CHEGARA QATLAM NAZARIYASI VA UNING AERODINAMIKADA AHAMIYATI

Farg‘ona Davlat Texnika Unversiteti 2-kurs talabalari
Turg‘unova Madinaxon Axadjon qizi,
Jurayev Otabek Azamatjon o‘g‘li
G‘ulomov Javohirbek Soxibjon o‘g‘li

Anotatsiya : *Ushbu maqolada chegara qatlam nazariyasining nazariy asoslari, u bilan bog‘liq fizik-matematik tushunchalar hamda aerodinamikadagi amaliy qo‘llanilish holatlari tahlil qilinadi. Dastlab, Ludwig Prandtl tomonidan ilgari surilgan chegara qatlam nazariyasi zamonaviy suyuqliklar dinamikasi, xususan, aerodinamikani chuqur tushunishda qanday rol o‘ynashi ko‘rsatib beriladi. Shuningdek, laminarlik va turbulentlik holatlari, Reynolds sonining ahamiyati va oqim ajralish jarayonlari yoritiladi. Maqolada aviatsiya, avtomobilsozlik, kosmik texnologiyalar va issiqlik texnikasi sohalarida ushbu nazariyaning qo‘llanilishi real misollar orqali tahlil qilinadi. Bundan tashqari, chegara qatlamni hisoblashda qo‘llaniladigan zamonaviy raqamli modellashtirish usullari, xususan CFD texnologiyalari ham ko‘rib chiqiladi. Maqola ilmiy izlanishlar uchun nazariy asos bo‘lib xizmat qiladi va kelajakdagi amaliy tadqiqotlarga yo‘naltirilgan.*

Kalit so‘zlar: *chegara qatlam, aerodinamika, Prandtl nazariyasi, laminarlik, turbulent oqim, Navye-Stoks tenglamalari, qarshilik kuchi, oqim ajralishi.*

Kirish:

Samolyot qanoti ustida harakatlanayotgan havoning atigi bir necha millimetr chuqurlikdagi qatlamida oqim tezligi sezilarli darajada pasayishini bilasizmi? Aslida, aynan shu nozik, ammo fizikaviy jihatdan murakkab zonada butun bir aerodinamik muvozanat hal qilinadi. Bu zonani chegara qatlam deb atashadi va uning fizikasi aerokosmik texnologiyadan tortib avtomobilsozlik, gidrodinamika va energetika tizimlarigacha bo‘lgan ko‘plab muhim sohalarda hal qiluvchi rol o‘ynaydi. Chegara qatlam nazariyasi ilk bor 1904-yilda nemis fizigi Ludwig Prandtl tomonidan Sankt-Peterburgda bo‘lib o‘tgan xalqaro matematiklar kongressida taqdim etilgan. U o‘zining klassik asarida real suyuqliklar oqimida yopishish kuchlarini hisobga olish zarurligini asoslab berdi va bu orqali ilgari faqat ideal suyuqliklar uchun qo‘llanilgan Navye-Stoks tenglamalarini soddalashtirishga erishdi. Keyinchalik bu nazariyani rivojlantirishda Theodore von Kármán, Hermann Schlichting, Sydney Goldstein, va W. Tollmien kabi olimlar muhim hissa qo‘shganlar. Ayniqsa, Schlichting tomonidan

yozilgan *Boundary-Layer Theory* asari ushbu sohaning klassik va zamonaviy yondashuvlarini uyg‘unlashtirib beradi.Zamonaviy davrda esa R. D. Joslin, P. Bradshaw, R. L. Panton kabi olimlar tomonidan chegara qatlamda yuz beradigan murakkab turbulent oqimlar, ularning raqamli modellashtirilishi va nazorat mexanizmlari chuqur o‘rganilmoqda. Ularning ishlari natijasida bugungi kunda yuqori samarali aviatsiya qanotlari, issiqlik almashtirgichlar va past qarshilikli avtomobil korpuslarini loyihalash imkoniyati vujudga keldi.

Mazkur maqolada chegara qatlam nazariyasining nazariy asoslari, aerodinamikadagi qo‘llanilishi, hisoblash va modellashtirish usullari, shuningdek, uning amaliy muhimligi tahlil qilinadi. Ushbu maqola tadqiqot ishining birinchi bosqichi sifatida xizmat qilib, mavzuni ilmiy izlanishlar yo‘nalishida yanada chuqurroq o‘rganishga asos yaratadi.

O‘zbekistonlik olimlar va ularning hissasi

Mazkur nazariya va uning amaliy qo‘llanilish jihatlari o‘zbek olimlari tomonidan ham chuqur tadqiq etilgan. Jumladan, **Akademik Yo‘ldoshbek Yo‘ldoshev**, **Prof. Karimov S.R.**, **Prof. Berdikulov I.B.**, **Sh. To‘xtayev** kabi olimlar aerodinamika, suyuqliklar va gazlar mexanikasi, shuningdek, chegara qatlamda oqimlarning barqarorligi va ajralish hodisalari yuzasidan fundamental izlanishlar olib borishgan.

Masalan, **O‘zbekiston Milliy universiteti**, **Toshkent davlat texnika universiteti**, **Fanlar akademiyasi Fizika-texnika institut**ida olib borilgan ilmiy ishlarda samolyot qanotlari, aerodinamik trubalarda oqim tahlili, hamda energetika qurilmalarida issiqlik va modda almashinuvi chegaraviy qatlam orqali modellashtirilgan. Ayniqsa, **professor Berdikulov I.B.** boshchiligidagi guruh tomonidan turbulent oqimlarning matematik modellashtirilishi va ular uchun chegaraviy shartlarning aniqlanishi bo‘yicha nufuzli ilmiy maqolalar e'lon qilingan.

Chegara qatlam tushunchasi va Prandtl nazariyasining nazariy asoslari

Chegara qatlam – bu harakatdagi suyuqlik yoki gazning qattiq sirt bilan tutashgan hududida yuzaga keladigan noan’anaviy oqim sohasi bo‘lib, unda viskozlik (ichki ishqalanish) kuchlarining ta’siri sezilarli darajada namoyon bo‘ladi. Bu qatlamda oqim tezligi sirtga yaqinlashgan sari pasayadi va nihoyat, sirtning o‘zida nolga tenglashadi. Bu hodisa viskozinlik xususiyatining bevosita oqibati bo‘lib, real suyuqliklar yoki gazlarning qattiq sirtlar bilan o‘zaro ta’sirida muhim ahamiyat kasb etadi.

Chegara qatlam nazariyasi ilk bor 1904-yilda nemis olimi **Ludwig Prandtl** tomonidan ilgari surilgan bo‘lib, bu nazariya suyuqliklar mexanikasidagi eng muhim

inqilobiy yondashuvlardan biri hisoblanadi. Prandtlning taklifiga ko‘ra, har qanday real oqim ikkita asosiy hududga ajraladi:

Erkin oqim (free stream) – bu sirtga nisbatan uzoq masofada joylashgan, yopishish kuchlarining ta’siri deyarli yo‘qolgan va oqim tezligi maksimal qiymatga yetgan soha.

Chegara qatlam (boundary layer) – bu sirtga juda yaqin joylashgan qatlam bo‘lib, u yerda suyuqlik yoki gazning harakat tezligi sezilarli darajada kamayadi va yopishish kuchlari ustunlik qiladi.

Prandtl nazariyasi shundan iboratki, oqim strukturasini oddiy va aniq tarzda tahlil qilish uchun chegaraviy zonani boshqa oqim qismidan alohida ko‘rib chiqish mumkin. Bu nazariya asosan **Navye-Stoks tenglamalari** asosida quriladi, biroq chegaraviy zonaning yupqaligi tufayli ushbu tenglamalar soddalashtirilgan ko‘rinishda qo‘llaniladi.

1. Prandtl tomonidan ilgari surilgan soddalashtirishlar quyidagilardan iborat:
2. Chegara qatlam qalinligi butun oqim hududiga nisbatan juda kichik miqdorda bo‘ladi;
3. Oqim odatda bir yo‘nalishda, ya’ni qatlam yuzasiga parallel bo‘ladi;
4. Viskoz kuchlar faqat chegaraviy qatlam ichida ahamiyatga ega bo‘ladi, tashqaridagi erkin oqimda esa ularni hisobga olish shart emas;
5. Bosim gradienti asosan erkin oqim orqali uzatiladi va chegaraviy qatlam ichida deyarli o‘zgarmaydi (Schlichting, 2000; White, 2011).

Bu soddalashtirishlar evaziga chegaraviy qatlamdagi oqimni tavsiflovchi maxsus differensial tenglamalar – **Prandtl chegaraviy qatlam tenglamalari** hosil qilinadi. Ular real sharoitdagi (viskoz, beqaror va noaniq) oqimlarni tahlil qilish imkonini beradi. Ayniqsa, bu tenglamalar oqim ajralishi, turbulentlik bosqichiga o‘tish, va sirt ustida havo harakatining tormozlanishi kabi muhim hodisalarni tushuntirishda katta amaliy va nazariy ahamiyatga ega.

Keyingi yillarda bu nazariya asosida ko‘plab rivojlantirilgan modellar (Blasius yechimi, Falkner-Skan tenglamasi, Thwaites metodi va boshqalar) paydo bo‘ldi. Shu bilan birga, zamonaviy hisoblash usullari, jumladan **Hisoblash suyuqlik dinamikasi (CFD)** yordamida Prandtl nazariyasini yanada mukammal modellashtirish va murakkab geometrik shakllarda qo‘llash imkoniyati tug‘ildi.

Chegara qatlamdagi oqim turlari va ularning aerodinamikadagi amaliy ahamiyati

Chegara qatlam ichida suyuqlik yoki gazning oqimi har doim ham bir xil bo‘lmaydi. Uning xarakteri muhitning fizikaviy sharoitlari, sirtning holati, oqim

tezligi, harorat va geometrik shakllarga bog‘liq holda o‘zgaradi. Oqim ikki asosiy holatda namoyon bo‘ladi: **laminar oqim** va **turbulent oqim**.

Laminar oqim – bu zarralar qatlamlari tartibli, silliq va parallel yo‘nalishda harakatlanadigan oqim holatidir. Bu turdagi oqimda ichki ishqalanish kuchlari kam bo‘lib, energiya sarfi nisbatan past bo‘ladi. Masalan, havo oqimi samolyot qanotining oldingi qismida yoki silliq quvurlar ichida past tezlikda harakatlanayotgan paytda laminar bo‘lishi mumkin.

Turbulent oqim esa – bu murakkab, notekis, beqaror va burama harakatlar bilan tavsiflanadigan oqim bo‘lib, unda harakat chiziqlari kesishadi, o‘zgaruvchanlik va energiya sarfi yuqori bo‘ladi. Bu holatda zarrachalar harakati tasodifiy bo‘lib, oqim ichida kichik girdoblar (eddilar) hosil bo‘ladi. Turbulent oqim yuqori tezlikda, sirt notekis bo‘lganda yoki harorat keskin o‘zgarganda yuzaga chiqadi.

Oqimning laminar yoki turbulent holatda bo‘lishi ko‘pincha **Reynolds soni (Re)** bilan baholanadi. Bu son quyidagi ifoda bilan aniqlanadi:

$$Re = \frac{PUL}{\mu} = \frac{UL}{v}$$

Bu yerda:

- U – oqim tezligi,
- L – xarakterli uzunlik (masalan, qanot uzunligi),
- ρ– suyuqlik zichligi,
- μ– dinamik viskozlik,
- ν– kinematik viskozlik**.**

Reynolds soni past bo‘lsa (odatda $Re<5\times10^5$), oqim laminar bo‘ladi; ammo bu son ma’lum kritik qiymatdan oshganda, oqim turbulent tus oladi. Shuni ta’kidlash kerakki, bu kritik qiymat muhit, sirt holati va boshqa omillarga qarab farq qilishi mumkin.

Chegara qatlam ichidagi bu o‘zgarishlarning aerodinamikada nihoyatda muhim amaliy oqibatlari mavjud:

Aviatsiyada, ayniqsa samolyot qanotlarida, chegara qatlamdagi oqimning laminar yoki turbulent holatda bo‘lishi parvoz samaradorligiga to‘g‘ridan-to‘g‘ri ta’sir qiladi. Agar chegara qatlamda turbulent oqim juda erta paydo bo‘lsa yoki oqim ajralish (separation) yuzaga kelsa, qanot ustidagi ko‘tarilish kuchi sezilarli kamayadi. Shuning uchun oqimni barqaror saqlash, ajralish nuqtasini kechiktirish yoki ularni boshqarish katta amaliy ahamiyatga ega.

Avtomobilsozlikda, havo qarshiligini kamaytirish orqali yoqilg‘i sarfini optimallashtirish mumkin. Chegara qatlamdagi oqimning xususiyatlari avtomobil kuzovining aerodinamik shaklini belgilashda asosiy omillardan biri hisoblanadi.

Masalan, sport avtomobillari yoki elektromobillarda oqim ajralishini kamaytirish orqali qarshilik koeffitsienti CdC_dCd ni pasaytirish energiya tejamkorligiga bevosita ta’sir qiladi.

Kosmik texnikada, ayniqsa yuqori tezlikda harakatlanuvchi raketa va apparatlar sirtida hosil bo‘ladigan issiqlik oqimi ko‘pincha chegara qatlamda yuzaga kelgan turbulentlik natijasida oshadi. Shuning uchun raketa konstruktorlari oqimni laminar holatda saqlab qolish, issiqlik yutilishini kamaytirish va termoshimni optimallashtirishga harakat qilishadi.

Energetika sohasida, ayniqsa gaz turbinalari, issiqlik almashtirgichlar va gidrodinamik tizimlarda, chegara qatlamdagi oqim xususiyatlari qurilma samaradorligiga ta’sir ko‘rsatadi. Turbulent oqim issiqlik uzatishni oshiradi, biroq energiya sarfini ham ko‘paytiradi. Bu esa texnologik balansni nozik boshqarishni talab qiladi.

Masalan, **NASA** tomonidan 1998-yilda o‘tkazilgan tadqiqotlarda (Joslin, 1998) samolyot qanoti yuzasida laminar oqimni uzoq muddat saqlab qolish orqali parvoz masofasini 10–15% ga oshirish mumkinligi aniqlangan. Bu esa aerodinamik boshqaruv, sirtni optimallashtirish va chegara qatlamni chuqur o‘rganishning bevosita amaliy natijasidir.

Muammoning dolzarbligi

Zamonaviy texnologik taraqqiyot sharoitida aerodinamika qonuniyatlarini chuqur o‘rganish va amaliyotga tadbiq etish yuksak dolzarb ahamiyat kasb etmoqda. Ayniqsa, energiya samaradorligi, ekologik xavfsizlik va yuqori tezlikda harakatlanuvchi transport vositalarining barqarorligini ta’minlash zamonaviy ilm-fan oldiga yangidan-yangi muammolarni qo‘ymoqda. Ushbu muammolarni hal qilishda chegara qatlam nazariyasi markaziy o‘rin egallaydi.

Chegara qatlamdagi oqim xususiyatlari – ayniqsa, laminarlik va turbulentlik o‘rtasidagi o‘tish, ajralish zonalari, sirt ishqalanishi va issiqlik uzatish jarayonlari – aerodinamik tizimlarning asosiy samaradorlik ko‘rsatkichlariga bevosita ta’sir ko‘rsatadi. Biroq, hozirgi kungacha bu jarayonlarni aniq matematik modellashtirish, ularning har doim to‘g‘ri bashorat qilinishi va nazorat ostida ushlab turilishi katta ilmiy va muhandislik muammo bo‘lib qolmoqda.

Masalan, yuqori samarali samolyotlar, elektromobillar, supersonik raketalar yoki sovutish tizimlarida yuzaga keladigan oqimlar murakkab geometriya va o‘zgaruvchan sharoitlarda sodir bo‘ladi. Bu esa klassik chegara qatlam modellari doirasida yetarlicha aniqlikka erishishni qiyinlashtiradi. Ayniqsa, oqimning turbulentlik bosqichiga o‘tish nuqtasi va ajralish zonalarini oldindan aniq belgilash hali ham murakkab ilmiy masala sifatida mavjud.

Shuningdek, barqaror laminar oqimni uzoq masofada saqlab qolish uchun yangi materiallar, aktiv va passiv nazorat usullari, sirt tuzilmalari (masalan, mikrogeometriyalar, plazma aktuatorlar) ishlab chiqilmoqda. Bularning barchasi chegara qatlamni chuqur ilmiy o‘rganish zaruriyatini taqozo etadi.

O‘zbekiston kontekstida esa, milliy aviatsiya, transport tizimlari, energetika inshootlari va issiqlik almashinish qurilmalarining samaradorligini oshirish maqsadida chegara qatlam nazariyasi bo‘yicha tadqiqotlarni kengaytirish ayni muddaodir. Shu boisdan ushbu nazariyani chuqur o‘rganish, unga oid modellashtirish va tajriba metodlarini ishlab chiqish, hamda bu bilimlarni amaliyotga tatbiq etish – fan va texnik taraqqiyotning muhim yo‘nalishlaridan biri hisoblanadi.

Muammoning yechimi

Chegara qatlam bilan bog‘liq aerodinamik muammolarni hal etish uchun kompleks yondashuv talab qilinadi. Bu yondashuv nazariy tahlil, raqamli modellashtirish, eksperimental usullar va innovatsion texnologiyalarni uyg‘unlashtirgan holda amalga oshirilishi kerak. Quyida ushbu muammoning asosiy yechim yo‘nalishlari keltirilgan:

Nazariy modellashtirishni takomillashtirish Prandtl tomonidan taklif etilgan klassik chegara qatlam nazariyasi hozirgi zamon sharoitida murakkab shakllar va o‘zgaruvchan oqim sharoitlari uchun to‘liq yetarli emas. Shuning uchun Navye-Stoks tenglamalarining soddalashtirilgan, ammo yanada aniqroq variantlari, masalan, yuqori aniqlikdagi asymptotik yondashuvlar, kvazi-uch o‘lchamli modellardan foydalanish kerak. Bu nazariy yondashuvlar oqim ajralish nuqtalari va turbulentlikka o‘tish jarayonini aniqlashda muhim rol o‘ynaydi.

1. **Eksperimental metodlarni keng qo‘llash** Fizik shamol tunnelidagi sinovlar orqali chegara qatlamning o‘zgaruvchan holatlari kuzatilib, nazariy va raqamli modellar verifikatsiya qilinadi. Lazer Doppler anemometriyasi (LDA), issiqlik aniqlagichlari va yuqori tezlikda suratga olish usullari orqali oqim tezligi, turbulent energiya va ajralish zonalari aniqlanadi.

2.Oqimni nazorat qilish texnologiyalari Chegara qatlamdagi oqim holatini boshqarish orqali aerodinamik samaradorlikni oshirish mumkin. Bunda quyidagi usullar muhim ahamiyatga ega:

Passiv boshqaruv: sirt tuzilmasini o‘zgartirish (mikro-qirralar, spiral kanallar);

Aktiv boshqaruv: plazma aktuatorlar, puflash/surtish usullari;

Sun’iy intellekt yordamida real vaqtda monitoring va boshqaruv tizimlari.

3.Mahalliy sharoitga mos innovatsion tadqiqotlar O‘zbekiston olimlari tomonidan avtomobillar, energetika qurilmalari va ventilyatsiya tizimlarida havo oqimini optimallashtirishga qaratilgan ishlar boshlangan. Kelajakda bu yo‘nalishda

TATU, **TDTU**, **NAMMQI** kabi muassasalarda chegara qatlam fizikasi bo‘yicha ixtisoslashgan ilmiy laboratoriyalar tashkil etish, yosh olimlar va doktorantlarni ilmiy loyiha va grantlarga jalb qilish orqali ilmiy salohiyatni kuchaytirish zarur.

Xulosa:

Chegara qatlam nazariyasi aerodinamikadagi eng muhim nazariy asoslardan biri bo‘lib, oqimning sirt bilan o‘zaro ta’sirini chuqur anglashga imkon beradi. Ludwig Prandtl tomonidan XX asr boshlarida ilgari surilgan bu konsepsiya bugungi kunda zamonaviy aerokosmik texnologiyalar, avtomobilsozlik, energetika va boshqa muhim texnika sohalarida muhim amaliy ahamiyat kasb etmoqda. Ayniqsa, oqimning laminarlikdan turbulentlikka o‘tishi, ajralish zonalari va sirt bilan yopishish kuchlari kabi holatlarni tushunish orqali har qanday muhitda energiya samaradorligini oshirish, qarshilik kuchlarini kamaytirish va tizimlarning ishonchliligini ta’minlash mumkin. Maqolada chegara qatlam nazariyasining nazariy asoslari, hisoblash usullari, raqamli va eksperimental modellashtirish yondashuvlari hamda amaliy qo‘llanilish sohalari keng tahlil qilindi. Shuningdek, zamonaviy muammolar – turbulent oqimlarni boshqarish, kritik zonalarni aniqlash va real sharoitlarga mos modellashtirish masalalari – kelajak tadqiqotlari uchun dolzarb yo‘nalish sifatida belgilandi. Kelajakdagi ilmiy izlanishlar chegara qatlam nazariyasini murakkab geometriyali obyektlar, o‘zgaruvchan ish sharoitlari va turli fizik muhitlar uchun moslashtirishga, sun’iy intellekt va raqamli texnologiyalar yordamida oqimlarni real vaqt rejimida boshqarish imkoniyatlarini amaliyotga joriy etishga qaratilishi lozim. Ayniqsa, O‘zbekiston sharoitida bu yo‘nalish transport, energetika va muhandislik texnologiyalari rivojida muhim o‘rin tutadi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Joslin, R. D. (1998). *Overview of laminar flow control*. NASA Langley Research Center. https://ntrs.nasa.gov

2. Schlichting, H. (2000). *Boundary-Layer Theory* (8th ed.). Springer.

3. White, F. M. (2011). *Fluid Mechanics* (7th ed.). McGraw-Hill Education.

4. Panton, R. L. (2013). *Incompressible Flow* (4th ed.). Wiley.