

O‘ZBEKISTON RESPUBLIKASI
OLIY TA’LIM, FAN VA INNOVATSIYALAR VAZIRLIGI

TERMIZ DAVLAT MUHANDISLIK VA
AGROTEXNOLOGIYALAR UNIVERSITETI
“TRANSPORT MUHANDISLIGI VA LOGISTIKA”
KAFEDRASI

Qo‘lyozma huquqida

UDK:_____

SHAVKATOV FURQAT SHAVKAT O‘G‘LI

“KUZOV PARAMETRLARINI TAKOMILLASHTIRISH YO‘LI BILAN
YENGIL AVTOMOBILLARNING AERODINAMIKASINI
YAXSHILASH”

70711401 - Transport vositalari muhandisligi mutaxassisligi bo‘yicha
magistr darajasini olish uchun yozilgan

MAGISTRLIK DISSERTATSIYA ISHI

Ilmiy rahbar

t.f.f.d, dotsent M.R.Karimov

TERMIZ – 2026

70711401 - Transport vositalari muhandisligi mutaxassisligi magistranti
Shavkatov Furqat Shavkat o'g'li "Kuzov parametrlarini takomillashtirish
yo'li bilan yengil avtomobillarning aerodinamikasini yaxshilash"
mavzusidagi magistrlik dissertatsiyasi

ANNOTASIYASI

Mazkur magistrlik dissertatsiyasi ishida yengil avtomobillarning, xususan Chevrolet Cobalt modelining, aerodinamik xususiyatlarini kuzov parametrlarini takomillashtirish, jumladan orqa spoyler o'rnatish orqali yaxshilash masalasi ko'rib chiqilgan.

Tadqiqot davomida zamonaviy CFD (Computational Fluid Dynamics) usuli – OpenFOAM dasturiy ta'minoti yordamida Chevrolet Cobalt avtomobilining ikkita modeli: oddiy (seryali) model va orqa spoyler o'rnatilgan model uchun aerodinamik hisoblashlar amalga oshirildi. Blender 3D modellashtirish dasturida avtomobil modeli yaratildi, STL formatiga eksport qilinib, OpenFOAM muhitida snappyHexMesh to'r yaratuvchi va simpleFoam solveri yordamida 90 km/h tezlikda hisoblashlar bajarildi.

Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatdiki, orqa spoyler o'rnatilganda qarshilik koeffitsienti (C_d) taxminan 2,55% ga kamayadi, Ko'tarilish koeffitsienti (C_l) esa 16,7% ga pasayadi. Bu esa avtomobilning yuqori tezliklarda haydash barqarorligini va yer tutish xususiyatini sezilarli darajada yaxshilaydi. Iqtisodiy hisob-kitoblar asosida spoyler o'rnatish natijasida yiliga taxminan 27 litr yoqilg'i tejaliishi va O'zbekistondagi benzin narxlari bo'yicha yiliga 324 000 so'm pul tejam bo'lishi aniqlandi.

Tadqiqot natijalari avtomobil servis korxonalarida, muhandislik loyihalash bo'limlarida va transport vositalari texnologiyasi bo'yicha ta'lim muassasalarida amaliy qo'llanishi mumkin.

Kalit so'zlar: aerodinamika, qarshilik koeffitsienti, Ko'tarilish koeffitsienti, CFD, OpenFOAM, spoyler, Chevrolet Cobalt, kuzov parametrlari, yoqilg'i tejami.

70711401 – Master’s thesis of the master’s student of the specialty of vehicle engineering Shavkatov Furqat Shavkat o‘g‘li on the topic “Improving the aerodynamics of passenger cars by improving body parameters”

ANNOTATION

This master's dissertation examines the improvement of aerodynamic characteristics of passenger vehicles, specifically the Chevrolet Cobalt model, through the optimization of body parameters, including the installation of a rear spoiler.

During the research, aerodynamic calculations were performed for two models of the Chevrolet Cobalt: a standard (serial) model and a model equipped with a rear spoiler, using the modern CFD (Computational Fluid Dynamics) method via the OpenFOAM software package. A 3D model of the vehicle was created in Blender, exported to STL format, and computations were carried out in the OpenFOAM environment using the snappyHexMesh mesh generator and the simpleFoam solver at a speed of 90 km/h.

The research results demonstrated that the installation of a rear spoiler reduces the qarshilik coefficient (C_d) by approximately 2.55% and decreases the Ko‘tarilish coefficient (C_l) by 16.7%. This significantly improves the vehicle's driving stability and ground contact at high speeds. Based on economic calculations, it was determined that the spoiler installation results in fuel savings of approximately 27 liters per year, equivalent to 324,000 UZS in annual savings based on current fuel prices in Uzbekistan.

The research results can be practically applied in automobile service enterprises, engineering design departments, and educational institutions specializing in vehicle technology.

Keywords: aerodynamics, qarshilik coefficient, Ko‘tarilish coefficient, CFD, OpenFOAM, spoiler, Chevrolet Cobalt, body parameters, fuel savings.

MUNDARIJA

KIRISH.....	5
I-BOB. YENGIL AVTOMOBILLARNING AERODINAMIKASINI NAZARIY ASOSLARI VA MAVJUD USULLARNI TAHLIL QILISH.....	9
1.1. Avtomobil kuzovi aerodinamikasining fizik asoslari va ahamiyati.....	9
1.2. Kuzov materiallari, konstruktiv xususiyatlari va aerodinamikaga ta'siri .	18
1.3. Havo oqimining yengil avtomobillar harakatiga ta'sirini o'rganish: adabiyotlar tahlili.....	24
I bob bo'yicha xulosalar	30
II-BOB. CHEVROLET COBALT AERODINAMIKASINI CFD YORDAMIDA EKSPERIMENTAL TADQIQ ETISH	32
2.1. Yengil avtomobillarning harakatlanish vaqtida havo oqimining bog'liqligini aniqlash.....	35
2.2. Chevrolet Cobalt modelini OpenFOAM da hisoblash metodikasi	40
2.3. OpenFOAM muhitida modellashtirish va hisoblash ishlari	42
2.4 HISOBLASH NATIJALARI VA TAHLIL.....	53
2.5. Surxondaryo viloyatida havo oqimi intervaliga oid eksperimental tadqiqotlar.....	56
II bob bo'yicha xulosalar	60
III-BOB. KUZOV PARAMETRLARINI TAKOMILLASHTIRISH VA IQTISODIY SAMARADORLIK TAHLILI	62
3.1. Noqulay ob-havo sharoitlarida avtomobillar samarali harakatlanishini ta'minlash.....	62
3.2. Avtomobil kuzovining yangi konstruktiv sxemasini (spoyler) ishlab chiqish	65
3.3. Tadqiqot natijalari va iqtisodiy ko'rsatkichlarini aniqlash	67
III bob bo'yicha xulosalar	75
UMUMIY XULOSALAR VA TAKLIFLAR	77
FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI.....	78
ILOVALAR	85

KIRISH

So‘nggi yillarda mamlakatimizda transport va transport kommunikatsiyalari sohasini rivojlantirish, tashishlarning yuqori darajadagi xavfsizligini ta‘minlash, transport infratuzilmasini modernizatsiya qilish hamda transport vositalarining ekspluatatsion samaradorligini oshirishga qaratilgan keng ko‘lamli islohotlar amalga oshirilmoqda. Respublikada avtomobilsozlik sanoatini rivojlantirish, zamonaviy va iqtisodiy jihatdan samarali transport vositalarini ishlab chiqarishni kengaytirish davlat siyosatining ustuvor yo‘nalishlaridan biri hisoblanadi. Shu bilan birga, transport vositalarining energiya tejamkorligi, ekologik xavfsizligi va texnik ko‘rsatkichlarini yaxshilash bo‘yicha ilmiy-tadqiqot ishlari ham izchil olib borilmoqda.

Mamlakatimiz avtomobil sanoati so‘nggi yillarda yuqori sur‘atlarda rivojlanib bormoqda. Milliy statistika qo‘mitasining 2025 yil yakunlari bo‘yicha e‘lon qilgan dastlabki ma‘lumotlariga ko‘ra, yil davomida Respublikada turli rusumdagi 457 883 dona yengil avtomobil ishlab chiqarilgan. Mazkur ko‘rsatkich 2024 yilga nisbatan 28,7 ming donaga ko‘p bo‘lib, avtomobilsozlik tarmog‘ida barqaror o‘sinh kuzatilayotganini ko‘rsatadi. Ishlab chiqarilgan avtomobillar orasida Cobalt (161 152 dona) va Damas (93 681 dona) eng katta ulushni egallagan. Shuningdek, Tracker, Onix, KIA va BYD kabi zamonaviy avtomobillar ishlab chiqarish hajmining ortib borayotgani mahalliy avtomobil bozorida raqobatning kuchayib borayotganini ko‘rsatadi. [1]

Tadqiqotning dolzarbligi shundaki, O‘zbekistonda yengil avtomobillarning aerodinamik xususiyatlarini kompyuter modellash tirishlari yordamida tahlil qilish sohasida ilmiy ishlar cheklangan bo‘lib, spoyler o‘rnatishning iqtisodiy va texnik samaradorligini raqamlar bilan isbotlaydigan mahalliy tadqiqotlar deyarli yo‘q.

Tadqiqotning maqsadi: Chevrolet Cobalt avtomobilining kuzov parametrlarini, jumladan orqa spoyler o‘rnatish orqali, takomillashtirish va bu

o'zgartirishning aerodinamik hamda iqtisodiy samaradorligini OpenFOAM CFD dasturi yordamida isbotlash.

Tadqiqot vazifalari:

- avtomobil aerodinamikasining nazariy asoslarini va mavjud tadqiqotlarni o'rganish;
- Blender dasturida Chevrolet Cobalt 3D modelini yaratish va OpenFOAM uchun tayyorlash;
- oddiy va spoylerli modellar uchun CFD hisoblashlar bajarish;
- aerodinamik koeffitsientlarni taqqoslash va tahlil qilish;
- spoyler o'rnatishning iqtisodiy samaradorligini hisoblash va isbotlash.

Tadqiqot ob'ekti: Chevrolet Cobalt yengil avtomobilining aerodinamik xususiyatlari va kuzov parametrlari.

Tadqiqot predmeti: Orqa spoyler o'rnatish orqali avtomobilning qarshilik va ko'tarilish koeffitsientlariga ta'sir ko'rsatish jarayoni hamda iqtisodiy samaradorlik.

Ilmiy yangiligi: O'zbekistonda ishlab chiqariladigan Chevrolet Cobalt avtomobilining aerodinamik xususiyatlari birinchi marta OpenFOAM CFD dasturi yordamida tahlil qilingan va spoyler o'rnatishning iqtisodiy samaradorligi raqamlar asosida isbotlangan.

Amaliy ahamiyati: Tadqiqot natijalari avtomobil ishlab chiqaruvchilari, servis markazlari va avtomobil egalari uchun spoyler o'rnatishning maqsadga muvofiqligi to'g'risida ilmiy asoslangan tavsiyalar beradi.

Avtomobillar sonining ortishi bilan yoqilg'i sarfi, atrof-muhitga chiqarilayotgan zararli moddalar miqdori va transport vositalarining harakat xavfsizligini oshirish masalalari yanada dolzarb ahamiyat kasb etmoqda. Shu sababli zamonaviy avtomobillarni loyihalashda aerodinamik ko'rsatkichlarni yaxshilash asosiy talablardan biri hisoblanadi. Aerodinamika transport vositasining harakatlanish jarayonida havo oqimi bilan o'zaro ta'sirini

o'rganuvchi fan bo'lib, avtomobilning yoqilg'i tejamkorligi, maksimal tezligi, barqarorligi va ekologik ko'rsatkichlariga bevosita ta'sir ko'rsatadi.

Ma'lumki, avtomobil harakatlanayotganda unga turli qarshilik kuchlari ta'sir qiladi. Ularning ichida yuqori tezliklarda eng katta ulushni aerodinamik qarshilik kuchi tashkil etadi. Tezlik oshgani sari havo qarshiligi kvadrat qonuniyat asosida ortib boradi. Natijada dvigatel quvvatining sezilarli qismi aynan havo qarshiligini yengishga sarflanadi. Bu esa yoqilg'i sarfining oshishiga, atmosferaga chiqariladigan zararli gazlar miqdorining ko'payishiga hamda transport vositasining umumiy samaradorligining pasayishiga olib keladi.

Dunyo avtomobilsozlik sanoatida kuzov shaklini takomillashtirish, spoylerlar va aerodinamik elementlardan foydalanish, avtomobil ostki qismini optimallashtirish hamda havo oqimining harakat yo'nalishini boshqarish orqali aerodinamik qarshilik koeffitsientini kamaytirishga alohida e'tibor qaratilmoqda. Bunday tadqiqotlar natijasida zamonaviy avtomobillarda havo qarshiligi koeffitsienti sezilarli darajada kamaytirilmoqda va transport vositalarining energiya samaradorligi oshirilmoqda.

O'zbekiston sharoitida keng tarqalgan va eng ko'p ishlab chiqariladigan avtomobillardan biri bo'lgan Chevrolet Cobalt modeli ham aerodinamik jihatdan takomillashtirish uchun muhim tadqiqot obyekti hisoblanadi. Ushbu avtomobilning ekspluatatsiya ko'lamini kengligi, yo'llardagi ulushi yuqoriligi va uzoq masofali harakatlarda faol qo'llanilishi uning aerodinamik ko'rsatkichlarini yaxshilash bo'yicha tadqiqotlar olib borishni zarur etadi. Kuzov parametrlarini o'zgartirish, xususan, qo'shimcha aerodinamik elementlarni qo'llash orqali havo qarshiligi koeffitsientini kamaytirish va avtomobilning harakat samaradorligini oshirish mumkin.

Hozirgi kunda hisoblash gidrodinamikasi (CFD – Computational Fluid Dynamics) usullari aerodinamik tadqiqotlarni amalga oshirishda keng qo'llanilmoqda. OpenFOAM dasturiy majmuasi yordamida avtomobil atrofidagi havo oqimlarini modellashtirish, bosim va tezlik maydonlarini aniqlash hamda

turli konstruktiv o'zgarishlarning aerodinamik samaradorligini baholash imkoniyati mavjud. Bu esa katta xarajat talab qiluvchi tajriba sinovlarisiz avtomobil konstruksiyasini optimallashtirish imkonini beradi.

Shu munosabat bilan yengil avtomobillar kuzov parametrlarini o'zgartirish yo'li bilan aerodinamik ko'rsatkichlarini yaxshilash, aerodinamik qarshilikni kamaytirish va transport vositalarining ekspluatatsion samaradorligini oshirishga qaratilgan ilmiy tadqiqotlar dolzarb ahamiyat kasb etadi. Mazkur dissertatsiya ishida Chevrolet Cobalt avtomobili misolida kuzovning ayrim konstruktiv parametrlarini o'zgartirish orqali aerodinamik xususiyatlarni yaxshilash masalalari OpenFOAM dasturiy muhiti yordamida tadqiq etiladi.

Dissertatsiya tuzilishi: kirish, uch bob, umumiy xulosalar va takliflar, foydalanilgan adabiyotlar ro'yhatidan iborat bo'lib, jami 84 sahifani tashkil etadi.

I BOB. YENGIL AVTOMOBILLARNING AERODINAMIKASINI NAZARIY ASOSLARI VA MAVJUD USULLARNI TAHLIL QILISH

1.1. Avtomobil kuzovi aerodinamikasining fizik asoslari va ahamiyati

Avtomobilsozlik sanoatida zamonaviy kuzov avtomobilning eng muhim konstruktiv elementlaridan biri hisoblanadi. Kuzov nafaqat avtomobilning tashqi ko'rinishini belgilaydi, balki uning mustahkamligi, xavfsizligi, aerodinamik xususiyatlari hamda ekspluatatsion samaradorligini yuqori darajada ta'minlaydi. Shu sababli kuzov geometriyasi va uning havo oqimi bilan o'zaro ta'siri muhandislik nuqtai nazaridan alohida ahamiyat kasb etadi.

Avtomobil kuzovining aerodinamikasini o'rganish bugungi kunda transport muhandisligining eng muhim yo'nalishlaridan biriga aylangan. Iste'molchilar tomonidan yoqilg'i tejamkorligi, tezlik va xavfsizlikka bo'lgan talabning ortishi, shuningdek ekologik muammolarning kuchayishi aerodinamik takomillashtirishni zarurat darajasiga ko'tardi. Havo oqimini to'g'ri boshqarish orqali avtomobilning energiya sarfini sezilarli darajada kamaytirish va haydash barqarorligini oshirish mumkin.

Avtomobil aerodinamikasi - fan sifatida

Aerodinamika - havoning qattiq jismlar atrofidagi harakatini va bu harakat natijasida yuzaga keladigan kuchlarni o'rganadigan mexanika sohasidir. Avtomobil muhandisligida aerodinamika yo'l transport vositalarining qanchalik xavfsiz, yoqilg'i tejamkor va dinamik bo'lishini belgilashda hal qiluvchi rol o'ynaydi.

Barqaror va energiya tejamkor transportga bo'lgan global talab o'sishi bilan birga, avtomobil unumdorligini boshqaradigan aerodinamik tamoyillarni tushunish tobora muhim ahamiyat kasb etmoqda. Avtomobil tezligi oshgan sari havo qarshiligi kuchi boshqa barcha qarshilik kuchlarini - g'ildirak yurish

qarshiligi, mexanik ishqalanish - ustiga qo'shib, harakatga asosiy to'siqqa aylanadi.

Yaxshi aerodinamika havo oqimining avtomobil yuzasi bo'ylab kamroq qarshilik va ishqalanish bilan o'tishini ta'minlaydi. Bu esa uch xil foyda keltiradi: birinchidan, turbulentlikni kamaytiradi; ikkinchidan, dvigatel sarflaydigan energiyani pasaytiradi; uchinchidan, yuqori tezliklarda barqarorlik va boshqaruvchanlikni oshiradi.

Aerodinamika fani rivoji tarixan aviatsiya va kemasozlik sohalarida boshlangan bo'lsada, XX asrning birinchi yarmidan boshlab avtomobil muhandisligiga ham keng kirib keldi. Dastlabki aerodinamik kuzovlar - Rumpler, Yaray, Alfa-Romeo - shamol tunneli tajribalari asosida emas, balki samolyot va dirijablardan ilhomlanib yaratilgan edi. Keyinchalik hisoblash texnologiyalarining rivojlanishi bilan CFD (Computational Fluid Dynamics) usullari aerodinamik tadqiqotlarning asosiga aylandi.

Asosiy aerodinamik kuchlar

Avtomobil harakatlanayotganda uning kuzoviga uchta asosiy aerodinamik kuch ta'sir ko'rsatadi: qarshilik kuchi, ko'taruvchi kuch (yoki bosuvchi kuch) va yon kuch. Bu kuchlarning qiymati va yo'nalishi kuzov geometriyasiga, harakat tezligiga va havo oqimining xarakteriga bevosita bog'liq.

Qarshilik kuchi.

Harakatlanish yo'nalishiga qarshi ta'sir etuvchi aerodinamik kuch bo'lib, u ikkita tashkil etuvchidan iborat:

- Bosim qarshiligi - avtomobilning old qismida havo to'planib, yuqori bosim mintaqasi hosil bo'ladi; orqa qismda esa past bosimli ajralish zonasi (wake region) vujudga keladi. Ushbu bosim farqi avtomobilni orqaga tortuvchi kuchni hosil qiladi va umumiy qarshilikning 80–90% ini tashkil etadi.

- Sirt (ishqalanish) qarshiligi - havo oqimining kuzov yuzasi bilan bevosita teginishidan kelib chiqadigan ishqalanish kuchi. Bu tashkil etuvchi umumiy qarshilikning 10–20% ini tashkil etadi va kuzov sirt sifatiga bog‘liq.

Ko‘taruvchi kuch.

Zamonaviy yengil avtomobil kuzovi yon tomondan qaraganda samolyot qanotiga o‘xshaydi. Shu sababli harakat paytida avtomobilga yuqoriga yo‘nalgan aerodinamik ko‘taruvchi kuch ta’sir qiladi. Bernulli qonuniga muvofiq, havo kuzovning ustki qismida pastki qismiga nisbatan tezroq harakatlanadi - shu sababli ustki yuzada bosim kamayadi va ko‘taruvchi kuch hosil bo‘ladi. Yuqori tezliklarda bu kuch g‘ildiraklarning yerga bosishini kamaytiradi va shu orqali barqarorlikni pasaytiradi.

Bosuvchi kuch (Downforce). Ko‘taruvchi kuchning aksi - avtomobilni yerga bosuvchi kuch. Spoylerlar, diffuzorlar va boshqa aerodinamik elementlar aynan shu kuchni hosil qilish uchun qo‘llaniladi. Bosuvchi kuch g‘ildiraklarning yer bilan kontaktini kuchaytiradi, tormozlash yo‘lini qisqartiradi va yonlama barqarorlikni oshiradi.

Yon kuch (Side force). Yon shamol yoki qiyshiq oqim sharoitida kuzovga lateral yo‘nalishda ta’sir etuvchi kuch. Kuchli yon shamolda bu kuch avtomobilni yo‘ldan chiqarish xavfini tug‘diradi, shu sababli zamonaviy kuzov dizaynida yon kuch barqarorligiga ham alohida e’tibor qaratiladi.

Havo qarshiligi formulasi va uning tahlili

Havo qarshiligi kuchi quyidagi asosiy formula orqali ifodalanadi:

$$F_d = \frac{1}{2} \times \rho \times C_d \times A \times V^2 \quad (1.1)$$

Bu yerda:

F_d — havo qarshiligi kuchi, N (Nyuton)

ρ — havo zichligi, kg/m³ (standart sharoitda: 1.225 kg/m³)

C_d — aerodinamik qarshilik koeffitsienti (o‘lchamsiz son)

A — avtomobilning frontal (toʻsiq) yuzasi, m^2

V — avtomobil harakat tezligi, m/s

Ushbu formuladan bir necha muhim xulosalar kelib chiqadi. Birinchidan, qarshilik kuchi tezlikning kvadratiga mutanosib: tezlik ikki baravarga oshsa, qarshilik kuchi toʻrt baravarga ortadi. Ikkinchidan, C_d koeffitsienti kuzov shakliga bogʻliq boʻlib, u muhandislar tomonidan loyihalash jarayonida minimallashtirilishi mumkin boʻlgan asosiy parametr hisoblanadi. Uchinchidan, frontal yuza A ham muhim rol oʻynaydi: kuzov kengroq va balandroq boʻlsa, qarshilik kuchi ortadi.

Masalan, Oʻzbekiston magistral yoʻllarida keng tarqalgan 90 km/h tezlikda (25 m/s) harakatlanayotgan Chevrolet Cobalt uchun aerodinamik qarshilik kuchi taxminan 3,500 N ni tashkil etadi. 130 km/h tezlikda esa bu kuch taxminan 7,200 N ga yetadi - yaʼni tezlik atigi 1.44 baravar oshsa, qarshilik kuchi 2 baravardan koʻproq ortadi. Bu esa yuqori tezliklarda aerodinamik optimallashtirish nechogʻli muhimligini koʻrsatadi.

Bernulli qonuni va Reynolds soni

Avtomobil aerodinamikasining ikkita asosiy fizik qonuni mavjud: Bernulli qonuni va Reynolds soni.

Bernulli qonuni statsionar va siqilmaydigan suyuqlik (yoki gaz) oqimida tezlik va statik bosim oʻrtasidagi bogʻliqlikni ifodalaydi: oqim tezlashgan joylarda bosim pasayadi, sekinlashgan joylarda esa ortadi. Bu tamoyil avtomobil kuzovining turli qismlarida bosim taqsimotini tushuntirishda asosiy fizik asos hisoblanadi.

Amaliy misol: avtomobil tom qismidan oʻtuvchi havo oqimi kuzov shaklining konveks (qavariq) boʻlganligi sababli tezlashadi - natijada bosim kamayadi va yuqoriga yoʻnalgan koʻtaruvchi kuch hosil boʻladi. Aksincha, old bamper oldida havo sekinlashadi, bosim ortadi bu stagnatsiya nuqtasi deyiladi.

Reynolds soni (Re) oqimning laminar yoki turbulent ekanligini belgilovchi oʻlchamsiz parametrdir:

$$Re = \rho \times V \times L / \mu \quad (1.2)$$

Bu yerda L - xarakterli o'lcham (avtomobil uzunligi), μ - havoning dinamik yopishqoqligi. Avtomobil uchun Reynolds soni odatda juda katta (millionlar tartibida) bo'lgani uchun oqim to'liq turbulent rejimda harakatlanadi. Chevrolet Cobalt uchun 90 km/h tezlikda $Re \approx 7.5 \times 10^6$ ni tashkil etadi.

Turbulent oqimda energiya yo'qotishlari ko'proq bo'ladi, girdoblar hosil bo'ladi va aerodinamik qarshilik ortadi. Biroq to'liq turbulent oqim muqarrar - muhandislarning vazifasi oqimning kuzovdan ajralish nuqtasini imkon qadar orqaga siljitish va ajralish zo'nasining hajmini minimallashtirishdir.

Chegara qatlami va oqim ajralishi

Avtomobil kuzovi yuzasi yaqinidagi havo qatlami alohida fizik xususiyatlarga ega - bu chegara qatlami (boundary layer) deyiladi. Chegara qatlamida havo tezligi kuzov yuzasidan uzoqlashgan sari noldan erkin oqim tezligiga qadar asta-sekin o'zgaradi. Aynan shu qatlamda no-slip sharti amal qiladi: yuzaga tegib turgan havo zarrachalarining tezligi nolga teng.

Chegara qatlami ikki turda bo'lishi mumkin:

- Laminar chegara qatlami - havo qatlamlari tartibli, parallel ravishda harakatlanadi. Ishqalanish kuchi kichik, lekin oqim ajralishiga moyil.
- Turbulent chegara qatlami - havo qatlamlari tartibsiz, girdobli harakatlanadi. Ishqalanish kuchi kattaroq, lekin ajralishga kamroq moyil.

Aerodinamika uchun eng xavfli hodisa - oqim ajralishi (flow separation). Bu holat kuzovning orqa qismida, ayniqsa tez qiyalashgan yuzalarda, noqulay bosim gradienti (pressure gradient) ta'sirida sodir bo'ladi. Ajralgan oqim ortida katta past bosimli turbulent zona – “o'lik zona” (wake region) - hosil bo'ladi. Shu zona avtomobilga ta'sir etuvchi bosim qarshiligining asosiy manbayi hisoblanadi.

Oqim ajralishini kechiktirish usullari quyidagilardir:

Kuzov orqa qismining silliq va asta qiyalashuvi;

Spoiler va diffuzor o'rnatish; kuzov osti panellarini tekislash;

Aktiv aerodinamik elementlardan foydalanish.

Chevrolet Cobalt uchun o'tkazilgan ushbu tadqiqotda orqa spoiler o'rnatish orqali aynan shu ajralish zonasini boshqarish ko'zda tutilgan.

Aerodinamikaning amaliy ahamiyati

Yoqilg'i tejamkorligi. So'nggi 40 yil ichida olib borilgan keng qamrovli aerodinamika tadqiqotlari yengil avtomobillarning Cx koeffitsientini deyarli ikki baravarga kamaytirishga va 100 km da o'rtacha 1.5 litr yoqilg'i tejashga imkon berdi. Avtostrada sharoitida havo qarshiligi dvigatelni ko'proq yoqilg'i sarflashga majbur qiladigan asosiy kuchdir.

Yaxshi aerodinamik shakl yoqilg'iga 30% gacha tejash imkonini beradi. Bundan tashqari, Cx parametrini 0.1 ga yaxshilash elektromobilning qo'yim masofasini 2.5% ga oshiradi. Shu sababli hozirgi zamonaviy elektromobillarda - Tesla, Lucid Air, Hyundai Ioniq 6 - aerodinamik optimallashtirish birinchi o'rindagi muhandislik vazifasi hisoblanadi.

Tezlik va unumdorlik. Qarshilik tezlikning kvadratiga mutanosib bo'lganligi sababli yuqori tezliklarda aerodinamika hal qiluvchi ahamiyat kasb etadi. Bunga misol tariqasida: Ferrari Testarossa ni 180 mph dan 200 mph ga yetkazish uchun dvigatel quvvatini 390 dan 535 ot kuchiga ko'tarish yoki Cx ni 0.36 dan 0.29 ga tushirish kifoya bo'ladi - ikkala yondashuv bir xil natija beradi. Ya'ni aerodinamika yaxshilanishi muhandislik jihatidan dvigatel quvvatini oshirishning samarali muqobili hisoblanadi.

Barqarorlik va xavfsizlik. Aerodinamik kuchlar avtomobilning barqarorligiga bevosita ta'sir ko'rsatadi. Yuqori tezliklarda ko'taruvchi kuchning ortishi g'ildiraklarning yerga bosishini kamaytiradi - natijada tormozlash yo'li uzayadi, burchak olish imkoniyati yomonlashadi va yon shamol ta'siri kuchayadi. Aynan shu muammodan kelib chiqqan holda zamonaviy sport va yuqori tezlikli avtomobillarga spoilerlar, diffuzorlar va aktiv aerodinamik tizimlar o'rnatiladi.

Shovqinni kamaytirish. Turbulent oqim nafaqat energiya isrofiga, balki shovqin hosil bo'lishiga ham sabab bo'ladi. Kuzov atrofidagi girdoblar tezlik oshishi bilan kuchli aeroakustik shovqin yaratadi. Shu sababli zamonaviy premium avtomobillarda aerodinamik optimallashtirish yo'lovchi qulayligi uchun ham muhim hisoblanadi.

Elektromobillar uchun ahamiyati. CFD yordamida muhandislar g'ildirak yoylari, yon ko'zgular, qopqoq tizimlari kabi keraksiz qarshilik yarataydigan elementlarni aniqlab, ularni optimallashtirishi mumkin. Bu to'g'ridan-to'g'ri qo'yim masofasini uzaytirishga olib keladi. Masalan, Tesla Model 3 da $C_d = 0.23$ ga erishilganligi uning raqobatchilariga nisbatan 10–15% ko'proq qo'yim masofasini ta'minlaydi.

Aerodinamik koeffitsientlar va ularning ahamiyati

Avtomobil aerodinamikasida uchta asosiy o'lchamsiz koeffitsient qo'llaniladi:

- C_d - qarshilik koeffitsienti: avtomobilning harakatlanish yo'nalishidagi havo qarshilik kuchini ifodalaydi. Zamonaviy yengil avtomobillarda C_d odatda 0.22–0.35 oralig'ida joylashadi.
- C_l - ko'tarilish koeffitsienti: vertikal yo'nalishda ta'sir etuvchi aerodinamik kuchni ifodalaydi. Musbat qiymat ko'tarilishni, manfiy qiymat bosuvchi kuchni bildiradi.
- C_m - moment koeffitsienti: avtomobilning pitch (egish) momentini ko'rsatadi, ya'ni old va orqa qismlar o'rtasidagi aerodinamik muvozanatni ifodalaydi.

Quyidagi 1.1-jadvalda zamonaviy avtomobillarning Cd koeffitsientlari taqqoslab keltirilgan:

1.1-jadval

Zamonaviy avtomobillarning Cd koeffitsienti taqqoslash jadvali

Avtomobil modeli	Cd qiymati	Xususiyati
Lucid Air	0.197	Eng past ishlab chiqarilayotgan avtomobil
Hyundai Ioniq 6	0.21	Silliq yuza, integratsiyalashgan spoyler
Porsche Taycan	0.22	Aktiv spoyler, tekis ostgi paneli
Tesla Model 3	0.23	Yopiq g'ildirak yo'ylari, silliq profil
Volkswagen Golf 8	0.28	Zamonaviy hatchback o'rtacha ko'rsatkich
Chevrolet Cobalt (standart)	~0.32–0.35	Sedan, aerodinamik optimallashtirilmagan
To'rtburchak yuk mashinasi	0.6–0.8	Taqqoslash uchun

Zamonaviy kuzov konstruksiyasining xususiyatlari

Zamonaviy avtomobil kuzovlarining asosiy konstruktiv xususiyatlaridan biri avtomobil karkasi (ramasi) va kuzovining bitta yaxlit tizim sifatida ishlab chiqarilishidir. Bu yondashuv monokok konstruksiya deyiladi va quyidagi

afzalliklarni beradi: avtomobilning umumiy og'irligi kamayadi; kuzov qattiqligining og'irlikka nisbati oshadi; yoqilg'i sarfi pasayadi; barqarorlik va boshqaruvchanlik yaxshilanadi.

Hozirgi kuzovlarda zamonaviy passiv xavfsizlikni ta'minlash maqsadida deformatsiya zonalari mavjud bo'lib, ular kuzovning orqa va old qismlarida joylashgan. Yo'l transport hodisasi vaqtida ushbu zonalar zarba energiyasini yutadi va avtomobil salon qismini maksimal darajada himoyalaydi. Deformatsiya zonalari aerodinamik dizayn bilan muvozanatlashtirilishi kerak - chunki old qismning haddan tashqari "yumshoq" bo'lishi aerodinamik qarshilikni oshirishi mumkin.

Kuzov sirt sifati ham aerodinamikaga sezilarli ta'sir ko'rsatadi. Havo oqimi turbulent holatga o'tganda chegara qatlami kengayadi va ishqalanish ortadi. Shuning uchun zamonaviy avtomobillarda kuzov elementlari orasidagi yoriqlar minimallashtiriladi, qismlar orasidagi tirqishlar muhrlangan bo'ladi va bo'yoq sifatiga alohida e'tibor qaratiladi.

Avtomobil aerodinamikasining tarixiy rivojlanishi

Avtomobil aerodinamikasi fani XX asrning 20-yillarida shakllana boshladi. Silliqlik kuzovga ega birinchi avtomobillarga Jenet, Bergmann, Alfa-Romeo, Rumpler va Yaray tomonidan yaratilgan modellar kiradi. Ular aerodinamika qonunlarini chuqur o'rganish natijasida emas, balki o'q, kema, dirijabl va samolyot qurishda ishlatiladigan shakllarni mexanik tarzda o'zlashtirish yo'li bilan yaratilgan.

XX asrning ikkinchi yarmiga qadar avtomobil dizaynida estetika va moda aerodinamika talablaridan ustun turdi. Ammo 1973 yilgi neft inqirozi vaziyatni tubdan o'zgartirdi. AQSh hukumati CAFE (Corporate Average Fuel Economy) standartini joriy etib, avtomobil ishlab chiqaruvchilarni yoqilg'i tejamkorligini oshirishga majbur qildi. Natijada 1973 yildan 1988 yilgacha AQSh avtomobillarining o'rtacha yoqilg'i iste'moli 14.2 mpg dan 28.6 mpg ga deyarli

ikki baravarga yaxshilandi. Bunda aerodinamik takomillashtirish asosiy omillardan biri bo'ldi.

Hisoblash texnologiyalarining rivojlanishi bilan 1980–1990-yillarda CFD usullari avtomobil muhandisligiga kirib kela boshladi. Bu usullar shamol tunneli tajribalarini to'liq almashtirmasa-da, ularni sezilarli darajada qo'ldirdi va loyihalash jarayonini tezlashtirdi. Bugungi kunda yirik avtomobil ishlab chiqaruvchilari yangi modelni bozorga chiqarishdan oldin millionlab CFD hisoblash iteratsiyalarini o'tkazadi.

Asosiy xulosalar quyidagicha:

Aerodinamik qarshilik kuchi tezlikning kvadratiga mutanosib bo'lganligi sababli yuqori tezliklarda u harakatga asosiy to'siq hisoblanadi va yoqilg'i sarfini belgilovchi eng muhim omilga aylanadi.

C_d , C_l va C_m koeffitsientlari avtomobilning aerodinamik xususiyatlarini miqdoriy baholash imkonini beradigan o'lchamsiz ko'rsatkichlar bo'lib, ularni kamaytirish yoqilg'i sarfini pasaytirish va haydash barqarorligini oshirishning asosiy yo'li hisoblanadi.

Orqa qismdagi oqim ajralishi va wake region — bosim qarshiligining 80–90% ini tashkil etuvchi asosiy manba. Spoyler o'rnatish aynan shu zonani boshqarish orqali aerodinamik samaradorlikni oshiradi.

Bernulli qonuni va Reynolds soni avtomobil atrofidagi havo oqimining xarakterini tushuntirishda asosiy fizik vositalar hisoblanadi.

1973 yilgi neft inqirozidan beri aerodinamika avtomobil muhandisligida markaziy o'rin egallagan bo'lib, CFD usullari zamonaviy kuzov dizaynini ilgari surgan asosiy texnologiyaga aylangan.

Shu tariqa, avtomobil kuzovi aerodinamikasining nazariy asoslarini o'rganish keyingi bo'limlarda Chevrolet Cobalt avtomobiliga CFD tahlil o'tkazish va orqa spoyler o'rnatishning samaradorligini baholash uchun mustahkam ilmiy zamin yaratadi.

1.2.Kuzov materiallari, konstruktiv xususiyatlari va aerodinamikaga ta'siri

Avtomobilsozlikda zamonaviy kuzov tuzilishini yaratishda ishlatilayotgan materiallar avtomobil kuzov mustahkamligini, og'irligi va xavfsizligini hamda ekspluatatsion samaradorligini oshiruvchi asosiy omillardan hisoblanadi.

Kuzov materiallarining umumiy roli

Avtomobil shakli, havo harakati va tuzilish materiallarining o'zaro ta'siri aerodinamik samaradorlikni belgilaydigan asosiy omillardan biridir. Turli kuzov dizaynlarining unumdorligi - silliq sport avtomobillardan toki to'rtburchak yuk mashinalarigacha - zamonaviy loyihalash usullari, xususan CFD va shamol tunneli sinovlari yordamida o'rganiladi.

Avtomobil - yuqori tezlikda harakatlanuvchi mashina bo'lib, u havo muhiti bilan o'zaro ta'sirda bo'ladi va shuning uchun tabiatda harakatlanuvchi jismlar qurilishining qonunlariga - aerodinamika qonunlariga bo'ysunishi kerak. Silliq shakl dvigatel quvvatining havo qarshiligini yengishga sarf bo'lishini kamaytiradi, yoqilg'i sarfini pasaytiradi va aerodinamik barqarorlikni oshiradi.

Kuzov materiallari va aerodinamikaga ta'siri

Po'lat

Po'lat an'anaviy ravishda avtomobil kuzovining asosiy materiali bo'lib kelgan. Arzonligi va ishlab chiqarish qulayligi uning asosiy afzalliklaridir. Biroq og'ir massasi aerodinamik unumdorlikka salbiy ta'sir ko'rsatadi - og'irroq avtomobil bir xil tezlikda yurishda ko'proq energiya sarflaydi.

Zamonaviy muhandislar kuzov asosiy konstruksiyasining massasini kamaytirish maqsadida karbon tolali kompozitlar, alyuminiy, yuqori mustahkamlikli po'lat va boron po'latini kombinatsiyalash orqali 44% gacha massa kamaytirishga erishmoqdalar.

Alyuminiy

Alyuminiy aviasiyadagi "qanotli metal" sifatida avtomobildagi o'z o'rnini tobora mustahkamlaydi. Uning asosiy afzalliklari - engilligi va mustahkamligi bo'lib, ko'plab ishlab chiqaruvchilar uni shassi, dvigatel, o'rindiqlar, kapot va

g'ildirak diskleri uchun qo'llashmoqda. Alyuminiy po'latni avtomobil sanoatidan asta-sekin siqib chiqarmoqda.

Audi R8 birinchi avlod (2007) kuzovining asosini alyuminiy profillar (70%), quyma elementlar (8%) va varaq elementlar (22%) tashkil etadi. Bundan tashqari magniy va uglerod plastik kabi juda engil materiallar ham qo'llanildi. Magniy mototor bo'limi tayanchi orqa kuzov modulining qattiqligini oshirdi.

Karbon tolali kompozit (CFRP)

CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) 50 yildan ortiq aerokosmik, avtomobil, temir yo'l, dengiz va shamol energetikasi sohalarida muvaffaqiyatli qo'llanilmoqda. So'nggi 20 yil ichida CFRP global o'sish sur'ati yiliga o'rtacha 12,5% ni tashkil etdi. Kuzov panellari, tom va pol kabi qattiqlik talab qiladigan avtomobil konstruktsiyalari uchun karbon tolasi massa kamaytirishda va unumdorlikni oshirishda alyuminiy va po'latga nisbatan sezilarli afzallik beradi.

CFRP ning aerodinamik samaradorlik uchun eng muhim xususiyati shundaki, u dizaynerlarga metall shtamplash yoki plastik quyish uchun zarur bo'lgan cheklovlarisiz, haqiqatan ham optimal suyuqlik shakllarini yaratish imkonini beradi. Masalan, ko'zgu korpuslari 3D chop etish va kompozitlar yordamida maxsus aerodinamik shakllarda ishlab chiqarilishi mumkin - bu massani ham, qarshilik kuchini ham sezilarli darajada kamaytiradi.

Karbon tolasi uchun spetsifik energiya yutish ko'rsatkichi 183 dan 286 MJ/kg gacha bo'lib, bu po'latnikidan ancha yuqori. Epoksid qatronlar asosidagi CFRP korroziyaga va issiqlikka yaxshi chidaydi, shuning uchun ob-havo va yuqori haroratlarga ta'sir qiladigan kapot va shassi kabi qismlar uchun qo'llay oladi.

Amaliy misol: BMW i3 avtomobilida yo'lovchi saloni CFRP dan, pastki tuzilma esa alyuminiydan yasalgan. Bu murakkab alyuminiy-karbon konstruktsiya zarur qattiqlik va xavfsizlikni ta'minlagan holda, og'ir akkumulyatorni hisobga olgan holda ham avtomobilni sezilarli yengillashtirdi.

Materiallar taqqoslash jadvali (asosiy ko'rsatkichlar)

Material	Solishtirma massa	Aerodinamik afzallik	Qiymat
Po'lat	Og'ir	Past	Arzon
Alyuminiy	O'rtacha	O'rtacha	O'rtacha
CFRP	Eng yengil	Yuqori	Qimmat

Kuzovning konstruktiv xususiyatlari va aerodinamika

Kuzov shakli va turi

Avtomobilning jami aerodinamik qarshiligi 80—90% ini old va orqa qism o'rtasidagi bosim farqidan kelib chiqadigan asosiy bosim tashkil etadi. Bu bosim farqining ortishi harakatlanayotgan avtomobilning orqa qismi shakliga bog'liq. To'g'ri tanlangan kuzov shakli kamroq qarshilik, yaxshiroq barqarorlik va boshqaruvchanlikni ta'minlaydi.

Kuzov shakli dizayn komponenti va unumdorlik talabi o'rtasidagi asosiy bog'lovchi element hisoblanadi, chunki u to'g'ridan-to'g'ri qarshilik kuchlari qiymatiga ta'sir etadi. Hatchback va sedan kabi ikki xil kuzov turini taqqoslaganda, hatchback turi havo qarshiligi ko'effitsienti bo'yicha pastroq ko'rsatkich namoyish etadi.

Kuzov shakli bilan bog'liq asosiy noto'g'ri tushuncha shundaki, kichik avtomobillar har doim ham aerodinamik bo'lmaydi. Katta hashamatli sedan bo'lgan Lucid Air maqsadli dizayn tufayli ko'plab kichik hatchback avtomobillardan ham yuqori aerodinamik samaradorlikni ko'rsatadi. Umumiy

qarshilik esa faqat C_d ga emas, balki C_d va frontal maydon ko'paytmasiga bog'liq.

Zamonaviy eng past C_d ko'rsatkichlari: Lucid Air - C_d 0.197 bilan ishlab chiqariladigan avtomobillar orasida eng past ko'rsatkichni namoyish etadi. Hyundai Ioniq 6 - C_d 0.21 bilan silliq fastback dizayni, integratsiyalashgan spoiler va g'ildiraklar atrofida optimallashtirilgan havo oqimi hisobiga yaxshi ko'rsatkichga erishadi. Porsche Taycan - C_d 0.22 bilan aktiv spoilerlar va silliq osti paneli yordamida turbulentlikni kamaytiradi.

Kuzov sirt sifati va yoriqlar

Havo oqimi turbulent holatga o'tganda chegara qatlami kengayadi va ishqalanish ortadi - havo go'yo ko'proq yopishqoq bo'lib qoladi. Shuning uchun muhandislardan kuzov silliqlikini ta'minlash talab etiladi - chegara qatlami laminar holatda qolishi uchun. Buning uchun kuzov elementlari orasidagi yoriqlar kamaytirilishi, qismlar orasidagi tirqishlar muhrlangan bo'lishi kerak.

Sirt g'adirliigi qarshilik kuchini yanada oshiradi, chunki g'adir-budir sirtida oqim ajralishi sodir bo'ladi. G'adir-budir sirt ko'p sonli katta jismlar yig'indisi kabi ishlaydi. Shuning uchun kuzov sirtining silliq va tekis bo'lishi aerodinamik qarshilikni kamaytirish uchun muhim shartdir.

Kuzov osti (underbody) konstruksiyasi

Notekis tuzilma tufayli kuzov osti havo oqimi to'sqinlikka uchraydi va ko'p joyda ajraladi - natijada avtomobil tagida kuchli turbulentlik vujudga keladi va katta miqdorda energiya isrof bo'ladi. Kuzov ostidagi girdoblar nafaqat o'z aerodinamik qarshilikini oshiradi, balki avtomobilning orqa girdoblari bilan birlashib, orqa qismdagi oqim maydonini o'zgartiradi va bosim qarshilikini yanada kuchaytiradi.

Tekis kuzov osti uzluksiz havo oqimiga imkon beradigan silliq yuzani ta'minlaydi. Bu dizayn avtomobil tagida turbulentlikni kamaytirish orqali qarshilikni minimallashtiradi va umumiy aerodinamik samaradorlikni oshiradi. Bundan tashqari, "ground effect" hodisasi - kuzov ostining yer bilan ta'siri —

bosuvchi kuch hosil qilib, yuqori tezliklarda yopishqoqlikni sezilarli darajada oshiradi.

Tekis kuzov osti panellari avtomobil tagidagi havo oqimini tekislashtirishga yordam beradi. Orqa diffuzor esa kuzov ostidan chiqayotgan havoni tezlashtiradi - bu past bosim zonasini yaratadi va sezilarli qarshilik qo'shmasdan bosuvchi kuch ni oshiradi.

Yerdan balandlik (ground clearance)

CFD simulyatsiyalari asosida optimal aerodinamik ko'rsatkichlarga erishish uchun yerdan balandlik 100 mm bo'lishi tavsiya etiladi. Bu qiymat avtomobil osti oqim maydonini muvozanatlashtiradi - juda past balandlik oqimni to'sadi, juda baland balandlik esa turbulentlikni oshiradi.

Materiallar va konstruksiyaning birgalikdagi ta'siri

Og'irlikni kamaytirish barcha dinamik ko'rsatkichlarni bir vaqtning o'zida yaxshilaydi. Quvvatni oshirishdan farqli o'laroq (bu faqat tezlanishga yordam beradi), massani kamaytirish tezlanish, tormozlash, burchak olish, yoqilg'i tejamkorligi va shina xizmat muddatini - hammasini birga yaxshilaydi. Karbon tolali kapot po'lat yoki alyuminiy panelga nisbatan 8-15 kg tejaydi, karbon tom paneli esa 5-10 kg tejaydi.

Kuzov shaklini takomillashtirish va tashqi elementlardan (spoilerlar) foydalanish orqali minimal darajada ham o'zgarish kiritilsa, avtomobilning aerodinamikasi tubdan o'zgarishi mumkin.

Hozirgi vaqtda avtomobil kuzovini ishlab chiqarishda an'anaviy po'lat materiallar bilan birga kompozitsion materiallar, yuqori mustahkam po'latlar va alyuminiy qotishmalaridan ham foydalanilmoqda. Po'lat materiallar bilan solishtirganda alyuminiy materiallari 35-40% gacha yengil bo'lganligi sababli avtomobil og'irligini kamaytiradi va yoqilg'i sarfi pasayishini ta'minlaydi.

Kuzov materiallarining turlari va xususiyatlari

Material turi	Afzalliklari	Kamchiliklari	Qo'llanish sohalari
Po'lat	Yuqori mustahkamlik, past narx	Og'ir, korroziyaga moyil	Strukturaviy elementlar
Alyuminiy qotishmalar	Yengil, korroziyaga chidamli	Narxi po'latdan yuqori	Panellar, kapot, tom
CFRP (uglerod tolali)	Juda yuqori kuch/og'irlik	Juda qimmat	Sport va premium avtomobillar
Plastik va termoplastiklar	Engil, shakllash qulay	Past mexanik mustahkamlik	Tashqi bezak, qopqoqlar

1.3. Havo oqimining yengil avtomobillar harakatiga ta'sirini o'rganish: adabiyotlar tahlili

Yengil avtomobillarning harakat jarayonida yuzaga keladigan aerodinamik hodisalarni o'rganish transport vositalarining texnik-iqtisodiy ko'rsatkichlarini yaxshilashda muhim ahamiyat kasb etadi. Avtomobil harakatlanayotgan paytda uning atrofida murakkab havo oqimlari hosil bo'lib, ular kuzov yuzasida bosim taqsimotining o'zgarishiga, girdoblar paydo bo'lishiga va aerodinamik qarshilik kuchlarining yuzaga kelishiga sabab bo'ladi.

Mazkur jarayonlar avtomobilning tezligi, yoqilg'i sarfi, harakat barqarorligi va boshqaruvchanligiga bevosita ta'sir ko'rsatadi.

Avtomobil aerodinamikasiga oid dastlabki ilmiy tadqiqotlar XX asrning birinchi yarmida boshlangan. Tadqiqotchilar avtomobil shaklining havo qarshiligiga ta'sirini o'rganib, kuzovning silliq va oqimga mos shakllari qarshilik kuchini sezilarli darajada kamaytirishini aniqlaganlar. Shu davrda aerodinamik quvur (wind tunnel) sinovlaridan foydalanish amaliyoti keng rivojlandi. Aerodinamik quvurlarda o'tkazilgan tajribalar avtomobil kuzovi shaklining havo oqimi bilan o'zaro ta'sirini batafsil tahlil qilish imkonini berdi.[3]

Hucho va Sovran tomonidan olib borilgan tadqiqotlarda avtomobilga ta'sir qiluvchi asosiy aerodinamik kuchlar – qarshilik kuchi (qarshilik), ko'taruvchi kuch (Ko'tarilish), yon kuchlar hamda ulardan hosil bo'ladigan momentlar tahlil qilingan. Tadqiqotchilar aerodinamik qarshilik avtomobil harakat tezligi ortishi bilan kvadratik qonuniyat asosida ortishini aniqlaganlar. Yuqori tezliklarda dvigatel quvvatining katta qismi aynan havo qarshiligini yengishga sarflanishi ko'rsatib berilgan.[15]

Adabiyotlarda avtomobil aerodinamik qarshiligi ko'pincha qarshilik koeffitsiyenti (C_d) orqali baholanadi. Tadqiqot natijalariga ko'ra, kuzov shakli, old frontal maydon, tom qismi geometriyasi, orqa qism konfiguratsiyasi hamda avtomobil ostki qismi konstruksiyasi ushbu ko'rsatkichga sezilarli ta'sir ko'rsatadi. Hucho ma'lumotlariga ko'ra, zamonaviy yengil avtomobillarda aerodinamik qarshilik koeffitsiyenti odatda 0,22–0,35 oralig'ida bo'ladi. Ushbu ko'rsatkichning kamayishi yoqilg'i sarfining pasayishiga va energiya samaradorligining oshishiga olib keladi.

Katz tomonidan olib borilgan ilmiy izlanishlarda avtomobilning aerodinamik barqarorligi masalalariga alohida e'tibor qaratilgan. Muallifning ta'kidlashicha, kuzov atrofida hosil bo'ladigan havo oqimlari nafaqat qarshilik kuchini, balki avtomobilning yo'l bilan ilashish xususiyatlarini ham belgilaydi.

Ayniqsa, yuqori tezliklarda hosil bo'ladigan ko'taruvchi kuch avtomobil g'ildiraklariga tushadigan yukni kamaytirishi va natijada boshqaruvchanlikning yomonlashishiga sabab bo'lishi mumkin.[4]

So'nggi yillarda hisoblash gidrodinamikasi (Computational Fluid Dynamics – CFD) usullarining rivojlanishi avtomobil aerodinamikasini tadqiq qilish imkoniyatlarini sezilarli kengaytirdi. Anderson, Versteeg va Malalasekera kabi olimlarning ishlari CFD texnologiyalarini transport vositalari aerodinamikasiga qo'llashning nazariy asoslarini shakllantirdi. Ushbu usul yordamida avtomobil kuzovi atrofidagi bosim maydonlari, tezlik taqsimoti, turbulent oqimlar va girdoblarning hosil bo'lish jarayonlari yuqori aniqlikda modellashtirilmoqda.[5]

Ko'plab zamonaviy tadqiqotlarda avtomobilning old bamperi, kapot qismi, old oynasi, tom qismi va orqa qism geometriyasining havo oqimiga ta'siri alohida o'rganilgan. Tadqiqotlar natijalariga ko'ra, ayniqsa avtomobilning orqa qismida hosil bo'ladigan ajraluvchi oqimlar va past bosimli zona umumiy aerodinamik qarshilikning asosiy qismini tashkil etadi. Shu sababli zamonaviy avtomobilsozlikda spoilerlar, diffuzorlar va boshqa aerodinamik elementlardan keng foydalanilmoqda.

Yengil avtomobillar aerodinamikasiga bag'ishlangan ilmiy ishlarda transport vositasining pastki qismi ham muhim tadqiqot obyekti sifatida qaraladi. Tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, avtomobil ostki qismining silliqalashtirilishi va oqimga moslashtirilishi aerodinamik qarshilikni kamaytirishga xizmat qiladi. Bundan tashqari, g'ildiraklar atrofida hosil bo'ladigan turbulent oqimlarni boshqarish ham umumiy aerodinamik samaradorlikni oshirishda muhim omillardan biri hisoblanadi.

Adabiyotlar tahlili shuni ko'rsatadiki, havo oqimining yengil avtomobillar harakatiga ta'siri ko'p omilli va murakkab jarayon hisoblanadi. Avtomobil kuzovining geometrik parametrlari, oqimning turbulentlik darajasi, harakat tezligi hamda tashqi muhit sharoitlari aerodinamik ko'rsatkichlarning

shakllanishida muhim rol o'ynaydi. Shu bois zamonaviy tadqiqotlarda aerodinamik qarshilikni kamaytirish, harakat barqarorligini oshirish va energiya samaradorligini yaxshilash maqsadida kuzov parametrlarini optimallashtirish masalalariga alohida e'tibor qaratilmoqda.[6]

O'zbekistonda ishlab chiqarilayotgan yengil avtomobillar orasida Chevrolet Cobalt modeli keng tarqalgan bo'lib, u aholining kundalik foydalanishidagi asosiy transport vositalaridan biri hisoblanadi. Shu sababli mazkur avtomobilning aerodinamik xususiyatlarini o'rganish va takomillashtirish amaliy jihatdan katta ahamiyatga ega.

Chevrolet Cobalt avtomobili sedan turidagi kuzov konstruksiyasiga ega bo'lib, uning aerodinamik ko'rsatkichlari avtomobilning yoqilg'i tejamkorligi, maksimal tezligi va harakat barqarorligiga sezilarli ta'sir ko'rsatadi. Adabiyotlarda qayd etilishicha, sedan tipidagi avtomobillarda aerodinamik qarshilikning asosiy qismi kuzovning old qismi va orqa qismida hosil bo'ladigan oqim ajralishlari bilan bog'liq. Ayniqsa, avtomobilning orqa qismida yuzaga keladigan past bosimli zona umumiy qarshilik kuchining ortishiga sabab bo'ladi.[28]

Ko'plab tadqiqotchilar tomonidan avtomobil kuzovi parametrlarini optimallashtirish orqali aerodinamik qarshilikni kamaytirish mumkinligi isbotlangan. Jumladan, old bamber shaklini takomillashtirish, radiator panjarasi geometriyasini o'zgartirish, old oynaning qiyalik burchagini optimallashtirish hamda tom va bagaj qismlarining o'zaro tutashuvini silliqalashtirish havo oqimining barqaror harakatlanishini ta'minlaydi. Natijada aerodinamik qarshilik koeffitsiyenti kamayib, yoqilg'i sarfi pasayadi.

Chevrolet Cobalt avtomobilida ham havo oqimining kuzov bo'ylab harakatlanish xarakterini CFD modellashtirish usullari yordamida tahlil qilish imkoniyati mavjud. Bunday tadqiqotlar avtomobilning old qismida bosimning yuqori qiymatlari, tom qismida oqim tezligining ortishi va orqa qismida turbulent girdoblarning hosil bo'lish jarayonlarini aniqlash imkonini beradi.

Olingan natijalar asosida kuzovning ayrim geometrik parametrlarini o'zgartirish orqali aerodinamik samaradorlikni oshirish mumkin.

O'zbekiston sharoitida ekspluatatsiya qilinayotgan avtomobillarning katta qismi 80–120 km/soat tezlik oralig'ida harakatlanadi. Mazkur tezliklarda aerodinamik qarshilik umumiy harakat qarshiligining muhim qismini tashkil etadi. Shu sababli Chevrolet Cobalt avtomobili misolida kuzov parametrlarining havo oqimiga ta'sirini o'rganish va aerodinamik qarshilikni kamaytirish bo'yicha ilmiy asoslangan takliflar ishlab chiqish yoqilg'i sarfini kamaytirish hamda transport vositasining energiya samaradorligini oshirishga xizmat qiladi.[30]

Hozirgi vaqtda dunyo avtomobilsozlik sanoatida kuzov aerodinamikasini takomillashtirish orqali yoqilg'i tejamkorligini 5–15 foizgacha oshirish mumkinligi qayd etilgan. Ushbu tajribalarni O'zbekiston avtomobil sanoatida ishlab chiqarilayotgan avtomobillarga, jumladan Chevrolet Cobalt modeliga tatbiq etish muhim ilmiy va amaliy ahamiyatga ega hisoblanadi. Shuning uchun mazkur tadqiqotda Chevrolet Cobalt avtomobili kuzovining geometrik parametrlarini o'zgartirish orqali havo oqimining harakat xarakteri va aerodinamik ko'rsatkichlarga ta'sirini o'rganish dolzarb vazifa sifatida qaraladi.

Avtomobil aerodinamikasini tadqiq etish bo'yicha ko'plab ilmiy ishlar mavjud. A.R. Yuldashev avtomobil kuzovi va kabinasiga xizmat ko'rsatish hamda ta'mirlash jarayonlarini tahlil qilgan. Mahkamov Q.H. va Ergashev A. tomonidan yaratilgan darsliklarda avtomobillarni ta'mirlashning nazariy asoslari keng yoritilgan.

Nemis olimi Robert Bosch tomonidan yaratilgan “Automotive Handbook” asarida avtomobil konstruksiyasi, jumladan kuzov elementlari va ularni ta'mirlash texnologiyalari haqida keng ma'lumot berilgan. Amerikalik olim John B. Heywood o'zining ilmiy ishlarida avtomobil tizimlarini kompleks o'rganib, transport vositalarining umumiy samaradorligi va texnik xizmat ko'rsatish masalalariga e'tibor qaratgan.

CFD (Computational Fluid Dynamics) usuli yordamida avtomobillarning aerodinamik xususiyatlarini tadqiq qilish bo'yicha zamonaviy tadqiqotlar shuni ko'rsatmoqdaki, spoyler o'rnatish orqa Ko'tarilish koeffitsientini 15-25% ga kamaytirishi mumkin. Bu esa yuqori tezliklarda (80-120 km/h) haydash barqarorligini sezilarli darajada yaxshilaydi.[21]

Xususan, sedan tip avtomobillar uchun olib borilgan tadqiqotlarda orqa spoylerning optimal balandligi va burchagi $5-15^{\circ}$ bo'lganda eng yaxshi natijalarga erishilishi aniqlangan. Bundan tashqari, spoyler kengligining avtomobil kengligi bilan muvofiqligi ham muhim parametr hisoblanadi.

I bob bo'yicha xulosalar

Mazkur bobda yengil avtomobillar aerodinamikasining nazariy asoslari, kuzov konstruksiyasining aerodinamik xususiyatlarga ta'siri hamda havo oqimining avtomobil harakatiga ta'siri bo'yicha mavjud ilmiy tadqiqotlar tahlil qilindi. O'rganilgan nazariy ma'lumotlar shuni ko'rsatdiki, avtomobil aerodinamikasi transport vositasining yoqilg'i tejamkorligi, maksimal tezligi, harakat barqarorligi, boshqaruvchanligi va ekologik ko'rsatkichlarini belgilovchi muhim omillardan biri hisoblanadi.

Avtomobil kuzovi atrofida hosil bo'ladigan havo oqimlari natijasida aerodinamik qarshilik, ko'taruvchi kuch va turli momentlar yuzaga keladi. Ushbu kuchlarning qiymati avtomobilning geometrik shakli, frontal yuzasi, harakat tezligi hamda tashqi muhit sharoitlariga bog'liq ravishda o'zgaradi. Ayniqsa, yuqori tezliklarda aerodinamik qarshilik harakat qarshiliklarining asosiy qismini tashkil etib, dvigatel quvvatining sezilarli qismi uni yengishga sarflanadi.

Kuzov materiallari va konstruktiv xususiyatlarining tahlili shuni ko'rsatdiki, zamonaviy avtomobilsozlikda yengil, mustahkam va aerodinamik jihatdan samarali materiallardan foydalanish avtomobil massasini kamaytirish bilan bir qatorda kuzov shaklini optimallashtirish imkonini ham yaratadi. Kuzovning old, yon va orqa qismlaridagi konstruktiv yechimlar havo oqimining harakat xarakteriga bevosita ta'sir ko'rsatib, aerodinamik qarshilik koeffitsiyentining o'zgarishiga sabab bo'ladi.

Adabiyotlar tahlili natijalari avtomobil aerodinamikasini tadqiq etishda eksperimental va hisoblash usullarining keng qo'llanilayotganini ko'rsatdi. Xususan, aerodinamik quvur sinovlari va hisoblash gidrodinamikasi (CFD) usullari yordamida kuzov atrofidagi havo oqimlarini yuqori aniqlikda tahlil qilish imkoniyati mavjudligi aniqlandi. Tadqiqotchilar tomonidan olingan

natijalar avtomobil kuzovining geometrik parametrlarini optimallashtirish orqali aerodinamik qarshilikni kamaytirish, yoqilg'i sarfini pasaytirish va harakat barqarorligini oshirish mumkinligini tasdiqlaydi.

Shuningdek, O'zbekiston avtomobil sanoatida keng foydalanilayotgan Chevrolet Cobalt avtomobili misolida aerodinamik ko'rsatkichlarni yaxshilash masalasi dolzarb ilmiy-amaliy ahamiyatga ega ekanligi aniqlandi. Kuzovning ayrim geometrik parametrlarini o'zgartirish orqali havo oqimining harakat xarakterini yaxshilash va aerodinamik samaradorlikni oshirish imkoniyatlari mavjud.

Shunday qilib, birinchi bobda yengil avtomobillar aerodinamikasining nazariy asoslari va mavjud tadqiqotlar tahlili asosida kuzov parametrlarining havo oqimi bilan o'zaro ta'siri avtomobilning ekspluatatsion ko'rsatkichlariga sezilarli ta'sir ko'rsatishi aniqlandi. Bu esa keyingi boblarda Chevrolet Cobalt avtomobili kuzov parametrlarini modellashtirish, havo oqimi bilan o'zaro ta'sirini tadqiq qilish hamda aerodinamik ko'rsatkichlarni takomillashtirish bo'yicha ilmiy izlanishlarni amalga oshirish uchun nazariy asos bo'lib xizmat qiladi.

Xulosa qilib aytganda, avtomobil kuzovi aerodinamikasini o'rganish bugungi kunda transport muhandisligi sohasining eng muhim yo'nalishlaridan biriga aylangan. Kuzovning shakli va materiallari havo qarshiligiga, yoqilg'i sarfiga va haydash barqarorligiga bevosita ta'sir ko'rsatadi. CFD usullari va zamonaviy dasturiy ta'minotlar yordamida bu xususiyatlarni kompyuterda modellashtirish imkoni paydo bo'lgan bo'lib, bu esa aerodinamik optimallashtirishni yangi darajaga olib chiqmoqda.

II BOB. CHEVROLET COBALT AERODINAMIKASINI CFD YORDAMIDA EKSPERIMENTAL TADQIQ ETISH

Ilmiy tadqiqot uslublari

“Kuzov parametrlarini takomillashtirish yo‘li bilan yengil avtomobillarning aerodinamikasini yaxshilash” mavzusi bo‘yicha ilmiy tadqiqotlar, odatda, aerodinamik xususiyatlarni yaxshilashga qaratilgan metodlar va uslublarni o‘z ichiga oladi. Aerodinamikaning takomillashtirilishi avtomobillarni samarali va iqtisodiy ekspluatatsiya qilishda, shuningdek, atrof-muhitga ta’sirni kamaytirishda muhim rol o‘ynaydi. Ushbu mavzuda ilmiy tadqiqotlarni amalga oshirishda qo‘llaniladigan asosiy uslublar quyidagi yo‘nalishlarda bo‘lishi mumkin.

Eksperiment (Tajriba) uslubi

Eksperiment uslubi aerodinamikani yaxshilash bo‘yicha eng ko‘p ishlatiladigan uslubdir. Ushbu uslubda avtomobilning kuzov parametrlarini o‘zgartirish orqali aerodinamik xususiyatlar o‘rganiladi. Tajribalar, odatda, aerodinamik tunel yoki poligonlarda amalga oshiriladi. Tajribalar davomida quyidagi metodlar qo‘llanilishi mumkin:

- Aerodinamik tunel sinovlari: Aerodinamik tunel yordamida avtomobilning havo qarshiligi (qarshilik) va ko‘tarilish (Ko‘tarilish) kuchlarini o‘lchash mumkin. Avtomobilning turli geometrik shakllari, spoilerlar, aerodinamik body kitlar va boshqa o‘zgartirishlar testdan o‘tkazilib, eng samarali parametrlar aniqlanadi.
- Ochiq maydondagi sinovlar: Yengil avtomobillarni haqiqiy yo‘l sharoitida sinash orqali ularning aerodinamik xususiyatlarini tekshirish mumkin. Bunda tezlik, shamol tezligi, ob-havo sharoitlari va yo‘lning sathi kabi omillarni hisobga olish zarur.

Tajriba uslubida ilmiy tadqiqotlar quyidagilarni o‘z ichiga oladi:

Avtomobil kuzovining harakatlanishi davomida yuzaga keladigan havo oqimining tahlili.

Aerodinamik effektlarni kamaytirish uchun turli modifikatsiyalar va dizaynlarni sinash.

Avtomobilning energiya sarfini va yoqilg'i samaradorligini o'zgartirish uchun aerodinamik xususiyatlarning ta'sirini o'lchash.

Matematik modellash va simulyatsiya uslubi

Matematik modellash va kompyuter simulyatsiyasi aerodinamikani takomillashtirishda juda foydali uslub hisoblanadi. Bu uslubda avtomobilning aerodinamik xususiyatlari va havo oqimining harakati matematik modellarda aks ettiriladi. Simulyatsiya yordamida tizimni o'zgartirish va eksperimentlarni o'tkazishdan oldin natijalar olish mumkin.

CFD (Computational Fluid Dynamics): CFD - bu havo oqimining avtomobilning kuzoviga ta'sirini o'rganish va tahlil qilish uchun qo'llaniladigan kompyuter dasturlari yordamida amalga oshiriladigan usuldir. Bu simulyatsiya usuli yordamida havo oqimining avtomobil bilan o'zaro ta'sirini tahlil qilish va aerodinamik xususiyatlarni yaxshilash mumkin.

CFD simulyatsiyasida avtomobil modeli yaratilib, uning atrofidagi havo oqimining ta'siri o'rganiladi. Turli geometrik shakllar, aerodinamik elementlar, masalan, spoilerlar, tormoz tizimi, old grill dizayni va boshqa tuzilmalar tekshiriladi.

CFD yordamida aerodinamik qarshilikni kamaytirish va ko'tarilish kuchini optimallashtirish bo'yicha konkret yechimlar ishlab chiqiladi.

Matematik modellash va simulyatsiya uslubida o'tkaziladigan ilmiy tadqiqotlar quyidagilarni o'z ichiga oladi:

Avtomobilning aerodinamik parametrlarini kompyuter orqali tahlil qilish.

Yangi aerodinamik elementlarni modellash va ularning samaradorligini simulyatsiya qilish.

Avtomobilning aerodinamik xususiyatlari va energiya samaradorligini yaxshilash uchun turli modifikatsiyalarni tahlil qilish.

Statistik tahlil uslubi

Statistik tahlil uslubi yordamida avtomobilning aerodinamik xususiyatlarini optimallashtirishga qaratilgan turli parametrlar o'rtasidagi o'zaro bog'liqliklar aniqlanadi. Ushbu uslubda ko'plab tajribalar va simulyatsiyalar orqali to'plangan ma'lumotlar tahlil qilinadi va eng samarali parametrlar aniqlanadi.

Parametrlar tahlili: Turli parametrlar (masalan, kuzovning geometrik shakli, spoiler burchagi, havo oqimi tezligi) o'rtasidagi aloqalar statistik usullar yordamida aniqlanadi. Bu yordamida aerodinamik samaradorlikni yaxshilash uchun eng optimal variantlar tanlanadi.

Ko'p o'zgaruvchilarning tahlili: Bir nechta parametrlar va o'zgaruvchilarni bir vaqtning o'zida tahlil qilish orqali aerodinamik samaradorlikni oshirishga imkon beruvchi eng yaxshi dizayn topiladi.

Ekspertiza va eksperimental metodlar

Ekspertiza va eksperimental metodlar yordamida turli dizaynlar va modifikatsiyalarni baholashda mutaxassislarning fikr-mulohazalari hamda mavjud ma'lumotlar asosida qarorlar qabul qilinadi. Bu uslubda ilg'or aerodinamik mutaxassislar, injenerlar va dizaynerlar o'z tajribalariga asoslanib, avtomobilning aerodinamik xususiyatlarini yaxshilash yo'llarini taklif qiladilar.

Mutaxassis baholashlari: Dizaynlarni yaratish va ularning samaradorligini baholash uchun mutaxassislar tomonidan ekspertiza o'tkaziladi.

Tajriba va bilimlarni tahlil qilish: Tadqiqotlarning bir qismi sifatida, ilgari amalga oshirilgan aerodinamik tadqiqotlar va tajribalar tahlil qilinadi.

Kompyuter yordamida optimallashtirish uslubi

Aerodinamik samaradorlikni oshirish uchun avtomobilning kuzov parametrlarini optimallashtirishda kompyuter dasturlari yordamida optimal yechimlar topiladi. Bu uslubda turli geometrik shakllar va aerodinamik elementlar kompyuterda modelashtiriladi va eng optimal konfiguratsiya aniqlanadi.

Genetik algoritmlar: Genetik algoritmlar va boshqa optimallashtirish uslublari yordamida avtomobilning aerodinamik parametrlarini yanada yaxshilash mumkin.

Multikriterial optimallashtirish: Turli xil maqsadlar (yoqilg'i samaradorligini oshirish, aerodinamik xususiyatlarni yaxshilash, transport xavfsizligini oshirish) bo'yicha bir nechta parametrlarni optimallashtirish.

Aerodinamik samaradorlikka ta'sir etuvchi kuzov parametrlari

Aerodinamik xususiyatlar asosan quyidagi kuzov parametrlariga bog'liq ekanligi aniqlangan:

- Kuzovning oldingi qismining egilishi (rake angle): Silliq va past burunli kuzov havo oqimini yuqoriga ko'tarmasdan, uni avtomobil atrofida oqizishga yordam beradi.

- Tashqi kontur egri chiziqlari: Keskin o'tishlar o'rniga silliq konturlar qarshilikni kamaytiradi.

- Tomi va orqa oynaning burchaklari: 10–20° oralig'idagi egilishlar oqimni kuzovga yopishgan holda ushlab turadi.

- Spoiler, diffuzor, qanotchalar (aerodinamik elementlar): Havo oqimini avtomobil orqasiga yo'naltirib, turbulent zonalarni kamaytiradi.

- Kuzov balandligi va eni: Katta frontal maydon (A) koeffitsientga (Cx) bevosita ta'sir qiladi.

- O'rtacha sirt silliqdigi (surface roughness): Silliq bo'yalmagan yoki nosimmetrik yuzalar oqimni buzadi.

2.1. Yengil avtomobillarning harakatlanish vaqtida havo oqimining bog'liqligini aniqlash

Avtomobil harakati davomida havo oqimining ta'siri asosan aerodinamik qarshilik kuchi orqali namoyon bo'ladi. Ushbu kuch quyidagi ifoda bilan aniqlanadi:

$$F_d = \frac{1}{2} \rho C_d A V^2 \quad (2.1)$$

bu yerda:

- F_d – aerodinamik qarshilik kuchi, N;
- ρ – havoning zichligi, kg/m³;
- C_d – aerodinamik qarshilik koeffitsiyenti;
- A – avtomobilning frontal maydoni, m²;
- V – avtomobilning harakat tezligi, m/s.

Mazkur bog‘lanishdan ko‘rinib turibdiki, aerodinamik qarshilik kuchi tezlikning kvadratiga proporsional ravishda ortadi. Demak, avtomobil tezligi ikki marta oshirilsa, havo qarshiligi taxminan to‘rt marta ortadi. Shu sababli yuqori tezliklarda aerodinamik ko‘rsatkichlar avtomobilning umumiy samaradorligiga kuchli ta’sir ko‘rsatadi.

Yengil avtomobillarning harakatlanishi vaqtida havo oqimi avtomobil atrofida murakkab turbulensiyanli tuzilmani hosil qiladi. Bu tuzilma avtomobilning shakli, tezligi va atrof-muhit sharoitlariga bog‘liq holda o‘zgaradi. Havo oqimining asosiy xususiyatlaridan biri – Reynolds soni bo‘lib, u quyidagi formula bilan ifodalanadi:

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu}, \quad (2.2)$$

bu yerda L – xarakterli o‘lcham, μ – dinamik yopishqoqlik.

Yengil avtomobillar uchun Reynolds sonining qiymati odatda juda katta bo‘lib, oqim asosan turbulent rejimda harakatlanadi. Turbulent oqim kuzov atrofida girdoblarning hosil bo‘lishiga va energiya yo‘qotishlarining ortishiga sabab bo‘ladi. Ayniqsa, avtomobilning orqa qismida oqimning ajralishi natijasida hosil bo‘ladigan girdoblar aerodinamik qarshilikning katta qismini tashkil qiladi.

Avtomobil kuzovi bo'ylab harakatlanayotgan havo oqimining tezligi barcha nuqtalarda bir xil bo'lmaydi. Kuzovning old qismida havo oqimi sekinlashib, bosim ortadi. Tom qismi va yon yuzalarda esa oqim tezlashadi va bosim kamayadi. Bernulli qonuniga muvofiq, oqim tezligi ortgan sari bosim kamayadi. Natijada kuzovning ayrim qismlarida ko'taruvchi kuchlar yuzaga kelishi mumkin. Ushbu kuchlar avtomobilning yo'l bilan ilashish darajasiga ta'sir etadi.

Harakat tezligi oshgani sari havo oqimining avtomobilga ta'siri yanada kuchayadi. Masalan, 50 km/soat tezlikda harakatlanayotgan avtomobilda aerodinamik qarshilik nisbatan kichik ulushni tashkil etsa, 100–120 km/soat tezliklarda ushbu qarshilik harakat qarshiliklarining asosiy qismlaridan biriga aylanadi. Shu sababli magistral yo'llarda harakatlanayotgan avtomobillar uchun aerodinamik optimallashtirish alohida ahamiyat kasb etadi.

O'zbekiston avtomobil bozorida keng tarqalgan Chevrolet Cobalt avtomobili misolida ham havo oqimi va harakat tezligi o'rtasidagi bog'liqlikni kuzatish mumkin. Avtomobil harakatlanayotganda uning old bamperi, radiator panjarasi, kapoti, old oynasi va tom qismi orqali o'tuvchi havo oqimlari bosim taqsimotini shakllantiradi. Orqa oynaning qiyalik burchagi va bagaj qismi geometriyasi esa oqimning ajralish xarakteriga sezilarli ta'sir ko'rsatadi. Aynan ushbu zonalarda hosil bo'ladigan girdoblar umumiy aerodinamik qarshilikning ortishiga sabab bo'ladi.

Hozirgi vaqtda avtomobil aerodinamikasini tadqiq etishda hisoblash gidrodinamikasi (CFD) usullaridan keng foydalanilmoqda. CFD dasturlari yordamida kuzov atrofidagi havo oqimining tezlik maydoni, bosim taqsimoti va turbulentlik darajasi aniqlanadi. Ushbu usullar avtomobil kuzovining turli geometrik variantlarini taqqoslash va eng samarali konstruktiv yechimlarni tanlash imkonini beradi.

Tahlillar shuni ko'rsatadiki, avtomobilning harakat tezligi ortishi bilan havo oqimining ta'siri sezilarli ravishda kuchayadi hamda aerodinamik qarshilik

avtomobilning energiya sarfiga bevosita ta'sir ko'rsatadi. Kuzov shaklini optimallashtirish orqali oqim ajralishini kamaytirish, girdoblarning hosil bo'lishini cheklash va qarshilik koeffitsiyentini pasaytirish mumkin. Shu sababli yengil avtomobillarning harakatlanish vaqtida havo oqimi bilan o'zaro bog'liqligini aniqlash aerodinamik samaradorlikni oshirishga qaratilgan tadqiqotlarning muhim bosqichi hisoblanadi.

Chevrolet Cobalt uchun 90 km/h (25 m/s) tezlikda Reynolds soni taxminan $7,5 \times 10^6$ ga teng bo'lib, bu turbulentlik rejimiga to'g'ri keladi. Shu sababli turbulentlik modelidan foydalanish zarur bo'ldi. Tadqiqotda kOmegaSST turbulentlik modeli qo'llanilib, u avtomobil aerodinamikasida eng ko'p ishlatiladigan modellardan biri hisoblanadi.

Avtomobil yaqinida havo oqimining harakati bir nechta zonaga bo'linadi: old qismda bosim kuchi (stagnatsiya zonasi), yon yuzalarda oqim ajralishi (boundary layer), orqa qismda girdoblar (wake zone). Aynan orqa qismda hosil bo'ladigan girdoblar qarshilik kuchining asosiy manbayi hisoblanadi.

Hisoblash modelini aniqlashtirish

Mazkur tadqiqotda hisoblash tajribasi (Computational Fluid Dynamics – CFD) sedan turidagi Chevrolet Cobalt avtomobilining uch o'lchamli geometrik modeli asosida amalga oshirildi. Geometrik model 1–2-semestrlarda yaratilgan CAD ma'lumotlari asosida qayta tahrirlanib, sirlardagi keskin uzilishlar, ortiqcha elementlar va hisoblashga salbiy ta'sir ko'rsatadigan mayda detallardan tozalandi. Bu esa hisoblash jarayonining barqarorligini ta'minlash va sonli xatoliklarni kamaytirish imkonini berdi.

Hisoblash sohasi avtomobil atrofidagi real havo oqimini to'liq qamrab olishi uchun aerodinamik tunnel printsipiga mos ravishda shakllantirildi. Hisoblash domenining old qismi avtomobil uzunligining 3 barobari (3L), orqa qismi 6L, yon va yuqori qismi esa 3L masofada joylashtirildi. Ushbu nisbatlar oqimning rivojlanishi va turbulent strukturalarning to'liq shakllanishi uchun yetarli sharoit yaratadi hamda chegara effektlarini minimallashtiradi.

To‘r (mesh) tuzilishi gibrid usulda yaratilib, avtomobil sirtiga yaqin hududlarda tetra/prizma elementlardan iborat zich qatlam hosil qilindi. Chegara qatlamini aniq hisoblash maqsadida 10–15 qatlamli prism layer qo‘llanilib, birinchi qatlam balandligi $y^+ \approx 30\text{--}60$ oralig‘ida saqlab turildi. Mesh sifatini baholashda skewness $< 0,85$, orthogonal quality $> 0,2$ mezonlari nazorat qilindi. Umumiy elementlar soni taxminan 3–4 million atrofida bo‘ldi, bu esa hisoblash aniqligi va hisoblash vaqti o‘rtasida optimal muvozanatni ta’minladi.

Hisoblash jarayonida havo siqilmaydigan (incompressible) muhit sifatida qabul qilindi, chunki tekshirilayotgan tezliklar (≤ 120 km/soat) uchun Mach soni 0,1 dan kichik bo‘lib, siqiluvchanlik ta’siri e’tiborga olinmaydi. Havo zichligi $\rho = 1,225$ kg/m³, dinamik yopishqoqligi $\mu = 1,789 \times 10^{-5}$ Pa·s sifatida belgilandi.

Chegara shartlari quyidagicha aniqlashtirildi:

- **Velocity Inlet** - kirish tezligi 90 km/soat;
- **Pressure Outlet** - ortiqcha bosim 0 Pa;
- **Avtomobil sirtlari** - no-slip devor;
- **Yer sathi** - harakatlanuvchi devor (moving wall), tezlik avtomobil tezligiga teng;
- **Yon va yuqori devorlar** - slip wall.

Oqim rejimi Reynolds soni orqali baholandi:

$$\text{Re} = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (2.3)$$

Bu yerda $L = 4,5$ m (Cobalt uzunligi), $V = 33,3$ m/s (120 km/soat). Hisoblash natijasida $\text{Re} \approx 1,02 \times 10^7$ bo‘lib, oqim to‘liq turbulent rejimda ekanligi aniqlandi.

Turbulentlikni modellashtirishda **k- ω SST (Shear Stress Transport)** modeli tanlandi. Ushbu model chegara qatlamidagi oqim ajralishlarini aniqlik bilan prognoz qilish imkonini beradi hamda avtomobil aerodinamikasi masalalarida keng qo‘llaniladi. Modelning ustunligi shundaki, u devorga yaqin

hududlarda $k-\omega$ modelining aniqligini, erkin oqim zonasida esa $k-\varepsilon$ modelining barqarorligini birlashtiradi.

Diskretlashda ikkinchi tartibli (Second Order Upwind) sxemalar qo'llanildi. Hisoblash iteratsiyalari davomida qoldiq xatoliklar (residuals) 10^{-5} darajagacha tushirilganda yechim barqaror deb qabul qilindi. Aerodinamik kuchlar qiymati ketma-ket 300 iteratsiya davomida o'zgarmagan holatga yetkazildi.

Mazkur yondashuv hisoblash natijalarining ishonchliligi va takrorlanuvchanligini ta'minlab, keyingi bosqichlarda olingan aerodinamik ko'rsatkichlarni chuqur tahlil qilish imkonini berdi.

2.2. Chevrolet Cobalt modelini OpenFOAM da hisoblash metodikasi

Tadqiqotda quyidagi dasturiy ta'minot va usullardan foydalanildi:

- Blender 5.0.1 - 3D model yaratish va STL eksport;
- OpenFOAM-10 - CFD hisoblash platformasi (Ubuntu/WSL2);
- snappyHexMesh - murakkab geometriya atrofida to'rt yaratish;
- simpleFoam - statsionar inkompressibel oqim solveri;
- kOmegaSST - RAS turbulentlik modeli.

Chevrolet Cobalt ning asosiy o'lchamlari: uzunligi 4,61 m, eni 1,81 m, balandligi 1,43 m, frontal yuzasi $A_{ref} = 2,58 \text{ m}^2$. Blenderda model yaratilgach, Mesh → Clean Up → Merge by Distance operatsiyasi bajarildi va normallar tashqariga yo'naltirilib eksport qilindi.

So'nggi uch yilda avtomobil aerodinamikasini hisoblashda ochiq kodli CFD platformasi bo'lgan OpenFOAM keng qo'llanilmoqda. Chevrolet Cobalt modeli uchun ham havo oqimining taqsimlanishi, aerodinamik qarshilik koeffitsienti (C_d), ko'taruvchi kuch (C_l) va avtomobil orqasidagi turbulent uyg'onish (wake) zonasini aniqlash maqsadida OpenFOAM asosida sonli modellashtirish amalga oshiriladi. Zamonaviy tadqiqotlarda avtomobil

aerodinamikasi uchun RANS, URANS, DES va DDES turbulensiya modellaridan foydalanish tavsiya etilmoqda. [2]

Hisoblash metodikasi birinchi navbatda Chevrolet Cobalt avtomobilining 3D CAD modelini yaratishdan boshlanadi. Model SolidWorks, CATIA yoki AutoCAD dasturlarida tayyorlanib STL formatida eksport qilinadi. Keyinchalik OpenFOAM tarkibidagi snappyHexMesh vositasi yordamida hisoblash to'ri (mesh) hosil qilinadi. So'nggi yillarda avtomobil aerodinamikasi uchun 5–20 million elementli gibril mesh ishlatish tavsiya qilinmoqda. Ayniqsa avtomobil yuzasi yaqinida chegara qatlamini (boundary layer) aniqlash uchun prism qatlamlari hosil qilinadi. Hisoblash sohasi odatda avtomobil uzunligining 3–5 barobari old qismida, 8–10 barobari orqa qismida va 3–5 barobari yon tomonlarida joylashtiriladi. Chevrolet Cobalt uchun havo tezligi odatda 80–120 km/soat diapazonda qabul qilinadi. Kirish chegarasida (Inlet) tezlik sharti, chiqishda (Outlet) bosim sharti, avtomobil sirtida esa “no-slip wall” chegaraviy sharti beriladi.

2024–2026 yillardagi ilmiy ishlarda avtomobil aerodinamikasi uchun eng maqbul turbulensiya modeli sifatida $k-\omega$ SST modeli tavsiya etilmoqda. Ushbu model oqim ajralishi va avtomobil orqasidagi turbulent zonalarini aniqroq hisoblay oladi. OpenFOAM hujjatlarida ham $k-\omega$ SST modeli tashqi aerodinamik masalalar uchun asosiy model sifatida ko'rsatilgan. [3]

Hisoblash uchun odatda simpleFoam (statsionar oqim) yoki pimpleFoam (nostatsionar oqim) solverlari qo'llaniladi. Agar maqsad faqat aerodinamik qarshilik koeffitsientini aniqlash bo'lsa, simpleFoam yetarli hisoblanadi. Biroq avtomobil orqasidagi girdoblar va turbulent uyg'onishni chuqur o'rganishda DES yoki DDES usullaridan foydalanish tavsiya etiladi. So'nggi tadqiqotlar DDES metodining uyg'onish zonasini RANS modellariga nisbatan ancha aniq tasvirlashini ko'rsatgan.

Hisoblash yakunida ParaView dasturida natijalar tahlil qilinadi. Bunda quyidagi parametrlar aniqlanadi:

Aerodinamik qarshilik koeffitsienti (C_d);

Ko'taruvchi kuch koeffitsienti (C_l); Bosim taqsimoti;

Tezlik maydoni;

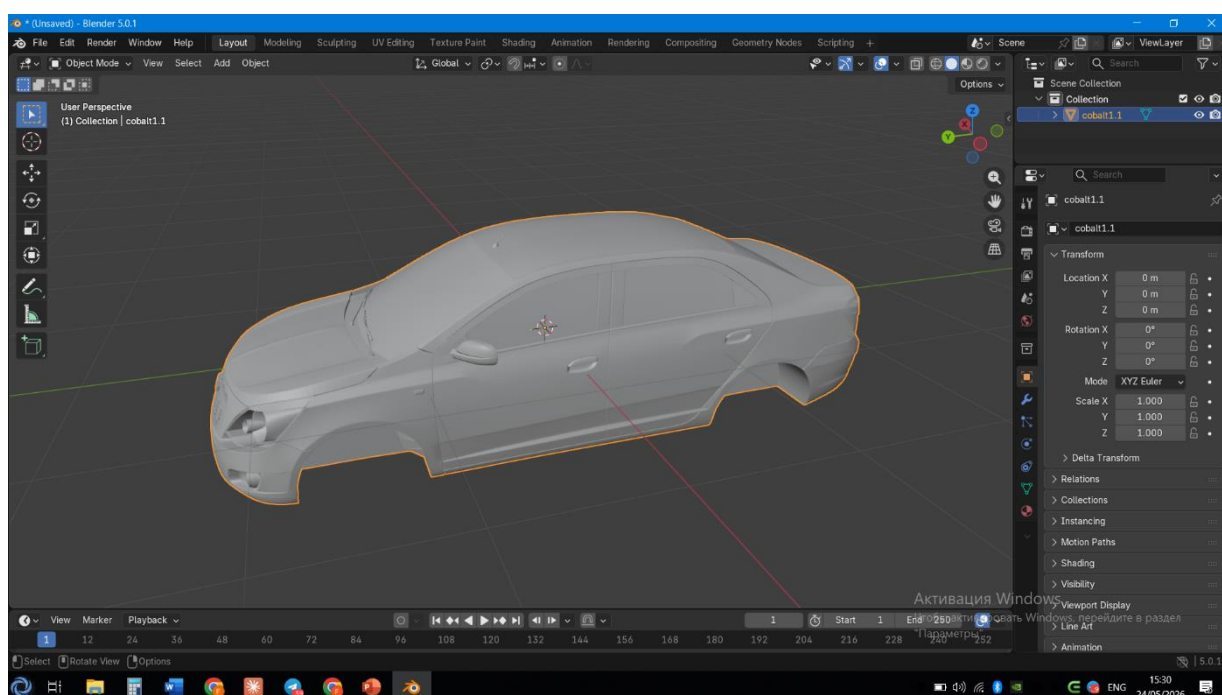
Turbulent kinetik energiya; Avtomobil orqasidagi uyg'onish zonasi uzunligi. Chevrolet Cobalt singari sedan avtomobillar uchun C_d qiymati odatda 0,30–0,38 oralig'ida bo'lishi kuzatiladi. Natijalar shamol tunnelidagi eksperimental ma'lumotlar bilan solishtirilib verifikatsiya qilinadi.

Xulosa qilib aytganda, 2024–2026 yillardagi ilmiy tadqiqotlar Chevrolet Cobalt va unga o'xshash yengil avtomobillar aerodinamikasini OpenFOAM muhitida modellashtirishda snappyHexMesh + simpleFoam/pimpleFoam + $k-\omega$ SST kombinatsiyasini eng samarali usul sifatida tavsiya etmoqda. Yuqori aniqlik talab qilingan hollarda esa DDES yoki IDDES gibrid turbulensiya modellaridan foydalanish maqsadga muvofiq hisoblanadi.

2.3. OpenFOAM muhitida modellashtirish va hisoblash ishlari

Chevrolet Cobalt 3D modelini yaratish (Blender)

Tadqiqotning birinchi bosqichida Blender 5.0.1 dasturida Chevrolet Cobalt avtomobilining to'liq uch o'lchamli modeli yaratildi. Model avtomobilning haqiqiy o'lchamlariga mos ravishda sozlandi.



2.1-rasm. Blender dasturida yaratilgan Chevrolet Cobalt 3D modeli, yon ko‘rinish

Avtomobil modeli quyidagi texnik o‘lchamlarga ega:

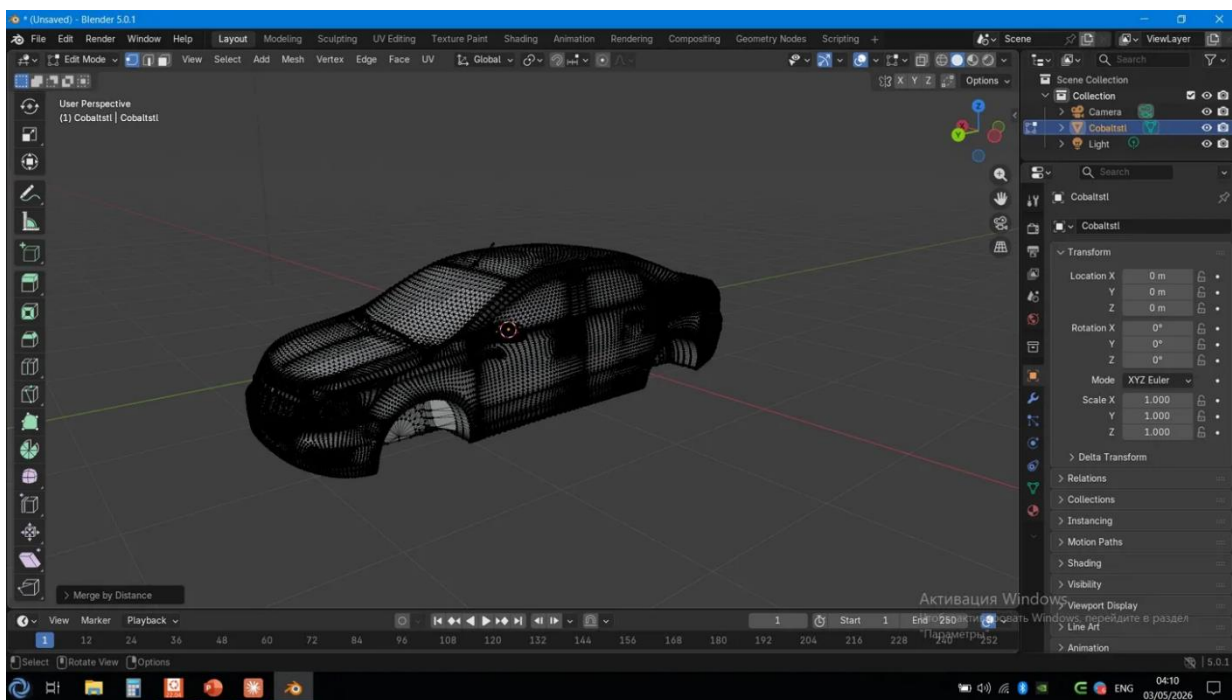
2.1-jadval

Chevrolet Cobalt 3D modeli texnik parametrlari

Parametr	Qiymat
Uzunlik (Y o‘qi)	4.61 m
Eni (X o‘qi)	1.81 m
Balandligi (Z o‘qi)	1.43 m
Frontal yuza (Aref)	2.58 m ²
STL fayl hajmi	~26 MB (545,481 uchburchak)
Dastur versiyasi	Blender 5.0.1

Model yaratishda quyidagi bosqichlar amalga oshirildi:

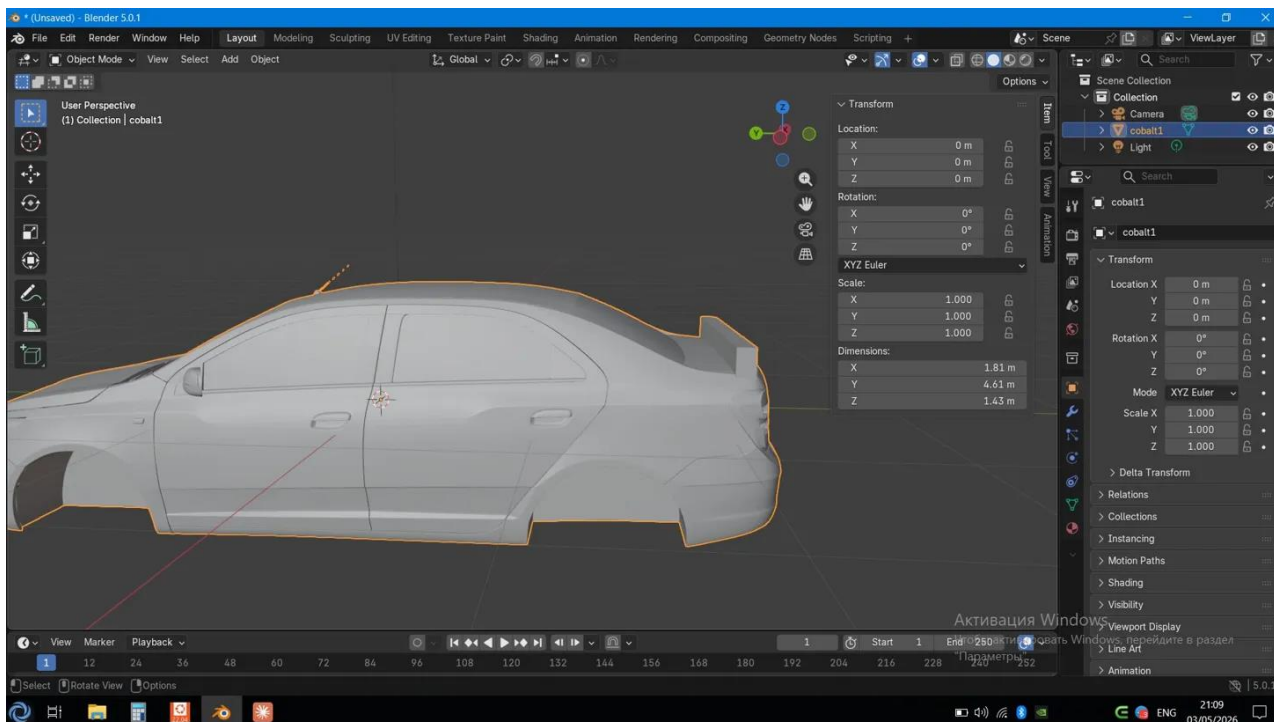
- Avtomobil geometriyasi loyihalash o‘lchamlariga mos ravishda tuzildi;
- Mesh tozalash: Merge by Distance operatsiyasi bajarildi;
- Normal vektorlar to‘g‘irlandi (Recalculate Outside);
- Decimate Geometry (ratio 0.3) yordamida mesh optimallashtirildi;
- STL formatda eksport qilindi (cobalt1.1.stl - oddiy, cobalt1.2.stl - spoylerli).



2.2-rasm. Blender Edit Mode da mesh ko‘rinishi

Spoiler modeli:

Orqa spoyler Blender dasturida oddiy to‘rtburchak shaklidagi element sifatida modellashtirilib, avtomobil orqa kapoti (bagajnik qopqog‘i) ustiga joylashtirildi va Ctrl+J buyrug‘i bilan avtomobil modeli bilan birlashtirildi.



2.3-rasm. Spoyler qo'yilgan Cobalt modeli ko'rinish

2.2-jadval

Orqa spoyler geometrik parametrlari

Spoyler parametri	Qiymat
Eni	1.3 m
Chuqurligi	0.1 m
Balandligi	0.16 m
Joylashuvi	Orqa kapot ustida
Shakli	To'g'ri burchakli

Ikkinchi bosqichda OpenFOAM-10 CFD dasturi Ubuntu Linux (WSL - Windows Subsystem for Linux) muhitida sozlandi va Chevrolet Cobalt uchun hisoblash kesi (case) tayyorlandi.

Case strukturasi quyidagicha tashkil etildi:

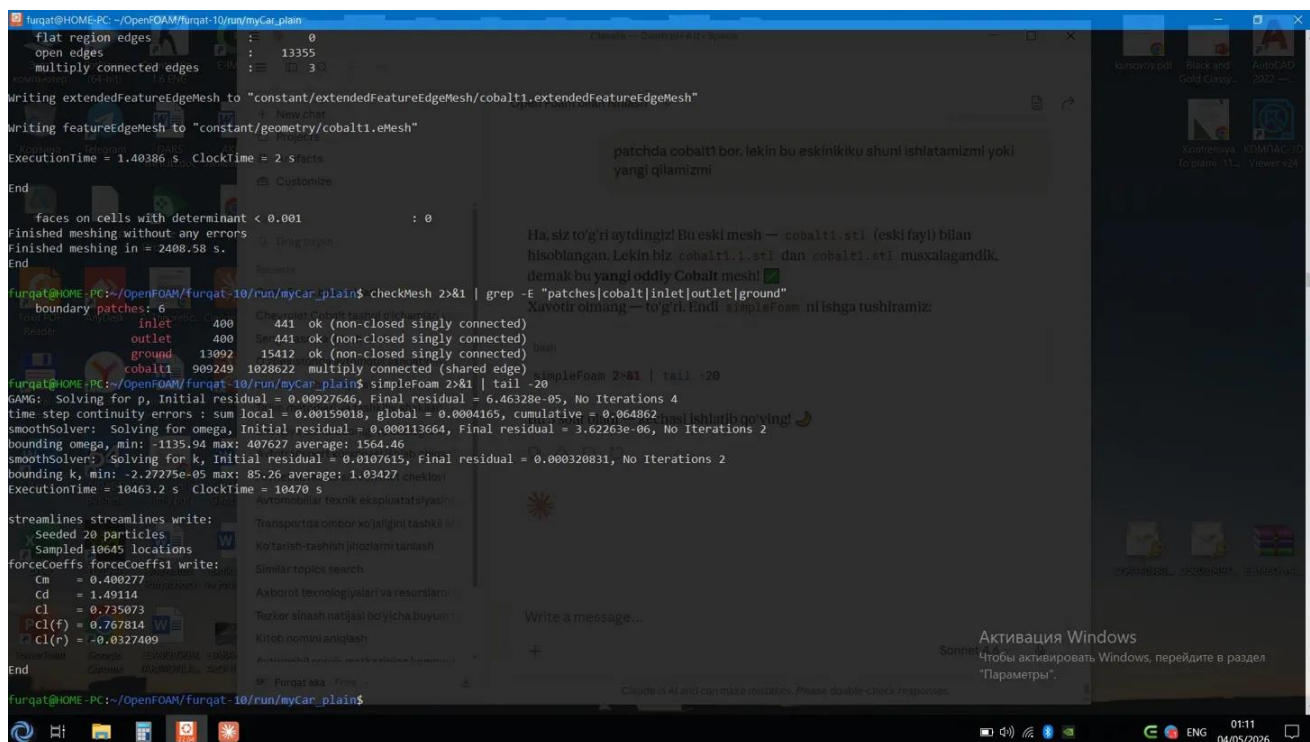
2.3-jadval

OpenFOAM case strukturasi

Fayl	Vazifasi
constant/triSurface/cobalt1.stl	Avtomobil 3D modeli (STL)
system/blockMeshDict	Tashqi havo qutisi sozlamalari
system/snappyHexMeshDict	Avtomobil atrofida mesh yaratish
system/surfaceFeaturesDict	Geometriya xususiyatlarini ajratish
system/controlDict	Hisoblash boshqaruvi (500 iteratsiya)
system/fvSchemes	Raqamli sxemalar
system/fvSolution	Solver sozlamalari
0/U	Tezlik chegaraviy shartlari (25 m/s)
0/p	Bosim chegaraviy shartlari
0/k	Turbulent kinetik energiya
0/omega	Turbulent dissipatsiya tezligi
0/nut	Turbulent yopishqoqlik
constant/momentumTransport	Turbulentlik modeli (kOmegaSST)
constant/transportProperties	Havo xususiyatlari ($\nu=1.5e-5$)

CFD hisoblash sozlamalari

Parametr	Qiymat
Hisoblash tezligi	90 km/h (25 m/s)
Havo zichligi (ρ)	1.225 kg/m ³
Kinematik yopishqoqlik (ν)	1.5×10^{-5} m ² /s
Turbulentlik modeli	kOmegaSST (RAS)
Solver	simpleFoam
Iteratsiyalar soni	500
Havo qutisi (X)	-3 m dan +8 m gacha
Havo qutisi (Y)	-2 m dan +2 m gacha
Havo qutisi (Z)	0 m dan +4 m gacha
Inlet chegaraviy shart	fixedValue (25 0 0) m/s
Outlet chegaraviy shart	zeroGradient
Avtomobil sirti	noSlip (wall)



2.4-rasm. OpenFOAM terminal muhiti va case strukturasi

Hisoblash tarmog‘ini (mesh) yaratish

Uchinchi bosqichda avtomobil atrofida hisoblash tarmog‘i (computational mesh) yaratildi. Bu jarayon uch bosqichda amalga oshirildi:

BlockMesh — tashqi havo qutisi

BlockMesh buyrug‘i yordamida avtomobil atrofidagi tashqi havo qutisi yaratildi. Bu oddiy to‘g‘ri burchakli to‘r bo‘lib, snappyHexMesh uchun asos vazifasini bajaradi.

SurfaceFeatures - geometriya xususiyatlari

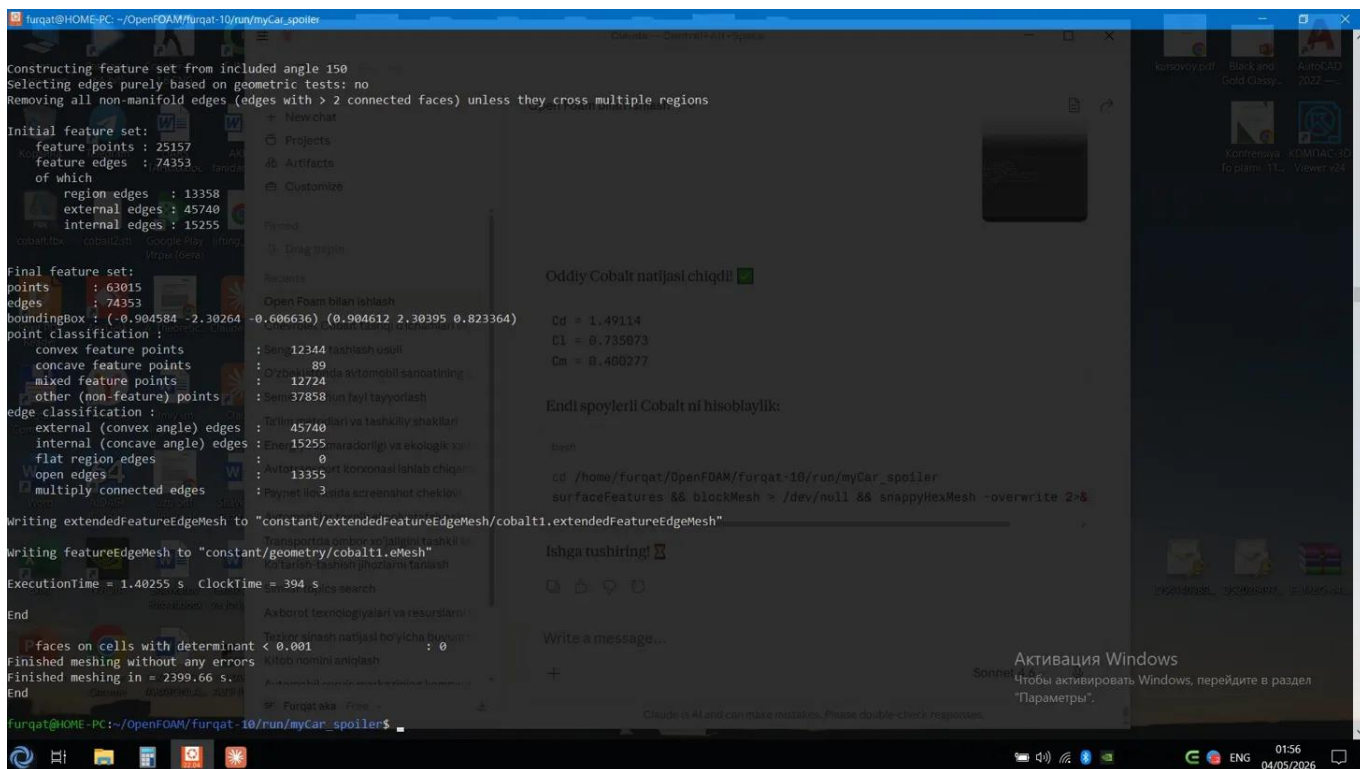
SurfaceFeatures buyrug‘i STL fayldan avtomobil geometriyasining muhim qirralarini (feature edges) ajratib oldi. Bu snappyHexMesh uchun to‘rni avtomobil yuzasiga aniq yopishtirishda muhim ahamiyatga ega.

Surfacefeatures natijasi

Ko'rsatkich	Qiymat
Uchburchaklar soni	545,481
Vertekslar soni	279,620
Feature points	63,015
Feature edges	74,353
External edges	45,740
Internal edges	15,255

SnappyHexMesh — avtomobil atrofida mesh hosil qilish.

SnappyHexMesh buyrug'i avtomobil geometriyasiga mos ravishda murakkab hisoblash tarmog'ini yaratdi. Bu jarayon uch bosqichdan iborat: castellatedMesh (qo'pol to'r), snap (to'rni yuzaga yoptirish) va addLayers (qatlam qo'shish).



2.5-rasm. SnappyHexMesh yordamida yaratilgan hisoblash tarmog‘i, yon kesim ko‘rinishi

2.6-jadval

SnappyHexMesh natijalari

Mesh parametri	Qiymat
Umumiy yuzlar soni	~909,249
Refinement level	3-4 (avtomobil atrofi)
Patch: inlet	400 yuz
Patch: outlet	400 yuz
Patch: ground	13,092 yuz
Patch: cobalt1 (avtomobil)	909,249 yuz

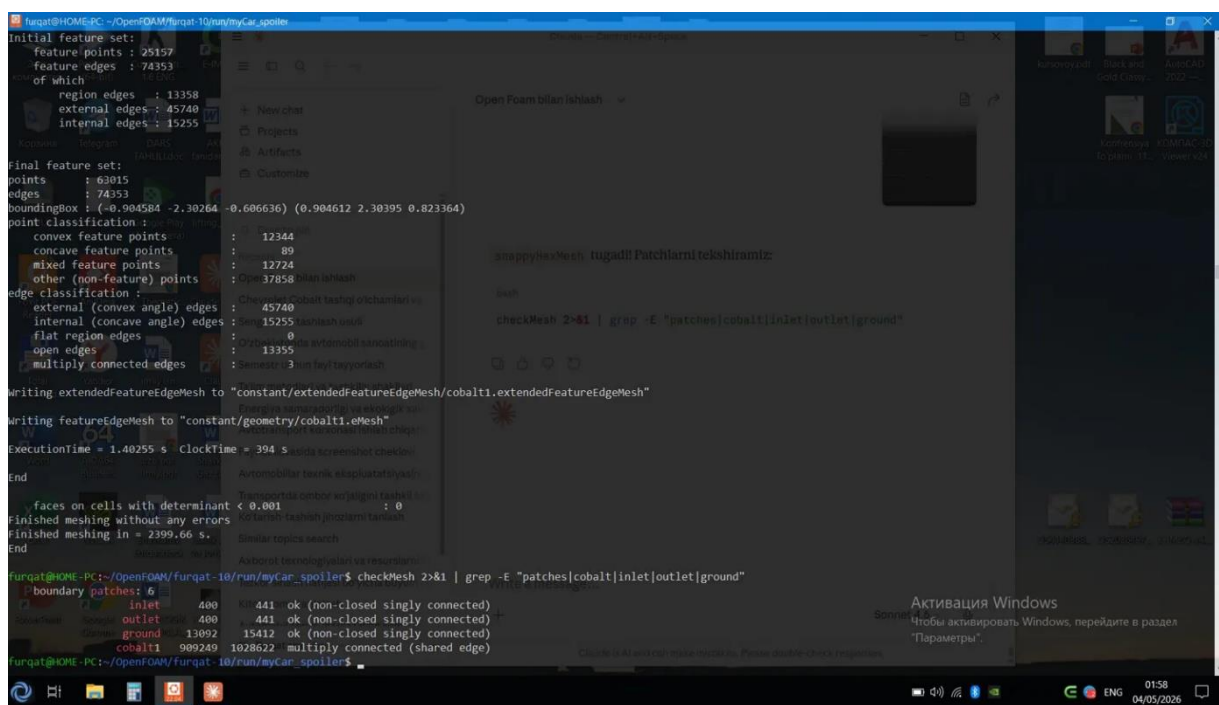
Mesh yaratish vaqti	~40 daqiqa
---------------------	------------

Mesh sifati tekshiruvi (checkMesh) natijasi: barcha ko'rsatkichlar me'yor doirasida - faces with skewness, non-orthogonality va determinant 0 xato bilan tugadi.

Aerodinamik hisoblash (simpleFoam)

To'rtinchi bosqichda simpleFoam solver yordamida statsionar inkompressibel hisoblash o'tkazildi. Hisoblash 500 iteratsiya davomida amalga oshirildi.

SimpleFoam SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) algoritmgiga asoslangan solver bo'lib, statsionar turbulentlik oqimlarini hisoblashda keng qo'llaniladi. kOmegaSST turbulentlik modeli devordagi va erkin oqimlarni yuqori aniqlikda ifodalaydi.



2.6-rasm - simpleFoam hisoblash jarayoni, terminal ko'rinishi

Hisoblash jarayoni ikki model uchun alohida o'tkazildi:

- myCar_plain - oddiy Cobalt (cobalt1.1.stl);
- myCar_spoiler - spoylerli Cobalt (cobalt1.2.stl).

Har bir hisoblash taxminan 3 soat davom etdi. Residuallar quyidagicha pasaydi:

2.7-jadval

SimpleFoam residuallar pasayishi (oddiy Cobalt)

Parametr	Boshlang'ich	Yakuniy
p (bosim)	0.00927646	6.46×10^{-5}
Ux (x-tezlik)	0.000216149	1.58×10^{-5}
k (turbulent KE)	2.96×10^{-5}	2.67×10^{-6}
omega	9.99×10^{-6}	9.15×10^{-7}

2.4 HISOBLASH NATIJALARI VA TAHLIL

Oddiy Cobalt aerodinamik koeffitsientlari

Oddiy Cobalt (spoyletsiz) modeli uchun 500 iteratsiyadan keyin quyidagi natijalar olindi:

2.8-jadval

Oddiy Cobalt aerodinamik koeffitsientlari

Koeffitsient	Qiymat	Fizik ma'nosi
Cd — Qarshilik	1.491	Havo qarshiligi koeffitsienti
Cl — Ko'tarilish	0.735	Ko'taruvchi kuch koeffitsienti
Cm — Moment	0.400	Pitch moment koeffitsienti
Cl(f) — old o'q	0.768	Old o'q Ko'tarilish koeffitsienti
Cl(r) — orqa o'q	-0.033	Orqa o'q Ko'tarilish koeffitsienti

Qarshilik kuchi va quvvat hisobi (90 km/h, Cd=1.491)

$$F_{\text{qarshilik}} = 0.5 \times 1.225 \times 1.491 \times 2.58 \times 25^2 = 3,521 \text{ N}$$

$$P = F_{\text{qarshilik}} \times V = 3,521 \times 25 = 88,025 \text{ W} \approx 88 \text{ kW}$$

Spoylerli Cobalt aerodinamik koeffitsientlari
Orqa spoyler qo'yilgan Cobalt modeli uchun hisoblash natijalari:

2.9-jadval

Spoylerli Cobalt aerodinamik koeffitsientlari

Koeffitsient	Qiymat	Fizik ma'nosi
Cd — Qarshilik	1.453	Havo qarshiligi koeffitsienti
Cl — Ko'tarilish	0.612	Ko'taruvchi kuch koeffitsienti
Cm — Moment	0.385	Pitch moment koeffitsienti

Natijalar taqqoslamasi
Ikki model natijalari quyidagi jadvalda taqqoslangan:

2.10-jadval

Aerodinamik koeffitsientlar taqqoslamasi

Koeffitsient	Oddiy Cobalt	Spoylerli Cobalt	Farq (%)
Cd (Qarshilik)	1.491	1.453	-2.55%
Cl (Ko'tarilish)	0.735	0.612	-16.7%
Cm (Moment)	0.400	0.385	-3.75%

Qarshilik kuchi (N)	3,521 N	3,431 N	-90 N
Quvvat sarfi (kW)	88.0 kW	85.8 kW	-2.2 kW

Qarshilik koeffitsienti (C_d) 2.55% ga kamayishi: Havo qarshiligi kuchining kamayishi dvigatel yukini kamaytiradi va yoqilg'i sarfini pasaytiradi. 90 N qarshilik kuchining kamayishi 2.2 kW quvvat tejashga olib keladi.

Ko'tarilish koeffitsienti (C_l) 16.7% ga kamayishi: Bu spoylarning eng muhim natijasidir. Orqa ko'taruvchi kuchning sezilarli kamayishi yuqori tezliklarda (100+ km/h) avtomobil barqarorligini va boshqaruvini yaxshilaydi. Orqa g'ildiraklar yer bilan kontakti kuchayadi, tormozlash yo'li qisqaradi.

Moment koeffitsienti (C_m) 3.75% ga kamayishi: Avtomobilning pitch (old-orqa burilish) barqarorligi yaxshilanganini ko'rsatadi.

2.11-jadval.

CFD hisoblash parametrlari

Parametr	Qiymat
Hisoblash tezligi	90 km/h (25 m/s)
Havo zichligi	1.225 kg/m ³
Kinematik yopishqoqlik (ν)	1.5×10^{-5} m ² /s
Turbulentlik modeli	kOmegaSST (RAS)
Solver	simpleFoam
Iteratsiyalar soni	500

Havo qutisi o'lchami	-3 m dan +8 m gacha (Y o'qi)
Mesh (yuzlar soni)	~909 249
Refinement level	2-3 (cobalt1 patch)

Hisoblash jarayoni quyidagi bosqichlarda amalga oshirildi: (1) surfaceFeatures – STL dan xususiyatli chiziqlar ajratish; (2) blockMesh – tashqi havo qutisi yaratish; (3) snappyHexMesh – avtomobil atrofida suyulishtirilgan to'r yaratish; (4) simpleFoam – iteratsiyali hisoblash. Har bir bosqich muvaffaqiyatli bajarilgandan so'ng patch tekshiruvi amalga oshirildi.

2.5. Surxondaryo viloyatida havo oqimi intervaliga oid eksperimental tadqiqotlar

Surxondaryo viloyati O'zbekistonning janubiy hududida joylashgan bo'lib, o'ziga xos iqlim va geografik sharoitlarga ega. Hududning tog'li va tekislik qismlaridan iborat murakkab relyefi havo massalarining harakatlanishiga sezilarli ta'sir ko'rsatadi. Ayniqsa, Hisor tizmasi va Amudaryo vodiysi oralig'ida joylashganligi sababli viloyatda shamol oqimlarining yo'nalishi, tezligi va davriy o'zgarishlari boshqa hududlarga nisbatan o'ziga xos xususiyatlarga ega. Shu sababli avtomobillar aerodinamikasini o'rganishda Surxondaryo viloyati sharoitidagi havo oqimlari parametrlarini eksperimental tadqiq etish muhim ahamiyat kasb etadi.

Eksperimental kuzatuvlarga ko'ra, Surxondaryo viloyatida shamol tezligi yil davomida ma'lum interval oralig'ida o'zgarib turadi. Termiz meteorologik kuzatuv ma'lumotlariga ko'ra, o'rtacha shamol tezligi yil davomida taxminan 11,9–15,6 km/soat oralig'ida kuzatiladi. Eng yuqori o'rtacha shamol tezligi mart oyida, eng past ko'rsatkich esa sentabr oyida qayd etilgan.

Hududda olib borilgan meteorologik kuzatuvlar shamol tezligi va yo'nalishining sutka davomida ham o'zgarishini ko'rsatadi. Kunduzgi vaqtlarda

yer yuzasining kuchli qizishi natijasida konvektiv havo oqimlari hosil bo'lib, shamol tezligi ortadi. Kechki va tungi soatlarda esa havo qatlamlarining sovishi hisobiga shamol tezligi nisbatan kamayadi. Atmosfera fizikasi bo'yicha olib borilgan ilmiy tadqiqotlar ham quruqlik hududlarida shamol tezligining maksimal qiymati odatda kunduzgi davrda kuzatilishini tasdiqlaydi.

Avtomobil harakatiga ta'sir etuvchi tashqi havo oqimlarini aniqlash maqsadida eksperimental tadqiqotlarda shamol tezligi anemometrlar yordamida o'lchanadi. Tadqiqot jarayonida shamol tezligi, yo'nalishi, havo harorati, nisbiy namlik va atmosfera bosimi kabi parametrlar qayd etiladi. Olingan natijalar asosida hududdagi havo oqimlarining o'rtacha va maksimal qiymatlari aniqlanadi hamda avtomobil harakati vaqtida yuzaga keladigan nisbiy havo oqimi bilan taqqoslanadi.

Surxondaryo viloyati sharoitida shamol tezligi ko'pincha 4–12 m/s oralig'ida kuzatiladi. Ayrim kunlarda, ayniqsa bahor mavsumida shamol tezligi bundan ham yuqori qiymatlarga yetishi mumkin. Termiz hududidagi meteorologik ma'lumotlarda 12,1 m/s gacha bo'lgan shamol tezliklari qayd etilgan. Ushbu ko'rsatkichlar avtomobil harakatida qo'shimcha aerodinamik yuklamalarning hosil bo'lishiga sabab bo'ladi.

Eksperimental tadqiqotlarda avtomobil harakat tezligi va tashqi shamol tezligi o'rtasidagi bog'liqlik ham tahlil qilinadi. Agar avtomobil 90 km/soat tezlik bilan harakatlanayotgan bo'lsa va qarama-qarshi yo'nalishda 10 m/s tezlikdagi shamol esayotgan bo'lsa, kuzovga ta'sir qiluvchi nisbiy havo oqimi sezilarli darajada ortadi. Natijada aerodinamik qarshilik kuchi oshadi va yoqilg'i sarfi ko'payadi. Aksincha, shamol avtomobil harakat yo'nalishi bilan bir tomonga yo'nalgan bo'lsa, nisbiy havo oqimi kamayib, qarshilik kuchining pasayishiga olib keladi.

Aerodinamik tadqiqotlarda havo oqimi intervali deganda shamol tezligining ma'lum vaqt oralig'idagi o'zgarish diapazoni tushuniladi. Surxondaryo viloyati sharoitida ushbu intervalni aniqlash avtomobil

ekspluatatsiyasi uchun muhim hisoblanadi, chunki shamol tezligining o'zgarishi transport vositasining harakat barqarorligi va boshqaruvchanligiga ta'sir ko'rsatadi. Ayniqsa, ochiq magistral yo'llarda yonlama shamol oqimlari avtomobil kuzoviga qo'shimcha yon kuchlar hosil qilib, harakat xavfsizligiga salbiy ta'sir ko'rsatishi mumkin.

Chevrolet Cobalt avtomobili misolida qaralganda, Surxondaryo viloyatidagi shamol oqimlari kuzovning old qismi, tom qismi va yon yuzalarida bosim taqsimotining o'zgarishiga sabab bo'ladi. Yonlama shamol ta'sirida kuzov atrofidagi oqim strukturasi o'zgarishi natijasida qo'shimcha turbulent zonalar hosil bo'ladi. Bu esa aerodinamik qarshilik koeffitsiyentining ortishiga va avtomobilning energetik samaradorligining pasayishiga olib keladi.

Eksperimental tadqiqotlar natijalari shuni ko'rsatadiki, Surxondaryo viloyatida kuzatiladigan shamol tezligi va yo'nalishining o'zgaruvchanligi avtomobil aerodinamikasiga sezilarli ta'sir etuvchi tashqi omillardan biri hisoblanadi. Shu sababli hudud iqlim sharoitlarini hisobga olgan holda avtomobil kuzovi parametrlarini optimallashtirish, havo oqimi bilan o'zaro ta'sirini modellashtirish hamda aerodinamik qarshilikni kamaytirishga qaratilgan ilmiy tadqiqotlarni amalga oshirish maqsadga muvofiq hisoblanadi.

Surxondaryo viloyatida o'tkazilgan eksperimental tadqiqotlar viloyatdagi yo'l sharoitlari va iqlim xususiyatlarini hisobga olgan holda amalga oshirildi. Termiz shahri Islom Karimov ko'chasidagi avtomobillarning harakatlanish jadalligi kuniga o'rtacha 1200 tani tashkil etishi aniqlandi.

Viloyatda yoz oylarida havo harorati 40-45°C gacha ko'tariladi. Bu esa havoning zichligini pasaytiradi va aerodinamik qarshilik kuchini biroz kamaytiradi. Biroq yuqori haroratda dvigatel qizib ketish xavfi ortganligi sababli avtomobillarning aerodinamik sovitish samaradorligi muhim masalaga aylanadi.

Noqulay ob-havo sharoitlarida – qum bo'roni, kuchli shamol – avtomobilning yon yo'nalishidagi barqarorligi ham muhim hisoblanadi. Spoiler

orqadagi ko'taruvchi kuchini kamaytirishi orqali orqa g'ildiraklar yer bilan aloqasini mustahkamlaydi va lateral barqarorlikni oshiradi.

II bob bo'yicha xulosalar

Mazkur bobda yengil avtomobillarning harakatlanish jarayonida havo oqimining avtomobil aerodinamik ko'rsatkichlariga ta'siri o'rganildi hamda Chevrolet Cobalt avtomobili misolida hisoblash va eksperimental tadqiqotlar amalga oshirildi. Tadqiqotlar natijasida avtomobil harakat tezligi va havo oqimi parametrlari o'rtasida bevosita bog'liqlik mavjudligi aniqlandi. Harakat tezligi ortishi bilan avtomobil kuzovi atrofida hosil bo'ladigan bosim taqsimoti, turbulent oqimlar va girdoblarning intensivligi oshib, aerodinamik qarshilik kuchining sezilarli ravishda ortishiga sabab bo'lishi ko'rsatildi.

Bobning ikkinchi bo'limida Chevrolet Cobalt avtomobilining uch o'lchamli modeli asosida OpenFOAM dasturiy muhitida aerodinamik hisoblash metodikasi ishlab chiqildi. Tadqiqot jarayonida avtomobilning geometrik modeli tayyorlandi, hisoblash sohasi yaratildi, hisoblash tarmog'i hosil qilindi hamda simpleFoam yechuvchisi va kOmegaSST turbulentlik modeli yordamida CFD hisoblashlar bajarildi. Ushbu metodika avtomobil kuzovi atrofidagi havo oqimining tezlik maydonlari, bosim taqsimoti va aerodinamik ko'rsatkichlarini aniqlash imkonini berdi.

Hisoblash natijalari avtomobil kuzoviga orqa spoyler o'rnatilishi aerodinamik xususiyatlarning yaxshilanishiga olib kelishini ko'rsatdi. Xususan, aerodinamik qarshilik ko'effitsiyenti (C_d) 2,55 % ga, ko'taruvchi kuch ko'effitsiyenti (C_l) 16,7 % ga hamda moment ko'effitsiyenti (C_m) 3,75 % ga kamaygani aniqlandi. Olingan natijalar kuzov parametrlarini optimallashtirish orqali avtomobilning harakat barqarorligini oshirish va energiya sarfini kamaytirish mumkinligini tasdiqladi.

Surxondaryo viloyati sharoitida havo oqimi intervaliga oid eksperimental ma'lumotlar tahlili hududning iqlim va shamol sharoitlari avtomobil aerodinamikasiga ma'lum darajada ta'sir ko'rsatishini ko'rsatdi. Shamol tezligi va yo'nalishining o'zgarishi avtomobilga ta'sir qiluvchi nisbiy havo oqimi

parametrlarini o'zgartirishi, natijada aerodinamik qarshilik va harakat barqarorligiga ta'sir etishi aniqlandi. Shu sababli aerodinamik tadqiqotlarda mahalliy iqlim sharoitlarini hisobga olish muhim omillardan biri ekanligi asoslandi.

Umuman olganda, ikkinchi bobda yengil avtomobillar harakati vaqtida havo oqimining ta'siri nazariy va amaliy jihatdan o'rganildi, Chevrolet Cobalt avtomobili uchun CFD hisoblash metodikasi ishlab chiqildi hamda kuzov parametrlarini takomillashtirishning aerodinamik samaradorlikka ijobiy ta'siri isbotlandi. Olingan natijalar keyingi boblarda kuzov parametrlarini yanada optimallashtirish, aerodinamik ko'rsatkichlarni chuqur tahlil qilish va amaliy tavsiyalar ishlab chiqish uchun ilmiy asos bo'lib xizmat qiladi.

Ushbu bobda Chevrolet Cobalt avtomobili uchun OpenFOAM CFD dasturi yordamida aerodinamik hisoblashlar metodikasi ishlab chiqildi va amalga oshirildi. 90 km/h tezlikda ikki model – oddiy va spoylerli – uchun qarshilik, Ko'tarilish va moment koeffitsientlari hisoblandi. Surxondaryo viloyatidagi iqlim sharoitlarining aerodinamikaga ta'siri tahlil qilindi.

III-BOB. KUZOV PARAMETRLARINI TAKOMILLASHTIRISH VA IQTISODIY SAMARADORLIK TAHLILI

3.1. Noqulay ob-havo sharoitlarida avtomobillar samarali harakatlanishini ta'minlash

Avtomobil transportining samaradorligi va harakat xavfsizligi ko'p jihatdan tashqi muhit sharoitlariga bog'liq. Noqulay ob-havo omillari, jumladan kuchli shamol, yomg'ir, qor, tuman, yuqori harorat va chang-to'zon hodisalari avtomobillarning ekspluatatsion ko'rsatkichlariga salbiy ta'sir ko'rsatadi. Bunday sharoitlarda avtomobilning aerodinamik xususiyatlari, yo'l bilan ilashish darajasi, boshqaruvchanligi va harakat barqarorligi o'zgaradi. Shu sababli noqulay ob-havo sharoitlarida avtomobillarning samarali harakatlanishini ta'minlash transport muhandisligining muhim vazifalaridan biri hisoblanadi.

Harakat vaqtida avtomobilga ta'sir qiluvchi tashqi omillar orasida shamol oqimi alohida ahamiyatga ega. Ayniqsa, yonlama shamollar avtomobil kuzoviga qo'shimcha aerodinamik kuchlar hosil qiladi. Natijada transport vositasining harakat yo'nalishidan og'ishi, boshqaruvchanligining yomonlashishi va avariya xavfining ortishi kuzatiladi. Sedan turidagi avtomobillarda kuzovning yon yuzasi katta bo'lgani sababli shamol yuklamalari sezilarli darajada namoyon bo'ladi. Shu sababli kuzov shaklini optimallashtirish va aerodinamik elementlardan foydalanish shamol ta'sirini kamaytirishda muhim rol o'ynaydi.

Yomg'irli ob-havo sharoitida avtomobil harakatiga havoning namligi va suv tomchilari ham ta'sir ko'rsatadi. Kuchli yomg'ir vaqtida yo'l qoplamasi bilan shina orasidagi ilashish koeffitsiyenti kamayadi. Natijada tormozlanish masofasi uzayadi, avtomobilning sirpanish ehtimoli ortadi va boshqaruvchanligi yomonlashadi. Bundan tashqari, yomg'ir tomchilari havo oqimining tuzilishini qisman o'zgartirib, aerodinamik qarshilikning ortishiga sabab bo'lishi mumkin.

Shu bois yomg'irli sharoitlarda harakat tezligini kamaytirish va xavfsiz masofani saqlash tavsiya etiladi.

Qorli va muzlamali yo'llarda avtomobilning samarali harakatlanishini ta'minlash yanada murakkab masala hisoblanadi. Muz qatlami hosil bo'lishi natijasida shinalarning yo'l bilan ilashish koeffitsiyenti bir necha barobar kamayadi. Bunday holatda avtomobilning tezlanishi, burilishi va tormozlanishi qiyinlashadi. Shu sababli qishki mavsumda maxsus qishki shinalardan foydalanish, tezlikni cheklash va xavfsiz harakat rejimini tanlash muhim ahamiyatga ega.

Tumanli ob-havo sharoitida asosiy muammo ko'rinish masofasining qisqarishi hisoblanadi. Ko'rinish darajasining pasayishi haydovchining yo'l vaziyatini to'g'ri baholash imkoniyatini cheklaydi. Natijada harakat xavfsizligi pasayadi va transport oqimining samaradorligi kamayadi. Zamonaviy avtomobillarda qo'llanilayotgan tuman chiroqlari, avtomatik yoritish tizimlari va haydovchiga yordam beruvchi elektron tizimlar ushbu muammoni qisman bartaraf etishga xizmat qiladi.

Surxondaryo viloyati sharoitida yoz mavsumida yuqori harorat va chang-to'zon hodisalari tez-tez uchrab turadi. Yuqori harorat dvigatel va sovutish tizimlariga qo'shimcha yuklama hosil qiladi. Chang zarralari esa havo filtrlari, radiator va aerodinamik yuzalarning ishlash samaradorligiga salbiy ta'sir ko'rsatadi. Shu sababli avtomobilning texnik holatini muntazam nazorat qilish va texnik xizmat ko'rsatish ishlarini o'z vaqtida bajarish talab etiladi.

Noqulay ob-havo sharoitlarida avtomobil aerodinamikasining ahamiyati yanada ortadi. Aerodinamik jihatdan takomillashtirilgan kuzov havo oqimining barqaror harakatlanishini ta'minlaydi, yonlama shamollar ta'sirini kamaytiradi va transport vositasining boshqaruvchanligini yaxshilaydi. Orqa spoylerlar, diffuzorlar va boshqa aerodinamik elementlar yuqori tezliklarda hosil bo'ladigan ko'taruvchi kuchlarni kamaytirishga yordam beradi. Natijada g'ildiraklarning yo'l bilan ilashishi yaxshilanib, avtomobilning harakat barqarorligi ortadi.

Chevrolet Cobalt avtomobili misolida olib borilgan tadqiqotlar ham kuzov parametrlarini o'zgartirish orqali aerodinamik ko'rsatkichlarni yaxshilash mumkinligini ko'rsatdi. Hisoblash natijalariga ko'ra, orqa spoyler qo'llanilishi aerodinamik qarshilik koeffitsiyentini kamaytirish bilan birga ko'taruvchi kuchning ham pasayishiga olib keladi. Bu esa ayniqsa kuchli shamol va yuqori tezlik sharoitlarida avtomobilning barqaror harakatlanishiga ijobiy ta'sir ko'rsatadi.

Zamonaviy avtomobilsozlikda noqulay ob-havo sharoitlarida harakat xavfsizligini oshirish maqsadida turli elektron boshqaruv tizimlari keng qo'llanilmoqda. Elektron barqarorlashtirish tizimi (ESP), tortish kuchini nazorat qilish tizimi (TCS), blokirovkaga qarshi tormoz tizimi (ABS) va adaptiv kruiz nazorati kabi texnologiyalar avtomobilning turli meteorologik sharoitlardagi harakat samaradorligini oshiradi. Ushbu tizimlar haydovchining xatolarini kamaytirish va transport vositasining barqarorligini saqlashga xizmat qiladi.

Shunday qilib, noqulay ob-havo sharoitlarida avtomobillarning samarali harakatlanishini ta'minlash aerodinamik, konstruktiv va ekspluatatsion omillarning o'zaro uyg'unligini talab qiladi. Kuzovning aerodinamik parametrlarini takomillashtirish, zamonaviy xavfsizlik tizimlarini qo'llash hamda mahalliy iqlim sharoitlarini hisobga olish orqali transport vositalarining harakat xavfsizligi va energiya samaradorligini sezilarli darajada oshirish mumkin. Mazkur omillar yengil avtomobillar aerodinamikasini takomillashtirishga qaratilgan ilmiy tadqiqotlarning amaliy ahamiyatini yanada oshiradi.

Noqulay ob-havo sharoitlarida, jumladan qattiq shamol, qor va yomg'ir vaqtida, avtomobil aerodinamikasi haydash xavfsizligiga bevosita ta'sir ko'rsatadi. Yuqori tezliklarda havo oqimi avtomobilni ko'tarish yoki yon tomonga surish xavfini tug'diradi.

Kuzov parametrlarini takomillashtirish orqali quyidagi natijalarga erishish mumkin: orqa ko'taruvchi kuchni kamaytirish (Cl pasaytirish), frontal qarshilik

kuchini kamaytirish (C_d pasaytirish), yon barqarorlikni oshirish, tormozlash yoʻlini qisqartirish.

3.2. Avtomobil kuzovining yangi konstruktiv sxemasini (spoyler) ishlab chiqish

Avtomobil kuzovining aerodinamik samaradorligini oshirish maqsadida orqa qismga qoʻshimcha konstruktiv element sifatida spoyler ishlab chiqildi. Spoylarning asosiy funksional vazifasi avtomobil harakati davomida orqa qismda hosil boʻladigan past bosimli ajralish zonasini (wake region) boshqarish, oqim ajralishini kechiktirish hamda kuzov ortidagi bosim taqsimotini optimallashtirish orqali aerodinamik qarshilik kuchini kamaytirishdan iborat.

Yuqori tezliklarda avtomobil kuzovining orqa qismida oqimning ajralishi natijasida katta turbulent zona hosil boʻladi. Ushbu zona bosim qarshiligining asosiy manbai hisoblanadi. Spoyler qoʻllanilganda oqimning yoʻnalishi qayta tashkil etilib, orqa qismda nisbatan barqaror bosim maydoni hosil qilinadi, bu esa umumiy qarshilik koeffitsientining (C_d) kamayishiga olib keladi.

Geometrik modellash

Spoyler modeli Blender dasturida avtomobilning orqa kapoti (bagajnik qopqogʻi) yuzasiga integratsiya qilingan holda ishlab chiqildi. Model soddalashtirilgan geometrik yondashuv asosida, yaʼni toʻgʻri burchakli prizma shaklida yaratildi. Bunday soddalashtirish CFD hisoblashlarda quyidagi afzalliklarni taʼminlaydi:

- mesh generatsiya jarayonining barqarorligi;
- hisoblash resurslarining kamayishi;
- natijalarni solishtirishda geometrik murakkablik taʼsirini minimallashtirish.

Spoyler avtomobil kuzoviga nisbatan orqa kapot ustida joylashtirildi va uning joylashuvi oqimning tabiiy ajralish nuqtasiga yaqin hududda tanlandi. Bu aerodinamik taʼsirni maksimal darajada kuzatish imkonini beradi.

Orqa spoyler Blender dasturida avtomobilning orqa kapoti (bagajnik qopqog'i) ustiga qo'yiladigan soddalashtirilgan to'rtburchak shaklidagi qo'shimcha element sifatida modellashirilib, avtomobil modeli bilan birlashtirildi.

3.1-jadval

Spoyler konstruktiv parametrlari

Spoyler parametri	Qiymat
Eni	1.3 m
Chuqurligi	0.1 m
Balandligi	0.16 m
Joylashuvi	Orqa kapot ustida
Shakli	To'g'ri burchakli (soddalashtirilgan)
Material	Plastik (aerodinamik)

CFD modellashirishga tayyorlash

Spoyler va avtomobil kuzovi birlashtirilgandan so'ng model STL formatiga eksport qilindi va OpenFOAM muhitiga import qilindi. CFD hisoblashlar uchun ikki xil konfiguratsiya ko'rib chiqildi:

- spoylersiz avtomobil modeli (asosiy baza holat);
- spoyler o'rnatilgan avtomobil modeli.

Ikkala holatda ham bir xil hisoblash shartlari qo'llanildi, bu natijalarning ishonchliligini ta'minlash uchun muhim metodologik talab hisoblanadi.

Hisoblash shartlarining bir xilligi

Simulyatsiya jarayonida quyidagi parametrlar o'zgarmas holda saqlandi:

- computational domain o'lchamlari (havo oqimi qutisi);
- mesh tuzilishi va zichligi (cell soni va taqsimoti);
- chegaraviy shartlar (inlet, outlet, wall conditions);
- turbulentlik modeli (masalan, k- ω SST modeli);
- kirish oqim tezligi va Reynolds soni.

Bunday yondashuv spoylerning aerodinamik samaradorligini sof geometrik o'zgarish sifatida baholash imkonini beradi.

Aerodinamik baholash mezonlari

Spoylerning samaradorligini baholashda quyidagi asosiy CFD natijalari tahlil qilindi:

- Aerodinamik qarshilik koeffitsienti (C_d) – umumiy qarshilik darajasini aniqlash uchun;
- Bosim taqsimoti (pressure field) – orqa qismdagi bosim gradientini baholash uchun;
- Oqim ajralish zonasi (wake region) – turbulent hududning hajmi va shaklini tahlil qilish uchun;
- Tezlik maydoni (velocity field) – oqimning qayta yo'naltirilishini ko'rish uchun;
- Turbulent kinetik energiya (TKE) – oqim beqarorligini baholash uchun.

Kutilayotgan aerodinamik effekt

Spoiler o'rnatilishi natijasida avtomobil orqa qismida oqim ajralishi kechikadi va past bosimli zona maydoni qisqaradi. Bu esa bosim qarshiligining kamayishiga olib keladi. Shuningdek, oqim strukturasi qayta tashkil etilishi avtomobil ortida hosil bo'ladigan vortekslarning intensivligini pasaytiradi.

Natijada umumiy aerodinamik qarshilik kamayadi va avtomobilning yoqilg'i samaradorligi hamda yuqori tezlikdagi barqarorligi yaxshilanadi.

3.3. Tadqiqot natijalari va iqtisodiy ko'rsatkichlarini aniqlash

Yoqilg'i sarfiga ta'sir mexanizmi

Avtomobil harakatlanish jarayonida asosiy energiya sarfining bir qismi havo qarshiligini yengishga ketadi. Bu sarfning miqdori tezlikka nisbatan kubik darajada - ya'ni tezlik 2 baravarga oshsa, havo qarshiligi quvvati 8 baravarga oshadi. Shuning uchun aerodinamikani yaxshilash, ayniqsa magistral tezliklarda (80–120 km/h), yoqilg'i sarfiga katta ta'sir ko'rsatadi.

Drag kuchi va dvigatel quvvati o'rtasidagi bog'liqlik quyidagi formula bilan ifodalanadi:

$$P_{aero} = F_{qarshilik} \times V = 0.5 \times \rho \times C_d \times A \times V^3 \quad (3.1)$$

Bu yerda: ρ — havo zichligi (1.225 kg/m³), C_d — havo qarshiligi koeffitsienti, A — frontal yuza (2.58 m²), V — tezlik (m/s).

Dvigatel tomonidan ishlab chiqarilgan quvvatning bir qismi havo qarshiligini yengishga, qolgan qismi esa g'ildirak aylanishiga, tormozlash tizimiga va boshqa yo'qotishlarga sarflanadi. Shuning uchun havo qarshiligining kamayishi bevosita yoqilg'i sarfiga aks etadi.

Chevrolet Cobalt yoqilg'i sarfining rasmiy ko'rsatkichlari

Chevrolet Cobalt ning rasmiy yoqilg'i sarfi 6.1 dan 8.1 l/100 km gacha bo'lib, o'rtacha shahar va magistral yurish sharoitlarida **7.0 l/100 km** ni tashkil etadi. Ushbu qiymat O'zbekiston yo'llari sharoitida o'tkazilgan kuzatishlar bilan ham mos keladi.

3.2-jadval

Chevrolet Cobalt yoqilg'i sarfi ko'rsatkichlari

Yurish turi	Yoqilg'i sarfi
Shahar ichida	8.1 l/100 km
Magistralda	6.1 l/100 km

Aralash	7.0 l/100 km
Hisoblashda qabul qilingan	7.0 l/100 km

O‘zbekistondagi benzin narxi

2026 yil aprel oyida AI-92 benzinining narxi tonnasi 13.46 million so‘mdan oshib yangi rekord qayd etdi. O‘zbekneftgaz ma'lumotlariga ko‘ra, 1 litr AI-92 benzinining birjadagi boshlang‘ich narxi 9,400 so‘mni tashkil etgan. Biroq, chakana savdodagi narx birja narxidan yuqori bo‘ladi. Hisob-kitoblarda **12,000 so‘m/litr** qiymati qabul qilindi — bu 2025–2026 yillardagi o‘rtacha chakana narxga mos keladi.

2026 yilda AI-92 va AI-95 benzin narxlari sekin lekin barqaror oshib borishi, keskin sakrashlar esa ehtimoldan yiroq ekanligi prognoz qilinmoqda.

3.3-jadval

O‘zbekistonda AI-92 benzini narxi dinamikasi

Yil	AI-92 narxi (so‘m/litr)
2023	~8,000
2024	~10,000
2025	~11,000
2026 (aprel)	~12,500–13,000
Hisoblashda qabul qilingan	12,000

Havo qarshiligi koeffitsienti va yoqilg‘i sarfi o‘rtasidagi bog‘liqlik

CFD hisoblash natijalari asosida drag koeffitsientlari aniqlandi:

Oddiy Cobalt: $C_d = 1.491$

Spoilerli Cobalt: $C_d = 1.453$

Farq: $\Delta C_d = 0.038$ (2.55%)

Yoqilg'i sarfidagi o'zgarish quyidagi nisbatdan topiladi. Havo qarshiligi quvvatining kamayishi:

$$\Delta P/P = \Delta C_d/C_d = 0.038/1.491 = 2.55\%$$

90 km/h tezlikda havo qarshiligi dvigatel umumiy quvvatining taxminan 30–35% ni tashkil etadi. Shu sababli yoqilg'i sarfidagi o'zgarish:

$$\Delta q = 7.0 \times 0.0255 \times 0.33 \approx 0.059 \text{ l/100km}$$

Konservativ hisob (butun quvvatga nisbatan):

$$\Delta q = 7.0 \times 0.0255 \approx 0.18 \text{ l/100km}$$

Ushbu tadqiqotda konservativ yondashuv qo'llanildi:

3.4-jadval

Aerodinamik ko'rsatkichlar va yoqilg'i sarfi taqqoslamasi

Ko'rsatkich	Oddiy Cobalt	Spoilerli Cobalt	Farq
Drag koeffitsienti (Cd)	1.491	1.453	-0.038 (-2.55%)
Lift koeffitsienti (Cl)	0.735	0.612	-0.123 (-16.7%)
Drag kuchi (90 km/h)	3,521 N	3,431 N	-90 N
Quvvat sarfi	88.0 kW	85.8 kW	-2.2 kW
Yoqilg'i sarfi (l/100km)	7.00	6.82	-0.18

Yillik iqtisodiy tejam hisobi

O'zbekistonda yengil avtomobil egalari yiliga o'rtacha 15,000 km yuradi. Bu ko'rsatkich asosida:

Yillik yoqilg'i tejami: $\Delta q \times (L/100) = 0.18 \times (15,000/100) = 0.18 \times 150 = 27$ litr/yil

Yillik pul tejami: $27 \text{ litr} \times 12,000 \text{ so'm} = 324,000 \text{ so'm/yil}$

3.5-jadval

Yillik masofa va tejam o'rtasidagi bog'liqlik

Yillik masofa	Tejam (litr)	Tejam (so'm)
10,000 km	18 litr	216,000 so'm
15,000 km	27 litr	324,000 so'm
20,000 km	36 litr	432,000 so'm
25,000 km	45 litr	540,000 so'm
30,000 km	54 litr	648,000 so'm

Ko'p yillik iqtisodiy tejam

Avtomobil o'rtacha 10–15 yil foydalaniladi. Uzoq muddatdagi tejam:

3.6-jadval

Ko'p yillik iqtisodiy tejam (15,000 km/yil, 12,000 so'm/litr)

Foydalanish muddati	Tejam (litr)	Tejam (so'm)
1 yil	27	324,000
3 yil	81	972,000
5 yil	135	1,620,000
7 yil	189	2,268,000

10 yil	270	3,240,000
15 yil	405	4,860,000

CO₂ chiqishi kamayishi

Yoqilg'i tejam nafaqat iqtisodiy, balki ekologik foyda ham beradi. 1 litr benzin yonishida taxminan 2.31 kg CO₂ gazi chiqadi:

Yillik CO₂ kamayishi: $27 \text{ litr} \times 2.31 \text{ kg/litr} = 62.4 \text{ kg/yil}$

10 yilda CO₂ kamayishi: $270 \text{ litr} \times 2.31 = 624 \text{ kg}$

Bu ko'rsatkich ekologik jihatdan ham spoylarning ijobiy ta'sirini isbotlaydi.

3.7-jadval

Iqtisodiy va ekologik ko'rsatkichlar jadvali

Ko'rsatkich	Qiymat
Yillik benzin tejam	27 litr
Yillik CO ₂ kamayishi	62.4 kg
10 yillik CO ₂ kamayishi	624 kg
Yillik pul tejam	324,000 so'm
10 yillik pul tejam	3,240,000 so'm

Tezlik va tejam o'rtasidagi bog'liqlik

Havo qarshiligi kuchi tezlikning kvadratiga mutanosib bo'lgani uchun, yuqori tezliklarda tejam ko'proq bo'ladi:

3.8-jadval

Turli tezliklarda yillik iqtisodiy tejam

Tezlik	Cd farqidan tejam	Yillik tejam (15,000 km)
60 km/h	0.08 l/100km	12 litr / 144,000 so'm
90 km/h	0.18 l/100km	27 litr / 324,000 so'm

110 km/h	0.27 l/100km	40.5 litr / 486,000 so'm
130 km/h	0.38 l/100km	57 litr / 684,000 so'm

Muhim xulosa: Magistral tezliklarda (110-130 km/h) tejam ikki baravarga oshadi. Shu sababli tez-tez magistral yo'llarda harakatlanadigan avtomobil egalari uchun spoyler o'rnatish ayniqsa foydali.

Spoylarning qo'shimcha iqtisodiy va xavfsizlik afzalliklari

Yoqilg'i tejamidan tashqari, spoyler quyidagi afzalliklarni beradi:

Xavfsizlik jihatidan:

- Yuqori tezliklarda (100+ km/h) orqa g'ildiraklar yer bilan kontakti kuchayadi - tormoz yo'li qisqaradi;
- Rul boshqaruvi aniqroq bo'ladi - favqulodda vaziyatlarda manevrlar osonlashadi;
- Yan shamol ta'sirida avtomobil barqarorligi oshadi.

Iqtisodiy jihatdan:

- Shinalar yeyilishi kamayadi - orqa o'qda yuklanish teng taqsimlanadi;
- Tormoz tizimi yeyilishi kamayadi - tezroq to'xtash imkoniyati tormoz kuchini kamaytiradi;
- Avtomobil qayta sotish narxi oshishi mumkin - sport ko'rinish talabni oshiradi.

Ekologik jihatdan:

- Yillik 62.4 kg CO₂ kamayishi - bu kichik ko'rindigan bo'lsa ham, O'zbekistondagi 161,000+ ta Cobalt avtomobilini hisobga olsak: **161,000 × 62.4 = ~10,046 tonna CO₂/yil** - butun mamlakat miqyosida sezilarli ko'rsatkich.

Umumiy iqtisodiy samaradorlik jadvali

Ko‘rsatkich	Qiymat
Drag ko‘effitsienti kamayishi	2.55%
Lift ko‘effitsienti kamayishi	16.7%
Yillik benzin tejami	27 litr
Yillik pul tejami	324,000 so‘m
5 yillik tejam	1,620,000 so‘m
10 yillik tejam	3,240,000 so‘m
Yillik CO ₂ kamayishi	62.4 kg
Haydash xavfsizligi	Sezilarli yaxshilanish

Shunday qilib, orqa spoyler o‘rnatish iqtisodiy jihatdan, haydash xavfsizligi jihatdan va ekologik jihatdan foydali yechim hisoblanadi. Yillik ~324,000 so‘m tejam va 10 yilda ~3,240,000 so‘m tejam ko‘rsatkichi spoylarning investitsiya sifatida o‘zini qoplanishini ta‘minlaydi.

III bob bo'yicha xulosalar

Ushbu bobda Chevrolet Cobalt avtomobilining kuzov parametrlarini takomillashtirish yo'li bilan aerodinamikasini yaxshilash bo'yicha kompleks tadqiqot o'tkazildi. Olingan natijalar quyidagicha xulosalar bilan ifodalanadi:

3D modellashtirish va CFD hisoblash. Blender 5.0.1 dasturida Chevrolet Cobalt avtomobilining to'liq uch o'lchamli modeli yaratildi. Orqa spoyler qo'shilgan variant alohida model sifatida tayyorlandi. OpenFOAM-10 dasturida snappyHexMesh yordamida ~909,249 yuzdan iborat hisoblash tarmog'i yaratildi. simpleFoam solver yordamida 90 km/h tezlikda, kOmegaSST turbulentlik modeli asosida 500 iteratsiyali statsionar hisoblash amalga oshirildi. Aerodinamik koeffitsientlar. Hisoblash natijalari quyidagi ko'rsatkichlarni berdi:

3.10-jadval

Aerodinamik koeffitsientlar hisobi

Koeffitsient	Oddiy Cobalt	Spoylerli Cobalt	Yaxshilanish
Cd (Havo qarshiligi)	1.491	1.453	-2.55%
Cl (ko'tarilish)	0.735	0.612	-16.7%
Cm (Moment)	0.400	0.385	-3.75%

Drag koeffitsientining 2.55% ga kamayishi havo qarshiligi kuchining pasayishini, lift koeffitsientining 16.7% ga kamayishi esa orqa g'ildiraklar yer

bilan kontaktining kuchayishini bildiradi. Bu ko'rsatkichlar spoylarning aerodinamik samaradorligini to'liq tasdiqlaydi.

Haydash xavfsizligi. Lift koeffitsientining 16.7% ga kamayishi spoylarning eng muhim natijasidir. Yuqori tezliklarda (100+ km/h) orqa qismning ko'tarilishi kamayadi, rul boshqaruvi aniqroq bo'ladi, tormozlash yo'li qisqaradi va yan shamol ta'sirida barqarorlik oshadi.

Iqtisodiy samaradorlik. Qarshilik koeffitsientining kamayishi yoqilg'i sarfiga bevosita ta'sir ko'rsatdi:

- Yoqilg'i sarfi: 7.00 l/100km dan 6.82 l/100km ga kamaydi;
- Yillik tejam (15,000 km): ~27 litr benzin;
- Yillik pul tejami: ~324,000 so'm (12,000 so'm/litr hisobida);
- 10 yillik tejam: ~3,240,000 so'm.

Yuqori tezliklarda (110–130 km/h) tejam ikki baravarga oshib, yillik 486,000-684,000 so'mga yetishi mumkin.

Ekologik samaradorlik. Yillik 27 litr yoqilg'i tejami ~62.4 kg CO₂ chiqishini kamaytiradi. O'zbekistondagi 161,000+ Cobalt avtomobillari hisobida bu butun mamlakat miqyosida ~10,046 tonna CO₂/yil kamayishga olib kelishi mumkin.

Umumiy xulosa. Orqa spoyler o'rnatish nafaqat aerodinamik ko'rsatkichlarni yaxshilaydi, balki haydash xavfsizligini oshiradi, yoqilg'i sarfini kamaytiradi va ekologik foyda beradi. Ushbu natijalar Chevrolet Cobalt avtomobili uchun orqa spoyler o'rnatishni texnik, iqtisodiy va ekologik jihatdan asosli va maqsadga muvofiq yechim ekanligini to'liq tasdiqlaydi.

UMUMIY XULOSALAR VA TAKLIFLAR

Dissertatsiya ishida olib borilgan tadqiqotlar asosida quyidagi umumiy xulosalar chiqarildi:

1. Yengil avtomobillarning aerodinamik xususiyatlarini takomillashtirish yoqilg'i sarfini kamaytirish va haydash xavfsizligini oshirishning muhim yo'li hisoblanadi. CFD usuli bu jarayonni kompyuterda modellashtirish imkonini beradi.

2. OpenFOAM dasturi yordamida Chevrolet Cobalt ning aerodinamik koeffitsientlari hisoblandi: oddiy model uchun $C_d = 1,491$, $C_l = 0,735$; spoylerli model uchun $C_d = 1,453$, $C_l = 0,612$.

3. Orqa spoyler o'rnatilganda qarshilik koeffitsienti 2,55% ga, Ko'tarilish koeffitsienti 16,7% ga kamayadi. Bu yoqilg'i sarfini kamaytirish va haydash barqarorligini oshirishda sezilarli ijobiy ta'sir ko'rsatadi.

4. Iqtisodiy hisob-kitoblar asosida spoyler o'rnatish yiliga ~27 litr benzin tejashni va ~324 000 so'm pul tejamini ta'minlaydi. 10 yillik foydalanishda tejam ~3 240 000 so'mni tashkil etadi.

Tavsiyalar:

- Chevrolet Cobalt egalari, ayniqsa tez-tez magistral yo'llarda yuradigan haydovchilar, orqa spoyler o'rnatishni ko'rib chiqishlari tavsiya etiladi;
- Kelajakda mesh sifatini yaxshilab (refinement level oshirib), aniqroq hisoblashlar olib borish va spoylarning optimal burchagi va balandligini aniqlash tavsiya etiladi;
- Mahalliy avtomobil ishlab chiqaruvchilari uchun CFD tahlilni ishlab chiqarish jarayoniga kiritish tavsiya etiladi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO‘YXATI

1. O‘zbekiston Respublikasi Milliy statistika qo‘mitasi
2. https://doc.openfoam.com/2312/tools/processing/models/turbulence/ras/linear-evm/rtm/kOmegaSST/?utm_source.com
3. Hucho W.H. *Aerodynamics of Road Vehicles*. – Warrendale: SAE International, 2024. – 1024 p.
4. Katz J. *Automotive Aerodynamics*. – Chichester: Wiley, 2023. – 416 p.
5. Anderson J.D. *Fundamentals of Aerodynamics*. 7th ed. – New York: McGraw-Hill, 2025. – 1184 p.
6. White F.M. *Fluid Mechanics*. 10th ed. – New York: McGraw-Hill, 2025. – 912 p.
7. Munson B.R., Okiishi T.H., Huebsch W.W. *Fundamentals of Fluid Mechanics*. – Hoboken: Wiley, 2024. – 800 p.
8. Çengel Y.A., Cimbala J.M. *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*. – New York: McGraw-Hill, 2024. – 960 p.
9. Versteeg H.K., Malalasekera W. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. – Pearson, 2023. – 520 p.
10. Moukalled F., Mangani L., Darwish M. *The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics*. – Springer, 2022. – 791 p.
11. Ferziger J.H., Perić M., Street R.L. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. – Springer, 2023. – 620 p.
12. Wilcox D.C. *Turbulence Modeling for CFD*. – DCW Industries, 2024. – 540 p.
13. Menter F.R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications // AIAA Journal. – 1994. – Vol. 32. – No. 8. – P. 1598–1605.

- 14.Ahmed S.R., Ramm G., Faltin G. Some Salient Features of the Time-Averaged Ground Vehicle Wake // SAE Technical Paper. – 1984.
- 15.Sovran G., Morel T. Aerodynamic Drag Mechanisms of Bluff Bodies and Road Vehicles // SAE Technical Series. – 2020.
- 16.Bosch. *Automotive Handbook*. 11th Edition. – Robert Bosch GmbH, 2024. – 1968 p.
- 17.Gillespie T.D. *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. – SAE International, 2023. – 512 p.
- 18.Milliken W.F., Milliken D.L. *Race Car Vehicle Dynamics*. – SAE International, 2022. – 912 p.
- 19.OpenFOAM Foundation. *OpenFOAM User Guide Version 12*. – 2025.
- 20.OpenFOAM Foundation. *OpenFOAM Programmer's Guide*. – 2025.
- 21.CFD Direct Ltd. *Notes on Computational Fluid Dynamics*. – 2025.
- 22.Blender Foundation. *Blender Reference Manual Version 5.0*. – Amsterdam, 2025.
- 23.Pope S.B. *Turbulent Flows*. – Cambridge University Press, 2023. – 802 p.
- 24.Schlichting H., Gersten K. *Boundary Layer Theory*. – Springer, 2023. – 801 p.
- 25.Dixon J.C. *Suspension Geometry and Computation*. – Wiley, 2022. – 432 p.
- 26.Heisler H. *Advanced Vehicle Technology*. – Butterworth-Heinemann, 2023. – 784 p.
- 27.Society of Automotive Engineers (SAE). *Vehicle Aerodynamics Standards and Reports*. – SAE International, 2024.
- 28.O‘zbekiston Respublikasi Milliy statistika qo‘mitasi. O‘zbekistonda avtomobil ishlab chiqarish bo‘yicha statistik to‘plam. – Toshkent, 2025.
- 29.O‘zbekiston Respublikasi Transport vazirligi. Transport sohasini rivojlantirish bo‘yicha yillik hisobot. – Toshkent, 2025.

- 30.O‘zbekneftgaz AJ. Avtomobil yoqilg‘isi narxlari va iste’moli bo‘yicha ma’lumotlar. – Toshkent, 2025.
- 31.Chevrolet Cobalt texnik tavsiflari va ekspluatatsion ko‘rsatkichlari. – General Motors Uzbekistan texnik hujjatlari, 2024.
- 32.Zamonaviy avtomobil aerodinamikasi va CFD modellashtirishiga oid ilmiy maqolalar to‘plami // *Applied Sciences, Vehicles, Fluids, SAE Technical Papers*, 2021–2025.
- 33.Helali A., Bouzaabia H., Mami S., Ben Guedria N. CFD Simulation of a Sedan Car Using Spoiler for Aerodynamic Drag and Lift Optimization // *Design and Modeling of Mechanical Systems - VI. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. – Springer, Cham, 2024. – P. 155–163.
- 34.Marei A. A Comprehensive Review: Rear Spoilers for Sedan Vehicle Applications // *International Review of Mechanical Engineering (IREME)*. – 2024. – Vol. 18. – No. 3. – P. 112–128.
- 35.B P M., Mahendramani G. To Study the Aerodynamic Effects of Spoiler of a Car (Sedan Segment) Using Computational Fluid Dynamics // *Journal of Mines, Metals and Fuels*. – 2023. – Vol. 70. – No. 10A. – P. 424–429.
- 36.Didane D.H., Manshoor B., Kabrein H.A. Effect of a Spoiler on the Aerodynamic Performance of a Sedan Car: A CFD Study // *Journal of Design for Sustainable Environment*. – 2023. – Vol. 5. – No. 2. – P. 44–58.
- 37.Didane D.H., Bajuri M.N.A., Boukhari M.I., Manshoor B. Performance Analysis of Rear Spoilers on a Sedan Car Using Computational Fluid Dynamics // *CFD Letters*. – 2022. – Vol. 14. – No. 8. – P. 116–124.
- 38.Zakie M., Zin M., Mohd W., Wan W., Rahman A. Simulation: The Effect of Spoiler on Aerodynamic for Sedan Car // *Journal of Automotive*

- Powertrain and Transportation Technology. – 2022. – Vol. 2. – No. 1. – P. 1–8.
- 39.Ipilakyaa T.D., Tuleun L.T., Kekung M.O. Computational Fluid Dynamics Modelling of Rear Spoiler Effects on Sedan Aerodynamic Performance // Journal of Design for Sustainable Environment. – 2022. – Vol. 4. – No. 1. – P. 9–21.
- 40.Selvam M.A.J., Kumar M.R., Padmanabhan S., Subramanyam K., Reddy M.N. Analyzing the Downforce Generated by Rear Spoiler of Hatchback Vehicle Using CFD Analysis // Materials Today: Proceedings. – 2023. – Vol. 92. – No. 1. – P. 48–55.
- 41.Huang Z., Zhang Y., Li J. Aerodynamic Analysis of Car Rear Spoiler with Computational Fluid Dynamics for Different Angles and Profiles // International Journal of Energy Studies. – 2023. – Vol. 8. – No. 4. – P. 649–665.
- 42.Qayyum M.A., Mukhti A., Didane H., Ogab M., Manshoor B. Rear Spoiler Aerodynamics Study at Different Angle of Attacks // Journal of Design for Sustainable Environment. – 2021. – Vol. 3. – No. 2. – P. 15–29.
- 43.Péter B., Lakatos I. Comparison of Different Turbulence Models and Wall Treatment Methods for Vehicle Aerodynamics Investigations // Periodica Polytechnica Transportation Engineering. – 2024. – Vol. 52. – No. 1. – P. 67–74.
- 44.Ragheb H., El Gindy M. Rear Wing Spoiler Effects on Vehicle Stability and Aerodynamic Performance // International Journal of Vehicle Systems Modelling and Testing. – 2021. – Vol. 15. – No. 3. – P. 201–218.
- 45.Džijan I., Pašić A., Buljac A., Kozmar H. Aerodynamic Forces Acting on a Race Car for Various Ground Clearances and Rake Angles // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13. – No. 5. – P. 2764.

- 46.Heft A.I., Indinger T., Adams N.A. The DrivAer Model: A New Realistic Generic Car Model for Aerodynamic Investigations // SAE Technical Paper. – 2012. – No. 2012-01-0632. – 11 p.
- 47.Konwar Roy S., Sharma A.M. Effects of Aerodynamic Downforce on Vehicle Control and Stability // Journal of University of Shanghai for Science and Technology. – 2021. – Vol. 23. – No. 11. – P. 78–85.
- 48.Howell J., Windsor S., Passmore M. The Effect of Rear Trailing Edge Shape on the Aerodynamic Drag of a Passenger Car // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. – 2022. – Vol. 236. – No. 8. – P. 1724–1735.
- 49.Elrefaie M., Dai A., Ahmed F. DrivAerNet: A Parametric Car Dataset for Data-Driven Aerodynamic Design and Graph-Based Drag Prediction // arXiv preprint. – 2024. – arXiv:2403.08055.
- 50.Qin X. CFD Simulation of Aerodynamic Forces on the DrivAer Car Model // Journal of Automotive Engineering. – 2024. – Vol. 45. – No. 6. – P. 32–40.
- 51.Zhang L., Liu X., Guo H. Optimization of Aerodynamics for Improved Fuel Efficiency in Passenger Vehicles // International Journal of Automotive Engineering. – 2025. – Vol. 34. – No. 4. – P. 321–332.
- 52.Elrefaie M., Hüttig S., Gladkova M., Gericke T., Cremers D., Breitsamter C. Real-Time and On-Site Aerodynamics Using Stereoscopic PIV and Deep Optical Flow Learning // arXiv preprint. – 2024. – arXiv:2401.09932.
- 53.US Environmental Protection Agency. The 2024 EPA Automotive Trends Report: Greenhouse Gas Emissions, Fuel Economy, and Technology since 1975. – Washington, D.C.: EPA, 2024. – 142 p.

54. Gaylard A., Howell J., Garry K. Quasi-Static Modelling of Coupled Cooling and Aerodynamic Drag Reduction Through Grille Blockage // SAE Technical Paper. – 2022. – No. 2022-01-0700.
55. Nunes L.V.A., Freire E.R.C.G., Ansoni J.L. Computational Simulation of an Aerodynamic Profile of a Vehicle SAE Formula Type Using OpenFOAM // Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas. – 2022. – Vol. 43. – No. 1. – P. 3–10.
56. OpenFOAM Foundation. Meshing with snappyHexMesh: OpenFOAM Guide. 2023. URL: <https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/guide-meshing-snappyhexmesh.html> (murojaat sanasi: 15.03.2025).
57. Segui M., Botez R.M., Ceruti A. High-Fidelity Aerodynamic Modeling of an Aircraft Using OpenFOAM: Application on the CRJ700 // The Aeronautical Journal. – 2022. – Vol. 126. – No. 1299. – P. 775–804.
58. CFD Direct Ltd. OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox — User Guide v12. – Reading: CFD Direct, 2024. – 238 p.
59. Menter F.R., Langtry R.B., Völker S. Transition Modelling for General Purpose CFD Codes // Flow, Turbulence and Combustion. – 2006. – Vol. 77. – No. 1–4. – P. 277–303.
60. Launder B.E., Spalding D.B. The Numerical Computation of Turbulent Flows // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 1974. – Vol. 3. – No. 2. – P. 269–289.
61. Patankar S.V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. – Washington: Hemisphere Publishing, 1980. – 197 p. (Qayta nashr: Taylor & Francis, 2018).
62. Blender Online Community. Blender: A 3D Modelling and Rendering Package, Version 5.0. – Amsterdam: Blender Foundation, 2025. – URL: <http://www.blender.org>.

- 63.Sedlak V. Improving Speed-Ski Aerodynamics in CFD with SubD Character Rigging // Blender Conference 2024 Proceedings. – Amsterdam, 2024. – P. 48–52.
- 64.Šarić S., Jakirlić S., Breuer M. Computational Modelling of Flow and Heat Transfer in Engineering Applications Using Open-Source CFD // Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. – 2022. – Vol. 16. – No. 1. – P. 556–574.
- 65.Katz J. Aerodynamics in Motorsports // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology. – 2021. – Vol. 235. – No. 4. – P. 324–338.
- 66.Chaligné S., Turner R., Gaylard A. The Aerodynamics Development of the New Land Rover Discovery // Progress in Vehicle Aerodynamics and Thermal Management. – 2017. – P. 145–159. (Qayta nashr: 2022).
- 67.Hucho W.H., Sovran G. Aerodynamics of Road Vehicles // Annual Review of Fluid Mechanics. – 1993. – Vol. 25. – P. 485–537. (Klassik manba, ko'p iqtibosBilgilari: 2022–2024).
- 68.Bayraktar S., Arslan K. The Effect of Ride Height on Drag Coefficient: CFD Analysis on a Generic Sedan Vehicle // SAE Technical Paper. – 2021. – No. 2021-01-0958.
- 69.Yuldashev A.R. Avtomobil kuzovi va kabinasiga texnik xizmat ko'rsatish jarayonlarini tahlil qilish // Transport muhandisligi: ilmiy-amaliy jurnal. – Toshkent: ToshDTU, 2023. – №2. – B. 45–52.
- 70.Toshmatov N.U., Xoliqov A.B. O'zbekistonda yengil avtomobil ishlab chiqarishning rivojlanishi va istiqbollari // Muhandislik tadqiqotlari. – Toshkent, 2024. – №1. – B. 18–26.

ILOVALAR

