

**Факултет инжењерских наука
Универзитета у Крагујевцу**



Назив студијског програма: Аутомобилско инжењерство

Назив студија: Основне академске студије

Предмет: Основе динамике моторних возила

Број индекса: 811/2013

Марко Д. Митић

**Анализа стабилности возила при дејству
бочног ветра и утицај аеродинамике на
возила високих перформанси
завршни рад**

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Александра Јанковић - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да анализира:

- Утицај бочног ветра на стабилност возила,
- Утицај аеродинамике на возила високих перформанси.

Препоручена литература:

[1] Hucho, W.-H. „Aerodynamics of Road vehicles“. Federal Republic of Germany, December 1986.

[2] Larrabee, E., „Aerodynamics of road vehicle or aerodynamics as an annoyance“. Second AIAA Symposium: The Aerodynamics of Sports and Competition Cars, Los Angeles, May 1974.

[3] Sorgatz, U., Buchheim, R., 'Untersuchungen zum Seitenwindverhalten zukünftiger Fahrzeuge'. *ATZ*, 84, 1982, pp 11-18.

Крагујевац, датум

1. септембар 2016.

ментор:

Др Александра Јанковић

Резиме

При кретању, на отвореном путу, возило је изложено разним силама и моментима који се супродстављају његовом кретању. Бочни ветар својим деловањем на возило резултује проклизавање точкова и губитка стабилности које доводи до одступања возила од жељеног правца кретања. У зависности од категорије поделе, аеродинамика возила има битну улогу када су у питању возила високих перформанси, од њих се очекује обезбеђивање максималних перформанси у погледу убрзања, максималне брзине, кочења, стабилности и управљања. У раду ће се говорити о стабилности возила при дејству бочног ветра и утицај аеродинамике на возила високих перформанси.

Кључне речи: *аеродинамика, отпор ваздуха, бочни уради ветра, возила високих перформанси*

Summary

While moving on the open road, vehicle is exposed to various forces and moments, which opposes its movements. While acting on a vehicle, side-wind resulting in wheel spin and loss of stability which leads to deviations from the desired vehicle direction. Depending on the category of vehicle, aerodynamics has an important role when it comes to high-performance vehicles, they are expected to ensure the maximum performanse in terms of acceleration, top speed, braking, stability and driving control. In this work will be discussed about the stability of the vehicle while exposed to the side-wind effect and aerodynamic infuence on high-performance vehicles.

Key words: *aerodynamic, drag, side-wind effects, high-performance vehicles*

САДРЖАЈ

1. Ознаке.....	6
2. Улога и значај аеродинамике возила.....	7
3. Стабилност возила при дејству бочног ветра.....	9
3.1 Увод.....	9
3.2 Силе и моменти на возилу.....	10
3.2.1 Природни ветар.....	10
3.2.2 Аеродинамична стабилност.....	11
3.3 Проблеми бочног ветра у саобраћају.....	14
3.3.1 Саобраћајнице, заштитници од ветрова.....	14
3.3.2 Природни и вештачки бочни удари ветра.....	15
3.4 Утицај бочних ветрова на динамику возила.....	16
3.5 Утицај аеродинамичких сила на бочно скретање.....	18
3.6 Безбедносна граница.....	20
4. Возила високих перформанси.....	22
4.1 Увод.....	22
4.2 Историјски развој.....	26
4.3 Утицајни фактори конструкције на аеродинамичност возила високих перформанси.....	28
4.3.1 Отпор ваздуха.....	27
4.3.2 Управљивост.....	29
4.3.2.1 Тест вожње.....	29
4.3.2.2 Опструјавање.....	30
4.3.2.3 Хлађење и вентилација.....	31
4.4 Алтернативни утицајни фактори конструкције на аеродинамичност возила високих перформанси.....	32
4.4.1 Отпор ваздуха и сила узгона.....	32
4.4.2 Управљивост.....	35
4.4.3 Хлађење и вентилација.....	36
4.5 Посебни проблеми.....	37
4.5.1 Пролазно време и потрошња горива.....	37
4.5.2 Достизање брзине звука.....	37
4.5.3 Избачени точкови.....	38
4.5.4 Развојне методе и симулације.....	38
4.6 Будући трендови развоја возила високих перформанси.....	39
5. Закључак.....	40
Литература.....	41

1. Ознаке

I_{ZZ}	момент инерције око вертикалне осе
N	момент заокретања возила
S	бочна сила
Tu	ниво турболенције
U	брзина ветра
V	брзина вожње
V_S	брзина бочног ветра
Y	релативно бочно одступање
c_L	коефицијент силе узгона
c_N	коефицијент момента заокретања возила
c_S	коефицијент бочних сила
f_G	ниво опасности
l	дужина возила
x_D	раздаљина центра притиска
x_{DS}	раздаљина од центра притиска до тежишта возила
x_S	раздаљина тежишта возила
y_G	бочно одступање
β	угао заокретања возила
γ	угао клизања возила
S_F	бочна сила на предњој осовини возила
S_R	бочна сила на задњој осовини
c_M	коефицијент момента пливања

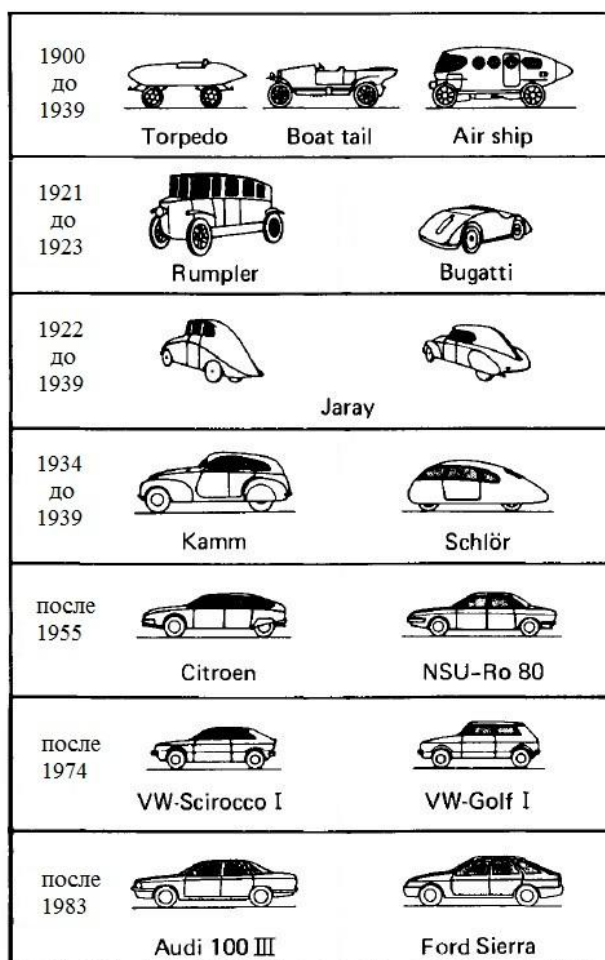
A	чеона (попечна) површина возила
L	међуосовинско растојање
L_F	узгон возила на предњој осовини
L_R	узгон возила на задњој осовини
M	Махов број (брзина звука $M=1$)
S	центрифугална сила
a_y	бочно убрзање
c_D	коефицијент отпора ваздуха
c_{LF}	коефицијент узгона на предњој осовини
c_{LR}	коефицијент узгона на задњој осовини
c_L	коефицијент узгона
c_{YM}	коефицијент момента заокретања
d	растојање између два возила
g	убрзање земљине теже
i	укупан однос заокретања точка
u	брзина протока ваздуха
β	угао заокретања возила
δ_{sw}	угао главе управљача
ζ	коефицијент растојања

2. Улога и значај аеродинамике возила

Аеродинамика возила има значајно место у развоју облика аутомобила и то са више аспеката: постизање веће динамичности возила, мање потрошње горива, повећање попречне стабилности возила, повећање безбедности при кочењу.

Аеродинамика третира кретање ваздушних струја по контурној површини опструјаваног објекта. Закони кретања ваздушних струја по контурним површинама су предмети изучавања механике флуида, тако да се аеродинамика возила базира на законима и релацијама познатим из механике флуида, тачније аеромеханике.

Значај аеродинамике за возило је уочен појавом прве каросерије, а нарочито је дошла до изражаја развојем мотора већих снага који су омогућавали постизање већих брзина. На слици 1 су дати облици аутомобила који илуструју развој каросерије у циљу смањења отпора опструјавања.

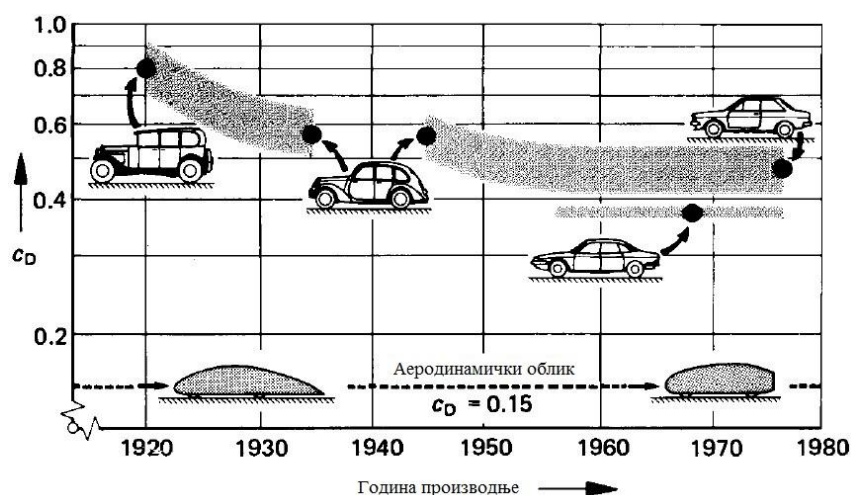


Слика 1 Историјски развој путничких аутомобила према [1]

Аеродинамички облик возила који је био подједнако прихватљив и са аспекта укупних димензија возила и са аспекта испоришћења простора је био проблем све до појаве резултата изстраживања групе аутора (W.E. Lay, E. Eveling, W. Kamm) који су решењем

облика задњег дела возила успели да постигну компромис између ова два захтева. Такозвани *Камт-ов* облик задњег дела возила представљен је релативно кратким и компактним задњим крајем возила.

У периоду нафтне кризе у свету (почетком седамдесетих година), с обзиром на везу између силе отпора ваздуха при кретању возила и потрошње горива, развој је био усмерен, пре свега, на вредност подужног коефицијента опструјавања, а поступило се и оптимирању бројних делова на возилу, тако да се у периоду око двадесетак година постигло смањење коефицијента отпора ваздуха за око 40% (слика 2).



Слика 2. Промена коефицијента отпора ваздуха у функцији од године производње [1]

Поред тенденције да се смањи подужни коефицијент опструјавања, све је више присутна тежња да се смањи коефицијент узгона, чија велика позитивна вредност онемогућава безбедно кочење. Негативне вредности овог коефицијента обезбеђују веће пријањање. Истраживања која се предузимају у овом циљу подразумевају оптимизацију пода возила, браника, постављање спојлера, као и оптимизација прострујавања кроз моторски простор.

Актуелна су и истраживања која имају за циљ смањење буке од ветра у путничком простору, чиме се постиже бољи комфор и већа кондициона безбедност.

Посебно место у аеродинамици возила заузима и понашање возила под дејством бочног ветра. Одговор возила на овај утицај, као и остале бочне поремећаје настале струјањем ваздуха (на пример: при претицању возила великом брзином на ауто-путевима) је предмет истраживања и развоја система аутоматског регулисања бочног повођења возила.

3. Стабилност возила при дејству бочног ветра

3.1 Увод

Приликом вожње на отвореном путу, ветар опструјава возило. Ово узрокује силе и моменте, који се јављају доминантно у правцу кретања возила али и у свим правцима, да утичу на возне карактеристике. Разлог томе, отпор ваздуха је привлачио највеће интересовање.

Компоненте у осталих пет степени слободе у великој мери утичу на бочне динамичке карактеристике возила. Силе узгона и моменти пливања се јављају услед дејства отпора ваздуха када је возило у покрету, док се услед дејства бочног ветра јављају бочне силе и моменти који проузрокују ваљање возила.

Резултујуће силе и моменти морају бити уравнотежени у зависности од реакција које се јављају између возила и пута (на точку). Резултујуће проклизавање точка доводи до одступања возила од жељеног правца кретања које мора да се компензује од стране возача преко система за управљање.

Приликом вожње, под утицајем бочног ветра, возачу се јавља неугодност за воланом, ако је присутна континуална бочна сила. Ово доводи до стреса, прераног умора и повећаног ризика управљања возилом.

Када се јаве јаки бочни ветрови са свих правца, на возилу, појавиће се безбедносни проблем. Ако возач нема потребну вештину или искуство да "исправи" утицај бочних ветрова, нежељена путања кретања возила проузроковаће губитак контроле над возилом.

Бочни ветар утиче на стабилност, тиме и на безбедност, а као посебан аспект треба истаћи и комфор вожње.

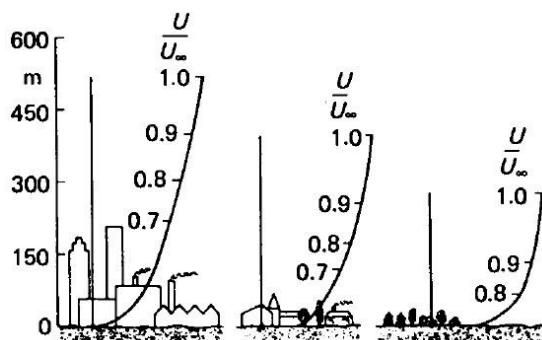
3.2 Силе и моменти на возилу

3.2.1 Природни ветар

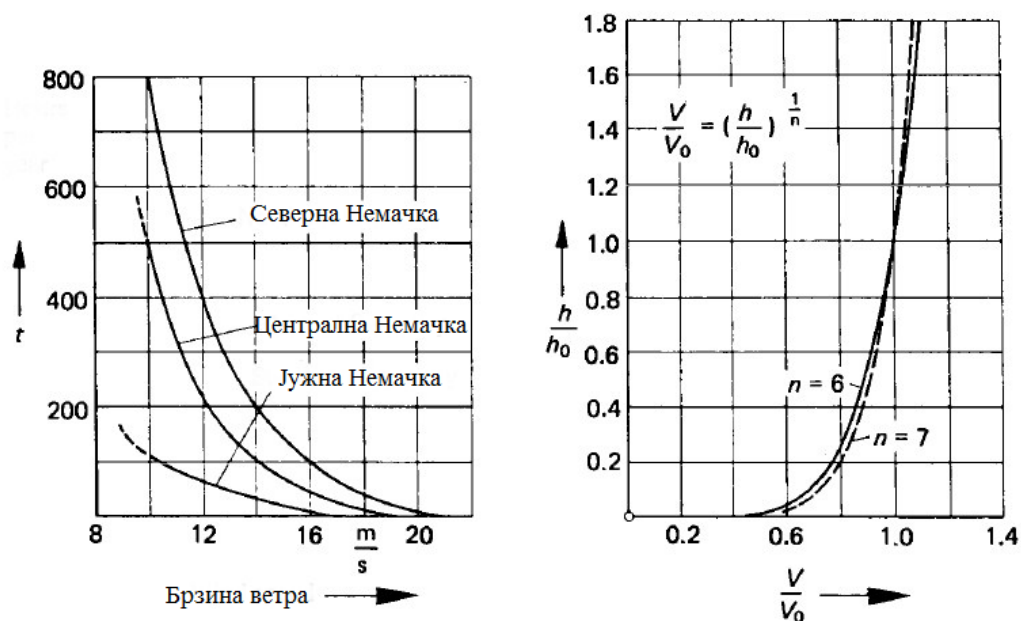
Јачина и правац ветра непрестано се мери на различитим географским локацијама и на различитим висинама од земље, нпр. 10 до 15 метара. У просеку, ови ваздушни профили стварају основни слој турбулентних ваздушних струја. Ближе земљи, колебање брзине ветра u' је приближно једнака просечној вредности брзине ветра V , па је тада ниво турбуленције Tu дефинисан једначином:

$$Tu = \frac{u'^2}{V} \approx 1 \quad (1)$$

У зависности од стања (храпавости) тла разликују се брзине струјања ветра (слика 3 и слика 4) [2]. Знатно ниже брзине ветрова јављају се у нивоу возила него на висини од 10-15m.



Слика 3. Граничне вредности брзине природних ветрова у зависности од облика терена

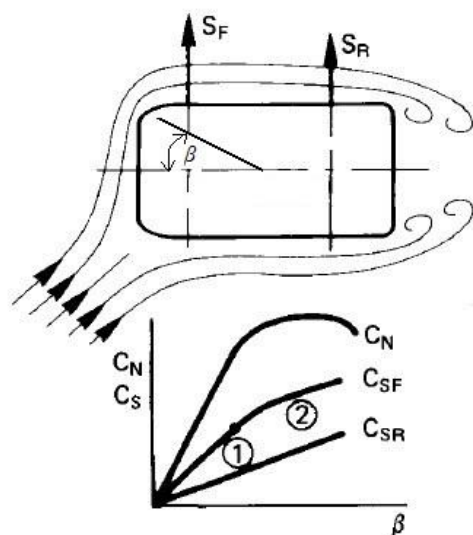


Слика 4. Учестаност јаких ветрова у различитим регионима у Немачкој (слика лево)[2], и разлика између ветробранских слојева и глатких површина (слика десно)[3]

3.2.2 Аеродинамична стабилност

Концентрација негативних притисака на заветринској страни возила, у односу на ветру истурени крај возила, је у великој мери одговорна за аеродинамичко заокретање возила. Ово је карактеристика која изазива нестабилност приликом кретања. Другим речима, када бочни ветрови делују на возило јавља се промена угла β (угла заокретања), овај ефекат изазива аеродинамичко заокретање возила које даље повећава вредност угла β .

Јасно илустрована карактеристика утицаја бочних ветрова на стабилност возила дата је на слици 5 [4]. За мале вредности угла заокретања, веома висок негативни притисак јавља се на заветринској предњој страни возила, док се кретући се ка задњем крају возила, задњи крај возила излаже само мањим притисцима. Обрнуто је за велике вредности угла заокретања.



- C_N - коефицијент опструјавања у подужном правцу
- C_{SF} - коефицијент бочних сила на предњем крају возила
- C_{SR} - коефицијент бочних сила на задњем крају возила
- 1 - са спојлером на предњем крају возила
- 2 - без спојлера на предњем крају возила

Слика 5. Ваздушне струје и силе које делују на возило изложено утицајем бочних ветрова [4]

У правцу ветра, на предњој страни возила, постоји низак позитиван притисак који се претвара у низак негативан притисак дуж ваздушне струје. Јачине и обими позитивног притиска, који делује на површинама који су под његовим утицајем, условљавају повећање угла пливања возила. За такве углове заокретања, возило се конструише са добро суженим и заобљеним задњим крајем возила (Ц-стубом) како би вредности негативних и позитивних притисака остали уравнотежени.

Дизајн возила знатно утиче на коефицијенте бочних сила на предњем и задњем крају возила, тако да су за типове каросерија "лимузина" и "купе" возила знатно нижи коефицијенти него код "караван" возила. Па се тако питање поставља, како дизајнови возила утичу на коефицијенте бочних сила? Са искуством из аеродинамике авионских крила инжењери су дошли до закључка да сила која потискује возило ка тлу је знатно већа од силе која делује у супротном смеру. Овај принцип примењен је на возилима, тако да су предњи браници аутомобила дизајнирани са ивицама који повећавају отпор ваздуха али зато смањују коефицијент бочних сила и заокретање возила.

Проблеми који су се јављали ради оптимизације отпора ваздуха и редукције бочних ветрова и момената заокретања возила превазиђени су оптимизацијом предњег краја возила која уз помоћ одговарајућих закривљених ивица на возилу омогућава моменту заокретања да остане у опсегу од $-10^\circ \leq \beta \leq +10^\circ$, што је у области у којој делује бочни ветар релативно мали проблем.

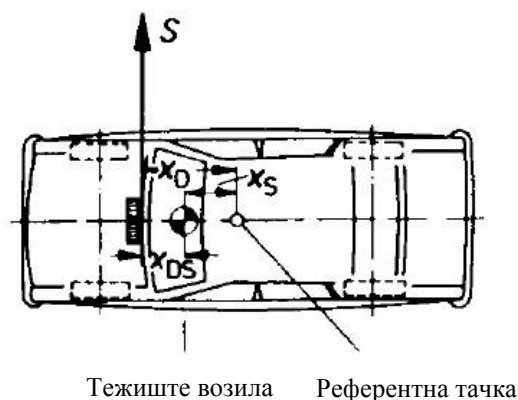
У динамици возила, моменти су обично везани за референтну тачку у центар међуосовинског растојања и центра путање возила, у нивоу пута. Са обзиром на утицај бочних ветрова, момент заокретања N_{SP} је померен ка тежишту возила, око којег се јавља момент заокретања, слика 6.

Аеродинамички момент заокретања

$$N = x_D \cdot S$$

Момент заокретања око тежишта

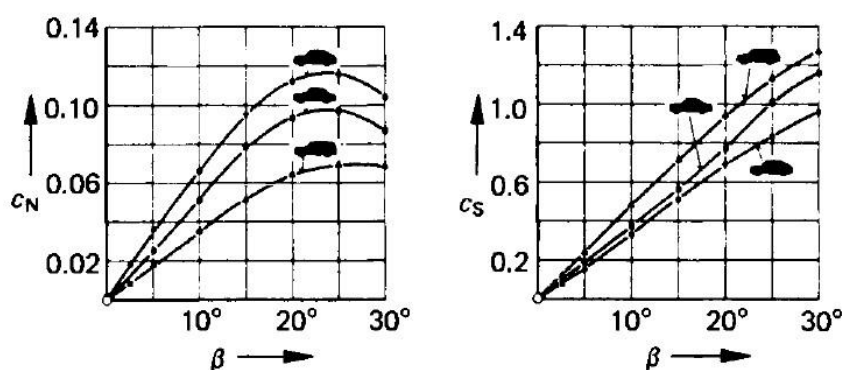
$$N_{SP} = x_{DS} \cdot S$$



Слика 6. Моменти на возилу услед дејства бочног ветра

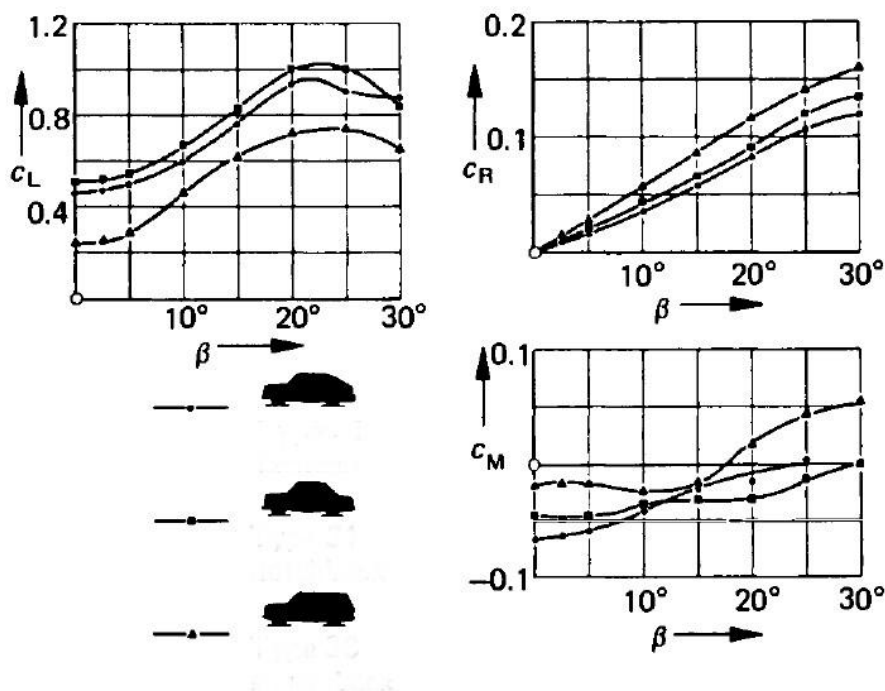
Ове две референтне тачке, око којих се рачуна момент заокретања, су идентичне уколико је тежина возила једнако распоређена на предњој и задњој осовини. Уколико се задња осовина превише оптерети може се довести до губитка стабилности возила.

Могућности за утицање аеродинамичких сила и момената у односу на облик каросерије возила приказане су на слици 7 и даље објашњене на слици 8.



Слика 7. Утицај момента заокретања возила и коефицијента бочних сила у зависности од изглед задњег краја возила

На сликама 7 и 8 може се видети да момент заокретања и коефицијент бочних сила посебно зависе од дизајна задњег краја возила. Мали моменти пливања и јаке бочне силе јављају се код возила "караванског" облика, док се код "купе" возила јављају најмање бочне силе и највећи моменти пливања. Док типови каросерије "лимузина" имају оптималне вредности бочних сила и момената пливања возила.



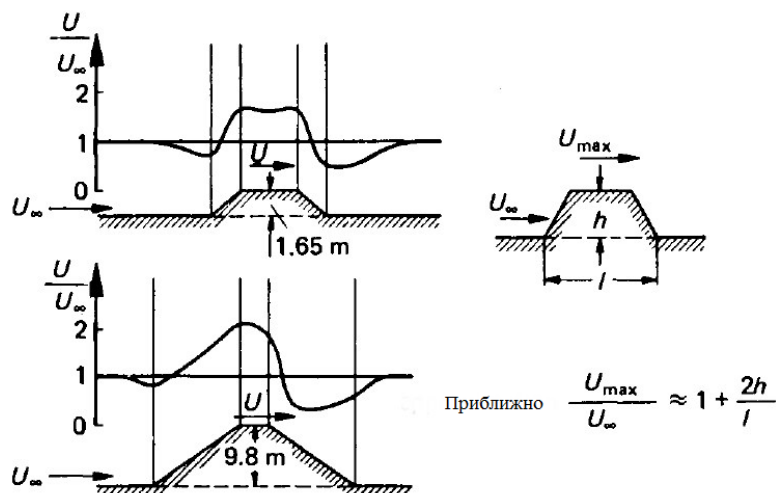
Слика 8. Моменти сила узгона (слика горе лево), ваљања (горе десно) и пливања (доле десно) у зависности од изгледа задњег краја возила

У случају купе или спортских возила, силе узгона возила морају се смањити одговарајућом модификацијом облика возила или додавањем додатних закрилца на предњем/или на задњем крају возила. Да би се повећала максимална брзина приликом вожње у кривини код тркачких аутомобила уграђују се спојлери или закрилци који дају негативне вредности узгона аутомобила, а самим тим утичу на повећања отпора ваздуха и смањења максималне брзине кретања.

3.3 Проблеми бочног ветра у саобраћају

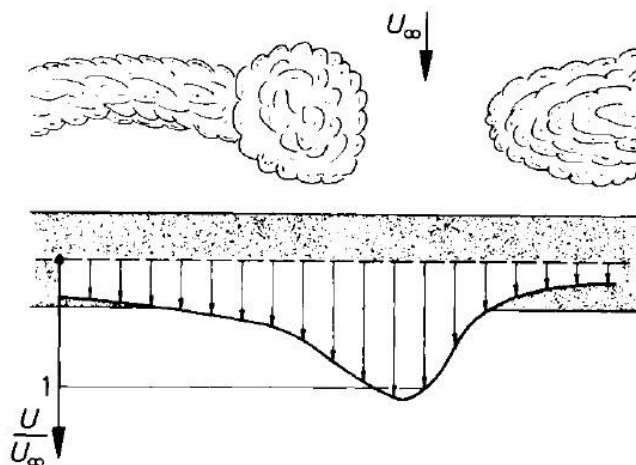
3.3.1 Саобраћајнице, заштитници од ветрова

Саобраћајнице су у просеку грађене без обзира на проблематику бочних ветрова. Подвожњаци, насипи и мостови су изложени овим утицајем. За разлику од константације у поглављу 3.2.1 где је речено да се ниже брзине ветрова јављају у нивоу возила него у висинама од 10-15m изнад тла, слика 9 показује да зграде и остали грађевински објекти, тј. насипи, могу да утичу на брзину ветра која се јавља при тлу.



Слика 9. Повећање брзине ветра на насипима услед утицаја бочних ветрова [3]

Пропусти у жбуњевима и размаци између стабла (слика 10) могу изазвати "ефекат млазњака" која изазива повећање брзине локалних ветрова изнад нормалне брзине на отвореним просторима.

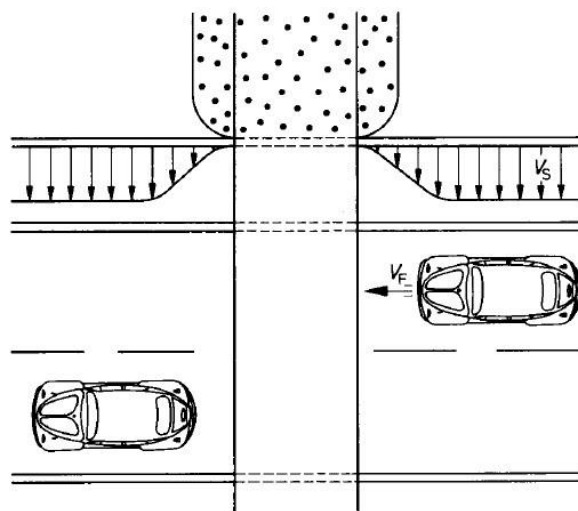


Слика 10. "Последица млазњака" између жбуњева поред пута [3]

3.3.2 Природни и вештачки бочни удари ветра

У претходним разматрањима је наведено да ниво турбулентног природног ветра је реда величине $Tu \approx 1$. Према томе када бочна брзина ветра има вредност V , брзина се може изненадно повећати до $2V$ или пасти на нулу. Струјање природног ветра исто је без обзира да ли је узрок грађевински објекат или вегетација (дрвеће, жбуњеви, итд.). Док се стални бочни уради ветра, проказани на слици 9, могу компензовати константним углом управљача возила, случај приказан на слици 10 се не може предвидети и изискује изненадну корекцију управљања. Стога ови бочни удари ветра изазивају опасност приликом вожње.

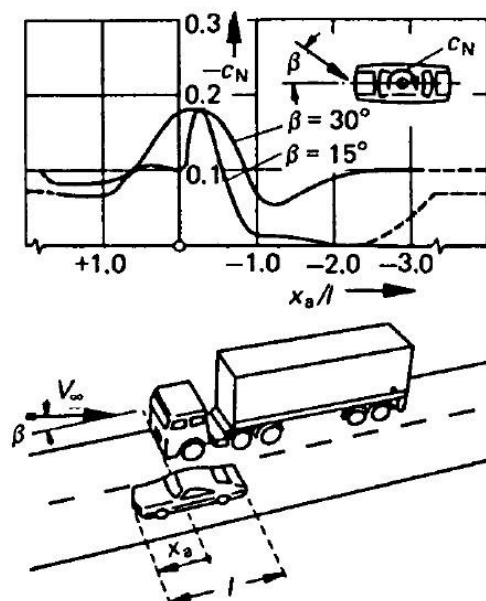
Исто важи и за вожњу између стубова моста услед дејства бочних ветрова. У почетку возило се креће константном брзином V_F под константним деловањем бочног ветра V_S (слика 11), са одговарајућим константним углом управљача према ветру. Затим долази до заштићеног подручија у близини носача моста где возач мора да управља ка левој страни како би избегао слетање ка десној страни пута. Са овим новим углом управљања возило при излазу из заштићеног подручија је поново изложено утицају бочних ветрова са десне стране, што доводи до изненадних реакција од стране возача.



Слика 11. Шематски приказ утицаја брзине бочног ветра у близини потпорних стубова моста

Скоро сваки возач је познат са проблемом претицања камиона када се јавља ефекат утицаја бочног ветра. Због релативне брзине кретања ова два возила, брзина претицања је мала у односу на брзину вожње и на учестаност малих ветрова. Стога је могуће симулирати претицање под константним деловањем бочног ветра у аеродинамичном тунелу.

Слика 12 [5] показује ефекат заокретања возила услед претицања тегљача са полуприколицом. Јавља се велики момент пливања који угрожава систем возач-возило, у моменту када возило излази из заштићене зоне тегљача са полуприколицом, и улази у поље расејаних ваздушних струја. У овом пољу испољавају се повећане брзине протока ваздуха, у односу на нормалне брзине бочног ветра, праћене са великим углом пливања.



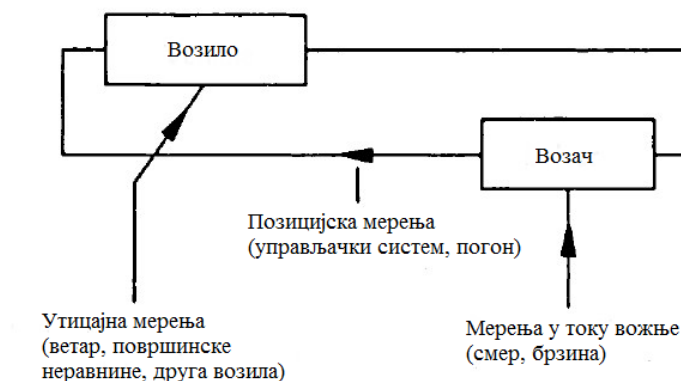
Слика 12. Промена момента пливања током претицања тегљача са полуприколицом од стране путничког возила [5]

Амплитуда ΔC_N зависи од бочне раздаљине између два возила током претицања. У принципу ефекат је исти за сваки облик аутомобила. Међутим, опсег момента пливања мења се у зависности од конструкције предњег дела тегљача, који се може смањити заокругљивањем предњег краја.

3.4 Утицај бочних ветрова на динамику возила

Не постоји општа дефиниција осетљивости возила на бочни ветар. У многим студијама проблем бочног ветра је разматран, или из резултата испитивања, или уз помоћу моделирања на рачунару [6, 7, 8, 9].

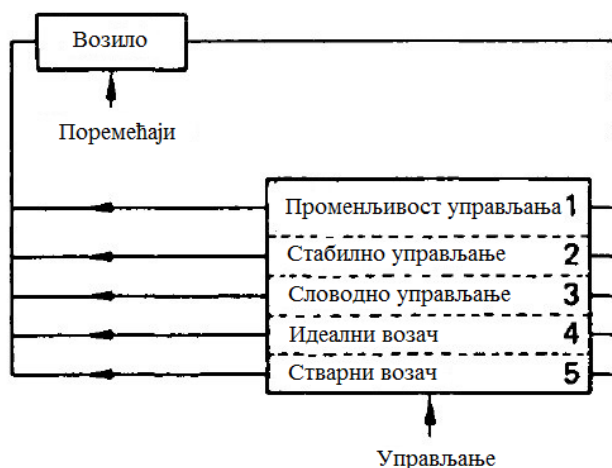
Да би се у потпуности представио феномент утицаја бочних ветрова, возач се мора узети у обзир. Однос између возача и возила, као што је приказано на слици 13, морају се у потпуности разумети.



Слика 13. Кибернетски систем возач-возило

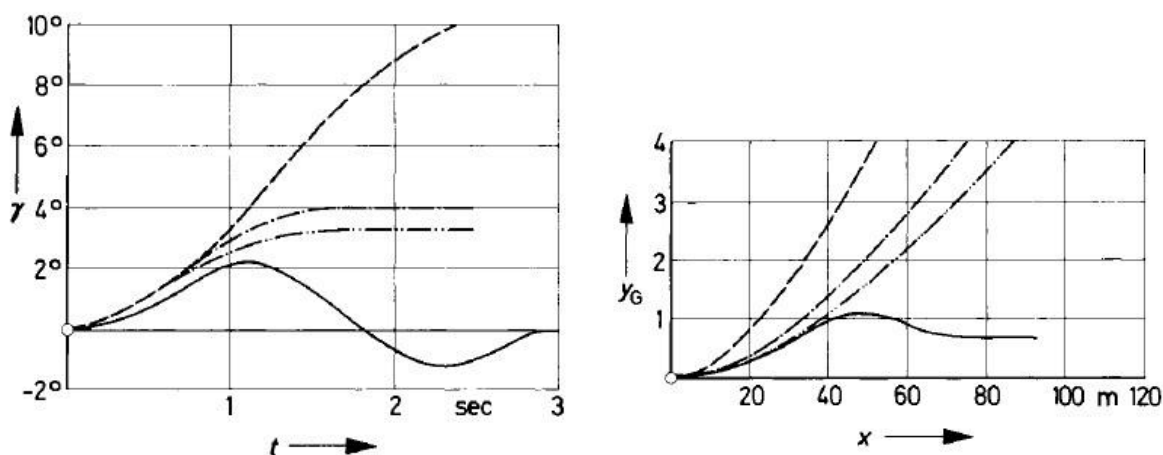
Неопходна испитивања су компликована чињеницом да је возач прилагодљив условима вожње, тј. он или она се прилагођавају карактеристикама возила која возе. Постоје још много непознаница у односу на возачеву прилагодљивост у систему возач-возило које се не могу теоретски описати.

Разне претпоставке које се односе на понашање возача учињено је у сврху различитих метода испитивања и рачунарских метода [10], тј. понашање возача је дефинисано низом различитих исказа да би се успоставило понашање и реаговање возила под утицајем бочног ветра.



Слика 14. Могући прикази система возач-возило

Слика 14 приказује различите могућности за разматрање, при чему возило може да буде под "стабилним управљањем" од стране точка управљача када је блокиран, или под "слободним управљањем" када точка управљача може слободно да се окрене [6].



Слика 15. Угао клизања и божно одступање у зависности од различитих реакција возача

- супротстављање возача скретању возила
- - - - - точак управљача фиксиран
- · - · - точак управљача слободан
- · · · · супротстављање возача скретању возила, и кочење

Одговарајућа два дијаграма (слика 15) указују на угаоне промене γ и бочно одступање y_G у зависности од тежишта возила као резултат лабораторијског испитивања и коришћење водене ракете монтиране на возилу која симулира утицај бочног ветра. Ове променљиве зависе од времена t . Кроз тест откривено је да прави возач, случај 5, је реаговао на поремећај корекцијом управљања после одређеног времена од приближно 0,2 секунде. Услед таквог вида управљања, а због променљивог карактера бочних ветрова, долази до кашњења од 0,8 секунде, односно пре него што је возило "приметило" било какав ефекат услед возачеве реакције.

До тог тренутка, вредности пливања и резултанта бочног одступања су сагласни у свим испитивањима. У конкретном случају, за возило под утицајем "фиксирани контроле" и под утицајем бочног ветра добијају се очекивани резултати одступања y_G од 0,8 секунди.

3.5 Утицај аеродинамичких сила на бочно скретање

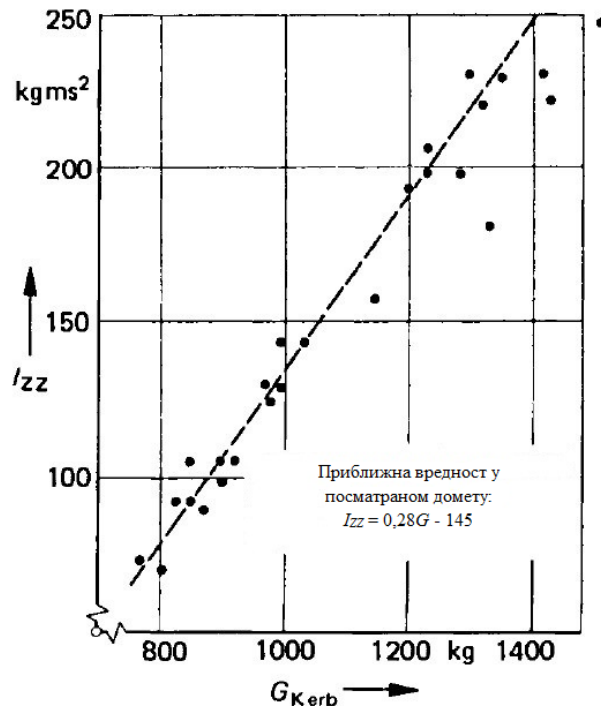
Бочна одступања возила од предвиђеног пута кретања, у условима "фиксирани контроле" зависи од великог броја фактора који утичу услед деловања ваздушних струја. У ове факторе спадају тежина возила G , момент инерције возила I_{zz} у односу на вертикалну осу кроз центар тежишта возила, расподела оптерећена предње и задње осовине као и дизајн карисерије возила. Као мање утицајни фактори убрајају се утицај пнеуматика, еластичност управљача и тип ослањања.

Опсег поремећености система је утицај аеродинамичких бочних сила и момената заокретања, силе узгона и пливања возила. Због тога што су параметри тестова у симулацији бочних ветрова дуготрајни исплати се коришћење тачног компјутерског модела [9]. Да би се утврдило понашање возила према стандардима и то за групу возила у којој постоје мање разлике у карактеристикама каросерије, могуће је користити стандардне податке тако да се разматрања могу усредсредити на следеће важне параметре бочног ветра:

- Висина возила G ,
- Расподела тежине G_f/G_r (положај тежишта),
- Момент инерције I_{zz} у односу на вертикалну осу кроз центар тежишта возила,
- Момент заокретања N ,
- Бочна сила S .

Као што слика 16 показује, постоји линеарна корелација између тежине возила G и момента инерције I_{zz} око вертикалне осе кроз центар тежишта, за масе возила између 700 и 1500kg. У овој области веза ових двеју величина је приближно линеарна функција.

$$I_{zz} = 0,28G - 145kg \, m \, s^2 \quad (2)$$



Слика 16. Поређење тежине возила и момента инерције око вертикалне осе кроз центар тежишта

Момент заокретања постоји око осе I_{zz} , која пролази вертикално кроз тежиште. То је резултат аеродинамичких сила које делују на аеродинамичну референтну тачку померену ка тежишту возила (видети слику 6):

$$N_{SP} = x_D S \quad (3)$$

Када се једначина (3) подели са бочном силом S , добија се непозната раздаљина x_{DS} (раздаљина од тзв. центра притиска или метацентра до тежишта возила).

$$x_{DS} = \frac{N_{SP}}{S} = \frac{N}{S} - x_S = x_D - x_S \quad (4)$$

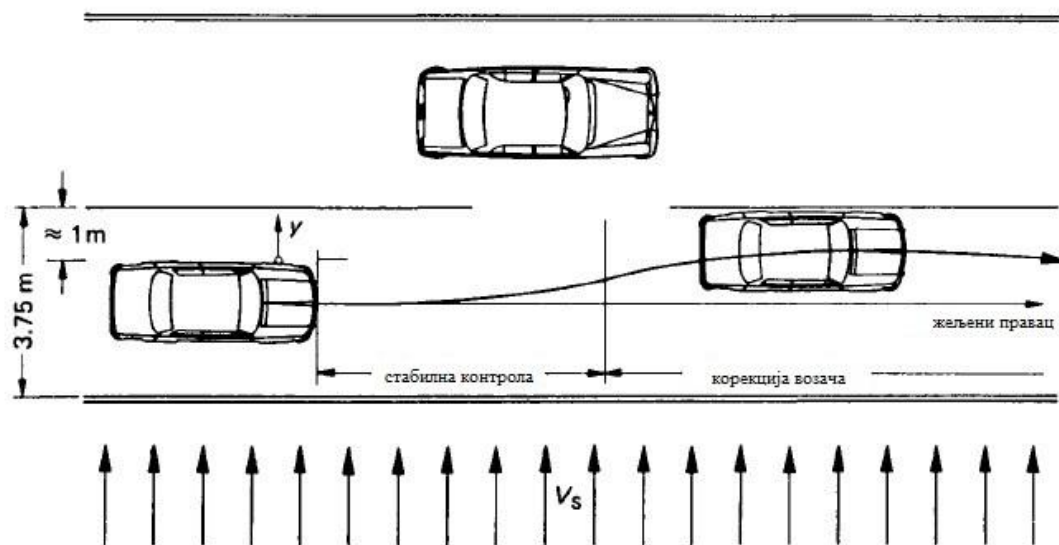
Овај израз "центар притиска" претпоставља да је момент заокретања резултат само бочних сила.

У стварности момент заокретања се генерише преко бочне силе и тангенцијалне силе, јер она делује у истој равни као и бочна сила, и наравно, моменат заокретања од тангенцијална силе има као крак растојање растојање од аеродинамичне референтне тачке.

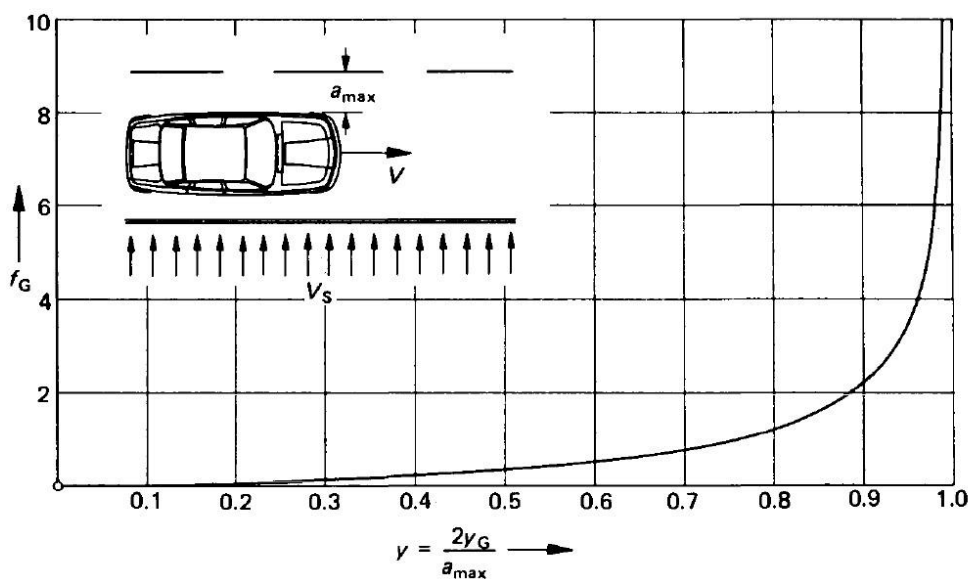
3.6 Безбедносна граница

Граница изнад које осетљивости бочног удара ветра постају опаснији, него само непријатности приликом вожње, не зависи само од бочног ветра и самог одступања возила од жељеног правца..

Велика бочна скретања, услед утицаја бочно ветра, могу се описати као она која узрокују да возило одступи од свог правца кретања. Са ширином коловоза од 3,75m (Немачки ауто-пут; ауто-пут САД је приближно 3,66m) и просечне ширине возила од 1,70m, само је ширина од 1m пута доступна за одступање од жељеног правца возила које се креће средином коловозне траке (слика 17).



Слика 17. Шематски приказ кретање возила као резултат бочног ветра



Слика 18. Ниво опасности са повећањем близине ка саобраћајној траци

Као почетна претпоставка, може се рећи да ће возило одступити од свог жељеног правца y_G за приближно два пута, што се јавља када је возило у стабилном кретању током првих 0,8 секунди после утицаја бочног ветра (видети слику 15) и пре него што возач реагује на кретање возила.

Под претпоставком да се возило креће средњом коловозном траком, ниво опасности се полако повећава док возило одступа од свог жељеног правца, кретајући се ка ивици коловозне траке, где је ниво опасности на критичном нивоу. Ова ситуација може се представити формулом (видети слику 18):

$$f_G = \sqrt{\left(\frac{1}{1-Y}\right)} - 1 \quad (5)$$

где је:

$$Y = \frac{2y_G}{a_{max}} \quad (6)$$

Под претпоставком расподеле нивоа опасности (једначина 5), може се видети да се ниво опасност знатно повећава од вредности $Y = 0.9$. Ако би се ово дефинисало као граница опасности, то би значило да пример илустрован на слици 17 ($a_{max} = 1m$) представља максимално дозвољено одступање од $Y_G=0.45$, које се може толерисати, тј. минимално безбедно растојање од краја ивице коловозне траке је $0,1m$.

4. Возила високих перформанси

4.1 Увод

Возила високих перформанси су, пре свега, возила са великим односом снаге и тежине. Велика убрзања, успорења и управљивости су од виталног значаја, нарочито за спортска и тркачка возила. Ово поглавље се односи на три основне категорије поделе возила: спортска возила, тркачка возила и рекордна возила.

Спортска возила (слика 19) су намењена за свакодневну употребу на јавним путевима. Велики однос снаге и тежине, ниско тежиште и компакност које има предност над носивошћу и, у извесној мери удобности у вожњи, супериорна убрзања, управљивости и кочење, могу бити позитивани фактор активне безбедности возила.



Слика 19. Спортско возило - Porsche 911 Turbo 1983, 221kW (300ks), 260km/h, $c_D=0,39$

Тркачка возила (слика 20) претежно се такмиче са сличним возилима на посебним стазама или путевима затвореним за јавни саобраћај. Она су дизајнирана са специфичним правилима и прописима како би се обезбедиле максималне перформансе у погледу убрзања, максималне брзине, кочења и управљања.

Рекордна возила (слика 21) су још више ограничена у њиховој употреби, те су обично дизајнирана да постигну максималне брзине или комбинацију брзине и економичности са аспекта пређених километара.

Аеродинамика има важну улогу у перформанси и безбедности ових возила. За рекордна возила, мали отпори ваздуха и стабилност при кретању праволинијски имају највиши приоритет, док тркачка возила имају додатне захтеве, као што су изванредно држање пута и стабилност у кривинама. Спортска возила често комбинују све ове факторе уз свакодневно коришћење.



Слика 20. Тркачко возило - Porsche 935/78 "Moby Dick"; Ле Ман 1978, 552kW (750ks), 395km/h, $c_D=0.36$



Слика 21. Рекордно возило - Плави Пламен (Blue Flame) 1970, 1.001,671km/h

Унутар ове три категорије возила постоји широк спектар облика каросерије који испуњавају одређена правила и услове, нпр.:

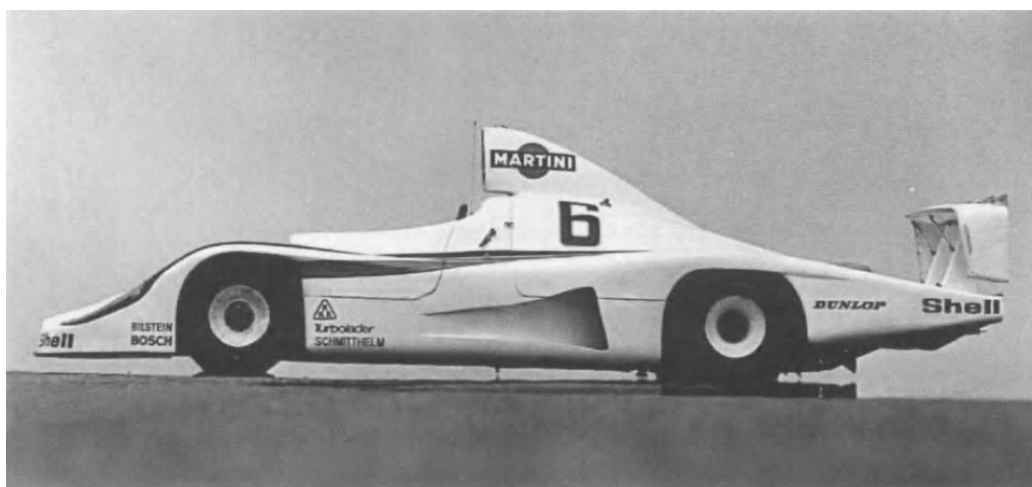
- Отворени аутомобили - претежно израђени са једним седиштем - са избаченим точковима, слика 22 и 23,
- Отворени аутомобили са затвореним (окруженим) точковима, слика 24 и 25 [11],
- Затворени аутомобили са избаченим точковима, слика 26,
- Затворени аутомобили са затвореним точковима, као што су рекордна возила, слика 21.



Слика 22. Тркачки аутомобил - Формула 1 - Lotus 79



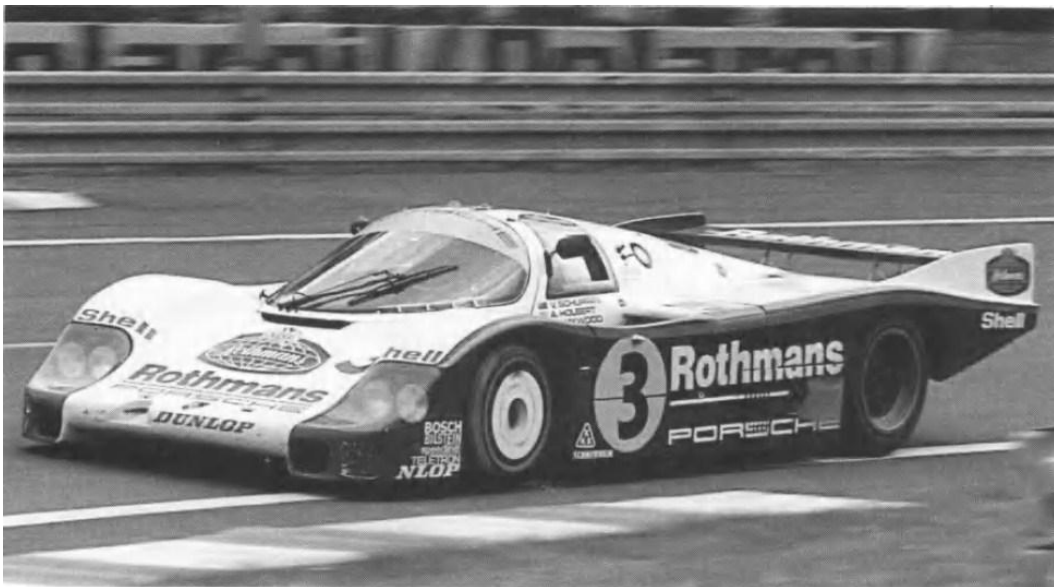
Слика 23. Тркачки аутомобил - Pennzoil Chaparral 2K Indy-type 1979



Слика 24. Тркачки аутомобил Porsche 936/78 1978; 427kW (580ks), 340km/h, $c_D=0.40$



Слика 25. Тркачки аутомобил - Porsche 917/30, 1973; 809kW (1100ks), 370km/h $c_D = 0.57$



Слика 26. Тркачки аутомобил - Porsche 956, Ле Ман 1983; 456kW (620ks), 355km/h

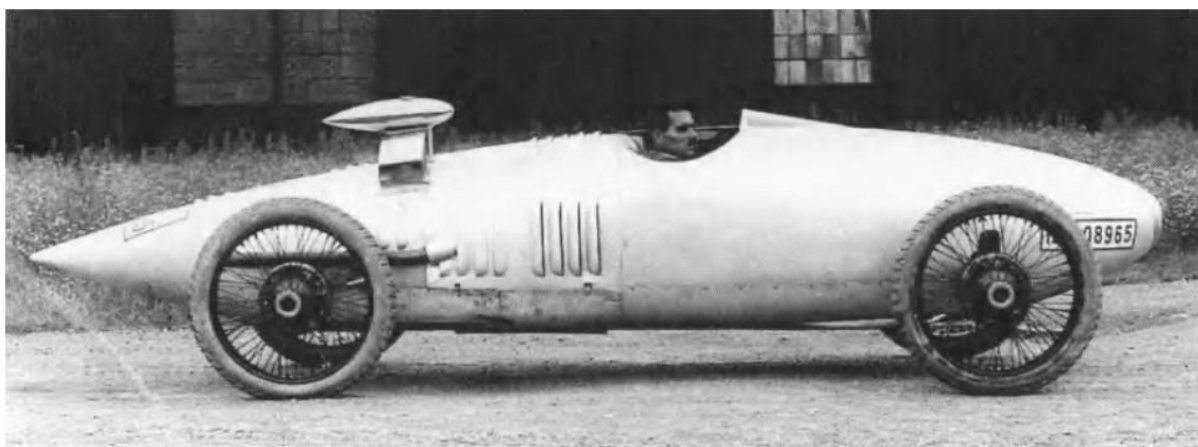
4.2 Историјски развој

Значај аеродинамике рекордних возила је признат у њиховом раном развоју. Први аутомобил који је прешао 100km/h је "La Jamais Contente" њега је конструисао Камил Јенаци (Camille Jenatzy) 1899. године. Јенаци је користио један од најпростијих аеродинамичких модела приликом конструкције возила (слика 27).

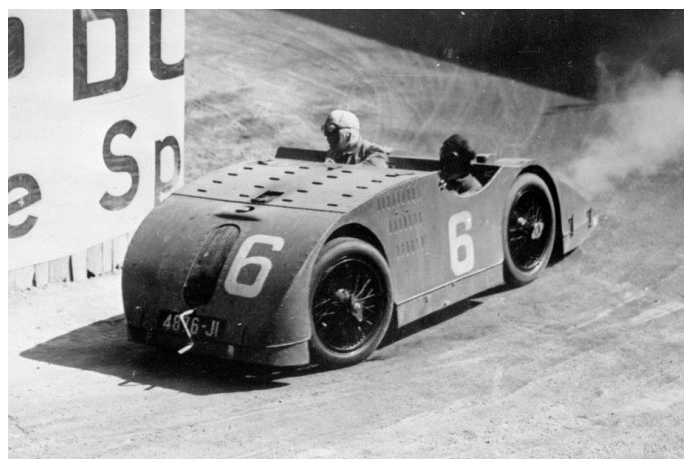


Слика 27. Аутомобил који је оборио највећу максималну брзину кретања (100km/h) 1899 године конструисан од стране Камила Јенаци (Camille Jenatzy)

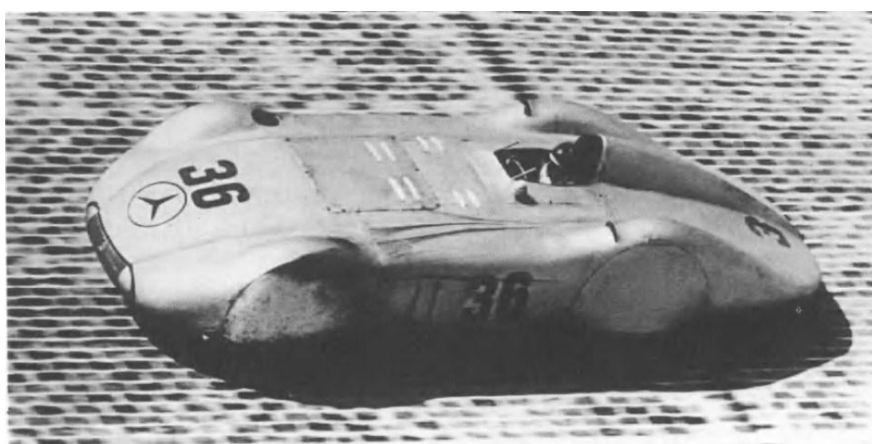
Развој аеродинамике тркачких возила био је нешто спорији. 1923. године тркачка верзија Benz Tropfenwagen изграђена је на основу Румплерових патената (слика 28), а исте године Bugatti Tank (слика 29) је конструисао ширу каросерију која се прилагодила точковима. Ово су издвојени примери, међутим, произвођачи спортских и тркачких аутомобила су углавном задржали класичне изгледе каросерије са великим хладњацима монтираним на предњем крају возила, узрокујући знатан отпор ваздуха. Недуго после Другог светског рата, компаније Auto-Union и Daimler-Benz су извели први аеродинамични облик аутомобила на тркачку стазу (слика 30).



Слика 28. Тркачки аутомобил - Benz Tropfenwagen 1923; 66kW (90ks), 185km/h



Слика 29. Дволитарски тркачки аутомобил марке Bugatti, 1923



Слика 30. Тркачки аутомобил са аеродинамичним обликом каросерије произвођача Daimler-Benz, Берлин 1937

Произвођачи спортских аутомобила следили су сличан примерак као и произвођачи тркачких аутомобила. У предратним годинама произвођачи спортских аутомобила су упорно конструисали класичне аутомобиле са великим хладњацима и одвојеним блатобранима. Одмах после Другог светског рата, произвођачи спортских аутомобила фокусирали су се углавном на смањење коефицијента отпора ваздуха. Примерак овога је Porsche 356 (слика 31) са чеоном површином возила од $1,61\text{m}^2$ и коефицијентом отпора ваздуха од 0,34 - веома цењен чак и за данашње стандарде.



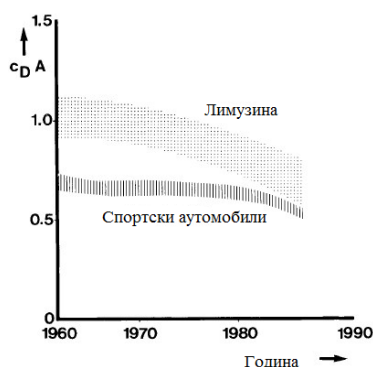
Слика 31. Спортски аутомобил - Porsche 356, 1950

4.3 Утицајни фактори конструкције на аеродинамичност возила високих перформанси

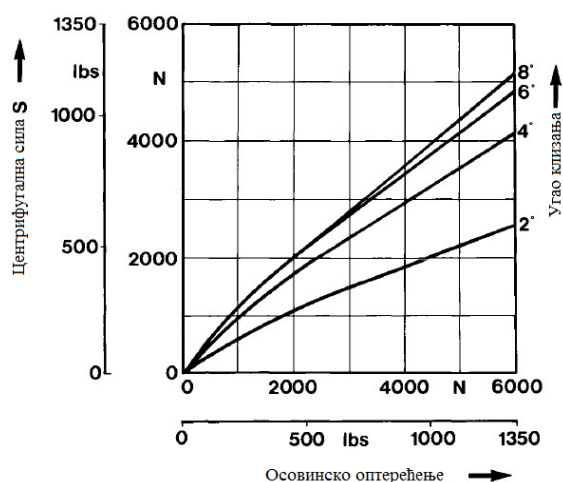
Добре аеродинамичке особине су основни захтеви возила високих перформанси за добијање максималне брзине и добре управљачке карактеристике.

4.3.1 Отпор ваздуха

Повећање максималне брзине возила за конкретну снагу мотора добијени су смањењем отпора ваздуха. Отпор ваздуха, који се повећава са квадратом брзине, одређује се преко коефицијента отпора ваздуха c_D и чеоном површином возила A . Слика 32 приказује како су спортска возила достигла низак ниво $c_D A$ 1950-их година, али ове вредности нису се могле додатно смањивати због утицаја ентеријера, ширине возила и пута. Развој лимузина био је спорији, али су недавно достигле упоредив отпор ваздуха. Рекордна возила последњих година су испод ових вредности.



Слика 32. Развој отпора ваздуха (вредности $c_D A$) лимузина и спортских аутомобила



Слика 33. Центрифугална сила као функција осовинског оптерећења и угла клизања

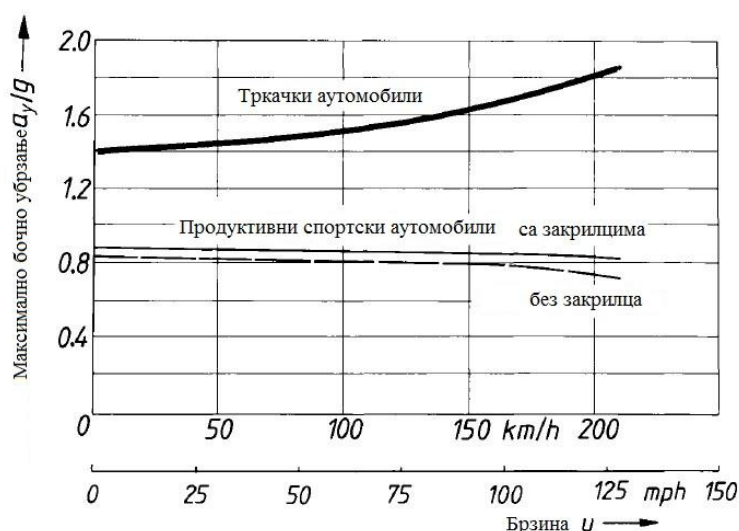
Осовинско оптерећење возила може бити под утицајем ваздушних струја које пролазе око њега. Настале силе узгона, позитивних или негативних вредности, варирају са квадратом брзине возила. Свака промена осовинског оптерећења утиче на коефицијент пријањања (слика 33) као и на управљивост возила.

4.3.2 Управљивост

Управљивост возила првенствено зависи од каросерије и механизма за вођење точкова, али се значајно може побољшати аеродинамичком конструкцијом каросерије поготово при великим брзинама кретања.

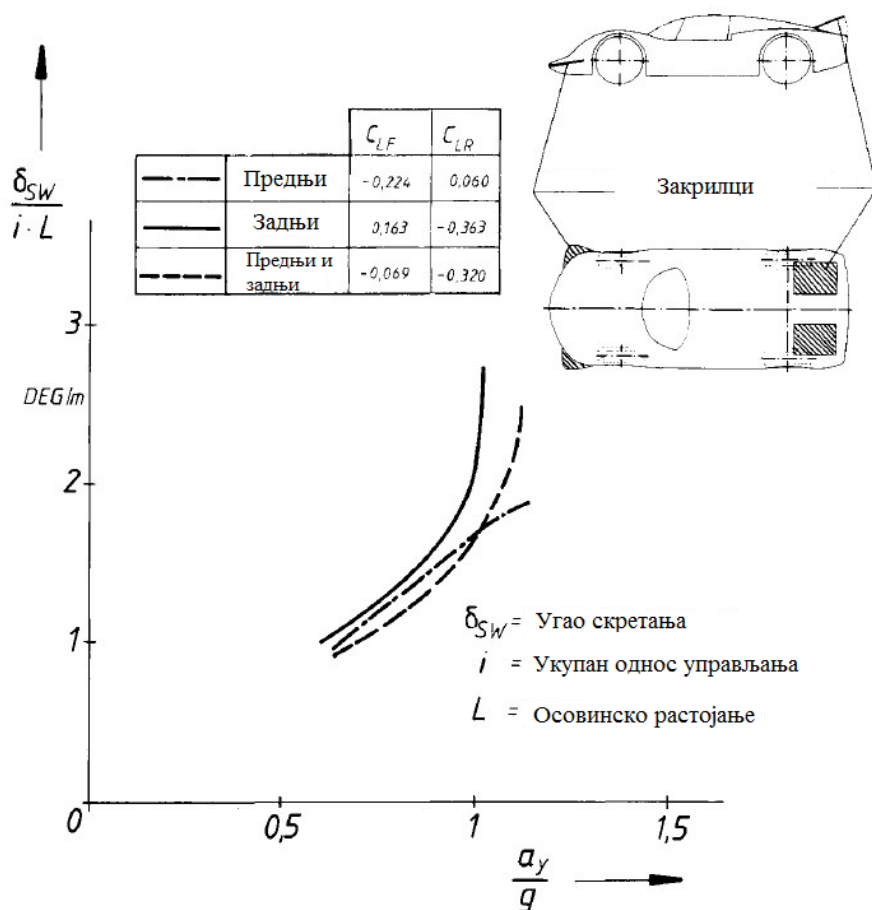
4.3.2.1 Тест вожње

Тест вожње на слици 34 показују да возило са негативним узгоном има максималне вредности бочног убрзања са повећањем брзине кретања [12]. Погољан утицај негативних узгона на задњој осовини илустрован је на слици 35. Тест возило је опремљено закрилцима како би генерисали негативан узгон на предњој и задњој осовини возила. Угао управљања се повећава са растом бочног убрзања чим су се задња закрилца проширила како бих створила негативан узгон возила на задњој осовини. Ово значи да је возило постало подуправљиво и стога се могло лакше контролисати. Са повећањем предњих закрилца, возило је тежило надуправљивости. Занимљиво је напоменути да су ови резултати добијени на клизећој подлози пречника 190m која одговара брзини кретања возила од само 120km/h.



Слика 34. Утицај аеродинамичких елемената (закрилца) на максимално бочно убрзање

Смањивањем сила узгона може се побољшати тренутни услови вожње, као што су претицања [13]. Такође се позитивно утиче и на кочење у кривини, где се побољшава пријањање пнеуматика на површини пута, као и прерасподела осовинског оптерећења. Због стварања ових услова возило се лакше контролише, јер је потребно мање корекције управљања.

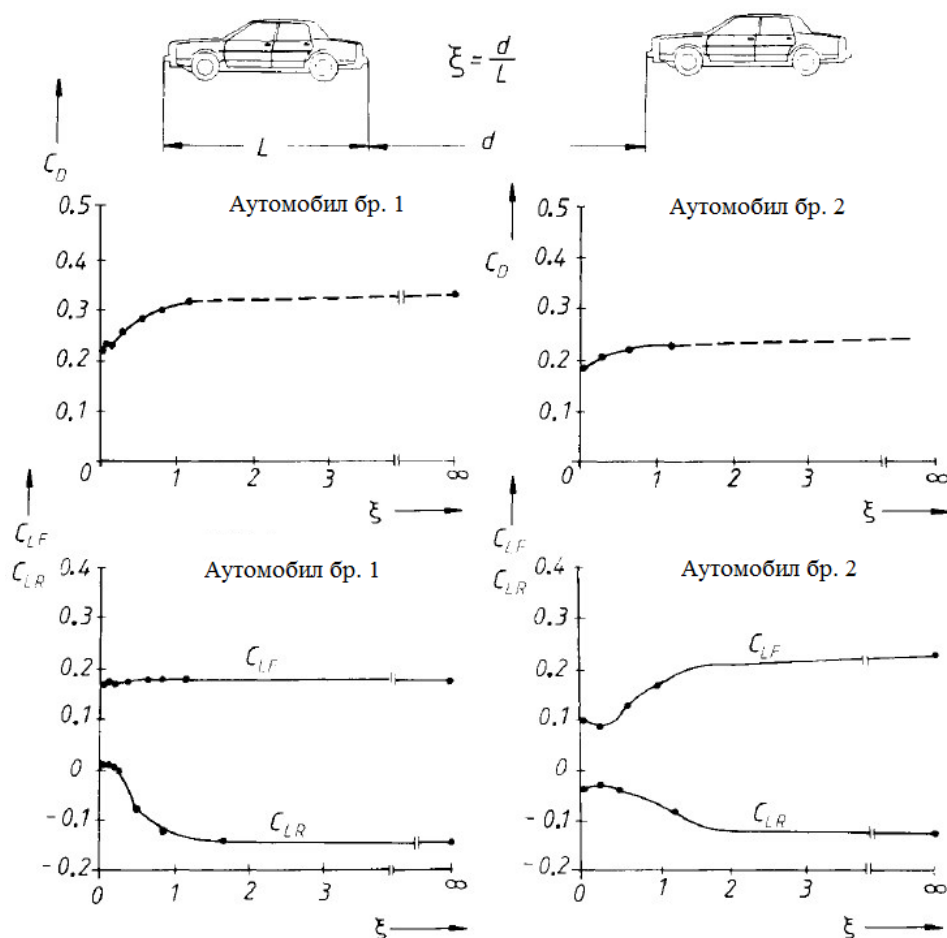


Слика 35. Стабилност приликом скретања бозила у зависности од предњег и задњег коефицијента узгона

4.3.2.2 Опструјавање

Досадашња разматрања су се заснивала на идеји да се возило креће у мирним ваздушним струјама, али у догађајима као што су трке аутомобила такмичари возе у уској формацији, односно, један иза другог. Разна тестирања су доказала да возило које се налази, иза оног које се креће, је оптерећено мањим отпорима ваздуха, до чак 30%, од водећег возила и до 37% наредног возила [14].

Опструјавање има такође утицај и на вертикалне реакције подлоге, мање коефицијенте узгона и тежи бољем управљању оба возила (слика 36).



Слика 36. Аеродинамичне силе приликом кретања једно возила иза другог [2.4]

4.3.2.3 Хлађење и вентилација

Систем за хлађење и вентилација кабине захтевају одређену количину ваздуха да струји кроз возило. Спортски аутомобили морају бити у складу са другим возилима која се користе на јавим путевима. Тркачки аутомобили и рекордна возила су претежно опремљени једноставним вентилационим системима и која уопште немају загревања, али се посвећује велика пажња системима за хлађење услед екстремних снага мотора. Примери система који захтевају ваздух, као расладни медијум, су:

- хладњак воде,
- хладњак уља,
- интеркулер,
- мотор,
- трансмисија и други преносници снаге,
- кочнице,
- турбопуњач, компресор,
- издувни систем.

У свим случајевима, хлађење је потребно постићи уз што мањи отпор ваздуха, и негативних утицаја коефицијената узгона возила.

4.4 Алтернативни утицајни фактори конструкције на аеродинамичност возила високих перформанси

Као што је речено у поглављу 4.3 аеродинамички захтеви који се постављају пред возила високих перформанси су:

- низак коефицијент отпора ваздуха и мала чеона површина како би се постигли минимални отпори ваздуха;
- висок негативан коефицијент силе узгон возила;
- већи негативан узгон задње осовине у односу на предњу;
- добољно хлађење и вентилација без погоршања аеродинамичких коефицијената.

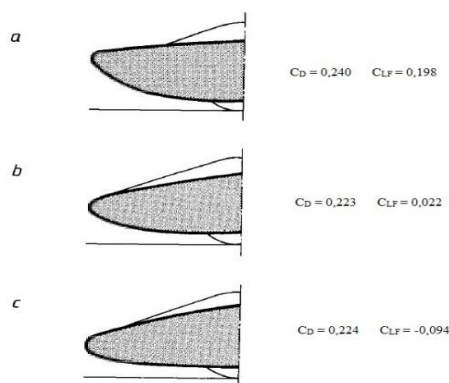
У већини случајева ови захтеви могу бити адекватно испуњени од стране следећих алтернативних дизајнова:

4.4.1 Отпор ваздуха и сила узгона

Отпор ваздуха је пропорционалан производњи коефицијента отпора ваздуха и фронталне површине возила. Минимизирање оба фактора код возила високих перформанси често има различите резултате.

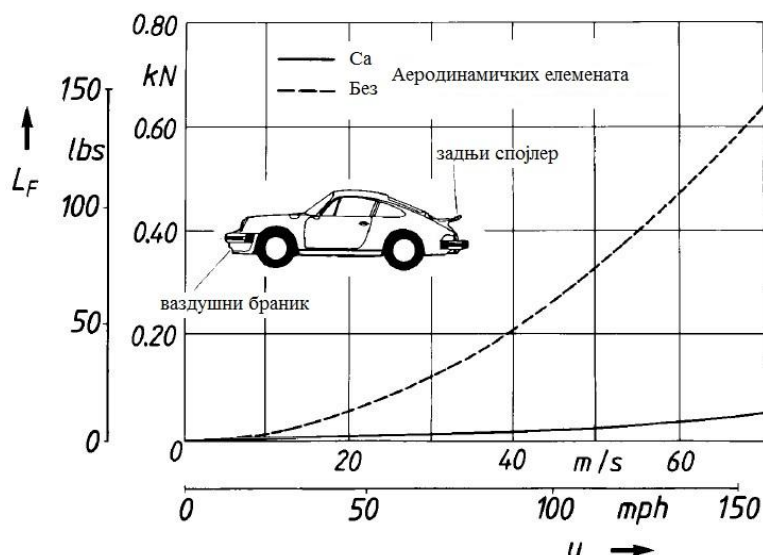
Није увек могуће смањити коефицијент отпора ваздуха јер се прописи не слажу са избаченим точковима, шири пнеуматици морају се монтирати како би повећали коефицијент пријањања, потребне су високи негативни узгони, или је потребна велика количина ваздуха за хлађење. Сви ови захтеви теже да повећају коефицијент отпора ваздуха. Смањење предњег краја возила ограничено је широким трагом точкова неопходним за управљање возилом, и велики пречници точкова потребни за кочење.

Изглед каросерије има одлучујући утицај на отпор ваздуха. Посебни изгледи могу се приметити, као што су нпр. сужен предњи крај возила смањује отпор ваздуха [15]. Међутим ово није увек довољно, потребно је направити такав конус на предњем крају возила како се не би притисак задржавао испод возила и јављале силе узгона. Из овог разлога предњи крај возила треба да буде нагнут на доле, да би се створио низак коефицијент отпора ваздуха и негативан узгон (слика 37).



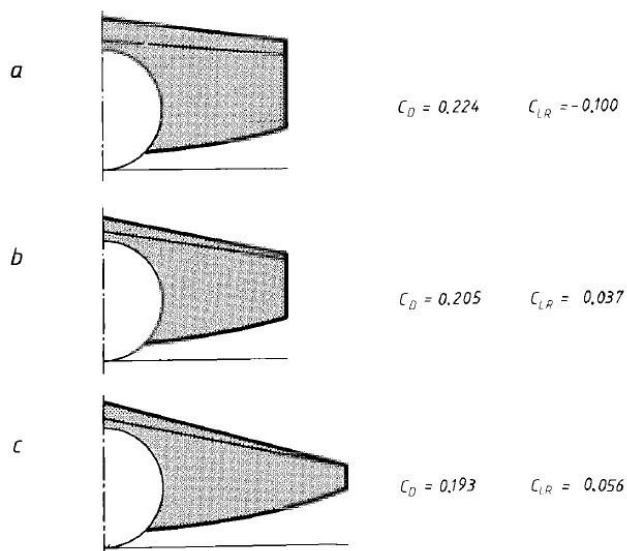
Слика 37. Аеродинамички коефицијент различитих конструкција предњег краја возила

Данашња возила ретко имају заобљен предњи крај, због одређених компоненти које је неизводљиво поставити и других елемената, као што су издувни систем и остали битни елементи мотора који морају бити изложени ваздушним струјама. Отпор ваздуха може се свести на минимум конструисањем одређених закрилца који одводе ваздух. То такође смањује силе узгона (слика 38), а самим тим смањује и клиренс испод возила. Спуштањем предњег краја возила, отпор ваздуха се умањује.



Слика 38. Узгон предње осовине као функција односа брзине вожње и примена аеродинамичких елемената (Porsche 911 Carrera)

Слика 39 пореди различите пресеке задњег краја возила. Неопходно је постићи мали траг, и он се може добити наглим или постепеним сужавањем задњег краја возила [16].



Слика 39. Аеродинамички коефицијент различитих конструкција задњег краја возила

Утврђено је да сви покуси смањивања отпора ваздуха утичу на силе узгона возила. За безбедност и управљивост у вожњи, возила високих перформанси морају имати

негативне вредности узгона, па се морају изабрати најефикаснија решења, она која дају маскимални однос c_L/c_D .

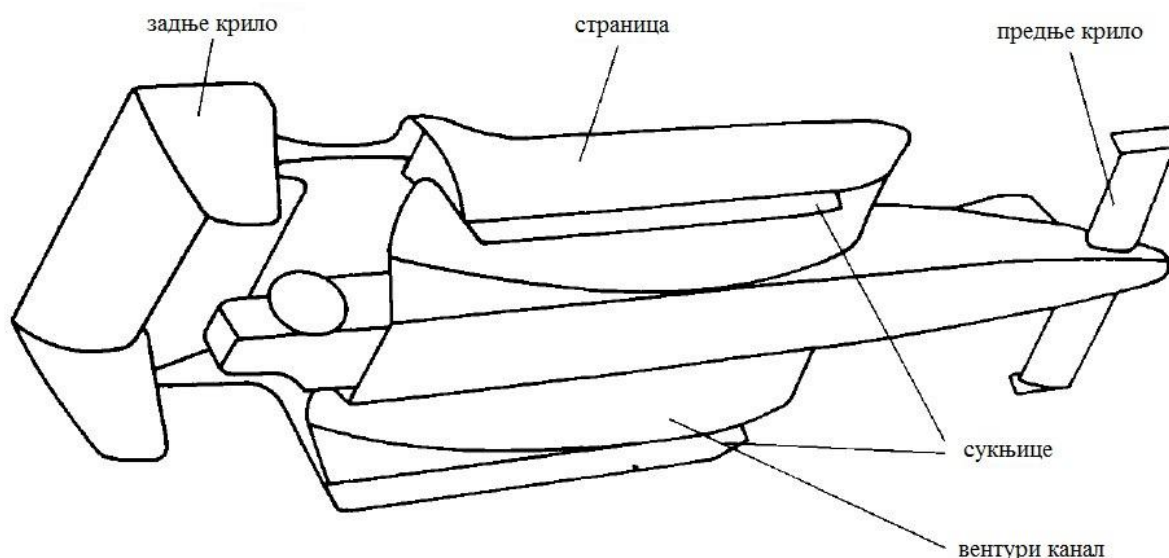
Постоје 3 главна начина постизања негативног узгона:

- варијација основне конфигурације возила,
- монтажа негативно косих закрилца,
- добар ефекат тла.

Основна конфигурација возила, за минималне и негативне вредности узгона, мора да има конкавни предњи крај возила, глатку горњу површину и повишен задњи крај [13]. Други начин за добијање негативне вредности узгона је да се добије негативни нападни угао предњег дела возила или подизање задњег краја.

Високе негативне вредности узгона до $c_L = -1$ добијају се негативним закошавањем закрилца, ефекат који се повећава са клиренсом изнад каросерије возила када оно уђе у несметан проток ваздуха. Додатне силе могу се добити позиционирањем закрилца далеко иза задње осовине или далеко испред предње осовине, колико је то прописно могуће.

Ефекат тла базира се на теорији да под возила и површина пута су изложени Вентури ефекту где се стварају мали притици испод возила који дају негативне вредности узгона. Негативан притисак се одржава бочним сукњицама фиксираним за возило и који неприметно додирују тло (слика 40). Предност ефекта тла је да омогућава веома високе негативне вредности узгона са повољним вредностима отпора ваздуха.

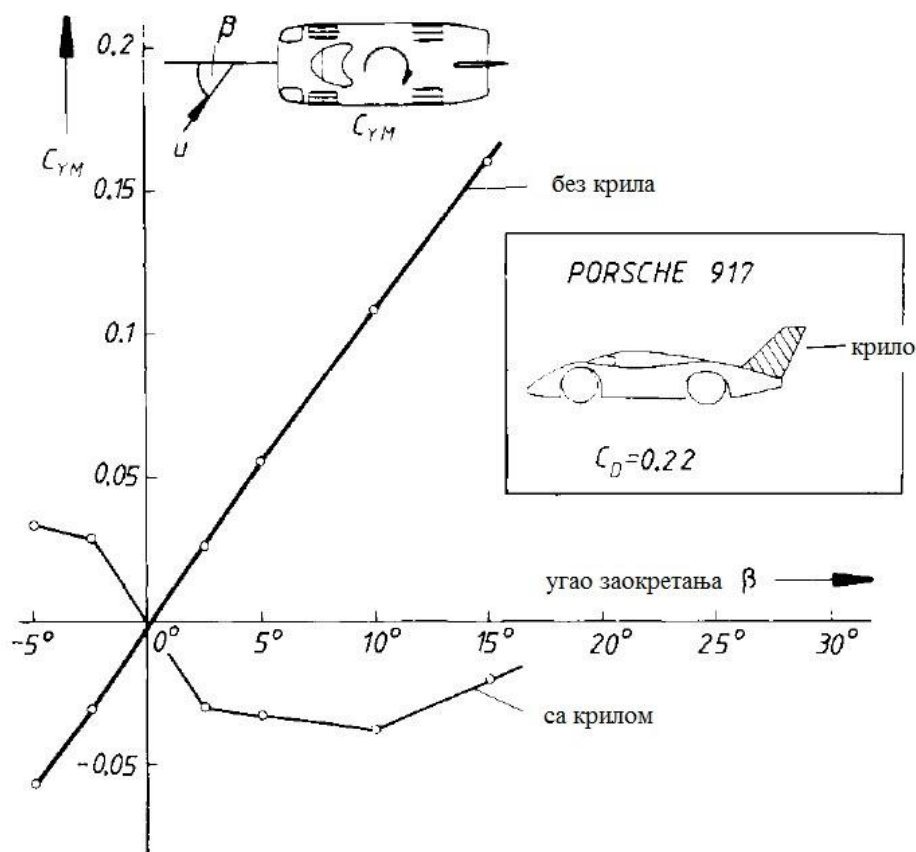


Слика 40. Шематски приказ пода, са ефектом тла, тркачког аутомобила са једним седиштем [17]

4.4.2 Управљивост

Возила која достижу велике брине кретања, као што су тркачки аутомобили или рекордна возила, морају да имају велику стабилност како бих појачали безбедност и смањили замор возача. Возила би требало да имају релативно велики размак између точкова и негативну вредност узгона који треба да буде присутан на свим осовинама. Такође би требало да буду више изражене на задњој осовини него на предњој како би произвеле већу подуправљивост возила са повећањем брзине.

Осетљивост на бочне ветрове може се свести на минимум лоцирањем центра притиска иза тежишта возила, стварајући супротан моменат који је под утицајем заокретања возила услед ветра. Ово се може постићи од стране вертикалних крила, који генеришу момент заокретања изнад вертикалне осе (слика 41).



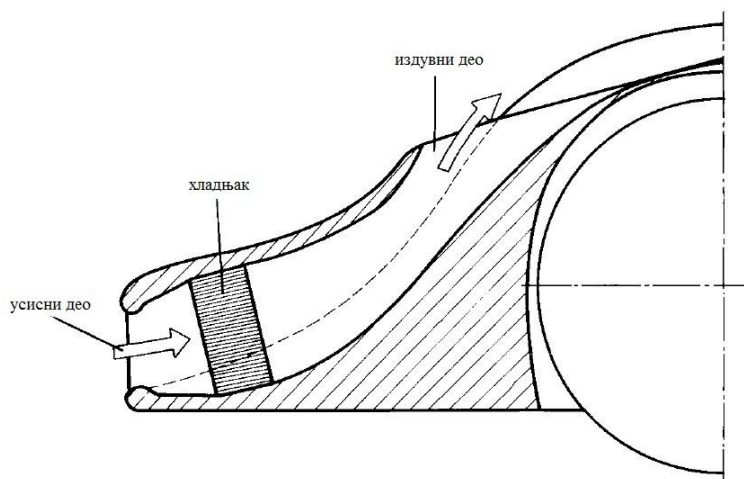
Слика 41. Утицај вертикалног крила на момент заокретања возила

4.4.3 Хлађење и вентилација

Иако постоје опште смернице за оптимално пројектовање улаза ваздуха, локација хладњака и вентилационих отвора, свако возило захтева своја решења према посебним условима, изгледу и функцији.

Велики обим протока ваздуха кроз хладњак постиже се креирањем највеће могуће разлике притиска на улазу и излазу из хладњака, где ваздушне струје великим брзинама пролазе кроз систем за хлађење омогућавајући оптималну радну температуру мотору.

Препоручљиво је конструисати највећи могући хладњак мотора, са контролисаним усисним делом [18]. Да би се минимизирао повећан отпор ваздуха због хлађења мотора, потребно је на усисном делу уградити дифузор за релативно споре брзине протока ваздуха кроз саће хладњака [19]. Загрејан ваздух се тада убрзава и избацује (слика 42). Овакав систем би се могао користити да произведе потисак ваздуха, али у пракси је то неизводљиво због недостатка простора [20].



Слика 42. Висока ефикасност распореда хладњака

Најпогодније место за позиционирање хладњака је на предњем крају возила. Позиционирање усисног дела на стагнационој тачки и издувног дела на површину са негативним притиском изазива стварање великог протока ваздуха услед разлике притиска. Даља предност је да негативни притисак, испод возила, није под овим утицајем. Једна од главних недостатка је ограничен простора на предњем крају возила, што ограничава могућности оптимизације протока ваздуха.

Рекордна возила, намењена за кратке стазе, могу да функционишу без система за хлађење, што омогућава смањење коефицијента отпора..

4.5 Посебни проблеми

4.5.1 Пролазно време и потрошња горива

Један од главних циљева тркачких аутомобила је да се постигне најкраће могуће пролазно време. Без обзира на тип мотора и каросерије, пролазно време зависи од односа c_L/c_D . Максимална брзина може да се постигне смањивањем коефицијента отпора ваздуха, али је то претежно праћено мањим негативним коефицијентом узгона и смањеним брзинама при кретању возила у кривини. Тестирање пута и прорачуни су потребни како би се одредиле оптималне вредности возила за одређену стазу.

Високе негативне вредности узгона повећавају отпор ваздуха што изазива ниску економичност горива, више зауставних пуњења горивом, а самим тим и губитак на времену. У најгорем случају може бити немогуће ускладити потрошњу горива омогућавајући само одређену количину горива потребног за трку. Из тог разлога потребно је проценити колико је степен негативног узгона потребан за дату количину горива. Потребно је предузети највеће могуће мере како би се постигле негативне вредности узгона, односно да однос c_L/c_D буде што већи.

4.5.2 Достижање брзине звука

Приликом пројектовања рекордних возила намена им је била да достигну приближне брзине звука, па се тако компресија ваздуха више није могла занемарити. Потребно је предузети посебне мере, узимајући као пример рекордно возило "Плави Пламен" (Blue Flame) [21].

Године 1970, возило на ракетни погон "Плави Пламен" (слика 21) достигло је рекордну брзину кретања од 1001,67km/h, повећавајући брзину од 0,5 на 2 маха (M) и подижући коефицијент отпора ваздуха до 200% (слика 43). Због тога посвећено је велика пажња каросерији возила са малим вредностима отпора ваздуха и изузетно танаким основним делом и шилјатим предњим крајем возила. Предњи точкови су интегрисани у телу возила како би се смањила чеона површина.



Слика 43. Повећање коефицијента отпора "Плавог Пламена" у зависности од Маховог броја [21]

Да би се обезбедила способност управљања при свим брзинама, силе узгона су биле у потпуности изостављене. Међутим, са пробијањем звучног зида јавио се занимљив феномен: негативни притисак настао испод возила у близини тла, преокренуо се у позитивне силе узгона. Ово се објашњава чињеницом да у подзвучном распону, ваздух између возила и шасије, се убрзава, стварајући низак притисак. При пробијању звучног зида, ударни таласи изазивају подизање предњег краја возила, производећи раст притиска који је трансформисан у силу узгона. Дакле, са пробијањем звучног зида, јављају се вертикалне силе које мењају нападни угао возила, изазивајући нестабилност.

4.5.3 Избачени точкови

Возила са једним седиштем (погледати поглавље 4.1) опремљена су са избаченим точковима, изложени струјању ваздуха. Тестови из ваздушних тунела открили су следеће информације [22]:

- коефицијент отпора ваздуха ротирајућег точка може се смањити монтирањем поклопца точка - дефлектора,
- ротирајући точкови имају нешто нижи коефицијент отпора ваздуха од стационарних,
- точкови производе силе узгона.

Приликом разматрања целог возила, четири точка утичу на шасију возила изазивајући компликован ефекат, који још увек није у потпуности испитан у аеродинамичким тунелима због проблема са симулацијом тла. Да би се смањили ови ефекти, потребно је уградити дефлекторе испред предњих точкова и између предњих и задњих точкова како бих одводили ваздушне струје које изазивају турбуленцију.

4.5.4 Развојне методе и симулације

Развој возила високих перформанси у аеродинамичним тунелима поседују проблеме који су више истакнути за разлику од развоја друмских возила из следећих разлога:

- Аеродинамични тунели у којима се врше испитивања обично нису дизајнирани за брзине од 250-400km/h које достижу спортска и тркачка возила и брзине преко 1000km/h за рекордна возила. Па са тим специјални ефекти као што су стварни однос ослањања возила на подлогу и могуће изобличење каросерије возила под утицајем бочних ветрова се не може снимити.
- Гранични слој, који се прави на површини тла приликом теста, утиче на услове протока ваздушних струја испод возила и не може се занемарити, због знатног нижег клиренса тркачких и рекордних возила у поређењу са осталим друмским возилима. Гранични слој смањује проток ваздуха испод аутомобила и нису исти услови као на путу. Тако да настале силе, претежно вертикалне, се не могу прецизно одредити.

- Симулација ротације точка у аеродинамичним тунелима је тешко због озбиљних проблема преноса снага са точка на подлогу. Исправна репродукција услова струјања ваздуха око точка је од посебног значаја за возила са избаченим точковима.

У покушају да се елиминишу последња два проблема, посебни модели аеродинамичких тунела су развијени. Да би се возило задржало у месту приликом мерења постављају се одређени подупирачи на бочним странама точка. Површина на којој стоји возило опремљена је покретним тракама које се покреће истом брзином као и брзина ветра. Точкови нису повезани са телом али су осигурани са спољашњим елементима и вођени од стране покретне траке [23]. Недостаци овог решења су да силе које делују на точкове се не могу измерити, утицај добијених података зависи од елемената ослањања који одржавају возило у равнотежи, и бочни ветар може се симулирати само компликованим техничким средствима.

4.6 Будући трендови развоја возила високих перформанси

Социјално-економски фактори као и технички напредак ће играти важну улогу у будућем развоју аутомобилске индустрије. На основу прошлости и садашњости технологије, могуће је идентификовати неке трендове у будуће примене аеродинамике на возила високих перформанси.

Спортска возила

Да би се побољшала економичност потрошње горива, учиниће се додатни напори како би се смањили отпоре ваздуха на возилу, што је достижно, смањујући чеону површину возила као и коефицијент отпора ваздуха.

За производњу аутомобила, неопходна је постићи нулу укупне вредност узгона, што је у основи усклађено са малим отпором ваздуха, а ипак силе узгона задње осовине би требале да буду ниже од предњих да бих помогле управљању и стабилности возила при великим брзинама.

Најбоље могуће решење минималног отпора ваздуха и ниске осетљивости бочног ветра ће бити строга потреба будућег дизајна аутомобила.

Тркачка возила

Очигледан развој ће бити под снажним утицајем будућих тркачких прописа. Тренутни тренд ставља акценат на потрошњу горива. Овај фактор би могао да стави тачку на утицај негативног узгона посматраног у току последњих година.

Рекордна возила

Пробијањем звучног зида био је циљ који је дуго био тражен и који је најзад постигнут. Даље повећање брзине ће бити ограничено због недовољно дуге стазе која је потребна да возило развије брзину, па ће се ту развој и зауставити. Нагласак би уместо тога био стављен на остваривање уштеде горива на великим средњим брзинама кретања, чиме се постиже развој производње аутомобила.

5. Закључак

Утицај бочног ветра на возило представља поремећај система возило-возач који може да варира од тога што може да буде губитак само комфора при опасним карактеристикама возила. Док се возило може релативно лако описати, возач се може симулирати само преко идеализованог модела који нема прилагодљиве квалитете као прави возач. Симулација возача је област која се мора истражити у будућности.

Возила високих перформанси су, пре свега, возила са великим односом снаге и тежине. Велика убрзања, успорења и управљивости су од виталног значаја, нарочито за спортска и тркачка возила. Основне категорије поделе возила високих перформанси су: спортска возила, тркачка возила и рекордна возила.

Спортска возила су намењена за свакодневну употребу на јавним путевима са великим односом снаге и тежине, ниског тежишта и компактности које има предност над носивошћу и, у извесној мери, удобности у вожњи, супериорна убрзања, управљивости и кочење.

Тркачка возила претежно се такмиче са сличним возилима на посебним стазама или путевима затвореним за јавни саобраћај. Она су дизајнирана са специфичним правилима и прописима како бих обезбедила максималне перформансе у погледу убрзања, максималне брзине, кочења и управљања.

Рекордна возила су још више ограничена у њиховој употреби, те су обично дизајнирана да постигну максималне брзине или комбинацију брзине и економичности са аспекта пређених километара.

Будућност ових типова возила зависиће од конструктивних решења у смањењу отпора ваздуха, потрошње горива, прописа који се представљају пред возилом као и од саме безбедности возача.

Литература

- [1] Hucho, W.-H., Janssen, L.J., Emmelmann, H.-J., *The Optimization of Body Details—A Method for Reducing the Aerodynamic Drag of Vehicles*. SAE Paper 760 185, Detroit, 1976.
- [2] Davenport, A.G., 'Some aspects of wind loading'. Transactions of the Institute of Canada. Paper No. EIC 63-CIV-3.
- [3] Bitzl, F., 'Die Einwirkung von Seitenwindkräften auf den Strassenverkehr. *Zeitschrift für Verkehrssicherheit*, No. 3, 1961, and No. 2, 1962. Dr. Arthur Tetzlaff-Verlag, Frankfurt/M.
- [4] Sorgatz, U., Buchheim, R., 'Untersuchungen zum Seitenwindverhalten zukünftiger Fahrzeuge'. *ATZ*, 84, 1982, pp 11-18.
- [5] Emmelmann, H.-J., *Einfluss der Luftkräfte auf Fahrdynamik, unfallträchtige Fahrsituationen*, In *Technologien für die Sicherheit im Strassenverkehr* (BMFT) TÜV Rheinland GmbH, Köln 1976, pp 308-311.
- [6] Fiala, E., 'Lenkreaktionen bei Seitenwind'. *VDI-Zeitung*, Vol. 108, 1966, pp 1333.
- [7] Gnadler, R., 'Umfassendes Ersatzsystem zur theoretischen Untersuchung der Fahreigenschaften von vierrädrigen Kraftfahrzeugen'. *Automobil Industrie*, Vol. 16, 1971, pp 75-84.
- [8] Mitschke, M., 'Fahrer—Fahrzeug—Windböen'. *ATZ*, Vol. 71, 1969, pp 347-351.
- [9] Sorgatz, U., 'Simulation of directional behaviour of road vehicles'. *Vehicle Systems Dynamics*, Vol. 5. Swets & Zeitlinger BV, Amsterdam, August 1975.
- [10] Niemann, K., 'Messungen und Berechnungen über das Regelverhalten von Autofahrern'. PhD Thesis, TU Braunschweig 1972.
- [11] Flegl, H., Bez, U., 'Aerodynamics—conflict or compliance in vehicle layout?' Impact of Aerodynamics on Vehicle Design, *Int. J. Vehicle Design*, SP3, 1983, pp 9-43.
- [12] Flegl, H., 'Die Fahrleistungsgrenzen heutiger Rennwagen—erläutert am Beispiel des Porsche 917/10 Can Am'. Kolloquium über Industrieaerodynamik, Part 3: Aerodynamik von Strassenfahrzeugen, pp 141-152, Aachen, 1974.
- [13] Braess, H.-H., Burst, H., Hannes, R., Hamm, L., 'Verbesserung der Fahreigenschaften von Personenkraftwagen durch Verringerung des aerodynamischen Auftriebs'. *ATZ*, Vol. 77, 1975, pp 119-124.
- [14] Romberg, G.F., Chianese, F., Lajoie, R.G., *Aerodynamics of Race Cars in Drafting and Passing Situations*. SAE Paper 710213, Detroit, 1971.
- [15] Flegl, H., 'Die Aerodynamische Gestaltung von Sportwagen'. *Christophorus*, No. 98, 1969, pp 18-19.
- [16] Hucho, W.-H., 'The aerodynamic drag of cars, current understanding, unresolved problems, and future prospects'. In Sovran, G., Morel, T., Mason, W.T. (Ed.): *Aerodynamic Drag Mechanisms of Bluff Bodies and Road Vehicles*. Plenum Press, New York, 1978.
- [17] *Auto-Jahr* No. 27, Edita, Lausanne, 1979/80.
- [18] Larrabee, E., 'Aerodynamics of road vehicle or aerodynamics as an annoyance'. Second AIAA Symposium: The Aerodynamics of Sports and Competition Cars, Los Angeles, May 1974.
- [19] Bošnjakovic, F., *Technische Thermodynamik, Part 1*, Verlag Theodor Steinkopff, Dresden, 1967.
- [20] Amato, G., 'Reaction thrust from a vehicle radiator'. *Automotive Engineer*, December 1980, pp 67-68.

- [21] Torda, T.P., Morel, T.A., 'Aerodynamic design of a land speed record car'. /. *Aircraft*, Vol. 8, No. 12, December 1971, pp 1029-1033.
- [22] Cogotti, A., 'Aerodynamic characteristics of car wheels'. Impact of Aerodynamics on Vehicle Design, *Int. J. of Vehicle Design*, SP3, London, 1983, pp 173-196.
- [23] Fackrell, J.E., *The Simulation and Prediction of Ground Effect in Car Aerodynamics*. Imperial College of Science and Technology, Department of Aeronautics; I.C. Aero Report 75-11, London, November 1975.