ISNN 3030-3907

2026/4
VOLUME 8

DEVELOPMENT OF SCIENCE

ILMIY JURNAL



Development of science

Ilmiy jurnal

2026/4 VOLUME 8

ISSN 3030 -3907

Ilmiy jurnal OAK rayosatining 2024 yil 27 sentabrdagi 361-son qaroriga asosan 02.00.00 kimyo fanlari hamda 2025 yil 12 fevral 367- son qaroriga asosan 05.00.00 texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) va fan doktori (DSc) ilmiy darajasiga talabgorlarning dissertatsiya ishlari yuzasidan dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan milliy ilmiy nashrlar ro‘yxatiga kiritilgan.

BOSH MUHARRIR:
Temirov Alisher Hoshim o‘g‘li – texnika fanlari falsafa doktori (PhD),Dotsent.
TAHRIRIYAT KENGASH RAISI:
Fozilov Sadriddin Fayzullayevich – texnika fanlari doktori, professor
TAHRIRIYAT KENGASH A’ZOLARI

TEXNIKA FANLARI/ TECHNICAL SCIENCES/ ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Bozorov G‘ayrat Rashidovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Abdurahmonov Olim Rustamovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Adizov Bobur Zamirovich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Umumiy va noorganik kimyo instituti, professor
Hayitov Ruslan Rustamjonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Jumayev Qayum Karimovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Berdiyev Dorob Murodovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor
Maxmudov Rafiq Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Tilloyev Lochin Ismatilloyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Raxmonov Qahramon Sanakulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Barakayev Nusratullo Rajabovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor.
Jo‘rayev Xayrullo Fayziyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Panoyev Erali Rajabboyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Ataullayev Sherzod Nabiullyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Malik Negmurodovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Axmedova Ozoda Bahronovna
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti.
Safarov Bahri Jumayevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Xaydarov Axtam Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Safarov Jasur Alijon o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Асадова Раъно Дилмуратовна
Тошкент Давлат техника университети доценти

KIMYO FANLARI/ CHEMICAL SCIENCES/ ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Axmedov Voxid Nizomovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Umarov Baqo Bafoyevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Kodirov Abduaxad Abduraximovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Qurbonov Mingniqul Jumagulovich
Qarshi davlat Universiteti, dotsent
Turemuratov Sharibay Naurizbaevich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Qoraqalpog‘iston bo‘limi Bosh ilmiy kotibi, professor
Tursunov Kaxor Shonazarovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Do‘stov Hamro
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Panoyev Nodir Shavkatovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Olimov Bobur Bahodir o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Kasimov Sherzod Abduazimovich
Termiz Davlat Universiteti, professor.
Aliqulov Rustam Valiyevich
Termiz Davlat Universiteti, professor
Tropov Xamza Tursunovich
Samarqand Davlat Universiteti, professor

IQTISODIYOT FANLARI/ ECONOMICS/ ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Nizamov Aslitdin Badreddinovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Boboyev Akmal Choriyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Ergashxojayeva Shaxnoza Djasurovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Saidaxmedova Nodira Ilxomovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Muxsinov Bekzod Toxirovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shakarov Qulmat Ashirovich
Renessans ta'lim universiteti,dotsent.
Jumaeva Zulfiya Qayumovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Norova Salomat Yusupovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Avezova Shaxnoza Maxmudjonovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Jalilov Jamshid G‘anijonovich
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, dotsent
Xasanova Gulruh Djumanazarovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

PEDAGOGIKA FANLARI/ PEDAGOGICAL SCIENCES / ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Siddiqova Sadoqat G‘afforovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Zoyirov Erkin Xalilovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, DSc, professor
Gaffarov Feruz Hasanovich
Puchon Universiteti, *professor*
Ruziyev Davron Yuldashevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Muradova Firuza Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Yunusova Gulandon Samiyevna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
To‘xtayeva Zebo Sharifovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Navro‘zova Gulchixra Nigmatovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Uzoqova Laylo Polvonovna
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.
To‘raqulova Marjona Qiyom qizi
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Muradova Zarina Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Sanjar Aslonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shodiyev Jahongir Jo‘raqulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent
Gaffarov Laziz Hasanovich
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.

Tahririyat a’zolarning to‘liq ro‘yxati jurnalning www.devos.uz saytida keltirilgan.

Tahririyat hay’ati a’zolarining tarkibini o‘zgartirish hamda qo‘shimcha kiritish yoki tahririyat a’zoligidan chiqarish bosh muharrir tomonidan amalga oshiriladi.

ISSN 3030-3907

Development of science ilmiy jurnali 2024 yil 15 aprel kuni №256445 sonli guvohnoma bilan Davlat ro‘yxatidan o‘tgan.

To‘plam elektron ko‘rinishda (pdf formatida) mualliflarga taqdim etiladi. To‘plamga kiritiladigan maqolalarning mazmuni, ulardagi statistik ma’lumotlar va me’yoriy hujjatlarning to‘g‘riligiga hamda har qanday fikr - mulohazalarga mualliflarning o‘zlari mas’ul hisoblanadilar. Talablarga javob bermaydigan maqolalar to‘plamga kiritilmaydi. Tashkiliy qo‘mita maqola matnini qisqartirish, qisman tuzatish kiritish, seksiyalarga joylashtirish huquqiga ega.

ISSN 3030-3907

O‘UK 621.311:621.565

MA’LUMOT MARKAZLARIDA HAVO OQIMINI CFD ASOSIDA MODELLASHTIRISH VA EKSPERIMENTAL TASDIQLASH

Alimova Nodira Batirdjanovna
Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti
O‘zbekiston, 100095, Toshkent, Universitetskaya ko‘chasi 2-uy
E-mail: nali71@gmail.com
ORCID: 0009-0001-1939-6063
Haydarova Laylo Hasan qizi
Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti
O‘zbekiston, 100095, Toshkent, Universitetskaya ko‘chasi 2-uy
E-mail: laylohaydarova591@gmail.com
ORCID: 0009-0006-5537-1775

Annotatsiya. Zamonaviy ma’lumot markazlarida elektr energiyasining sezilarli qismi sovitish infratuzilmasiga sarflanadi. Ushbu maqolada ma’lumot markazidagi havo oqimi va issiqlik taqsimoti hisoblash suyuqliklar dinamikasi (CFD) asosida modellashtirildi hamda eksperimental ma’lumotlar bilan tekshirildi. Matematik model uzluksizlik tenglamasi, Navier-Stokes tenglamalari va energiya saqlanish qonuniga tayandi, turbulent oqimni ifodalash uchun RANS asosidagi k-ε modeli qo‘llandi. Hisoblashlar cheklangan hajm methodi yordamida bajarildi va bosim-tezlik bog‘lanishi SIMPLE algoritmi orqali ta’minlandi. Natijalar CFD modeli bilan eksperimental o‘lchovlar o‘rtasidagi farq 5-8% oralig‘ida ekanini ko‘rsatdi. Tahlil davomida qiziydigan zonalar, sovuq va issiq havo aralashuvi hamda qisqa tutashuvli havo oqimi holatlari aniqlandi. Optimallashtirilgan konfiguratsiyada havo oqimi barqarorlashgani va sovitish energiyasi kamaygani qayd etildi. Mazkur yondashuv ma’lumot markazlarida issiqlik boshqaruvini takomillashtirish, PUE ko‘rsatkichini yaxshilash va keyingi bosqichda intellektual boshqaruv tizimlari bilan integratsiya qilish uchun mustahkam ilmiy asos yaratadi.

Kalit so‘zlar: ma’lumot markazi, hisoblash suyuqliklar dinamikasi, havo oqimi, issiqlik taqsimoti, Navier-Stokes, k-ε modeli, eksperimental validatsiya, energiya samaradorlik, PUE.

Аннотация. В современных центрах обработки данных значительная часть электроэнергии расходуется на охлаждение. В данной статье выполнено моделирование воздушного потока и распределения тепла в центре обработки данных с использованием вычислительной гидродинамики (CFD) и подтверждено экспериментальными данными. Математическая модель основана на уравнении непрерывности, уравнениях Навье-Стокса и законе сохранения энергии, а для представления турбулентного потока используется

ISSN 3030-3907

k-ε модель на основе RANS. Расчеты выполнены методом конечных объемов, а связь давления и скорости обеспечивается алгоритмом SIMPLE. Результаты показывают, что разница между моделью CFD и экспериментальными измерениями находится в диапазоне 5-8%. В ходе анализа были выявлены зоны перегрева, смешение холодного и горячего воздуха, а также условия короткого замыкания воздушного потока. В оптимизированной конфигурации отмечено, что воздушный поток стабилизировался, а потребление энергии на охлаждение снизилось. Такой подход создает прочную научную основу для улучшения управления тепла в центрах обработки данных, повышения показателя PUE и последующей интеграции с интеллектуальными системами управления.

Ключевые слова: центр обработки данных, вычислительная гидродинамика, воздушный поток, распределение тепла, уравнения Навье-Стокса, k-ε модель, экспериментальная проверка, энергоэффективность, PUE.

Annotation. In modern data centers, a significant portion of the energy consumed is spent on cooling. In this paper, airflow and heat distribution in a data center are simulated using computational fluid dynamics (CFD) and validated with experimental data. The mathematical model is based on the continuity equation, the Navier-Stokes equations, and the energy conservation law, while a RANS-based k-ε model is used to represent turbulent flow. The calculations are performed using the finite volume method, and the pressure-velocity relationship is provided by the SIMPLE algorithm. The results show that the difference between the CFD model and experimental measurements is in the range of 5-8%. The analysis identified hot spots, mixing of cold and hot air, and airflow short-circuit conditions. In the optimized configuration, airflow was stabilized and cooling energy consumption decreased. This approach provides a solid scientific basis for improving heat management in data centers, increasing PUE, and subsequent integration with intelligent control systems.

Keywords: data center, computational fluid dynamics, airflow, heat distribution, Navier-Stokes equations, k-ε model, experimental verification, energy efficiency, PUE.

KIRISH.

Ma’lumot markazlari raqamli iqtisodiyotning tayanch infratuzilmasiga aylangan sari ularning energiya iste’moli va issiqlik yuklamasi ham ortib bormoqda. Yuqori zichlikda joylashtirilgan serverlar, tarmoq qurilmalari va hisoblash tizimlari ishlashi natijasida katta miqdorda issiqlik hosil bo‘ladi. Ushbu issiqlikni samarali chiqarib yuborish tizim ishonchliligi, xizmatning uzluksizligi va energiya samaradorligining eng muhim shartlaridan biridir. Ma’lumot

ISSN 3030-3907

markazlarida sovitish tizimlarining noto‘g‘ri tashkil etilishi issiq va sovuq havo oqimlarining aralashuviga, lokal qizib ketish zonalari paydo bo‘lishiga hamda ortiqcha energiya sarfiga olib keladi. An’anaviy yondashuvlar ko‘pincha statik boshqaruvga tayangani sababli, dinamik yuklama sharoitida real termofizik jarayonlarni yetarli darajada ifodalab bera olmaydi. Shu sababli ma’lumot markazi muhitida havo oqimi va harorat maydonini chuqur tahlil qilish uchun suyuqliklar dinamikasi (CFD) yondashuvi muhim ilmiy-amaliy vosita sifatida qaraladi.

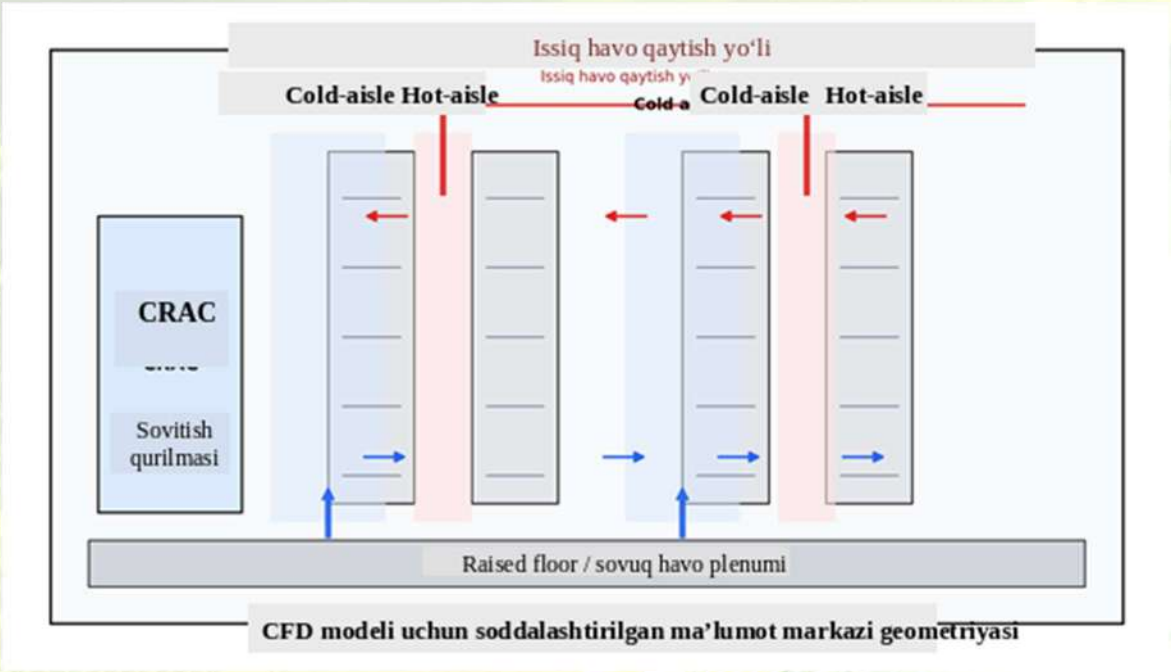
CFD yordamida havo oqimi trayektoriyasi, havoning qayta aylanish (resirkulyatsiya) zonalari, aylanib o‘tish oqimlari, tokcha kirishi-chiqishidagi haroratlar va issiqlik almashinuvi jarayonlari yuqori aniqlikda baholanishi mumkin. Bundan tashqari, mazkur yondashuv mavjud tizimlarni tahlil qilish bilan cheklanib qolmay, yangi ma’lumot markazi infratuzilmasini loyihalash bosqichida ham optimal geometriya va sovitish strategiyasini tanlash imkonini beradi.

Ushbu tadqiqotning maqsadi ma’lumot markazidagi havo oqimini CFD asosida modellashtirish, modelni eksperimental ma’lumotlar bilan tekshirish hamda olingan natijalar asosida sovitish samaradorligini oshirishga xizmat qiluvchi ilmiy xulosalar ishlab chiqishdan iborat.

Tadqiqotning birinchi bosqichida ma’lumot markazining uch o‘lchamli geometrik modeli shakllantirildi. Model tarkibiga server tokchalari, sovuq yo‘lak (cold aisle), issiq yo‘lak (hot aisle), ko‘tarilgan pol osti havo kanali va CRAC qurilmalari kiritildi. Geometriya real ma’lumot markazilarda uchraydigan klassik havo oqimi sxemasiga mos ravishda tashkil etildi: sovuq havo CRAC tizimidan ko‘tarilgan qavat orqali sovuq yo‘lak hududiga uzatiladi, tokchalar orqali o‘tgach qizigan havo issiq yo‘lak tomonga chiqadi va keyin qayta sovitish uchun CRAC ga qaytadi.

Mazkur geometriya ma’lumot markazlarida havo oqimi muammolarini, xususan, issiq yo‘lak resirkulyatsiyasi, sovuq havo aylanma yo‘li va qisqa tutashuvli havo oqimi holatlarini aniqlash uchun yetarli darajada reprezentativ hisoblanadi. Hisoblash sohasi bloklar oralig‘idagi oqim, yo‘laklardagi harorat gradienti va qaytish zonasidagi havo aralashuvini tahlil qilish imkonini beradigan qilib tanlandi.

ISSN 3030-3907



1-rasm. Ma'lumot markazidagi klassik sovuq yo'lak / issiq yo'lak havo oqimi sxemasi

Massa saqlanish qonuni quyidagi uzluksizlik tenglamasi bilan ifodalanadi:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad . \qquad (1)$$

Ushbu tenglama tizim ichida havo massasi saqlanishini ifodalaydi hamda kiruvchi va chiquvchi oqimlar muvozanatini nazorat qilish imkonini beradi.

Impuls almashinuvi Navier-Stokes tenglamasi orqali ifodalanadi:

$$\rho(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \vec{v}) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} + \vec{F} \quad . \qquad (2)$$

Bu yerda: p - bosim, μ - dinamik viskozlik, $\vec{F}$ - tashqi kuchlar. Mazkur tenglama bosim gradienti, yopishqoqlik va tashqi ta'sirlar hisobiga yuzaga keluvchi oqim dinamikasini tavsiflaydi.

Issiqlik almashinuvi energiya tenglamasi asosida ifodalanadi:

$$\rho c_p(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T) = k \nabla^2 T + Q \quad . \qquad (3)$$

Bu yerda: T - harorat, c_p - izobarik issiqlik sig'imi, k - issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsiyenti, Q - serverlardan ajralayotgan issiqlik manbai. Ushbu tenglama konvektiv va diffuzion issiqlik uzatilishining birgalikdagi ta'sirini aks ettiradi.

Ma'lumot markazidagi oqim, ayniqsa tokcha chiqishida va tor yo'lak hududlarida, odatda turbulent xarakterga ega bo'ladi. Oqim rejimi Reynolds soni yordamida baholanadi:

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \quad . \qquad (4)$$

ISSN 3030-3907

Reynolds sonining katta qiymatlari oqimning turbulent ekanini ko‘rsatadi. Shu sababli modellashtirishda RANS asosidagi standart k-ε modeli qo‘llanildi:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla\cdot(\rho k\vec{v}) = \nabla\cdot[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k})\ \nabla k\ ] + G_k - \rho\varepsilon \quad . \quad (5)$$

Ushbu model turbulent kinetik energiya va uning taarqalishini hisoblash orqali havo aralashuvi va turbulent diffuziyani tavsiflashga xizmat qiladi.

Server tokchalari konsentrlashgan issiqlik manbai sifatida qaraldi. Barcha serverlarning umumiy issiqlik ajralishi quyidagi ifoda bilan baholandi:

$$Q_{total} = \sum_{i=1}^{N} P_i \quad . \quad (6)$$

Tokcha darajasida havo bilan olib chiqilayotgan issiqlik oqimi esa quyidagicha aniqlandi:

$$Q = \dot{m}c_p(T_{out} - T_{in}) \quad . \quad (7)$$

Bu yerda: $\dot{m}$ - massaviy havo sarfi, T_{out} va T_{in} - tokchaga kirish va undan chiqish haroratlari. Mazkur ifoda tochka darajasida sovitish samaradorligini miqdoriy baholash imkonini beradi.

Ventilyatorlar energiya sarfi havo oqimi boshqaruvida muhim omil bo‘lgani sababli parrak quvvati quyidagi bog‘lanish bilan ifodalandi:

$$Pfan \propto v^3 \quad . \quad (8)$$

Bu bog‘lanish havo tezligining nisbatan kichik ortishi ham energiya sarfining keskin oshishiga olib kelishini ko‘rsatadi.

1-jadval

CFD modelida ishlatilgan asosiy belgilar va fizik ma’nosi

Belgi	Kattalik nomi	Izoh
P	Zichlik	Havo muhitining zichligi
V	Tezlik	Havo oqimining xarakterli tezligi
P	Bosim	Oqimdagi statik bosim
T	Harorat	Muhit yoki rack inlet/outlet harorati
Q	Issiqlik manbai	Serverlardan ajralayotgan issiqlik
$\dot{m}$	Dinamik viskozlik	Yopishqoqlik xossasi
c_p	Issiqlik sig‘imi	Izobarik issiqlik sig‘imi
Re	Reynolds soni	Oqim rejimini tavsiflovchi mezon

CFD modelini yechish uchun cheklangan hajm usuli (FVM) qo‘llanildi. Bosim va tezlik maydonlari o‘rtasidagi bog‘lanish SIMPLE algoritmi yordamida

ISSN 3030-3907

ta’minlandi. Iterativ hisoblash jarayonida konvergentsiya mezonlari nazorat qilinib, yechimning barqarorligi tekshirildi.

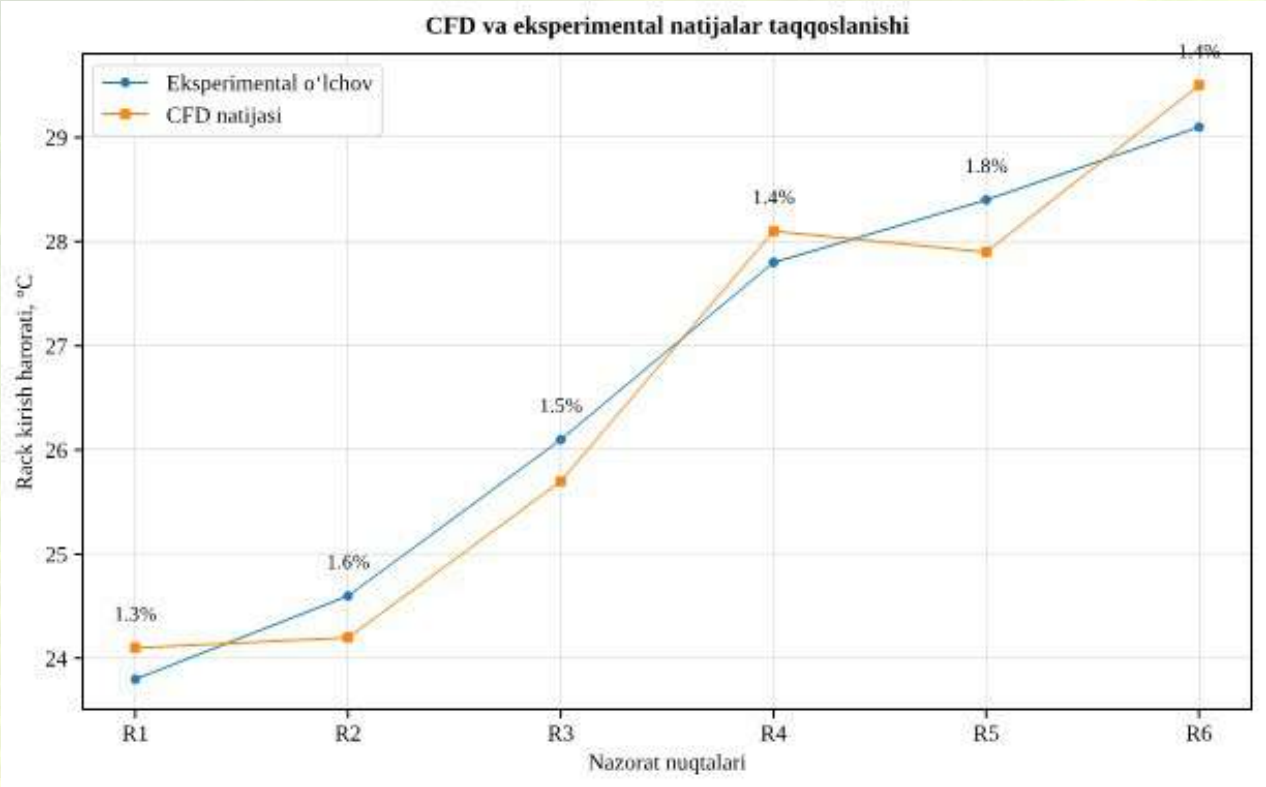
Modelni tekshirish uchun tokchaning kirish va chiqish nuqtalarida harorat sensorlari, ayrim hududlarda esa havo tezligi o‘lchagichlari joylashtirildi. CFD natijalari eksperimental ma’lumotlar bilan taqqoslanib, nisbiy xatolik quyidagi formula asosida baholandi:

$$Error = \frac{|T_{exp} - T_{CFD}|}{T_{exp}} \times 100\% \quad . \quad (9)$$

Ushbu yondashuv simulyatsiya va real o‘lchovlar o‘rtasidagi moslik darajasini miqdoriy baholash imkonini berdi.

Simulyatsiya natijalari ma’lumot markazida harorat maydoni bir tekis taqsimlanmaganini ko‘rsatdi. Ayrim tokchalar kirish qismida lokal qizib ketish zonalari, ya’ni qaynoq nuqtalar kuzatildi. Mazkur qaynoq nuqtalar, asosan, sovuq havo oqimining tokchalarga teng taqsimlanmasligi, issiq yovlak hududidan qaytuvchi issiq havo infiltratsiyasi va ayrim zonalarda oqimning qisqa tutashuvi bilan izohlandi. Tokcha darajasida issiqlik almashinuvini baholash uchun (7)-tenglamadan foydalanildi. Hisob-kitoblar shuni ko‘rsatdiki, yuklama ortishi bilan tokcha chiqish harorati sezilarli oshadi, biroq havo oqimi yetishmovchiligi mavjud hududlarda bu o‘sish ancha keskin namoyon bo‘ladi. Natijada ayrim tokchalar haddan tashqari qizib ketish xavfiga duch keladi. Oqim trajektoriyalarining tahlili natijasida uchta muhim holat aniqladi: birinchidan, sovuq havoning tokchalar orqali o‘tmasdan to‘g‘ridan-to‘g‘ri qaytish zonasiga o‘tishi; ikkinchidan, qizigan havoning sovuq yo‘lakga qaytib kirishi; uchinchidan, CRAC yaqinida qisqa tutashuv oqimlarining paydo bo‘lishi. Ushbu hodisalar sovitish samaradorligini pasaytiruvchi asosiy omillar sifatida baholandi.

ISSN 3030-3907



2-rasm. CFD natijalariga ko‘ra tokchalar orasidagi harorat gradienti va qaynoq nuqtalar zonalari

2-jadval

Eksperimental validatsiya va optimallashtirish natijalarining qisqacha xulosasi

Ko‘rsatkich	Qiymat / oraliq	Izoh
CFD va eksperiment orasidagi farq	5-8 %	Model validatsiyasi qoniqarli
Qaynoq nuqtalar soni	Kamaygan	Havo oqimi taqsimoti yaxshilangan
Tokchaga kirish joyi harorati	Barqarorlashgan	Lokal qizib ketish pasaygan
Sovitish energiyasi	15-25 % gacha kamayish	Optimallashtirilgan rejim natijasi

Eksperimental o‘lchovlar bilan taqqoslash natijasida CFD modeli va real tizim o‘rtasidagi farq 5-8% oralig‘ida ekanligi aniqlandi. Bu ko‘rsatkich modelning real tizimdagi havo oqimi va harorat taqsimotini yetarli aniqlik bilan ifodalashini tasdiqlaydi.

ISSN 3030-3907

CFD asosida havo oqimi konfiguratsiyasi optimallashtirilgach, sovuq havo taqsimoti yaxshilandi, qaynoq nuqtalar zonalar soni kamaydi va tokchaga kirish joyi haroratlari barqarorroq bo‘ldi. Shu bilan birga, sovitish infratuzilmasining ish rejimi optimallashtirilishi natijasida energiya sarfi pasayishi kuzatildi. Amaliy baholashda sovitish energiyasi 15-25% gacha kamayishi mumkinligi qayd etildi.

Olingan natijalar shuni ko‘rsatadiki, ma’lumot markazlarida harorat barqarorlikni ta’minlash faqat sovitish quvvatini oshirish bilan emas, balki havo oqimini to‘g‘ri tashkil etish bilan chambarchas bog‘liq. Agar sovuq va issiq oqimlar yetarli darajada ajratilmasa, qo‘shimcha sovitish quvvati ham energiya samaradorligini keskin yaxshilay olmaydi. Geometrik parametrlar, xususan, tokchalar joylashuvi, yo‘lak kengligi, CRAC lar pozitsiyasi va cheklash darajasi tizimning umumiy samaradorligiga sezilarli ta’sir ko‘rsatadi. Ayniqsa, sovuq yo‘lak kengligining optimal tanlanishi sovuq havo bosimini barqarorlashtiradi va issiq havo infiltratsiyasini kamaytiradi. Shuningdek, parrak quvvatining havo tezligiga kub qonuni bo‘yicha bog‘liqligi havo oqimini faqat kuchaytirish emas, balki oqimni to‘g‘ri yo‘naltirish muhimligini ko‘rsatadi. Noto‘g‘ri havo oqimi sxemasida parrak tezligini orttirish energiya sarfini oshiradi, biroq qaynoq nuqtalarni to‘liq bartaraf eta olmaydi.

Mazkur tadqiqotning yana bir muhim natijasi shundaki, ishlab chiqilgan CFD model keyingi bosqichda real vaqt monitoring tizimlari va sun’iy intellekt asosidagi boshqaruv algoritmlari bilan integratsiya qilinishi mumkin. Bu esa kelajakda intellectual ma’lumot markazlari konsepsiyasini shakllantirish uchun muhim ilmiy zamin yaratadi.

XULOSA VA TAKLIFLAR.

Ushbu tadqiqotda ma’lumot markazlaridagi havo oqimi va issiqlik taqsimoti CFD asosida modellashtirildi hamda eksperimental ravishda tekshirildi. Olingan natijalar CFD yondashuvi real tizimdagi havo oqimi va harorat maydonini yetarli aniqlik bilan ifodalashini ko‘rsatdi.

Natijalar asosida ma’lumot markazlarida qaynoq nuqta zonalar, issiq havo oqimining qayta aylanishi, **sovuq havo oqimining chetlab o‘tishi** va havo oqimining qisqa tutashuvi holatlari asosiy termik muammo ekani aniqlandi. Geometrik va ekspluatatsion parametrlarni optimallashtirish orqali ushbu muammolarni sezilarli kamaytirish mumkinligi tasdiqlandi. Eksperimental validatsiya davomida 5-8% oralig‘idagi xatolik olingan modelning ishonchliligini ko‘rsatdi. Shu sababli taklif etilgan yondashuv ma’lumot markazlarini loyihalash, modernizatsiya qilish va ekspluatatsion boshqarishda samarali vosita sifatida tavsiya etiladi. Kelgusida mazkur CFD modelini real vaqt sensor tizimlari, IoT platformalari va mustahkamlovchi o‘rganish algoritmlari bilan integratsiya qilish

ISSN 3030-3907

ma’lumot markazlari energiya samaradorligini yanada oshirishga xizmat qilishi mumkin.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO‘YXATI

1. Sharma R.K., Bash C.E., Patel C.D. Dimensionless Parameters for Evaluation of Thermal Design and Performance of Large-Scale Data Centers // 8th AIAA/ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference. 2002. Paper AIAA 2002-3091.
2. Wibron E., Gustavsson M., Kutti V., Karlsson B. Computational Fluid Dynamics Modeling and Validating Experiments of Airflow in a Data Center // *Energies*. 2018. Vol. 11. No. 3. Art. 644.
3. VanGilder J.W., Schmidt R.R., Alkharabsheh S., Sammakia B. Experi-mentally Validated Computational Fluid Dynamics Model for a Data Center With Cold Aisle Containment // *Journal of Electronic Packaging*. 2015. Vol. 137. No. 2. Art. 021010.
4. Versteeg H.K., Malalasekera W. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. 2nd ed. Harlow: Pearson Education, 2007.
5. Patankar S.V. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1980.
6. ASHRAE TC 9.9. *Thermal Guidelines for Data Processing Environments*. 5th ed., revised and expanded. Atlanta: ASHRAE, 2021.
7. Avelar V., Azevedo D. *PUE: A Comprehensive Examination of the Metric*. White Paper 49. The Green Grid, 2012.
8. Herrlin M.K. *Data Center Air Management Report*. Lawrence Berkeley National Laboratory / Pacific Gas and Electric Company, 2006.
9. Shehabi A., Smith S., Sartor D., Brown R., Herrlin M., Koomey J., et al. *2024 United States Data Center Energy Usage Report*. Lawrence Berkeley National Laboratory, 2024.
10. Sarikaya O.M., Kuzay B.N., Morosuk T., Tsatsaronis G. Energy efficiency enhancement in two European data centers through CFD modeling // *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Art. 24952.
11. Ham S.W., Jeong J.W. Impact of aisle containment on energy performance of a data center // *Applied Thermal Engineering*. 2016. Vol. 105. P. 690–701.
12. Hajdukiewicz M., Keane M.M., et al. A narrative review to credible computational fluid dynamics prediction for indoor environmental design and operation // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2024.

ISSN 3030-3907