

# Mogućnosti upotrebe fotogrametrije pri izračunu sudarnih brzina vozila u prometnim nestecama

---

Ćimović, Krešimir

Master's thesis / Diplomski rad

2021

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Transport and Traffic Sciences / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:608978>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-22**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Transport and Traffic Sciences -  
Institutional Repository](#)



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI**

**Krešimir Ećimović**

**MOGUĆNOSTI UPOTREBE FOTOGRAMetriJE PRI IZRAČUNU**  
**APSORBIRANE ENERGIJE U SUDARU VOZILA**

**DIPLOMSKI RAD**

**Zagreb, 2021.**

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti

## **DIPLOMSKI RAD**

**MOGUĆNOSTI UPOTREBE FOTOGRAMETRIJE PRI IZRAČUNU  
APSORBIRANE ENERGIJE U SUDARU VOZILA**

**THE POSSIBILITIES OF APPLYING PHOTOGRAMMETRY IN  
THE CALCULATION OF ABSORBED ENERGY IN A VEHICLE  
COLLISION**

Mentor: Doc. dr. sc. Željko Šarić

Student: Krešimir Ećimović

JMBAG: 0165029671

Zagreb, srpanj 2021.

## SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	1
<b>2. MATERIJALI I KONSTRUKCIJA KAROSERIJE</b> .....	3
2.1.1 Oblici karoserija .....	3
2.1.2 Limuzina .....	3
2.1.3 Limuzina kabriolet .....	4
2.1.4 Produžena limuzina .....	4
2.1.5 Limuzina sa zakošenim zadnjim vratima ( <i>hatchback</i> ) .....	5
2.1.6 Karavan .....	5
2.1.7 Kupe .....	6
2.1.8 Kupe kabriolet .....	6
2.1.9 Višenamjensko vozilo .....	7
2.1.10 Terensko vozilo (SUV) .....	8
2.2 Konstrukcija karoserije .....	9
2.2.1 Odvojena karoserija .....	9
2.2.2 Karoserija s nosivim okvirima ( <i>subframe</i> ) .....	10
2.2.3 Samonosiva karoserija .....	10
2.2.4 Karoserija s rešetkastim okvirima ( <i>Space-frame</i> ) .....	12
2.3 Materijali za izradu karoserija .....	13
2.3.1 Niskolegirani čelik .....	14
2.3.2 Čelici visoke čvrstoće .....	14
2.3.3 Ultračvrsti čelici .....	14
2.3.4 Aluminijski .....	15
2.3.5 Polimerni kompoziti .....	15
2.3.6 Usporedba mehaničkih svojstava .....	16
2.4 Karoserija kao pasivni element sigurnosti .....	16
2.4.1 Sigurnosna karoserija .....	18
2.4.2 Pojasna linija .....	20
<b>3. FOTOGRAMetrija</b> .....	22

3.1	Osnovni parametri digitalne fotografije.....	23
3.1.1	Ekspozicijski trokut .....	23
3.1.2	ISO osjetljivost .....	25
3.1.3	Otvor zaslona.....	25
3.1.4	Dubina oštine .....	27
3.2	Osnovna teorijska podloga fotogrametrije .....	27
3.3	„Structure From Motion“ algoritam.....	30
3.4	SIFT algoritam.....	33
3.5	„Bundle block adjustment“ algoritam.....	34
3.6	Tijek rada algoritama.....	34
<b>4.</b>	<b>ENERGETSKA METODA ZA ODREĐIVANJE BRZINE SUDARA VOZILA.....</b>	<b>36</b>
4.1	Definicija EES .....	36
4.2	Definicija $\Delta V$ .....	38
4.3	Izračun brzine vozila na temelju deformacija i EES-a.....	39
4.4	Energetski raster u svrhu analize sudara .....	43
4.4.1	Postupak izrade dijagrama energetskog rastera .....	45
4.4.2	Izračun energije deformacije na osnovi testova.....	48
4.4.3	Koeficijenti čvrstoće vozila .....	50
4.4.4	Izračun energije deformacije na osnovu rada i EES.....	51
<b>5.</b>	<b>PRIMJENA FOTOGRAMETRIJE U PROCJENI DEFORMACIJE VOZILA NAKON SUDARA ..</b>	<b>53</b>
5.1	Fotografiranje bespilotnom letjelicom.....	53
5.1.1	Bespilotna letjelica DJI Phantom 4 PRO .....	53
5.1.2	Kamera.....	54
5.2	Programski alat Agisoft Metashape .....	54
5.2.1	Svrstavanje fotografija.....	54
5.2.2	Izgradnja gustih točki.....	55
5.2.3	Izgradnja mreže ( <i>engl.</i> mesh) .....	56
5.2.4	Optimizacija modela .....	57
5.2.5	Izgradnja teksture .....	57

5.3	Skeniranje LIDAR kamerom Intel Real Sence L515 .....	58
5.3.1	LIDAR RealSense L515 .....	59
5.3.2	Programski alat DOT3D.....	60
5.3.3	Skeniranje i rezultati skeniranja .....	60
5.4	Prikaz oštećenja vozila.....	62
5.5	Definiranje sudarnog položaja .....	63
5.5.1	Definiranje sudarnog položaja fotogrametrijskim modelima .....	64
5.5.2	Definiranje sudarnog položaja skeniranim modelima.....	66
<b>6.</b>	<b>USPOREDBA FOTOGRAMETRIJE S KLASIČNOM METODOM FOTOGRAFIRANJA U PROCJENI DEFORMACIJE VOZILA .....</b>	<b>67</b>
6.1	Usporedba s vozilom iz EES kataloga .....	67
6.2	Testirano vozilo .....	69
6.3	Prednosti fotogrametrije u određivanju oštećenja.....	73
<b>7.</b>	<b>ZAKLJUČAK.....</b>	<b>76</b>
	<b>LITERATURA .....</b>	<b>78</b>
	<b>POPIS SLIKA .....</b>	<b>80</b>
	<b>POPIS TABLICA.....</b>	<b>83</b>

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI**  
POVJERENSTVO ZA DIPLOMSKI ISPIT

Zagreb, 7. svibnja 2021.

Zavod: **Zavod za prometno-tehnička vještačenja**  
Predmet: **Prometno tehničke ekspertize i sigurnost**

**DIPLOMSKI ZADATAK br. 6084**

Pristupnik: **Krešimir Ećimović (0165029671)**  
Studij: **Promet**  
Smjer: **Cestovni promet**

Zadatak: **Mogućnosti upotrebe fotogrametrije pri izračunu sudarnih brzina vozila u prometnim nestecama**

Opis zadatka:

U Diplomskom radu potrebno je utvrditi mogućnosti upotrebe fotogrametrije pri izračunu sudarnih brzina vozila u prometnim nesrećama. Analizirati energetska metoda za određivanje brzine sudara vozila. Na realnom primjeru, usporediti mogućnosti fotogrametrije s klasičnom metodom fotografiranja oštećenja u procjeni deformacije vozila

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:

---

doc. dr. sc. Željko Šarić

## SAŽETAK

U ovom radu su opisani materijali i konstrukcije karoserija cestovnih vozila u službi pasivne sigurnosti putnika i mogućnosti apsorpcije kinetičke energije prilikom sudara. Kao primjer metode za izračun apsorbirane energije opisana je energetska metoda. Za prikaz primjene fotogrametrije i energetske metode izrađen je *crash* test u organizaciji Fakulteta prometnih znanosti u Zagrebu za ovaj rad. Izrađeni su 3D modeli razbijenih vozila preko fotogrametrije i LiDAR kamere te prikazani u programu PC-Crash. U radu su prikazane mogućnosti primjene fotogrametrije u ovom području i uspoređene s klasičnom metodom određivanja dubine oštećenja preko fotografije.

KLJUČNE RIJEČI: konstrukcija karoserije vozila, energetska metoda, fotogrametrija, 3D model vozila

## SUMMARY

This paper describes the materials and structures of road vehicle bodies in the service of passive passenger safety and the possibility of absorbing kinetic energy during collisions. Energy method is described as an example for calculating absorbed energy. A "crash" test was organized by the Faculty of Transport and Traffic Sciences in Zagreb for the use of photogrammetry and energy method for this paper. With use of photogrammetry and LiDAR camera 3D models of collided vehicles are made and shown in the PC-crash program. The paper presents the possibilities of applying photogrammetry in this area and compared with the classic method of determining the depth of damage through photography.

KEYWORDS: vehicle body construction, energy method, photogrammetry, 3D vehicle model



## 1. UVOD

Nakon sudarnog procesa jednog ili više vozila potrebno je omogućiti sudskom vještaku da na osnovi očevida rekonstruira sudarni proces i izračuna potrebne parametre. Jedan od važnijih parametara je brzina vozila prije sudara. Današnja vozila su puno elastičnija i mogu apsorbirati puno više energije u sudarnom procesu nego vozila prije dvadeset i više godina. Korišteni materijali u dizajnu konstrukcije su prilagođeni tome da apsorbiraju što više kinetičke energije tijekom sudara. Današnja vozila morala bi proći *crash* test kako bi mogla biti na tržištu, a iz tih testova se prikupljaju važni podatci o brzini i količini oštećenja.

Primjenom fotogrametrije u izradi 3D modela vozila koje je sudjelovalo u sudaru omogućuje se lakše određivanje oštećenja i određivanje brzine sudara.

Naslov diplomskog rada je: *Mogućnosti upotrebe fotogrametrije pri izračunu apsorbirane energije u sudaru vozila*. Rad ima ukupno šest cjelina:

1. Uvod
2. Materijali i konstrukcija karoserije
3. Fotogrametrija
4. Energetska metoda za određivanje brzine sudara vozila
5. Primjena fotogrametrije u procjeni deformacije vozila nakon sudara
6. Usporedba fotogrametrije s klasičnom metodom fotografiranja u procjeni deformacije vozila
7. Zaključak

U drugom poglavlju nabrojani su i opisani oblici karoserija. Opisane su različite konstrukcije karoserija, materijala koje se danas najčešće koriste u automobilske industriji. Kao dio ovog poglavlja opisan je i dio pasivne sigurnosti karoserije vozila.

U trećem poglavlju opisani su osnovni parametri digitalne fotografije kao uvod u fotogrametriju što je i naziv tog poglavlja. Definirana je i opisana fotogrametrija kao i najčešći algoritmi za obradu fotografija u fotogrametriji.

U četvrtom poglavlju definirana je i opisana energetska metoda za određivanje brzine sudara vozila, kao i definicija osnovnih pojmova. Prikazan je energetski raster u svrhu analize sudara te je i izračunat prema jednom primjeru iz literature.

U petom poglavlju je opisana i prikazana primjena fotogrametrije u procjeni deformacije vozila kroz pet potpoglavlja. Kroz potpoglavlja su opisani načini fotografiranja bespilotnom letjelicom, obrada fotografija u programskom alatu Agisoft Metashape, primjena LIDAR kamere, prikaz oštećenja vozila pomoću dobivenih 3D modela i definiranje sudarnog položaja.

U šestom poglavlju je uspoređena klasična metoda određivanja oštećenja s mogućnostima primjene fotogrametrije.

## **2. MATERIJALI I KONSTRUKCIJA KAROSERIJE**

Gornji dio vozila koji služi za smještaj putnika, tereta i ostalih dijelova se naziva karoserija (*njem.* Karosserie , *franc.* carrosserie, od *carrosse*: kola, *tal.* carrozza). Osim što preuzima nosivu ulogu podvozja putnika i tereta, karoserija služi i kao zaštita od meteoroloških utjecaja te sudjeluje kao pasivni element u sigurnosti prilikom nesreća.

U dizajnu osobnih automobila postoje različite vrste karoserija: limuzina, *cabrio* limuzina, kupe, produžene limuzine, kombi, kabriolet, vozila višenamjenske svrhe i specijalna vozila. Osim po vrsti, važnije je razlikovati karoseriju prema konstrukciji nadgradnje. Postoje tri osnovne vrste konstrukcije karoserije: odvojena karoserija, karoserija s nosivim okvirima i samonosiva karoserija.

Najčešće korišteni materijali za izradu karoserije vozila su: čelik, pocinčani čelik, aluminijski limovi, plastične mase i kompozitni materijali. Kod sportskih automobila sve češće se koriste ugljična vlakna zbog svojih vrlo dobrih svojstava te omjera čvrstoće i mase.

### **2.1.1 Oblici karoserija**

Vrste karoserija za putničke automobile prema kategoriji M 1 su: limuzina, limuzina kabriolet, produžena limuzina, limuzina sa zakošenim zadnjim vratima, karavan, kupe, kupe kabriolet, višenamjensko vozilo, višenamjensko vozilo za stanovanje, blindirano vozilo, sanitetsko vozilo, pogrebno vozilo i terensko vozilo.

### **2.1.2 Limuzina**

Limuzina je zatvoreni oblik karoserije koji ima putnički prostor za četiri ili više putnika u najmanje dva reda sjedala. Postoje izvedbe s dvoja bočna ili četiri bočnih vrata.



*Slika 2-1 Primjer oblika karoserije limuzina, [11]*

### **2.1.3 Limuzina kabriolet**

Limuzina kabriolet je otvoreni oblik karoserije s mogućnošću podizanja tvrdog ili mekog dijela krova. Putnički prostor je za četiri ili više putnika u najmanje dva reda sjedala. Postoje izvedbe s dvoja ili četiri bočnih vrata.



*Slika 2-2 1 Primjer oblika karoserije limuzina kabriolet, [12]*

### **2.1.4 Produžena limuzina**

Limuzina je zatvoreni oblik karoserije koji ima putnički prostor za četiri ili više putnika u najmanje dva reda sjedala. Putnički prostor može biti odvojen pregradom od dijela gdje se nalazi vozač. Postoje izvedbe s četiri ili šest bočnih vrata.



*Slika 2-3 Primjer oblika karoserije produžene limuzine, [13]*

### **2.1.5 Limuzina sa zakošenim zadnjim vratima (*hatchback*)**

Limuzina je zatvoreni oblik karoserije koji ima putnički prostor za četiri ili više putnika u najmanje dva reda sjedala. Postoje izvedbe s dvoja ili četiri bočnih vrata. Za razliku od klasične limuzine, ima zakošeni zadnji kraj vozila s dodatnim vratima.



*Slika 2-4 Primjer oblika karoserije sa zakošenim zadnjim vratima (engl. *hatchback*), [14]*

### **2.1.6 Karavan**

Karavan je zatvoreni oblik karoserije koji ima putnički prostor za četiri ili više putnika u najmanje dva reda sjedala. Postoje izvedbe s dvoja ili četiri bočnih vrata. Za razliku od klasične limuzine, ima zakošeni zadnji kraj vozila s dodatnim vratima i prošireni oblik kako bi se osigurao veći unutarnji prostor.



*Slika 2-5 Primjer oblika karoserije karavan, [15]*

### **2.1.7 Kupe**

Kupe je zatvoreni oblik karoserije koji ima ograničen putnički prostor za dvoje ili više putnika u najmanje jednom redu sjedala. Dizajn karoserije je oblikovan kako bi se naglasile sportske karakteristike vozila.



*Slika 2-6 Primjer oblika karoserije kupe, [16]*

### **2.1.8 Kupe kabriolet**

Kupe je otvoreni oblik karoserije koji ima ograničeni putnički prostor za dvoje ili više putnika u najmanje jednom redu sjedala, s mogućnošću podizanja tvrdog ili mekog dijela krova. Dizajn karoserije je oblikovan kako bi se naglasile sportske karakteristike vozila.



*Slika 2-7 Primjer oblika karoserije kupe kabriolet, [17]*

### **2.1.9 Višenamjensko vozilo**

Višenamjensko vozilo je motorno vozilo koje se znatno razlikuje od limuzine, a namijenjeno je prijevozu putnika i njihove prtljage u istom prostoru. U ovaj oblik karoserije se ubraja dosada poznato kombinirano vozilo. Postoje tri vrste vozila: vozilo koje služi samo prijevozu putnika, vozilo za prijevoz tereta i kombinirano vozilo. Najčešće vozilo, ono koje je namijenjeno samo prijevozu putnika, ima tri reda sjedala za putnike i vozača (osam putnika i jedan vozač). Takva vozila imaju dvoja klasična bočna vrata, jedna klizna vrata s desne strane i vrata na stražnjem dijelu vozila.



*Slika 2-8 Primjer oblika karoserije višenamjenskog vozila namijenjeno isključivo za prijevoz putnika, [18]*

Vozilo koje je namijenjeno samo prijevozu tereta ima jedan red sjedala za vozača i dva putnika, a ostatak prostora je namijenjen za teret s pregradom.

Kombinirano vozilo je dizajnirano tako da ima dva reda sjedala, a ostatak prostora namijenjen je prijevozu tereta.



*Slika 2-9 Primjer oblika karoserije višenamjenskog vozila namijenjeno za prijevoz tereta, [19]*

#### **2.1.10 Terensko vozilo (SUV)**

Terensko vozilo (SUV) ima zatvoreni oblik karoserije s putničkim prostorom za četiri ili više putnika u najmanje dva reda sjedala. Postoje izvedbe s dvojna ili četiri bočnih vrata. Za razliku od klasične limuzine, ima zakošen zadnji kraj vozila s dodatnim vratima, a vozilo je više podignuto od tla nego prije navedena vozila.



*Slika 2-10 Primjer oblika karoserije terenskog vozila (engl. SUV), [20]*

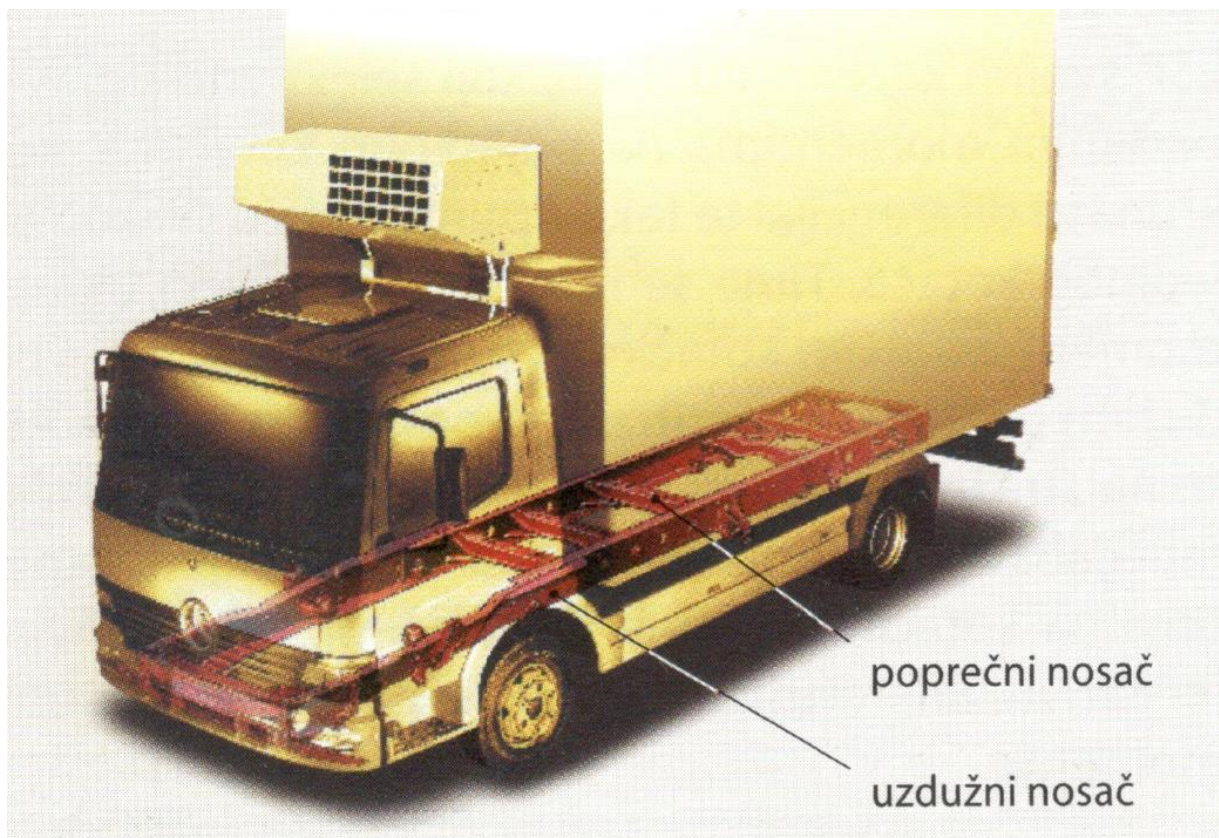


## 2.2 Konstrukcija karoserije

Prema konstrukciji nadogradnje podjela karoserija je sljedeća: odvojena karoserija, karoserija s nosivim okvirima i samonosiva karoserija.

### 2.2.1 Odvojena karoserija

Nadogradnja (šasija) i okvir dva su odvojiva dijela (slika dolje). Osim karoserije, na okvir se pričvršćuju i ostali sustavi podvozja (npr. osovine, upravljanje, ovjes). Zbog svoje prilagodljivosti, danas se ovakva konstrukcija gotovo isključivo koristi u gradnji gospodarskih i terenskih vozila te prikolica. Osim toga, dobro se prigušuje buka, a na isti okvir se mogu postaviti različiti oblici nadogradnje. Konstrukcija okvira obično je u obliku ljestava. Dva uzdužna nosača spojena su s više poprečnih profila zakovicama, vijcima ili zavarivanjem. Čelični okviri s otvorenim (U, L) ili zatvorenim profilom ( $\square$ ,  $\circ$ ) imaju veliku krutost na savijanje kao i torzijsku krutost te osiguravaju veliku nosivost konstrukcije. [2]



Slika 2-11 Konstrukcija s okvirom, odvojena karoserija, [2]

Kod odvojene ili neovisne karoserije sva opterećenja preuzima sama šasija vozila. Osim spomenute funkcije opterećenja, sama šasija služi kao mjesto za pričvršćivanje motora, ovjesa, kabine i ostalih dijelova vozila.

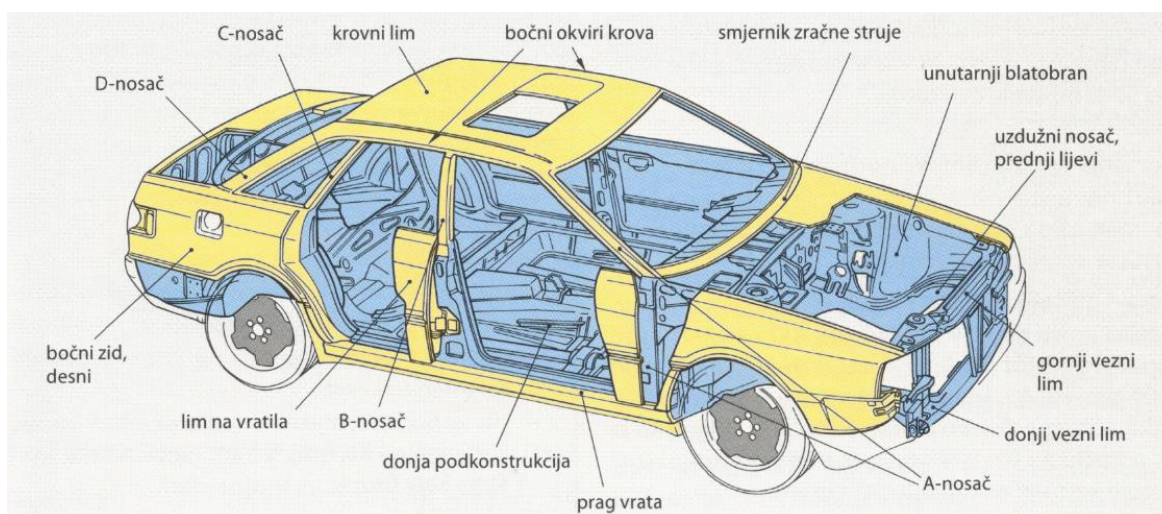
Ovakav oblik karoserije, osim kod spomenutih gospodarskih i teretnih vozila, našao je primjenu kod osobnih vozila, kao što su starije verzije kombiniranih (kombi) vozila. Danas se koriste kod vozila tipa *pick-up*, terenskih vozila i kod nekih električnih vozila.

### 2.2.2 Karoserija s nosivim okvirima (*subframe*)

Većinom se na središnju samonosivu karoseriju vijcima pričvršćuje prednji i stražnji podokvir (slika dolje). U usporedbi sa samonosivom karoserijom, omogućuje jednostavniju izradu različitih karoserijskih inačica. [2]

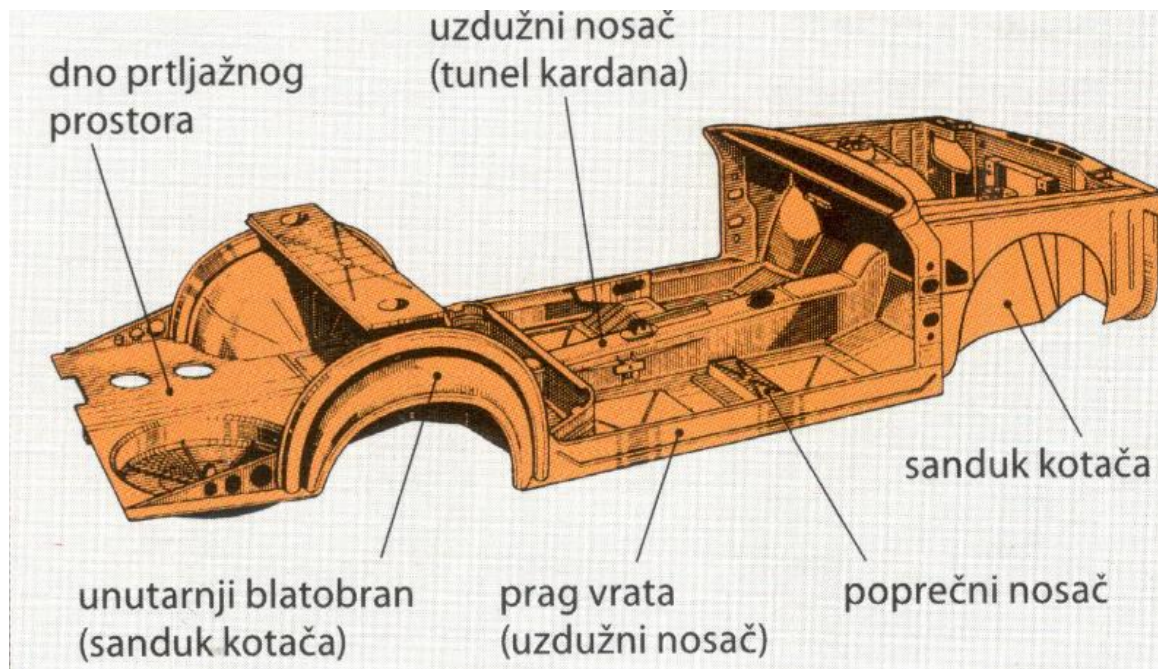
Nosivi okviri mogu imati različite oblike i ispunjavati različite funkcije, kao što su, npr. okviri za stražnje i prednje osovine i okviri koji nose osovину i motor. Zbog tog načina dizajna smanjuje se ukupna masa i sami troškovi proizvodnje. Budući da nosivi okviri nisu direktno spojeni na središnju samonosivu šasiju, to umanjuje vibracije i buku.

### 2.2.3 Samonosiva karoserija



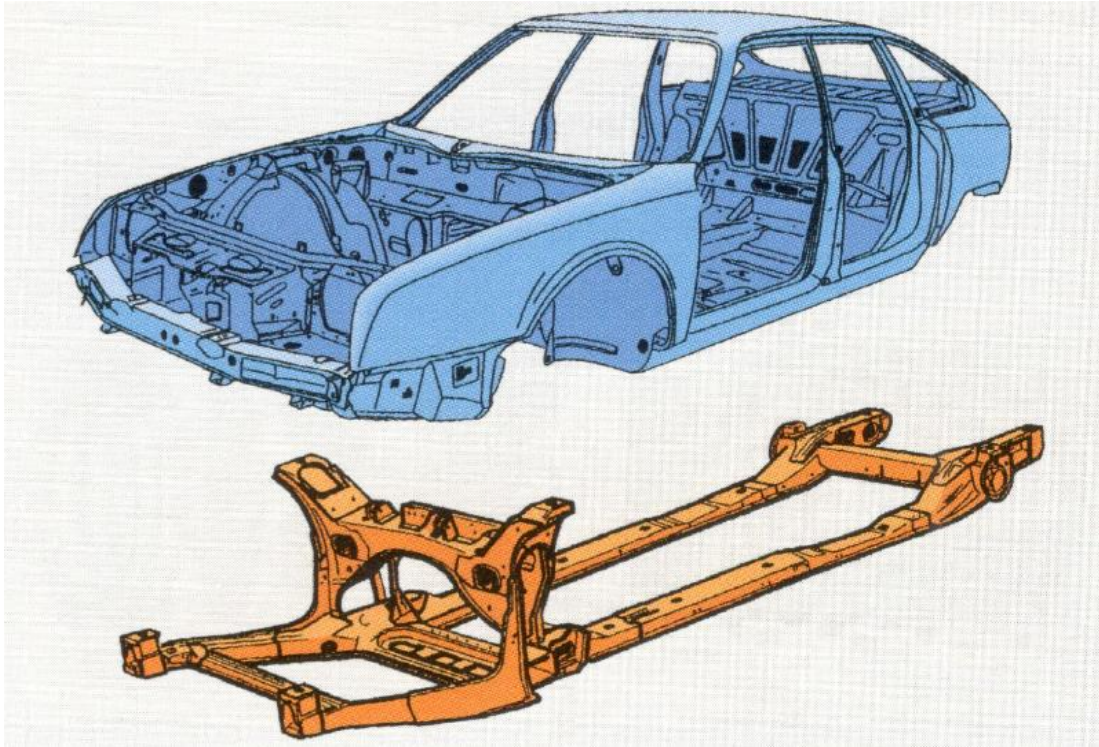
Slika 2-12 Samonosiva karoserija u školjkastoj izvedbi, [2]

Koristi se za osobna vozila i autobuse. Kod osobnih se vozila okvir nadomješta donjom podkonstrukcijom koja, pored nosivih dijelova (nosač motora, pragovi, vrata, poprečni nosači), ima i dno prtljažnog prostora te unutarnji blatobran (slika 2-12). Na ojačanu podkonstrukciju zavaruju se ostali sklopovi samonosive karoserije: A, B, C i D nosači, krovni okvir, krov, blatobrani i prilijepljeno prednje i stražnje staklo. Tako se dobije školjkasta samonosiva karoserija (slika2-13).



*Slika 2-13 Donja podkonstrukcija, [2]*

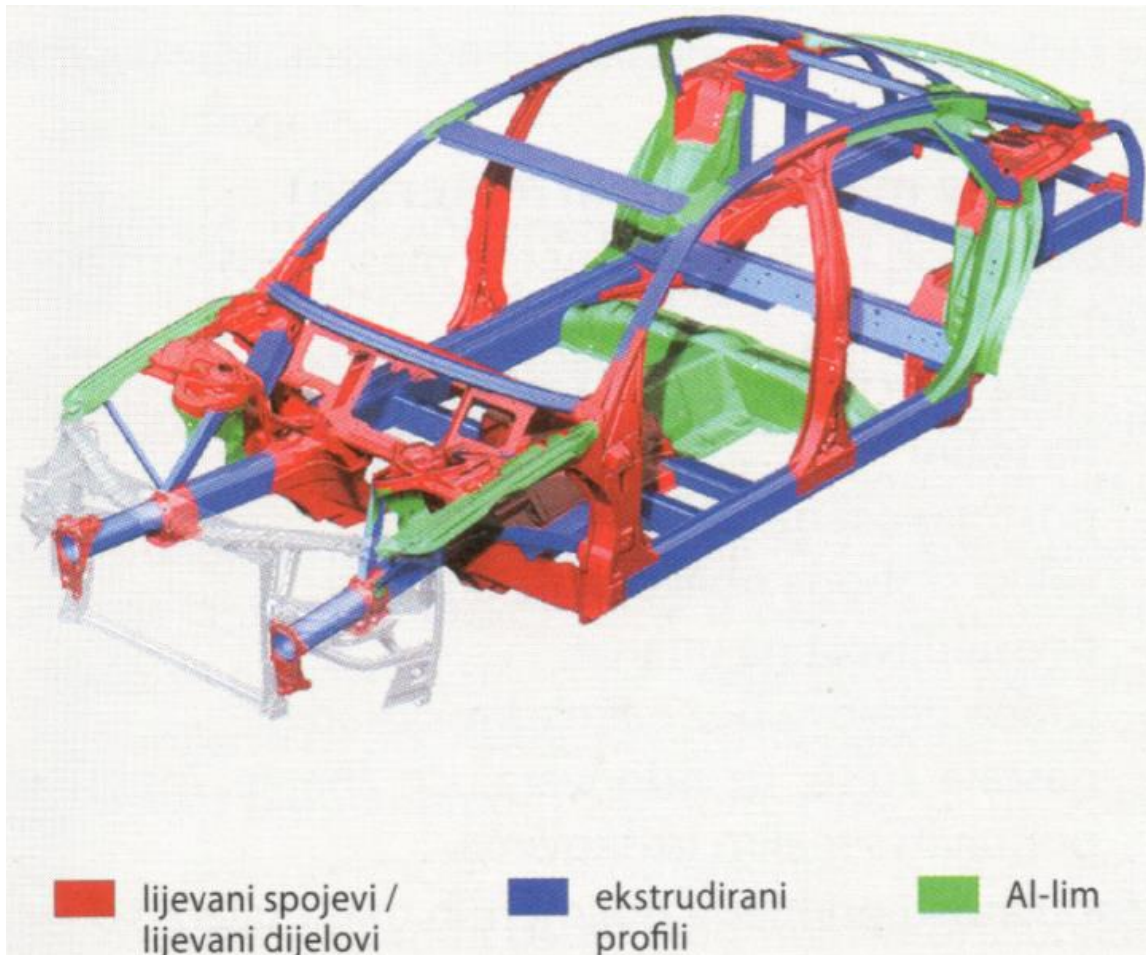
Karoserija se ukružuje profiliranim limovima, ojačanjima dobivenim obradom spuštavanja limova, zatvorenim profilima i vanjskim plohamama. [2]



Slika 2-14 Karoserija s nosivim podokvirime (engl. subframe), [2]

#### 2.2.4 Karoserija s rešetkastim okvirima (*Space-frame*)

Primarni nosivi dio je rešetkasti okvir (sustav nosača) na koji se montiraju vanjske plohe kao dodatni nosivi elementi. Ova konstrukcija primjenjuje se, npr. za osobna vozila s aluminijskom karoserijom (slika 2-15). Pritom različito oblikovani istiskivani profili (ekstrudirani) i profilirani aluminijski limovi čine nosivi okvir koji je na visokoopterećenim mjestima spojen lijevanim spojevima. [2]



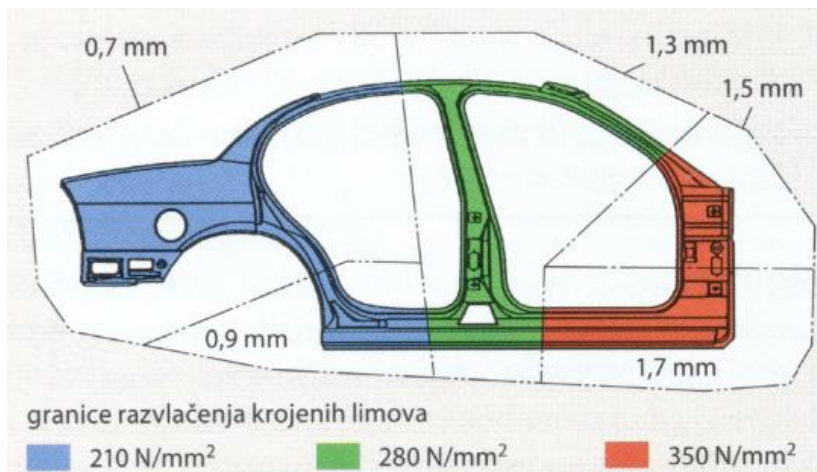
*Slika 2-15 Rešetkasti nosivi okvir osobnog vozila s aluminijskom karoserijom, (engl. Space-frame), [2]*

### **2.3 Materijali za izradu karoserija**

Kod proizvodnje osobnih automobila najčešće korišteni materijali za izradu su čelik, pocinčani čelik, aluminijski limovi i profili istih. Osim metala, koriste se i polimeri i kompoziti ojačani ugljičnim vlaknima. Ciljanim smještanjem tih materijala na određena mjesta na karoseriji ovisit će krutost karoserije koja je dio pasivne sigurnosti vozača i putnika.

### 2.3.1 Niskolegirani čelik

Niskolegirani ili konstrukcijski čelici uglavnom imaju feritnu mikrostrukturu. Ti čelici imaju vlačnu čvrstoću do  $280 \text{ N/mm}^2$  i vrlo su jednostavni za oblikovanje. Konstrukcijski čelici su nekad bili dominantni materijali za izradu karoserija automobila, ali je danas njihova upotreba ograničena na komponente kod kojih se traži niska krutost i na kozmetičke dijelove kod kojih je potrebno kompleksno savijanje. [3]



Slika 2-16 Primjena čelika povišene čvrstoće na bočnom dijelu karoserije, [2]

### 2.3.2 Čelici visoke čvrstoće

Niskolegirani ugljični - manganski čelici legirani su od elemenata za mikrolegiranje, kao što su titan, vanadij itd. Ti čelici imaju vlačnu čvrstoću do  $800 \text{ N/mm}^2$ , a dijelovi izrađeni od njih i dalje mogu biti izrađivani prešanjem. HSLA je jedan od prvih zajednički korištenih čelika visoke čvrstoće u automobilskoj industriji, a u uporabi su od 1990. godine. HSLA čelici se još uvijek koriste u mnogim automobilima. [3]

### 2.3.3 Ultračvrsti čelici

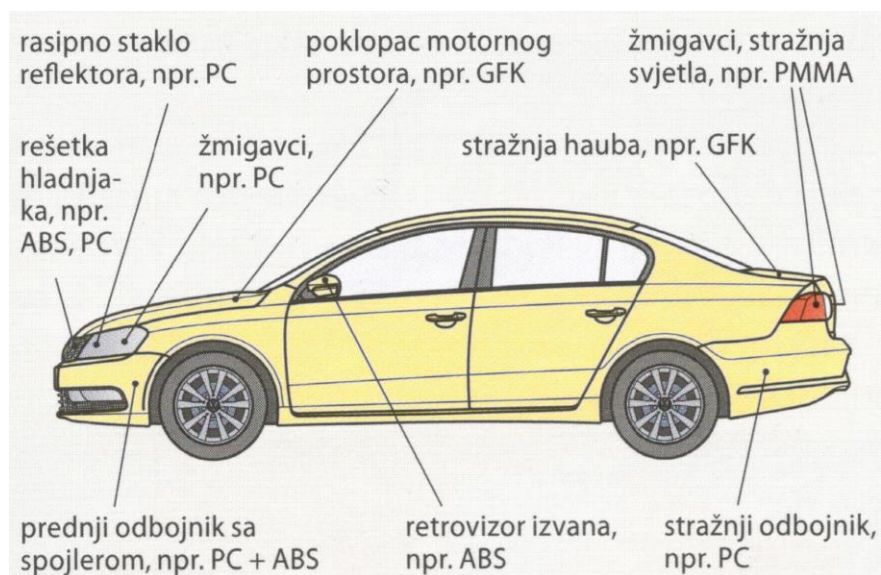
Ultračvrsti čelici pripadaju skupini čelika vlačne čvrstoće preko  $1000 \text{ N/mm}^2$ , a primjenom ovih čelika omogućuje se izvedba što lakše konstrukcije i još bolja iskoristivost materijala. Visoka vrijednost vlačne čvrstoće postiže se korištenjem legiranih elemenata poput Si, Mn, Cr, Ni, Mo, V i nizom mehanizama očvršuća. [3]

### 2.3.4 Aluminij

Aluminij je materijal koji se sve više upotrebljava u automobilskoj industriji. Glavna prednost u usporedbi s čelikom je 2,9 puta manja gustoća čime se postiže ušteda na masi dijelova. Vlačna čvrstoća je do 700 N/mm<sup>2</sup>, uz dobru istezljivost. Mehanička svojstva se postižu legiranjem Mn, Mg, Cu, Zn te nizom toplinskih obrada.

### 2.3.5 Polimerni kompoziti

Kompoziti su materijali proizvedeni umjetnim spajanjem dvaju ili više materijala različitih svojstava s ciljem postizanja karakteristika kakve ne posjeduje niti jedan materijal. [4]



Slika 2-17 Primjeri karoserijskih dijelova iz polimernih masa, [2]

Osnovne komponente kompozita su matrica i ojačivalo. Kod polimernih kompozita matrica je od polimera, a ima zadaću držati ojačivalo zajedno i štiti od atmosferskih djelovanja. Ojačivalo je nosivi element kompozita i mora imati visoku čvrstoću, elastičnost i otpornost na trošenje. Spajanjem matrice i ojačivala dobivaju se materijali vrlo dobrih karakteristika.

Razlozi zbog kojih se polimerne mase koriste u izradi karoserija su:

- mala specifična težina i zbog toga znatna ušteda na težini
- postojanost na koroziju

- velika sloboda oblikovanja dijelova
- neosjetljivost na udarce
- izrada dijelova bez naknadne obrade
- nastale štete (uz odgovarajuće znanje, mogu se popraviti uz male troškove).

Mogućnost primjene polimernih masa u izradi karoserije vozila prikazane su na slici. [2]

### 2.3.6 Usporedba mehaničkih svojstava

U Tablici 1. prikazana su neka mehanička svojstva i cijena različitih materijala koji se koriste u izradi okvira automobila. Porastom zahtjeva za mehaničkim svojstvima dijelova neizbježno raste i cijena po kilogramu. Kod izbora materijala potrebno je uzeti u obzir omjer čvrstoće i mase jer se uz zadanu čvrstoću želi postići minimalna masa dijela. [5]

Tablica 1 Usporedba mehaničkih svojstva

Materijal	Gustoća [kg/m <sup>3</sup> ]	Vlačna čvrstoća MPa	Modul elastičnosti GPa	Cijena po jedinici mase Kn/kg
P460NL1	7700	700-800	200	5-9
30CrMoV 9	7800	1100-1300	210	9-12
AlMg4,5Mn	2650	300-350	70	15-25
Ugljična vlakna (tkanina)	1500- 2000	3000-5000	200-400	1000

Izvor: [5]

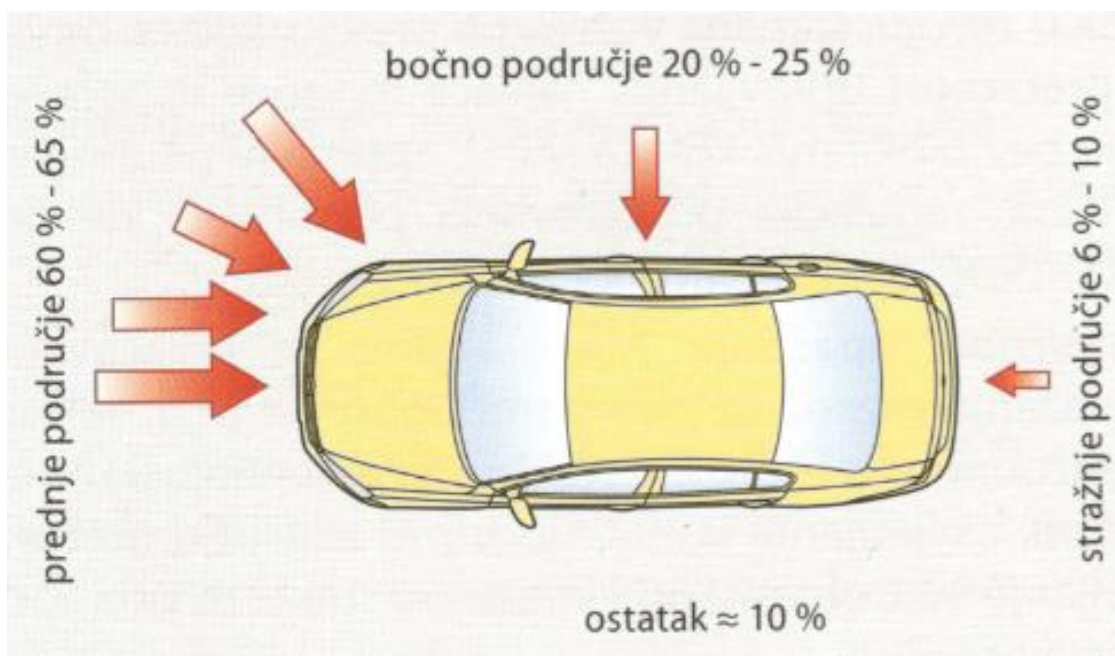
### 2.4 Karoserija kao pasivni element sigurnosti

Pasivna sigurnost obuhvaća sve konstruktivne mjere na vozilu koje pri nesreći smanjuju ozljede svih sudionika prometa. Karoserija je važan dio pasivne sigurnosti vozila. Uloga pasivne sigurnosti karoserije je u što većoj mjeri ublažiti utjecaj kinetičke energije vozila prilikom prometne nesreće. Da bi se utjecaj kinetičke energije udara ublažio, karoserija mora biti čvrsta, otporna na uvijanje, otporna na vlačne i tlačne sile, savijanje i toplinska naprezanja.



Karoserijska sigurnost se može podijeliti na unutarnju i vanjsku područje sigurnosti. Unutarnja sigurnost smanjuje rizik ozljeda u putničkom prostoru vozila smanjivanjem ubrzanja i sila koje djeluju na putnike i vozača.

Cilj mjera je osigurati preživljavanje putnika i vozača te osigurati djelovanje onih sustava koji utječu na sigurno izvlačenje putnika. Prema analizama prometnih nesreća, najčešći uzroci ozljeda putnika su izravni (direktni, frontalni) sudari s 60 – 65 % te bočni s 20 – 25 %.



Slika 2-18 Vrste sudara i ozljede osoba, [2]

Ponašanje karoserije i djelovanje na sudionike nesreće istražuje se na temelju analiza nezgoda računalnim modeliranjem i standardiziranim sudarnim testovima.



*Slika 2-19 Bočni pomaknuti frontalni sudar (50 % prekrivanja), [2]*

Bira se najpovoljnija konstrukcija karoserije. Standardni test je, primjerice, izravni udar vozila brzinom od 50 km/h u nepomičnu prepreku. Putnici u vozilu tijekom sudara ne smiju biti izloženi kritičnim vrijednostima usporenja. To se postiže primjenom deformacijskih područja (*zona deformacije*) koje energiju gibanja pretvaraju u *energiju deformiranja* (deformacijski rad). Dio kinetičke energije koji se pretvara u deformaciju i koji treba biti manji od kritične vrijednosti prenosi se na putnički prostor. [2]

#### **2.4.1 Sigurnosna karoserija**

Sigurnosnu karoseriju (slika 2-20) čini krut putnički prostor te deformabilni prednji i stražnji dio vozila. Kruti putnički prostor mora zadržavati svoj oblik i pri teškim nesrećama omogućujući tako preživljavanje putnika.



*Slika 2-20 Sigurnosna karoserija, [2]*

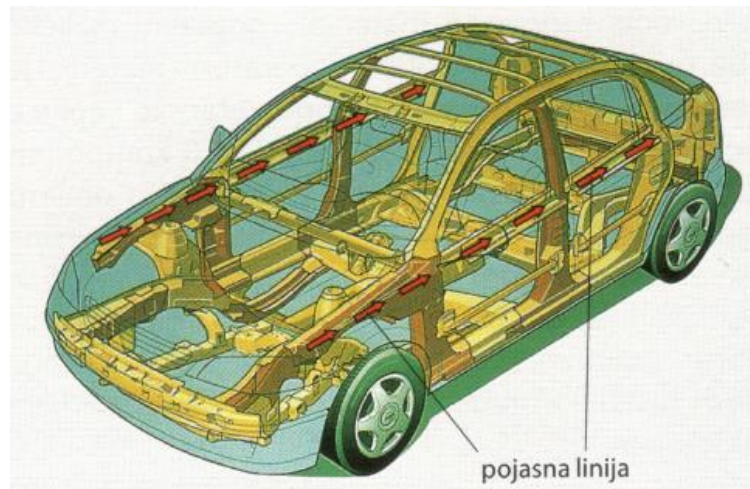
U području deformiranja postavljeni su uzdužni ili poprečni nosači koji se, npr. pri izravnom sudaru, deformiraju prvo u prednjem donjem dijelu karoserije, a zahvaljujući tvornički izrađenim pregibima (slika 2-21). Tek pri teškim udarima u pretvorbi energije sudjeluju i stražnja područja karoserije. [2]



*Slika 2-21 Deformacijsko ponašanje prednjeg uzdužnog nosača, [2]*

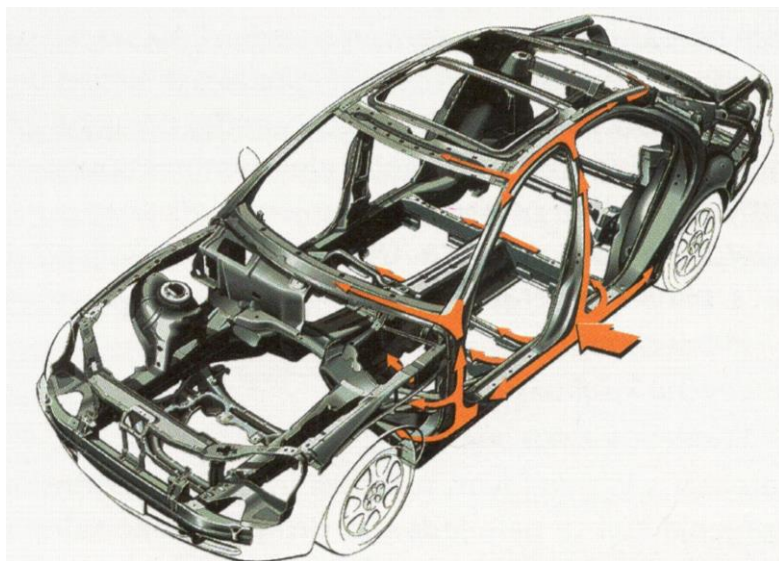
### 2.4.2 Pojasna linija

Kod vozila kojima uobičajena deformacijska područja nisu dovoljna za pretvorbu energije pri izravnom sudaru, u definiranu deformaciju se uključuju i dijelovi koji leže u području pojasne linije. Time je spriječena prevelika deformacija prednjeg dijela putničkog prostora. Pojasna linija proteže se od čeonog lima preko gornjeg prihvata blatobrana, A-nosača, uzdužnih ojačanja bočnih vrata, B-nosača, te, ovisno o konstrukciji, C-nosača.



Slika 2-22 Tok deformacije u području pojasne linije [2]

Pri sudaru se ovakvim konstrukcijskim zahvatima usmjeruje znatno veća energija iznad donje podkonstrukcije, tj. veće deformacije.



*Slika 2-23 Nosiva struktura s tokom sile pri bočnom udaru, [2]*

Zaštita od bočnih sudara prikazana je na slici (slika 2-21). Ojačanjima u području vrata, poprečnim nosačem između A-nosača u visini instrument ploče, pojačanjima pragova vrata, poprečnim nosačem (*transverzalnim ojačanjem poda*) te B i C-nosačima, utječe se na deformacijsko ponašanje karoserije pri bočnim udarima kako bi se povećala zaštita putnika od ozljede. [2]

### 3. FOTOGRAMetriJA

Fotogrametriju<sup>1</sup> je definiralo Američko društvo za fotogrametriju i daljinska istraživanja kao umjetnost, znanost i tehnologiju dobivanja pouzdanih informacija o fizičkim objektima i okolišu kroz procese snimanja, mjerenja i tumačenja fotografskih slika i uzoraka zabilježene blistave elektromagnetske energije i drugih pojava. Kao što se podrazumijeva pod imenom, znanost se izvorno sastojala od analize fotografija, međutim, korištenje filmskih kamera uvelike se smanjilo u korist digitalnih senzora. Fotogrametrija se proširila na analizu drugih zapisa, kao što su digitalne slike, zračni akustični energetske obrasci, laserska mjerenja i magnetske pojave. [21]

Osnovna ideja fotogrametrijske metode je rekonstrukcija optičkih pravaca, tj. definiranje jednadžbi pravaca koji povezuju točke na objektu i njihove projekcije na fotografiji. Kod mjerenja u prostoru potrebno je objekt snimiti iz barem dva položaja kamere. Dvije snimke tada tvore stereopar, a fotogrametrijska rekonstrukcija prostora pomoću stereoparova zove se stereofotogrametrija. Optički pravci su se u prošlosti rekonstruirali optomehaničkim postupkom pomoću velikih i skupih uređaja ili stereoinstrumenata. Analiza snimaka bila je dugotrajna i komplicirana te ograničena na specijalizirane mjerne institute pa je fotogrametrija rijetko nalazila primjenu u industriji. Razvojem digitalnih kamera i računalne obrade slike razvili su se automatizirani fotogrametrijski sustavi. Razvoj metode povezo je dva područja, a to su:

- fotografija i
- metrologija.

Radi potrebe visoke točnosti mjernih rezultata, pouzdanosti i automatizacije fotogrametrijskog sustava, fotografije moraju biti visokokvalitetne. Digitalni aparati su iz dana u dan sve bolji i bolji, granice kvalitete fotografije i veličine rezolucije se stalno pomiču, što je važno za točnost mjerenja. Istovremeno, cijene opreme na tržištu padaju pa oprema postaje dostupnijom za široku primjenu. Metrologija se bavi tehnikama za određivanje 3D koordinata mjernog objekta iz fotografija. [22]

Prednost ove metode skeniranja je ta da nije potrebno imati fizički doticaj s objektom koji se skenira. Razvojem tehnologije današnji senzori za prikupljanje informacija su, osim digitalne

---

<sup>1</sup> spoj tri grčke riječi: photo/svjetlo; gram/ crtež/crtati; metry/ mjera/mjerenje

fotografije, i termalne ili multispektralne kamere. Također se koriste i LIDAR sustavi kako bi se što kvalitetnije izradio digitalni 3D model promatranog objekta ili područja.

Prema prostornom položaju kamere (senzora), fotogrametrija se može podijeliti u kategorije:

- aerofotografija
- terestička
- orbitalna i
- ekstra-terestička.

Aerofotografija je proces snimanja većih (vanjskih) površina korištenjem bespilotnih letjelica. Količina detalja u aerofotogrametriji nije toliko potrebna. Ukoliko je objekt koji se snima manjih dimenzija, riječ je o terestičkoj fotogrametriji. Kod te metode detalji su puno važniji nego kod aerofotogrametrije.

Područja u kojima se primjenjuje fotogrametrija:

- Forenzika
- Arheologija
- Arhitektura
- Građevina
- Automobilistička industrija
- Medicina
- Mapiranje geoloških informacija
- Obrnuti inženjering
- itd.

### 3.1 Osnovni parametri digitalne fotografije

#### 3.1.1 Ekspozicijski trokut

Ekspozicija je ukupna količina svjetla koja padne na fotoosjetljivi sloj (film ili senzor). Može se izraziti kao umnožak intenziteta svjetla koje pada na fotoosjetljivu površinu i vremena osvjetljavanja. [22]

$$E = I \cdot t \quad (1)$$

gdje je:

$E$  – ekspozicija

$I$  – intenzitet svjetla

$t$  – vrijeme osvjetljavanja.

Ukoliko je ukupna količina svjetla koja dolazi do senzora premala, dobiva se podeksponiranu (pretamnu) fotografiju, a ako je došlo previše svjetla – fotografija je preeksponirana (presvijetla). Intenzitet svjetla se regulira otvorom zaslona objektiva, a vrijeme osvjetljavanja – brzinom zatvarača. Dakle, veličina otvora zaslona određuje koliko svjetla će biti propušteno, a brzina zatvarača koliko vremenski traje osvjetljavanje. Osim o otvoru zaslona i brzini zatvarača, ekspozicija ovisi i o osjetljivosti sloja (filma ili senzora) na svjetlo – ISO vrijednosti. Iako postavka ISO osjetljivosti neće direktno utjecati na količinu svjetla koja dolazi do senzora, ona će utjecati na efekt koji će ta količina svjetla proizvesti. Kontroliranjem ta tri faktora može se postići ispravna ekspozicija na fotografiji. [23]

Kod fotogrametrije postavke fotoaparata bi trebale, u idealnom slučaju, biti postavljene ručno tako da sve fotografije imaju iste postavke. Fotografija ne smije biti pretamna ili presvijetla jer se na taj način gube informacije koje su potrebne programskim alatima kako bi napravili što bolji 3D model iz fotografija.

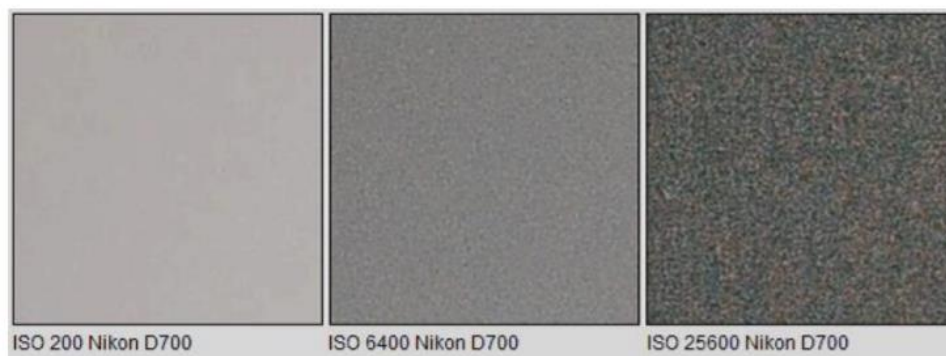


Slika 3-1 Međuviznost otvora zaslona - brzine zatvarača - ISO osjetljivost, [22]



### 3.1.2 ISO osjetljivost

ISO je standard za mjerenje osjetljivosti filma. Proizvođači digitalnih fotoaparata usvojili su ISO kao standard kojim označavaju osjetljivost senzora na svjetlo. Veći ISO broj označava veću osjetljivost na svjetlo. Fotoaparat je moguće podesiti između cca ISO 100 - 6,400 (kod novijih profesionalnih modela i do 25,600), u koracima po 1/3. No, sam senzor ima jednu bazičnu osjetljivost i najčešće je to ISO 100. Postavka ISO 200 znači da je senzor dva puta osjetljiviji na svjetlo od ISO 100, a kod postavke ISO 400 znači da je četiri puta osjetljiviji od ISO 100. Visoka ISO osjetljivost pogodna je za snimanje objekata u kretanju ili u uvjetima slabog svjetla. No, tako snimljene fotografije će sadržavati smetnje – šum, uz manje oštine. Kod veće ISO vrijednosti signal koji se dobije od fotona svjetla na senzoru elektronički se pojačava. Pojačanjem željenog signala, pojačava se i pozadinski elektronički šum koji je prisutan u svim elektroničkim napravama. [23]



*Slika 3-2 Šum pri ISO 200, 6400 i 25600, [22]*

Prilikom fotografiranja u fotogrametriji, ISO osjetljivost je važno postaviti tako da šum (Slika 3-2) koji se javlja pri velikim vrijednostima ISO osjetljivosti ne utječe na program koji kasnije obrađuje fotografije. U praksi se pokazalo da je najbolje ne ići preko vrijednosti 200 kod postavke ISO vrijednosti.

### 3.1.3 Otvor zaslona

Otvor zaslona izražava se tkz. f-brojem. F-broj je omjer žarišne duljine objektiva i promjera otvora objektiva. Predstavlja standardnu jedinicu koja je neovisna o pojedinom objektivu i fizičkoj

veličini otvora. Veličina f-broja je obrnuto proporcionalna količini svjetla koje prolazi kroz objektiv. Što je f-broj manji, objektiv propušta više svjetla (u praksi to znači postojanje tzv. „velikog zaslona“). Upravo se radi toga f-broj često piše kao razlomak, npr. f/5.6, gdje veći broj u nazivniku znači manji promjer otvora zaslona. Standardne vrijednosti f-broja su: 1, 1.4, 2, 2.8, 4, 5.6, 8, 11, 16, 22, 32. [23]



Slika 3-3 Standardni otvori zaslona, [22]

Pri fotografiranju u manualnom modu moramo biti svjesni međusobne povezanosti otvora zaslona, brzine ekspozicije i ISO osjetljivosti. Svaka promjena otvora zaslona vuče za sobom potrebu mijenjanja brzine ekspozicije ili kompenzacije pomoću ISO osjetljivosti. Ako je otvor objektiva veći, kroz njega prolazi više svjetlosti pa je i vrijeme potrebno da se senzor osvijetli kraće. Ako je otvor objektiva manji, potrebno je više vremena za osvjetljavanje senzora (ili veća ISO osjetljivost senzora). [23] U tablici ispod prikazane su kombinacije otvora zaslona, zatvarača i ISO osjetljivosti kako bi se dobila što bolja fotografija.

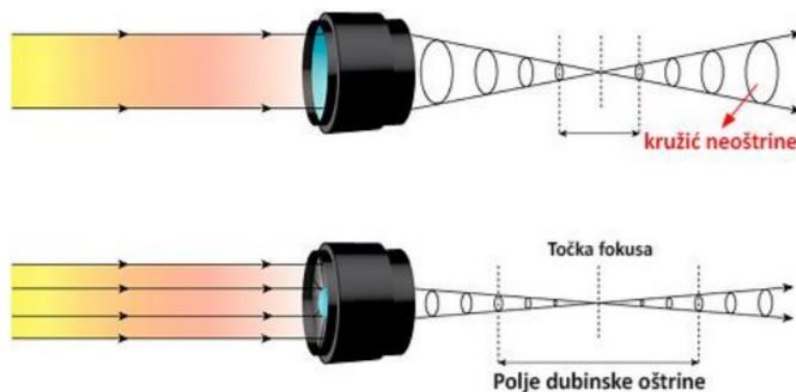
Tablica 2 Kombinacije brzine zatvarača i otvora zaslona pri različitim ISO vrijednostima

Brzina zatvarača		1/1000	1/500	1/250	1/125	1/60	1/30	1/15	1/8	¼
Otvor	ISO 100	f:1,4	f:2	f:2,8	f:4	f:5,6	f:8	f:11	f:16	f:22
	ISO 200	f:2	f:2,8	f:4	f:5,6	f:8	f:11	f:16	f:22	f:32
	ISO 400	f:2,8	f:4	f:5,6	f:8	f:11	f:16	f:22	f:32	F:45

Izvor: [23]

### 3.1.4 Dubina oštine

Polje dubinske oštine, tkz. DOF (*depth of field*) je prostor ispred i iza ravnine koju smo izoštrili, a unutar kojeg su predmeti još uvijek prihvatljivo oštri. Može se reći da je to područje prihvatljive oštine na fotografiji. No, „prihvatljivo oštro“ ne znači i „potpuno oštro“ jer je potpuna oština dobivena samo u jednoj ravnini koja je izoštrjena prihvatljiva samo u tom smislu da ljudskom oku izgleda oštro. Područje prihvatljive oštine određeno je promjerom tkz. kružića neoštine (*engl. circle of confusion*). Sve što je na senzoru (punog formata) zabilježeno promjerom kružića od cca 1/30mm ili manjim, smatra se oštrim. Ovdje treba napomenuti da će se područje prihvatljive oštine činiti veće na fotografijama manjih dimenzija nego na onim jako povećanim. [23]



Slika 3-4 Plitko i duboko polje dubinske oštine, [23]

### 3.2 Osnovna teorijska podloga fotogrametrije

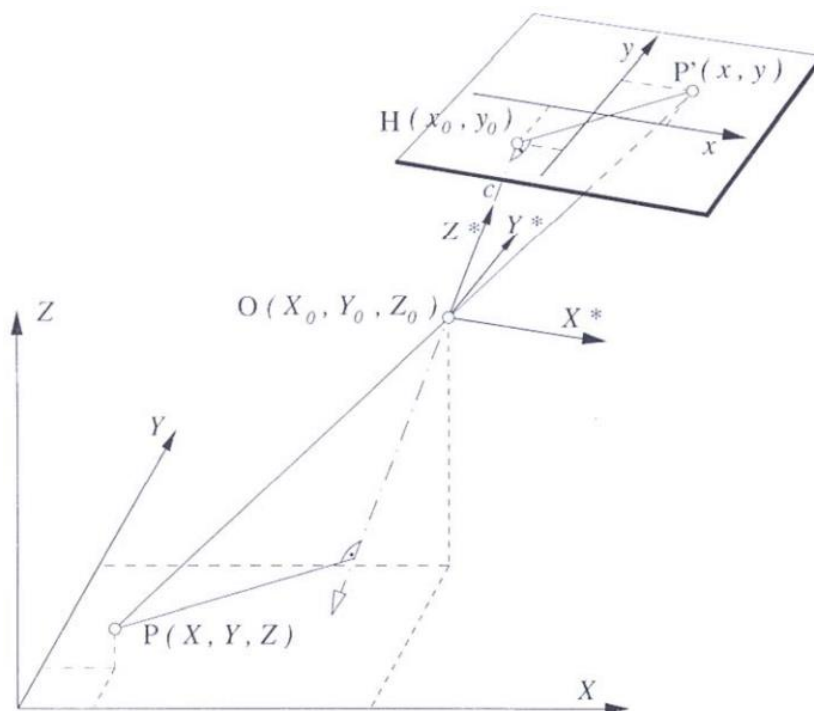
Fotogrametrija je optička mjerna metoda u kojoj se prostorne koordinate točaka promatranog predmeta određuju pomoću snimaka napravljenih fotoaparatom. Na snimkama ostaju zabilježene uočljive mjerne točke pomoću kojih se provodi rekonstrukcija optičkih zraka.

U matematičkom modelu rekonstrukcije pravaca definiraju se dva skupa koordinata, a to su:

- OBJEKTNE (X, Y, Z) – koordinate točke na objektu
- SLIKOVNE (x, y) – položaj projekcije promatrane točke na fotografiji.

Slikom 35 prikazana je veza između slikovnih i objektnih koordinata kod proizvoljno orijentirane kamere. Točka na mjernom objektu je P s objektnim koordinatama (X, Y, Z). Projekcija točke P na filmu ili čipu fotoaparata je P' sa slikovnim koordinatama (x, y). Za rekonstrukciju

optičkog pravca, tj. postavljanje funkcijske veze između objektnih i slikovnih koordinata postavlja se pomoćni koordinatni sustav  $X^*, Y^*, Z^*$  s ishodištem u točki  $O$  koja se nalazi u središtu leće objektiva. Koordinatne osi  $X^*$  i  $Y^*$  paralelne su s koordinatnim osima kamere  $X$  i  $Y$ . [22]



Slika 3-5 Veza između slikovnih i objektnih koordinata kod proizvoljno orijentirane kamere,

[22]

Objektne koordinate točke  $P$  transformiraju se u koordinatni sustav  $X^*, Y^*, Z^*$  uzimajući u obzir translaciju u smjerovima  $X, Y$  i  $Z$  te rotaciju oko koordinatnih osi kutovima  $\omega, \psi$  i  $\kappa$ . Veza slikovnih i objektnih koordinata u koordinatnom sustavu  $X^*, Y^*, Z^*$  slijedi iz uvjeta kolinearnosti, a jednadžbe slikovnih koordinata imaju oblik: [22]

$$x = f(c, X_0, X_{y_0}, X_{z_0}, \omega, \psi, \kappa, X, Y, Z, x_0, \Delta x) \quad (2)$$

$$y = f(c, X_0, X_{y_0}, X_{z_0}, \omega, \psi, \kappa, X, Y, Z, y_0, \Delta y) \quad (3)$$

gdje je:

$C$  - konstanta kamere, vrijednost približno jednaka žarišnoj duljini objektiva

$X_0, X_{y_0}, X_{z_0}$  - koordinate ishodišta  $O$  (središte leće objektiva) pomoćnog koordinatnog sustava

$\omega, \Psi, \kappa$  - kutovi zakreta koordinatnog sustava kamere

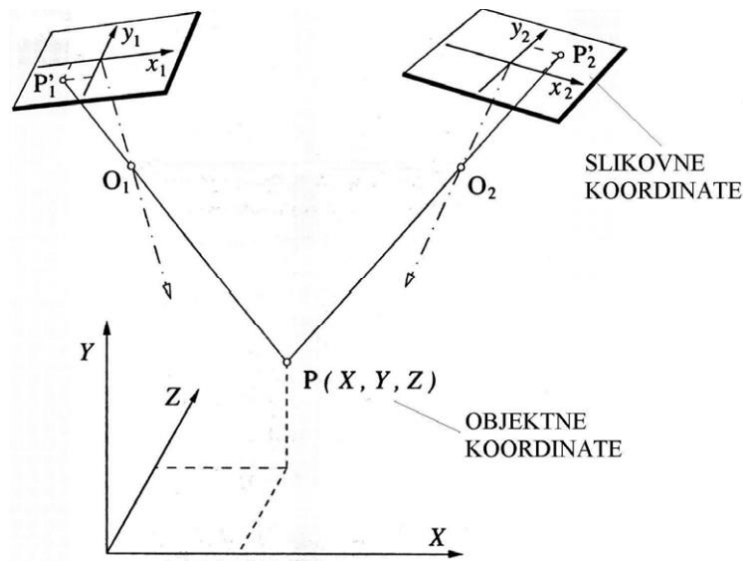
$x_0, y_0$  – slikovne koordinate točke

$X, Y, Z$  – objektne koordinate točke

$\Delta x, \Delta y$  – odstupanje od centralne projekcije.

Usljed nesavršenosti objektiva, položaj točke udaljene od pravca centralne projekcije mora se korigirati. Pri korekciji se uzimaju u obzir parametri kao što su radijalna distorzija, nejednolikost mjerila fotografije, neokomitost, izobličenje slike kao posljedica neravnoće kartice te nepravilno izobličenje slike. [22]

Ovime je definiran model rekonstrukcije optičkih pravaca, tj. veza koordinata točke na objektu i na fotografiji. Teoretski, ovakav model dovoljan je za razmatranje mjerenja u ravnini kada se dvije nepoznate veličine objektnih koordinata  $X$  i  $Y$  ( $Z=0$ ) mogu odrediti pomoću dviju jednadžbi slikovnih koordinata  $(x, y)$ . Kada se razmatraju mjerenja u prostoru u kojem treba odrediti tri nepoznate vrijednosti prostornih koordinata točke  $(X, Y, Z)$ , dvije jednadžbe slikovnih koordinata  $(x, y)$  nisu dovoljne. Za rješavanje ovog problema potrebno je postaviti dodatne jednadžbe slikovnih koordinata točke, a to se radi tako da se točka snimi iz drugog položaja kamere čime se dobivaju još dvije jednadžbe što će omogućiti predefiniranost sustava jednadžbi. Osnova optičkih mjernih metoda kod proračuna položaja točke u prostoru je stereoskopski efekt. Kao što čovjek položaj predmeta u prostoru može percipirati jedino gledanjem s oba oka, tako je prostorna percepcija okoline kod optičkih metoda moguća jedino promatranjem s dvije kamere. Prostorni položaj točke određuje se metodom triangulacije prikazanom slikom 36. Položaj točke u prostoru određuje se presjekom optičkih pravaca koji su određeni točkom na objektu  $P$  i njenom projekcijom  $P'$  na fotografiji. [22]



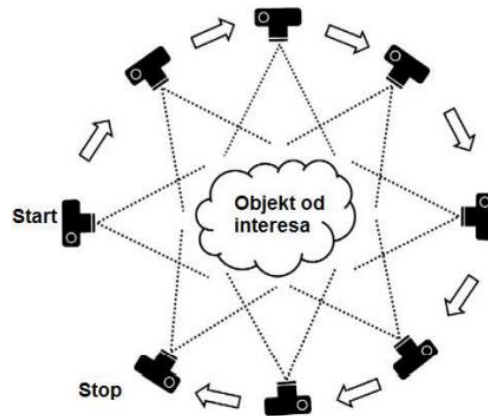
Slika 3-6 Princip triangulacije, [22]

Rješenje matematičkog modela proračuna objektnih koordinata točke  $P(X, Y, Z)$  u prostoru, postiže se metodom izjednačenja zrakovnog snopa. Postavlja se sustav jednadžbi slikovnih koordinata točaka koje su u funkciji: objektnih koordinata točke  $(X, Y, Z)$ , parametara vanjske orijentacije kamere, tj. položaja i kuta fotoaparata kod snimanja svake fotografije te unutrašnjih parametara kamere koji uključuju, npr. karakteristike objektiva. Snimanjem većeg broja fotografija, povećava se broj jednadžbi slikovnih koordinata pa sustav postaje znatno predefiniran, tj. broj jednadžbi bitno je veći od broja nepoznanica. Takav predefinirani sustav nelinearnih jednadžbi rješava se iterativnim postupkom minimizacije odstupanja, a konačno rješenje su prostorne koordinate promatranih točaka i svi ostali parametri matematičkog modela. [22]

### 3.3 „Structure From Motion“ algoritam

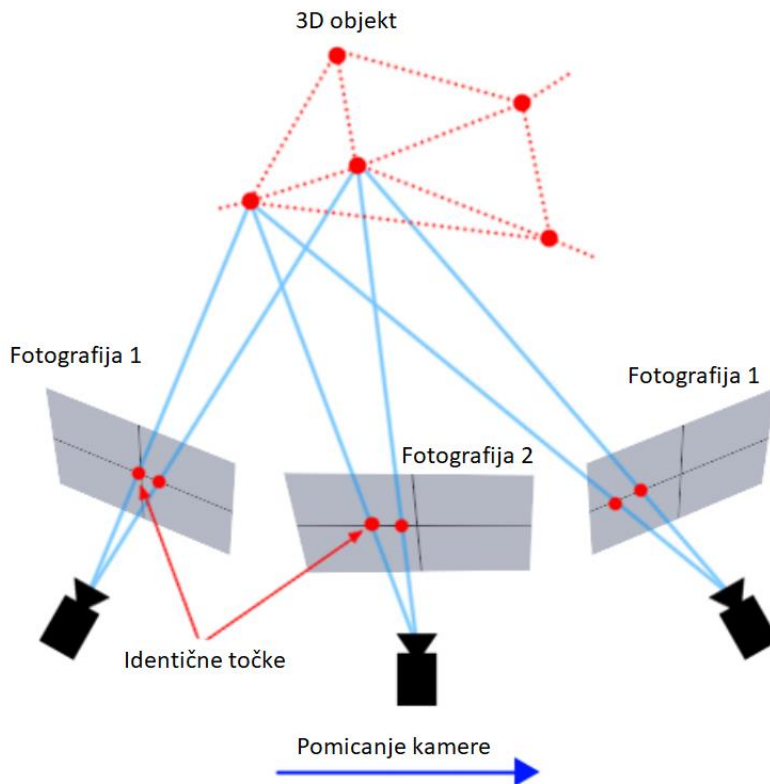
Za rad računalnog programa u fotogrametriji osnovni algoritam je SFM koji se temelji na stereoskopskoj fotogrametriji. Pomoću prikupljenih fotografija fotografiranih iz raznih kutova oko objekta SFM, algoritam omogućuje određivanje unutarnjih i vanjskih orijentacijskih parametara kamere. Na taj način nije potrebno unositi dodatne koordinate geodetskim metodama što umanjuje kompleksnost samog procesa skeniranja, ali unošenjem istih, povećava se točnost i

brzina izvođenja samog postupka. Kako bi proces bio uspješan, potrebno je imati što više snimljenih fotografija objekta koji se skenira.



*Slika 3-7 Način pravilnog fotografiranja objekta za potrebe SFM algoritma, [24]*

Kod svake fotografije se detektiraju točke interesa i te točke se prate kroz ostale snimljene fotografije kako bi se odredio položaj kamere i koordinate snimanog objekta. U tom postupku se javljaju greške koje se mogu ispraviti i na način da se koristi metoda najmanjih kvadrata kod nelinearnih funkcija.



Slika 3-8 Prikaz detektiranih značajki (točaka) na fotografijama, [24]

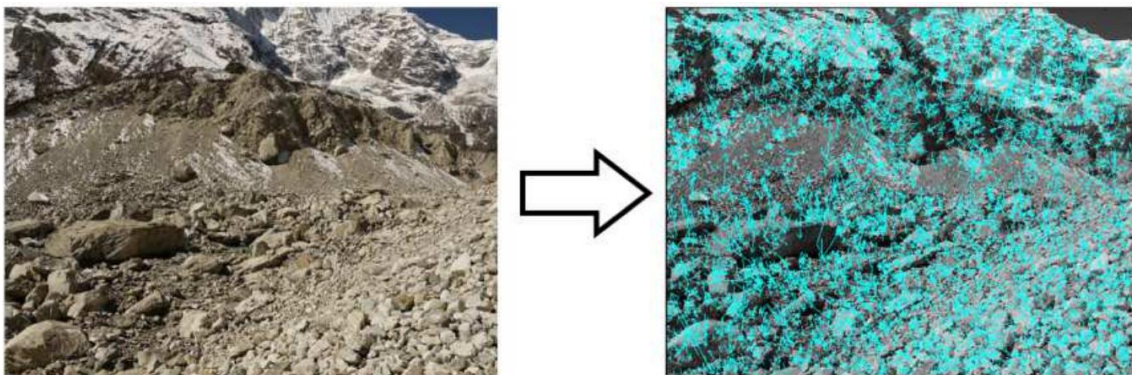
Primjena metode najmanjih kvadrata neophodna je budući da zbog korištenja velikog broja fotografija konačno rješenje nije jednoznačno. Za razliku od tradicionalne fotogrametrije, vanjskim orijentacijskim parametrima kamere dobivenim upotrebom SFM algoritma nedostaju mjerilo i apsolutna orijentacija u prostoru. Ti nedostaci se eliminiraju upotrebom kontrolnih točaka na terenu poznatih koordinata čime su jednoznačno determinirani parametri koji su nedostajali. Prema tome, trodimenzionalni oblak točaka je generiran u relativnom koordinatnom sustavu, takozvanom prostoru slike (*engl.* Image Space) koji se mora naknadno uskladiti sa stvarnim svijetom, odnosno, nekim realnim referentnim koordinatnim sustavom. Usklađenje ovih dvaju koordinatnih sustava najčešće se postiže primjenom trodimenzionalne slične transformacije bazirane na manjem broju kontrolnih točaka na terenu s poznatim prostornim koordinatama. Takve kontrolne točke mogu biti definirane i naknadno, razlučivanjem jasno vidljivih značajki na oblaku točaka i na terenu te zatim određivanjem pripadnih koordinata preciznim geodetskim metodama. U praksi se češće koriste jasno vidljive oznake postavljene na terenu prije postupka snimanja. Takav je pristup i korišten u praktičnom dijelu ovog rada. On



osigurava pouzdanu dobro distribuiranu mrežu točaka poznatih koordinata preko cijelog prostora od interesa i na taj način omogućuje procjenu nelinearnih strukturalnih pogrešaka u rekonstrukciji promatranog objekta primjenom SFM algoritma. Poželjno je ostvariti i redundantnost ovakvih oznaka kako bi se izbjegao eventualni nedostatak specifičnih značajki na fotografijama potrebnih za rekonstrukciju. [22]

### 3.4 SIFT algoritam

Prvi i osnovni problem koji pogađa SFM algoritam je determinacija trodimenzionalnih koordinata korespondentnih značajki na više fotografija snimljenih iz različitih kutova. Inicijalni korak je identifikacija značajki na pojedinačnim fotografijama koje mogu biti iskorištene za povezivanje snimki. Danas je uvriježena metoda rješavanja potonjeg problema SIFT matematički algoritam. To je sustav koji služi za prepoznavanje značajki na svakoj pojedinoj snimci koje su invarijantne na promjenu mjerila i rotaciju te djelomično invarijantne na promjene u osvjetljenju i točki gledišta kamere (Slika 3-9). Točke od interesa, odnosno, promatrane značajke se automatski detektiraju kroz sva mjerila i sve lokacije na svakoj slici. Svako identificiranoj i izdvojenoj značajki pridodaje se pripadni opisni vektor. Opisni vektor se dobije transformacijom lokalnih gradijenata slike u veličine koje su poprilično neosjetljive na varijacije u osvjetljenju i orijentaciji. Spomenuti vektori koji opisuju pojedinu značajku dovoljno su jedinstveni da omogućuju prepoznavanje korespondentnih značajki u iznimno velikim setovima podataka. [22]



*Slika 3-9 SIFT algoritam rastavlja fotografiju na bazu podataka izdvojenih značajki, [25]*

### 3.5 „Bundle block adjustment“ algoritam

To je matematički algoritam, tj. matematički pristup rješavanju problema simultanog rafiniranja, odnosno optimizacije trodimenzionalnih koordinata koje opisuju geometriju promatrane scene te parametara kamere.[22]

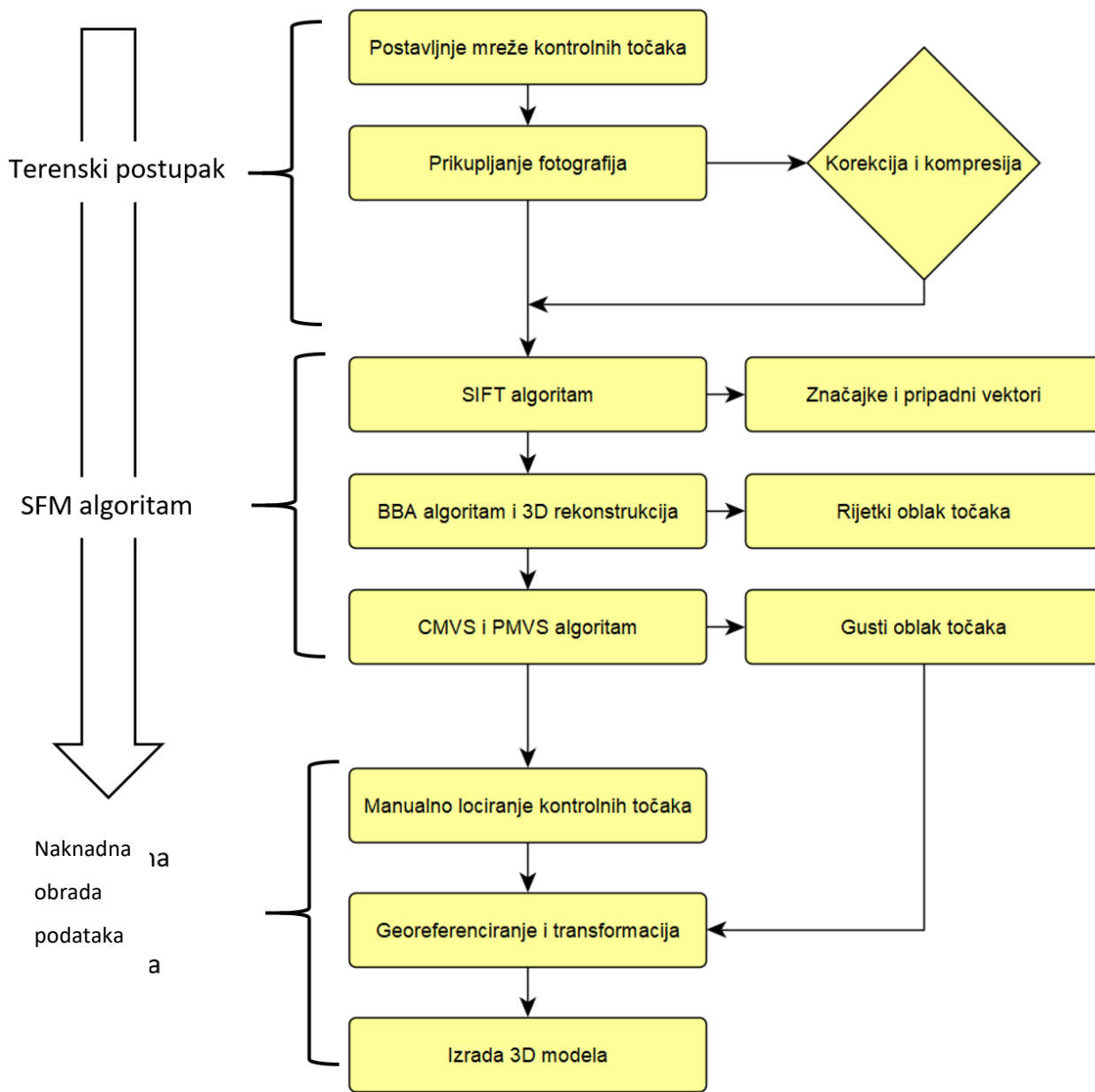
BBA algoritam omogućuje da se ugone inicijalni parametri kamere te parametri geometrijske promatrane scene kako bi se odredili parametri koji najtočnije predstavljaju položaj točaka u koordinatnom sustavu.

BBA je moguće definirati jednostavnim matematičkim izrazom. Pretpostavimo da je  $n$  3D točaka vidljivo na  $m$  fotografija. Vrijednost  $X_{ij}$  predstavlja projekciju točke  $i$  na fotografiju  $j$ . Veličina  $v_{ij}$  predstavlja binarnu vrijednost koja je jednaka 1 ukoliko je točka  $i$  vidljiva na slici  $j$  i obrnuto. Nadalje, može se pretpostaviti da je stajalište kamere za svaku fotografiju  $j$  parametrizirano vektorom  $a_j$  te da je svaka 3D točka  $i$  parametrizirana vektorom  $b_i$ . BBA algoritam minimalizira pogrešku reprojekcije, uzimajući u obzir sve parametre 3D točaka i položaje kamere, što se može opisati sljedećom jednadžbom: [22]

$$\min_{a_j, b_i} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m v_{ij} d(Q(a_j, b_i), X_{ij})^2 \quad (4)$$

### 3.6 Tijek rada algoritama

Na slici 3-10 je prikazan blok dijagram rada SFM algoritma u vezi s terenskim postupkom i na kraju obrade podataka s konačnim rezultatom izrade 3D objekta.



**Slika 3-10** Tijek rada SFM algoritma od fotografije do 3D modela

Izvor: [26]

## 4. ENERGETSKA METODA ZA ODREĐIVANJE BRZINE SUDARA VOZILA

### 4.1 Definicija EES

Izraz za usporedbu kinetičke energije definira se s  $\frac{1}{2} \cdot M \cdot ETS^2$ , gdje je  $ETS^2$  brzina kojom se provodi usporedba u pokusu sudara. Bez obzira na djelomičan odboj pri udaru vozila u kruti zid, ETS je identičan promjeni brzine  $\Delta V$  tijekom udarnog procesa. Procjena oštećenja u pravim centralnim sudarima ne predstavlja teškoću, jer postoji mnogo pokusa za snimanje svih vrsta sudara u automobilskoj industriji.

U radovima u kojima se navodi sukladnost ETS i  $\Delta V$  pri pravim centralnim udarima dvaju osobnih automobila, u kojih su deformacije približne, postoje odstupanja između izgubljene brzine  $\Delta V$  u udarnom procesu i veličine ETS. Stoga procjena udara na osnovu deformacija u centralnim udarima ima veće područje rasipanja vrijednosti rezultata. [6]

Prema Zeider, F. *Deformationsverhalten von Kraftfahrzeugen bei Autprallversuchen unter praxisgerechten Versuchsbedingungen* iz 1979. oznaka ETS je pridružena za ekvivalentnu brzinu pri testiranju, ali se to pokazalo kao nedostatak, jer energija ekvivalentne brzine može odstupati od brzine pri testu. Kako bi se izbjegao taj nedostatak, uvedena je nova veličina EES<sup>3</sup>.

Iskazivanje brzine se radi prema izrazu: (1)

$$W_d = E_d = \frac{1}{2} m EES^2 \quad (1)$$

gdje je:

$W_d$  - rad utrošen na deformaciju [J]

$E_d$  - deformacijska energija [J]

$m$  - masa vozila [kg]

$EES$  – energija ekvivalentne brzine [km/h].

Pri kosim sudarima dvaju vozila jedan se dio kinetičke energije vozila pretvara u rotacijsku energiju. Drugi dio kinetičke energije potroši se na putu smirivanja pri translacijskom kretanju.

---

<sup>2</sup> ETS - ekvivalentna ispitna brzina energiji deformacija vozila

<sup>3</sup> EES - (*engl.* Energy Equivalent Speed), ekvivalentna brzina energiji deformacija vozila

U pokusima se pokazalo da je dio kinetičke energije smirivanja vozila manji u odnosu na dio energije koja je potrošena na deformaciju vozila. [6]

Prilikom sudara vozila dolazi do trajnih deformacija vozila za koje je potrebno utrošiti određenu količinu energije vozila. Utrošena energija je kinetička energija vozila koja se može prikazati pomoću virtualnog iznosa brzine iz EES-a. Za autentičnu procjenu EES-a potrebno je napraviti više različitih crash testova vozila u različitim uvjetima, jer udubljenja nastala na vozilima djelovanjem deformacijske energije ovise o različitim parametrima. Iznos deformacijske energije se tijekom sudara mijenja tako da ona u fazi kompresije raste do maksimalne vrijednosti, a u toj fazi ujedno i nastaju najveća oštećenja na vozilima, dok se u fazi restitucije deformacijska energija smanjuje i u ovoj fazi dolazi do povratnog djelovanja djelomično elastično deformiranog materijala vozila, odnosno, do povratka dijela utrošene energije pri čemu nastaju trajna oštećenja vozila. [7]

EES je skalarna veličina. To znači da ima veličinu, ali nema smjer. Vrijednost EES-a za različite tipove vozila može se dobiti primjenom različitih aproksimativnih jednadžbi. EES se može prikazati pomoću sljedeće jednadžbe: [7]

$$E_d = \frac{1}{2} m EES^2 \quad (2)$$

gdje je:

$E_d$  - deformacijska energija [J]

$m$  - masa vozila [kg]

$EES$  – energija ekvivalentne brzine [km/h].

EES ovisi samo o rasutoj energiji  $E_D$  i masi vozila  $m$ . Ako je EES jednoga od vozila koje je sudjelovalo u sudaru dvaju vozila poznat, onda je moguće odrediti i EES drugog vozila, ako je on nepoznat i to na temelju principa prema kojem je akcija jednaka reakciji. Ovo se može prikazati pomoću sljedećih jednadžbi: [7]

$$\frac{EES_1}{EES_2} = \sqrt{\frac{m_2 S_{Def 1}}{m_1 S_{Def 2}}} \quad (3)$$

$$EES_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot E_d}{m_2 \cdot \left( \frac{S_{Def 1}}{S_{Def 2}} + 1 \right)}} \quad (4)$$

gdje je:

$m_1$  – masa vozila 1 u [kg]

$m_2$  – masa vozila 2 u [kg]

$S_{Def 1}$  – dubina udubljenja vozila 1 nastalog djelovanjem deformacijske sile prilikom sudara vozila u [m]

$S_{Def 2}$  – dubina udubljenja vozila 2 nastalog djelovanjem deformacijske sile prilikom sudara vozila u [m]

$E_d$  – energija koja se utrošila na oštećenja dvaju vozila koja su se sudarila [J].

Ako podaci za određivanje deformacijske energije vozila koja su se sudarila nisu raspoloživi, onda se deformacijska energija sudarenih vozila može izračunati ili korištenjem brzinsko deformacijske krivulje koja je nastala na temelju višestrukih testova različitih sudarnih brzina vozila ili krivulje premještanja sile koja je nastala na temelju jednog udarnog testa. Uz navedene metode, postoje i druge metode za izračun EES-a, i to: metoda energetske mreže (energetski raster), aproksimativne jednadžbe i algoritmi bazirani na oštećenjima vozila. [7]

Prilikom izračunavanja EES-a najčešće se koriste podatci koji se nalaze u EES katalogu, a koji su dobiveni raznim crash testovima različitih modela vozila. EES katalog sadrži fotografije nastalih oštećenja vozila koje su raspoređene prema modelima vozila i vrstama sudara. To omogućuje korisnicima kataloga da na brz i razuman način na temelju EES-a izračunaju jačinu udara, odnosno sudarnu brzinu vozila, a koja je utemeljena na vizualnoj usporedbi stvarnih oštećenja vozila s onima u EES katalogu. [7]

## 4.2 Definicija $\Delta V$

Delta-V ( $\Delta v$ ) je uobičajena oznaka koja se koristi u matematici, a posebno u fizici za označavanje promjene ili razlike u brzini. U kontekstu sudara motornog vozila  $\Delta$  se konkretno odnosi na promjenu brzine između putanje vozila prije sudara i nakon sudara. [8]

$$\Delta v = v_2 - v_1 \quad (5)$$

gdje je:

$v_1$  – brzina vozila prije sudara [m/s]

$v_2$  – brzina vozila poslije sudara [m/s].

Korisnost  $\Delta$  za karakterizaciju težine sudara pojavila se 1970-ih, u kontekstu analize rekonstrukcije sudara. Nacionalna uprava za sigurnost prometa na autocestama (NHTSA) naručila je razvoj programa rekonstrukcije sudara pod nazivom CRASH<sup>4</sup>. Ovaj program se koristi za procjenu  $\Delta V$  vozila koja su sudjelovala u sudaru na temelju mjerenja njihove strukturne deformacije. Izvorna verzija CRASH testova mogla je procijeniti brzinu udara vozila u točnosti oko 12 % stvarne brzine sudara. [8]

Pretpostavimo da se vozilo 1 s masom  $m_1$ , putujući brzinom prije sudara  $v_1$ , sudara s vozilom 2, sporijim vozilom u pokretu s masom  $m_2$  i brzinom prije sudara  $v_2$ . Brzine nakon sudara označene su znakom tilda ( $\tilde{}$ ). Zatim,  $\Delta v$  za svako vozilo je jednostavno promjena između brzine prije sudara i brzine nakon sudara, kao što je napisano u jednadžbi 6. [8]

$$\Delta v_1 = \tilde{v}_1 - v_1 \quad (6)$$

$$\Delta v_2 = \tilde{v}_2 - v_2$$

### 4.3 Izračun brzine vozila na temelju deformacija i EES-a

EES rekonstrukcijska metoda uporabljiva je samo ako se iz preostalih deformacija može ustanoviti vrijednost EES. Preduvjet za to je dobra dokumentacija o oštećenju vozila, što se vidi na slikama fotodokumentacije uglavnom svake prometne nesreće.

Usporedne slike za određivanje EES-a danas stoje na raspolaganju iz ispitnih sudara, a dobivaju se od automobilske industrije za usporedbu. Postoji više načina testiranja koja se obično izvode pri različitim brzinama i za različite vrste sudara i udara. Postoje sljedeće vrste:

- čelni udar, tj. nalet vozila na čvrstu zapreku
- čelni udar u jednu od 30° koso postavljenu zapreku
- čelni udar u stepenastu zapreku s 50° % prekrivenosti
- čelni udar u stepenastu zapreku s 30° % prekrivenosti
- udarac sa strane pod pravim kutom s čvrstim udarnim vozilom
- udarac sa strane ispod 45° od naprijed s čvrstim udarnim vozilom

---

<sup>4</sup> Engl. Calspan Reconstruction of Accident Speeds on Highways

- udarac sa strane ispod 45° straga s čvrstim udarnim vozilom
- udarac u visini stražnjega prozorskog stakla s čvrstim udarnim vozilom.

Za ove testove poznate su ispitne brzine (ETS), što znači brzine kojima se testovi rade. Ovi podatci o ETS-u ne odgovaraju uvijek i u svim slučajevima EES-u što pri procjenjivanju treba uzeti u obzir. Isto tako, valja voditi računa o masi testiranog vozila i o masi ispitnog tereta (čvrsto udareno vozilo). Rezultati ispitnih vrijednosti redovito se objavljuju u stručnim časopisima. [7]

U realnim situacijama nakon očevida u kojem se primjenjuje ova metoda dolazi do poteškoća pri izračunu udarne brzine vozila. Ako su svi parametri poznati i brzina se može izračunati preko deformacija, na taj rezultat također treba dodati i put kočenja kako bi se ustanovila početna brzina.

Deformacije na vozilu nastaju zbog djelovanja vanjskih sila. Živa sila vozila pri usporenju u procesu sudara istog je pravca i veličine, ali suprotnog smjera, od sile kojom prepreka djeluje na vozilo i njena veličina ovisi o deformacijskom putu, a može se prikazati kao: [7]

$$F_S = M \cdot a_s \quad (7)$$

gdje je:

$F_S$  – sila na prepreci kao funkcija deformacijskog puta [N]

$M$  – masa vozila [kg]

$a_s$  – usporenje vozila kao funkcija deformacijskog puta [ $m/s^2$ ].

Sila na prepreci se može izračunati i preko deformacijske strukture vozila pomoću sljedeće jednadžbe: [7]

$$F_S = c \cdot S_d \quad (8)$$

gdje je:

$c$  – krutost čelične površine vozila [N/m]

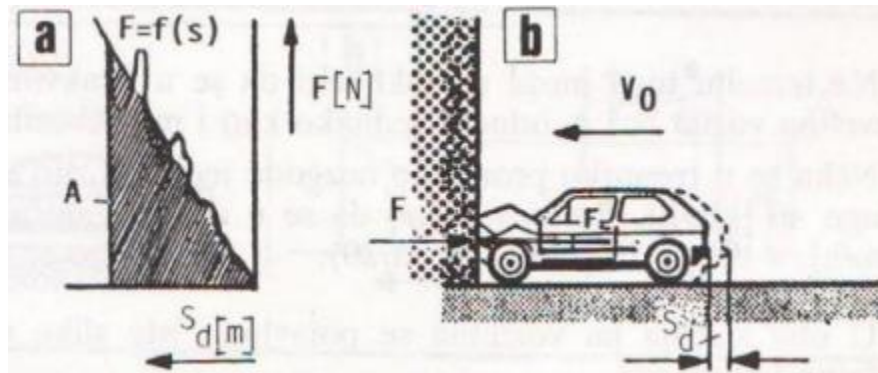
$S_d$  – deformacijski put [m].

Iz dvije prethodno navedene jednadžbe može se odrediti jednadžba za određivanje usporenja vozila: [7]

$$a = \frac{c}{M} \cdot S_d \quad (9)$$



Usporenje, a prema tome i sila na prepreci, povećavaju se povećanjem deformacijskog puta. Zavisnost sile FS u funkciji deformacijskog puta prikazana je na slici 4-1. [7].

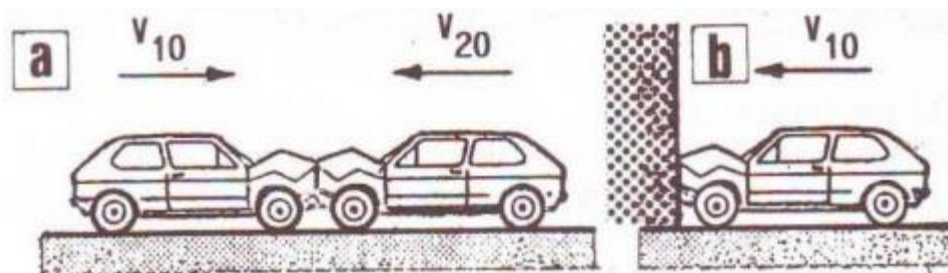


Slika 4-1 Nalet vozila na čvrstu zapreku, [7]

Sila  $F_s$  na deformacijskom putu obavi rad koji je jednak:

$$W_d = \frac{c \cdot S_d^2}{2} \quad (10)$$

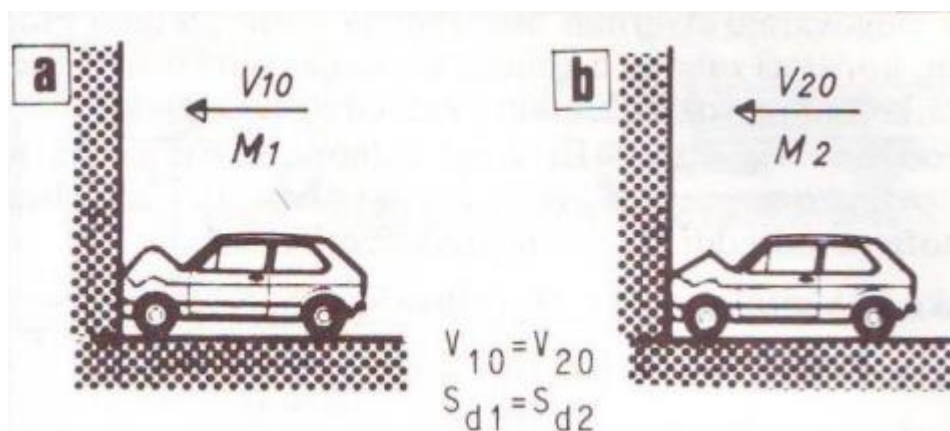
Deformacijski rad jednak je površini A prikazanoj na slici 4-1. Sa slike dolje uočava se kako se razlikuju deformacijski put kad se sudare dva jednaka vozila koja se kreću jednakim brzinama i suprotnim smjerovima i deformacijski put pri udaru vozila istom tom brzinom u vertikalnu prepreku. [7]



Slika 4-2 Usporedba sudara dvaju vozila s naletom vozila na zapreku, [7]

Ako se pretpostavi da vozila djelomično prodiru jedno u drugo, onda nema nikakvih razlika, [7]. Ako se za primjer kod punog sudara dvaju vozila između njih postavi tanka čelična ploča, tijekom sudara ploča bi ostala na istom mjestu i nakon sudara može biti izvađena. Ploča praktično ne utječe na sudar. Ukoliko je ploča dosta velika, tako da se vozači ne mogu vidjeti, imali bi dojam da su prešli preko čvrste prepreke. [1]

Radi zaštite putnika crash testom se određuju maksimalne vrijednosti usporenja vozila koje se ne smiju premašiti (slika 4-3.). Kinetička energija koju posjeduje vozilo pri udaru u prepreku pretvara se u deformacijski rad. [1]



Slika 4-3 Nalet vozila na zapreku, [7]

Ako vozila imaju jednake izmjere, udaraju u prepreku jednakim brzinama i imaju jednak deformacijski put (slika 4-3), onda vrijede sljedeće jednadžbe, [7]:

$$E_{k1} = \frac{M_1 \cdot v_{10}^2}{2}; E_{k2} = \frac{M_2 \cdot v_{20}^2}{2} \quad (11)$$

$$W_{d1} = \frac{c_1 \cdot S_d^2}{2}; W_{d2} = \frac{c_2 \cdot S_d^2}{2} \quad (12)$$

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{W_{d1}}{W_{d2}} = \frac{E_{k1}}{E_{k2}} = \frac{M_1}{M_2} \quad (13)$$

Na temelju toga se može zaključiti da se u ovakvim slučajevima krutosti čeličnih površina  $C_1$  i  $C_2$  odnose jednako kao i mase vozila  $M_1$  i  $M_2$ . [7]

U svrhu lakše procjene oštećenja vozila i izračuna utrošene energije prilikom sudara vozila izrađen je katalog koji obuhvaća širok spektar vozila i njihovih oštećenja. Taj katalog se svakodnevno nadopunjuje novim primjerima i rezultatima prometnih nesreća za svako vozilo, a samim tim se smanjuje pogreška i povećava točnost pri izračunu. Prilikom upotrebe EES-a se za sada daje prednost optičkoj usporedbi nad računskom, zbog bolje procjene štete na fotografijama oštećenog vozila.

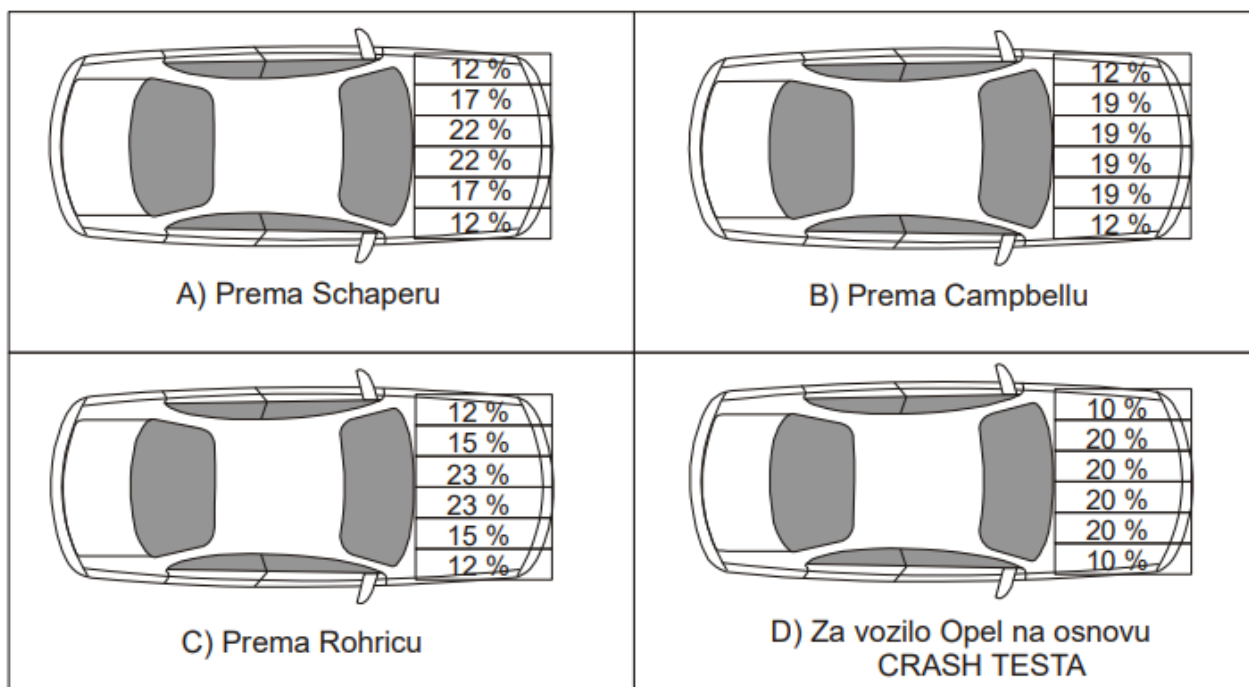
Kao osnova za računsku analizu koriste se pokusi sudara iz kojih se mjere sile udara, a poznate su veličine poput brzine udara, mase vozila itd.

Osim u rekonstrukciji prometnih nesreća, EES metoda se koristi i u osiguravajućim kućama pri analizi sudara.

#### **4.4 Energetski raster u svrhu analize sudara**

Prema radu Campbella polazi se od toga da se pri čelnom udaru, tj. naletu na čvrstu zapreku, dogodi određeno deformiranje vozila koje je u funkciji udarne brzine (EBS – Equivalent Barriere Speed). [7]

Postupak pouzdanog utvrđivanja deformirane energije zasniva se na novom modelu koji podrazumijeva konstrukciju specifičnih dijagrama energetskih rastera za svaku marku, tip i model vozila. Na samom početku ovog postupka neophodno je izvršiti postotnu i geometrijsku preraspodjelu deformirane energije po cijeloj širini vozila. Među prvima, ovom problematikom bavio se Shaper koji je na osnovi rezultata istraživanja dao postotnu preraspodjelu deformirane energije, prikazane na slici 4-4. [9]



Slika 4-4 Postotna raspodjela deformacije energije po širini vozila, [9]

Detaljnijim istraživanjem problema postotne preraspodjele deformirane energije u raster poljima bavio se Rohrich. On je u načelu prihvatio Campbellovu postotnu preraspodjelu uz određene korekcije, s tim što je dao dijagrame energetskega rastera i za bočnu stranu vozila. Rohrich je izvršio korekciju Campbellove metode postotne preraspodjele energetskega rastera i ta nova postotna preraspodjela prikazana je na slici, pod C. Postotna raspodjela energetskega rastera koja je prikazana na slici, pod C, napravljena je na osnovi eksperimenta koji je rađen s putničkim automobilom srednje klase, sa standardnim pogonom i s masom od 950 kg. Usporednom analizom prethodno prikazanih postotnih vrijednosti energije za pojedina polja, uočava se da u suštini nema velikih odstupanja u prikazanim varijantama. Vrijednosti deformirane energije u prvom polju kreću se u rasponu od 10 do 12 %, u drugom 15 do 20 %, dok se vrijednosti apsorbirane energije u trećem polju kreću u rasponu od 19 do 23 %. Procentualna raspodjela deformirane energije u raster polja u najvećoj mjeri zavisi od veličine i položaja motora i njegovih pomoćnih uređaja. Analizom većeg broja fotografija, za različite marke tipove i modele vozila, na kojima se vidi položaj pogonskog motora i njegovih uređaja, može se zaključiti da je

najprihvatljivija postotna preraspodjela energije koju je predložio Rohrich, a prikazana je na slici, pod C. [9]

#### 4.4.1 Postupak izrade dijagrama energetskega rastera

Za izradu dijagrama energetskih rastera potrebno je izvršiti najmanje tri sudara s čvrstom zaprekom s različitim brzinama sudara. Potrebno je nakon sudara izmjeriti dubine deformacije.

Tablica 3 Podatci o vozilu i izmjerenim deformacijama

Marka vozila	Tip vozila	Masa [kg]	Brzina vozila [km/h]	Dubina profila oštećenja [mm]						
				C1	C2	C3	C4	C5	C6	C <sub>pros</sub>
TOYOTA	TACOMA	1432	40,4	248	292	302	290	284	215	280
TOYOTA	TACOMA	1432	48,2	332	396	396	400	404	346	387
TOYOTA	TACOMA	1600	56,4	452	480	495	495	480	399	475

Izvor: [9]

Pomoću izmjerenih vrijednosti iz tablice može se konstruirati graf iz kojeg se vidi da pri brzini od 8 km/h nema deformacija na vozilu. Ta točka se zove koeficijent  $b_0$  i predstavlja nagib zavisnosti brzine i deformacije.

Funkcionalna ovisnost  $V=f(c)$

$$v = b_0 + b_1 c \quad (14)$$

Iz pravila o trenutnoj energiji za sudar sa zidom je: [7]

$$\frac{Mv^2}{2} = \iint_0^{B_1 c} f \, dc \, dB = \iint_0^{B_1 c} (a_0 + a_1 c) \, dc \, dB + K \quad (15)$$

i uz (14) je:

$$\frac{M}{2} (b_0 + b_1 c)^2 = \frac{M}{2} (b_0 + 2b_0 b_1 c + b_1^2 c^2) = a_0 \cdot c \cdot B_0 + a_1 \frac{c^2}{2} B_0 + K \quad (16)$$

Usporedbom koeficijenata slijedi za  $c=0 \rightarrow$

$$K = \frac{M}{2} b_0^2 \quad (17)$$

i nakon ubacivanja K i prebacivanja je: [7]

$$a_0 = M \frac{b_0 b_1}{B_0} \quad (18)$$

$$a_1 = M \frac{b_1^2}{B_0} \quad (19)$$

Time se izražava sila po jedinici širine s poznatim vrijednostima za  $b_0$  i  $b_1$ : [7]

$$f = \frac{M}{B_0} (b_0 b_1 + b_1^2 c) \quad (20)$$

$$E_d = \frac{m}{B_0} \iint_0^{B_1 c} (b_0 b_1 + b_1^2 c) dc dB + \frac{M}{2} b_0^2 \quad (21)$$

integral od c i ukupne širine  $B_0$  daju: [7]

$$E_d = m \left( b_0 b_1 c + b_1^2 \frac{c^2}{2} + \frac{b_0^2}{2} \right) \quad (22)$$

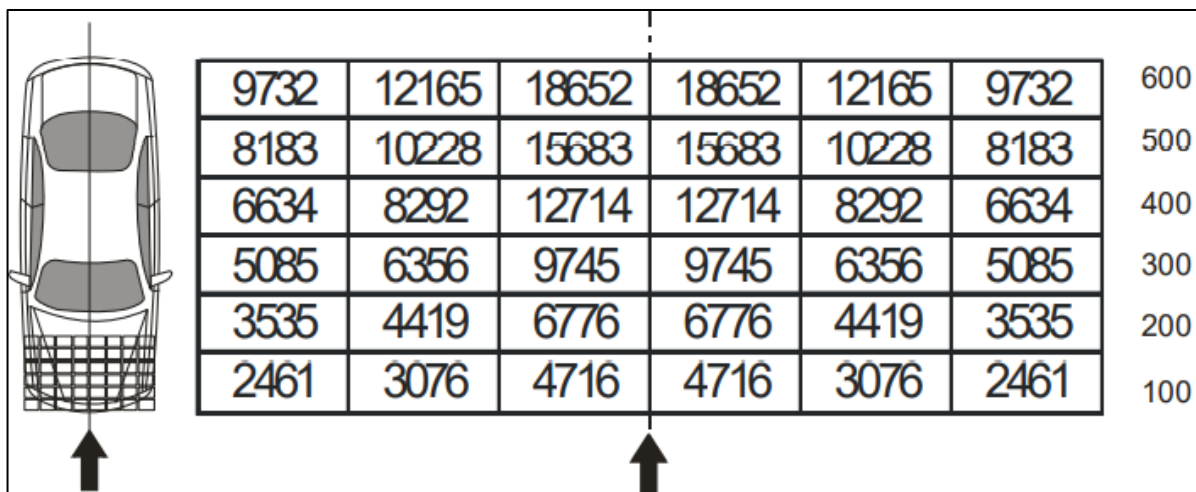
Izrazom (22) se izračunava vrijednost energije koja se apsorbira u ukupnoj širini vozila gdje je m masa vozila u kilogramima. Ako se dubina deformacije postavi u razmacima od 0.1 metar, može se precizno dobiti vrijednost deformirane energije apsorbirane na putu deformacije od 0.1 m.

Tablica 4 Vrijednosti deformacijske energije u zavisnosti dubine deformacije

Dubina deformacije C (mm)	Vrijednost deformirane vrijednosti $E_d$ (J)	Razlika deformacije energije	12% $E_d$	15% $E_d$	23% $E_d$
100	20504	20504	2461	3076	4716
200	49967	29462	3535	4419	6776
300	92338	42371	5085	6356	9745
400	147618	55280	6634	8292	12714
500	215807	68189	8183	10228	15683
600	296905	87098	9732	12165	18652

Izvor: [9]

Na osnovi prihvaćene postotne preraspodjele deformacijske energije, prikazane na slici 4.4 – C i konkretnih vrijednosti izračunate deformacijske energije prikazane u Tablici 3, može se konstruirati dijagram energetskega rastera za konkretno vozilo (slika 4-5). [9]

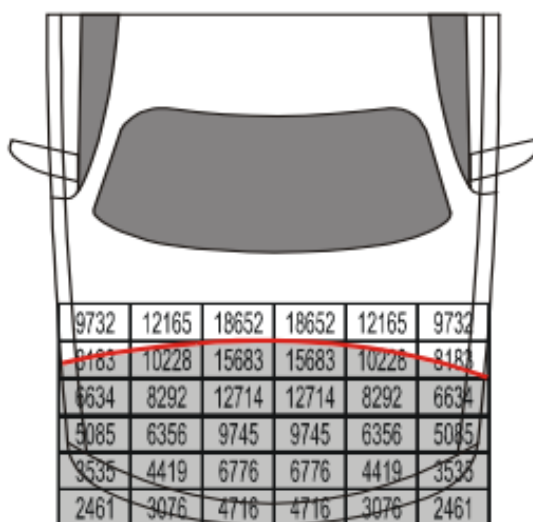


Slika 4-5 Energetski raster za čeon dio vozila TOYOTA, [9]

Nakon toga se raster polje precrtava (prenese) na prednji dio vozila i izračuna zbroj vrijednosti iz onih polja koja su obuhvaćena deformacijom pri sudaru. Ukoliko su neka od polja djelomično

pokrivena, u tom slučaju vrši se procjena postotne prekrivenosti polja, a vrijednost iz polja uzima se u postotnom iznosu u odnosu na cjelokupnu vrijednost polja. Zbroj vrijednosti iz polja koja su obuhvaćena deformacijom predstavlja vrijednost deformacijske energije, kao što je to prikazano na **slici 4**. Na osnovi deformacijske energije izračunava se brzina izgubljena na deformiranju primjenom poznatog izraza (23). [9]

$$EES = 3,6 \sqrt{\frac{2 \cdot E_d}{m}} [km/h] \quad (23)$$



*Slika 4-6 Postupak izračuna brzine izgubljene na deformaciju na osnovu karakterističnog dijagrama energetskega rastera, [9]*

#### 4.4.2 Izračun energije deformacije na osnovi testova

Testovima udara vozila u nepomičnu prepreku može se ustanoviti zavisnost između deformacije i poznate brzine u testu. Osnovna definicija između naletne brzine i deformacije je iskazana izrazom (14) u prethodnom poglavlju. Meckay je 1968. godine povezoao izgubljenu brzinu i ekvivalentnu energiju u udaru vozila u nepomičnu prepreku (EBS).

$$EBS = \sqrt{\frac{2}{m} \cdot \left[ \int_0^{w_2} F \cdot dC + const \right] dw} \quad (24)$$



Energija vozila naletom na prepreku dijelom se potroši na rad plastične deformacije, a dijelom na rad elastične deformacije i to: [10]

$$\frac{m \cdot EBS^2}{2} = W_{pl} + W_{el}; W_{pl} = \frac{m \cdot EBS^2}{2}; V = EBS \text{ i } V^1 = -k \cdot EBS \quad (25)$$

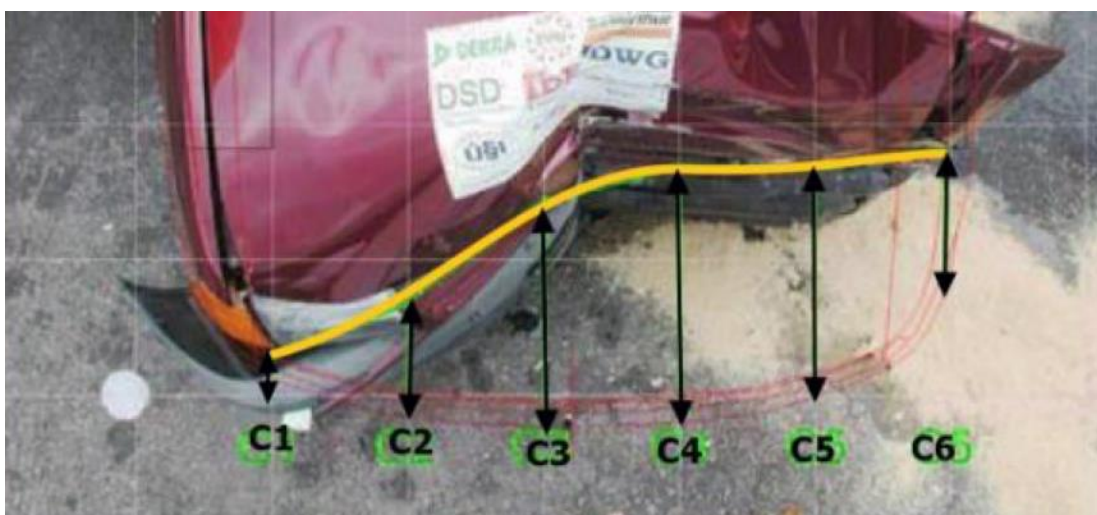
Odnos između EBS i EES ima zavisnost: [10]

$$EBS = EES \cdot \sqrt{1 - k^2} \quad (26)$$

Veličinu EES (energija ekvivalentna brzini) je definirao Burg 1980. godine kao: [10]

$$W_{def} = \frac{m \cdot EES^2}{2} \quad (27)$$

Na temelju poznate brzine udara u čvrstu nepomičnu prepreku može se odrediti stupanj čvrstoće vozila, a na osnovi izmjerenih vrijednosti deformacija. Širina deformacije  $w_0$  podijeli se na šest jednakih područja u kojima se mjeri dubina deformacije od  $C_1$  do  $C_6$ . Za poznatu širinu vozila, težinu vozila, iznos brzine do koje nema vidljivih deformacija  $b_0$  i testnu brzinu naleta na prepreku  $V_t$  dobije se čvrstoća vozila i to: [10]



Slika 4-7 Mjerenje dubine deformacija, [10]

$$C_{sr} = \frac{C_1 + \sum_{i=2}^{n-1} C_i + \frac{C_n}{2}}{N-1}; b_1 = \frac{V_t - b_0}{C_{sr}} \left( \frac{1}{S} \right); A = a_0 = \frac{m}{w_0} \cdot b_0 \cdot b_1 \left( \frac{kN}{m} \right); \quad (28)$$

$$B = a_1 = \frac{m}{w_0} \cdot b_1^2 \left( \frac{kN}{m} \right) \text{ i } G = konst = \frac{m}{2 \cdot w_0} \cdot b_0^2 (kN) \quad (29)$$

Čvrstoća vozila se dobije kao: [10]

$$S = B \cdot (\text{širina vozila}) \left( \frac{kN}{m} \right) \quad (30)$$

#### 4.4.3 Koeficijenti čvrstoće vozila

Koeficijenti čvrstoće vozila predmet su ispitivanja od 1981. godine. Na osnovi međuosovinskog razmaka vozila su podijeljena na klase. Podaci o ispitivanju se odnose na podatke od institucije NHTSA (*engl.* Highway Traffic Safety Administration) koji su dostupni. Putnička vozila, na osnovi međuosovinskog razmaka, podijeljena su u pet klasa, kombi vozila u dvije klase, kamioni u dvije klase i višenamjenska vozila u dvije klase. Podatci za navedene klase vozila s koeficijentima čvrstoće A i B i to za prednji dio, bočni dio i zadnji dio vozila su sljedeći: [10]

Tablica 5 Vrijednosti čvrstoće vozila po klasama

Čvrstoća A [N/cm]	Područje oštećenja:					
	Prednji dio		Bočni dio		Zadnji dio	
Čvrstoća B [N/cm]	A	B	A	B	A	B
Kategorije Vozila/međuosovinski razmak [m]	[N/cm]	[N/cm]	[N/cm]	[N/cm]	[N/cm]	[N/cm]
<b>Putnička vozila</b>						
Klasa 1; 2,05-2,40	315,61	49,68	302,04	44,37	164,52	41,17
Klasa 2; 2,50-2,58	323,39	45,73	284,23	34,06	175,10	45,61
Klasa 3; 2,58-2,80	361,82	48,21	332,02	35,67	174,66	53,57

Klasa 4; 2,80-2,98	377,16	45,96	325,69	32,38	239,89	65,45
Klasa 5; >2,98	505,57	78,17	511,99	95,08	239,89	65,45
<b>Kamioni</b>						
Klasa 1; <2,89	465,91	75,04	452,33	74,98	180,35	63,39
Klasa 2; >2,89	384,52	47,13	508,96	84,75	163,58	27,56
<b>Kombi vozila</b>						
Klasa 1; <2,93	541,06	93,01	492,03	81,65	168,10	53,74
Klasa 2; >2,93	628,17	106,62	546,31	97,65	239,89	65,45
<b>Višenamjenska vozila</b>						
Klasa 1; <2,89	465,91	75,05	452,33	74,98	180,35	63,39
Klasa 2; >2,89	384,52	47,13	508,96	84,75	136,58	27,56

Izvor: [10]

#### 4.4.4 Izračun energije deformacije na osnovu rada i EES

Prilikom očevida prometne nesreće tehničar fotografira deformacije vozila koja su sudjelovala u prometnoj nesreći. Način na koji se provodi fotodokumentacija deformiranih vozila je vrlo važan i treba se provoditi prema pravilima struke. Važno je da se prilikom fotografiranja određenih dijelova vozila koja su pretrpjela deformacije fotografira i metar kako bi se kasnije mogla iz fotografija očitati udubljenja deformacija. Pomoću programskih alata se kasnije mogu prikazati udubljenja u mjerilima iz kojih se može izračunati rad koji je potrošen za tu deformaciju te pomoću izraza (31) izračunati brzina udara.

$$EBS = \sqrt{\frac{2 \cdot W_{def}}{m}} \quad (31)$$

gdje je:

$W_{def}$  – ukupna vrijednost deformiranog rada na vozilu [J]

$m$  – ukupna masa vozila [kg].

Vrijednost deformiranog rada na osnovi dubine i širine deformacije iznosi:

$$W_{def} = \sum_{i=1}^{n-1} W_i \cdot \left[ \frac{B}{6} \cdot \frac{C_{i+1}^3 - C_i^3}{C_{i+1} - C_i} + \frac{A}{2} \cdot (C_{i+1} + C_i) \cdot G \right] + (1 + \tan^2 \theta) \quad (32)$$

$$W_i = L_{i+1} - L_i \quad (33)$$

Ako se izmjeri samo u četiri točke, onda bi ovaj izraz izgledao ovako:

$$W_{def(4)} = \frac{L}{3} \left[ 3 \cdot G + \frac{A}{2} \cdot (C_1 + 2 \cdot C_2 + 2 \cdot C_3 + C_4) + \frac{B}{6} \cdot (C_1 + 2 \cdot C_2 + 2 \cdot C_3 + C_4 + C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 + C_3 \cdot C_4) \right] \cdot Y \quad (34)$$

gdje je:

$A$  i  $B$  – Koeficijenti čvrstoće vozila prema CRASH 3 modelu,

$G$  – Koeficijent zavisan od koeficijenata  $A$  i  $B$ ;  $G=A^2/2B$  [N],

$L$  i  $W$  – Dužina i širina vozila,

$Y - Y = (1 - \tan^3 \theta)\theta = 0; Y = 1; \theta = 45; Y = 2; \theta > 45; Y = 2$  kut udara. [10]

## 5. PRIMJENA FOTOGRAMETRIJE U PROCJENI DEFORMACIJE VOZILA NAKON SUDARA

### 5.1 Fotografiranje bespilotnom letjelicom

Za potrebe fotografiranja razbijenog vozila iz svih kutova najbolje se pokazala upotreba bespilotne letjelice, tkz. drona<sup>5</sup>, jer klasičnim fotoaparatom nije moguće pokriti sve kutove vozila. Kod fotografiranja ručnim fotoaparatom nije moguće fotografirati iznad svoje visine i tu se javlja potreba za upotrebom bespilotne letjelice. Kako bi krajnji rezultat bio što točniji, potrebno je razbijeno vozilo snimiti iz svih kutova i s dovoljnim preklapanjem fotografija radi lakše obrade u programskim alatima za fotogrametriju.

#### 5.1.1 Bespilotna letjelica DJI Phantom 4 PRO

Phantom 4 PRO je bespilotna letjelica koja pruža mogućnosti stabilnog leta i fotografiranja u visokim rezolucijama. Letjelica ima četiri motora koja se nalaze na rubovima letjelice što joj omogućuje stabilan let i laku upravljivost. Za upravljanje letjelicom potreban je daljinski upravljač. Za sigurnije upravljanje i letenje bespilotnom letjelicom, ista ima ugrađene senzore koji onemogućuju da se letjelica sudari s preprekama oko sebe.



Slika 5-1 Bespilotna letjelica DJI Phantom 4 PRO [27]

---

<sup>5</sup> U hrvatskome se ta riječ najčešće piše dron te se upotrebljava u značenju letjelice u kojoj nema posade, ali koja se može nadzirati na daljinu ili letjeti samostalno prema programiranome planu.

### 5.1.2 Kamera

Bespilotna letjelica Phantom 4 PRO na sebi ima ugrađenu kameru od 1 inča i CMOS senzor za od 20 megapiksela. Kamera na bespilotnoj letjelici ima mehanički zatvarač koji eliminira izobličenja koja se pojavljuju pri snimanju objekata kada se kamera pomiče, a ta značajka je vrlo bitna kod fotogrametrije i zbog toga ova bespilotna letjelica s ugrađenim fotoaparatom ima prednost nad drugima koje nemaju tu značajku. Na slici ispod prikazana je razlika između klasičnog (*engl.* Rolling Shutter) i mehaničkog (*engl.* Global Shutter).



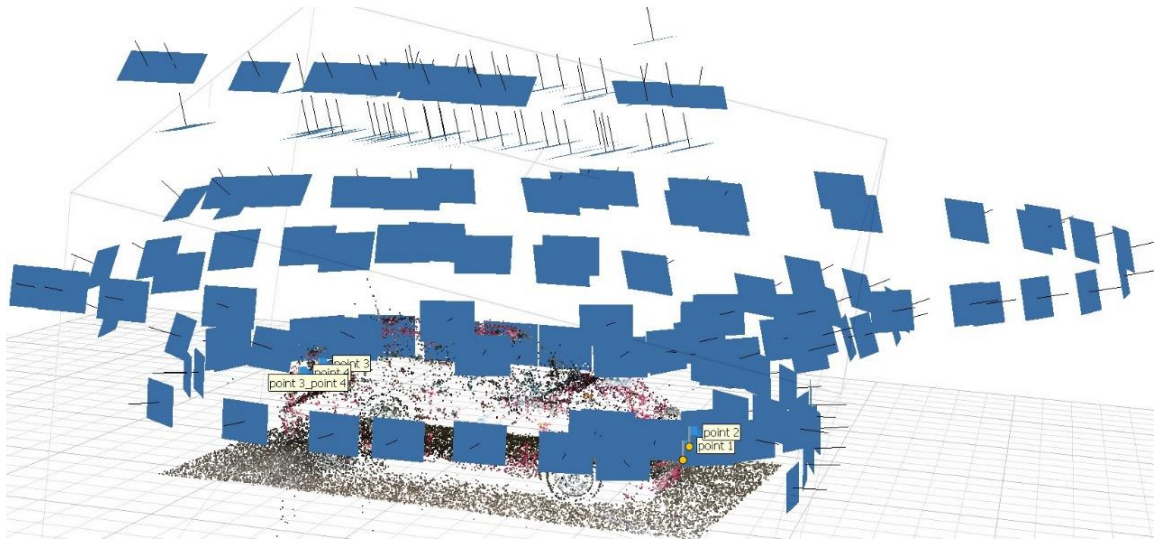
Slika 5-2 Razlika između klasičnog i mehaničkog zatvarača kamere [28]

## 5.2 Programski alat Agisoft Metashape

Agisoft Metashape je programski alat za fotogrametriju i jedan od najpopularnijih u tom sektoru. Program pomoću fotografija visoke rezolucije može tehnikom fotogrametrije generirati 3D modele fotografiranih objekata. Primjena tog programskog alata je u raznim industrijama, npr. u industriji računalnih igara, u građevini, u prometu, geodeziji itd.

### 5.2.1 Svrstavanje fotografija

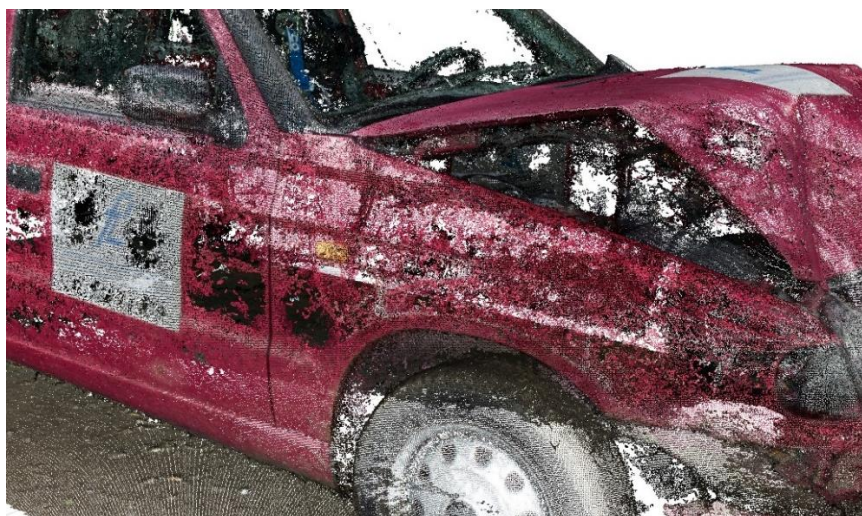
Pokretanjem i učitavanjem fotografija potrebno je fotografije uskladiti (*engl.* Align). Program izračunava poziciju svake fotografije oko fotografiranog objekta te moguće je odrediti točnost: malu (25 % od moguće), srednju (50 % od moguće) i visoku (100 %). Za rad programa potrebno je dosta radne memorije na računalu. Što je više fotografija, to je potrebno više radne memorije.



*Slika 5-3 Prikaz svrstavanja fotografija u programu Agisoft Metashape*

### **5.2.2 Izgradnja gustih točki**

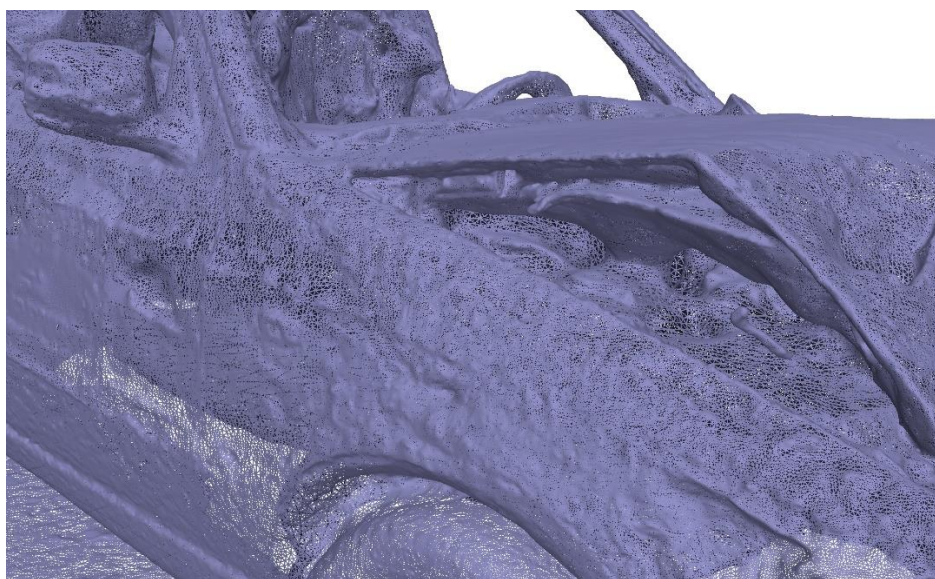
Sljedeći korak u programskom alatu Metashape je generiranje modela gustog oblaka (*engl.* Dense cloud). Nakon izračuna pozicije kamera, program računa informacije o dubini svake kamere. Informacije o dubinama se spajaju u jednu točku koja se zove gusta točka (*engl.* Dense point cloud). Da bi izračun bio što bolji, u programu je potrebno izabrati maksimalan iznos koji je moguć ovisno o hardverskim mogućnostima stroja. Kao i kod prethodnog koraka, ovaj dio ovisi o količini radne memorije, a preporučuje se 32 GB i više.



*Slika 5-4 Izgradnja gustih točaka u programu Agisoft Metashape*

### **5.2.3 Izgradnja mreže (*engl. mesh*)**

S podatkom iz prethodnog koraka je moguće izraditi mrežu, odnosno poligon (*engl. mesh*). Program nudi nekoliko metoda za izgradnju poligona, a *Arbitrary* je opcija koja najbolje odgovara ovom modelu. Prije pokretanja tog koraka potrebno je odrediti maksimalan broj poligona i točaka. Na prikazanom modelu na slici je 2 239 419 poligona i 1 120 791 točka.

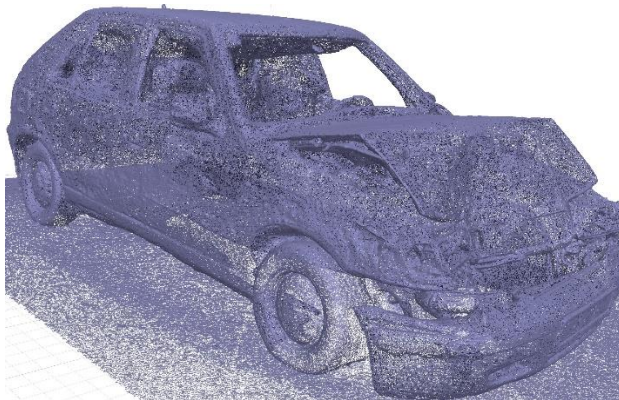


*Slika 5-5 Prikaz mesha u programu Agisoft Metashape*

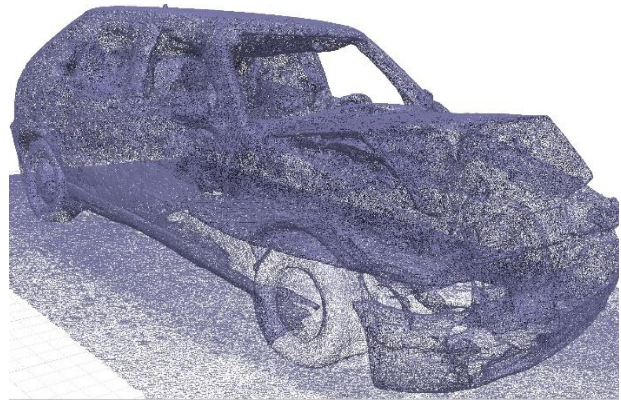


#### 5.2.4 Optimizacija modela

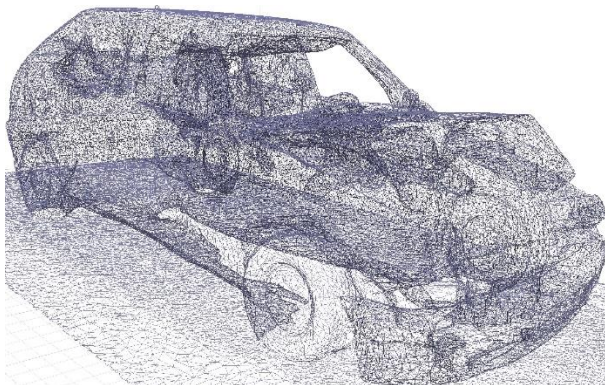
U slučaju da je model potrebno izvesti u neki drugi program, kao npr. PC-Crash, neophodno je optimizirati model radi lakšeg rukovanja u drugim programima. Jedan od osnovnih koraka optimizacije je smanjivanje broja poligona i točaka. Agisoft Metashape nudi tu mogućnost koja se zove Decimate Mesh. Model gore na slici ima previše poligona i previše točaka. Na slici dolje je usporedba mreže prije i poslije optimizacije.



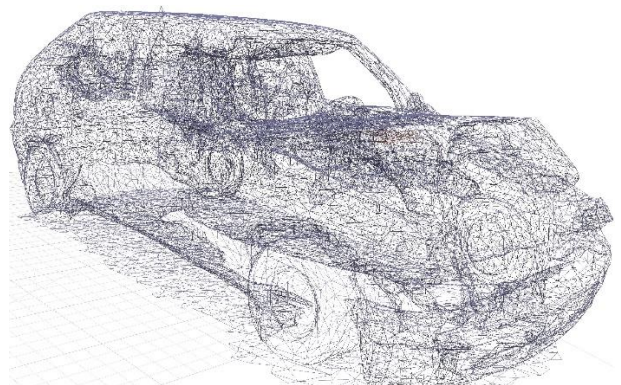
2 239 419 poligona



999 999 poligona



100 00 poligona



25 000 poligona

*Slika 5-6 Prikaz različitih broja poligona nakon optimizacije (Agisoft Metashape)*

#### 5.2.5 Izgradnja teksture

Izgradnja teksture je posljednji korak pri rekonstrukciji vozila, koji nije neophodan, ali u nekim slučajevima rekonstrukcije dobro dođe jer omogućuje realniji pogled na vozilo. Agisoft nudi ukupno šest različitih načina za izradu teksture. Keep UV se pokazao najboljim izborom. Na slici 5-7 vidi se konačan rezultat tekstura na modelu od 25000 poligona.



Slika 5-7 Prikaz teksturiranog modela (Agisoft Metashape)

### 5.3 Skeniranje LIDAR kamerom Intel Real Sence L515

Kao dio eksperimenta u ovom radu korištena je LIDAR (*engl.* Light Detection And Ranging) kamera.

Tehnologija se temelji na poznavanju brzine svjetlosti i uskom koherentnom snopu laserske zrake koju uređaj emitira u prostor. LASER (*engl.* Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) naziv je za optičku napravu koja emitira koherentni snop fotona. Zraka se kreće brzinom svjetlosti, odbija se od fizičke prepreke i vraća u prijemnik koji se nalazi u uređaju iz kojega je i odaslana. Uređaj mjeri vrijeme potrebno pulsu laserske zrake da napravi putovanje do prepreke i nazad do senzora. [29]

### 5.3.1 LIDAR RealSense L515

Intel RealSense L515 revolucionarna je LIDAR dubinska kamera koja koristi MEMS tehnologiju skeniranja zrcala, omogućujući bolju učinkovitost laserske snage u usporedbi s drugim tehnologijama, s manjom potrošnjom energije od 3,5 W za dubinski streaming. Sa svojim unutarnjim procesorom, smanjenjem artefakata zamućivanja pokreta i kratkom latencijom fotona do dubine, L515 je pravo rješenje za hvatanje, čak i objekata koji se brzo kreću s minimalnim zamućenjem pokreta. Točnost skeniranja, kako tvrdi proizvođač, je između 5 mm do 14 mm na udaljenosti do 9 m, što je vrlo točno za tako mali uređaj.

Uređaj se može spojiti na pametni telefon ili na računalo pomoću USB kabela. Da bi se moglo skenirati, potrebno je imati odgovarajući programski alat.



*Slika 5-8 LIDAR kamera (RealSense L515) [30]*

### 5.3.2 Programski alat DOT3D

DotProduct je tvrtka koja već dugi niz godina gradi industrijske aplikacije za 3D skeniranje, koristeći razne senzore i robusna rješenja kako bi se omogućio niz zanimljivih načina upotrebe. Programski alat DOT3D je proizvod tvrtke DotProduct i omogućuje da se preko pametnog telefona ili osobnog računala poveže LiDAR kamera L515 i skeniramo vozilo. Kao rezultat dobije se skenirano vozilo koje se može izvesti iz programa u razne formate.

### 5.3.3 Skeniranje i rezultati skeniranja

Postupak skeniranja započinje registracijom i instalacijom programskog alata DOT3D na pametni telefon ili na prijenosno računalo. Spajanjem LiDAR kamere L515 pomoću USB kabela i pokretanjem programskog alata DOT3D može se krenuti skenirati oštećeno vozilo. Najjednostavnije je zalijepiti LiDAR kameru na zadnji dio pametnog telefona ili prijenosnog računala kako bi kamera i pametni telefon bili usmjereni u mjesto skeniranja, a što je prikazano na slici dolje.



*Slika 5-9 Prikaz LiDAR senzora i pametnog telefona prije skeniranja [31]*

Kada je sve postavljeno, skeniranje se vrši tako da se gleda kroz LiDAR kameru koja je prikazana na ekranu pametnog telefona. Pojavljivanje zelene boje na mjesto koje se skenira označava da je dovoljno podataka pa se može pomaknuti na sljedeće mjesto. Hodanjem oko vozila s usmjerenom kamerom prema njemu stvara se oblak točkica i na taj se način vozilo skenira. Ako

se u postupku izgubi usmjerenje, potrebno se vratiti korak nazad kako bi program prepoznao već skenirane dijelove i nastavio skenirati. Rezultat skeniranja dvaju vozila je prikazan na slikama dolje.



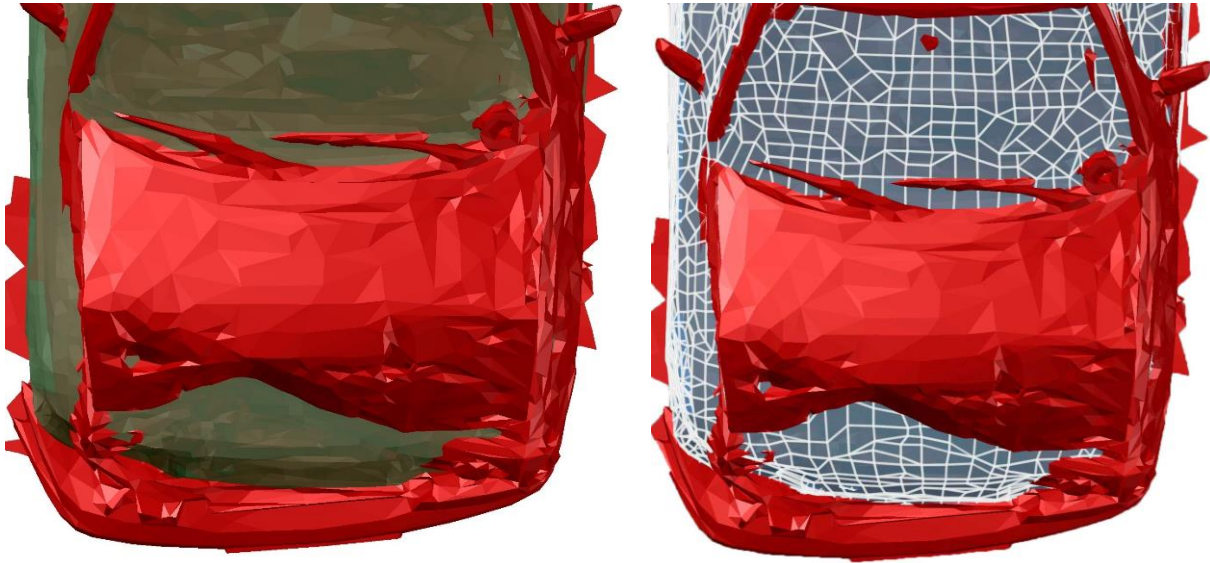
*Slika 5-10 Skenirano vozilo Škoda Felicia*



*Slika 5-11 Skenirano vozilo Renault Thalia*

#### **5.4 Prikaz oštećenja vozila**

Za ovaj diplomski rad Zavod za prometno-tehnička vještačenja Fakulteta prometnih znanosti u Zagrebu organizirao je crash test između dvaju vozila. Za prikaz oštećenja korišten je programski alat Autodesk AutoCAD. Za potrebe ovog prikaza potrebno je imati 3D model neoštećenog vozila kako bi se moglo usporediti s modelom oštećenog. Prikaz oštećenja je prikazan na slikama 5-12 i 5-13, a zelenom bojom je prikazan 3D model neoštećenog vozila. Crvenom bojom prikazan je 3D model nakon oštećenja.



*Slika 5-12 Prikaz oštećenja vozila tlocrtno*



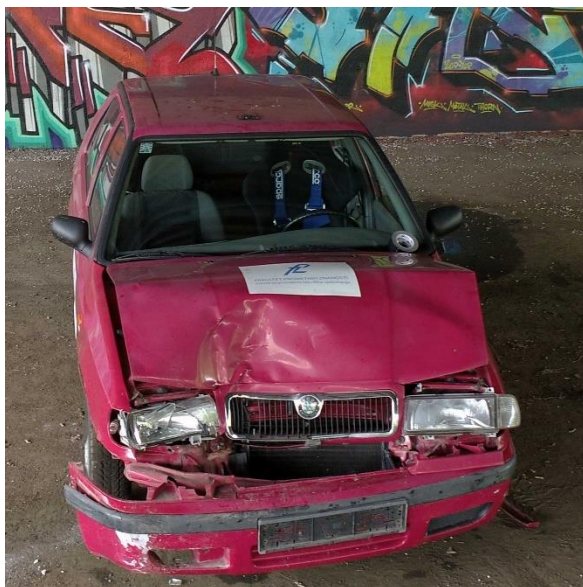
*Slika 5-13 Prikaz oštećenja vozila bokocrtno*

## **5.5 Definiranje sudarnog položaja**

Vozila se u stvarnosti sudaraju pod različitim kutovima. Kut sudara između dvaju vozila u velikom broju slučajeva je pod pravim kutom ili blizu njega. Međutim, postoje i sudari u kojima vozila zatvaraju sudarni kut od  $0^\circ$  (čisti centralni) i od  $180^\circ$  (stražnje centralni). Ovi sudari se u nekim stručnim literaturama nazivaju i kolinearnim sudarima. [32]

Korištenjem dviju metoda iz ovog rada – fotogrametrijom i snimanjem bespilotnom letjelicom te snimanjem LiDAR kamerom definiran je sudarni položaj vozila.

Vozilo 1  
Škoda Felicia



Vozilo 2  
Renault Thalia



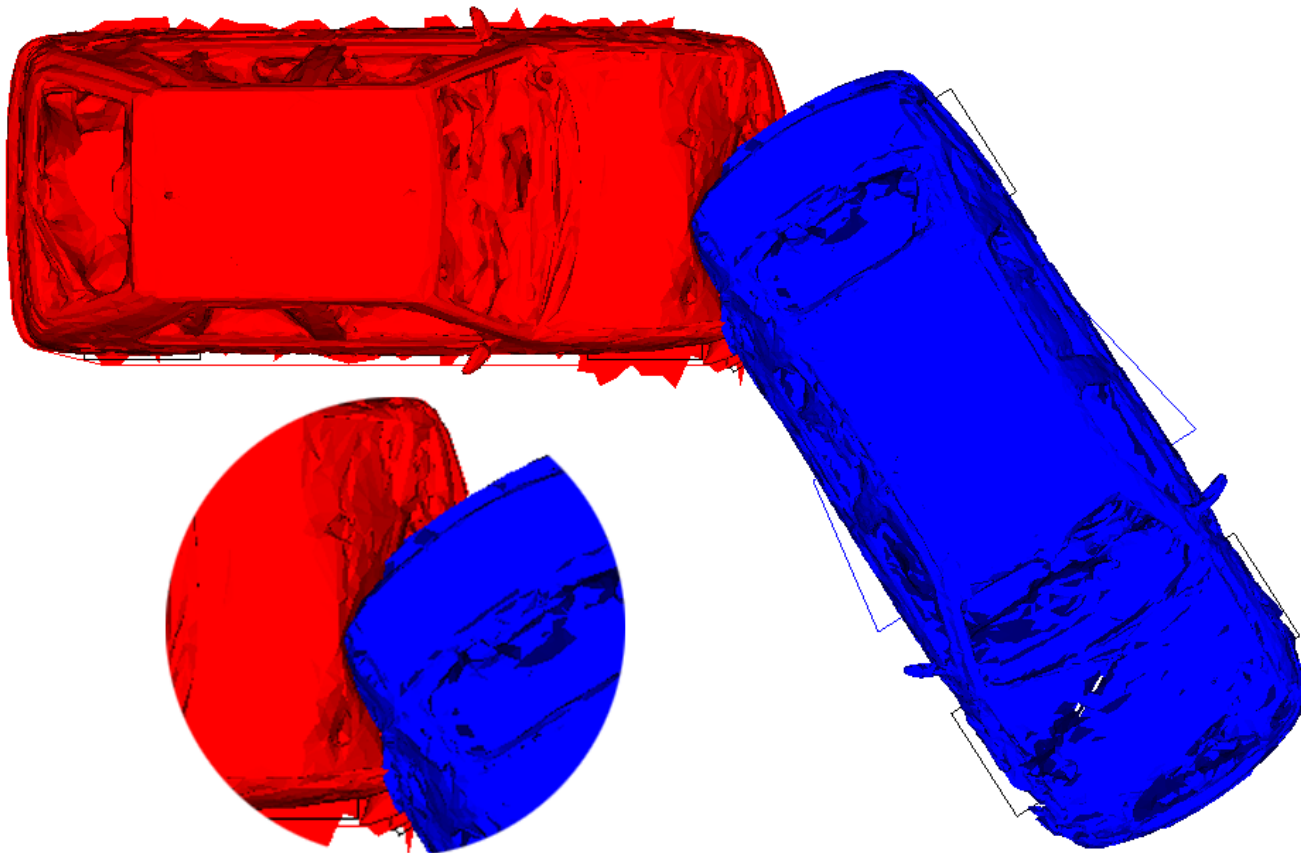
*Slika 5-14 Fotografije vozila koja su sudjelovala u sudaru*

### 5.5.1 Definiranje sudarnog položaja fotogrametrijskim modelima

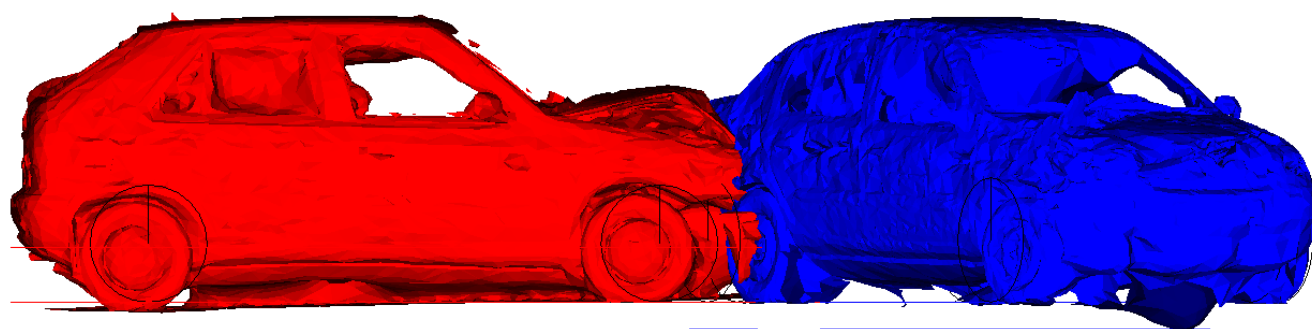
Vozila su pripremljena i skalirana u programu Agisoft Metashape kako bi odgovarala stvarnim dimenzijama. Za skaliranje je uzeta poznata mjera na vozilu, npr. dužina registarske. Za točnije skaliranje uzeto je više poznatih mjera. U praksi se koriste posebne oznake koje se stave na objekt prije fotografiranja. Potrebno je „izvesti“ (*engl. export*) modele u .dxf format.

Na slikama 5-15 i 5-16 prikazan je sudarni položaj vozila. Poklapanje je vrlo dobro i izmjereni kut je 123°.





*Slika 5-15 Prikaz sudarnog položaja tlocrtno (fotogrametrija)*



*Slika 5-16 Prikaz sudarnog položaja bokocrtno (fotogrametrija)*

### 5.5.2 Definiranje sudarnog položaja skeniranim modelima

Prilikom unosa vozila koja su skenirana LiDAR kamerom i obrađena u DOT3D programskom alatu, vođeno je računa o formatu izlaznih datoteka iz tog programa. Uneseni su Point Cloud skenirani modeli i odrezani kako bi se dobila vanjska kontura vozila. S pripremljenim skeniranim modelima ručno su namješteni modeli kako bi se oštećenja što bolje podudarala. Izmjereni kut nakon namještanja je 114°.



*Slika 5-17 Prikaz sudarnog položaja*

## **6. USPOREDBA FOTOGRAMetriJE S KLasiČNOM METODOM FOTOGRAFIRANJA U PROCJENI DEFORMACIJE VOZILA**

Poslije svake prometne nesreće vrši se očevid i dio očevida je fotografiranje mjesta nesreće i oštećenih vozila. Fotografije oštećenih vozila nerijetko su fotografirane u lošim uvjetima (loše osvjetljenje) i pod kutom koji nije dobar za očitavanje oštećenja. U ovom poglavlju će biti uspoređeno klasično fotografiranje vozila iz EES kataloga s metodom fotogrametrije u smislu procjene deformacije vozila koja su sudjelovala u prometnoj nesreći.

### **6.1 Usporedba s vozilom iz EES kataloga**

Za potrebe ove usporedbe pretražena je baza EES kataloga vozila sa sličnim oštećenjima kao na testiranim vozilima Škoda Felicia i Renault Thalia.

Vozilo Škoda Octavia pronađenu u EES katalogu sudjelovalo je u prometnoj nesreći s vozilom Renault Kadjar. Vozilo marke Škoda se sudarilo prednjim krajem u vozilo ispred.

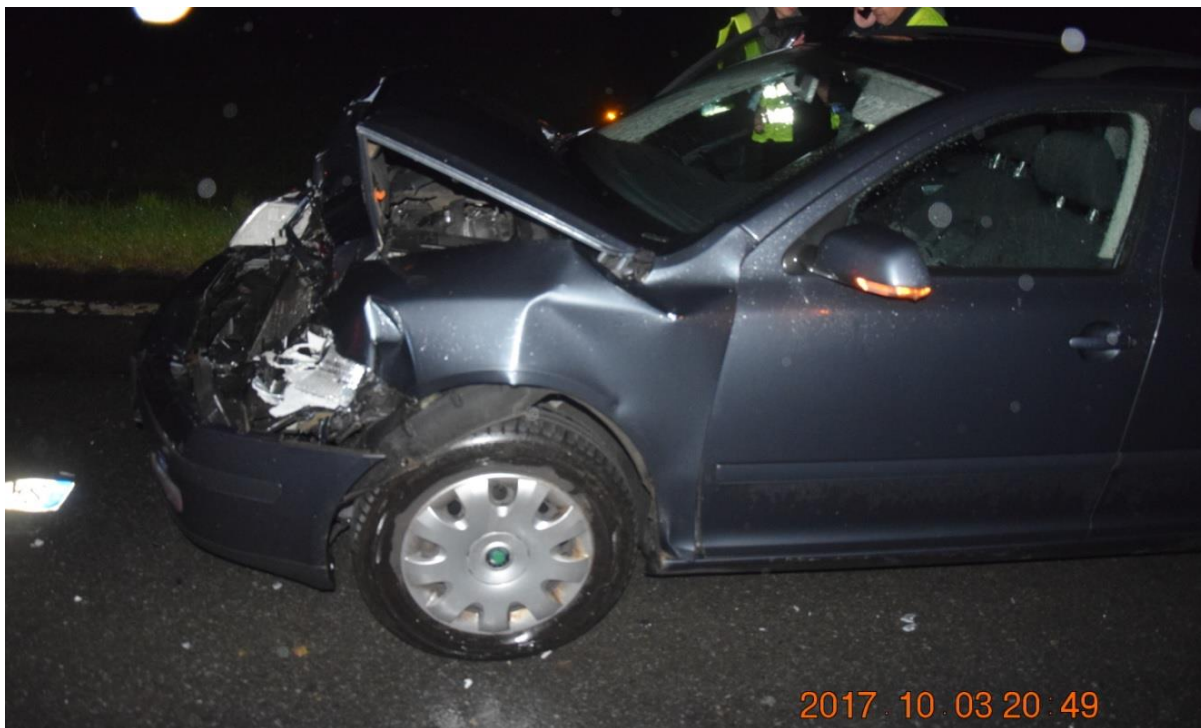
Osnovni podatci o vozilu iz EES kataloga.

Proizvođač: Škoda

Model: Octavia

Godina proizvodnje: 2007.

Masa vozila: 1400 kg



*Slika 6-1 Fotografija oštećenog vozila Škoda Octavia (EES katalog), bočno*



*Slika 6-2 Fotografije oštećenog vozila Škoda Octavia (EES katalog), prednja strana*

Iz fotografija koje su prikupljene u EES katalogu teško se može procijeniti dubina oštećenja jer su fotografije fotografirane iz nepovoljnog kuta za primjenu te metode. Kod ovakvog slučaja određivanja dubine oštećenja vozila dolazi do izražaja samo iskustvo sudskog vještaka ili korištenje neke druge metode za određivanje brzine sudara.

## 6.2 Testirano vozilo

Osnovni podatci o vozilu koje je sudjelovalo u crash testu.

Proizvođač: Škoda

Model: Felicia

Godina proizvodnje: 1998.

Masa vozila: 935 kg



*Slika 6-3 Fotografije oštećenog vozila Škoda Felicia*

Za potrebe ovog diplomskog rada Zavod za prometno-tehnička vještačenja Fakulteta prometnih znanosti u Zagrebu organizirao i izveo „crash“ test između dva vozila.

Vozilom marke Škoda (Felicia) sudarilo se u parkirano vozilo marke Renault (Thalia) u organiziranom testu. Nakon testa odrađen je očevid i vozila su fotografirana.

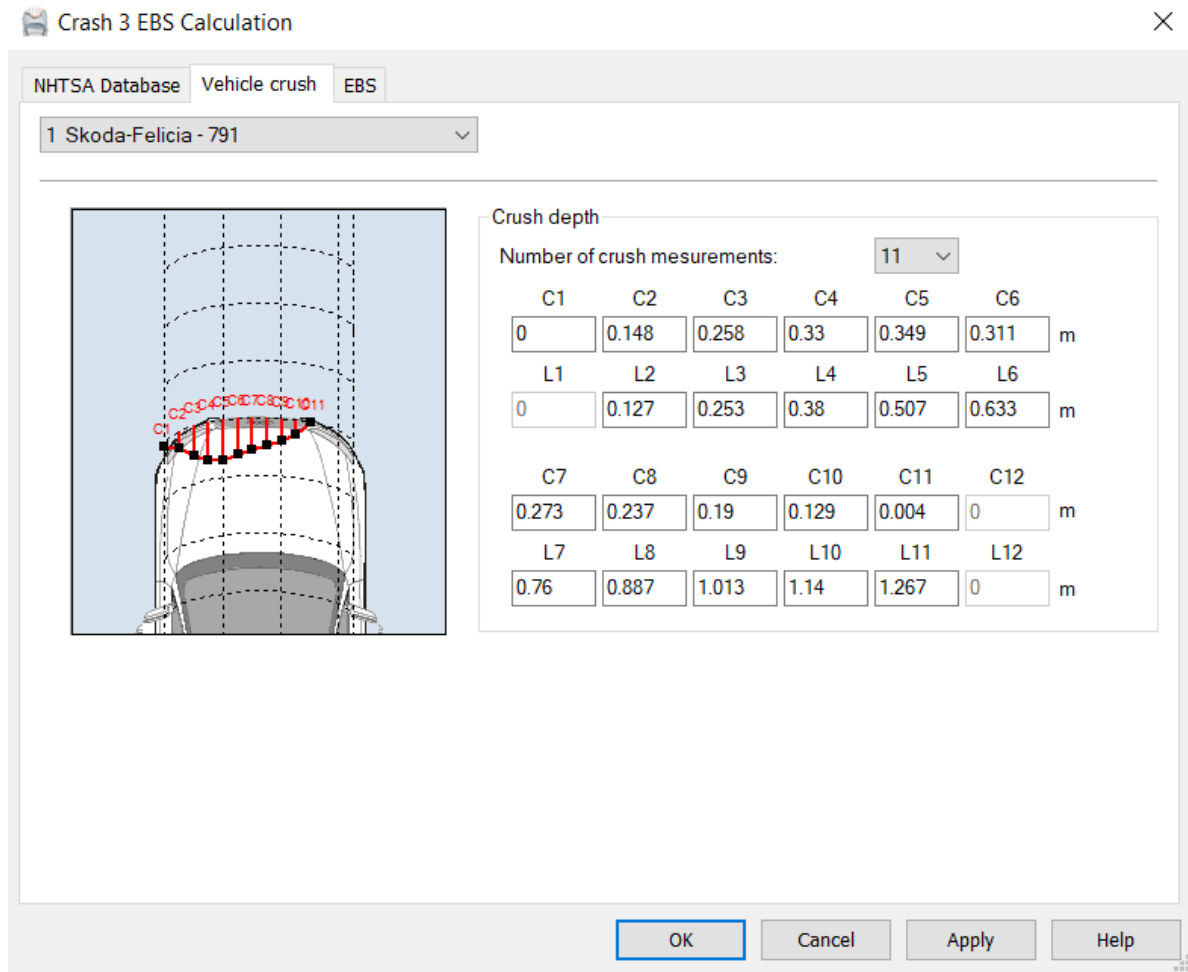


*Slika 6-4 Programski alat PC-Crash 13.1, [33]*

Za analizu prometne nesreće, u ovom slučaju crash testa koristio se programski alat PC-Crash 13.1. Ovaj programski alat omogućuje korisniku da vrlo precizno i realno rekonstruira prometnu nesreću. Jedna od mogućnosti ovog programa je da pomoću fotografije koja je fotografirana tlocrtno (Slika 6-5) odredi dubinu nastalih oštećenja.

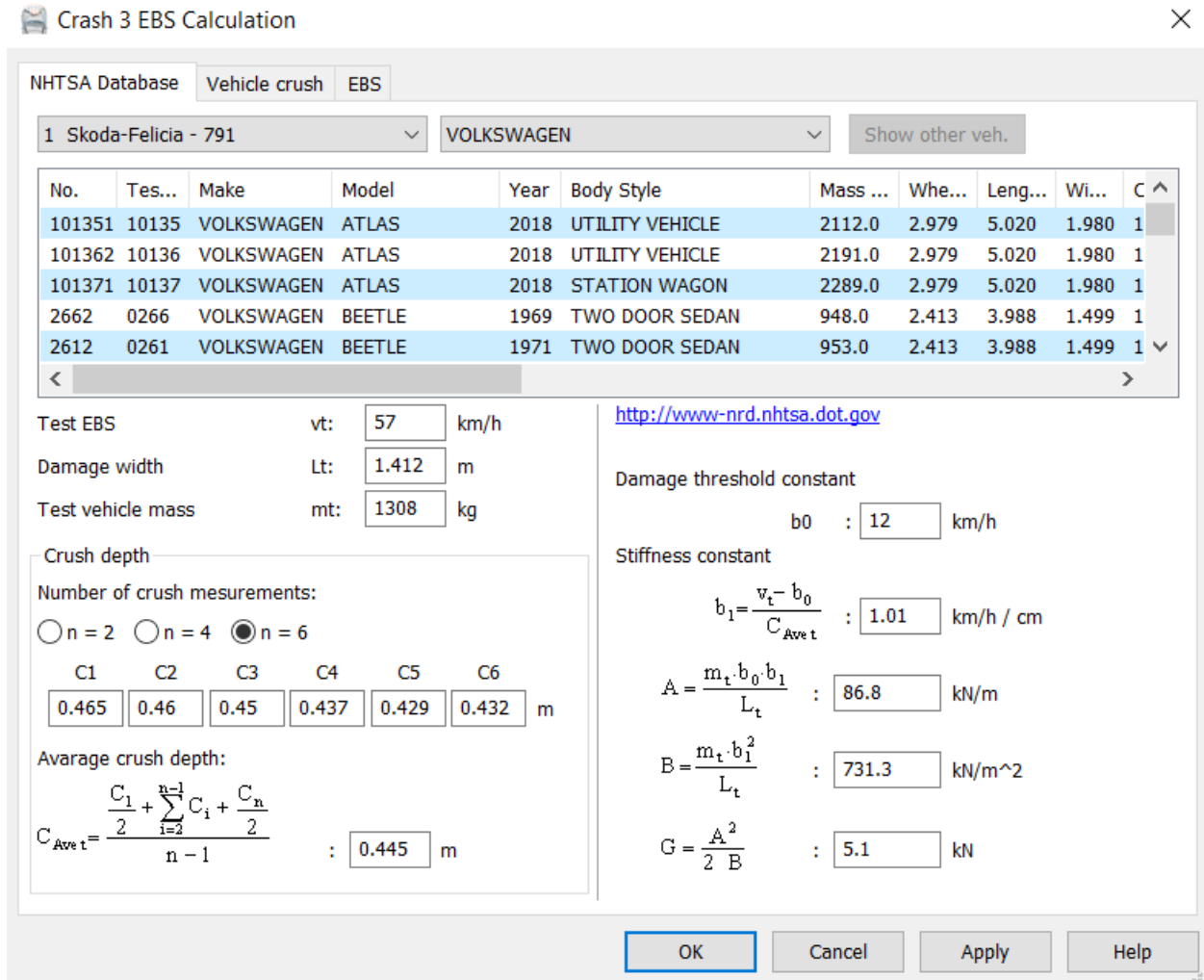


*Slika 6-5 Prikaz dubine oštećenja na vozilu u PC-Crash programu*



Slika 6-6 Izmjera udubljenja u PC-crashu

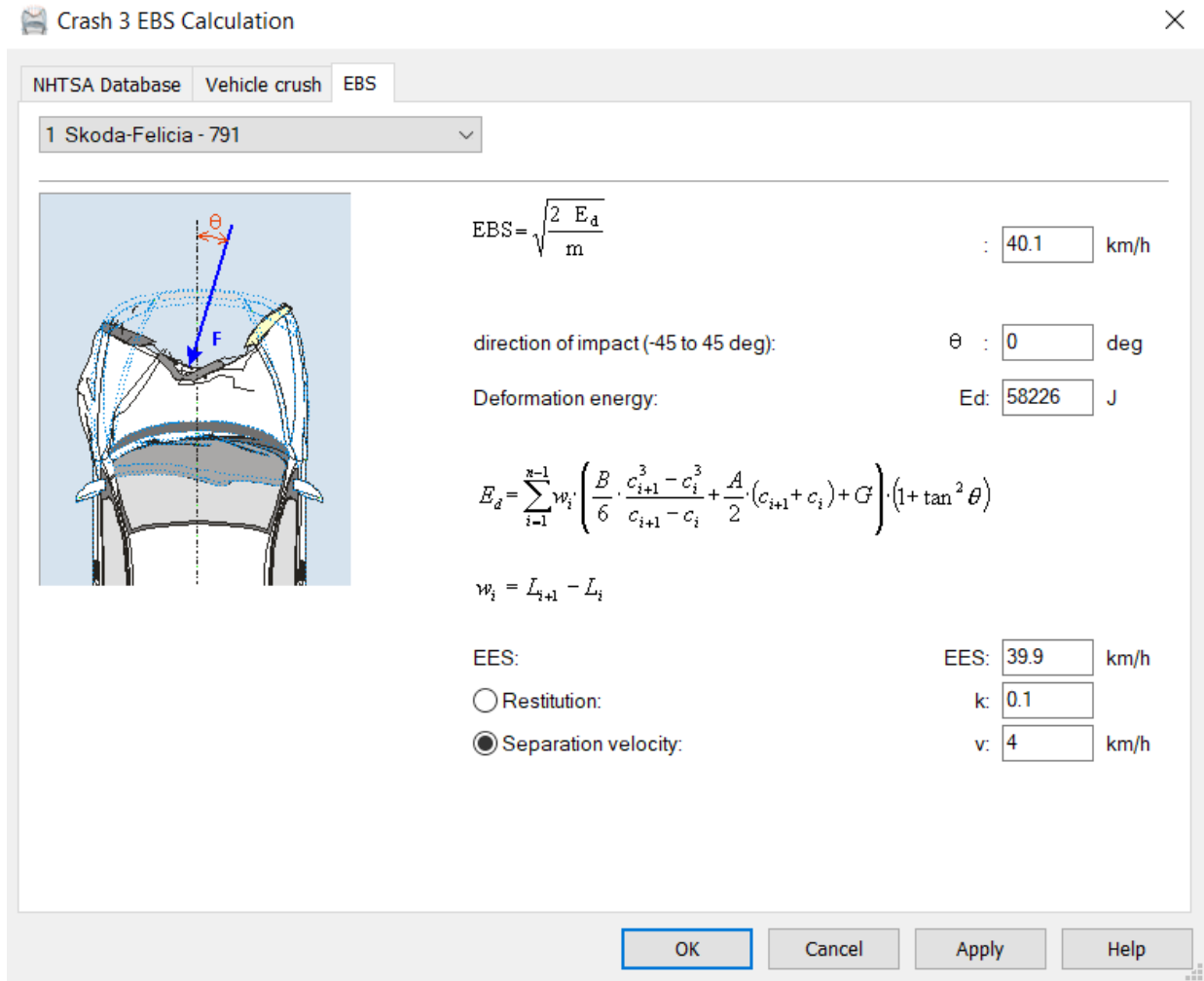
U programu PC-Crash učitana je fotografija koja je fotografirana tako da se tlocrtno vide oštećenja nastala nakon sudara. Nakon skaliranja fotografije, povučena je linija deformacije (linija zelene boje na slici 6-5). Program na osnovi te linije izračunava razliku između oblika vozila prije oštećenja i nakon. Na slici 6-6 se vidi izmjera u jedanaest točaka koje je generirao program nakon čega je prikazana izmjerena dubina oštećenja.



Slika 6-7 NHTSA baza vozila (PC-Crash)

S tim izmjerama program izračunava vrijednosti oštećenog vozila (Slika 6-7). Kako bi program uspješno izvršio izračun, izabrano je slično vozilo u NHTSA katalogu. Za usporedbu je pronađeno vozilo VW Jetta iz 1991. godine (Slika 6-7).





Slika 6-8 Izračun EBS vrijednosti nakon očitavanja oštećenja.

### 6.3 Prednosti fotogrametrije u određivanju oštećenja

Prema dobivenim fotografijama nakon očevida nekada je teško odrediti točna oštećenja i na koji način se dogodio sudar. Kako se radi o laboratorijskom eksperimentu, poznata je vrijednost brzine udara kod testiranog vozila Škode Felicie, za razliku kod vozila iz EES kataloga Škode Octavie iz poglavlja 6.1.

Nove tehnologije, kao što su fotogrametrija i snimanje LiDAR kamerom, postale su vrlo dostupne i ekonomski prihvatljivije. Primjenom spomenutih tehnologija proširuju se mogućnosti samog programskog alata kao što je PC-Crash te služe kao dodatni ulazni parametar za točniji izračun ili procjenu.

Kada bi sudski vještak imao 3D model razbijenoga vozila nakon prometne nesreće, mogao bi lakše odrediti metodu po kojoj će izračunati udarnu brzinu. Vještaku ovaj način pogleda omogućuje da pogleda vozilo iz svih kutova i udaljenosti bez ikakvog gubitka na kvaliteti slike ili modela. Uspoređivanjem razlike u oštećenju iz poglavlja 5.4., može se vidjeti i koliko je narušena geometrija samog vozila nakon sudara.

Na slici ispod može se vidjeti da je prednji branik Škode Felicie ostao neoštećen u „crash“ testu te ovo oštećenje ne bi bilo pogodno za primjer primjene spomenute metode u četvrtom poglavlju. Prikazom 3D modela procjenitelj brže i lakše može doći do tog zaključka.



*Slika 6-9 Prikaz mogućnosti fotogrametrije za određivanje oštećenja*



*Slika 6-10 Prikaz mogućnosti fotogrametrije za određivanje oštećenja*

Za usporedbu se uzimaju vozila iz EES kataloga koja imaju slična oštećenja, npr. vozilo Škoda Octavia iz poglavlja 6.1.

Sama procjena oštećenja također ovisi i o samom iskustvu procjenitelja, ali ovakav prikaz oštećenog vozila u 3D pogledu bi procjenitelju s manje iskustva omogućio točnije određenje oštećenja i uočavanje nekih drugih parametara nakon prometne nesreće.

## 7. ZAKLJUČAK

Današnja vozila su se bitno promijenila u načinu konstrukcije, dizajna i tehnologije od vozila od prije više od dvadeset godina. Ta promjena je utjecala na ponašanje vozila u sudarnom procesu. Vozila su postala elastičnija i imaju mogućnost apsorpiranja više kinetičke energije nego prije. Svojstva današnjih vozila produkt su spomenutih načina dizajniranja konstrukcije i upotrebe različitih vrsta materijala kako bi se apsorpiralo što više kinetičke energije prilikom sudara i na taj način povećala pasivna sigurnost vozača i putnika.

Sudar jednog ili više vozila može imati jako puno varijacija i načina pod kojim se može dogoditi. Postoje različite metode određivanja brzine vozila prije sudara. Svaka metoda ima svoje prednosti, mane i vrstu sudara na koju se može primijeniti.

Energetska metoda za određivanje brzine sudara je metoda koja na osnovi dubine oštećenja daje mogućnost izračuna energije koja se apsorpirala na razbijenom vozilu. Ovisno o količini energije potrošene u deformaciji, može se izračunati i brzina udara. Ako se radi o sudaru pod kutom, potrebno je dodati i dio energije potreban za rotaciju vozila. Ova metoda se pokazala vrlo korisnom kod sudara koju su pod malim kutom ili kod frontalnih sudara.

Prilikom svakog očevida se fotografiraju vozila koja su sudjelovala u prometnoj nesreći. Smanjenjem cijene nekada skupe tehnologije digitalnih snimaka i obrade fotografija prirodno je proizišla tehnologija izrade 3D modela iz snimljenih digitalnih fotografija, fotogrametrija.

Fotogrametrija je tehnologija koja iz snimljenih fotografija pomoću poznatih algoritama i računalnom obradom može generirati 3D model snimanog objekta. Primjenom te tehnologije u izradi 3D modela vozila koja su sudjelovala u prometnoj nesreći bitno se olakšava procjena štete i razine udubljenja koji su nastali sudarom. Simbiozom te tehnologije s poznatim programima, kao što je PC-Crash, dolazi se do vrlo relevantnih rezultata u određivanju udarnih brzina i određivanju položaja vozila prije nastanka prometne nesreće.

Kada klasičnu metodu procjene deformacije vozila nakon prometne usporedi s novim pristupom preko fotogrametrije ili LiDAR kamerom, dobiju se pozitivni pomaci u procjeni dubine deformacija. Osim dubine, procjenitelj ima uvid u 3D model iz kojeg se može vidjeti puno više detalja vozila, i to iz svih kutova, a što je bitno poboljšanje u odnosu na klasičnu fotografiju.

U ovom diplomskom radu prikazane su mogućnosti primjene fotogrametrije na primjeru sudarnog procesa između dvaju vozila u izrađenom crash testu na Fakultetu prometnih znanosti. Vozila su nakon sudara analizirana i fotografirana, tako da su se mogle primijeniti tehnologije fotogrametrije za izradu 3D modela. Analizom se pokazalo da u ovom slučaju oštećenja nastala na vozilu nisu pouzdana da bi relevantna u EES katalogu. Bez tehnologije fotogrametrije takva bi procjena bila otežana jer bi bila donesena iz isključivo klasičnih fotografija koje se fotografiraju prilikom očevida.

## LITERATURA

- [1.] Genta G, Morello, L, Cavallino F: The Motor Car Past, Present and Future, Springer 2014
- [2.] Verlag Europa-Lehrmittel, Nourne : Tehnika motornih vozila 2013
- [3.] <http://ispatguru.com/steels-for-automotive-applications/> , [Pristupljeno: siječanj 2021.]
- [4.] Filetin, T., Marić G.: Napredne tehnologije materijala
- [5.] Filip Žanetić, Završni rad. Faktografska analiza cijevi od 25CRMo4 čelika, Zagreb 2018.
- [6.] Rotim, F.: Elementi sigurnosti cestovnog prometa, Svezak 3, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 1991
- [7] Tomasch, E.: Accident Reconstruction Guidelines, Graz Univrsity of Technology, Graz, 2004.
- [8.] Steven G. Shelby: Delta-v as a measure of traffic conflict severity, Indianapolis, USA, 2011.
- [9.] Bogičević D., Kostić S., Gladović P., Čeregić N. : Konstrukcija i primena dijagrama energetskih rastera za tipske modele vozila, Zbornik radova
- [10.] Kovačević F., Smajlović E., Džafić E., Zdravković N., Vrednovanje deformacionog rada na vozilima u analizi saobraćajnih nezgoda, 2016.
- [11.] <https://bit.ly/3nzthQQ> , [Pristupljeno: siječanj 2021.]
- [12.] <https://bit.ly/3i22Kum> , [Pristupljeno: siječanj 2021.]
- [13.] <https://bit.ly/3oNzwCh> , [Pristupljeno: siječanj 2021.]
- [14.] <https://bit.ly/38zl2z2> , [Pristupljeno: siječanj 2021.]
- [15.] <https://bit.ly/2XuEdov> , [Pristupljeno: siječanj 2021.]
- [16.] <https://bit.ly/3qa6VXR> , [Pristupljeno: siječanj 2021.]
- [17.] <https://bit.ly/3nzndrH> , [Pristupljeno: siječanj 2021.]
- [18.] [shorturl.at/quwIW](https://shorturl.at/quwIW) , [Pristupljeno: siječanj 2021.]
- [19.] [shorturl.at/bdiPW](https://shorturl.at/bdiPW) , [Pristupljeno: siječanj 2021.]
- [20.] [shorturl.at/bdfPW](https://shorturl.at/bdfPW) , [Pristupljeno: siječanj 2021.]
- [21.] Wolf R.P., Dewitt B.A., Wilkinson B.E., Elements of Photogrammetry with Applications in GIS, 2014.

- [22.] Ljubenkov B., Modificirana fotogrametrijska metoda u gradnji broda, Doktorski rad, 2006.
- [23.] Kurečić Strgar M., Primjena digitalne fotografije u reprodukcijским medijima, Nastavni materijal, 2015.
- [24.] <https://bit.ly/2Kk05Qg>, [Pristupljeno: siječanj 2021.].
- [25.] [shorturl.at/joADH](https://shorturl.at/joADH), [Pristupljeno: siječanj 2021.].
- [26.] M.J. Westoby, J. Brasington, N.F. Glasser, M.J. Hambrey, J.M. Reynolds, 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications, 2012
- [27.] [shorturl.at/fDTW2](https://shorturl.at/fDTW2) [Pristupljeno: lipanj 2021.].
- [28.] [shorturl.at/txFGL](https://shorturl.at/txFGL) [Pristupljeno: lipanj 2021.].
- [29.] <http://www.infotrend.hr/clanak/2009/5/3d-lasersko-skeniranje,38,785.html>  
[Pristupljeno: lipanj 2021.].
- [30.] <https://store.intelrealsense.com/buy-intel-realsense-lidar-camera-l515.html>  
[Pristupljeno: lipanj 2021.].
- [31.] <https://www.dotproduct3d.com/blog/l515> [Pristupljeno: lipanj 2021.].
- [32.] Fricke, L.B.: Traffic Accident Reconstruction, Volume 2, Northwestern University Traffic Institute, Evanston, 1990.
- [33.] [shorturl.at/efiHS](https://shorturl.at/efiHS), [Pristupljeno: lipanj 2021.].

## POPIS SLIKA

Slika 2-1 Primjer oblika karoserije limuzina, [11] .....	4
Slika 2-2 1 Primjer oblika karoserije limuzina kabriolet, [12] .....	4
Slika 2-3 Primjer oblika karoserije produžene limuzine, [13] .....	5
Slika 2-4 Primjer oblika karoserije sa zakošenim zadnjim vratima ( <i>engl. hatchback</i> ), [14] .....	5
Slika 2-5 Primjer oblika karoserije karavan, [15] .....	6
Slika 2-6 Primjer oblika karoserije kupe, [16] .....	6
Slika 2-7 Primjer oblika karoserije kupe kabriolet, [17] .....	7
Slika 2-8 Primjer oblika karoserije višenamjenskog vozila namijenjeno isključivo za prijevoz putnika, [18] .....	7
Slika 2-9 Primjer oblika karoserije višenamjenskog vozila namijenjeno za prijevoz tereta, [19] .....	8
Slika 2-10 Primjer oblika karoserije terenskog vozila ( <i>engl. SUV</i> ), [20] .....	8
Slika 2-11 Konstrukcija s okvirom, odvojena karoserija, [2] .....	9
Slika 2-12 Samonosiva karoserija u školjkastoj izvedbi, [2] .....	10
Slika 2-13 Donja podkonstrukcija, [2] .....	11
Slika 2-14 Karoserija s nosivim podokvirime ( <i>engl. subframe</i> ), [2] .....	12
Slika 2-15 Rešetkasti nosivi okvir osobnog vozila s aluminijskom karoserijom, ( <i>engl. Space-frame</i> ), [2] .....	13
Slika 2-16 Primjena čelika povišene čvrstoće na bočnom dijelu karoserije, [2] .....	14
Slika 2-17 Primjeri karoserijskih dijelova iz polimernih masa, [2] .....	15
Slika 2-18 Vrste sudara i ozljede osoba, [2] .....	17
Slika 2-19 Bočni pomaknuti frontalni sudar (50 % prekrivanja), [2] .....	18
Slika 2-20 Sigurnosna karoserija, [2] .....	19
Slika 2-21 Deformacijsko ponašanje prednjeg uzdužnog nosača, [2] .....	19
Slika 2-22 Tok deformacije u području pojasne linije [2] .....	20
Slika 2-23 Nosiva struktura s tokom sile pri bočnom udaru, [2] .....	21
Slika 3-1 Međuovisnost otvora zaslona - brzine zatvarača - ISO osjetljivost, [22] .....	24



Slika 3-2 Šum pri ISO 200, 6400 i 25600, [22].....	25
Slika 3-3 Standardni otvori zaslona, [22] .....	26
Slika 3-4 Plitko i duboko polje dubinske oštine, [23] .....	27
Slika 3-5 Veza između slikovnih i objektnih koordinata kod proizvoljno orijentirane kamere, [22] .....	28
Slika 3-6 Princip triangulacije, [22] .....	30
Slika 3-7 Način pravilnog fotografiranja objekta za potrebe SFM algoritma, [24] .....	31
Slika 3-8 Prikaz detektiranih značajki (točaka) na fotografijama, [24] .....	32
Slika 3-9 SIFT algoritam rastavlja fotografiju na bazu podataka izdvojenih značajki, [25].....	33
Slika 3-10 Tijek rada SFM algoritma od fotografije do 3D modela Izvor: [26].....	35
Slika 4-1 Nalet vozila na čvrstu zapreku, [7] .....	41
Slika 4-2 Usporedba sudara dvaju vozila s naletom vozila na zapreku, [7] .....	41
Slika 4-3 Nalet vozila na zapreku, [7] .....	42
Slika 4-4 Postotna raspodjela deformacije energije po širini vozila, [9].....	44
Slika 4-5 Energetski raster za čeon dio vozila TOYOTA, [9] .....	47
Slika 4-6 Postupak izračuna brzine izgubljene na deformaciju na osnovu karakterističnog dijagrama energetskog rastera, [9] .....	48
Slika 4-7 Mjerenje dubine deformacija, [10] .....	49
Slika 5-1 Беспилотна летјеліца DJI Phantom 4 PRO [27].....	53
Slika 5-2 Razlika između mehaničkog i klasičnog zatvarača kamere [28] .....	54
Slika 5-3 Prikaz svrstavanja fotografija u programu Agisoft Metashape.....	55
Slika 5-4 Izgradnja gustih točaka u programu Agisoft Metashape .....	56
Slika 5-5 Prikaz <i>mesha</i> u programu Agisoft Metashape .....	56
Slika 5-6 Prikaz različitih broja poligona nakon optimizacije (Agisoft Metashape) .....	57
Slika 5-7 Prikaz teksturiranog modela (Agisoft Metashape) .....	58
Slika 5-8 LIDAR kamera (RealSence L515) [30] .....	59
Slika 5-9 Prikaz LiDAR senzora i pametnog telefona prije skeniranja [31] .....	60
Slika 5-10 Skenirano vozilo Škoda Felicia .....	61
Slika 5-11 Skenirano vozilo Renault Thalia .....	62

<i>Slika 5-12 Prikaz oštećenja vozila tlocrtno.....</i>	<i>63</i>
<i>Slika 5-13 Prikaz oštećenja vozila bokocrtno.....</i>	<i>63</i>
<i>Slika 5-14 Fotografije vozila koja su sudjelovala u sudaru .....</i>	<i>64</i>
<i>Slika 5-15 Prikaz sudarnog položaja tlocrtno (fotogrametrija).....</i>	<i>65</i>
<i>Slika 5-16 Prikaz sudarnog položaja bokocrtno (fotogrametrija).....</i>	<i>65</i>
<i>Slika 5-17 Prikaz sudarnog položaja .....</i>	<i>66</i>
<i>Slika 6-1 Fotografija oštećenog vozila Škoda Octavia (EES katalog), bočno .....</i>	<i>68</i>
<i>Slika 6-2 Fotografije oštećenog vozila Škoda Octavia (EES katalog), prednja strana .....</i>	<i>68</i>
<i>Slika 6-3 Fotografije oštećenog vozila Škoda Felicia .....</i>	<i>69</i>
<i>Slika 6-4 Programski alata PC-Crash 13.1.....</i>	<i>70</i>
<i>Slika 6-5 Prikaz dubine oštećenja na vozilu u PC-Crash programu .....</i>	<i>70</i>
<i>Slika 6-6 Izmjera udubljenja u PC-crashu.....</i>	<i>71</i>
<i>Slika 6-7 NHTSA baza vozila (PC-Crash) .....</i>	<i>72</i>
<i>Slika 6-8 Izračun EBS vrijednosti nakon očitavanja oštećenja.....</i>	<i>73</i>
<i>Slika 6-9 Prikaz mogućnosti fotogrametrije za određivanje oštećenja .....</i>	<i>74</i>
<i>Slika 6-10 Prikaz mogućnosti fotogrametrije za određivanje oštećenja .....</i>	<i>75</i>

## POPIS TABLICA

Tablica 1 Usporedba mehaničkih svojstva.....	16
Tablica 2 Kombinacije brzine zatvarača i otvora zaslona pri različitim ISO vrijednostima.....	26
Tablica 3 Podatci o vozilu i izmjerenim deformacijama .....	45
Tablica 4 Vrijednosti deformacijske energije u zavisnosti dubine deformacije .....	47
Tablica 5 Vrijednosti čvrstoće vozila po klasama .....	50



Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti  
10000 Zagreb  
Vukelićeva 4

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOST

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem kako je ovaj \_\_\_\_\_ diplomski rad  
isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na  
objavljenu literaturu što pokazuju korištene bilješke i bibliografija.

Izjavljujem kako nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, niti je prepisan iz  
necitiranog rada, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava.

Izjavljujem također, kako nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj  
visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu \_\_\_\_\_ diplomskog rada  
pod naslovom **MOGUĆNOSTI UPOTREBE FOTOGRAFIJE PRI IZRAČUNU  
APSORBIRANE ENERGIJE U SUDARU VOZILA**

na internetskim stranicama i repozitoriju Fakulteta prometnih znanosti, Digitalnom akademskom  
repozitoriju (DAR) pri Nacionalnoj i sveučilišnoj knjižnici u Zagrebu.

U Zagrebu, \_\_\_\_\_ 24.6.2021 \_\_\_\_\_

Student/ica:

\_\_\_\_\_  
(potpis)