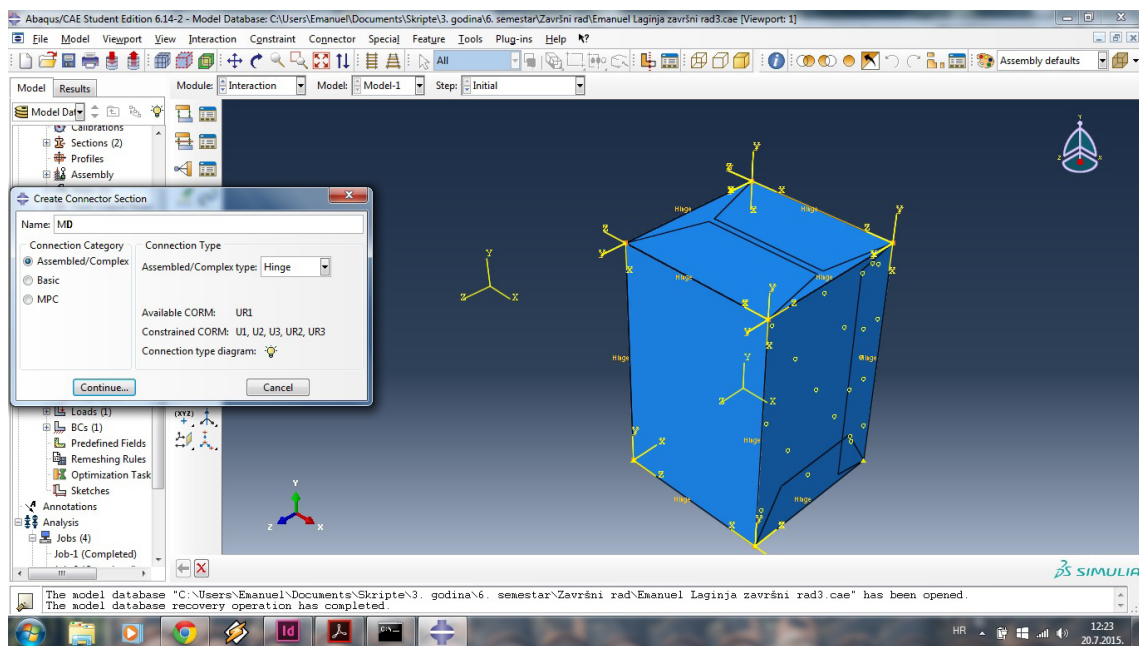
Slika 18. - Spajanje dijelova u cjelinu u “Assembly” modulu

Također, prije toga potrebno je definirati materijal. U ovom radu je to definirano kao 220 g/m² te sa definiranom elastičnošću prema inženjerskim parametrima. Korišteni su podaci Young-ovog modula za oba smjera vlakancu (E_1 - uzdužni smjer, E_2 - poprečni smjer) te za treći smjer odnosno debljinu (E_3), vrijednosti Poissonovog koeficijenta su ($\mu_{1,2}$, $\mu_{1,3}$, $\mu_{2,3}$ - svaki za pojedini smjer) i moduli smicanja ($G_{1,2}$, $G_{1,3}$, $G_{2,3}$). [17]
 U Tablici 1. prikazani su iznosi prethodno navedenih parametara.

Tablica 1. - Parametri elastičnosti korišteni kod definiranja materijala [17]

<i>Parametar</i>	<i>Iznos</i>
$E_1(N/mm^2)$	4380
$E_2(N/mm^2)$	1800
$E_3(N/mm^2)$	21,9
$\mu_{1,2}$	0,458
$\mu_{1,3}$	-2,2
$\mu_{2,3}$	0,54
$G_{1,2}(N/mm^2)$	1080
$G_{1,3}(N/mm^2)$	79,6
$G_{2,3}(N/mm^2)$	51,3

Nakon sklapanja modela i definicije materijala, slijedi definicija spoja između stranica, što znači da se simuliraju žljebovi. To se radi na način da se prvo definira način spajanja, točnije stupnjevi slobode gibanja tih spojeva. Potrebno je definirati spoj tj. kreirati, kako u programu piše, *connector section*. Prilikom kreiranja odabire se opcije *hinge* što označava na koji način će se spoj ponašati (eng. *hinge* - šarka) tj. koliko stupnjeva slobode gibanja takav spoj omogućava. Budući da treba simulirati žljeb na kutiji, mora imati samo 1, tj. samo djelomičnu rotaciju oko svoje osi, što je prikazano na Slici 19.

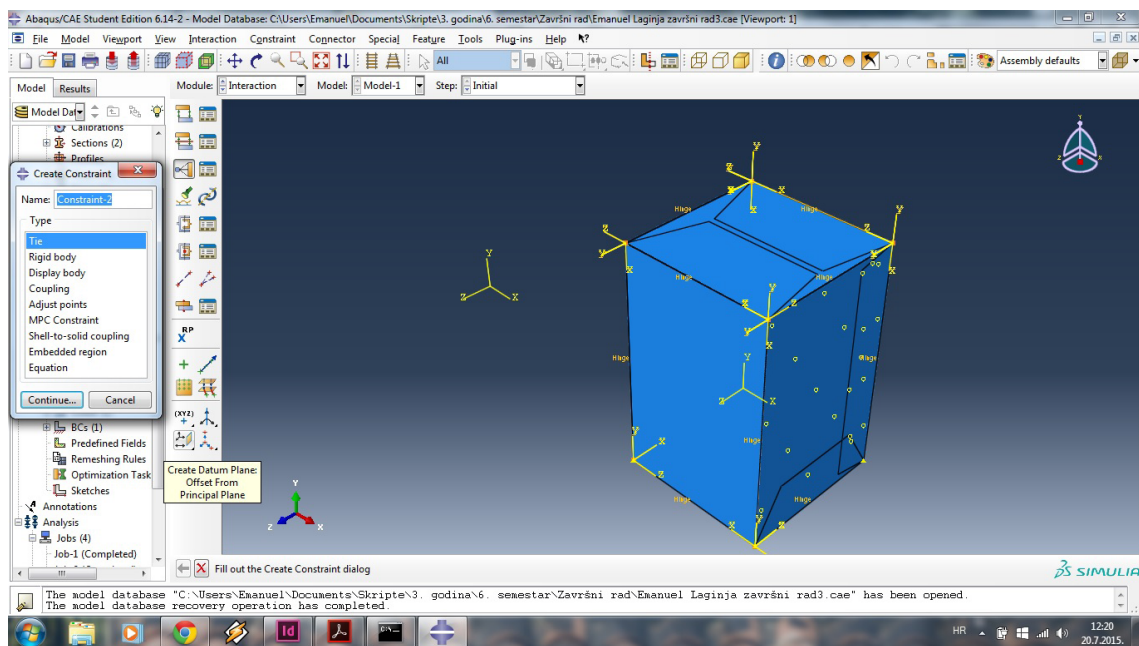


Slika 19. - Definiranje spoja šarkom

Nakon definicije spoja, kreira se i sam taj spoj, pomoću opcije *Connection builder* tako što se klikom na mjesto spoja definira spoj između dvije stranice, odnosno postavlja se tzv. šarka. Zatim potrebno je definirati poseban spoj, koji u ovom zadatku predstavlja mjesto ljepljenja. To se definira opcijom *Create Constraint*, zatim se u izborniku izabere *Tie constraint* te se označe stranice na koje će takav spoj utjecati, (u ovom slučaju stranice koje se lijepe).

Tie constraint inače predstavlja kruti spoj, što u praksi ljepilo i ne predstavlja takav tip spoja, iz razloga što ljepilo može popustiti i dolazi do puknuća odnosno raspadanja spoja, no kada bi se pristupilo takvom strogo inženjerskom pristupu, znatno bi se zadatak zakomplicirao i vjerojatno ne bi mogao biti izvršen zbog ograničenosti opreme, kao npr. korištenje studentske verzije programa.

Na Slici 20. vidi se definiranje ljepljenog spoja.

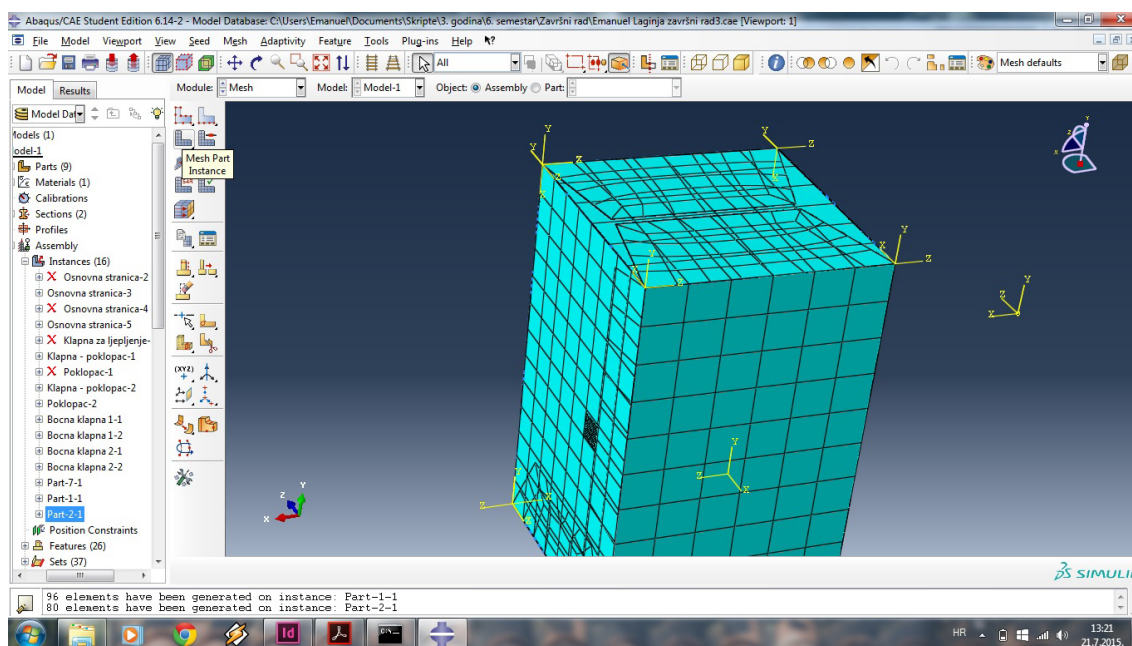


Slika 20. - Definiranje “Tie constraint” spoja

Sljedeća faza odvija se u modulu *Mesh*. U ovom modulu definira se tzv. *Mesh* mrežu, tj. mrežu kvadratičnih segmenata koji predstavljaju referentna polja koja registriraju naprezanja unutar materijala. Veličina tih referentnih polja definira se opcijom *Seed Part*, pod poljem *approximate global size* se upisuje željeni broj, obično program sam već predloži vrijednost veličine polja koja je optimalna. Naravno ako se poveća vrijednost analiza će se brže izvršiti, ali će zato njezina preciznost biti umanjena. Također, da bi se mogla iscrtati referentna mreža potrebno je svaki dio učiniti neovisnim o ostalima, opcijom u *Assembly* modulu *Make Independent*.

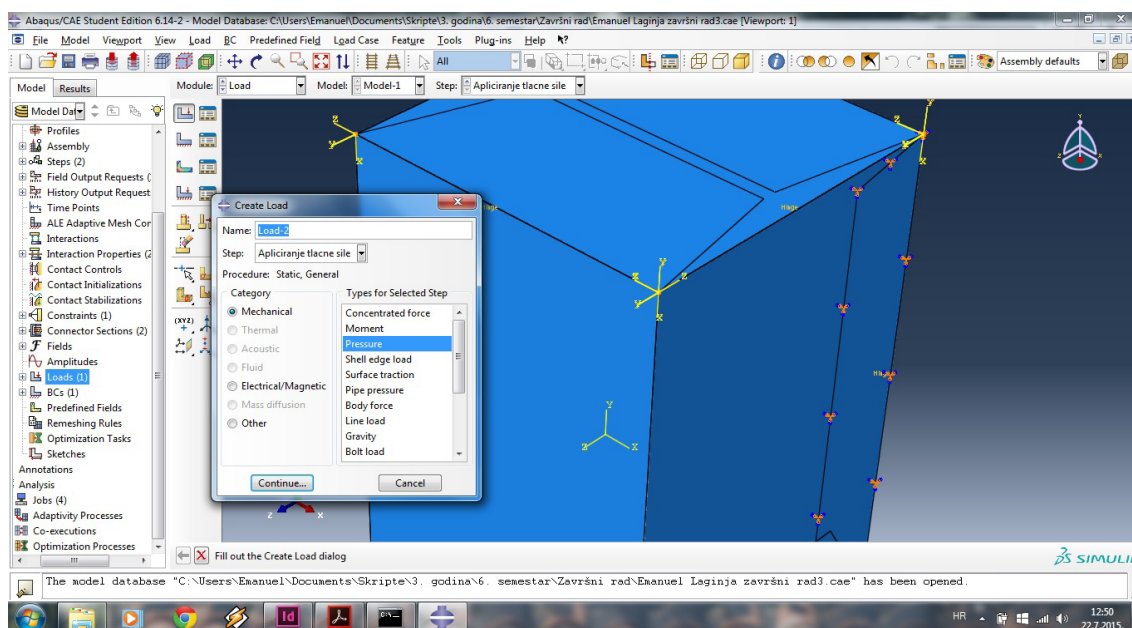
U ovom zadatku korištena je veća vrijednost od preporučene iz razloga zbog ograničenosti verzije programa.

Na Slici 21. prikazana je *Mesh* mreža.



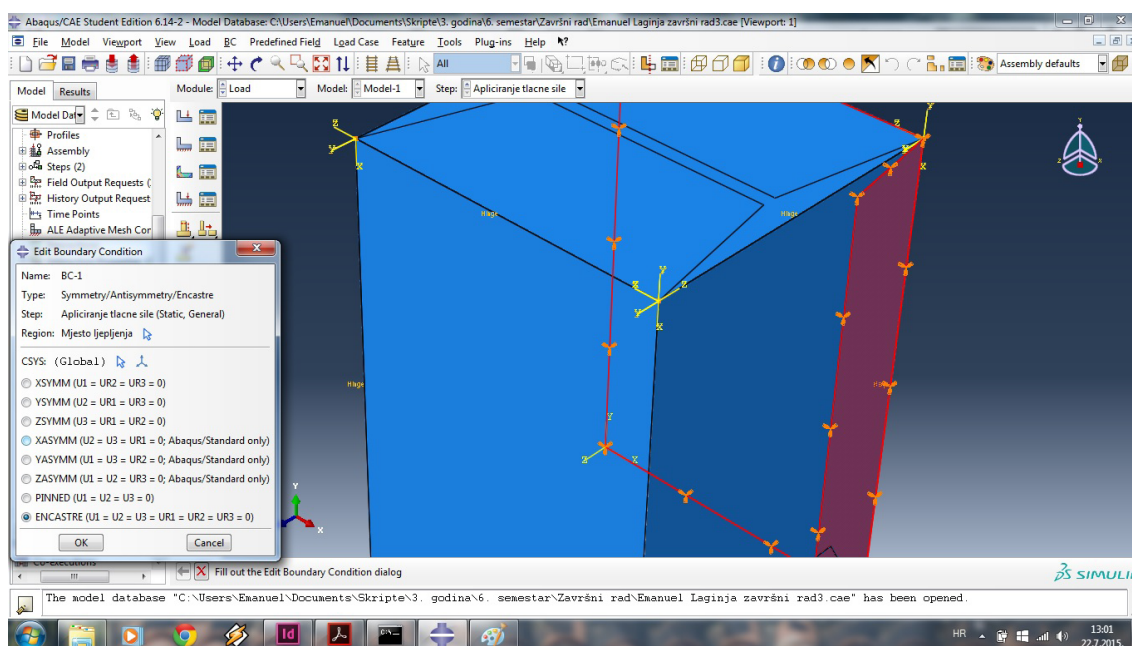
Slika 21. - "Mesh" mreža

Nakon mreže slijedi faza postavljanja tereta i rubnih uvjeta. Postavljanje tereta odnosi se na postavljanje uzroka ispitivanja, što znači da se postavlja tip tereta, koji je u ovom zadatku definiran kao tlak, odnosno tlačna sila, te se izabire mjesto djelovanja, tj. stranicu na koju direktno djeluje sila i naposljetku način rasporeda sile po površini (je li jednoliko raspoređen) te njena vrijednost, što je prikazano na Slici 22.



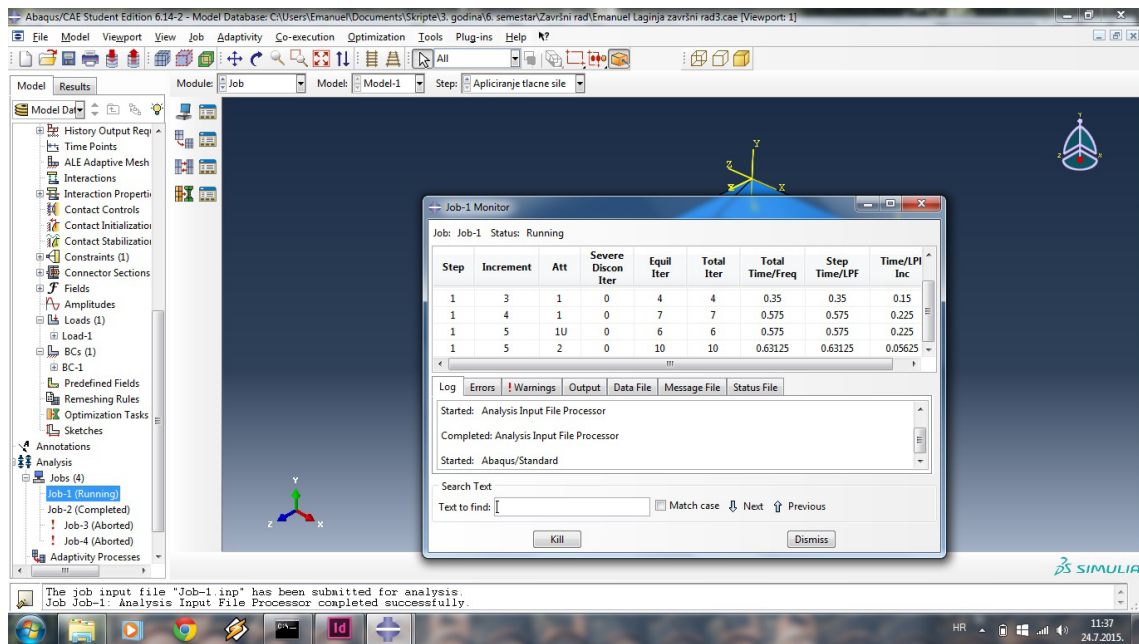
Slika 22. - Postavljanje tereta

Definiranje rubnih uvjeta predstavlja postavljanje načina na koji će se ostali dijelovi modela, koji nisu pod direktnim utjecajem tereta, ponašati. Pod ponašanjem misli se na okretanje s obzirom na stupnjeve slobode gibanja, tako je moguće vidjeti koji najveći kut žljebovi mogu izdržati prije pucanja, što puno pomaže kada se kutija izrađuje za strojno pakiranje. Na Slici 23. prikazano je postavljanje rubnih uvjeta.



Slika 23. - Postavljanje tereta

Nakon izrađenog modela i definiranja uvjeta analize, vrši se sama analiza. Pod modulom *Job* klikne se na opciju *Create* i nakon toga na *Submit*. Klikom na tu opciju pokreće se mehanizam izrade simulacije. Pored ima i opcija *Monitor* kojom se otvara okvir u kojem se prikazuje stanje izrade same simulacije, status te eventualni problemi koji se mogu javiti u toku same simulacije, što je prikazano na Slici 24.

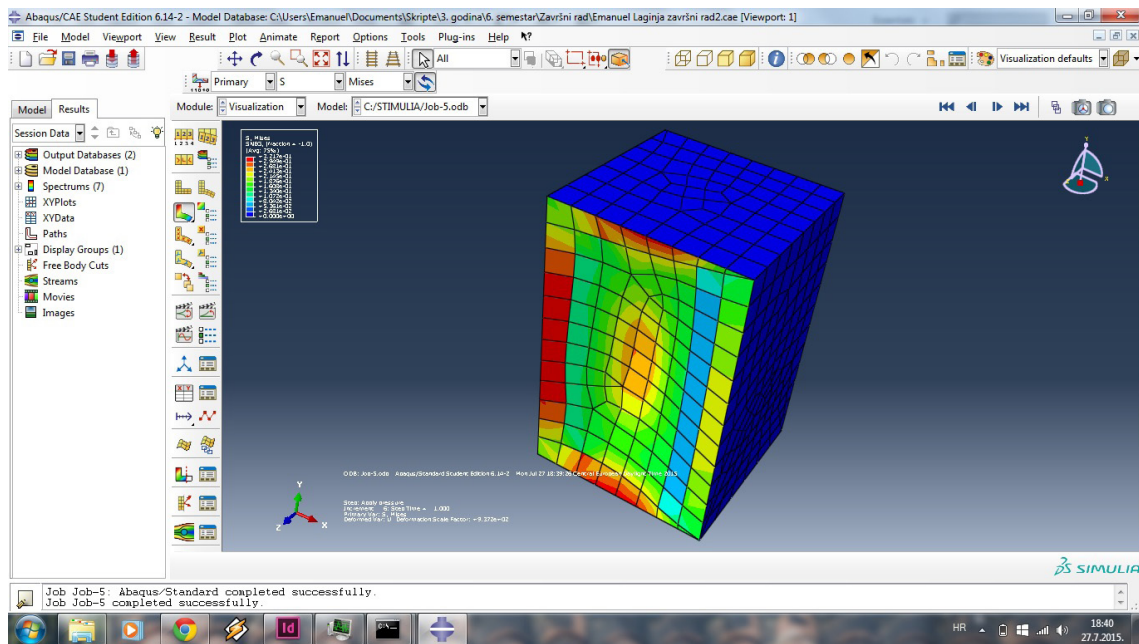


Slika 24. - Praćenje simulacije

7.1. Analiza modela

Nakon što softver da znak da je simulacija izvršena, potrebno je kliknuti na opciju *Results*, koja otvara Abaqus/Viewer, te nam prikazuje rezultate simulacije. Također, moguće je odrediti vrstu prikaza (spektralni prikaz napreznja, prikaz deformiranog modela itd.) te dodatne opcije poput presjeka i reakciju modela na gibanje kroz fluid. Moguće je još i animirati simulaciju, točnije pokazati je u obliku animacije, što omogućuje bolji uvid u način ispitivanja i ponašanja modela pod određenim teretom.

U ovoj simulaciji, korišten je spektralni prikaz napreznja i to tzv. *Rainbow* spektar, gdje plava označava malo odnosno gotovo nikakvo napreznje, a crvena boja maksimalno napreznje, što je prikazano na Slici 25.

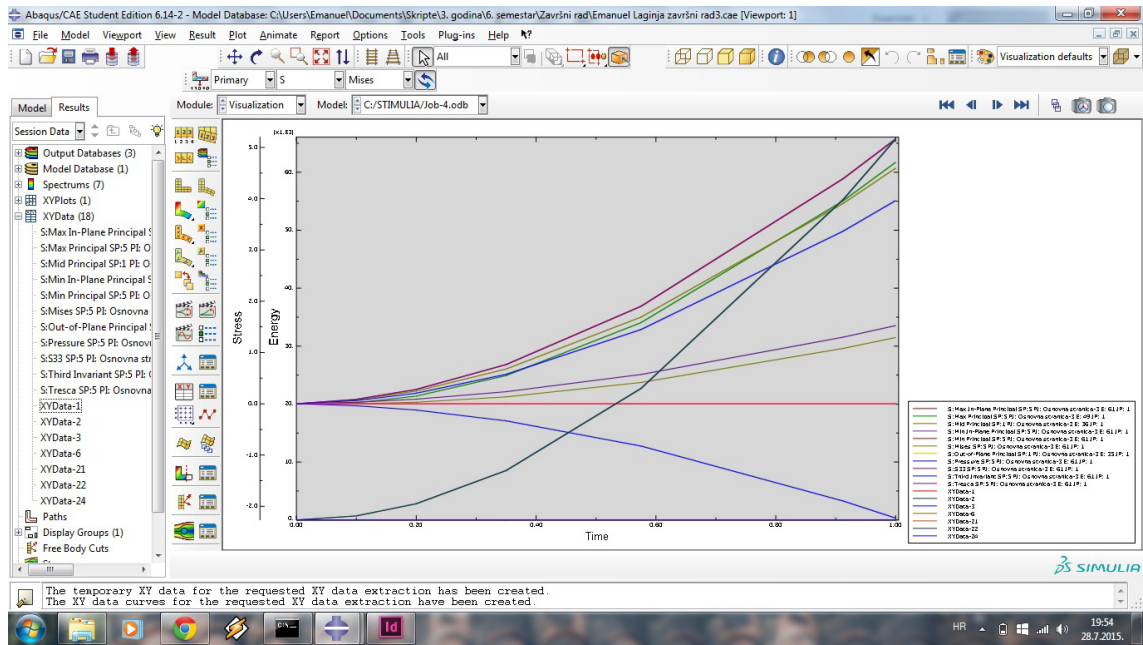


Slika 25. - Spektralni prikaz naprezanja

Poslije definiranja prikaza naprezanja postavljaju se uvjeti izrade dijagrama, odnosno označavaju se točke koje će ulaziti u analizu, tj. izradu dijagrama. Pri izradi dijagrama koristi se opcija *XYData* sa podopcijom *ODB history output*. U ovom dijelu se definira polje koje ulazi u analizu, u ovom slučaju izrađena su dva takva dijagrama gdje se kod prvog analiziralo područje pod djelovanjem ljepila (klapna za ljepljenje), a kod drugog područje najvećeg naprezanja (crvena polja).

Ovom funkcijom moguće je izraditi dijagram koji prikazuje ponašanje referentnog polja u smislu elastičnosti, plastičnosti, naprezanja, elektrostatičnosti, elastičnosti spoja (obična, tangencijalna te ona na normali), kinetičke energije itd.

Kod ovog zadatka promatrano je samo naprezanje cjelokupnog modela (Strain energy, *Artificial strain energy*), što se može vidjeti i na Slici 26.



Slika 26. - Izrada dijagrama

8. Rezultati

Rezultati analize pokazuju kako maksimalan tlak koji definirani materijal može podnijet (karton 220 g/m²), iznosi 600 kPa. Točnije, taj podatak govori o graničnom tlaku pri kojem deformacija materijala prelazi iz elastične u plastičnu (inače se naziva otpornost prema tlaku po Mullenu, a u praksi primjenjuje se i naziv “prskanje” - eng. *bursting test*). [18]

$$p = F / A \quad (1)$$

Sila koja je aplicirana iznosi $F=5.5$ N, a površina na koju djeluje $A=25$ mm² te se prema jednadžbi (1) dobije da tlak prskanja iznosi $p=220$ kPa. Ovaj podatak pokazuje kako nije korištena dovoljna sila koja bi uzrokovala tzv. prskanje papira, pa je stoga drugi put korištena maksimalna sila.

Tlak prskanja koji je korišten u ovom izračunu je maksimalan što znači da iznosi $p=600$ kPa. Površina djelovanja ostaje ista $A=25$ mm² pa slijedi da je, prema jednadžbi (1) sila potrebna za ostvarivanje prskanja kartona $F=15$ N. Nakon ovog izračuna zaključuje se kako korišteni karton može izdržati pritisnu silu od 15 N, gdje se počinje izvijati te poprima plastičnu deformaciju, odnosno biva oštećen. Stoga, ako se aproksimira da vrijedi $1 \text{ kg} = 10 \text{ N}$, moguće je zaključiti kako korišteni karton može izdržati masu od 1.5 kg. Taj podatak se, recimo, može koristiti kod planiranja pakiranja prireza (djelomično sljepljenih kutija) u transportne kutije, neposredno prije distribucije naručitelju.

9. Zaključak

CAE softver je već uvelike integriran u mnoge grane industrije kao recimo građevinskoj, električnoj, strojarskoj, automobilskoj itd. No u ambalažnoj industriji i to isključivo u dijelu industrije kartonske ambalaže se takav tip softverske podrške nalazi još u povojima iz razloga što se uglavnom od kartona izrađuje ambalaža koja ima ulogu prodaje veću nego ulogu zaštite proizvoda. Pod time se misli da zaštitna funkcija ima ulogu samo da štiti proizvod od vanjskih utjecaja, no ne i da izdrži određena naprezanja na djelovanje sile ili pak otpornost na gibanje kroz fluid. Stoga u tom području potreba za takvim tipom softvera nema isplativost. No kada govorimo o specijaliziranom području takve industrije, recimo kod proizvodnje transportne ambalaže od valovite ljepenke, staklene, polimerne ili pak višeslojne ambalaže (npr. Tetrapack), gdje je primarna zadaća ambalaže zaštita proizvoda, isključivo kada se govori o velikim masama, takav softver može uvelike olakšati planiranje izrade takvog proizvoda, pogotovo jer se izrada takve ambalaže temelji na njejoj nosivosti, što se u takvom tipu softvera može vrlo lako izračunati. Stoga se može zaključiti kako je budućnost takve tehnologije upravo u toj usko specijaliziranoj proizvodnji, čija je primarna uloga funkcionalnost proizvoda. Također, budućnost je i u tome što upravo takvo osmišljavanje kutije pruža veliku prednost, a to je činjenica da se virtualno može odrediti kolika čvrstoća kutije je potrebna da bi podnijela određeno opterećenje, što znači da nije potrebno raditi prototipove i testirati ih, što dovodi do uštede vremena na planiranju proizvodnje, uštede na materijalu te očuvanju resursa.

10. Popis literature

1. ***<http://www.adobe.com/> - Adobe logotip, 10.6.2015.
2. ***<http://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/abaquscae/> - Abaqus/CAE - Dassault Systèmes - Abaqus logo, 10.6.2015.
3. Franjo Mesaroš (1971). *Grafička Enciklopedija*, Tehnička knjiga, Zagreb
4. Kaj Johansson, Peter Lundberg, Robert Ryberg, (2007). *A Guide To Graphic Print Production 2nd Edition*, John Wiley & Sons, Inc. Hoobken, New Jersey
5. ***<http://www.recikliraj.hr/wp-content/uploads/2013/04/paper6.jpg> – Proizvodnja papira u Kini, 10.6.2015.
6. Helmut Kipphan (2001). *Handbook of Print Media*, Springer-Verlag, Heidelberg
7. Ivan Drčec (2012). *Mehanička kvaliteta valovitog kartona ovisno o sastavnicama*, diplomski rad, Grafički fakultet u Zagrebu
8. ***<http://www.urbancult.hr/4878.aspx>- ambalaža mješana, 11.6.2015.
9. ***http://stari.dizajn.hr/images/work_1022_1.jpg - Slika prodajne ambalaže, 12.6.2015.
10. ***<http://www.drvoplast.com.hr/index.php?L=HR&STR=KARTON> - Skupna i transportna ambalaža, 12.6.2015.
11. ***<http://www.ambalaza.hr/hr/novosti/milijunske-zarade-na-plasticnim-bocama,11592.html> - Povratna i nepovratna ambalaža, 13.6.2015.
12. ***<http://www.ucl.ac.uk/mssl/mechanical/images/cad-images/Exomars-filter.png> – Cad crtež
13. ***http://www.vistaes.com/cad_cam.html - CAD/CAM
14. ***<http://www.strandeng.com/wp-content/uploads/2012/08/CAE.png> - Slika CAE analize
15. ***http://www.plm.automation.siemens.com/en_us/plm/cae.shtml – CAE
16. Darko Dujmović (2013). *Primjena software-a ABAQUS kod problema stabilnosti pločastog elementa*, predavanje Stabilnost konstrukcija, Građevinski fakultet u Zagrebu
17. Juan Crespo Amigo (2012). *Stiffness Design of Paperboard Packages using the Finite Element Method*, doktorski rad, KTH Engineering Sciences, Stockholm
18. Carl-Magnus Everitt, Gustav Marin, Philip Ekfeldt, Hui Huang, Mikael Nygård (2013). *Package performance - BCT and point loading of paperboard packages*, Innventia Report No.:441, rujun 2013.