



**“ISSIQLIK ELEKTR STANSIYASIDA (IES) SUVNI YUMSHATISH
VA TUZSIZLANTIRISHNING ZAMONAVIY USULLARIDAN
FOYDALANGAN HOLDA SUVNI TOZALASH TIZIMINI
TAKOMILLASHTIRISH”**

M25-12 ATMM guruh talabasi

Shodmonova Surayyo Adxambek qizi

Annotatsiya: *“Issiqlik elektr stansiyasida (IES) suvni yumshatish va tuzsizlantirishning zamonaviy usullaridan foydalangan holda suvni tozalash tizimini takomillashtirish” mavzusidagi ushbu maqola issiqlik elektr stansalari uchun boiler va yuqori bosimli bug‘ generatorlari sifatida talab qilinadigan yuqori sifatli make-up va feed-water tayyorlash tizimlarini optimallashtirishga qaratilgan. Maqolada suvni yumshatish (hardness removal) va tuzsizlantirish (demineralization)ning asosiy texnologiyalari — ion almashinuvi (ion-exchange), membrana jarayonlari (reverse osmosis, nanofiltration) va elektro-demineralizatsiya (EDI/CEDI) — taqqoslanadi; har bir usulning samaradorligi, energiya va operatsion xarajatlari, muammolari va IES’ga mos kombinatsion sxemalari ilmiy manbalarga tayangan holda tahlil etiladi. Praktik amaliyot va adabiyotlar asosida eng samarali yondashuvlar: RO + EDI kombinatsiyasi yoki RO oldidan to‘liq pretreatment bilan birgalikda qo‘llash ko‘rsatiladi, chunki bu sxemalar yuqori darajadagi demineralizatsiyani kimyoviy regeneratsiya talabini kamaytirgan holda iqtisodiy va ekologik jihatdan maqbul yechim beradi. Maqola statistik jadval shaklida samaradorlik va xarajatlardan misollar keltiradi va IES’larda amaliy joriy etish uchun tavsiyalar beradi. (MDPI)*

Abstract: *This paper examines modern methods for softening and demineralizing water in thermal power plants (TPPs) to improve boiler feedwater quality and reduce corrosion, scaling and maintenance. It compares ion exchange, membrane processes (reverse osmosis, nanofiltration) and electrodeionization (EDI/CEDI), analysing removal efficiencies, energy and operating costs,*

fouling/regeneration issues and integration schemes. Based on literature and pilot/full-scale data, the most advantageous approach for many TPPs is a hybrid RO + EDI (or RO + ion-exchange where appropriate) system with robust pretreatment (filtration, antiscalant, degasification). This scheme minimizes chemical regenerant use, achieves stable high purity (conductivity and silica control), and—when fouling is managed—offers lifecycle cost benefits. Recommendations for implementation, monitoring parameters and expected performance are provided. (MDPI)

KALIT SO‘ZLAR / KEYWORDS

O‘zbekcha: *issiqlik elektr stansiyasi, suvni yumshatish, tuzsizlantirish, ion-almashinuvi, revers osmoz, elektrodemineralizatsiya, boiler feed-water.*

English: *thermal power plant, water softening, demineralization, ion exchange, reverse osmosis, electrodeionization, boiler feedwater.*

KIRISH: Issiqlik elektr stansiyalarida yuqori bosimli bug‘ generatorlari va boilerlar ishlashi uchun feed-water sifatining yuqori bo‘lishi zarur. Suvda mavjud qattiq ionlar (Ca^{2+} , Mg^{2+}), silika, kloridlar va sulfatlar korroziy jarayonlarni kuchaytiradi, texnik xizmat xarajatlarini oshiradi va turbinaning ishlash muddatini qisqartiradi. An’anaviy ion-almashinuvi tizimlari qattiqlik va mineral ionlarni samarali olib tashlasa-da, kimyoviy regeneratsiya, chiqindi suvlari va ekologik yuk bilan bog‘liq muammolar mavjud. Shu sababli, zamonaviy suvni tozalash usullari — membrana jarayonlari va elektrodemineralizatsiya kabi texnologiyalar — yanada samarali va ekologik jihatdan maqbul yechim sifatida ko‘riladi.

ASOSIY QISM: Suvni yumshatish va tuzsizlantirish usullari.

Ion-almashinuvi (Ion Exchange): Katyon va anion resinlari yordamida suvdan Ca^{2+} va Mg^{2+} ionlarini olib tashlaydi. Samarali, lekin kimyoviy regeneratsiya talab qiladi. Regeneratsiya jarayoni oqava suv va kimyoviy chiqindilarni hosil qiladi.

Membrana jarayonlari (Reverse Osmosis va Nanofiltratsiya): RO yuqori darajada ionlarni olib tashlaydi, feed-water uchun past o'tkazuvchanlik va past silika darajasini ta'minlaydi. Biroq, membrana fouling, yuqori bosim pompalari va energiya sarfi kabi masalalar mavjud. NF esa qisman ionlarni olib tashlaydi, past



energiya sarfi bilan ajralib turadi, lekin yuqori darajadagi tuzsizlantirishni ta'minlay olmaydi.

Elektrodemineralizatsiya (EDI/CEDI): Ion-almashinuvi va membrana elementlarini elektr maydoni bilan birlashtirib, uzluksiz tuzsizlantirishni amalga oshiradi. RO orqali oldtreatment qilingan suv bilan qo'llashda maksimal samaradorlikka erishiladi, kimyoviy regeneratsiya deyarli talab qilinmaydi.

Usullarni samaradorligi va tahlili

Usul	Ca ²⁺ /Mg ²⁺ (%)	Ionlarni olib tashlash (%)	Energiya (kWh/m ³)	Oper. xarajat (USD/m ³)
Ion-exchange	95–99	90–99	0.01–0.05	0.05–0.20
Reverse Osmosis (RO)	85–99	95–99	0.5–3.0	0.04–1.30
Nanofiltration (NF)	70–95	70–95	0.2–1.2	0.03–0.40
EDI/CEDI (post-RO)	99+	99.9+	0.05–0.3	0.05–0.30

RO + EDI kombinatsiyasi eng samarali va ekologik jihatdan maqbul yechim sifatida ko'rsatiladi, chunki bu sxema yuqori sifatli feed-water beradi, kimyoviy regeneratsiya va chiqindilarni kamaytiradi.

Monitoring va operatsion tavsiyalar

✓ Parametrlar: conductivitiy, silika (SiO₂), pH, Ca/Mg, Na⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, TOC, bioburden.

✓ Foulingni kamaytirish: kuchli pretreatment, ultrafiltratsiya, antiscalant, pH nazorati.

✓ Oqava suv va konsentratlarni boshqarish ekologik talablarni qondiradi.

Issiqlik elektr stansiyalarida ishlatiladigan boiler va yuqori bosimli bug' generatorlari uchun make-up va feed-water sifatining qat'iy talablari mavjud: past mineral konsentratsiyasi, minimal silika, korroziy ionlar (xususan kloridlar va sulfatlar) va nazorat ostidagi qattiqlik. An'anaviy texnologiyalardan ion-exchange



(kation va anion zaxiralari orqali) uzoq yillar davomida foydalanilib kelinadi: u qattiqlikni (Ca^{2+} , Mg^{2+}) samarali olib tashlaydi, lekin kimyoviy regeneratsiya (NaCl , NaOH va HCl kabi reagentlar) va chiqindilar hosil qilishi kerak, shuningdek regeneratsiya jarayoni oqava suvning tuz yukini oshiradi. Amaliy hisoblar va tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, ion-almashinuvi tizimlari kichik va o'rta hajmdagi o'sishlarda past kapital xarajatlari va soddaligi tufayli jozibali, ammo barqarorlik va rivojlangan ekologik talablarga javob berishda cheklovlarga ega. ([ScienceDirect](#))

Membrana texnologiyalari, xususan reverse osmosis (RO) va nanofiltratsiya (NF), sovrinli xususiyatlariga ega: ularning yordamida yuqori darajada ionlarni va eritilgan organik/suulanishuvchan moddalarni olib tashlash mumkin, natijada feed-water uchun past o'tkazuvchanlik va past silika darajasi erishiladi. RO tizimlari yuqori bosim pompalarini, samarali pretreatment (ultrafilter, antiscalant, koagulyatsiya/dekalkulyatsiya) va muntazam kimyoviy/termal tozalashni talab qiladi; shuningdek membrana fouling (tuklanish) va permeat yo'qotish xarajatlari tizim xarajatlariga ta'sir ko'rsatadi. So'nggi iqtisodiy tahlillar va sanoat hisobotlari shuni ko'rsatadiki, RO asosli modernizatsiya — to'g'ri oldtreatment bilan birgalikda — ko'plab holatlarda ion-exchangeni almashtirish yoki uni sezilarli darajada kamaytirish imkonini beradi, ayniqsa yuqori tuzlilik yoki murakkab kontaminantlar mavjud bo'lgan manbalarda. Biroq, RO energiya sarfi va membrana almashtirish xarajatlarini hisobga olish zarur. ([MDPI](#))

Elektrodemineralizatsiya (EDI/CEDI) — bu ion-exchange resinlari, ion-selective membranalar va elektr maydoni kombinatsiyasi orqali uzluksiz regeneratsiyani amalga oshiruvchi texnologiya bo'lib, kimyoviy regeneratsiyani talab qilmaydi yoki sezilarli kamaytiradi. EDI, ayniqsa RO orqali dastlabki tuz miqdori sezilarli darajada kamaytirilgan so'ng (RO-permeatni) qo'llashda juda samarali hisoblanadi: EDI orqali yuqori tozalikka ($\mu\text{S}/\text{cm}$ darajasida o'tkazuvchanlik, juda past iyonlar) erishish mumkin va bu boilerning korroziy yukini kamaytiradi hamda yuqori bosimli turbinalar va yuqori sifatdagi bug' generatorlari uchun talab qilinadigan standartlarga mos keladi. So'nggi tadqiqotlar va sanoat pilot loyihalar RO + EDI kombinatsiyasi sovrinli balansni — kimyoviy



regeneratsiya volatil chiqindilarini kamaytirish, yuqori darajada demiralizatsiya va barqaror operatsion sharoitlarni ta'minlash jihatidan — ta'minlashi mumkinligini ko'rsatadi. (MDPI)

Amaliy tahlil: quyida turli usullarning umumiy samaradorlik va xarajatlarni qiyoslovchi soddalashtirilgan statistik jadval ko'rsatiladi (jadval qiymatlari adabiyotlardan olingan interval va namuna misollarga asoslangan):

Usul	Ca ²⁺ /Mg ²⁺ (%)	Ionlarni olib tashlash (%)	Energiya (kWh/m ³)	Oper. xarajat (USD/m ³) *
Ion-exchange (regeneratsiyali)	95–99	90–99	0.01–0.05	0.05–0.20
Reverse Osmosis (RO)	85–99	95–99	0.5–3.0	0.04–1.30 (turlicha)
Nanofiltration (NF)	70–95	70–95	0.2–1.2	0.03–0.40
EDI/CEDI (post-RO)	99+	99.9+	0.05–0.3	0.05–0.30

* — xarajat diapazonlari manba va o'lchamga qarab o'zgaradi; RO xarajatlari katta o'lcham va brackish/seawater holatlariga qarab sezilarli farq qiladi. Bu jadval umumiy tendensiyalarni ko'rsatadi; aniq loyihalashtirish uchun mahalliy manba suvi analizi va tizim hajmi talab qilinadi. (MDPI)

Muammolar va yechimlar: RO va NF tizimlarida fouling eng katta operatsion muammo hisoblanadi — organik moddalar, biofouling va skalant ionlar membrana samaradorligini pasaytiradi va tozalash/yaqin almashtirish xarajatlarini oshiradi. Fouling narxi va uning iqtisodiy ta'siri haqidagi tahlillar tozalash-vaqti, energiya talabining oshishi hamda erta membrana almashtirishni hisoblash orqali sezilarli qo'shimcha xarajatlarni keltirib chiqarishini ko'rsatadi, shuning uchun kuchli pretreatment (sandy/dual-media filtration, ultrafiltration, antiscalant dozasi, pH nazorati) va fouling monitoringi — zarur shart. (api.kwrwater.nl)

Tuzsizlantirishning ideal sxemasi (samaradorlik, iqtisod va ekologiya nuqtai nazaridan) ko'pincha quyidagicha tavsiya etiladi: manba suvining dastlabki tahlili → mexanik filtratsiya → flokulyatsiya/koagulyatsiya (zarur bo'lsa) →



ultrafiltratsiya yoki nozik filtratsiya → revers osmoz (bir yoki ikki bosqichli, kerak bo'lsa konsentratni qayta ishlash) → EDI yoki polir ion-exchange (oxirgi demine-sahifa) → monitoring va avtomatik nazorat. Bu sxema RO orqali katta qismini fizik/kimyoviy jihatdan olib tashlab, EDI yordamida minimal kimyoviy regeneratsiya bilan yuqori darajada demineralizatsiyani ta'minlaydi. Pilot loyihalar va amaliy tajriba shuni ko'rsatadiki, RO + EDI kombinatsiyasi juda kam kimyoviy chiqindilar bilan $\mu\text{S}/\text{cm}$ darajasida o'tkazuvchanlikni barqaror saqlaydi va tizimning umumiy lifecycle xarajatlari ko'pincha an'anaviy faqat ion-exchange tizimlariga nisbatan raqobatbardosh bo'lishi mumkin. (MDPI)

Monitoring va nazorat parametrlariga alohida e'tibor kerak: conductivtiy ($\mu\text{S}/\text{cm}$), silika (SiO_2 mg/L), pH, barch (Ca, Mg) konsentratsiyasi, kation/anion spesifik ionlar (Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-}), TOC/organik yuk, va bioburden. Boiler uchun tavsiya etiladigan amaliy standartlar va avtomatik nazorat tizimlari yordamida tezda og'ishlarni aniqlash va to'g'rilash bo'yicha protseduralarni joriy etish kerak. Bundan tashqari konsentrat oqava suvni boshqarish, regeneratsiya oqava suvini neytrallash va chiqindilarni kamaytirish bo'yicha ekologik talablar loyihaning muhim qismi hisoblanadi.

Tavsiyalar: IES uchun yangi yoki modernizatsiya qilinayotgan suv tozalash tizimi loyihasida quyidagilarni hisobga olish lozim: (1) mahalliy manba suvining tahlili va o'zgaruvchanligini (sezoni) aniqlash; (2) pilot-miqyosda RO + pretreatment + EDI konfiguratsiyasini sinovdan o'tkazish; (3) fouling nazorati va CIP rejimini loyihalash; (4) energiya samaradorligini oshirish uchun bosim tiklash texnologiyalari va optimal pompalar tanlash; (5) chiqindi konsentrat va regeneratsiya halokatlarini ekologik boshqarish; (6) iqtisodiy tahlil (CAPEX + OPEX) va LCOE (lifecycle cost) hisobini olib borish. Adabiyotlar va sanoat hisobotlari shuni ko'rsatadiki, RO + EDI kombinatsiyasi ko'plab hollarda optimal muvozanatni beradi va kimyoviy regeneratsiyani sezilarli kamaytiradi, bu esa operatsion xavfsizlik va atrof-muhit yukini pasaytiradi. (MDPI)



XULOSA: Issiqlik elektr stansiyalarida suvni yumshatish va tuzsizlantirishni takomillashtirishga zamonaviy yondashuvlar kompleks yechim talab qiladi. An'anaviy ion-almashinuvi oddiy va past boshlang'ich xarajatga ega bo'lsa-da, RO + EDI kombinatsiyasi yuqori darajada demineralizatsiya, past kimyoviy regeneratsiya, barqaror operatsiya va ekologik samaradorlikni ta'minlaydi. Tizimni loyihalashda manba suvining o'zgaruvchanligi, foulingni nazorat qilish, energiya sarfi va oqava suv boshqaruvi e'tiborga olinishi kerak. Xulosa sifatida aytish mumkinki, issiqlik elektr stansiyalarida suvni yumshatish va tuzsizlantirishni takomillashtirishga yo'naltirilgan zamonaviy yondashuvlar kompleks axborot-muhandislik qarorlari (manba tahlili, pilot sinovlar, iqtisodiy model) va bir nechta texnologiyalarni — RO, EDI, pretreatment modullarini — uyg'unlashtirishni talab qiladi. An'anaviy ion-exchange tizimlari oddiyligi va past boshlang'ich xarajatlari bilan jozibador bo'lsa-da, yuqori tozalik, kamaytirilgan kimyoviy regeneratsiya va barqarorlikni ta'minlash uchun RO + EDI yoki RO bilan birgalikdagi modullar ko'proq afzalliklarni taklif qiladi. Loyihalashtirishda fouling va membrana umrini, energiya sarfini va oqava konsentrat boshqaruvini hisobga olish muhim. Ushbu maqolada keltirilgan statistik ko'rsatkichlar va amaliy tavsiyalar IES'lar uchun samarali, iqtisodiy va ekologik jihatdan maqbul suv tozalash yechimlarini tanlashda yordam beradi. ([ScienceDirect](#))

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR (TANLANGAN, ASOSIY MANBALAR)

1. Santos A.B., et al., "Electrodeionization for Wastewater Reuse in Industrial Applications", *Water* (MDPI), 2024. ([MDPI](#))
2. Tseng P.C., et al., "Performance evaluation of resin wafer electrodeionization for desalination", *Sustainable Environment Research*, 2022. ([BioMed Central](#))
3. Feo-García J., et al., "Cost Studies of Reverse Osmosis Desalination Plants", *Water* (MDPI), 2024. ([MDPI](#))
4. Kukić D.V., "Ion exchange vs reverse osmosis — comparative analysis", *ScienceDirect* (review), 2013 (va undan keyingi sanoat hisobotlari va tahlillar). ([ScienceDirect](#))



5. Jafari M., et al., “Cost of fouling in full-scale reverse osmosis and nanofiltration installations”, *Desalination*, 2021 — membrana fouling va uning iqtisodiy ta'siri tahlili. (api.kwrwater.nl)