

# Održivi materijali za izradu bolida Formule jedan

---

**Kosanović, Lovre**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2022**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:776795>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-02**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Lovre Kosanović**

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Irena Žmak

Student:

Lovre Kosanović

Zagreb, 2022.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem mentorici dr.sc. Ireni Žmak na prijedlogu teme završnog rada i stručnom savjetovanju tijekom njegove izrade. Svojom pristupačnošću i srdačnim, ali profesionalnim pristupom uvelike mi je olakšala stresno razdoblje pisanja završnog rada uz istovremeno savladavanje ostalih fakultetskih obaveza.

Također, zahvaljujem obitelji, svim prijateljima i kolegama na podršci i pomoći, a osobito majci Silvani Tokić i djevojci Ivoni Stjepić na bezuvjetnoj emocionalnoj potpori u svim trenucima mog dosadašnjeg tijeka studiranja.

Lovre Kosanović



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 22 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 22 -	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Lovre Kosanović**

JMBAG: **0035218246**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Održivi materijali za izradu bolida Formule jedan**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Sustainable materials for Formula one racing cars**

Opis zadatka:

Održivi razvoj podrazumijeva razvoj koji zadovoljava potrebe sadašnjosti bez ugrožavanja mogućnosti budućih generacija da zadovolje vlastite potrebe. Stoga je jedan od trendova razvoja novih materijala i razvoj održivijih materijala, koji manje opterećuju okoliš svojom proizvodnjom, odnosno za koje se manje troše prirodni resursi. Taj je trend nedavno zabilježen i u svijetu razvoja novih natjecateljskih vozila (tzv. bolida) Formule jedan. Međutim, materijali, postupci izrade, konstrukcija itd. bolida Formule jedan strogo su propisani i nadzirani od strane organizacije Fédération Internationale de l'Automobile (FIA).

U okviru ovog završnog rada potrebno je istražiti pojam održivog razvoja, Program Ujedinjenih naroda o održivom razvoju do 2030. godine (tzv. Agenda 2030) te istaknuti i objasniti Ciljeve održivog razvoja koji su povezani s razvojem novih materijala za izradu bolida Formule jedan. Potrebno je istražiti smjerove razvoja novih održivijih materijala, njihov sastav i svojstva, prednosti i poteškoće te procijeniti perspektivu ovih materijala u budućim bolidima Formule jedan.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. 11. 2021.

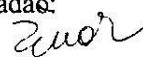
Datum predaje rada:

1. rok: 24. 2. 2022.  
2. rok (izvanredni): 6. 7. 2022.  
3. rok: 22. 9. 2022.

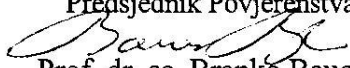
Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 28. 2. – 4. 3. 2022.  
2. rok (izvanredni): 8. 7. 2022.  
3. rok: 26. 9. – 30. 9. 2022.

Zadatak zadao:

  
Izv. prof. dr. sc. Irena Žmak

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Branko Bauer

**SADRŽAJ**

POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA .....	IV
POPIS KRATICA .....	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY .....	VII
1. UVOD.....	1
2. ODRŽIVI RAZVOJ.....	2
2.1. Općenito o održivom razvoju.....	2
2.2. Agenda 2030 .....	3
2.3. Održivi razvoj u svijetu Formule 1 .....	5
2.3.1. Inicijativa „Nulta stopa emisije CO <sub>2</sub> “ .....	6
3. MATERIJALI U BOLIDIMA FORMULE 1 .....	9
3.1. Općenito o bolidu Formule 1 .....	9
3.2. Kompozitni materijali .....	11
3.3. Metodologija proizvodnje bolida Formule 1 .....	20
4. EKOLOŠKA PRIHVATLJIVOST CFRP-A.....	23
4.1. Postupci recikliranja materijala u bolidima Formule 1 .....	23
4.1.1. Mehaničko recikliranje .....	25
4.1.2. Toplinsko recikliranje .....	26
4.1.3. Kemijsko recikliranje.....	27
4.2. Održivost recikliranja materijala u Formuli 1 .....	28
5. PERSPEKTIVA ODRŽIVOSTI U FORMULI 1 .....	29
5.1. Formula E kao predstavnik ekološki prihvatljivog natjecanja.....	29
5.2. „Zeleni“ kompoziti.....	31
6. ZAKLJUČAK.....	34
LITERATURA.....	35

**POPIS SLIKA**

Slika 1. 17 ciljeva održivog razvoja [4] .....	3
Slika 2. Sastavnice održivog razvoja [5] .....	4
Slika 3. Vozači Formule 1 ujedinjeni s porukom o suzbijanju rasne diskriminacije [7] .....	6
Slika 4. Prikaz ukupne količine ozona kroz godine po DU [8] .....	7
Slika 5. Ciljevi provedbe plana „Nulta stopa emisije CO <sub>2</sub> “ [6] .....	8
Slika 6. Raspored sila pri vožnji bolida [10] .....	9
Slika 7. Ispitivanje vlačne čvrstoće stražnjeg krila [10] .....	13
Slika 8. Kompozitna prednja osovina bolida [13] .....	13
Slika 9. Promjena svojstava sendvič-strukture kompozita u ovisnosti o debljini jezgre [10] ..	14
Slika 10. Primjer sendvič-konstrukcije korištene za izradu prednjeg krila bolida Formule 1 [12] .....	15
Slika 11. Sklop „nosa“ bolida [12] .....	16
Slika 12. Prikaz sposobnosti apsorpcije energije udara metalnih struktura [10] .....	17
Slika 13. Prikaz sposobnosti apsorpcije energije udara kompozitnih struktura [10] .....	17
Slika 14. Vlakna PBO [14] .....	18
Slika 15. Grafički prikaz svojstava visokočvrstih vlaknastih materijala [15] .....	19
Slika 16. Zaštitna oplata od PBO u unutrašnjosti kokpita bolida [10] .....	19
Slika 17. Metodologija proizvodnje elemenata bolida [12] .....	20
Slika 18. CNC-uređaj za oblikovanje kalupa [10] .....	22
Slika 19. Prikupljanje točaka dodirnom sondom CMM-uređaja [12] .....	22
Slika 20. Postupak rekonstrukcije prostirke od ugljičnih vlakana [17] .....	24
Slika 21. Shematski prikaz životnog ciklusa CFRP-kompozita [17] .....	24
Slika 22. Drobilica MAS1 Wittman [18] .....	25
Slika 23. Bolid Formule E i polipropilenski reklamni paneli [21] .....	30
Slika 24. Udio emisija ekvivalenta ugljikovog dioksida po kilogramu za različite segmente natjecanja [21] .....	30

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Usporedba materijala izrade bolida kroz vrijeme [12] .....	10
Tablica 2. Usporedba mehaničkih svojstava metalnih i kompozitnih materijala [10] .....	12
Tablica 3. Usporedba svojstava CFRP-a prije i nakon recikliranja pirolizom [19] .....	28
Tablica 4. Usporedba mehaničkih svojstava prirodnih vlakana u odnosu na ugljična [10], [22] .....	33



**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Mjerna jedinica</b>	<b>Opis oznake</b>
<i>A</i>	%	Istezljivost
<i>CO<sub>2</sub>-eq</i>	t	Ekvivalent ugljikovog dioksida
<i>E</i>	N mm <sup>-2</sup>	Modul elastičnosti
<i>F</i>	N	Sila
<i>m</i>	kg	Masa
<i>R<sub>e</sub></i>	N mm <sup>-2</sup>	Granica razvlačenja
<i>R<sub>m</sub></i>	N mm <sup>-2</sup>	Vlačna čvrstoća
<i>v</i>	km h <sup>-1</sup>	Brzina
<i>θ</i>	°C	Temperatura
<i>ρ</i>	g cm <sup>-3</sup>	Gustoća

## POPIS KRATICA

<b>Kratika</b>		<b>Opis</b>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>	- računalom potpomognuto oblikovanje
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i>	- računalom potpomognuta proizvodnja
CFRP	<i>Carbon Fibre Reinforced Polymer</i>	- ugljičnim vlaknima ojačan polimerni kompozit
CMM	<i>Coordinate-Measuring Machine</i>	- stroj za mjerenje koordinata
CNC	<i>Computerized Numerical Control</i>	- računalno numeričko upravljanje
CO <sub>2</sub>	<i>Carbon Dioxide</i>	- ugljikov dioksid
DU	<i>Dobson Unit</i>	- Dobsonova mjerna jedinica
FDM	<i>Fused Deposition Modelling</i>	- postupak trodimenzionalnog printanja visoke preciznosti i ponovljivosti
FIA	<i>Fédération Internationale de l'Automobile</i>	- Međunarodna automobilistička federacija
GPD	<i>Grams per Denier</i>	- mjerna jedinica za čvrstoću tekstilnih materijala
HM	<i>High Modulus Carbon</i>	- kompoziti ojačani ugljičnim vlaknima visokog modula elastičnosti
IM	<i>Intermediate Modulus Carbon</i>	- kompoziti ojačani ugljičnim vlaknima srednje visokog modula elastičnosti
NiMoCr	<i>Chrome-Nickel-Molybdenum steel</i>	- čelik legiran niklom, molibdenom i kromom
PVC	<i>Polyvinyl Chloride</i>	- poli(vinil-klorid)
SLA	<i>Stereolithography</i>	- postupak trodimenzionalnog printanja (stereolitografija)
SLS	<i>Selective Laser Sintering</i>	- selektivno lasersko sinteriranje
UN	<i>United Nations</i>	- Ujedinjeni narodi

## **SAŽETAK**

Razvoj koji zadovoljava potrebe sadašnjosti bez ugrožavanja mogućnosti budućih generacija da zadovolje vlastite potrebe smatra se održivim. Programom Ujedinjenih naroda o održivom razvoju do 2030. godine, potaknuti su poslovni entiteti diljem svijeta na osvještavanje i reakciju u postizanju ciljeva održivosti, a među takvima se pronalazi i Međunarodna automobilistička federacija, pod čijom je ingerencijom sport Formule 1.

U ovom završnom radu prikazani su izazovi s kojima se susreće Međunarodna automobilistička federacija u provedbi ideja održivog razvoja. Kao takvi, prikazani su faktori: regulacije upotrebe materijala, njihovo uspješno recikliranje uz minimalno zagađenje okoliša, iskorištavanje punog potencijala obnovljivih izvora energije, smanjenje emisija štetnih plinova, smanjenje stvaranja neobnovljivog polimernog otpada, ograničavanje troškova izrade bolida, ali i korištenje globalno praćenih platformi za usmjeravanje i edukaciju mlađih generacija vrijednostima jednakosti, poštenja i sportskog nadmetanja.

Razmatrana je i mogućnost primjene ekološki prihvatljivijih materijala u bolidima Formule 1, te usporedba njihovih svojstava u odnosu na svojstva odgovarajućih ugljičnim vlaknima ojačanih polimernih kompozita koji se trenutno primjenjuju za izradu strukturnih dijelova bolida.

Ključne riječi: Formula 1, održivi razvoj, ugljičnim vlaknima ojačani polimerni kompoziti, ekološki prihvatljivi materijali

## **SUMMARY**

Development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs is considered sustainable. The 2030 United Nations Sustainable Development Program has encouraged businesses around the world to raise awareness and respond to sustainability goals, including the International Automobile Federation, which is responsible for Formula One sports.

This Bachelor thesis presents the challenges facing the International Automobile Federation in implementing the idea of sustainable development. As such, the following factors are presented: regulation of used material, successful recycling process with minimal environmental pollution, exploitation of the full potential of renewable energy sources, reduction of harmful gas emissions, reduction of non-renewable plastic waste, limiting car production costs, but also the use of globally followed platforms for the education of younger generations on the values of equality, fair-play and sporting competition.

The possibility of using environmentally friendly materials in Formula One cars was also considered, as well as a comparison of their properties in relation to the properties of the corresponding carbon fiber reinforced polymer composites currently used for the production of structural parts of Formula One cars.

Key words: Formula One, sustainable development, carbon fiber reinforced polymer composites, environmentally friendly materials

## 1. UVOD

Formula 1 se smatra najvišom klasom jednosjednog automobilističkog utrivanja, a djeluje pod ingerencijom Međunarodne automobilističke federacije (fr. *Fédération Internationale de l'Automobile*, FIA). Svake sezone, momčadi sastavljene od vozača i inženjera (konstruktora), natječu se za osvajanje odvojenih nagrada vozačkog i konstrukcijskog svjetskog prvaka. Tijekom sezone momčadima su dozvoljene prilagodbe i izmjene na bolidima u svrhu postizanja optimalnih rezultata pri utrivanju, uz nužan uvjet da sve izmjene budu u skladu s regulativama FIA-e.

S prvom utrkom na stazi 1946. godine, započelo je i nadmetanje konkurentnih momčadi za izgradnju pobjedničkog bolida. Zahvaljujući razvoju znanosti, osobito u područjima strojarstva i elektrotehnike, moto-sport današnjice poprimio je sasvim drugačiji izgled, a razlike u rezultatima među momčadima ovise o iznimno sitnim detaljima. Konstantne progresivne promjene u vidu implementacije naprednijih radnih jedinica, regulacijskih sustava i prikladnijih materijala u natjecateljske bolide dovode do iznimnih performansi. Međutim, uslijed ubrzanog ritma proizvodnje i imperativa za napredak, kolateralna šteta se očituje kroz onečišćenje okoliša, pa su stoga odredbe za njegovu zaštitu rigoroznije.

Odabir materijala za primjenu u izradi bolida Formule 1 kompleksan je proces koji zahtijeva zadovoljavanje brojnih kriterija po pitanju sigurnosti vozača, performansi bolida i ekološke prihvatljivosti. Konstruktivan pristup rješavanju problematike vezane uz proizvodnju u automobilskoj industriji, uz efikasnost i ekonomičnost, uključuje i razmišljanje o budućnosti industrije i čovječanstva, pa se stoga povezivanje ovih značajki u funkcionalan sustav postiže provedbom ideja održivog razvoja. Posljedično Programu Ujedinjenih naroda o održivom razvoju do 2030. godine (tzv. Agenda 2030), FIA je inicirala odgovarajuće strategije za zaštitu okoliša s osobitim naglaskom na smanjenju emisija ugljikovog dioksida u atmosferu.

Slijedom navedenog, u radu će biti prikazan utjecaj primjene trenutno korištenih materijala na okoliš, ali i na natjecateljske i sigurnosne performanse bolida. S posebnom pozornošću na obuhvaćene aspekte Formule 1, detaljno će biti opisani ciljevi i očekivani rezultati pokrenutih programa, te će se na kraju dati pregled mogućeg smjera razvoja materijala za bolide Formule 1 sukladno smjernicama UN-ovog Programa održivog razvoja do 2030. godine.

## 2. ODRŽIVI RAZVOJ

### 2.1. Općenito o održivom razvoju

Iako se prisutnost ideja o održivom razvoju može primijetiti još od početka 18. stoljeća iz radova Hansa Carla Von Carlowitza, koji je pisao nadahnut nedostatkom resursa drva uslijed masovnog iskorištavanja u svrhe rudarstva, konkretnije razumijevanje problematike i oblikovanje današnjih modela započelo je sastancima predstavnika svjetskih velesila u Rio de Janeiru 1992., te New Yorku 2000. godine [1]. Ipak, zbog utvrđenog nedovoljnog utjecaja na nerazvijenije države u 15 godina koje su slijedile navedenim sporazumima, isticala se potreba za sporazumom koji će djelovati globalno. Shodno tome, na Općoj skupštini Ujedinjenih naroda (UN) 25. rujna 2015. godine predstavljen je pokret pod nazivom Program održivog razvoja do 2030. godine (tzv. Agenda 2030).

Načelo održivog razvoja utemeljeno je na ostvarivanju sadašnjih i budućih gospodarskih ciljeva čovječanstva uz istovremeno očuvanje ekosustava i prirodnih energenata o kojima društvo i većina industrija ovise. Za razliku od problema zagađenja životnog okruženja koji su uočljivi neposrednom promatraču, bitno je primijetiti i kolateralnu štetu u vidu utjecaja na klimatske promjene, ali i prirodne ograničenosti zaliha neobnovljivih energenata. Jedan od problema leži u procesu proizvodnje nekih materijala, gdje dolazi do stvaranja otrovnih tvari koje se ispuštaju u prirodu. Također, mnogi materijali, poput sintetičkih polimera (za koje je primarna sirovina nafta) i nekih metala, proizvedeni su iz neobnovljivih izvora. Ovi neobnovljivi resursi postupno se iscrpljuju, što zahtijeva otkrivanje novih rezervi koje su na Zemlji ograničene, pa je stoga ključan razvoj novih materijala na prirodnoj bazi s naglaskom na obnovljivosti [2].

Prema [2], ljudska težnja za unaprjeđenjem tehnoloških procesa uvjetuje razvoj učinkovitijih materijala koji će imati veću sposobnost recikliranja te se predstavlja kao put k ostvarenju održivog razvoja.

Svijest o održivom razvoju javlja se kao reakcija na utjecaj procesa industrijalizacije i globalizacije na društvo, gospodarstvo i okoliš, a s obzirom na realnost aktualne situacije u svijetu, nužne su radikalne promjene koje su ostvarive samo ujedinjavanjem na globalnoj razini.

## 2.2. Agenda 2030

U okviru Programa održivog razvoja do 2030. godine, koji podrazumijeva uključenost svih 193 država članica UN-a, predstavljeno je 17 ciljeva održivog razvoja (Slika 1) kroz tri dimenzije – društvenu, ekonomsku i ekološku (Slika 2). Ideja vodilja je da se aktivnim sudjelovanjem svih članova društva nastoje postići navedeni ciljevi kako bi se svima omogućilo pravo na dostojanstven život, poštivanje ljudskih prava, pravdu, jednakost i zaštitu okoliša. Neophodan uvjet funkcionalnosti programa je univerzalna primjenjivost i međusobna povezanost ciljeva na način da se ostvarivanjem jednog pridonosi ostvarivanju ostalih [3].

(Slika 1) prikazuje 17 ciljeva održivog razvoja koji obuhvaćaju ključna tematska područja za optimizaciju života u modernom društvu. Iako provedba navedenih ciljeva nije pravna obaveza, moralna je odgovornost vodstava država sudionica da uspostave nacionalne okvire njihove provedbe, te su shodno tome mnoge države implementirale ciljeve i u strategije poslovanja svojih ključnih institucija, sveučilišta i drugih državnih entiteta [3].



Slika 1. 17 ciljeva održivog razvoja [4]

Partnerstvo i suradnja svih sudionika posebno dolaze do izražaja kod analize uspješnosti provedbe ciljeva. S obzirom da su ideje Agende 2030 u interesu cjelokupne ljudske vrste, a analiza na globalnoj razini otežana zbog kompleksnosti izračuna nekih rezultata ciljeva i mnogobrojnosti populacije, nužan je kontinuirani doprinos od strane država sudionica u vidu dobrovoljnih nacionalnih pregleda provedbe ciljeva. Potom se početna vizija programa uspoređuje sa stvarnim rezultatima, a sukladno tome se otvara i mogućnost za otklanjanje potencijalnih poteškoća u provedbi ciljeva održivog razvoja u određenim područjima.

Održivi se razvoj smatra idealiziranom sinergijom triju sastavnica kojima je oblikovana ljudska svakodnevnica, kao što se može primijetiti prikazom na (Slika 2). Poslovni modeli i struktura svjetskih organizacija današnjice trebaju biti prilagođeni zadovoljavanju ciljeva održivog razvoja kroz prizmu društvene, ekonomske i ekološke prihvatljivosti. Sukladno navedenom, vlade zemalja potpisnica Programa održivog razvoja do 2030. trebale bi utjecati na održivi razvoj promicanjem održivih promjena i subvencioniranjem tzv. „pametnog razvoja“.



Slika 2. Sastavnice održivog razvoja [5]



### 2.3. Održivi razvoj u svijetu Formule 1

Od kompleksne logistike iza organizacije natjecanja diljem svijeta, do izrade i utjecaja vožnje bolida na okoliš, prisustvo ideje održivosti proteže se svim ključnim segmentima Formule 1. Materijali i postupci koji se koriste kod izrade bolida strogo su propisani i nadzirani od strane organizacije FIA-e kako bi se sačuvala sigurnost natjecanja, ali i zadovoljili uvjeti ekološke i ekonomske prihvatljivosti.

Tri strateška područja primjene planova održivosti u Formuli 1 su [6]:

1. Klimatsko djelovanje – ubrzanje neto nulte transformacije
2. Tehnologija i inovacije – poticanje održivih i inovativnih rješenja
3. Održive prakse – poticanje održivih promjena.

U ovom završnom radu, naglasak je na zadovoljavanju potreba za inovativnim rješenjima u svrhu napretka natjecateljskog i industrijskog aspekta sporta Formule 1, uz poštovanje ciljeva odgovorne potrošnje i proizvodnje te industrije, inovacije i infrastrukture. Reakcija FIA-e na Program održivog razvoja do 2030. godine istaknuta je i u vidu posljedično pokrenutih inicijativa za smanjenje emisija štetnih plinova u atmosferu, a time se pridonosi ostvarivanju ciljeva vezanih uz klimatske promjene i očuvanje okoliša. Prvi konkretan plan održivosti u povijesti FIA-e pokrenut je 2019. godine pod nazivom „Nulta stopa emisije CO<sub>2</sub> 2030“ (engl. *Net-zero carbon 2030*).

Iako to nije direktno povezano s temom ovog završnog rada, treba napomenuti da svjetska popularnost natjecateljima u najvišim rangovima sporta, poput Formule 1, pruža priliku za korištenje platformi poput društvenih mreža i telekomunikacijskih medija u svrhu promoviranja ciljeva smanjenja nejednakosti te rodne ravnopravnosti, pa su i na taj način u mogućnosti izravno pridonijeti cjelokupnom pokretu održivog razvoja. (Slika 3) prikazuje vozače Lewisa Hamiltona i Sebastiana Vettela ujedinjene u pokretu za suzbijanje rasne diskriminacije uslijed aktualnih događaja u svijetu koji upućuju na to da je ona i dalje itekako prisutna.



Slika 3. Vozači Formule 1 ujedinjeni s porukom o suzbijanju rasne diskriminacije [7]

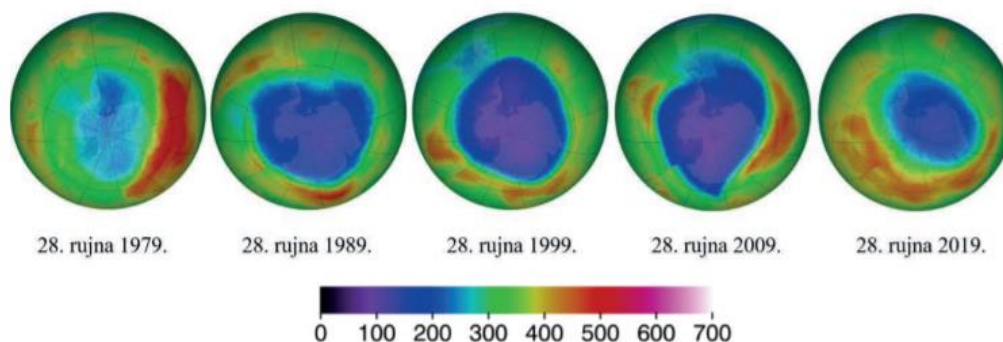
### 2.3.1. Inicijativa „Nulta stopa emisije CO<sub>2</sub>“

Prijevozna sredstva koja koriste motore s unutarnjim izgaranjem goriva pridonose emisiji štetnih plinova u značajnoj mjeri, pa su stoga regulacije u automobilskoj, brodograđevnoj i zrakoplovnoj industriji drastično ograničile dozvoljene količine emitiranih štetnih plinova, s aspiracijama o potpunom suzbijanju emisija u narednim godinama.

Emisijom štetnih plinova poput CO<sub>2</sub> postiže se tzv. efekt staklenika (engl. *Greenhouse effect*), čiji se negativan utjecaj na klimatske promjene odražava u obliku povišenja temperature zraka na Zemlji, tj. izazivajući globalno zatopljenje. „Neživa priroda itekako podliježe temperaturnom porastu: s promjenama oborinskih obrazaca vidljive su promjene od Arktika do Antarktike, a srednja razina mora neprestano raste – tijekom XX. stoljeća zamijećeno je podizanje razine mora za čak 20 cm, a nastavi li se trend zagađenja/zatopljenja, ta će brojka zasigurno narasti“ [8].

Poznat je i problem djelovanja štetnih plinova (halogeniranih ugljikovodika) koji razaraju ozonski omotač, pa kroz tzv. ozonske rupe do Zemlje prodire i dio ultraljubičastoga zračenja

Sunca kojeg bi trebao onemogućiti ozonski omotač. (Slika 4) dokazuje štetan utjecaj efekta staklenika na ozonski omotač, ali i činjenicu da je proces destrukcije reverzibilan, te da se pravovremenom reakcijom čovječanstva može oporaviti.



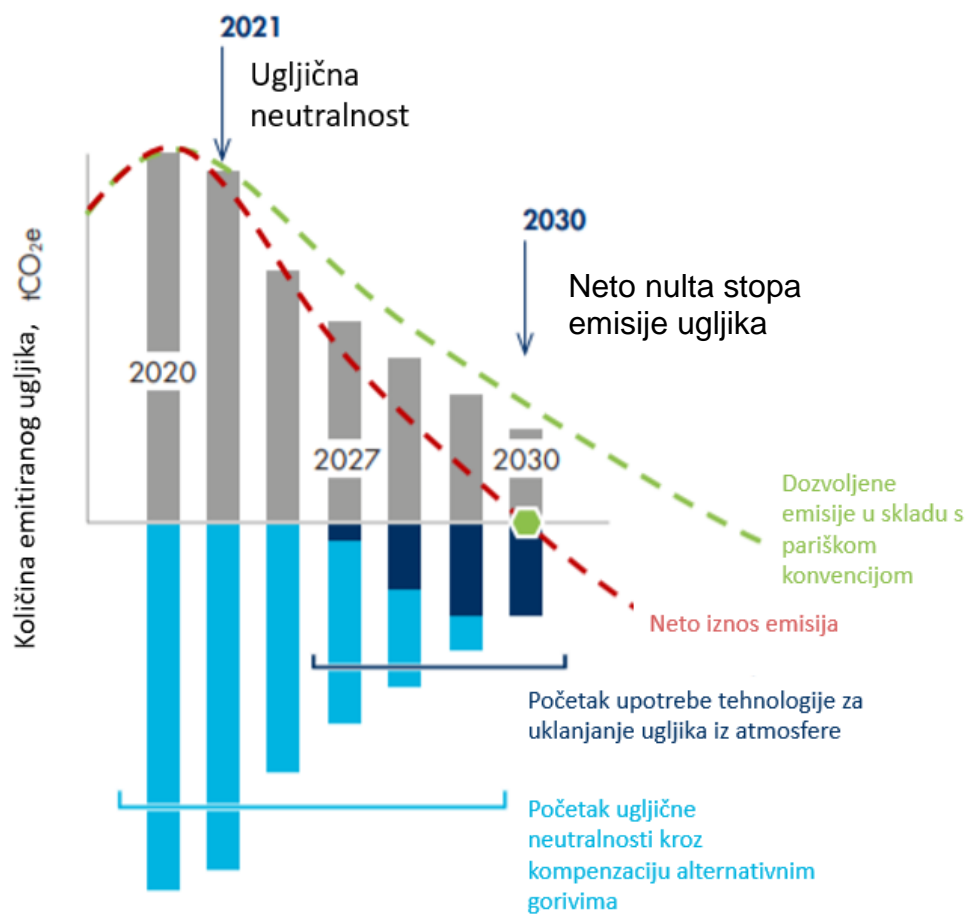
**Slika 4. Prikaz ukupne količine ozona kroz godine po DU [8]**

Sport Formule 1 zasniva se na izgaranju pogonskih goriva i prirodnih ruda u razne svrhe, od zahtjevnih potreba za napajanjem radnih stanica, pa do enormnog utroška goriva tijekom vožnje samih bolida. Trajno zanemarivanje ekološke neprihvatljivosti Formule 1 okončano je 2010. godine zabranom točenja goriva pri stajanjima u utrci (engl. *Pit stop refueling*), čime se postiglo značajno smanjenje sveukupnog utroška goriva, a samim time i kolateralnog onečišćenja okoliša. Početkom sezone 2014. godine, na snagu je stupilo pravilo o obaveznoj zamjeni dotadašnjih motora s unutrašnjim izgaranjem hibridnim pogonskim jedinicama, čija sposobnost generacije iznimne količine energije uz minimalan utrošak goriva pruža mogućnost razvoja primjene inovativnih rješenja i za automobile u svakodnevnoj upotrebi [9]. Posljedično razvoju hibridnih pogonskih jedinica, dolazi do kulminacije pokreta za zaštitu okoliša u vidu ambicioznog plana održivosti predstavljenog 12. studenog 2019., kojim su naposljetku obuhvaćene sve aktivnosti u sklopu Formule 1.

Temeljna ideja inicijative je apsolutno smanjenje emisije ugljikovog dioksida u atmosferu i uklanjanje iz atmosfere onih plinova koji su neizbježni nusprodukt reakcije izgaranja. Projekt „Nulta stopa emisije CO<sub>2</sub>“ s tehničke strane uključuje razvoj i upotrebu [6]:

- 100 % održivog pogonskog goriva
- održivih materijala uz potpunu mogućnost recikliranja otpada
- radnih stanica s isključivim napajanjem na obnovljive izvore energije

- unaprijeđenih hibridnih pogonskih jedinica
- sustava za obnovu energije.



Slika 5. Ciljevi provedbe plana „Nulta stopa emisije CO<sub>2</sub>“ [6]

### 3. MATERIJALI U BOLIDIMA FORMULE 1

#### 3.1. Općenito o bolidu Formule 1

Bolidi su monokokna vozila čija se osnovna (primarna) struktura sastoji od šasije, pogonske jedinice, mjenjača i sklopa stražnjeg ovjesa, a primjenjuju se u svrhu sportskog natjecanja na Velikim nagradama (fr. *Grand Prix*) Formule 1 [10].

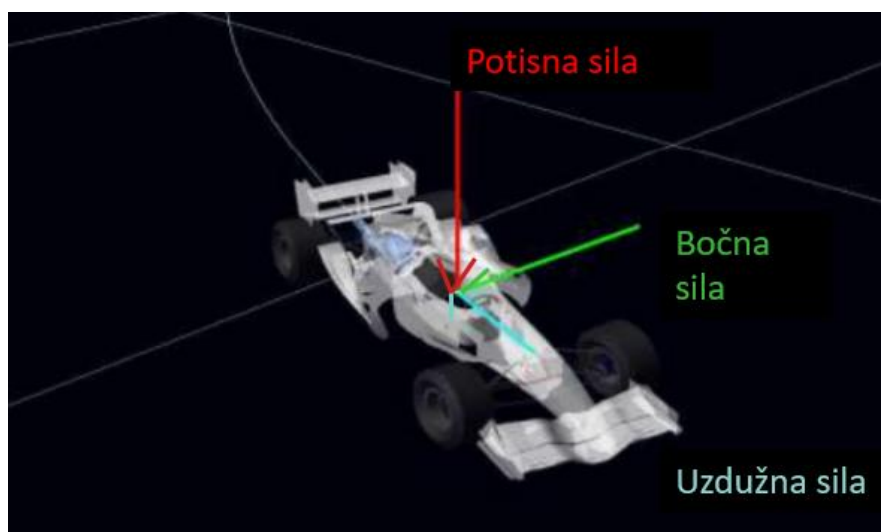
Šasija je centralna komponenta koja se sastoji od :

- kokpita
- sklopa prednjeg ovjesa
- gorivog članka.

Sekundarni strukturni dijelovi, čijom se funkcijom upotpunjava djelovanje primarnih, su :

- karoserija
- podvozje
- prednja i stražnja krila
- rashladni kanali.

S obzirom na ekstremne uvjete kojima se podvrgavaju tijekom utrka, sve komponente bolida su planski pozicionirane kako bi se postigle maksimalne vrijednosti potisne sile kojom se vozilo opire prevrtanju uslijed djelovanja uzdužnih i bočnih sila koje su prikazane na (Slika 6).



Slika 6. Raspored sila pri vožnji bolida [10]

Premda su prilagodbe specifikacija bolida dozvoljene za svaku pojedinu utrku, opća konfiguracija, poput dozvoljenih materijala za izradu vozila ili minimalne mase vozila, mora zadovoljavati regulative FIA-e. Kao što prikazuje (Tablica 1), očigledno je da takve odredbe nisu oduvijek bile prisutne u Formuli 1, no današnje sigurnosne odredbe se ipak smatraju prioritetnima. Provjere usklađenosti značajki vozila s odredbama FIA-e provode se prije svake utrke u svrhu osiguranja sigurnosti natjecanja.

Prema [11]: „Bolidi Formule 1 moraju se u cijelosti pridržavati ovih propisa u svakom trenutku tijekom natjecanja.“ Također, „dizajn bolida, njegove komponente i sustavi, s iznimkom sigurnosnih značajki, moraju dokazati usklađenost s ovim regulacijama pri ispitivanju putem fizičke provjere hardvera ili materijala.“

Iz (Tablica 1) je vidljivo kako su se materijali i njihova ukupna masa kod Mercedes-Benzovih i McLarenovih bolida prilagođavali zahtjevima vremena i uvjeta u kojima su nastajali, te kako su promjene korištenih materijala na pojedinim dijelovima bolida utjecale na povećanje maksimalne brzine, općenito bolje performanse bolida i, unatoč većim brzinama, sigurniju vožnju.

**Tablica 1. Usporedba materijala izrade bolida kroz vrijeme [12]**

Mercedes-Benz W 154 Silver Arrow (1938. god.)				McLaren MCL35 Renault (2020. god.)			
Dio bolida	Materijal	Ukupna masa vozila, $m / \text{kg}$	Maksimalna brzina, $v / \text{km h}^{-1}$	Dio bolida	Materijal	Ukupna masa vozila, $m / \text{kg}$	Maksimalna brzina, $v / \text{km h}^{-1}$
Šasija	NiMoCr	980	330	Šasija	CFRP	746	341
Karoseriija	Aluminij			Kočnice	CFRP		
Podvozje	Čelik			Podvozje	CFRP		

### 3.2. Kompozitni materijali

Kompoziti su materijali sačinjeni od jasno odvojene kombinacije dvaju ili više sastavnica različitog kemijskog sastava, u svrhu postizanja povoljnijih svojstava nego što bi ih te sastavnice pružale individualno [10].

Faze kompozita se dijele na matrice i ojačala, gdje matrice mogu biti [10]:

- metalne
- keramičke
- polimerne.

Dok matrica ima ulogu povezivanja, zaštite ojačala od vanjskih utjecaja, oblikovanja cjelokupnog kompozita i prijenosa opterećenja na ojačalo, ojačala kao nosivi element kompozita imaju zadaću osiguravanja svojstava čvrstoće, krutosti i otpornosti na adhezijsko i abrazijsko trošenje.

Glavna prednost kompozita naspram ostalih vrsta materijala je mogućnost postizanja povoljnijih vrijednosti svojstava ključnih za određene eksploatacijske uvjete, a takva se mogućnost ostvaruje podešavanjem odnosa volumnog udjela, oblika, raspodjele i veličine ojačala te izborom materijala matrice.

Usprkos tome što su bolidi u početnim godinama Formule 1 bili konstruirani od aluminijskih i čeličnih ljevova, razvoj bolida je u međuvremenu pokazao da određeni kompozitni materijali, osobito ugljičnim vlaknima ojačani polimerni kompoziti, tzv. CFRP (engl. *Carbon Fiber Reinforced Polymer*), mogu osigurati povoljnija mehanička svojstva i veću sigurnost uz manju masu dijelova zbog nižih gustoća materijala, kao što se zaključuje prikazom (Tablica 2).

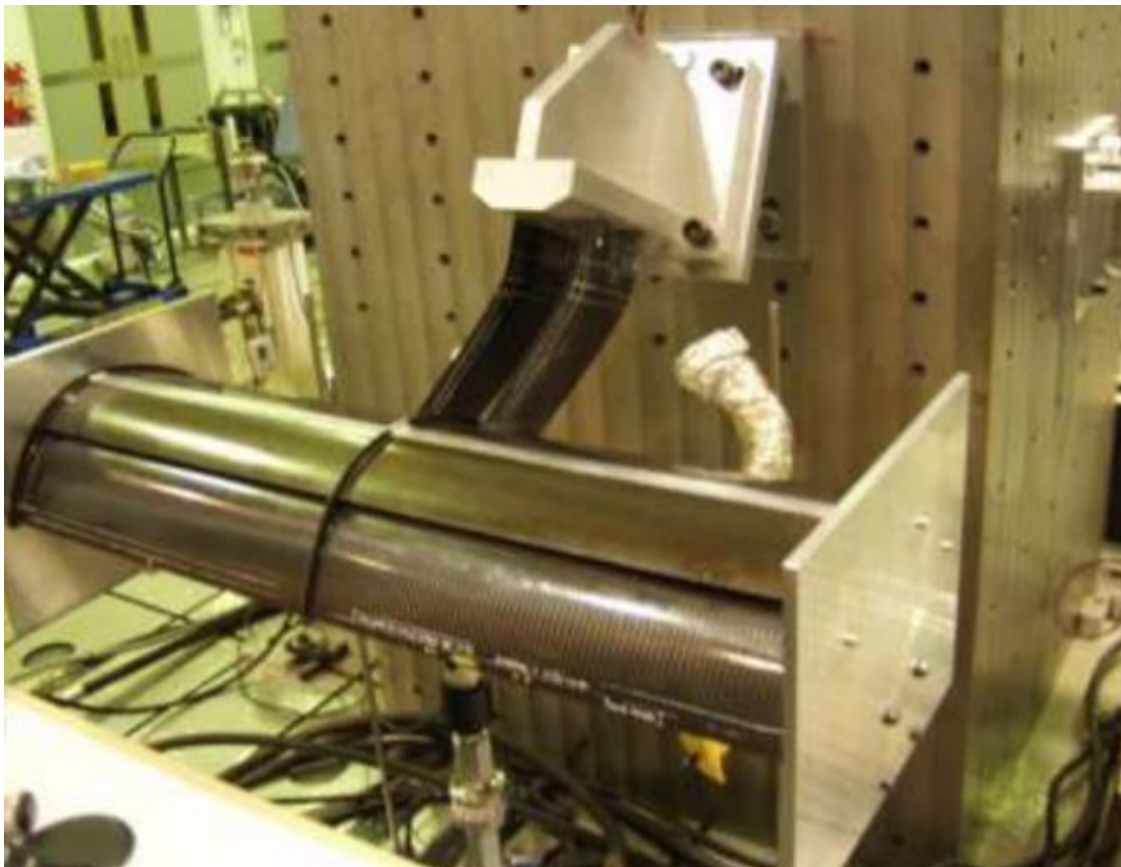
Danas se stoga za izradu većine dijelova bolida koriste kompoziti na bazi duromernih smola, poput epoksidne, ojačani ugljičnim vlaknima [12]. Zamjenom metalnih s kompozitnim materijalima kod konstrukcije dijelova ostvaruje se 30 do 50 % smanjenja mase [10].

**Tablica 2. Usporedba mehaničkih svojstava metalnih i kompozitnih materijala [10]**

Materijal	Gustoća, $\rho / \text{g cm}^{-3}$	Vlačna čvrstoća, $R_m /$ MPa	Modul elastičnosti, $E / \text{GPa}$	Specifična čvrstoća, $R_m/\rho /$ $\text{MPa cm}^3 \text{ g}^{-1}$	Specifični modul elastičnosti, $E/\rho /$ $\text{GPa cm}^3 \text{ g}^{-1}$
Čelik	7,8	1300	200	167	26
Aluminij	2,81	350	73	124	26
Titanij	4	900	108	204	25
E-staklo	2,1	1100	75	524	21,5
Aramid	1,32	1400	45	1060	57
IM ugljičnim vlaknima ojačani kompoziti	1,51	2500	151	1656	100
HM ugljičnim vlaknima ojačani kompoziti	1,54	1550	212	1006	138

Visoke vrijednosti specifičnih mehaničkih svojstava ključne su za odabir materijala izrade dijelova natjecateljskih bolida jer osiguravaju proizvodnju elemenata snižene mase uz jednako povoljna mehanička svojstva za sigurnosnu i natjecateljsku funkcionalnost vozila. Zbog svoje učinkovitosti, kompoziti ojačani ugljičnim vlaknima danas čine gotovo 85 % sveukupnog volumena bolida Formule 1, ostvarujući svega 25 % masenog udjela u sveukupnoj masi vozila [10].





Slika 7. Ispitivanje vlačne čvrstoće stražnjeg krila [10]



Slika 8. Kompozitna prednja osovina bolida [13]

### 3.2.1.1. Prepreg i sendvič konstrukcije

Najčešći primjer postizanja povoljnijih svojstava manipulacijom odnosa ojačala i matrice su prepreg i sendvič-konstrukcije. Iako konstituenti takvih kompozita pojedinačno ne pružaju značajno bolja svojstva od konvencionalnih materijala, njihovom kombinacijom i određenim rasporedom postižu se znatno bolja svojstva.

Prepreg se prema [10] definira kao „široka traka utkanih ili poravnatih vlakana, impregniranih polimernom smolom“. Dobivene trake se potom slažu jedna na drugu i podvrgavaju toplinsko-tlačnim obradama, s ciljem formiranja trake povoljnijih svojstava. Takve se tanke i čvrste trake koriste kao vanjski slojevi za sendvič konstrukcije, čija je unutrašnjost ispunjena jezgrom u obliku, najčešće, pčelinjeg saća (engl. *Honeycomb core*). Prema (Slika 9), kod sendvič-konstrukcija vrijednosti svojstava savojne čvrstoće i krutosti rastu eksponencijalno s povećanjem debljine jezgre [10].

	ČISTI MATERIJAL	DEBLJINA JEZGRE = $t$	DEBLJINA JEZGRE = $3t$
KRUTOST	1.0	7.0	37.0
SAVOJNA ČVRSTOĆA	1.0	3.5	9.2
TEŽINA	1.0	1.03	1.06

Slika 9. Promjena svojstava sendvič-strukture kompozita u ovisnosti o debljini jezgre [10]



**Slika 10. Primjer sendvič-konstrukcije korištene za izradu prednjeg krila bolida Formule 1 [12]**

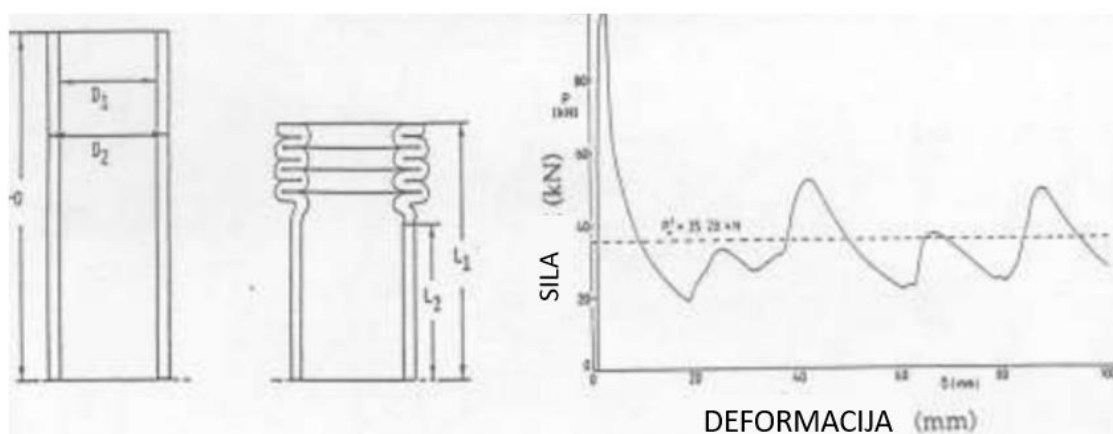
(Slika 10) Prikazuje primjer kompozitne sendvič-strukture s aluminijskom jezgrom povezanom složenim slojevima ugljičnih vlakana, što je ujedno i najčešće upotrebljavana kombinacija materijala u upotrebi kod konstrukcije dijelova bolida Formule 1. Problem koji se javlja kod konstruiranja elemenata je kompleksnost oblika uslijed uvjeta aerodinamičnosti bolida, pa se stoga postupak izvršava izradom manjih dijelova koji se naknadno montiraju u sklop [12].



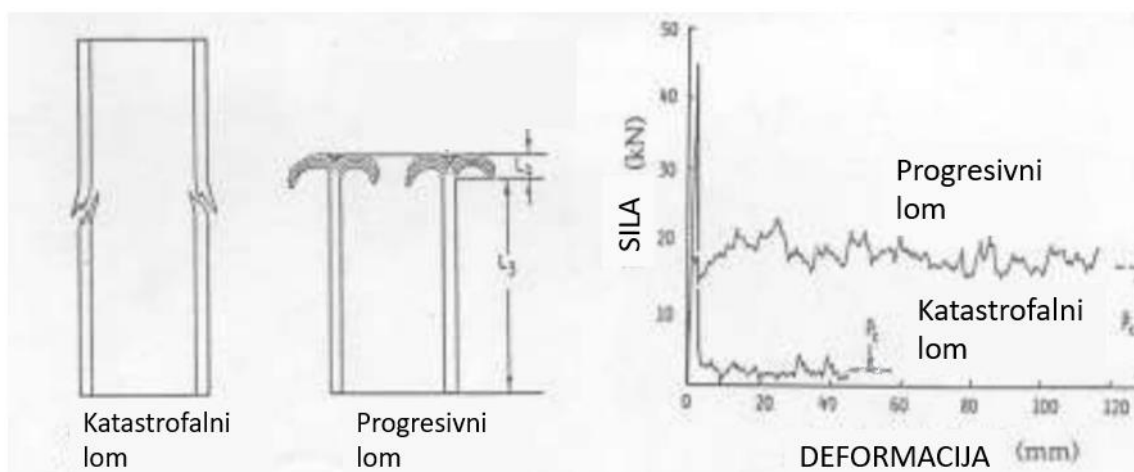
**Slika 11. Sklop „nosa“ bolida [12]**

### **3.2.1.2. Sigurnosne prednosti kompozitne strukture bolida**

Usporedbom grafičkih prikaza (Slika 12) i (Slika 13), očito je da kompozitni materijali pokazuju veća svojstva krutosti zbog kojih dolazi do krhkog loma za razliku od duktilnijih materijala poput metala. Pojava katastrofalnog loma, pri kojem se materijal u potpunosti strukturno raspada u trenutku dostizanja kritičnog naprezanja je, zbog iznimne krutosti i sposobnosti apsorpcije energije materijala, uvelike povoljnija za sigurnost vozača od plastične deformacije koja se događa prilikom izlaganja metalnih materijala istom naprezanju, što dokazuje i značajno manji broj smrtnih slučajeva u Formuli 1 od uvođenja kompozitnih struktura u bolide, unatoč činjenici da su se brzine bolida povećale u istom vremenskom razdoblju.



**Slika 12. Prikaz sposobnosti apsorpcije energije udara metalnih struktura [10]**



**Slika 13. Prikaz sposobnosti apsorpcije energije udara kompozitnih struktura [10]**

Sigurnosne specifikacije bolida osobito su napredovale implementacijom polimernih vlakana u pojedine elemente. Najznačajnija polimerna vlakna za upotrebu u bolidima Formule 1 su:

- poli(p-fenilen-2,6-benzobisoksazol), PBO (trgovački naziv „zylon“)
- aramidna vlakna (trgovački naziv „kevlar“)
- orijentirane polietilenske niti.



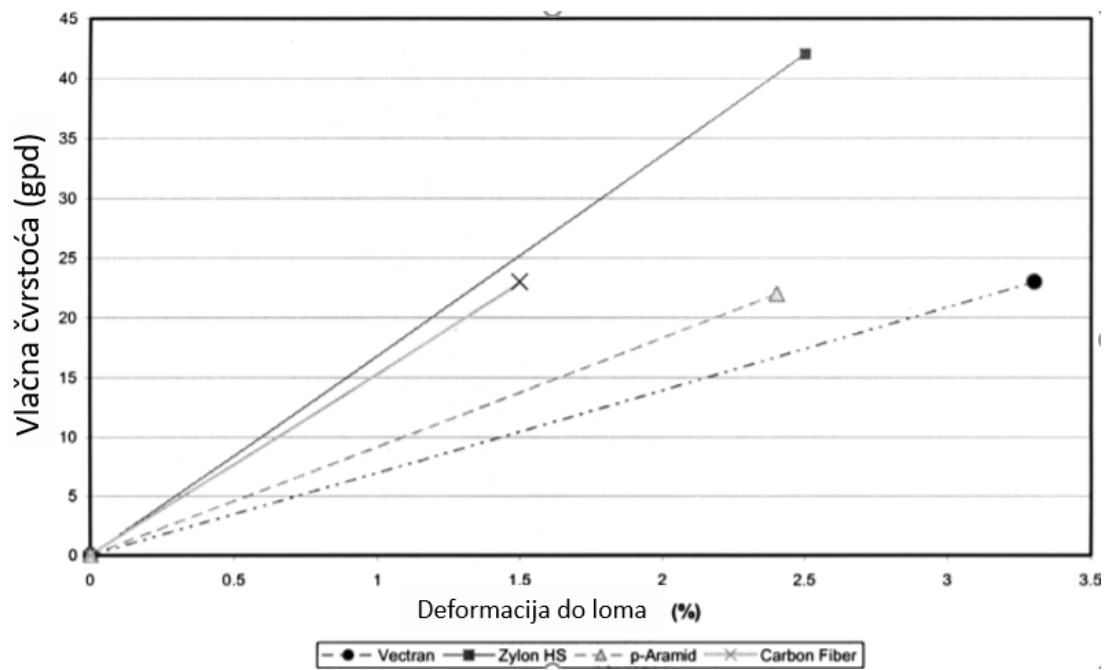
**Slika 14. Vlakna PBO [14]**

Iako se sve tri navedene vrste polimernih vlakana mogu pronaći u različitim elementima bolida, za sigurnost vozača osobito je važan PBO. Japanski znanstvenici proizveli su PBO kao najčvršći vlaknasti materijal na svijetu, što je rezultiralo njegovom upotrebom u raznim primjenama sa zahtjevima visoke čvrstoće i toplinske otpornosti materijala, poput zaštitnih oplata s unutrašnje strane kokpita [14].

Karakteristična svojstva polimera PBO su [15]:

- iznimno visoka vlačna čvrstoća
- visok modul elastičnosti
- vatrootpornost
- otpornost razgradnji pri povišenim temperaturama (prikladan za radne temperature do 1450 °C).



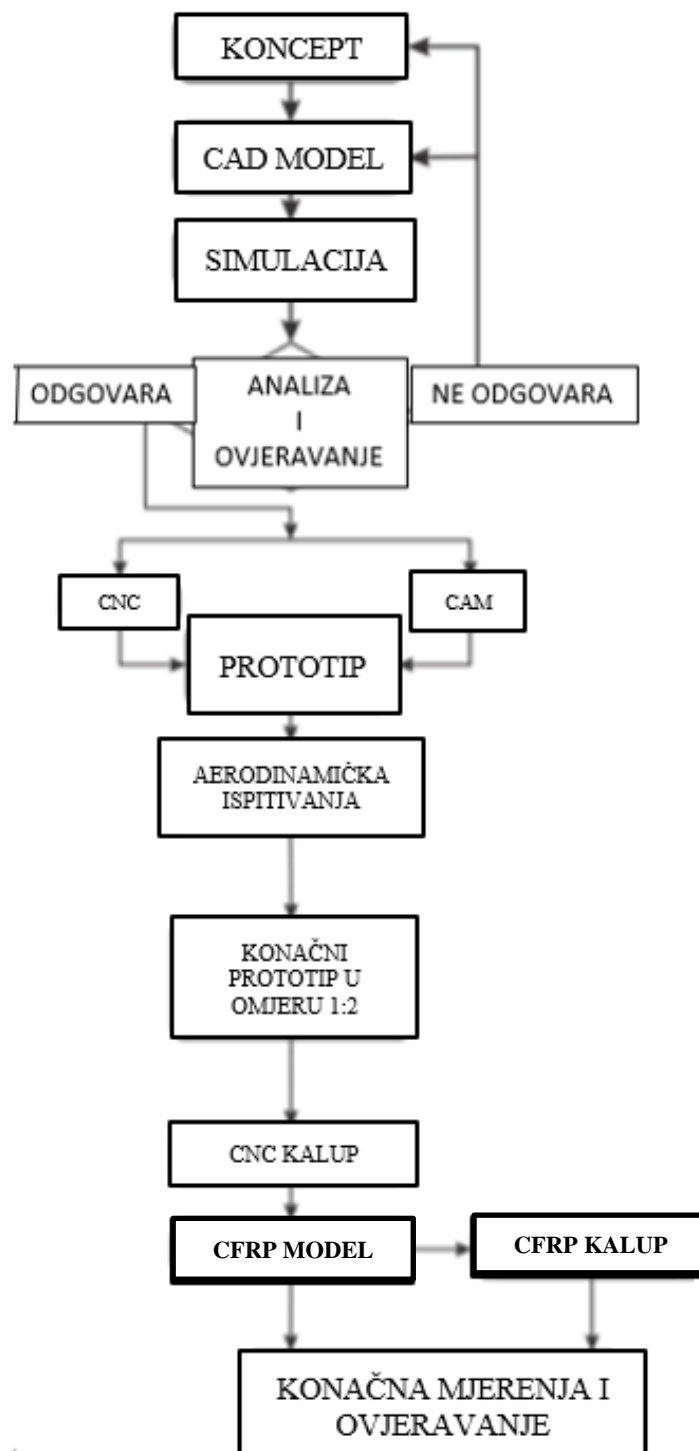


Slika 15. Grafički prikaz svojstava visokočvrstih vlaknastih materijala [15]



Slika 16. Zaštitna oplata od PBO u unutrašnjosti kokpita bolida [10]

### 3.3. Metodologija proizvodnje bolida Formule 1



Slika 17. Metodologija proizvodnje elemenata bolida [12]



Cjelokupni i složeni proces konstrukcije bolida mora se prilagoditi rigoroznim zahtjevima FIA-e, pri čemu se proizvodni postupci te primjena materijala u izradi bolida strogo nadziru, pazeći na klimatske učinke emisije izgaranja plinova iz motora, te potičući tehnološke inovacije kojima će se doći do održivih ekoloških, ali i ekonomski prihvatljivih rješenja. Problem financijske neodgovornosti i neravnomjerne raspodjele financijske moći među ekipama FIA je riješila prilagodbom regulacija o potrošnji kojom se potiče kompetitivnost financijski inferiornijih ekipa. [16]

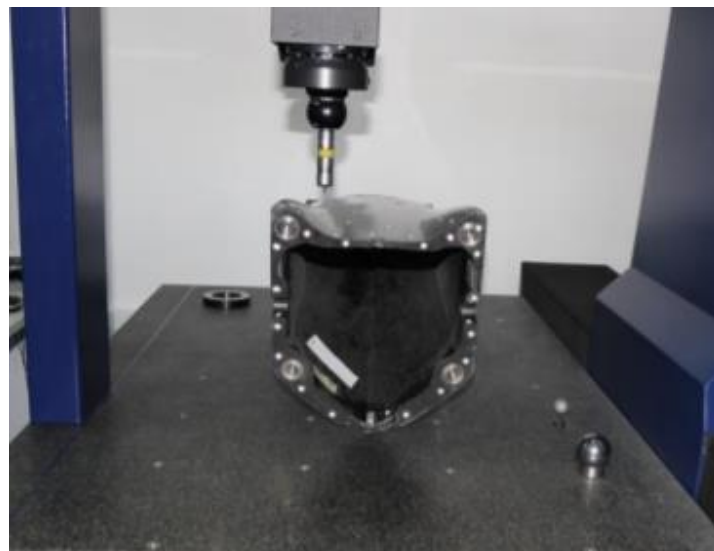
Konstrukcija bolida Formule 1 započinje procesom projektiranja pojedinačnih elemenata koji se naknadno montiraju u sklopove, u konačnici rezultirajući bolidom. Prema (Slika 17), proces počinje od konceptualne ideje koja u obliku CAD-modela prolazi odgovarajuće simulacije. Na temelju dobivenih rezultata se zaključuje o prihvatljivosti koncepta, a potom slijedi dorađivanje nedostataka početnog koncepta ili biranje postupka proizvodnje, ovisno o rezultatima analize. Postupci proizvodnje elemenata bolida su [12]:

- CNC-postupcima – kratko trajanje proizvodnje, povoljna dimenzijska preciznost prototipa
- CAM-tehnologija – SLS, FDM, SLA ili PolyJet-tehnologija.

Oba postupka proizvodnje uključuju proizvodnju polimernog prototipa koji se potom podvrgava ispitivanju aerodinamičnosti u zračnim tunelima. Zatim se kalupljenjem proizvodi konačan prototip od CFRP kompozitnog materijala koji će biti korišten u eksploataciji. Posljednji korak uključuje konačna mjerenja i ovjeravanje elemenata koji zadovoljavaju željene rezultate za upotrebu, koristeći metode laserskog skeniranja i CMM-uređaja za mjerenje koordinata (engl. *Coordinate Measuring Machine*), kako bi se odredilo dimenzijsko odstupanje dobivenih prototipa u odnosu na početni CAD-model [12].



**Slika 18. CNC-uređaj za oblikovanje kalupa [10]**



**Slika 19. Prikupljanje točaka dodirnom sondom CMM-uređaja [12]**

## 4. EKOLOŠKA PRIHVATLJIVOST CFRP-A

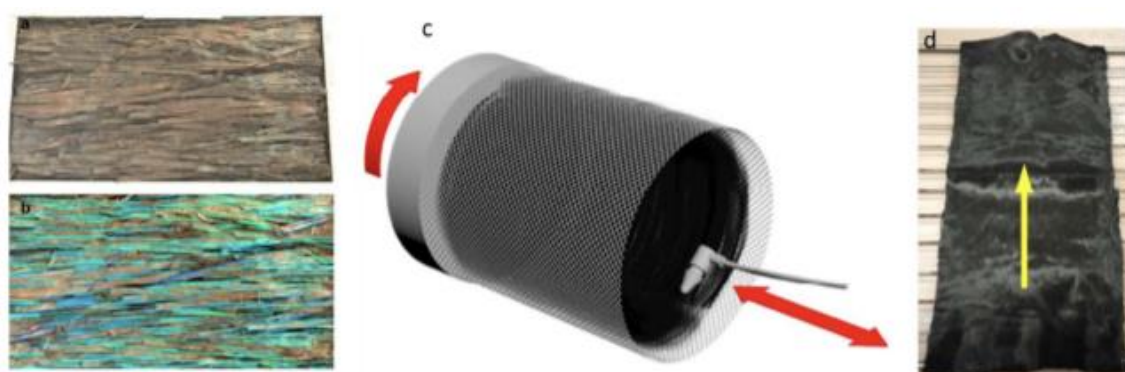
### 4.1. Postupci recikliranja materijala u bolidima Formule 1

Sve češća upotreba kompozitnih materijala u brojnim svjetskim industrijama današnjice nametnula je obavezu recikliranja otpadnog kompozitnog materijala kao osnovnog uvjeta održivosti. Dok je primarni interes pri upotrebi kompozitnih materijala u pojedinim granama industrije masovna proizvodnja i maksimalno ostvariv profit, druge industrijske grane, poput sportske ili zrakoplovne, se baziraju na učinkovitosti materijala u postizanju optimalnih performansi bez obzira na financijsko opterećenje. No, između ostalog, zbog predstavljenih ideja Programom održivog razvoja do 2030. godine, izraženija svijest o značaju recikliranja dospjela je i u tvornice Formule 1 putem FIA-ine inicijative „Nulta stopa emisije CO<sub>2</sub>“.

„Pretvaranje otpada od ugljičnim vlaknima ojačanih kompozita u dragocjeni resurs i zatvaranje petlje u njihovom životnom ciklusu od vitalnog je značaja za daljnju upotrebu takvog materijala u nekim primjenama.“ [17]

S obzirom na značajnu količinu otpada koja se stvara kao posljedica čestih sudara prilikom utrka, iterativnih postupaka testiranja i ispitivanja pri konstrukciji samih bolida, izrade novih bolida svake sezone, kao i obavezne zamjene bolida nakon prijeđenih 15000 km, recikliranje materijala je nužno za održivost u Formuli 1. Međutim, problem recikliranja u Formuli 1 leži u visokoj zastupljenosti CFRP-kompozita u konstrukciji bolida, koje po svojim svojstvima nije jednostavno reciklirati. Upravo karakteristična upotreba duromernih smola kao matričnog materijala u CFRP-kompozitima znatno otežava postupak ekstrakcije ugljičnih vlakana, o kojem ovisi obnovljivost takvih materijala.

(Slika 21), (Slika 20) prikazuju životni ciklus CFRP-kompozita, kao i postupak ekstrakcije ugljičnih vlakana.



Slika 20. Postupak rekonstrukcije prostirke od ugljičnih vlakana [17]



Slika 21. Shematski prikaz životnog ciklusa CFRP-kompozita [17]

(Slika 20) prikazuje postupak kojim se recikliraju ugljična vlakna iz nekog otpadnog materijala. Prvo se provodi izlučivanje ugljičnih vlakana (prikazano zelenom bojom na slici pod b)), a potom se izlučena vlakna stavljaju u rotirajući cilindar i ponovno se rekonstruira prostirka. Ispitivanja su ukazala na značajne nedostatke u vidu nepovoljnih mehaničkih svojstava recikliranih vlakana kod ovakvog postupka recikliranja, pa je on primjenjiv samo u eksploatacijskim uvjetima koji ne zahtijevaju znatno izraženu potrebu za visokom vlačnom čvrstoćom i krutošću materijala.

Postupci recikliranja CFRP-kompozita dijele se na [17]:

- mehaničke postupke recikliranja
- kemijske postupke recikliranja
- toplinske postupke recikliranja.

#### **4.1.1. Mehaničko recikliranje**

Postupci kod mehaničke metode recikliranja su [17]:

- mljevenje
- drobljenje
- usitnjavanje.

Postupak se vrši obradom otpadnog materijala nekom od navedenih tehnologija s ciljem dobivanja sitnih čestica. Konstituenti dobivene heterogene smjese od polimernih, ugljičnih i čestica smole se potom segregiraju i pripremaju za ponovnu upotrebu [17].

Prednosti mehaničkog recikliranja [17] :

- sposobnost izdvajanja vlakana i smole bez upotrebe ili stvaranja štetnih nusprodukata
- iznimno učinkovito za recikliranje staklenim vlaknima ojačanih kompozita.

Nedostatci mehaničkog recikliranja [17] :

- otežana integracija produkata recikliranja u nove primjene kombinirane s duromernim smolama
- značajna degradacija mehaničkih svojstava produkata recikliranja.



**Slika 22. Drobilica MAS1 Wittman [18]**

#### 4.1.2. Toplinsko recikliranje

Tehnologije u upotrebi kod toplinskog postupka recikliranja polimernih kompozita su [18]:

- piroliza
- izgaranje u fluidiziranom sloju.

Postupci funkcioniraju na principu upotrebe visokih temperatura i fluida za razgradnju matričnog materijala (smole) s ciljem očuvanja što povoljnijih mehaničkih svojstava ojačala (ugljičnih vlakana) za ponovnu upotrebu.

Piroliza je jedini postupak toplinskog recikliranja u komercijalnoj upotrebi zbog karakteristične održivosti i primjenjivosti. Prema [18]: „piroliza je proces toplinske razgradnje koji se provodi u atmosferi bez prisustva kisika kod koje se kompozit zagrijava na temperaturu između 400 °C i 1000 °C, što omogućava uporabu ugljičnih vlakana visokog modula elastičnosti koja zadržavaju 50 do 85 % vlačne čvrstoće u odnosu na ugljična vlakna u izvornom obliku“.

Prednosti pirolize su [17]:

- sposobnost uporabe ugljičnih vlakana povoljnih mehaničkih svojstava za ponovnu upotrebu
- jednostavan postupak razgradnje matričnog materijala i izdvajanja ojačala.

Nedostatci pirolize su [17]:

- previsoka temperatura procesa može nepovoljno utjecati na mehanička svojstva reciklata.

Postupak izgaranja u fluidiziranom sloju je i dalje u postupku razvoja te nije prisutan u praktičnoj primjeni. Značajne prisutnosti štetnih plinova i organskih otapala uz veliku potrošnju energije čine ovaj postupak ne samo ekološki neprihvatljivim, već i moguće opasnim po zdravlje osoblja koje ga izvršavaju [18].

#### 4.1.3. *Kemijsko recikliranje*

Postupak kemijskog recikliranja provodi se tehnološkom metodom solvolize, odnosno upotrebom otapala za razgradnju duromerne matrice i izlučivanja ojačala za ponovnu upotrebu. Mogućnost podešavanja parametara, poput temperature, tlaka i vrste otapala, omogućava primjenu metode za razne zahtjeve.

Otapala u primjeni kod solvolize su [18]:

- voda
- etanol
- kalijev hidroksid
- aceton
- metanol.

Kemijsko recikliranje je postupak koji se rijetko provodi u Formuli 1 s obzirom na osjetljivost postupka na metalne konstituente koji su osnovni element sendvič konstrukcija u bolidima [17].

Prednosti solvolize su [17], [18]:

- čisti i kvalitetni reciklat (produkt recikliranja)
- niže radne temperature u odnosu na pirolizu
- mogućnost upotrebe ekološki prihvatljivih otapala (voda, alkohol).

Nedostatci solvolize su [17], [18]:

- situacijski izazvana upotreba ekološki zagađujućih otapala i kemikalija
- skupa oprema sa zahtjevima otpornosti na koroziju pri povišenim temperaturama
- osjetljivost postupka na metalne konstituente kompozita ograničavaju njegovu primjenu.

#### 4.2. Održivost recikliranja materijala u Formuli 1

Zbog značajnog štetnog utjecaja na okoliš i nemogućnosti postizanja jednako povoljnih mehaničkih svojstava pri recikliranju CFRP materijala, kao što prikazuje (Tablica 3), postavlja se pitanje održivosti i isplativosti samih postupaka recikliranja, s obzirom da se može argumentirati kako se ostvaruje veća kolateralna šteta za čovječanstvo od koristi za određeni poslovni entitet.

Prema [18]: „Otprilike 40 % otpadnog CFRP materijala generira se u stadiju proizvodnje“. Upravo iz tog razloga se javlja potreba za razvojem novih, unaprijeđenih postupaka recikliranja za dobivanje reciklata povoljnijih mehaničkih svojstava. Također, javlja se potreba za razvojem potpuno recikličnih kompozitnih materijala na osnovi prirodnih vlakana i biorazgradivih smola, čijom bi se implementacijom u bolidu postigla održiva, „zelena“ proizvodnja bez štetnih nusprodukata [18].

Strogi zahtjevi mehaničkih svojstava predstavljaju razlog zbog kojeg je supstitucijska upotreba takvih materijala, umjesto ugljičnim vlaknima ojačanih kompozita, u bolidima Formule 1 trenutno onemogućena. Inicijativom „nulta stopa emisije ugljikovog dioksida“ pokrenuta su intenzivna istraživanja s ciljem razvoja upravo takvog materijala koji bi omogućio eliminaciju upotrebe ugljičnih vlakana, istovremeno osiguravajući zadovoljavanje zahtjeva iznimnih mehaničkih svojstava. Pritom se osobite nade polažu u razvoj razgradivih duromera i plastomera niske viskoznosti.

**Tablica 3. Usporedba svojstava CFRP-a prije i nakon recikliranja pirolizom [19]**

Materijal	Modul elastičnosti, $E$ / GPa	Vlačna čvrstoća, $R_m$ / MPa	Istezljivost, $A$ / %
CFRP u izvornom obliku	65,9	731	1,11
CFRP s recikliranim vlaknima	52	614	0,89
CFRP s dvaput recikliranim vlaknima	40,4	279	0,52



## 5. PERSPEKTIVA ODRŽIVOSTI U FORMULI 1

### 5.1. Formula E kao predstavnik ekološki prihvatljivog natjecanja

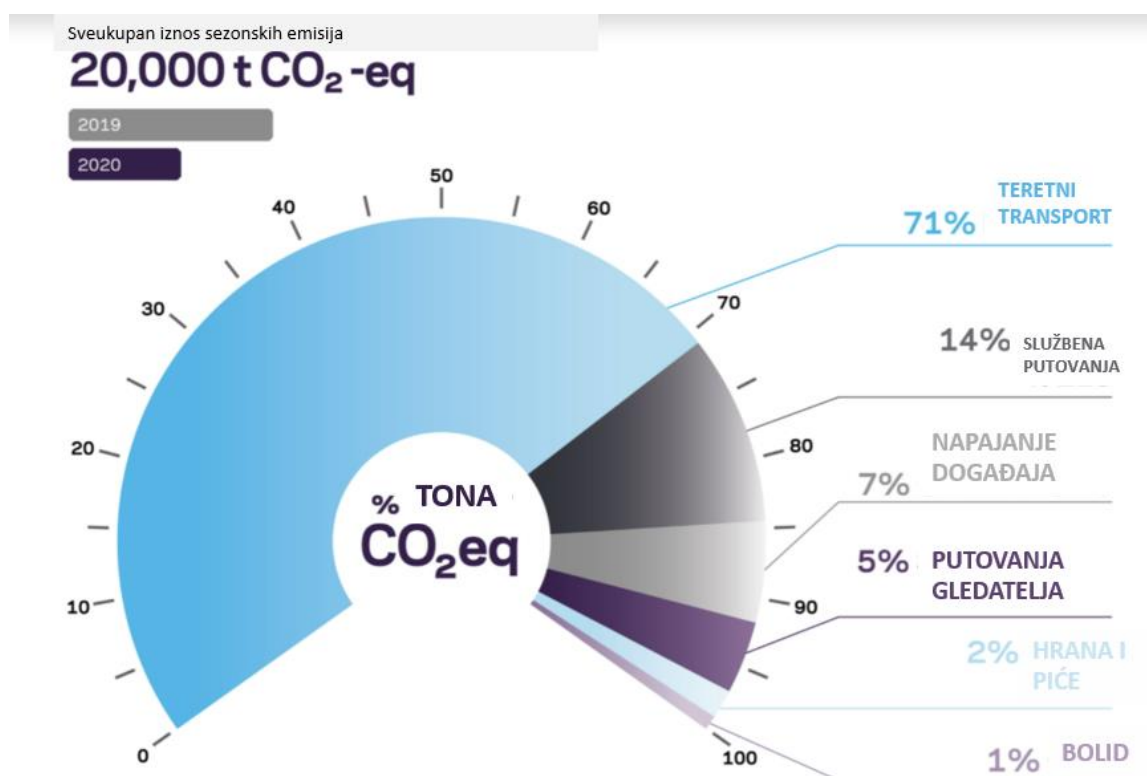
Formula E je natjecanje isključivo električno pogonjenih bolida pokrenuto 2015. u svrhu promocije i razvoja ekološki i društveno održivijih oblika transporta. Brojne, ali ne i sve, ekipe Formule 1 imaju svoj ogranak tima koji je vezan isključivo uz rast i razvoj Formule E, koja ujedno služi i kao svojevrsni „pokusni kunić“ za inovacije i nove materijale koji pokazuju potencijal za implementaciju u bolide Formule 1 [20].

Ključna razlika Formule E u odnosu na ostale vrste sportskog utrkivanja leži u električnom pogonu, koji u odnosu na benzin omogućava nultu stopu emisija CO<sub>2</sub>. Naglasak na održivost u Formuli E odražava se kroz konstantnu optimizaciju logistike i transporta, razvoj tehnologija za recikliranje dijelova litij-ionskih baterija te ukidanje polimerne ambalaže za jednokratnu upotrebu na događajima. Doprinos održivosti natjecanja ostvaren je i eliminacijom PVC-a iz reklamnih panela postavljenih uzduž natjecateljske trake, s ciljem promocije smanjenja polimernog otpada. Novi reklamni paneli proizvedeni su od polipropilena s posebno prilagođenim ljepilom, drastično reducirajući utjecaj polimernog otpada na okoliš zbog mogućnosti jednostavnog recikliranja polipropilena [21].

„Težnja Prvenstva za održivim djelovanjem dovela je do toga da je Formula E postala prva i jedina kategorija u moto-sportu koja je dobila certifikat ISO 20121 – međunarodni standard za održivost na događajima.“ [21]



Slika 23. Bolid Formule E i polipropilenski reklamni paneli [21]



Slika 24. Udio emisija ekvivalenta ugljikovog dioksida po kilogramu za različite segmente natjecanja [21]

Kada je riječ o moto-sportu, najznačajniji iskorak održivosti ostvaren je između sezona 2018./2019. i 2019./2020. Formule E, kada je zabilježeno smanjenje emisija ugljikovog dioksida sveukupnog natjecanja za 55 %, i to osobito u određenim segmentima održavanja događaja koji uključuju [21]:

- teretni transport – na način da se prednost da kopnenom, pomorskom i željezničkom transportu nad zračnim, koji se koristi za transport isključivo ključnih elemenata za održavanje događaja.
- opskrbu – organizacija opskrbe u lokalnim mjestima odvijanja događaja.
- privatni transport – zbog nedostatka javnih parkirališta na događajima promovira se upotreba javnog prijevoza.
- otpad – eliminacija jednokratnih polimernih posuda i upotreba razgradivih.

Treba ipak napomenuti kako je izbijanje pandemije COVID-19 uvelike pridonijelo ovako drastičnom padu emisija, s obzirom na ograničavajuće mjere sigurnosti zbog kojih su se natjecanja održavala na manje lokacija i bez gledatelja.

## 5.2. „Zeleni“ kompoziti

Sagledavanjem štetnog utjecaja na okoliš i kompleksnog procesa recikliranja polimernih kompozitnih struktura bolida Formule 1, postavlja se pitanje o mogućnosti alternativnog izbora materijala. Popularan trend zamjene elemenata od staklenim vlaknima ojačanog polimernog kompozita zelenim kompozitima zabilježen je u automobilske industriji, gdje Direktiva o otpadnim vozilima 2000/53/EZ Europskog parlamenta i Vijeća, nalaže da barem 95 % mase vozila za komercijalnu upotrebu proizvedenih nakon 2015. godine mora biti ponovno uporabljivo i/ili oporabljivo [22].

Zeleni kompoziti su materijali sastavljeni od ojačala u obliku prirodnih vlakana (juta, lan, sisal, konoplja, ramija i sl.) i biorazgradivog matičnog materijala (smole na biljnoj bazi). Primjer njihove implementacije u automobilske industriji su pjene za sjedala na bazi soje u Toyotinim modelima Matrix i RAV iz 2008. godine. Iako mehanička svojstva zelenih (kao i svih ostalih) kompozita uvelike ovise o rasporedu konstituenata i načinu proizvodnje, nedostatak ispitivanja i istraživanja mehaničkih svojstava zelenih kompozita otežavaju usporedbu s materijalima u

konvencionalnoj upotrebi. Međutim, svojstva konstituenata itekako su poznata i usporediva s karakterističnim ugljičnim vlaknima i umjetnim smolama Formule 1 [22].

S prikaza (Tablica 4), jasno se očituje superiornost mehaničkih svojstava ugljičnih vlakana nad svojstvima prirodnih vlakana. Iako im je iznos gustoće nešto niži od ugljičnih vlakana, a posljedično tome i masa izrađenih dijelova, svojstva od krucijalnog značaja poput vlačne čvrstoće i modula elastičnosti ipak su značajno povoljnija kod ugljičnih vlakana. Shodno tome možemo prokomentirati osnovne prednosti i nedostatke vlakana i smola na prirodnoj bazi [22].

Prednosti vlakana na prirodnoj bazi su [22]:

- niska gustoća
- osrednja čvrstoća i krutost
- obnovljivost i ekološka prihvatljivost
- niska cijena.

Nedostatci vlakana na prirodnoj bazi [22] :

- neujednačenost svojstava – brojni utjecajni faktori poput: zrelosti biljke u trenutku žetve, dijela biljke s kojeg se vade vlakna (list, stabljika), načina žetve...
- loša kompatibilnost s polimernim matricama
- ograničena toplinska stabilnost – mehanička degradacija i volumno smanjivanje vlakana iznad 200 °C.

Prednosti matrica na biljnoj bazi [22] :

- razgradive su
- ujednačenost svojstava – postojeća kontrolirana proizvodnja u drugim granama industrije.

Nedostatci matrica na biljnoj bazi [22]:

- visoka cijena – polilaktična smola kao najjeftiniji predstavnik smola na biljnoj bazi je 1,5 puta skuplja u odnosu na često korištenu sintetičku polipropilensku matricu.
- niža čvrstoća
- visoka propusnost plinova
- niska viskoznost taline – otežano oblikovanje u proizvodnji.

Može se zaključiti kako vlakna i smole imaju svoje komparativne prednosti i nedostatke.

**Tablica 4. Usporedba mehaničkih svojstava prirodnih vlakana u odnosu na ugljična [10], [22]**

Vlakno	Promjer vlakna, $d / \mu\text{m}$	Gustoća, $\rho / \text{g cm}^{-3}$	Vlačna čvrstoća, $R_m / \text{MPa}$	Modul elastičnosti, $E / \text{GPa}$	Prosječna specifična čvrstoća, $R_m/\rho / \text{MPa cm}^3 \text{g}^{-1}$
Lan	40 – 600	1,5	345 – 1500	27 – 39	600
Konoplja	25 – 250	1,47	550 – 900	38 – 70	455
Juta	25 – 250	1,49	393 – 800	13 – 26,5	400
Sisal	50 – 200	1,45	468 – 700	9,4 – 22	400
Ramija	0,049	1,6	400 – 938	61,4 – 128	420
E-staklo	15 – 25	2,55	2000 – 3500	70 – 73	1100
Ugljična vlakna srednjeg modula elastičnosti	4,5 – 5	1,8	5490 – 6370	294	3250

Iako je motiv zamjene materijala u automobilskoj industriji ekološki prihvatljivijim materijalima od vlakana i smola na prirodnoj bazi dodatno potenciran ostvarivim poboljšanjima performansi automobila putem značajnog smanjenja mase u odnosu na čelične i aluminijske elemente, njihova implementacija u bolide Formule 1 je otežana upravo zbog negativnog utjecaja na performanse. U odnosu na manje stroge uvjete kod izrade strukturnih dijelova konvencionalnih automobila, poput otpornosti na vanjske utjecaje ili na udarno opterećenje, u Formuli 1 ekstremno visoka kritična naprezanja uvjetuju značajniju strukturnu stabilnost, a i smanjenje mase je upitno s obzirom na već poznata povoljna svojstva gustoće CFRP-a. Zbog svega navedenog, trenutno su mali izgledi da će do zamjene ovim ekološki prihvatljivijim materijalima u svijetu Formule 1 uskoro doći.

## 6. ZAKLJUČAK

Temelji simbioze čovjeka i prirode leže u idejama održivog razvoja, a njihov se značaj odražava kroz unaprjeđenja društvenog, ekonomskog i ekološkog aspekta života. Inkluzija organizacija i pojedinaca diljem svijeta je imperativ postizanja vidljivih rezultata, pa su stoga i inicijative održivosti zasnovane na partnerstvu i zajedništvu s jednim ciljem – osiguranje trenutne i buduće kvalitete života na Zemlji.

Materijali su sastavni dio sportske industrije i njihov razvoj direktno utječe na razvoj sporta. Formula 1 je sport u kojem su napredak i razvoj materijala od ključnog značaja za natjecateljske i sigurnosne performanse bolida, i često odlučujući faktor po pitanju sigurnosti i uspješnosti vozača. Iako se uslijed zahtjevnog postupka recikliranja CFRP-a, koji su temeljni konstituent strukturnih dijelova natjecateljskih bolida, javlja potreba za pronalaskom i razvojem alternativnog rješenja potpuno obnovljive prirode, nepovoljnija mehanička svojstva „zelenih“ materijala prouzročila bi narušavanje sigurnosti ovog sporta, te se stoga njihova implementacija u bolide za sada ne čini izglednom. Ekološki prihvatljivi materijali zasigurno su područje vrijedno daljnjeg istraživanja i razvoja, ali u sportu Formule 1 naglasak održivosti je ipak na unaprjeđenju trenutno korištenih materijala i sustava, baziranih na kompozitnim materijalima ojačanim ugljičnim vlaknima.

Posljedično pandemiji COVID-19, privremeno su ostvareni povoljniji rezultati održivosti, no realnost je nešto drugačija. Kada su u pitanju segmenti poput recikliranja osnovnih dijelova bolida, emisija štetnih plinova i financijskog opterećenja, unatoč očiglednim dobrim namjerama, održivost razvoja Formule 1 još uvijek je upitna.

## LITERATURA

- [1] Keiner M. History, definition(s) and models of sustainable development. ETH Zürich , Switzerland. doi. 10.3929/ethz-a-004995678.
- [2] Gabrić I., Šitić S. Materijali 1 , Sveučilište u Splitu, Sveučilišni odjel za stručne studije; 2012.
- [3] Gudelj I. Ciljevi održivog razvoja - provedba na globalnoj razini i provedbeni status u Republici Hrvatskoj. Hrvatske vode. 2019; 27(109):245-251
- [4] Ružić M. Ciljevi održivog razvoja, Info Centar Mogućnosti <https://icm-mogucnosti.info/ciljevi-odrzivog-razvoja/> (29. 12. 2021.)
- [5] Urbanex d.o.o. Lokalni plan provedbe Agende 2030 za održivi razvoj, Grad Split; 2019. [https://www.split.hr/DesktopModules/Bring2mind/DMX/API/Entries/Download?language=hr-HR&Command=Core\\_Download&EntryId=6078&PortalId=0](https://www.split.hr/DesktopModules/Bring2mind/DMX/API/Entries/Download?language=hr-HR&Command=Core_Download&EntryId=6078&PortalId=0) (6. 1. 2022.)
- [6] FIA Environment and Sustainability Commission, FIA Environmental Strategy 2020-2030 Summary, <https://corp.formula1.com/fia-introduces-sustainable-fuel-into-formula-1-and-commits-to-becoming-carbon-neutral-from-2021-and-net-zero-by-2030/> (6. 1. 2022.)
- [7] Wallace B. The 100 most influential people of 2020 : Lewis Hamilton , Time, SAD; 2020. <https://time.com/collection/100-most-influential-people-2020/5888433/lewis-hamilton/> (10. 1. 2022.)
- [8] Buterin T, Doričić R, Eterović I, Muzur A, Šantić M. Javnozdravstvena perspektiva utjecaja industrijskog onečišćenja na globalno zatopljenje i pojavnost zoonoza. Sveučilište u Rijeci, Medicinski fakultet. 2021. doi. 10.31298/sl.145.1-2.6.
- [9] Mourao P. R. Smoking Gentlemen – How Formula One Has Controlled CO<sub>2</sub> Emissions. Sveučilište u Bragi, Portugal; 2018. doi:10.3390/su10061841
- [10] Savage G. Composite Materials Technology in Formula 1 Motor Racing, Oxford Brookes University, United Kingdom; 2008 <http://f1-forecast.com/pdf/F1-Files/Composite%20Materials%20Technology%20in%20Formula%201%20Motor%20Racing.pdf> (9. 2. 2022.)

- [11] Fédération Internationale de l'Automobile, Formula 1 Technical Regulations; 2022 [https://www.fia.com/sites/default/files/formula\\_1\\_-\\_technical\\_regulations\\_-\\_2022\\_-\\_iss\\_8\\_-\\_2021-12-15.pdf](https://www.fia.com/sites/default/files/formula_1_-_technical_regulations_-_2022_-_iss_8_-_2021-12-15.pdf) (9. 2. 2022.)
- [12] Bere P., Neamtu C. Design and manufacturing methodology for F1 nose car. 2014 International Conference on Production Research – Regional Conference Africa, Europe and the Middle East 3rd International Conference on Quality and Innovation in Engineering and Management; 2014 , Cluj, Rumunjska
- [13] De Groote S. Alfa adds fins around S-duct, F1 Technical; 2019. <https://www.f1technical.net/development/> (10. 2. 2022.)
- [14] SEAS, Zylon, Technical F1 dictionary, <http://www.formula1-dictionary.net/index.html> (12. 2. 2022.)
- [15] Seely L., Zimmerman M., McLaughlin J. The use of Zylon fibers in ULDB tendons , Advances in Space Research , Sulphur Springs ; 2003. doi.10.1016/j.asr.2003.07.046.
- [16] Fédération Internationale de l'Automobile, Formula 1 Financial Regulations; 2022 [https://www.fia.com/sites/default/files/formula\\_1\\_-\\_financial\\_regulations\\_-\\_iss\\_9\\_-\\_2022-02-18.pdf](https://www.fia.com/sites/default/files/formula_1_-_financial_regulations_-_iss_9_-_2022-02-18.pdf) (19. 2. 2022.)
- [17] Borjan D, Knez Ž., Knez M. Recycling of Carbon Fiber Reinforced Composites— Difficulties and Future Perspectives. Materials 2021, 14, 4191. doi. 10.3390/ma14154191.
- [18] Zhang J, Chevali VS, Wang H, Wang C-H. Current status of carbon fibre and carbon fibre composites recycling, Composites Part B; 2020, doi. 10.1016/j.compositesb.2020.108053
- [19] Longana ML, Ong N, Yu HN, Potter KD. Multiple closed loop recycling of carbon fibre composites with the HiPerDiF method, Composite Structures. 2016;153:271-277. doi. 10.1016/j.compstruct.2016.06.018.
- [20] Robeers T, Van Den Bulck H. Towards an Understanding of Side-Lining Environmental Sustainability in Formula E: Traditional Values and the Emergence of eSports, Athens Journal of Sport ; 2018, doi. 10.30958/ajspo.5-4-7.
- [21] Fédération Internationale de l'Automobile, Race For Better Futures, Season Six Sustainability Report; 2020. <https://f.fiaformulae.com/r/sustainability/FE->



[Sustainability-Report-S6.pdf?\\_ga=2.85825305.1858536874.1632134762-937318176.1627304743](#) (19. 2. 2022.)

- [22] Koronis G, Silva A, Fontul M. Green composites: A review of adequate materials for automotive applications, *Composites: Part B*; 2013. doi. 10.1016/j.compositesb.2012.07.004.