

# BIR JINSLI BO'LMAGAN KO'P QATLAMLI G'OVAK MUHITDA TASHQI OMILLAR TA'SIRINI HISOBGA OLGAN HOLDA YER OSTI SUVLARINING FILTRATSIYA JARAYONLARINI MODELLASHTIRISH

F.Adizova<sup>1</sup>

1. Osiyo Xalqaro universiteti, o'qituvchi

**Mas'ul muallif:** Adizova F.M, Osiyo Xalqaro universiteti, o'qituvchi.

Accepted: 13 Sentabr 2026

Published: 13 Sentabr 2026

**Copyright:** © 2026 by the author(s). Licensee Buxoro xalqaro universiteti ilmiy axborotnomasi.

**Iqtibos uchun:** Adizova, F. BIR JINSLI BO'LMAGAN KO'P QATLAMLI G'OVAK MUHITDA TASHQI OMILLAR TA'SIRINI HISOBGA OLGAN HOLDA YER OSTI SUVLARINING FILTRATSIYA JARAYONLARINI MODELLASHTIRISH / F. Adizova // Buxoro xalqaro universiteti ilmiy axborotnomasi. — 2026. — T. 9, № 1. — B. 136–139.

**Annotatsiya.** Zamonaviy suv xo'jaligi va gidrogeologiya sohasida yer osti suvlari zaxiralarini baholash, ulardan oqilona foydalanish va muhofaza qilish masalalari eng dolzarb ilmiy-amaliy yo'nalishlardan biri hisoblanadi. Tabiiy sharoitda g'ovak muhit deyarli hech qachon bir jinsli bo'lmaydi: turli litologik tarkibga, filtratsiya koeffitsiyentiga va suv sig'imiga ega bo'lgan qatlamlar bir-biri bilan gidravlik jihatdan bog'langan holda murakkab ko'p qatlamli sistemani hosil qiladi. Bunday sistemalarda filtratsiya jarayonini tavsiflashda faqat gidrogeologik parametrlarning fazoviy heterogenligini emas, balki yog'in-sochin, bug'lanish, nasos qudulari orqali suv olish, daryo va sug'orish tarmoqlari bilan gidravlik aloqa kabi tashqi omillarning ta'sirini ham hisobga olish zarur.

**Kalit so'zlar:** yer osti suvlari, filtratsiya, ko'p qatlamli g'ovak muhit, bir jinsli bo'lmagan muhit, matematik modellashtirish, tashqi omillar, sizib o'tish (leakage), piyezometrik napor, vizuallashtirish, sonli usullar.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФИЛЬТРАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В НЕОДНОРОДНОЙ МНОГОСЛОЙНОЙ ПОРИСТОЙ СРЕДЕ С УЧЁТОМ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ

**Аннотация.** Оценка запасов подземных вод, их рациональное использование и охрана являются одним из наиболее актуальных направлений управления водными ресурсами. В природных условиях пористая среда практически никогда не бывает однородной: слои с различным литологическим составом, коэффициентом фильтрации и водоотдачей, гидравлически связанные между собой, образуют сложную многослойную систему. При описании процесса фильтрации в таких системах необходимо учитывать не только пространственную неоднородность гидрогеологических параметров, но и влияние внешних факторов - атмосферных осадков, испарения, водоотбора через эксплуатационные скважины, гидравлической связи с реками и оросительной сетью.

**Ключевые слова:** подземные воды, фильтрация, многослойная пористая среда, неоднородная среда, математическое моделирование, внешние факторы, перетекание (leakage), пьезометрический напор, визуализация, численные методы.

## MODELING OF GROUNDWATER FILTRATION PROCESSES IN A HETEROGENEOUS MULTILAYER POROUS MEDIUM CONSIDERING THE INFLUENCE OF EXTERNAL FACTORS

**Abstract.** The assessment, rational use, and protection of groundwater resources are among the most pressing directions in water resource management today. Under natural conditions, a porous medium is almost never homogeneous: layers with different lithological composition, filtration coefficients, and storage capacity, hydraulically connected to one another, form a complex multilayer system. Describing filtration processes in such systems requires accounting not only for the spatial heterogeneity of hydrogeological parameters, but also for the influence of external factors - precipitation, evaporation, groundwater abstraction through production wells, and hydraulic connection with rivers and irrigation networks.

**Keywords:** groundwater, filtration, multilayer porous medium, heterogeneous medium, mathematical modeling, external factors, leakage, piezometric head, visualization, numerical methods.

**Kirish.** Yer osti suvlari gidrokinamikasida klassik yondashuv ko'pincha bir jinsli, izotrop va cheksiz g'ovak muhit farazi asosida quriladi. Biroq real gidrogeologik sharoitda suv o'tkazuvchi qatlamlar (akvifer) va nisbatan yomon o'tkazuvchi qatlamlar (vodopoy yoki akvitard) navbatlashib joylashgan bo'lib, ularning har biri o'ziga xos filtratsiya koeffitsiyenti Ki, solishtirma suv sig'imi Si va qalinligi bilan tavsiflanadi. Bunday tuzilma bir jinsli bo'lmagan ko'p qatlamli g'ovak muhit deb yuritiladi. Qatlamlar orasidagi gidravlik bog'lanish - sizib o'tish (leakage) hodisasi - bitta qatlamdagi bosim o'zgarishining qo'shni qatlamlarga uzatilishiga olib keladi, bu esa filtratsiya jarayonini yanada

murakkablashtiradi.

Bundan tashqari, real sharoitda filtratsiya jarayoniga bir qator tashqi omillar ta'sir ko'rsatadi: atmosfera yog'inlari va sug'orish suvlarining infiltratsiyasi natijasida yer osti suvlarining to'lib borishi (recharge), quyosh radiatsiyasi va o'simliklar transpiratsiyasi hisobiga bug'lanish (evapotranspiratsiya), aholi punktlari va qishloq xo'jaligi ehtiyojlari uchun nasos qudulari orqali suv olish, shuningdek daryo, kanal va sug'orish tarmoqlari bilan gidravlik aloqa. Ushbu omillarning barchasini bitta yaxlit matematik model doirasida hisobga olish zamonaviy gidrogeologik modellashtirishning asosiy vazifalaridan biridir.

Bunday ko'p qatlamli, ko'p omilli tizimlarni tushuntirishda faqat analitik tenglamalarni bayon qilish yetarli emas - chunki tenglamalar tizimining o'zaro bog'liqligi va parametrlarning fazoviy o'zgaruvchanligi mavhum tasavvurni qiyinlashtiradi. Shu sababli matematik modellashtirish jarayonini bosqichma-bosqich qurish va har bir bosqichni sxematik hamda grafik vizuallashtirish orqali izohlash muhim ahamiyat kasb etadi.

Matematik model

Bir qatlamli g'ovak muhitda filtratsiya jarayonini tavsiflovchi asosiy qonuniyat Darsi qonunidir. Fazoviy koordinatalar bo'yicha filtratsiya tezligi quyidagicha ifodalanadi:

bu yerda  $v$  - filtratsiya tezligi vektori,  $K$  - filtratsiya koeffitsiyenti tenzori (bir jinsli bo'lmagan muhitda fazoviy koordinatalarga bog'liq,  $K = K(x,y,z)$ ),  $H$  - p'ezometrik napor.

Uzluksizlik tenglamasi bilan birlashtirilganda, bir jinsli bo'lmagan uch o'lchamli muhitda o'zgaruvchan (statsionar bo'lmagan) filtratsiya jarayoni quyidagi umumlashgan tenglama bilan tavsiflanadi:

bu yerda  $K_x, K_y, K_z$  - koordinata o'qlari bo'yicha filtratsiya koeffitsiyenti komponentalari (muhitning anizotropiysi va bir jinsli emasligi hisobga olingan),  $S_s$  - solishtirma suv sig'imi,  $W(x,y,z,t)$  - tashqi omillarni ifodalovchi manba-yutuvchi (source-sink) funksiya.

Ko'p qatlamli sistema uchun har bir  $i$ -qatlam ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) uchun alohida tenglama yoziladi, qatlamlar orasidagi sizib o'tish hadi  $L_i$  orqali qo'shni qatlamlar bilan bog'lanadi:

bu yerda sizib o'tish hadi odatda quyidagi ko'rinishda ifodalanadi:

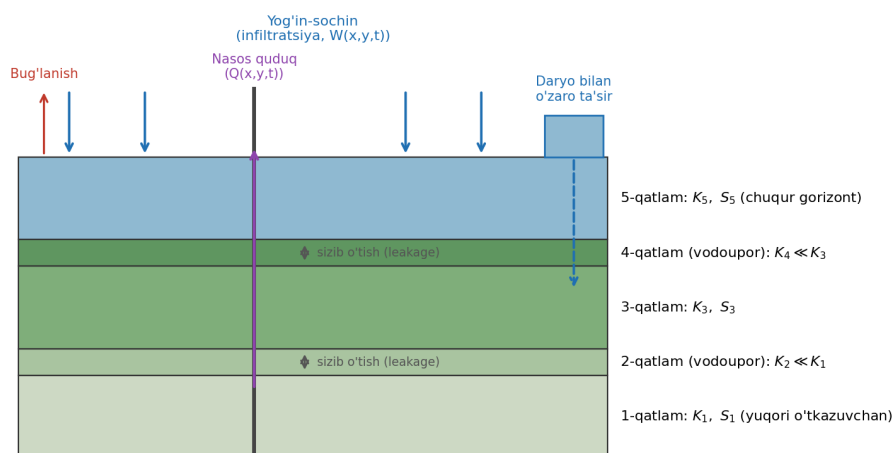
bu yerda  $K'$  va  $m'$  - mos ravishda ikki qatlam orasidagi vodoupor (akvitard) qatlamning filtratsiya koeffitsiyenti va qalinligi. Ushbu nisbat qatlamlar orasidagi napor farqi qanchalik katta bo'lsa, sizib o'tish oqimi shunchalik intensiv bo'lishini ko'rsatadi.

Tashqi omillarning  $W_i(x,y,t)$  funksiyasi tarkibiga quyidagi hadlar kiritiladi:

- infiltratsion to'yinish hadi: yog'in-sochin va sug'orish suvlarining bir qismi yer osti suvlarini to'ldiradi;
- bug'lanish (evapotranspiratsiya) hadi: sayoz joylashgan qatlamlarda napor yer yuzasiga yaqin bo'lganda manfiy had sifatida hisobga olinadi;
- nasos va in'eksion qudulari hadi:  $Q_k(t)$  debitli quduqlar nuqtaviy yutuvchi yoki manba sifatida modellashtiriladi;
- daryo-suv gorizonti aloqasi hadi: daryo sathi bilan yer osti suvlari napori orasidagi farqqa proporsional oqim sifatida ifodalanadi.

Chegara shartlari sifatida odatda I tur (Dirixle, ma'lum napor), II tur (Neyman, ma'lum oqim) yoki III tur (aralash, Koshi) shartlari qo'llaniladi, boshlang'ich shart esa quyidagicha beriladi:

Umumiy holda bunday tenglamalar sistemasi analitik yo'l bilan yechilmaydi, shu sababli chekli ayirmalar yoki chekli elementlar usullariga asoslangan sonli algoritmlar qo'llaniladi.



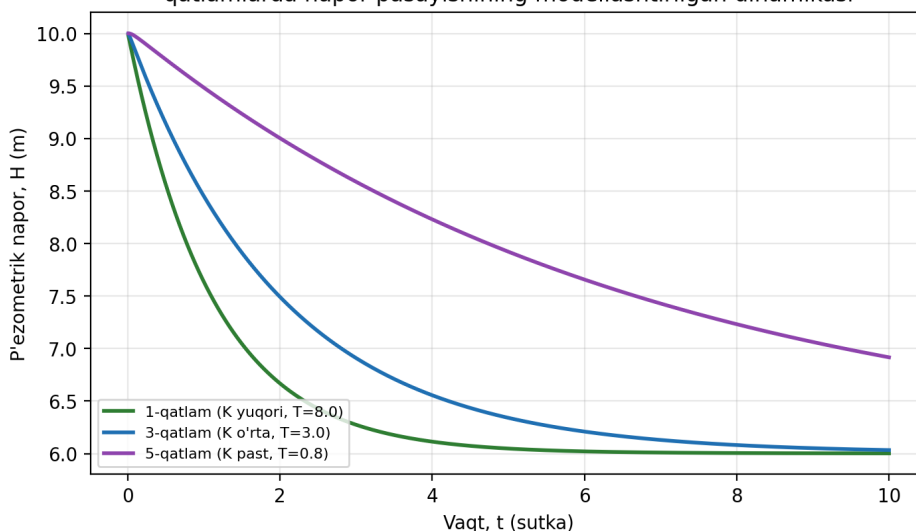
1-rasm. Ko'p qatlamli bir jinsli bo'lmagan g'ovak muhitda tashqi omillar ta'sirida filtratsiya jarayonining sxematik tasviri

1-rasm. Ko'p qatlamli bir jinsli bo'lmagan g'ovak muhitda tashqi omillar ta'sirida filtratsiya jarayonining sxematik tasviri.

Modellashtirish natijalarini vizuallashtirish

Yuqorida keltirilgan model asosida qurilgan sonli hisoblash namunasini ko'rib chiqamiz: uchta gidrogeologik jihatdan farqlanuvchi qatlamda (yuqori, o'rta va past filtratsiya koeffitsiyentiga ega) markazda joylashgan nasos qudug'i ishga tushirilgandan so'ng piyezometrik naporning vaqt bo'yicha o'zgarishi hisoblab chiqildi. Filtratsiya koeffitsiyenti (demak, transmissivlik  $T = K \cdot m$ ) yuqori bo'lgan qatlamda napor tezroq va chuqurroq pasayadi, chunki suv oqimi tezroq harakatlanib, quduq atrofidagi bosim tezda muvozanatga intiladi. Aksincha, transmissivligi past bo'lgan qatlamda napor sekinroq, ammo uzoqroq davom etuvchi tarzda pasayadi - bu qatlarning "xotira" xususiyatiga o'xshash effektini namoyon etadi.

2-rasm. Nasos qudug'i ishga tushirilgandan so'ng turli qatlamlarda napor pasayishining modellashtirilgan dinamikasi



2-rasm. Nasos qudug'i ishga tushirilgandan so'ng turli filtratsion xususiyatlarga ega qatlamlarda napor pasayishining modellashtirilgan dinamikasi.

Ushbu grafik talabalarga va yosh tadqiqotchilarga qatlamlarning bir jinsli emasligi filtratsiya jarayonining tezligi va xarakteriga qanday ta'sir qilishini bevosita ko'rgazmali tarzda tushuntirish imkonini beradi. Bundan tashqari,  $W(x,y,t)$  funksiyasidagi turli tashqi omillarni (masalan, infiltratsiya intensivligini mavsumiy o'zgartirish yoki quduq debitini oshirish) navbatma-navbat kiritish orqali ularning yer osti suvlari rejimiga ta'sirini alohida-alohida taqqoslash mumkin, bu esa model parametrlarini sezgirlik tahlili (sensitivity analysis) asosida baholashga xizmat qiladi.

Sonli yechish usuli va hisoblash algoritmi

Yuqorida keltirilgan tenglamalar sistemasi bir jinsli bo'lmagan koeffitsiyentlarga va o'zaro bog'langan chegara shartlariga ega bo'lgani sababli uni yopiq ko'rinishda yechish amalda imkonsizdir. Shu bois hisoblash amaliyotida sohani diskretlashtirishga asoslangan yondashuv qo'llaniladi: modellashtirilayotgan hudud gorizontali tekislikda to'rtburchak yoki uchburchak kataklarga, vertikal yo'nalishda esa gidrogeologik qatlamlarga mos keluvchi hisoblash sathlariga ajratiladi. Har bir katak markazida piyezometrik naporning noma'lum qiymati aniqlanadi, qo'shni kataklar orasidagi oqim esa ularning o'tkazuvchanlik xususiyatlaridan kelib chiqib gidravlik qarshilik orqali ifodalanadi.

Vaqt bo'yicha integrallash uchun oshkormas (implicit) sxemadan foydalanish maqsadga muvofiq, chunki u qadamning kattaligiga nisbatan turg'un bo'lib, uzoq muddatli prognozlarni hisoblashda hisoblash xarajatini sezilarli kamaytiradi. Har bir vaqt qadamida hosil bo'lgan siyrak matritsali chiziqli tenglamalar sistemasi iteratsion usullar - masalan, ketma-ket ortiqcha bo'shashish yoki oldindan shartlangan konjugat gradiyent usuli - yordamida yechiladi. Iteratsiya jarayoni napor o'zgarishining berilgan aniqlik chegarasidan kichik bo'lishi va har bir qatlam bo'yicha suv balansi xatoligining ruxsat etilgan darajadan oshmasligi mezoni asosida to'xtatiladi.

Hisoblash algoritmining alohida bosqichi sifatida qatlamlararo sizib o'tish hadini yangilash ajratib ko'rsatiladi. Har bir iteratsiyada qo'shni qatlamlardagi napor farqi qayta hisoblanadi va akvitar qatlamning gidravlik qarshiligiga ko'ra vertikal oqim miqdori aniqlanadi. Ushbu had sistemani bog'lovchi vazifasini bajarganligi sababli, uni to'g'ri hisobga olmaslik natijalarning fizik jihatdan asossiz bo'lib qolishiga, xususan, suv balansining buzilishiga olib keladi.

Model parametrlarini identifikatsiyalash va sezgirlik tahlili

Modelning ishonchliligi ko'p jihatdan unga kiritiladigan gidrogeologik parametrlarning qanchalik asoslanganligiga bog'liq. Filtratsiya koeffitsiyenti, solishtirma suv sig'imi va akvitar qatlamlarning gidravlik qarshiligi dala tajribalari - nasos sinovlari, quyish tajribalari va laboratoriya o'lchovlari - natijasida baholanadi. Biroq bunday o'lchovlar odatda nuqtaviy xususiyatga ega bo'lgani sababli, ularni butun hudud bo'yicha tarqatishda interpolatsiya yoki geostatistik usullardan foydalaniladi, bu esa muqarrar ravishda noaniqlik manbaiga aylanadi.

Parametrlarni aniqlashtirishning samarali yo'li teskari masalani yechish, ya'ni kuzatuv quduqlarida qayd etilgan haqiqiy napor qiymatlari bilan model hisoblab bergan qiymatlar orasidagi farqni minimallashtirishdir. Bunda maqsad funksiyasi sifatida odatda kvadratik og'ishlar yig'indisi tanlanadi va uni minimallashtirish optimallashtirish algoritmlari yordamida amalga oshiriladi. Kalibrlash bosqichida olingan parametrlar to'plami keyinchalik mustaqil kuzatuv qatori

bo'yicha tekshiriladi - bu bosqich modelning prognostik qobiliyatini tasdiqlash uchun zarur.

Sezgirlik tahlili esa qaysi parametrlarning natijaga kuchliroq ta'sir ko'rsatishini aniqlash imkonini beradi. Hisob-kitoblarda shuni ko'rsatadiki, quduq atrofidagi napor pasayishining kattaligiga birinchi navbatda ishlatilayotgan qatlamning o'tkazuvchanligi, pasayish jarayonining davomiyligiga esa suv sig'imi va akvitaridning qarshiligi hal qiluvchi ta'sir ko'rsatadi. Infiltratsion to'yinishning mavsumiy o'zgarishi sayoz qatlamlarda seziladi, chuqurroq joylashgan bosimli qatlamlarda esa uning ta'siri sustlashib, vaqt bo'yicha kechikish bilan namoyon bo'ladi. Shu sababli, dala kuzatuvlari tarmog'ini loyihalashda o'lchov nuqtalarini aynan eng sezgir zonalarda joylashtirish tavsiya etiladi.

Modelning amaliy tatbiqi va ta'lim jarayonidagi ahamiyati

Ishlab chiqilgan yondashuv amaliyotda bir necha yo'nalishda qo'llanilishi mumkin. Birinchidan, u yer osti suvlari zaxiralarini baholashda, ya'ni belgilangan debit bilan uzoq muddat suv olinganda napor rejimi qanday o'zgarishini oldindan aniqlashda foydalidir. Ikkinchidan, sug'oriladigan hududlarda yer osti suvlari sathining ko'tarilishi va shu sababli yuzaga keladigan sho'rlanish xavfini bashorat qilish imkonini beradi. Uchinchidan, quduqlar tarmog'ini joylashtirishning turli variantlarini taqqoslash orqali suv olishning eng maqbul rejimini tanlashga xizmat qiladi.

Model natijalarini talqin qilishda ularning noaniqlik darajasini oshkora ko'rsatish muhim ahamiyatga ega. Kirish parametrlarining ehtimoliy taqsimotini hisobga oluvchi ko'p variantli hisoblashlar prognozni yagona egri chiziqli sifatida emas, balki ishonch oralig'i ko'rinishida taqdim etish imkonini beradi. Bunday yondashuv boshqaruv qarorlarini qabul qilishda xavf-xatarni miqdoriy baholashga asos yaratadi va model natijalariga haddan tashqari ishonishning oldini oladi.

Ta'lim nuqtai nazaridan ko'rib chiqilgan model gidrogeologiya va amaliy matematika yo'nalishi talabalarini uchun samarali o'quv vositasi bo'lib xizmat qiladi. Talaba parametrlarni o'zgartirib, natijaning qanday javob berishini bevosita kuzatar ekan, differensial tenglamalar tilida yozilgan mavhum munosabatlar bilan real fizik jarayon o'rtasidagi bog'liqlikni anglab yetadi. Sxematik tasvir, grafik va sonli natijalarni birgalikda taqdim etish esa murakkab ko'p qatlamli tizimlarni idrok etishni sezilarli darajada osonlashtiradi hamda mustaqil tadqiqot ko'nikmalarini shakllantirishga zamin yaratadi.

Xulosa. Bir jinsli bo'lmagan ko'p qatlamli g'ovak muhitda yer osti suvlarining filtratsiya jarayonlarini modellashtirish klassik bir jinsli muhit uchun qurilgan modellarga nisbatan ancha murakkab matematik apparatni talab qiladi. Qatlamlararo sizib o'tish hodisasini va tashqi omillarni (infiltratsiya, bug'lanish, quduqlar, daryo aloqasi) manba-yutuvchi hadlar sifatida hisobga oluvchi differensial tenglamalar sistemasi real gidrogeologik sharoitni ancha to'g'ri tasvirlash imkonini beradi.

Matematik modellashtirish jarayonini sxematik va grafik vizuallashtirish vositalari bilan uyg'unlashtirish murakkab ko'p qatlamli sistemalarning fizik mazmunini talabalar va amaliyotchilarga tushunarli tarzda yetkazishga xizmat qiladi. Qatlamlarning filtratsion xususiyatlari va tashqi ta'sirlarning o'zgarishi natijasida napor rejimining qanday o'zgarishini vizual taqqoslash orqali sonli tahlil natijalarini sifatli talqin etish mumkin bo'ladi.

Kelgusi tadqiqotlarda ushbu modelni suv sifati (ifloslanish transporti), tuproq namligi bilan o'zaro ta'sir hamda iqlim o'zgaruvchanligi ta'sirini hisobga oluvchi bloklar bilan kengaytirish, shuningdek olingan sonli natijalarni interaktiv dinamik vizuallashtirish vositalari (masalan, veb-asosli dashboard) yordamida taqdim etish istiqbolli yo'nalish bo'lib qoladi.

### **Foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati**

- [1] Bear J. Dynamics of Fluids in Porous Media. - New York: Dover Publications, 1988.
- [2] Bear J., Cheng A.H.-D. Modeling Groundwater Flow and Contaminant Transport. - Springer, 2010.
- [3] Todd D.K., Mays L.W. Groundwater Hydrology. 3rd ed. - John Wiley & Sons, 2005.
- [4] Anderson M.P., Woessner W.W., Hunt R.J. Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport. 2nd ed. - Academic Press, 2015.
- [5] Polubarinova-Kochina P.Ya. Theory of Ground Water Movement. - Princeton University Press, 1962.
- [6] Verruijt A. Theory of Groundwater Flow. - Macmillan, 1970.
- [7] Hantush M.S. Modification of the theory of leaky aquifers // Journal of Geophysical Research. - 1960. - Vol. 65, No. 11. - P. 3713-3725.
- [8] Konikow L.F., Bredehoeft J.D. Computer model of two-dimensional solute transport and dispersion in ground water // USGS Techniques of Water-Resources Investigations. - 1978.
- [9] Rasulov A.S. va boshq. Yer osti suvlari gidrodinamikasi va filtratsiya nazariyasi. - Toshkent: O'zbekiston, 2015.
- [10] Arcavi A. The Role of Visual Representations in the Learning of Mathematics // Educational Studies in Mathematics. - 2003. - Vol. 52, No. 3. - P. 215-241.