

Математичка гимназија

Матурски рад

ИЗ ПРЕДМЕТА ФИЗИКА

Аеродинамика у ауто-индустрији

Ментор

Проф. Драгица Ивковић

Ученик

Вељко Ђурашевић, IV_a

Београд, јун 2021.

Садржај

1 Увод	4
2 Основна својства ваздуха	5
2.1 Хемијска својства ваздуха	5
2.2 Физичка својства ваздуха	5
3 Основне аеродинамичке појаве.....	6
3.1 Ваздушне струје	6
3.2 Одвајање ваздушне струје	7
3.3 Гранични слој	8
3.4 Ламинарно и турбулентно струјање. Рејнолдсов број	8
3.5 Бернулијева једначина	9
3.6 Коандин ефекат	9
3.7 Вентури ефекат	10
4 Аеродинамичке силе које делују на возило	10
4.1 Сила отпора ваздуха.....	10
4.2 Сила вертикалног издизања (узгона) и сила аеродинамичког притиска уз подлогу	12
5 Аеродинамички елементи	13
5.1 Основе понашања аутомобила и њихова ограничења	13
5.1.1 Проклизавање точкова приликом убрзања	13
5.1.2 Подуправљање (енг. understeer)	13
5.1.3 Преуправљање (енг. oversteer).....	14
5.1.4 Генерална нестабилност при великим брзинама	16
5.1.5 Отпор ваздуха	16
5.2 Аеродинамички елементи	17
5.2.1 Предњи браник.....	17
5.2.2 Предњи спојлер (енг. splitter)	18
5.2.3 Раван под.....	18
5.2.4 Дифузор	19
5.2.4 Вентилатор	20
5.2.5 Задњи спојлер.....	20
5.2.6 Генератори вортекса	21

5.2.7 Прагови	22
5.2.8 Још неки аеродинамички елементи.....	22
6 Mercedes-Benz CLR	24
7 Закључак.....	28
Литература	29

1 Увод

Људи, као и друга жива бића на Земљи, константно су у контакту са разним врстама флуида као што су вода, ваздух, итд. Може се слободно рећи да многи флуиди утичу на активности тих живих бића али и на неживу природу. Знамо да под утицајем ваздуха и воде гвожђе рђа. Исто тако знамо да је за опстанак човека неопходан кисеоник који се добија из ваздуха процесом дисања. Непорециво је да флуиди играју велику улогу у животу на Земљи.

Флуиди, као што су вода и ваздух, испуњавају средину у коме се организми крећу и бораве. Самим тим они утичу на само кретање. Као пример можемо узети слободан пад. Познато је да тела у слободном паду, уколико имају довољно простора, достижу неку коначну брзину познату као терминална брзина. То је последица изједначавања силе Земљине теже са силом отпора ваздуха (флуида у коме се тело креће). Као мало боље познат пример можемо навести и пливање. Сви знамо колико је теже кретати се у води него у ваздуху и ту се очигледно може закључити да вода у својству флуида пружа отпор при кретању и на тај начин утиче успоравајући га.

За људе и њихово кретање, најзначајнији флуид је ваздух. Небитно да ли се кретали пешице, бициклом, аутомобилом или авионом, на наше кретање на разне начине утиче ваздух. Наука која проучава кретање ваздуха у односу на чврста тела назива се аеродинамика. Та наука нам помаже да објаснимо како авиони и хеликоптери могу да лете, зашто се аутомобил може кретати већом брзином од камиона упркос значајно бољем односу снаге и масе који карактерише камион.

У овом раду дат је теоријски осврт на ваздух као флуид који утиче на кретање аутомобила, серијских као и тркачких, као и на начине на који се, употребом разних елемената и облика, утиче на разне аспекте који подразумевају повећање перформанси и ефикасности, али и утицаја на еколошке карактеристике возила.

Кратка историја аеродинамике

Појам аеродинамика је грчког порекла и потиче од речи *ἀήρ* (*aéros*) што значи ваздух и речи *δύναμις* (*dynamis*) у значењу сила. Аеродинамика је изузетно комплексна наука која користи аналитичке и експерименталне методе које се међусобно преплићу и употпуњују.

Иако је аеродинамика као наука озбиљно почела да се развија тек у 18-ом веку, рани трагови аеродинамичких концепата датирају из другог и трећег века пре нове ере у списима Аристотела^[1] и Архимедеса^[2]. Први који се бавио аеродинамиком у

модерном смислу био је Исак Њутн^[3]. Он је развио теорију о отпору ваздуха, што је касније и експериментално доказано. Истраживачи су вршили експерименте везане за отпор ваздуха у 18-ом и 19-ом веку, у чему им је доста помогао развој првог ваздушног тунела 1871. године. Бернули^[4] је описао фундаменталан однос између брзине, густине и притиска познатији као Бернулијева једначина^[5].

George Cayley^[6] развио је модеран концепт летелице са фиксним крилима 1799. година. Значајно је што је он у том процесу идентификовао 4 кључне силе везане за летење: силу вертикалног издизања, силу потиска, силу отпора ваздуха и тежину.

Браћа ,Wilbur и Orville, Wright^[7] били су први који су успешно летели моторизованом летелицом 1903. године. Публицитет који је тај лет добио био је значајан за даљи развој аеродинамике као науке.

2 Основна својства ваздуха

2.1 Хемијска својства ваздуха

Ваздух је смеша гасова. Састоји се из:

- азота са око 78% удела
 - кисеоника са око 21% удела
 - аргона са око 0,93% удела и
 - у јако малим количинама из угљен-диоксида, криптона, ксенона, озона, итд.
- Због великог удела азота, за ваздух можемо рећи да је поприлично инертан.

2.2 Физичка својства ваздуха

За проучавање утицаја ваздуха на кретање возила биће нам веома важна његова физичка својства. Нека важнија физичка својства су:

- густина
- притисак

- влажност
- температура
- вискозност и
- струјања.

Густина је по дефиницији однос масе и запремине неког тела или флуида. Најчешће се означава са ρ и њена мерна јединица је $\frac{kg}{m^3}$.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Притисак је бројно једнак јачини силе која делује нормално на неку површину, сведеној на јединицу површине. Означава се малим латиничним словом p , а његова мерна јединица је Паскал ($P = \frac{N}{m^2}$).

$$p = \frac{F}{S}$$

Температура је мера загрејаности тела и има јединицу келвин (К).

Влажност је величина која квантитативно описује количину водене паре у ваздуху.

Вискозност или унутрашње трење представља отпор којим се слојеви флуида супротстављају његовом кретању.

Струјањима ћемо се детаљније бавити у наставку.

3 Основне аеродинамичке појаве

3.1 Ваздушне струје

Када се аутомобил креће око њега струји ваздух. У почетним фазама развоја аеродинамике, визуализација струјања ваздуха око објекта представљала је проблем. Данас постоји више метода визуализације струјања ваздуха. Један од модерних начина подразумева употребу ваздушног тунела и дима или неког другог обојеног флуида. Наиме, ваздушни тунел симулира кретање возила тако што се ваздух покреће помоћу великих вентилатора и струји око возила. Тада се око целог аутомобила или само жељених делова испушта дим и он тада прати струјање ваздуха као што је приказано на слици 1.



Слика 1: Струјање дима у ваздушном тунелу
око возила (Mercedes Benz SLR McLaren)

Данашњи рачунари су доста поједноставили процес визуализације струјања као и његовог анализирања.

3.2 Одвајање ваздушне струје

Повећавање количине дима око жељених делова возила омогућава нам да видимо тачно на који начин ваздух струји око свих делова возила.

Наиме, посматрајући слику 2 можемо лако уочити да ваздух у потпуности пријања уз површину хаубе и крова возила. Овакав начин струјања зове се пријањајуће струјање (енг. Attached flow). Кључна карактеристика овог начина струјања је да се одржава равномерна расподела притиска око дате површине. Такође, уочавамо да се ваздух одваја од возила на његовој задњој страни. Такав начин струјања је одвојиво струјање. Оно је израженије код кратког и одсеченог репа возила. Струја прати контуре каросерије возила док не наиђе на нагло заобљење након чега се одваја. Таква појава доводи до стварања вртлога и одликује се неравномерном расподелом притиска што за последицу може имати повећање силе отпора ваздуха и силе вертикалног издизања возила којима ћемо посветити више пажње у наставку.



Слика 2: Струјање ваздуха око возила (Mercedes Benz SLS AMG)

3.3 Гранични слој

Гранични слој представља формирану зону у близини површине око које опструјава ваздух. Дебљина граничног слоја може значајно да варира, од само пар милиметара са предње стране возила до неколико центиметара око крова. Такође, веома важна карактеристика код појаве граничног слоја је прерасподела брзине ваздушне струје око граничног слоја предмета око ког ваздух опструјава. Када у ваздушну струју убацимо препреку, брзина ваздушне струје у зони око саме препреке ће се мењати. Наиме, у самом додиру молекула ваздуха са самом површином ваздуха, један део молекула се зауставља. Мало даљи молекули успоравају док се удаљени молекули крећу непромењеном брзином. Ову појаву условљава тзв. услов струјања без клизања.

3.4 Ламинарно и турбулентно струјање. Рејнолдсов број

Ламинарно струјање јавља се када флуид тече у паралелним слојевима без њиховог мешања. Њему супротно је турбулентно струјање. Простим речима речено, ламинарно струјање је глатко, док је турбулентно струјање грубо и хаотично.

Као практичну демонстрацију можемо узети дим цигарете. При одвајању, уз минималан утицај страних сила, до одређене висине јавља се ламинарно кретање као што је приказано на слици 1. Но, када се дим довољно удаљи од цигарете долази до појаве турбулентног струјања што се такође може уочити на слици.



Слика1

Ламинарно струјање око возила може се постићи у ваздушном тунелу јер на возило делује само један тип струјања. У реалном окружењу веома је тешко изоловати ламинарно струјање због утицаја много фактора. Неки од тих фактора су: ветар, ваздушна струја од другог возила док се возила мимоилазе или претичу, присуство разних врста објеката при проласку поред, али и нагли прекиди и контуре у каросерији возила.

Рејнолдсов^[8] број је бездимензиона величина која нам може помоћи при описивању ламинарног, односно турбулентног кретања. Узима у обзир зависност протока од густине, брзине, вискозности и дужине на којој се проток одвија. Израчунава се по формули:

$$R = \frac{\rho V l}{\mu}$$

где ρ представља густину флуида, V представља брзину, l представља дужину на којој се врши мерење и μ представља динамичку вискозност флуида.

Критична вредност при којој ламинарно струјање прелази у турбулентно је око $5 \cdot 10^4$, док се потпуно турбулентно струјање у ваздушној средини јавља за вредности око 10^5 .

3.5 Бернулијева једначина

Основни облик Бернулијеве једначине без губитака гласи:

$$\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} + gz = const.$$

Сваки члан представља енергију која у себи садржи јединичну масу флуидне струје.

Члан $\frac{v^2}{2}$, где v представља брзину, представља кинетичку енергију. Члан $\frac{p}{\rho}$, где је p притисак, а ρ густина, представља енергију притиска. Најзад, члан gz , у ком z представља геодезијску висину, врши функцију тзв. положајне енергије.

Бернулијев принцип веома је битан за аеродинамику. Наиме, он каже да када се флуид креће већом брзином он врши мањи притисак на околину.

3.6 Коандин ефекат

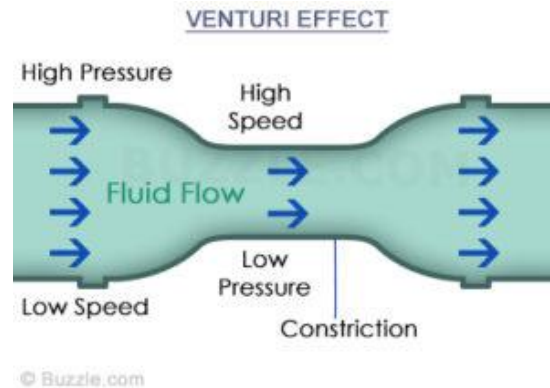
Помоћу једног свима блиског примера увешћемо Коандин ефекат. Свима се сигурно десило да покушају из неке шоље или чаше да преспу течност у другу посуду. Такође, приликом тог покушаја сигурно се некада догодило да дође до подливања, тј. да течност након што напусти унутрашњост прве посуде настави да се креће у додиру с посудом с њене спољашње стране и да наша течност заврши просута по поду или столу.

Описани феномен описао је Хенри Коанда 1934. године. Он је закључио да ако би молекули флуида наишли на заобљену површину, они би формирали такав притисак који би им омогућио да наставе да се крећу у додиру са датом површином. Ипак, овај ефекат неће се јавити увек, нпр. код оштријих ивица. Због тога нам течност не подлива када се сипа из џезве или лончета.

Овај ефекат је значајан функционалност авионско крила, али и за функционалност спојлера код аутомобила којим ћемо се бавити више у наставку.

3.7 Вентури ефекат

Вентури ефекат је појава смањења притиска флуида када се он усмери на област са мањим попречним пресеком. Тада флуид, у складу са Бернулијевим принципом, повећава брзину. Слика 2 илуструје овај ефекат.



Слика 2

4 Аеродинамичке силе које делују на возило

Када се возило креће на њега делују многе силе које утичу на његово кретање. Оне теже да успоре или убрзају кретање возила, а исто тако утичу и на његову стабилност и управљивост. У силе које теже да успоре кретање возила убрајају се силе попут силе отпора ваздуха, сила трења котрљања (између гума и подлоге возила) као и вертикална компонента силе земљине теже када је возило на успону. Те силе називамо силама отпора. Наравно, јасно је да нису све ове силе аеродинамичке. Такође, важно је знати да је сила отпора ваздуха вишеструко већа од силе трења котрљања. У наставку ћемо се бавити силама проузрокованим кретањем возила кроз флуид.

Три аеродинамичке силе које су пресудне за понашање возила на путу су: сила отпора ваздуха (енг. drag), сила вертикалног издизања (енг. lift) као и њој супротна сила аеродинамичког притиска возила уз подлогу (енг. downforce).

4.1 Сила отпора ваздуха

Сила отпора ваздуха представља највећу силу отпора при кретању возила. Укупна сила отпора ваздуха може се поделити на следеће компоненте:

1. Чеону силу отпора ваздуха – Наиме, на самој чеоној површини долази до гомилања честица ваздуха што повећава притисак испред возила. При том не долази до повећања притиска иза возила те са две стране возила постоји разлика у притисцима. Као што знамо, формула по којој се рачуна сила којом флуид делује на неку површину је:

$$F = P * S$$

где P представља притисак, а S површину на коју сила делује. С обзиром да је разлика у предњој и задњој површини возила релативно мала, уочавамо да је чеона сила отпора ваздуха директна последица разлике притисака. Чеона сила отпора ваздуха обично представља око 65% укупне силе отпора ваздуха.

2. Отпор површинског трења (тангенцијални отпор) – Он настаје услед трења честица ваздуха о површине возила и обично чини око 10% укупног отпора ваздуха.

3. Отпор прострујавања – Овај тип отпора јавља се због проласка ваздуха кроз разне системе не возилу као што су: систем за проветравање кабинског простора, систем за хлађење мотора (хладњак), систем за хлађење кочница (механичко преусмеравање ваздуха у простор у коме се налазе кочioni дискови и плочице са сврхом њиховог хлађења и самим тим одржавања оптималних кочioniх способности), итд. Овај тип отпора учествује у укупном отпору ваздуха са око 10%.

4. Отпор дисконтинуитета површине (прекидне зоне површине возила) – Отпор се јавља због појаве турбулентног кретања које је директна последица прекидне зоне возила. Обично сачињава око 15% укупне површине возила. Из овог разлога се при конструкцији возила обраћа доста пажње на умањење прекидних зона и њихово оптимизовање.

Сада када разумемо како настаје сила отпора ваздуха можемо увести следећу математичку формулу за њено израчунавање.

$$F_o = \frac{1}{2} \rho c_w A V^2$$

где ρ означава густину ваздуха, c_w означава коефицијент аеродинамичности возила, A означава чеону површину возила и V означава брзину возила.

Оно што одмах можемо увидети јесте да сила отпора експоненцијално расте са повећањем брзине. То значи да ће се отпор ваздуха четворостручити уколико се брзина возила повећа са нпр. $50 \frac{km}{h}$ на $100 \frac{km}{h}$. Иначе, коефицијент отпора ваздуха може се емпиријски израчунати само за једноставније геометријске облике. С обзиром да је облик аутомобила доста специфичан, та вредност се израчунава експериментално у ваздушном тунелу. Поређења ради, коцкаста цигла има коефицијент отпора ваздуха око 1, док најаеродинамичнији облик који се јавља у природи, кишна кап, има вредност око 0,05. Просечне вредности за серијске аутомобиле варирају у опсегу од 0,2 до 0,4, а за камионе преко 0,5. Вероватно бисте помислили да тркачки и спортски аутомобили имају коефицијент отпора

воздуха испод 0,2. У том случају погрешили бисте јер су те вредности, за нпр. болид формуле 1, износе око 0,7. Но дискусију о томе зашто оставићемо за поглавље о аеродинамичким елементима.

4.2 Сила вертикалног издизања (узгона) и сила аеродинамичког притиска уз подлогу

Сила вертикално издизања је усмерена навише и израчунава се аналогно сили отпора ваздуха:

$$F_L = \frac{1}{2} \rho c_L A V^2$$

Коефицијент издизања, c_L , израчунава се на сличан начин као коефицијент отпора ваздуха. Сила супротна сили вертикалног издизања је сила аеродинамичког притиска уз подлогу. Делује у истом смеру, а супротном правцу. Знак се мења у оквиру коефицијента вертикалног издизања.

Сила коефицијента вертикалног издизања јавља се код већине серијских аутомобила. Она доприноси дестабилизацији возила при великим брзинама. Нпр. када би, хипотетички, та сила била већа од тежине возила, возило би полетело. По том принципу лете авиони.

Насупрот њој, сила аеродинамичког притиска уз подлогу јавља се код малог процента серијских аутомобила и код тркачких аутомобила јер то омогућава ефикаснији пренос снаге на подлогу, стабилност у кривинама и при великим брзинама.

Такође, оно што може бити јако битно за возне карактеристике аутомобила је распоред деловања ове две силе. Кључне тачке деловања су предња и задња осовина, а обе силе рачунају се по истој формули како и укупне силе с тим што се мења коефицијент са коефицијентом издизања одговарајуће осовине.

Теоретски посматрано, уколико би сила притиска уз подлогу при некој брзини била већа од тежине возила, возило би при тој брзини могло да се креће на плафону. У пракси, такви аутомобили постоје. Један од њих је и аутомобил са слике 1.



Слика 1: Brabham BT62

5 Аеродинамички елементи

5.1 Основе понашања аутомобила и њихова ограничења

Како бисмо добро разумели коју функцију обавља неки аеродинамички елемент, морамо разумети због чега се уопште јавила потреба за његовим постојањем. Неки неповољни видови понашања аутомобила су: подуправљање, преуправљање, проклизавање погонских точкова при покушају убрзања, нестабилност при великим брзинама... Неповољна је и појава отпора ваздуха.

5.1.1 Проклизавање точкова приликом убрзања

Ово је проблем који је најизраженији код аутомобила са много снаге. Наиме, сила којом мотор окреће погонске точкове је већа од силе трења датих пнеуматика (слика 6). То за последицу има неефикасно убрзање, непотребно трошење пнеуматика, као и трајна оштећења пнеуматика узрокована ослобођеном топлотом у екстремним случајевима, губитак контроле над возилом услед криволинијског кретања...



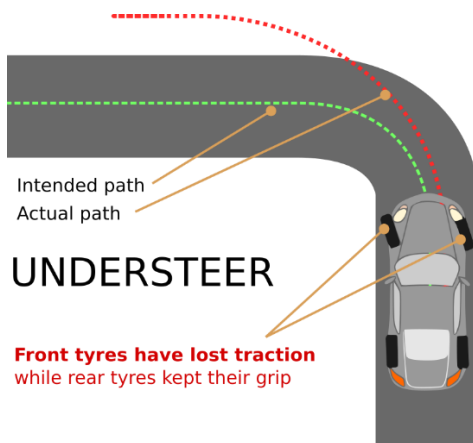
Слика 6: проклизавање задњих (погонских) точкова код модела Dodge Demon

Употребом аеродинамичких елемената који повећавају силу аеродинамичког притиска тела уз подлогу, на осовини погонских точкова, долази до повећања трења на датој осовини што за последицу има повећан максимални пренос снаге код ког не долази до проклизавања.

5.1.2 Подуправљање (енг. understeer)

Подуправљање је појава код које се дешава да приликом скретања у кривину предњи пнеуматици возила нису у стању да омогуће довољно трења да управе

цео аутомобил у кривину, већ долази до тога да само точкови скрену, а аутомобил не испрати њихову путању већ наставља да се креће право или скреће под мањим углом од точкова. За визуелну репрезентацију погледати слику 1. Зеленом бојом означена је нормална путања, а црвеном када долази до подуправљања.



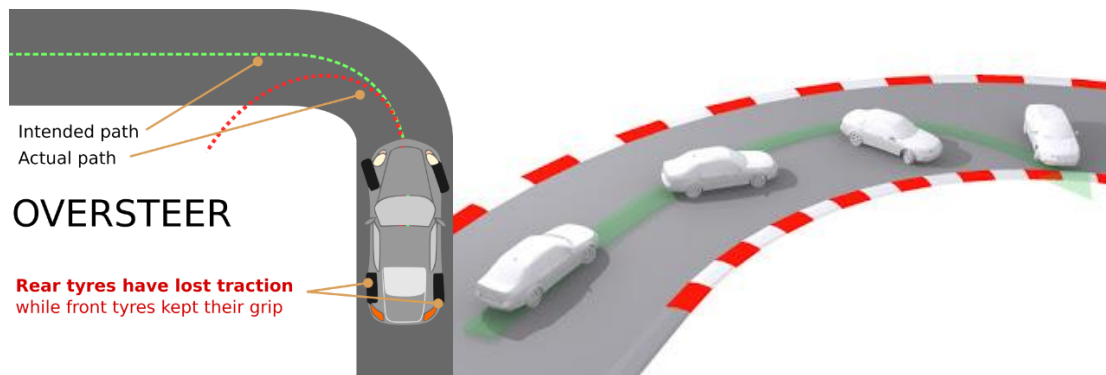
Слика 1

Подуправљање је карактеристично за аутомобиле код којих се мотор налази испред возача и предњи точкови су погонски, а његов узрок може бити повећана брзина, услови смањеног трења попут кише, снега и леда, као и лоше стање самих пнеуматика. Наравно, то што је мотор иза возача не мора да значи да је аутомобил имун на ову појаву. Највећи проблем подуправљања јесте да када се догоди, возач је често немоћан и завршава ван пута. Једино у ситуацијама када је изазивач знатно умањено трење попут снега или леда и када се возач креће јако малим брзинама, можда може бити могуће направити корекцију.

Подуправљање се може предупредити до одређеног нивоа повећањем аеродинамичке силе притиска уз подлогу на предњој осовини јер ће тада предњи пнеуматици имати више трења. Такође се, исто као и преуправљање, може предупредити повећањем масе возила, но то има неповољан утицај на могућност возила да скреће и убрзава, који се не би јавио да је возило лакше.

5.1.3 Преуправљање (енг. oversteer)

До преуправљања долази када при било којој фази кретања кроз кривину, задњи пнеуматици изгубе трење и тада је задњи крај подложен утицају центрипеталне силе. Због тога, задњи крај креће у „претицање“ предњег краја аутомобила. За визуелну репрезентацију погледати слику 2 и 3. Зеленом бојом, на слици 2, означена је нормална путања, а црвеном када долази до преуправљања.



Слика 2

Слика 3

Преуправљање је карактеристично за возила код којих су задњи точкови погонски, а најчешће се јавља када је мотор испред возача јер је тада мала маса на самој задњој осовини и то умањује трење задњих пнеуматика, у односу на аутомобил где је мотор иза возача, односно изнад задње осовине. До проклизавања задњих пнеуматика може доћи на разне начине као што су: закључавање задњих точкова употребом ручне кочнице, услови смањеног трења, преоптерећењем точкова снагом мотора, превелика брзина, промена у нижи степен преноса при криволинијском кретању без усклађивања обртаја мотора и точкова употребом педале гаса (тзв. међугас)... На срећу, када до предуправљања дође, возач често може да остане на путу и ауто поново доведе у стање равнотеже. То се постиже тзв. контрирањем, односно управљањем и оном смеру у ком желите да се крећете. Нпр. у десној кривини треба усмерити точкове улево (слика 4). Нажалост, већини возача ово није природна реакција и они чине управо супротно што доводи до окретања возила. Иначе, стил вожње који промовише ротирање возила као последицу губитка трења на задњој осовини и контрирање, назива се дрифт.



Слика 4

Преуправљање се донекле може предупредити повећањем силе аеродинамичког притиска на задњој осовини јер то омогућује више трења.

5.1.4 Генерална нестабилност при великим брзинама

Генерална нестабилност може се јавити као последица интензивног вртложења иза самог возила. Такође се јавља када су велике вредности силе вертикалног издизања.

5.1.5 Отпор ваздуха

Као циљ, смањење отпора ваздуха, јавља се јер доприноси повећању ефикасности аутомобила односно смањењу потрошње, повећавању максималне брзине али и убрзања возила. У данашње време, када су закони о емисији штетних гасова рестриктивнији него што су икада били, веома је важно да се потрошња смањује на све могуће начине. Посебну пажњу треба посветити електричним аутомобилима јер је тренутно једна од најбитнијих цифара код куповине електричног аутомобила, осим цене наравно, управо колико аутомобил може прећи са једним пуњењем батерије. Тај број је важнији код електричних аутомобила него код аутомобила са моторима са унутрашњим сагоревањем, јер се батерија, за разлику од резервоара, у овом тренутку не може напунити за пар минута на једној од многобројних бензинских станица. Тај број се повећава смањењем отпора ваздуха. Тесла модел Икс (Tesla Model X – види слику 5) има коефицијент отпора ваздуха од само 0.25, што га чини најаеродинамичнијим СУВ возилом на свету.



Слика 5

Ипак, испоставило се да за активности у којима долази до повећања отпора ваздуха (као нпр. вучење приколице), електрични аутомобили драстично губе на ефикасности, за разлику од аутомобила са унутрашњим сагоревањем ког којих је та појава мање изражена.

5.2 Аеродинамички елементи

5.2.1 Предњи браник

Улога предњег браника, поред изгледа, јесте да усмери проток ваздуха преко возила, као и да усмери ваздух ка елементима којима је потребно хлађење попут хладњака мотора, хладњака уља, интеркулера, кочница, итд... На слици 1 испод можемо видети добро дизајниран предњи крај. Између фарова налазе се два симетрична отвора за хлађење мотора. Велики отвор испод њих служи истој сврси, док два мања са обе стране тог отвора служе првенствено за хлађење кочница.



Слика 1: Предњи крај возила Bmw M2 F87

На спортским и тркачким аутомобилима, неретко је да се јаве закрилца на боковима предњег браника (видети слику 2). Та закрилца усмеравају ваздух навише и тиме производе малу количину силе притиска из подлогу.



Слика 2: закрилца на боку браника тркачког возила

5.2.2 Предњи спојлер (енг. splitter)

Предњи спојлер углавном се налази на дну предњег браника возила (видети слику 3), изузев неких тркачких возила код којих не постоји предњи браник где се налази испред предњих точкова (видети слику 4).



Слика 3: предњи спојлер
на моделу Dodge Charger



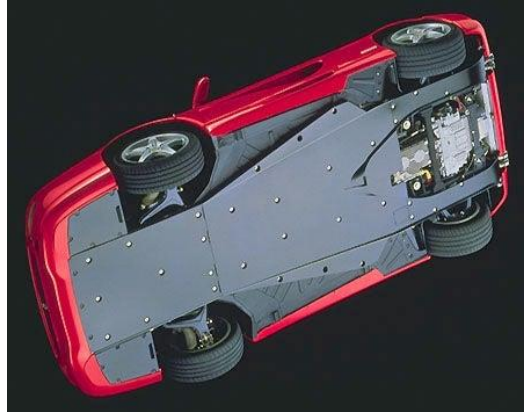
Слика 4: предњи спојлер
на болиду формуле 1

Предњи спојлер повећава област гомилања ваздуха испред возила што повећава отпор ваздуха. Но тај недостатак он надокнађује тиме што усмерава ваздух преко возила. Тај ваздух иде преко возила уместо испод њега и тиме се смањује притисак испод возила, а повећава изнад, што за резултат има повећање силе притиска уз подлогу. Тај ефекат доводи до отпорности возила на подуправљање, о коме смо већ дискутовали, али доприноси и генералној стабилности возила.

5.2.3 Раван под

Када ваздух пролази испод аутомобила, његово кретање може бити веома турбулентно због доласка у контакт са разним компонентама издувног система, вешања, кочионог система, система управљања, итд. Тада долази до повећања отпора ваздуха и успорења кретања ваздуха испод возила, што, као што знамо по Бернулијевом принципу, доводи до повећања притиска испод возила што негативно утиче на понашање возила.

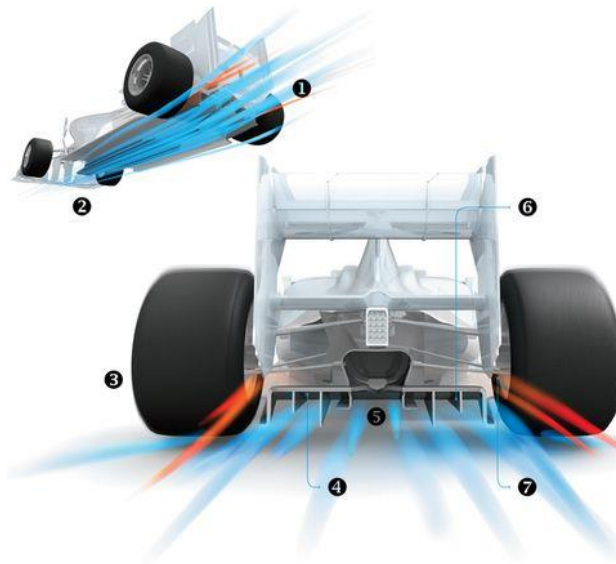
Тада на сцену ступа раван под (слика 6). Његова улога је да олакша пролаз ваздуха и смањи отпор ваздуха, при том повећавајући силу притиска уз подлогу.



Слика 6: раван под код модела Ferrari 355

5.2.4 Дифузор

Дифузор се углавном налази на задњој страни возила (слика 7). У суштини, он је део пода возила. Позициониран је што ближе земљи како би ограничио простор кроз који ваздух може да тече. Тада се, због Вентури ефекта, повећава његова брзина и услед тога, због Бернулијевог принципа, додатно смањује притисак испод возила. То за последицу има повећање силе притиска уз подлогу и тиме се побољшава пријањање возила уз подлогу.



Слика 7: дифузор на болиду формуле 1

Такође, на самом крају возила, дифузор усмерава ваздух навише како би се мирно спојио са ваздухом који путује преко возила, што додатно смањује отпор ваздуха и вртложење. Ваздух тада успорава јер излази из области ограниченог кретања и повећава се његов притисак иза возила.

Паралелни разделници на дифузору служе да усмере ваздух и спрече појаву турбулентног струјања ваздуха.

5.2.4 Вентилатор

Вентилатор уграђен на задњој страни возила има задатак да „усиса“ сав ваздух испод аутомобила и практично створи вакум. На тај начин се смањује притисак и, као што смо до сада пуно пута рекли, повећава се сила притиска уз подлогу.

Вентилатори су ретки и јављају се на само 2 серијска аутомобила, McLaren F1 и GM T.50 (слика 8), као и на једном тркачком, Brabham BT46 (слика 9). Сви имају истог творца, легенду ауто-индустрије, Гордона Мурија (енг. Gordon Murray). Наиме, поменути тркачки аутомобил тркао се у формули 1. Након очигледне доминације, због бољег лежања на путу од конкуренције које му је омогућио вентилатор, болид је на крају био забрањен за употребу. У овом случају је очигледно колико аеродинамичко побољшање може да утиче на перформансе.



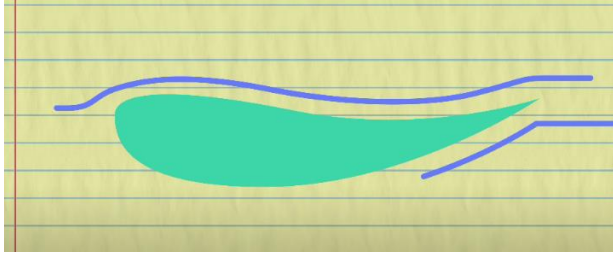
Слика 8: GM T.50



Слика 9: Brabham BT46

5.2.5 Задњи спојлер

Задњи спојлер монтира се са задње стране возила, на поклопац пртљажника или директно на каросерију возила. Његов облик је веома специфичан (погледати слику 9) и доприноси повећању силе притиска уз подлогу.



Слике 9 и 10: облик задњег спојлера (његов бочни пресек) и спојлер на моделу Porsche 911 GT3 RS

Зашто долази до повећања те силе? Наиме, када ваздух наиђе на закривљену површину са доње стране спојлера, он тежи да остане у контакту са њом (Коандин ефекат). Тај ваздух мора да пређе већи пут од ваздуха са горње стране и тада убрзава. То доводи до смањења притиска са доње стране спојлера (Бернулијев принцип) што за последицу има повећање претходно поменуте силе.

По истом принципу функционише и авионско крило, само што је оно контра окренуто (слика 11) и производи силу вертикалног издизања која омогућава лет авиона.



Слика 11: облик авионског крила (бочни пресек)

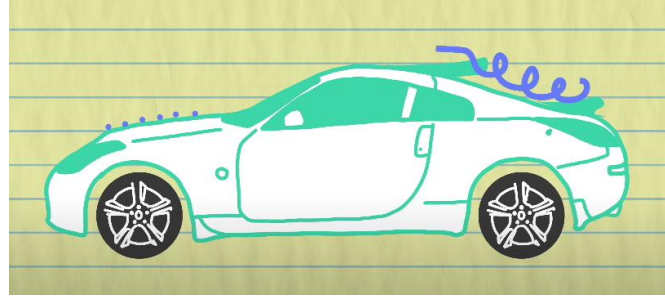
Задњи спојлер код аутомобила може бити фиксни или активни. Активни спојлер, за разлику од фиксног, може да мења угао свог нагиба и тако смањи отпор ваздуха који спојлер природно ствара, када нема потребе за великом вредности силе аеродинамичког притиска уз подлогу. Овакав систем у формули 1 познатији је као ДРС (drag reduction system) и погодан је за употребу на правцима при великим брзинама.

5.2.6 Генератори вортекса

Генератори вортекса (слика 12) монтирају се на сам крај крова како би спречили одвајање ваздушне струје и усмерили ваздух ка задњем спојлеру, повећавајући његову ефективност. При проласку ваздуха кроз генератор стварају се вортекси као на слици 13.



Слика 12



Слика 13

5.2.7 Прагови

Циљ многих аеродинамичких елемената је повећање силе притиска уз подлогу, односно смањење притиска испод возила. Знамо да ће ваздух природно да путује из области вишег у област нижег ваздушног притиска. Када имамо висок притисак изнад возила, а низак испод, на неки начин морамо спречити ваздух изнад возила да се уз бокове возила спусти и продре у област ниског притиска испод. Ту функцију обављају аеродинамични прагови, представљајући директну препреку таквом неповољном кретању ваздуха. Можемо их видети на слици 14.



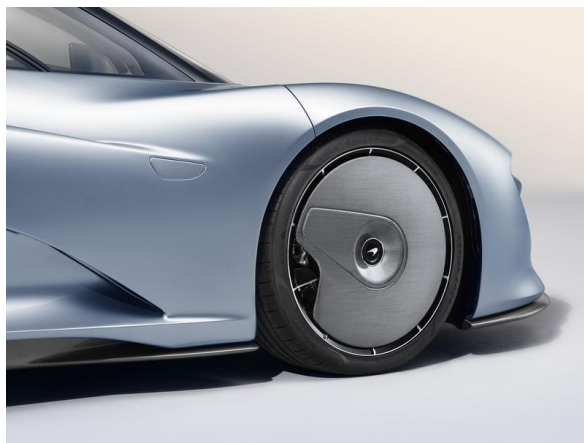
Слика 14: карбонски прагови на моделу Bmw M2

5.2.8 Још неки аеродинамички елементи

Ретровизори су један од елемената који пружају отпор ваздуха. Отпор се може смањити аеродинамичким профилисањем облика при дизајнирању, али и заменом ретровизора камером што је далеко ефикасније (слика 15).



Слика 15: камере уместо ретровизора на електричном возилу Audi E-tron
Точкови возила могу добити аеродинамичнији облик њиховим затварањем са спољње стране (слика 16).



Слика 16: Аеродинамичан точак модела McLaren Speedtail

При усмеравању ваздуха ка кочницама, уколико се тај ваздух из простора унутар точка не евакуише, он може да допринесе повећању силе отпора ваздуха и умањи ефекат хлађења. Тада се на бочно крило додају шкрге (слика 17) које омогућавају ваздуху да побегне и усмерене се по углом тако да допринесу повећању силе притиска уз подлогу.



Слика 17: шкрге за евакуацију притиска из простора
око кочница на моделу Porsche 911 GT3 RS

Пожељно је да сви претходно поменути елементи буди израђени од угљених влакана са циљем смањења тежине.

6 Mercedes-Benz CLR

Овај аутомобил (приказан на слици 1) учествовао је на награди Ле Мана (енг. Le Mans) 1999. године. То учешће запамћено је као последње учешће Мерцедеса на тој трци, јер је више пута долазило до стравичних незгода, у којима на срећу нико није погинуо. Узрок је била комбинација мноштва фактора, од којих је највећи била аеродинамичка конфигурација аутомобила.



Слика 1: Mercedes-Benz CLR

Несрећа се састојала од тога што би аутомобил у погодним условима полетео и потпуно се одвојио од подлоге, притом правећи „салто уназад“ (слика 2). Важно је напоменути да се све ово одиграло на брзинама преко $300\frac{km}{h}$.



Слика 2: Mercedes-Benz CLR у лету

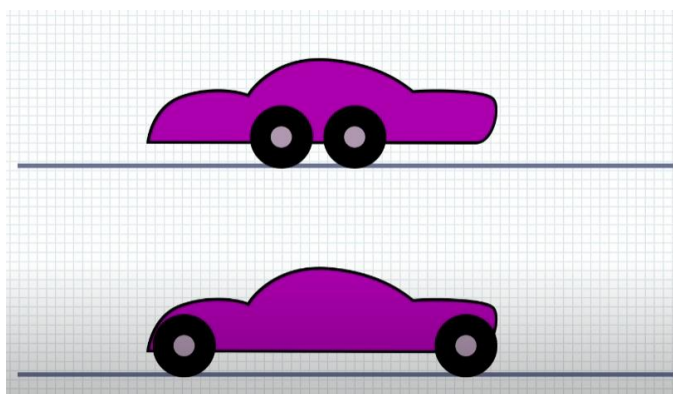
Прво превртање догодило се возачу Марку Веберу (енг. Mark Webber) у току квалификација. Инжењери Мерцедеса мислили су да ће додавањем закрилаца на предњи браник и постављањем тврђих задњих опруга (када будемо објашњавали узрок незгоде биће јасно због чега) решити проблем. Нажалост, исти возач је поново доживео исту незгоду. Срећа је да је аутомобил оба пута слетео на тачкове и није напустио стазу. Возач је заједно са аутомобилом повучен и одлучено је да неће ни почињати трку. Ипак, још два таква аутомобила била су у тиму Мерцедеса. У току круга број 75, после чак 5 сати тркања, долази до неизбежног. Наиме, возача Питера Дамбрека (енг. Peter Dumbreck) задесила је иста судбина као и његовог колегу, само што је овај, у лету, напустио стазу и завршио међу дрвећем. На сву срећу, није било повређених нити погинулих.

Подсећам, ово се дешава на брзинама преко $300 \frac{km}{h}$. Мерцедес је тада повукао и други аутомобил који се тркао.

За разумевање разлога ове несреће морамо се мало боље упознати са аутомобилом. Мерцедес је журио сваки и последњи грам перформанси како би могао да победи. Гурали су дизајн аутомобила толико далеко да су дошли до границе аеродинамичке стабилности. Више фактора је утицало на то:

1. Скраћено међу-осовинско растојање

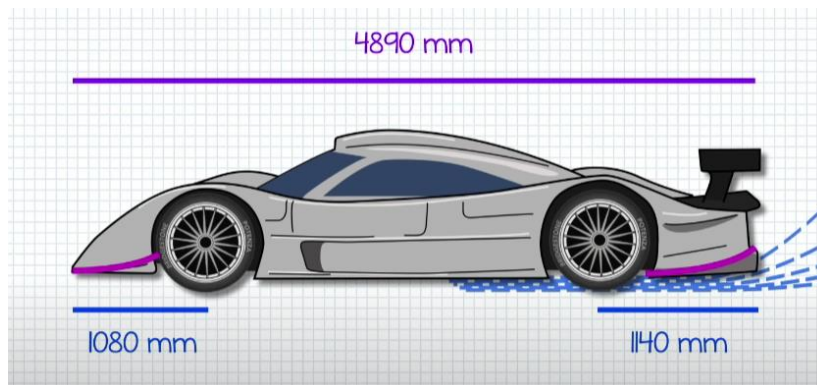
Како бисмо разумели зашто је међу-осовинско растојање битно, замислимо два возила, једно са екстремно малим међу-осовинским растојањем и једно са екстремно великим међу-осовинским растојањем (слика 3).



Слика 3

Можемо уочити да ће аутомобил са краћим међу-осовинским растојањем бити много осетљивији мењању нагиба при утицају инерцијалних и аеродинамичких сила.

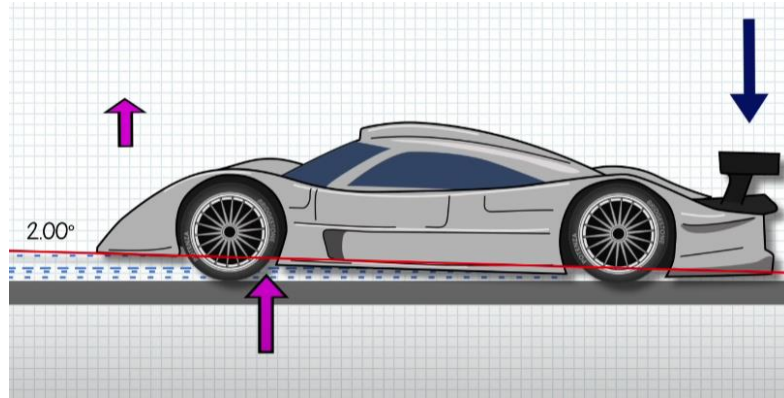
Мерцедес је одлучио са смањи међу-осовинско растојање (слика 4) у односу на друге као би максимално искористио област испред предњих точкова, и иза задњих точкова, као би уградио највеће могуће дифузоре и тиме повећао силу притиска уз подлогу. Ипак, то је донело осетљивост возила и његовог нагиба.



Слика 4

2. Нагиб возила

Нагиб возила код тркачких аутомобила је био негативан. То значи да је аутомобил био нижи у области предње осовине у односу на област задње осовине. То као последицу има да цео аутомобил служи као елемент за генерисање силе притиска уз подлогу, но то се одвија на рачун повећавања силе отпора ваздуха. Мерцедес је, због доминантности дугих праваца на стази, одлучио да нагиб возила буде 0 до -0.7 , за разлику од просечних -2 до -2.5 . Мало пре смо видели да је овај аутомобил, због краћег међу-осовинског растојања, подложен промени нагиба услед деловања спољњих сила. То значи да постоји потенцијал да угао нагиба постане позитиван (слика 5), тј. да предњи део буде виши од задњег, и то значи да би цео под аутомобила могао да постане елемент који, уместо да ствара силу притиска уз подлогу, ствара силу вертикалног издизања. Подсећам, та сила омогућава авионима да лете. Мислим да нам је јасно куда ово води.



Слика 5: позитиван угао нагиба

3. Кретање иза другог аутомобила

Када се испред нас креће други аутомобил, иако то смањује отпор ваздуха на наше возило, он квари проток ваздуха и онемогућава елементима на предњем крају возила да обављају своју функцију и стварају силу притиска уз подлогу. Ипак, због великог задњег спојлера, задњи крај аутомобила и даље је био добро прилепљен за подлогу. Тај дисбаланс илустрован се на слици 5.

4. Неравнине на стази

Наиме, када аутомобил стигне на врх брдашцета, његов угао нагиба је тренутно позитиван. Већ смо продискутовали како то утиче на аутомобил.

5. Облик кабине возила

Облик кабине аутомобила сам по себи је стварао силу вертикалног издизања.

Поменули смо мере које је Мерцедес предузео да неутралише ове појаве. Додавањем закрилаца на предњи крај возила, хтели су да прилепе предњи крај уз подлогу и спрече његово издизање, но то није функционисало када је аутомобил био иза другог возила, а објаснили смо и зашто. А што се тврђих задњих опруга тиче, намера је била да се смањи дужина за који би се скупиле опруге под утицајем великог задњег спојлера, и тиме да се задњи крај одржи вишим од предњег.

Нажалост, то није био довољно. „Мерцедес“ је блиско пратио „Тојоту“ и утицај неравне стазе и значајне промене нагиба утицао је на то да „Мерцедес“ заврши у ваздуху. Видели смо да је на задњи крај спојлер вршио силу на доле, а предњи крај на горе. Моменти ротације тих сила око задње осовине, узроковали су да „Мерцедес“ у ваздуху направи, не један, већ 2 салта уназад. Све то резултовало је незапамћеном незгодом и једном великом лекцијом за Мерцедес.

7 Закључак

Као што смо могли да видимо, аеродинамика је наука која је веома важна у многим областима, а поготову у ауто-индустрији. У време смањења потрошње погонских горива по захтеву европских регулатива, али и померања граница онога што је могуће када је о перформансама реч, аеродинамика игра огромну улогу.

За развој ове науке у ауто-индустрији кључан је био развој ваздушног тунела и рачунара који су омогућили тестирање и откривање начина за побољшања у областима стабилности, ефикасности и удобности.

Видели смо да неправилно манипулисање аеродинамичким елементима може имати катастрофалне последице, што нам показује колико је важно познавање и правилно баратање аеродинамиком. Самим повећањем аеродинамичке стабилности, у протеклом веку спашено је ко зна колико стотина хиљада људских живота. Напредак у осталим областима ауто-индустрије, као што су нпр. погонски агрегати, незамислив је без напретка аеродинамике.

Са свим новитетима у ауто-индустрији, попут електричних аутомобила и аутомобила са погоном на водоник, ко зна колико ће још напредовати аеродинамика и где су горње границе ове области.

Литература

- [1] Race Car Aerodynamics: Designing for Speed Bentley Publishers 1995 ISBN: 0-8376- 0142-8
- [2] Маша Букуров МЕХАНИКА ФЛУИДА – прва књига, Нови Сад, Факултет техничких наука 2015.
- [3] Инж. Др Светополк Пивко ПРИМЕЊЕНА АЕРОДИНАМИКА, Београд 1949.
- [4] https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_aerodynamics#:~:text=Early%20records%20of%20fundamental%20aerodynamics,begin%20until%20the%2018th%20century.&text=Aerodynamics%20work%20throughout%20the%2019th,heavier%2Dthan%2Dair%20flight. Приступљено 1. април 2021.
- [5] Наташа Чалуковић ФИЗИКА 2 – уџбеник за 2. разред Математичке гимназије Круг, Београд 2015
- [6] https://www.youtube.com/watch?v=OnUFE0Uqd80&list=PLCCBinAhNIUwokCC1CTEVdp_OdKWOi9OL&index=6&t=649s Приступљено 5. априла 2021.
- [7] https://www.youtube.com/watch?v=iL4gMpZolsU&list=PLCCBinAhNIUwokCC1CTEVdp_OdKWOi9OL&index=9&t=548s Приступљено 7. априла 2021.
- [8] https://www.youtube.com/watch?v=ZFEzMKYjShc&list=PLCCBinAhNIUwokCC1CTEVdp_OdKWOi9OL&index=3 Приступљено 7. априла 2021.
- [9] https://www.youtube.com/playlist?list=PLCCBinAhNIUwokCC1CTEVdp_OdKWOi9OL Приступљено 7. априла 2021.
- [10] https://www.youtube.com/watch?v=qvDerbIU-uY&list=PLCCBinAhNIUwokCC1CTEVdp_OdKWOi9OL&index=5 Приступљено 7. априла 2021.