ISHLAB CHIQARISH JARAYONLARIDA ENERGIYA ISTE'MOLINI TAHLIL QILISH VA SAMARADORLIKNI OSHIRISH USULINI ISHLAB CHIQISH

Kamolova Fotima Alisher qizi
Toshkent to'qimachilik va yengil sanoat instituti (TTYeSI)
https://doi.org/10.5281/zenodo.22917132

ANNOTATSIYA

Maqolada ishlab chiqarish jarayonlarida energiya iste'molini tizimli tahlil qilish va energiya samaradorligini oshirishga qaratilgan integrallashgan usul taklif etiladi. Usul ISO 50001:2018 va ISO 50006:2023 tamoyillari, energiya samaradorligi ko'rsatkichlari (EnPI), solishtirma energiya sarfi (SEC), bazaviy energiya modeli, yuklama profili, yo'qotishlarni tasniflash va ko'p mezonli optimallashtirish bosqichlarini birlashtiradi. Tadqiqot metodologiyasi ilmiy adabiyotlar va xalqaro standartlar tahlili, energiya balansini tuzish, statistik normalizatsiya, regressiya asosidagi bazaviy model hamda modellashtirilgan ishlab chiqarish ssenariysidan iborat. Taklif etilgan usulda energiya sarfini mahsulot hajmi, ish vaqti, uskunaning yuklanish darajasi va texnologik rejimlar bilan bog'lash, me'yordan chetlanishlarni erta aniqlash hamda tejamkorlik choralarini energiya, iqtisodiy va texnologik mezonlar asosida ustuvorlashtirish ko'zda tutilgan. Illustrativ 24 soatlik ssenariyda jami elektr energiyasi sarfi 1405 kWh dan 1234 kWh gacha, SEC 2,81 dan 2,47 kWh/birlik gacha, pik quvvat esa 84 kW dan 73 kW gacha kamaygan. Ushbu raqamlar real korxona tajribasi emas, taklif etilgan algoritmning hisoblash mantiqini namoyish etuvchi modellashtirilgan natijalardir. Ishlab chiqilgan yondashuv energiya monitoringi, benchmarking, ishlab chiqarish rejalashtirish va doimiy takomillashtirishni yagona boshqaruv sikliga birlashtirishi bilan amaliy ahamiyatga ega.

Kalit so'zlar: energiya iste'moli, energiya samaradorligi, energiya monitoringi, EnPI, SEC, energiya bazaviy chizig'i, ISO 50001, optimallashtirish, ishlab chiqarish jarayoni, Industry 4.0.

АННОТАЦИЯ

В статье разработан интегрированный метод анализа энергопотребления и повышения энергоэффективности производственных процессов. Метод объединяет мониторинг, нормализацию данных, формирование энергетической базовой линии, расчет показателей энергетической результативности, выявление потерь и многокритериальную оптимизацию. Методологическая основа сформирована с учетом ISO 50001:2018 и ISO 50006:2023, а также современных исследований по цифровому энергетическому менеджменту. Для демонстрации расчетной логики использован модельный 24-часовой производственный сценарий; полученные значения не интерпретируются как результаты натурного эксперимента.

Ключевые слова: энергопотребление, энергоэффективность, энергетический менеджмент, мониторинг, EnPI, SEC, базовая линия, оптимизация, производство.

ABSTRACT

This article proposes an integrated method for analysing energy consumption and improving energy efficiency in manufacturing processes. The method combines data acquisition, normalization, energy performance indicators, specific energy consumption, baseline modelling, loss detection and multi-criteria optimization within a continuous improvement loop. The methodological framework is aligned with ISO 50001:2018 and ISO 50006:2023 and incorporates recent research on energy assessment, machine learning,

forecasting and AI-enabled manufacturing. An illustrative 24-hour production scenario is used to demonstrate the computational logic. The simulated results show reductions in total electricity use, specific energy consumption and peak demand; these values are not presented as empirical plant data. The proposed approach provides a practical bridge between energy monitoring, process analysis, operational optimization and management decision-making.

Keywords: energy consumption, energy efficiency, energy management, EnPI, specific energy consumption, baseline, optimization, manufacturing, Industry 4.0.

KIRISH

Jahon sanoatida energiya samaradorligini oshirish iqtisodiy raqobatbardoshlik, resurslardan oqilona foydalanish va dekarbonizatsiya vazifalarini bir vaqtning o‘zida hal qiladigan strategik yo‘nalish hisoblanadi. IEA ma’lumotlariga ko‘ra, global energiya samaradorligi bo‘yicha taraqqiyot 2024-yilda ham talab etiladigan sur’atdan past bo‘lib qolgan; shu sababli mavjud texnologiyalarni modernizatsiya qilish bilan birga, korxona darajasida ma’lumotga asoslangan energiya boshqaruvi va doimiy yaxshilash mexanizmlarini kuchaytirish muhimdir (3). Ishlab chiqarish tizimlarida energiya sarfi uskunaning texnik holati, ishlab chiqarish hajmi, yuklama darajasi, turib qolishlar, texnologik parametrlar va yordamchi tizimlar bilan birgalikda shakllanadi. Shuning uchun umumiy hisoblagich ko‘rsatkichining o‘zi energiya yo‘qotishining qayerda va nima sababdan yuz berayotganini aniqlash uchun yetarli emas.

ISO 50001:2018 energiya menejmenti tizimini tashkilotda rejalashtirish, amalga oshirish, tekshirish va takomillashtirish uchun tizimli asos sifatida belgilaydi (1). ISO 50006:2023 esa energiya samaradorligi ko‘rsatkichlari va energiya bazaviy chizig‘idan foydalanib natijadorlikni baholash bo‘yicha metodik yo‘riq beradi (2). Mazkur standartlar energiya samaradorligini faqat alohida texnik loyihalar yig‘indisi sifatida emas, balki uzluksiz boshqaruv jarayoni sifatida ko‘rishni talab qiladi. Fitzgerald va hammualliflar ISO 50001ga asoslangan boshqaruv tizimlarida energiya samaradorligi yaxshilanishi uzoq muddat saqlanishi mumkinligini 83 ta ishlab chiqarish obyektining tasdiqlangan ma’lumotlari asosida ko‘rsatgan (13).

Ilmiy adabiyotlarda ishlab chiqarish energiya menejmentining bir nechta asosiy yo‘nalishlari ajratiladi: energiya diagnostikasi va auditi, hisobga olish va monitoring, energiya iste’molini modellashtirish, energiya samaradorligini benchmarking, ishlab chiqarish jadvalini energiya mezoni bo‘yicha optimallashtirish hamda sun’iy intellekt asosidagi real vaqt boshqaruvi (4–9). Cai va hammualliflar monitoring, baholash, optimallashtirish va benchmarkingni yagona integrallashgan siklga birlashtirish energiya ko‘rsatkichlarini yaxshilash uchun muhimligini ta’kidlaydi (7). Menghi va hammualliflar esa energiya baholash vositalarini energiya tahlili, natijadorlikni baholash va energiya tejash choralari bloklariga ajratib, ma’lumotlarning yetarli granulyarligi va jarayon bilan bog‘lanishi hal qiluvchi omil ekanini ko‘rsatadi (5).

Raqamlashtirish energiya boshqaruviga yangi imkoniyatlar yaratmoqda. Mashinali o‘qitish modellaridan energiya iste’molini prognozlash, nomaqbul rejimlarni aniqlash va optimal sozlamalarni tavsiya qilishda foydalanish bo‘yicha tadqiqotlar soni oshib bormoqda (6, 10–12, 15). Biroq ko‘plab yondashuvlarda muammo energiya monitoringi, bazaviy model va optimallashtirish bosqichlarining alohida ko‘rilishidir. Korxona uchun esa “qayerda sarf yuqori?”, “bu sarf ishlab chiqarish hajmi bilan izohlanadimi?”, “qaysi yo‘qotish birinchi bartaraf etilishi kerak?” va “o‘zgarishdan so‘ng haqiqiy tejash qancha?” savollariga ketma-ket javob beradigan yaxlit usul zarur.

Shu sababli mazkur tadqiqotning maqsadi ishlab chiqarish jarayonlarida energiya iste’molini tahlil qilish va samaradorlikni oshirish uchun monitoring, normalizatsiya, EnPI/SEC, bazaviy model, chetlanishlarni aniqlash va ko‘p mezonli optimallashtirishni

birlashtiruvchi usulni ishlab chiqishdan iborat. Tadqiqot vazifalari: 1) energiya tahlilining asosiy ko‘rsatkichlari va ma’lumot tuzilmasini aniqlash; 2) normalizatsiyalangan bazaviy energiya modelini shakllantirish; 3) energiya yo‘qotishlarini sabablar bo‘yicha tasniflash; 4) tejamkorlik choralarini ustuvorlashtiruvchi ko‘p mezonli baholashni ishlab chiqish; 5) usulning ishlash mantiqini modellashtirilgan ishlab chiqarish ssenariysida ko‘rsatish.

MATERIALLAR VA METODLAR

Tadqiqot nazariy-amaliy xarakterga ega bo‘lib, 15 ta xalqaro standart, hisobot va ilmiy manbaning maqsadli tahlili, energiya oqimlarini dekompozitsiya qilish, statistik normalizatsiya, regressiya asosidagi bazaviy model, solishtirma ko‘rsatkichlar va ko‘p mezonli qaror qabul qilish elementlariga tayandi. Tahlil uchun manbalar 2017–2025-yillarda ishlab chiqarish energiya menejmenti, energiya auditi, monitoring, mashinali o‘qitish, prognozlash, energiya samarali rejalashtirish va AI asosidagi optimallashtirish yo‘nalishlarini qamrab oladigan tarzda tanlandi (4–15).

Energiya iste’molini o‘lchash va ko‘rsatkichlar tizimi

Korxona energiya iste’moli texnologik uskunalar, yordamchi tizimlar va infratuzilmaviy iste’molchilar kesimida o‘lchanishi kerak. Tavsiya etiladigan minimal ma’lumotlar to‘plami: vaqt tamg‘asi, aktiv energiya (kWh), quvvat (kW), mahsulot hajmi Q, uskunaning ish vaqti, yuklama koeffitsienti, asosiy texnologik parametrlar, smena, turib qolish va ishlab chiqarish holati. Jarayon darajasidagi hisobga olish imkon qadar SCADA/MES/IIoT tizimlariga bog‘lanadi. Energiya o‘lchovining granulyarligi qancha yuqori bo‘lsa, yo‘qotishlar va operatsion sabablar o‘rtasidagi bog‘liqlikni aniqlash shuncha osonlashadi (5, 7, 9).

Asosiy energiya ko‘rsatkichi sifatida solishtirma energiya sarfi qabul qilinadi:

$$SEC = E / Q,$$

bu yerda E — tahlil davridagi energiya sarfi, kWh; Q — foydali mahsulot yoki texnologik natija miqdori. SEC turli ishlab chiqarish davrlarini mahsulot hajmi bo‘yicha solishtirish imkonini beradi. Bundan tashqari, pik quvvat Pmax, bo‘sh yurish energiyasi Eidle, yuklama koeffitsienti LF = Pavg/Pmax va energiya xarajatining mahsulot birligiga nisbati qo‘llanadi. ISO 50006:2023 bunday EnPIlarni energiya bazaviy chizig‘i bilan bog‘lab baholashni tavsiya etadi (2).

1-jadval. Ishlab chiqarish energiya tahlili uchun tavsiya etiladigan ko‘rsatkichlar

Ko‘rsatkich	**Hisoblash / birlik**	**Mazmuni**	**Boshqaruvdagi roli**
Umumiy energiya E	ΣE, kWh	Davrdagi jami sarf	Energiya balansini tuzish
SEC	E/Q, kWh/birlik	Mahsulot birligiga sarf	Normalizatsiya va benchmarking
Pik quvvat Pmax	max(Pt), kW	Eng yuqori talab	Pikni pasaytirish va tarif nazorati
Bo‘sh yurish ulushi	Eidle/E × 100, %	Foydasiz sarf	O‘chirish/standby siyosati
Yuklama koeffitsienti	Pavg/Pmax	Quvvatdan foydalanish	Rejim barqarorligini baholash
Bazadan chetlanish	(E−Ê)/Ê ×100, %	Kutilgan sarfdan og‘ish	Anomaliya va yo‘qotishni aniqlash

Bazaviy energiya modeli va normalizatsiya

Energiya sarfini faqat oldingi davr bilan bevosita taqqoslash noto‘g‘ri xulosaga olib kelishi mumkin, chunki ishlab chiqarish hajmi, ish vaqti, mahsulot turi yoki tashqi sharoit o‘zgaradi. Shu bois bazaviy model energiya sarfini ta’sir etuvchi omillarga bog‘laydi. Soddalashtirilgan ko‘p omilli regressiya modeli quyidagicha ifodalanadi:

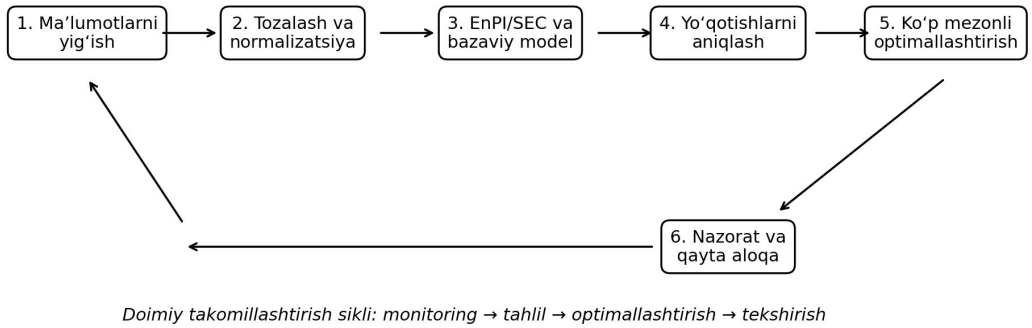
$$\hat{E}t = \beta 0 + \beta 1 Qt + \beta 2 Ht + \beta 3 Lt + \beta 4 Zt,$$

bu yerda $\hat{E}t$ — kutilayotgan energiya sarfi; Qt — ishlab chiqarish hajmi; Ht — ish vaqti; Lt — yuklama yoki quvvat omili; Zt — mahsulot turi, harorat yoki boshqa tegishli o‘zgaruvchilar; βi — tarixiy ma’lumotlardan aniqlanadigan model koeffitsientlari. Ishlab chiqarish energiya prognozlashida fizik ma’noga ega parametrlarni modelga kiritish umumlashtirish qobiliyatini yaxshilashi mumkin (11). Sanoat jarayonlarida chuqur o‘qitish va gibrid prognozlash usullari ham qo‘llanmoqda, ammo ma’lumot sifati va sensor xatolari model noaniqligini oshirishi mumkin (12).

Normalizatsiyalangan og‘ish $\Delta Et = Et - \hat{E}t$ ko‘rinishida aniqlanadi. Agar og‘ish musbat va nazorat chegarasidan yuqori bo‘lsa, “ortiqcha sarf” hodisasi qayd etiladi. Nazorat chegarasi tarixiy qoldiq dispersiyasi asosida yoki texnologik mutaxassis tomonidan operatsion tolerans sifatida berilishi mumkin. Bu yondashuv real sarfning ko‘payishini ishlab chiqarish hajmi ko‘payishi bilan adashtirmaslikka yordam beradi.

Taklif etilgan samaradorlikni oshirish usuli

Taklif etilgan usul olti ketma-ket blokdan iborat: 1) ma’lumotlarni yig‘ish; 2) tozalash va normalizatsiya; 3) EnPI/SEC hamda bazaviy modelni hisoblash; 4) chetlanish va yo‘qotish sabablarini aniqlash; 5) ko‘p mezonli optimallashtirish orqali chora-tadbirlarni tanlash; 6) natijani tekshirish va modelni yangilash. Ushbu sikl PDCA mantiqiga mos bo‘lib, energiya boshqaruvini bir martalik auditdan doimiy operatsion boshqaruvga o‘tkazadi (1, 13).



1-rasm. Energiya iste’molini tahlil qilish va samaradorlikni oshirish usulining funksional sxemasi

Yo‘qotishlarni tasniflashda to‘rtta guruh taklif etiladi: a) texnologik yo‘qotishlar — keragidan yuqori harorat, bosim, tezlik yoki sikl vaqti; b) tashkiliy yo‘qotishlar — rejadan tashqari bekor turish, noto‘g‘ri smena/yuklama taqsimoti; c) texnik yo‘qotishlar — motor, kompressor, nasos, pech yoki uzatmalardagi samaradorlik pasayishi; d) yordamchi tizim yo‘qotishlari — siqilgan havo sizib chiqishi, ventilyatsiya va sovitish tizimlarining ortiqcha ishlashi. Energiya auditi amaliyotida aynan motorlar, bug‘, siqilgan havo va issiqlik tizimlari yuqori tejamkorlik salohiyatiga ega yo‘nalishlar sifatida tez-tez uchraydi (9).

Ko‘p mezonli ustuvorlashtirish va optimallashtirish

Aniqlangan energiya tejash choralari faqat potensial kWh bo‘yicha emas, iqtisodiy va ishlab chiqarish cheklovlari bilan birga baholanadi. Ustuvorlik bali S quyidagi ko‘rinishda berildi:

$S = w1 \cdot Es + w2 \cdot Cs + w3 \cdot Fr + w4 \cdot Qr - w5 \cdot Rk,$

bu yerda Es — normalizatsiyalangan energiya tejash potensiali; Cs — xarajat/tejamkorlik jozibadorligi; Fr — amalga oshirish qulayligi; Qr — sifat va ishlab chiqarish barqarorligiga ijobiy ta’sir; Rk — texnologik risk; wi — tashkilot strategiyasiga ko‘ra beriladigan og‘irlik koeffitsientlari. Bunda xavfsizlik va mahsulot sifati majburiy cheklov bo‘lib qoladi. Energiya samarali rejalashtirish bo‘yicha adabiyotlar ishlab chiqarish jadvali, uskuna holati, ish tezligi va vaqt slotlarini optimallashtirish energiya sarfi hamda pik yuklamani kamaytirish imkonini berishini ko‘rsatadi (8).

Operatsion optimallashtirish masalasi soddalashtirilgan holda quyidagi maqsad funksiyasi orqali ifodalanadi:

$\min J = \alpha \cdot SEC + \beta \cdot Cenergy + \gamma \cdot Pmax + \lambda \cdot Eidle,$

cheklovlar: $Q \geq Qplan$; sifat ko‘rsatkichi $\geq Qmin$; $Tmin \leq T \leq Tmax$; $vmin \leq v \leq vmax$; texnologik va xavfsizlik shartlari bajarilishi. Ko‘p mezonli xarita va optimallashtirishni birlashtirish iqtisodiy jihatdan arzon variant bilan eng yaxshi energiya natijasi o‘rtasidagi muvozanatni topishga yordam beradi (14). Yangi tadqiqotlarda AI, mashinali o‘qitish, raqamli egizak va reinforcement learning monitoring, prognozlash, real vaqt boshqaruvi va parametrlarni optimallashtirish vazifalarida qo‘llanmoqda (15).

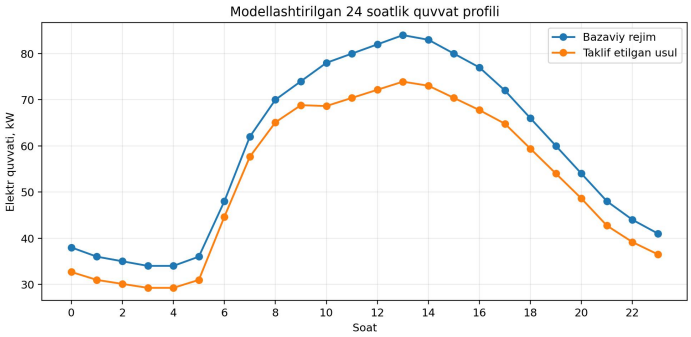
NATIJALAR

Taklif etilgan usulning hisoblash mantiqini ko‘rsatish uchun 24 soat davomida ishlaydigan shartli ishlab chiqarish uchastkasi modellashtirildi. Uchastkada 500 birlik mahsulot ishlab chiqariladi; energiya iste’moli texnologik uskunalar, motor-nasos guruhlari, siqilgan havo va yordamchi tizimlardan shakllanadi. Bazaviy holatda uskunalar bo‘sh yurish vaqtida to‘liq o‘chirilmaydi, pik davrda bir nechta yirik iste’molchi bir vaqtda ishlaydi va ayrim texnologik set-pointlar energiya nuqtai nazaridan optimallashtirilmagan. Taklif etilgan usul qo‘llanganda bo‘sh yurish boshqaruvi, yuklamani vaqt bo‘yicha qayta taqsimlash va texnologik parametrlarni ruxsat etilgan diapazonda energiya mezoni bo‘yicha sozlash ssenariylari ko‘rib chiqildi. Natijalar metodni namoyish etish uchun modellashtirilgan bo‘lib, real korxona eksperimentini ifodalamaydi.

2-jadval. Modellashtirilgan ssenariy bo‘yicha asosiy energiya ko‘rsatkichlari

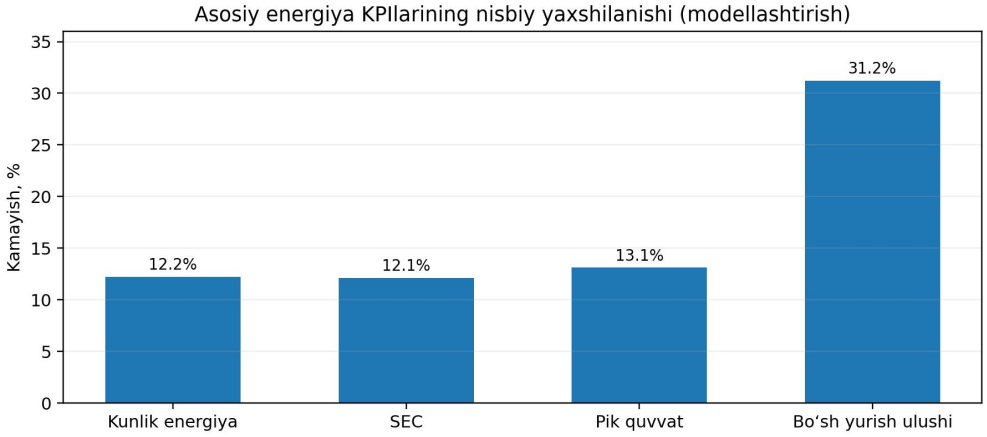
Ko‘rsatkich	Bazaviy holat	Taklif etilgan usul	O‘zgarish
Kunlik elektr energiyasi, kWh	1405	1234	−12,2%
SEC, kWh/birlik	2,81	2,47	−12,1%
Pik quvvat, kW	84	73	−13,1%
Bo‘sh yurish energiyasi ulushi, %	18,6	12,8	−5,8 p.p.
Yuklama koeffitsienti	0,68	0,74	+8,8%
Rejadan yuqori og‘ish hodisalari, ta	9	3	−66,7%

Hisoblash natijasida kunlik energiya sarfi 171 kWh ga qisqardi. Mahsulot hajmi o‘zgarmaganligi sababli umumiy energiya sarfidagi 12,2% kamayish SECda ham deyarli shunga teng 12,1% yaxshilanish sifatida namoyon bo‘ldi. Pik quvvatning 84 kW dan 73 kW gacha pasayishi quvvat talabini boshqarish imkonini beradi. Ayniqsa, bo‘sh yurish ulushining 18,6% dan 12,8% gacha kamayishi tashkiliy va operatsion choralarning investitsiyasiz yoki kichik investitsiya bilan sezilarli ta’sir ko‘rsatishi mumkinligini namoyish etdi.



2-rasm. Bazaviy va optimallashtirilgan rejimning 24 soatlik quvvat profili (modellashtirilgan ma’lumot)

2-rasmda energiya iste’molining qisqarishi kun davomida bir xil emasligi ko‘rinadi. Tungi davrda asosiy effekt bo‘sh yurish va standby iste’molini kamaytirish hisobiga yuz beradi. Ishlab chiqarishning yuqori yuklama oralig‘ida esa uskunalarni bir vaqtning o‘zida ishga tushirishni cheklash, yuklamani smena ichida taqsimlash va set-pointlarni optimallashtirish pikni pasaytiradi. Bu yondashuv faqat “kamroq ishlash” emas, balki bir xil ishlab chiqarish natijasini energiya nuqtai nazaridan qulayroq rejimda olishga qaratilgan.



3-rasm. Bazaviy va taklif etilgan usul bo‘yicha asosiy KPIlar taqqoslanishi

3-jadval. Energiya tejash choralari va ularni ustuvorlashtirish namunasi

Chora	Asosiy mexanizm	Kutiladigan ta’sir	Investitsiya darajasi	Ustuvorlik
Bo‘sh yurishni avtomatik boshqarish	Standby/o‘chirish algoritmi	Eidle kamayadi	Past	Yuqori
Siqilgan havo sizib chiqishini bartaraf etish	Yo‘qotishlarni kamaytirish	Kompressor yuklamasi kamayadi	Past	Yuqori
Motor/nasos tezligini rostlash	VFD va set-point optimallashtirish	Qisman yuklamada sarf kamayadi	O‘rta	Yuqori

Chora	Asosiy mexanizm	Kutiladigan ta’sir	Investitsiya darajasi	Ustuvorlik
Pik yuklamani qayta taqsimlash	Ish jadvalini optimallashtirish	Pmax va tarif xarajati pasayadi	Past–o‘rta	Yuqori
Yuqori samarali uskuna	Texnik modernizatsiya	Uzoq muddatli SEC yaxshilanishi	Yuqori	O‘rta
ML asosida prediktiv model	Prognoz va anomaliya aniqlash	Barqaror nazorat, erta ogohlantirish	O‘rta	O‘rta–yuqori

Natijalar shuni ko‘rsatadiki, samaradorlikni oshirish choralarini texnik kapital loyihalar bilan cheklab qo‘yish shart emas. Dastlabki bosqichda hisobga olishni to‘g‘ri tashkil etish, bo‘sh yurishlarni kamaytirish, sizib chiqish va noto‘g‘ri set-pointlarni bartaraf etish kabi operatsion choralar yuqori ustuvorlikka ega bo‘lishi mumkin. Keyingi bosqichda esa VFD, yuqori samarali motorlar, issiqlikni qayta tiklash yoki yangi texnologik uskunalar bo‘yicha investitsiya qarorlari bazaviy model va o‘lchangan tejash ma’lumotlariga tayanishi kerak. Energiya auditi bo‘yicha tadqiqotlar ham chora-tadbirlarni obyektning ishlab chiqarish darajasi, uskuna turi va iqtisodiy sharoitiga mos holda baholash zarurligini ko‘rsatadi (9).

MUHOKAMA

Taklif etilgan usulning asosiy afzalligi energiya sarfini hisoblagich ko‘rsatkichidan boshqaruv qarorigacha olib boruvchi uzluksiz zanjirni shakllantirishidir. An’anaviy amaliyotda oy yakunidagi jami kWh va energiya to‘lovi ko‘pincha asosiy indikator sifatida olinadi. Bunday yondashuv ishlab chiqarish hajmi o‘zgarganda noto‘g‘ri talqin qilinadi: ko‘proq mahsulot ishlab chiqarilgan oyda energiya ko‘payishi tabiiy bo‘lishi mumkin, biroq SEC yaxshilangan bo‘lishi ham mumkin. Bazaviy model va normalizatsiya bu muammoni kamaytiradi. ISO 50006:2023ning EnPI va EnB konsepsiyasi aynan shunday taqqoslanadigan asos yaratishga qaratilgan (2).

Ikkinchi muhim jihat — ishlab chiqarish va energiya ma’lumotlarini integratsiyalashdir. Energiyani faqat elektr tarmog‘i nuqtai nazaridan ko‘rish o‘rniga, uni mahsulot turi, buyurtma, operatsiya, smena va uskuna holati bilan bog‘lash energiya intensivligi sabablarini ochib beradi. Kapp va hammualliflarning 45 ta ishlab chiqarish obyektiga asoslangan tadqiqoti ham fizik tizim parametrlarini energiya modeliga kiritish prognozlashning tavsifiy qiymatini oshirishini ko‘rsatadi (11). Bermeo-Ayerbe va hammualliflar adaptiv ma’lumotga asoslangan modelni energiya samaradorligi va texnik xizmat vazifalarini birlashtirish uchun taklif qilgan (10).

Uchinchi jihat — optimallashtirishning ko‘p mezonliligi. Energiya sarfini minimal qilish har doim ham ishlab chiqarish uchun eng yaxshi qaror emas. Juda past tezlik throughputni kamaytirishi, haddan tashqari agressiv set-point o‘zgarishi sifatga ta’sir qilishi, maksimal o‘chirish esa uskuna ishga tushirish sikllarini ko‘paytirishi mumkin. Shu bois energiya, xarajat, pik yuklama, ishlab chiqarish hajmi, sifat va risk birgalikda ko‘rilishi zarur. Energiya samarali job-shop scheduling bo‘yicha 172 maqolani qamrab olgan sharhda ham uskuna holati, ish tezligi va vaqt slotlari energiya bilan birga optimallashtirilishi qayd etilgan (8). Miserocchi va hammualliflar energiya performance mapping va optimallashtirishni birlashtirish samarali qarorlar uchun muhim ekanini ko‘rsatadi (14).

To‘rtinchi jihat — ma’lumot sifati va modelning tushuntiriluvchanligi. AI va ML vositalari katta imkoniyatga ega bo‘lsa-da, noto‘g‘ri sensor, sinxronlashmagan vaqt qatorlari, mahsulot miksining keskin o‘zgarishi yoki kam kuzatuvlar modelni chalg‘itadi. Narciso va Martins sanoatda MLning energiya prognozi, tahlili va optimallashtirishda qo‘llanilishini umumlashtirgan, biroq turli tarmoqlar bo‘yicha empirik bazaning notekisligini qayd etgan (6).

Hu va Man esa sanoat energiya prognozlarida ma’lumot noaniqligi va umumlashtirish muammolariga e’tibor qaratgan (12). Shu sababli taklif etilayotgan usulda dastlab sodda, tushuntiriladigan bazaviy modeldan boshlash, keyin ma’lumot yetarli bo‘lganda murakkab ML modellariga o‘tish tavsiya etiladi.

Beshinchi jihat — boshqaruv mexanizmining barqarorligi. Energiya tejash bir martalik loyiha sifatida amalga oshirilganda dastlabki natija keyinchalik yo‘qolib ketishi mumkin. ISO 50001ga mos sikl esa maqsad, mas’uliyat, o‘lchash, tekshirish va qayta ko‘rib chiqishni boshqaruv tizimiga singdiradi (1). Fitzgerald va hammualliflar tahlil qilgan ISO 50001 obyektlarida yillik energiya samaradorligi yaxshilanishlari uzoq muddat davom etgani mazkur tizimli yondashuvning ahamiyatini ko‘rsatadi (13). Shuningdek, IEAning 2024-yilgi tahlili energiya samaradorligini oshirish sur’atlarini tezlashtirish uchun siyosat bilan birga amaliy investitsiya va boshqaruv vositalarini kengaytirish zarurligini qayd etadi (3).

Taklif etilgan metodning cheklovlari ham mavjud. Birinchidan, maqoladagi raqamli natijalar modellashtirilgan ssenariyga tegishli va real korxonadagi tejash miqdorini bevosita bashorat qilmaydi. Ikkinchidan, usulning samarasi submetering darajasi, sensorlarning ishonchliligi va ishlab chiqarish ma’lumotlarining to‘liqligiga bog‘liq. Uchinchidan, energiya bazaviy modeli mavsumiylik, mahsulot miksi va texnologik modernizatsiya sababli vaqt o‘tishi bilan qayta kalibrlanishi kerak. To‘rtinchidan, optimal tavsiyalar mutaxassisning texnologik ekspertizasi va xavfsizlik talablarini almashtirmaydi. Kelgusi tadqiqotlarda usulni real sanoat korxonasining 3–12 oylik ma’lumotlari bilan validatsiya qilish, regressiya modelini gradient boosting/LSTM/transformer modellar bilan taqqoslash va raqamli egizak muhitida real vaqt optimallashtirishni sinash maqsadga muvofiq.

XULOSA

Maqolada ishlab chiqarish jarayonlarida energiya iste’molini tahlil qilish va samaradorlikni oshirish uchun integrallashgan usul ishlab chiqildi. Usul energiya ma’lumotlarini yig‘ish, tozalash va normalizatsiya qilish, SEC va boshqa EnPIlarni hisoblash, bazaviy energiya modelini shakllantirish, ortiqcha sarf va yo‘qotish sabablarini aniqlash, chora-tadbirlarni ko‘p mezonli baholash hamda natijani qayta tekshirish bosqichlarini yagona siklga birlashtiradi.

Usulning ilmiy-amaliy jihati shundaki, energiya sarfi ishlab chiqarish hajmi va texnologik rejimlardan ajratib emas, ular bilan bog‘langan holda baholanadi. Bazaviy modelning qo‘llanishi “ko‘p ishlab chiqarilganligi uchun ko‘p sarflandi” holati bilan “samarasizlik sababli ortiqcha sarflandi” holatini ajratish imkonini beradi. Ko‘p mezonli ustuvorlashtirish esa kWh tejamkorligi bilan birga xarajat, texnologik xavf, sifat va amalga oshirish qulayligini hisobga oladi.

Modellashtirilgan ssenariyda kunlik elektr energiyasi sarfining 12,2%, SECning 12,1% va pik quvvatning 13,1% ga pasayishi usulning nazariy ishlash mantiqini ko‘rsatdi. Ushbu qiymatlar real ishlab chiqarish tajribasi sifatida emas, metodning hisoblash imkoniyatini namoyish qiluvchi illustrativ natija sifatida talqin qilinishi lozim. Real korxona sharoitida tejash darajasi uskuna tarkibi, texnologiya, ishlab chiqarish rejasi va boshlang‘ich energiya intizomiga bog‘liq bo‘ladi.

Taklif etilgan yondashuvni SCADA/MES/IIoT tizimlari bilan integratsiya qilish, ISO 50001 va ISO 50006 talablari asosida EnPI va bazaviy chiziqlarni yuritish hamda kelgusida AI/raqamli egizak modullari bilan boyitish mumkin. Shu yo‘l bilan energiya menejmenti periodik hisobotdan real vaqtga yaqin, uzluksiz va qaror qabul qilishga yo‘naltirilgan boshqaruv tizimiga aylantiriladi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. International Organization for Standardization. (2018). ISO 50001:2018. Energy management systems — Requirements with guidance for use. Geneva: ISO.
2. International Organization for Standardization. (2023). ISO 50006:2023. Energy management systems — Evaluating energy performance using energy performance indicators and energy baselines. Geneva: ISO.
3. International Energy Agency. (2024). Energy Efficiency 2024. Paris: IEA.
4. May, G., Stahl, B., Taisch, M., & Kiritsis, D. (2017). Energy management in manufacturing: From literature review to a conceptual framework. Journal of Cleaner Production, 167, 1464–1489. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.191
5. Menghi, R., Papetti, A., Germani, M., & Marconi, M. (2019). Energy efficiency of manufacturing systems: A review of energy assessment methods and tools. Journal of Cleaner Production, 240, 118276. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118276
6. Narciso, D. A. C., & Martins, F. G. (2020). Application of machine learning tools for energy efficiency in industry: A review. Energy Reports, 6, 1181–1199. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.04.035
7. Cai, W., Wang, L., Li, L., Xie, J., Jia, S., Zhang, X., Jiang, Z., & Lai, K.-H. (2022). A review on methods of energy performance improvement towards sustainable manufacturing from perspectives of energy monitoring, evaluation, optimization and benchmarking. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 159, 112227. https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112227
8. Fernandes, J. M. R. C., Homayouni, S. M., & Fontes, D. B. M. M. (2022). Energy-Efficient Scheduling in Job Shop Manufacturing Systems: A Literature Review. Sustainability, 14(10), 6264. https://doi.org/10.3390/su14106264
9. Patterson, M., Singh, P., & Cho, H. (2022). The current state of the industrial energy assessment and its impacts on the manufacturing industry. Energy Reports, 8, 7297–7311. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.05.242
10. Bermeo-Ayerbe, M. A., Ocampo-Martinez, C., & Diaz-Rozo, J. (2022). Data-driven energy prediction modeling for both energy efficiency and maintenance in smart manufacturing systems. Energy, 238, 121691. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121691
11. Kapp, S., Choi, J.-K., & Hong, T. (2023). Predicting industrial building energy consumption with statistical and machine-learning models informed by physical system parameters. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 172, 113045. https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.113045
12. Hu, Y., & Man, Y. (2023). Energy consumption and carbon emissions forecasting for industrial processes: Status, challenges and perspectives. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 182, 113405. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113405
13. Fitzgerald, P., Therkelsen, P. L., Sheaffer, P., & Rao, P. (2023). Deeper and persistent energy savings and carbon dioxide reductions achieved through ISO 50001 in the manufacturing sector. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 57, 103280. https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103280
14. Miserocchi, L., Franco, A., & Testi, D. (2023). An integrated framework for energy performance improvement in manufacturing: From mapping to optimization. Journal of Cleaner Production, 411, 137387. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137387