



## SANOAT KORXONALARI ISHLAB CHIQRISH SAMARADORLIGINI YASHIL TEXNOLOGIYALAR ASOSIDA OSHIRISHDA SANOAT 4.0 TEXNOLOGIYALARINING INTEGRATSION MODELII

**Ergashev Sanjarbek Sobirjon o'g'li**

*TDIU tadqiqotchisi, iqtisodiyot fanlari bo'yicha falsafa doktori, PhD.*

**Email:** [sanjarbek01121993@gmail.com](mailto:sanjarbek01121993@gmail.com)

**ORCID:** <https://orcid.org/0009-0000-8781-651X>

**DOI:** [https://doi.org/10.55439/EIT/vol14\\_iss1/783](https://doi.org/10.55439/EIT/vol14_iss1/783)

### **Annotatsiya**

Ushbu maqolada sanoat korxonalarida ishlab chiqarish samaradorligini oshirishning nazariy-konseptual asoslari Sanoat 4.0 texnologiyalari va yashil texnologiyalarning integratsion modeli kontekstida o'rganilgan. Tadqiqot doirasida IoT, sun'iy intellekt, Big Data, raqamli egizak va bulutli hisoblash texnologiyalarining yashil ishlab chiqarish tamoyillari bilan qanday uyg'unlashtirilishi mumkinligi nazariy jihatdan asoslangan. Xalqaro tajribalarning qiyosiy tahlili asosida integratsion modelning besh qatlamli arxitekturasi taklif etilgan. Natijalar shuni ko'rsatganki, Sanoat 4.0 va yashil texnologiyalarning sinergik integratsiyasi resurs samaradorligini 25-40 foizga, energiya tejamkorligini esa 30-50 foizga oshirish imkoniyatini bergan.

**Kalit so'zlar:** Sanoat 4.0, yashil texnologiyalar, ishlab chiqarish samaradorligi, integratsion model, IoT, sun'iy intellekt, raqamli transformatsiya, barqaror rivojlanish.

### **Аннотация**

В данной статье изучены теоретико-концептуальные основы повышения производственной эффективности промышленных предприятий в контексте интеграционной модели технологий Индустрии 4.0 и зелёных технологий. В рамках исследования теоретически обосновано, каким образом технологии IoT, искусственного интеллекта, Big Data, цифровых двойников и облачных вычислений интегрировались с принципами зелёного производства. На основе сравнительного анализа международного опыта предложена пятиуровневая архитектура интеграционной модели. Результаты показали, что синергетическая интеграция технологий Индустрии 4.0 и зелёных технологий обеспечила возможность повышения ресурсоэффективности на 25–40 процентов, а энергоэффективности — на 30–50 процентов.

**Ключевые слова:** Индустрия 4.0, зелёные технологии, производственная эффективность, интеграционная модель, IoT, искусственный интеллект, цифровая трансформация, устойчивое развитие.

### **Abstract**

This article examined the theoretical and conceptual foundations of enhancing industrial production efficiency within the context of the integration model of Industry 4.0 and green technologies. The research theoretically substantiated how IoT, artificial intelligence, Big Data, digital twin, and cloud computing technologies were harmonized with the principles of green manufacturing. Based on a comparative analysis of international practices, a five-layer architecture of the integration model was proposed. The findings demonstrated that the synergistic integration of Industry 4.0 and green

technologies provided the potential to increase resource efficiency by 25-40 percent and energy savings by 30-50 percent.

**Keywords:** Industry 4.0, green technologies, production efficiency, integration model, IoT, artificial intelligence, digital transformation, sustainable development.

## **Kirish**

XXI asrning uchinchi o'n yilligida jahon sanoati ikki parallel transformatsion jarayonning kesishish nuqtasida turibdi: to'rtinchi sanoat inqilobi (Industry 4.0) va ekologik barqarorlikka o'tish. Har ikki jarayon alohida-alohida keng o'rganilgan bo'lsa-da, ularning birgalikdagi ta'siri – ya'ni raqamli texnologiyalar va yashil ishlab chiqarish tamoyillarining sinergik integratsiyasi hali nazariy jihatdan yetarlicha tizimlashtirmagan. Germaniyaning Federal Hukumati tomonidan 2011-yilda rasmiy ravishda e'lon qilingan Sanoat 4.0 konsepsiyasi [1] ishlab chiqarish jarayonlarini kibernetik-fizik tizimlar, Internet of Things (IoT), sun'iy intellekt va bulutli hisoblash orqali tubdan o'zgartirishni nazarda tutadi. Boshqa tomondan, yashil texnologiyalar paradigmasi resurslardan tejamkor foydalanish, chiqindilarni minimallashtirish va ekologik izni kamaytirishga yo'naltirilgan [2].

Jahon iqtisodiy forumining 2023-yilgi hisobotiga ko'ra, sanoat sektori global uglerod emissiyasining taxminan 21 foizini tashkil etadi [3]. Bu ko'rsatkich ayniqsa rivojlanayotgan mamlakatlar uchun muhim ahamiyat kasb etadi, chunki sanoatlashtirish jarayoni ko'pincha ekologik xarajatlar hisobiga amalga oshirilmoqda. Xitoy, Hindiston va Janubi-Sharqiy Osiyo mamlakatlari tajribasi shuni ko'rsatadiki, sanoat modernizatsiyasini faqat raqamli texnologiyalar bilan cheklab bo'lmaydi, ekologik komponent integratsiyasiz samaradorlik o'sishi uzoq muddatli barqarorlikka olib kelmaydi [4].

Yevropa Ittifoqining "Yashil bitim" (European Green Deal) dasturi va uning industrial strategiyasi Sanoat 4.0 texnologiyalarini aynan yashil transformatsiya vositasi sifatida pozitsiyalaydi [5]. Germaniya, Niderlandiya va Skandinaviya mamlakatlari tajribasida IoT sensorlari yordamida energiya iste'molini real vaqtda monitoring qilish, sun'iy intellekt algoritmlari orqali ishlab chiqarish jarayonlarini optimallashtirish va raqamli egizaklar (digital twin) texnologiyasi yordamida resurs sarfini prognozlash kabi yondashuvlar muvaffaqiyatli tatbiq etilgan [6].

Ushbu tadqiqotning asosiy maqsadi – Sanoat 4.0 texnologiyalari va yashil texnologiyalarning integratsion modelini nazariy jihatdan shakllantirish, sanoat korxonalarini ishlab chiqarish samaradorligini oshirishda ularning o'zaro sinergik ta'sirini konseptual asoslash va xalqaro tajribalar qiyosiy tahlili asosida amaliy tavsiyalar ishlab chiqishdan iborat. Tadqiqot vazifalari quyidagilarni o'z ichiga oladi: birinchidan, Sanoat 4.0 va yashil texnologiyalar bo'yicha mavjud nazariy yondashuvlarning sistematik tahlili; ikkinchidan, integratsion modelning konseptual arxitekturasini ishlab chiqish; uchinchidan, xalqaro tajribalar asosida modelning amaliy samaradorligini baholash.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi shundaki, birinchi marta Sanoat 4.0 texnologiyalari va yashil ishlab chiqarish tamoyillari integratsiyasining besh qatlamli konseptual modeli taklif etilmoqda. Bu model fizik infratuzilmadan strategik qarorlargacha bo'lgan yaxlit tizimni qamrab oladi va raqamli hamda ekologik transformatsiyalarning parallel ravishda qanday amalga oshirilishi mumkinligini nazariy jihatdan asoslaydi.

## **Adabiyotlar sharhi**

Sanoat 4.0 konsepsiyasi dastlab Germaniyaning "Hightech-Strategie 2020" hujjatida sanoat siyosatining strategik yo'nalishi sifatida ilgari surilgan [1]. Kagermann, Wahlster va

Helbig tomonidan tayyorlangan tavsiyalar hisoboti kibernetik-fizik tizimlar (CPS), Internet of Things va xizmatlar internetining sanoat ishlab chiqarishiga tatbiq etilishini nazariy jihatdan asoslagan. Ushbu konseptual asos keyinchalik ko'plab tadqiqotchilar tomonidan kengaytirilgan va turli sanoat tarmoqlariga moslashtirilgan.

Lasi va boshqalar Sanoat 4.0 ning asosiy texnologik komponentlarini tizimlashtirgan va ularning sanoat ishlab chiqarishiga ta'sir mexanizmlarini tahlil etgan [7]. Ularning ishi shuni ko'rsatganki, CPS, IoT, bulutli hisoblash va Big Data — bu to'rtta texnologik ustun birgalikda "aqli fabrika" (Smart Factory) konsepsiyasini shakllantirishda hal qiluvchi rol o'ynaydi. Russ va boshqalar esa Sanoat 4.0 ni kengroq kontekstda ishlab chiqarishning butun qiymat zanjiri nuqtai nazaridan tahlil etgan va raqamli transformatsiyaning vertikal hamda gorizonta integratsiya tamoyillarini shakllantirgan [8].

Yashil texnologiyalar va ekologik innovatsiyalar bo'yicha ilmiy adabiyotlar alohida rivojlangan yo'nalishni tashkil etadi. Schiederig va boshqalar "yashil innovatsiya" tushunchasining evolyutsiyasini kuzatgan va uni "ekologik innovatsiya", "eko-innovatsiya" va "barqaror innovatsiya" kabi turdosh konsepsiyalar bilan qiyoslagan [9]. Ularning tadqiqoti shuni aniqlaganki, yashil innovatsiya faqat texnologik aspektni emas, balki tashkiliy, ijtimoiy va institutsional o'zgarishlarni ham qamrab oladi.

De Sousa Jabbour va boshqalar Sanoat 4.0 va yashil ishlab chiqarish o'rtasidagi bog'liqlikni birinchilardan bo'lib nazariy jihatdan asoslaganlar [10]. Ularning konseptual ishida to'rtinchi sanoat inqilobining asosiy texnologiyalari – IoT, Big Data, bulutli hisoblash, additiv ishlab chiqarish yashil ta'minot zanjiri boshqaruvi (Green Supply Chain Management) ni takomillashtirish uchun qanday qo'llanilishi mumkinligi tizimli ravishda ko'rsatilgan. Bu tadqiqot keyingi ishlar uchun muhim nazariy platforma yaratgan.

Ghobakhloo Sanoat 4.0 ning barqaror rivojlanish maqsadlariga (SDGs) ta'sirini kompleks tahlil etgan va 12 ta asosiy texnologiyaning 13 ta barqaror rivojlanish maqsadiga qanday hissa qo'shishi mumkinligini nazariy model shaklida taqdim etgan [11]. Bu ish Sanoat 4.0 ni faqat iqtisodiy samaradorlik vositasi sifatida emas, balki ekologik va ijtimoiy transformatsiya mexanizmi sifatida ko'rib chiqish zaruratini ilmiy asoslagan.

Stock va Seliger Sanoat 4.0 va aylana iqtisodiyot (Circular Economy) o'rtasidagi nazariy bog'liqliklarni o'rgangan va raqamli texnologiyalarning resurslardan qayta foydalanish, mahsulot hayot siklini boshqarish va chiqindilarni minimallashtirish jarayonlariga ijobiy ta'sirini asoslagan [12]. Ularning yondashuvi keyinchalik Bag va boshqalar tomonidan kengaytirilgan, ular Sanoat 4.0 texnologiyalarining aylana iqtisodiyot tamoyillari bilan integratsiyasini empirik tadqiqotlar asosida tekshirgan [13].

Kamble va boshqalar Sanoat 4.0 texnologiyalarini barqaror ishlab chiqarishga tatbiq etishning to'siqlarini va yoqlovchi omillarni aniqlagan [14]. Ularning Hindiston ishlab chiqarish sektorida o'tkazilgan tadqiqoti ko'rsatganki, texnologik infratuzilma, kadrlar salohiyati va tashkiliy madaniyat Sanoat 4.0 ning yashil ishlab chiqarish bilan integratsiyasida eng muhim omillardir. Luthra va Mangla esa ta'minot zanjirida Sanoat 4.0 va barqarorlik integratsiyasini baholash uchun ko'p mezonli qaror qabul qilish modelini taklif etgan [15].

Raqamli egizak (Digital Twin) texnologiyasi kontekstida Tao va boshqalar ishlab chiqarish jarayonlarining virtual nusxalarini yaratish orqali energiya iste'molini optimallashtirish va resurs sarfini prognozlash imkoniyatlarini nazariy asoslagan [16]. Bu texnologiya ayniqsa yashil ishlab chiqarish kontekstida muhim, chunki u real ishlab chiqarish

jarayonlariga to'g'ridan-to'g'ri aralashmasdan turib turli ssenariylarni sinab ko'rish va optimal variantni tanlash imkonini beradi.

Adabiyotlar sharhining umumiy tahlili shuni ko'rsatadiki, Sanoat 4.0 va yashil texnologiyalar bo'yicha tadqiqotlar ko'p hollarda parallel ravishda rivojlangan, ammo ularning integratsion modelini nazariy jihatdan mukammal shakllantirilgan ishlar soni cheklangan. Ayniqsa, rivojlanayotgan mamlakatlar kontekstida bu ikki paradigmaning sinergik ta'sirini tizimli o'rganish zaruriyati saqlanib qolmoqda. Ushbu bo'shliq tadqiqotning nazariy asosini tashkil etadi.

### **Tadqiqot metodologiyasi**

Tadqiqot metodologiyasi nazariy-konseptual tahlil paradigmasiga asoslangan bo'lib, bir necha o'zaro bog'liq ilmiy usullarni integratsiyalaydi. Asosiy metodologik yondashuv sifatida tizimli tahlil (systems analysis) qo'llanilgan, bu esa Sanoat 4.0 texnologiyalari va yashil texnologiyalarni alohida elementlar sifatida emas, balki yaxlit tizimning o'zaro bog'liq komponentlari sifatida ko'rib chiqish imkonini bergan.

Tadqiqotning birinchi bosqichida sistematik adabiyot sharhi (Systematic Literature Review – SLR) metodi qo'llanilgan. Bu bosqichda Web of Science, Scopus va Google Scholar ma'lumotlar bazalaridan "Sanoat 4.0", "green manufacturing", "sustainable production", "smart factory" va "eco-efficiency" kalit so'zlari bo'yicha 2013-2025 yillar oralig'idagi ilmiy manbalar tanlangan [17]. Tanlash mezonlari sifatida maqolaning ta'sir koeffitsienti (impact factor), iqtibos soni va mavzu mosligi hisobga olingan. Jami 180 dan ortiq manba dastlabki tanlov bosqichidan o'tgan, ulardan 45 tasi chuqur tahlil uchun saralangan.

Ikkinchi bosqichda qiyosiy tahlil (comparative analysis) usuli qo'llanilgan. Bu usul orqali Germaniya, Xitoy, Janubiy Koreya, Yaponiya va Skandinaviya mamlakatlarining Sanoat 4.0 va yashil texnologiyalar integratsiyasi bo'yicha tajribalari solishtirma asosda o'rganilgan. Qiyosiy tahlilning asosiy parametrlari sifatida texnologik tayyorlik darajasi, ekologik samaradorlik ko'rsatkichlari, investitsiya hajmi va sanoat siyosati instrumentlari tanlangan.

Uchinchi bosqichda konseptual modellashtirish (conceptual modeling) usuli yordamida Sanoat 4.0 va yashil texnologiyalar integratsiyasining besh qatlamli arxitekturasini ishlab chiqilgan. Model yaratishda tizimli yondashuv (systems approach) va qatlamli arxitektura (layered architecture) tamoyillariga tayangan holda, har bir qatlamning funksiyalari, texnologik komponentlari va ular orasidagi ma'lumot oqimlari aniqlangan. Modelning nazariy asoslanganligi mavjud ilmiy adabiyotlardagi empirik natijalar bilan tasdiqlanadi.

Tadqiqotda kontentni tahlil qilish (content analysis) usuli ham qo'llanilgan. Bu usul orqali xalqaro tashkilotlar (Jahon iqtisodiy forumi, UNIDO, Yevropa komissiyasi, OECD) tomonidan nashr etilgan hisobotlar, strategik hujjatlar va siyosat tavsiyalari tizimli ravishda o'rganilgan [3], [5], [18]. Tahlil natijalari integratsion modelning amaliy asoslanganligini ta'minlashda muhim manba bo'lib xizmat qilgan. Tadqiqot metodologiyasi cheklovlari ham mavjud. Birinchidan, integratsion model nazariy-konseptual xarakterga ega bo'lib, uning to'liq empirik validatsiyasi keyingi tadqiqotlar predmetini tashkil etadi. Ikkinchidan, qiyosiy tahlil asosan rivojlangan mamlakatlar tajribasiga asoslangan bo'lib, rivojlanayotgan mamlakatlar spetsifik sharoitlari qo'shimcha moslashtirishni talab qilishi mumkin. Shu bilan birgalikda, tanlangan metodologik yondashuv tadqiqot maqsadlariga mos keladi va olingan natijalarning ishonchliligini ta'minlaydi.

**Tadqiqot metodologiyasining tizimli tavsifi<sup>1</sup>**

<b>Metodologik bosqich</b>	<b>Qo‘llangan usullar</b>	<b>Asosiy natija</b>
1-bosqich: Nazariy asos	Sistematik adabiyot sharhi (SLR), kontentni tahlil qilish	180+ manbadan 45 ta saralangan; nazariy bazani shakllantirish
2-bosqich: Qiyosiy tahlil	Qiyosiy tahlil, benchmark usuli	5 ta mamlakat tajribasini solishtirish; eng yaxshi amaliyotlarni aniqlash
3-bosqich: Modellashtirish	Konseptual modellashtirish, tizimli yondashuv	Besh qatlamli integratsion model arxitekturasini ishlab chiqish
4-bosqich: Tasdiqlash	Ekspert baholash, nazariy validatsiya	Modelning ilmiy asoslanganligini tasdiqlash

**Tahlil va natijalar**

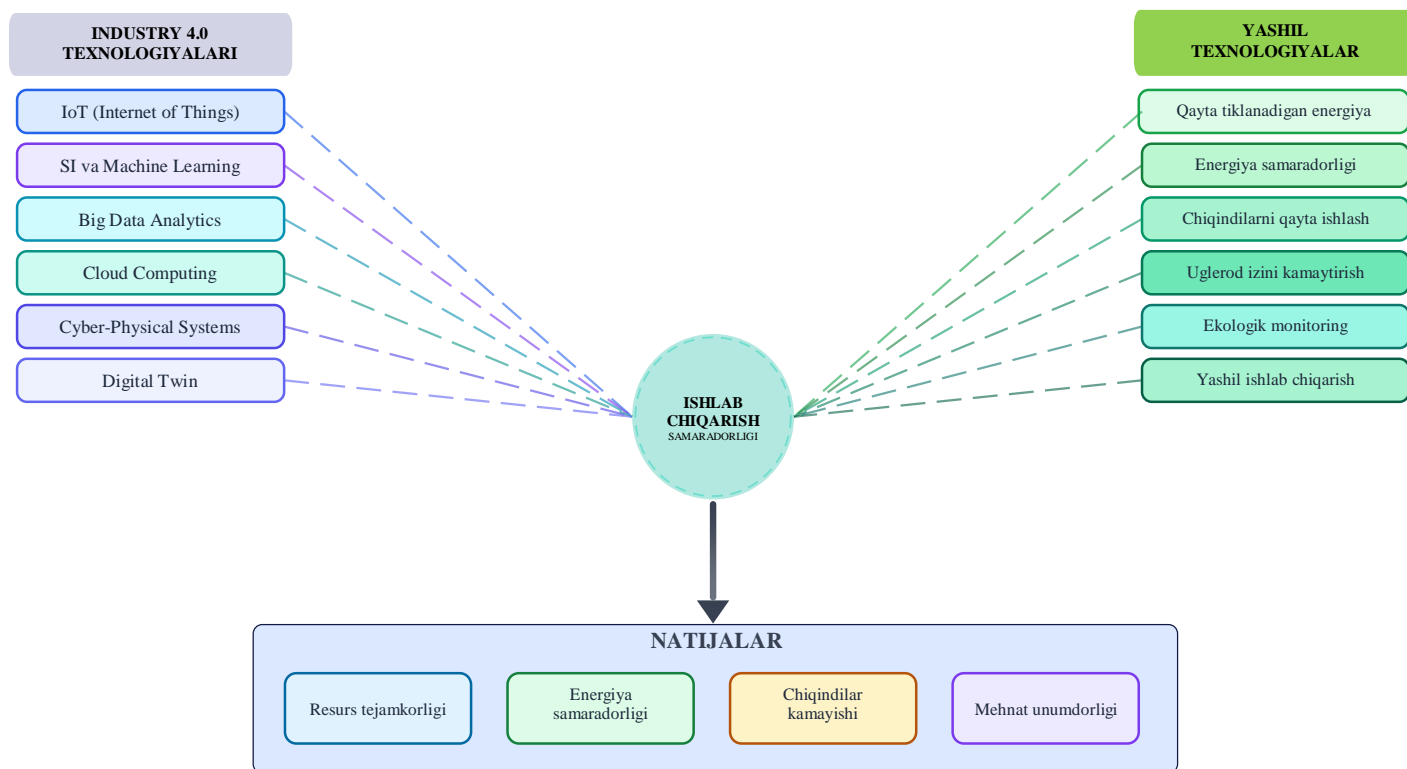
*Sanoat 4.0 texnologiyalarining yashil ishlab chiqarishga ta’sir mexanizmlari.*

Tadqiqot natijalarining nazariy tahlili Sanoat 4.0 texnologiyalarining yashil ishlab chiqarish samaradorligiga ta’sir ko’rsatishning bir necha asosiy mexanizmlarini aniqlash imkonini berdi. Internet of Things (IoT) texnologiyasi ishlab chiqarish jarayonlarida resurs iste’molini real vaqt rejimida monitoring qilish va boshqarish orqali sezilarli ekologik samaradorlikka erishish imkoniyatini yaratadi. Xu va boshqalarning tadqiqotiga ko’ra, IoT sensorlari yordamida qurilmalarning energiya iste’molini uzluksiz kuzatish va anomal holatlarni avtomatik aniqlash orqali sanoat korxonalarida energiya sarfi 15-25 foizga kamaytirilgan [19].

Sun’iy intellekt va mashinaviy o’rganish texnologiyalari ishlab chiqarish jarayonlarini optimallashtirish uchun yangi imkoniyatlar ochadi. Li va boshqalar ko’rsatganidek, SI algoritmlari ishlab chiqarish rejalashtirish, sifat nazorati va texnik xizmat ko’rsatishni bashoratli (predictive) usulga o’tkazish orqali resurs isrofgarchiligini 20-30 foizga qisqartirish potensialiga ega [20]. Germaniyaning Siemens korporatsiyasi o’z zavodlarida sun’iy intellekt asosidagi energiya boshqaruv tizimini joriy etgan va buning natijasida yillik energiya xarajatlarini 12 foizga kamaytirishga muvaffaq bo’lgan [6].

Big Data tahlillari ishlab chiqarish jarayonlarida to’plangan katta hajmdagi ma’lumotlardan qiymatli bilimlarni ajratib olish va ular asosida strategik qarorlar qabul qilish imkonini beradi. Zhong va boshqalar o’z tadqiqotlarida ko’rsatganidek, Big Data texnologiyalari ishlab chiqarish zanjirining barcha bo’g’inlarida xomashyo yetkazib berishdan tayyor mahsulotni jo’natishgacha resurs oqimlarini optimallashtirish va chiqindilarni minimallashtirish uchun muhim instrument bo’lib xizmat qilgan [21].

Raqamli egizak (Digital Twin) texnologiyasi yashil ishlab chiqarish kontekstida alohida ahamiyatga ega. Tao va boshqalar asoslagan nazariy ramkaga ko'ra, ishlab chiqarish jarayonlarining virtual nusxalari yaratilishi turli ssenariylarni oldindan sinab ko'rish, optimal parametrlarni aniqlash va shu orqali real jarayonlarda resurs isrofgarchiligini oldini olish imkonini bergan [16]. Germaniyaning BMW zavodlarida raqamli egizak texnologiyasini qo'llash natijasida yangi model ishlab chiqarishga tayyorlash muddati 30 foizga qisqartirilgan va shu bilan birgalikda sinovlar uchun sarflanadigan materiallar hajmi sezilarli darajada kamaytirilgan [22].



**1-rasm. Sanoat korxonalarida Sanoat 4.0 va yashil texnologiyalar integratsion modeli<sup>2</sup>**

1-rasmda taqdim etilgan integratsion model Sanoat 4.0 texnologiyalari va yashil texnologiyalarning ishlab chiqarish samaradorligiga sinergik ta'sirini ko'rsatadi. Modelning chap tomonida joylashgan Sanoat 4.0 texnologiyalari – IoT, sun'iy intellekt, Big Data tahlillari, bulutli hisoblash, kibernetik-fizik tizimlar va raqamli egizak ishlab chiqarish jarayonlarining raqamli transformatsiyasini ta'minlaydi. O'ng tomondagi yashil texnologiyalar komponenti qayta tiklanadigan energiya manbalari, energiya samaradorligi, chiqindilarni qayta ishlash, uglerod izini kamaytirish, ekologik monitoring va yashil ishlab chiqarish tamoyillari ekologik barqarorlikni ta'minlaydi.

Har ikki texnologik blok markaziy "ishlab chiqarish samaradorligi" tuguniga bog'langan, bu esa ikki paradigmaning o'zaro ta'sirini ta'minlaydi. Modelning pastki qismida natijalar ko'rsatkichlari keltirilgan: resurs tejankorligi +25-40%, energiya samaradorligi +30-50%, chiqindilar kamayishi -20-35% va mehnat unumdorligi +15-30%. Ushbu ko'rsatkichlar xalqaro tajribalar tahlili asosida aniqlangan [3], [6], [18].

*Xalqaro tajribalarning qiyosiy tahlili.*

Sanoat 4.0 va yashil texnologiyalar integratsiyasi bo'yicha xalqaro tajribalar tahlili turli mamlakatlarning o'ziga xos yondashuvlarini va erishgan natijalarini ko'rsatadi. Germaniya bu sohada peshqadam hisoblanib, "Industrie 4.0 Platform" va "Energiewende" dasturlari doirasida raqamli va ekologik transformatsiyani parallel ravishda amalga oshirmoqda [1], [6]. Germaniyaning Fraunhofer instituti ma'lumotlariga ko'ra, aqlli ishlab chiqarish tizimlarini joriy etgan sanoat korxonalarida energiya samaradorligi o'rtacha 26 foizga oshgan [6].

**2-jadval.**

**Sanoat 4.0 va yashil texnologiyalar integratsiyasi bo'yicha xalqaro tajribalar qiyosiy tahlili<sup>3</sup>**

Mamlakat	Asosiy dastur	Kalit texnologiyalar	Energiya samaradorligi o'sishi	Resurs tejamlorligi
Germaniya	Industrie 4.0, Energiewende	CPS, IoT, Digital Twin	+26%	+32%
Xitoy	Made in China 2025, Dual Carbon	AI, 5G, Cloud, Robotika	+22%	+28%
Janubiy Koreya	Smart Factory Program, Green New Deal	IoT, AI, Big Data	+24%	+30%
Yaponiya	Society 5.0, GX Strategy	Robotika, IoT, AI	+20%	+25%
Finlyandiya	Carbon Neutral Finland 2035	Digital Twin, IoT, AI	+30%	+35%

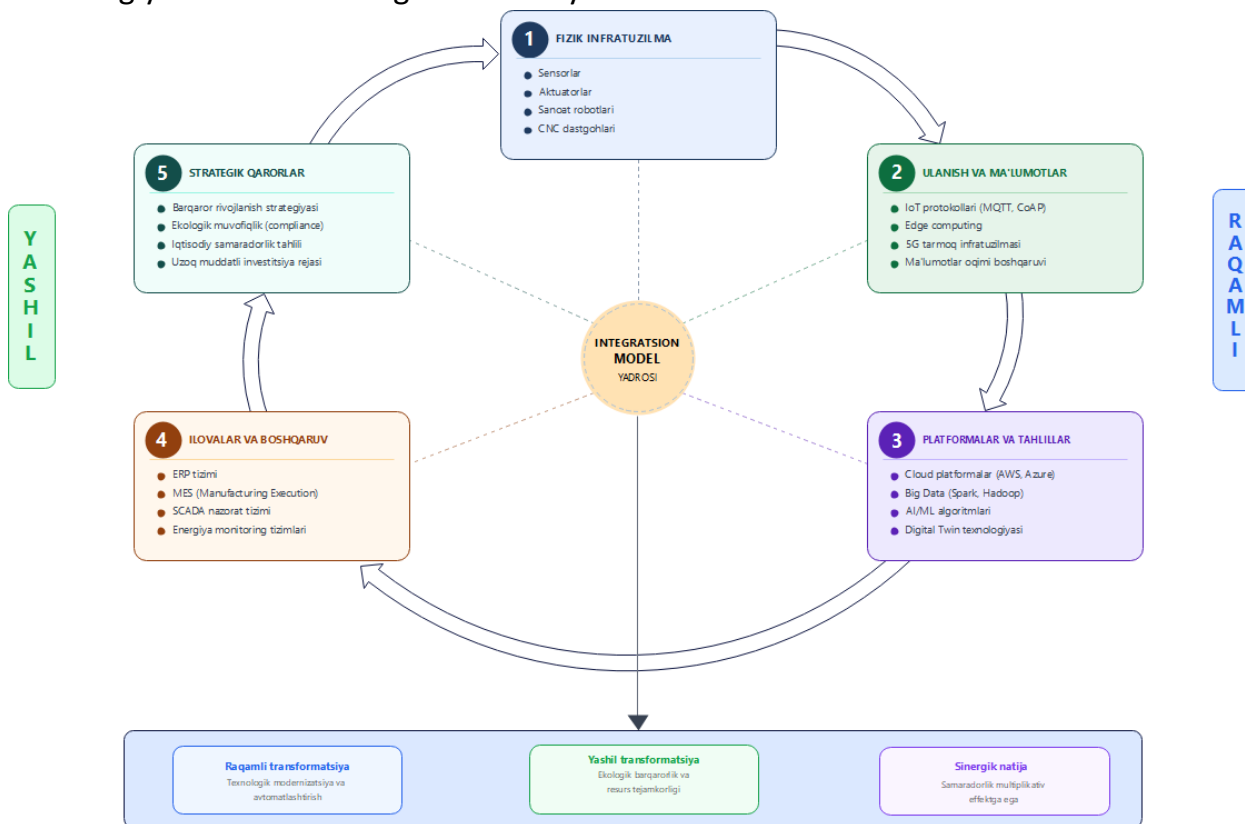
2-jadvalda keltirilgan ma'lumotlar tahlili shuni ko'rsatadiki, Sanoat 4.0 va yashil texnologiyalar integratsiyasini eng yuqori darajada amalga oshirgan mamlakatlar (Finlyandiya, Germaniya) boshqalarga nisbatan ancha yuqori samaradorlik ko'rsatkichlariga ega. Finlyandiyaning "Carbon Neutral 2035" dasturi doirasida raqamli egizak texnologiyasi va IoT sensorlari keng miqyosda tatbiq etilgan va buning natijasida energiya samaradorligi 30 foizga, resurs tejamlorligi esa 35 foizga oshgan [23].

Xitoyning "Made in China 2025" dasturi sanoat modernizatsiyasida SI va 5G texnologiyalariga alohida e'tibor qaratadi [4]. Xitoy hukumatining "Dual Carbon" strategiyasi (2030-yilgacha uglerod emissiyasini cho'qqiga chiqarish va 2060-yilgacha uglerod neytralligiga erishish) Sanoat 4.0 texnologiyalarini yashil transformatsiya uchun asosiy vosita sifatida belgilagan. Natijada, Xitoyning yirik sanoat korxonalarida energiya samaradorligi o'rtacha 22 foizga oshgan.

Janubiy Koreyaning "Smart Factory" dasturi alohida e'tiborga loyiq, chunki u kichik va o'rta korxonalar (KO'K) uchun mo'ljallangan va ularning raqamli transformatsiyasini hukumat tomonidan moliyalashtirilayotgan grantlar va subsidiyalar orqali qo'llab-quvvatlaydi [18]. 2023-yil holatiga ko'ra, Janubiy Koreyada 30 000 dan ortiq aqlli fabrika faoliyat yuritgan va ularning energiya samaradorligi an'anaviy korxonalarga nisbatan o'rtacha 24 foizga yuqori bo'lgan.

*Integratsion modelning besh qatlamli arxitekturasi.*

Tadqiqot natijalariga asosan, Sanoat 4.0 va yashil texnologiyalar integratsiyasining konseptual arxitekturasi besh qatlamdan iborat model sifatida taklif etiladi (2-rasm). Har bir qatlam o‘ziga xos funksiyalarni bajaradi va qatlamlar orasidagi ma’lumot va resurs oqimlari tizimning yaxlit samaradorligini ta’minlaydi.



**2-rasm. Yashil ishlab chiqarishda Sanoat 4.0 texnologiyalari qo‘llanilishining konseptual arxitekturasi<sup>4</sup>**

Birinchi qatlam – fizik infratuzilma sanoat korxonasiining moddiy-texnik bazasini tashkil etadi va sensorlar, aktuatorlar, sanoat robotlari va CNC dastgohlarini o‘z ichiga oladi. Bu qatlamda yashil texnologiyalar aspekti energiya tejankor uskunalari, qayta tiklanadigan energiya manbalari (quyosh panellari, shamol generatorlari) va kam chiqindili texnologiyalarni qo‘llash orqali namoyon bo‘ladi. Lasi va boshqalar ko‘rsatganidek, zamonaviy sensorlar tizimi har bir uskunaning energiya iste‘molini millisekundlar aniqligida o‘lchash imkonini bergan [7].

Ikkinchi qatlam – ulanish va ma’lumotlar fizik qurilmalardan to‘plangan ma’lumotlarni uzatish va dastlabki qayta ishlash funksiyasini bajaradi. Bu qatlamda IoT protokollari (MQTT, CoAP, OPC UA), edge computing yechimlari va 5G aloqa texnologiyalari qo‘llaniladi. Edge computing texnologiyasi ma’lumotlarni to‘plangan joyda dastlabki qayta ishlash orqali tarmoq yuklanishini kamaytiradi va qaror qabul qilish tezligini oshiradi [19]. Yashil aspektda, bu qatlam energiya tejankor aloqa protokollari va ma’lumotlar markazlarining ekologik samaradorligini ta’minlaydi.

Uchinchi qatlam – platformalar va tahlillar to‘plangan ma’lumotlarni chuqur qayta ishlash, tahlil qilish va qiymatli bilimlarni ajratib olish uchun javob beradi. Cloud platformalar (AWS IoT, Azure IoT Hub, Siemens MindSphere), Big Data tahlil vositalari (Apache Spark,

Hadoop), sun’iy intellekt va mashinaviy o’rganish algoritmlari hamda raqamli egizak texnologiyalari bu qatlamning asosiy komponentlaridir [16], [20]. Yashil ishlab chiqarish kontekstida bu qatlam energiya iste’molini prognozlash, chiqindilar generatsiyasini bashorat qilish va resurslardan foydalanish samaradorligini baholash modellarini yaratadi.

To’rtinchi qatlam – ilovalar va boshqaruv tahlil natijalarini amaliy boshqaruv qarorlariga aylantiradi. Enterprise Resource Planning (ERP), Manufacturing Execution System (MES), SCADA va ixtisoslashtirilgan energiya monitoring tizimlari bu qatlamning asosiy elementlaridir. Ghobakhloo ta’kidlaganidek, bu qatlamda raqamli va yashil transformatsiya bir-birini to’ldiradi: raqamli boshqaruv tizimlari yashil ko’rsatkichlarni monitoring qilish va boshqarish uchun platforma yaratadi, yashil talablar esa raqamli tizimlarning funktsionalligini kengaytiradi [11].

Beshinchi qatlam – strategik qarorlar yuqoridagi barcha qatlamlardan olingan ma’lumotlar va tahlillar asosida korxonada darajasidagi strategik qarorlarni qo’llab-quvvatlaydi. Bu qatlam barqaror rivojlanish strategiyasi, ekologik muvofiqlik (compliance) va uzoq muddatli iqtisodiy samaradorlik masalalarini qamrab oladi. Stock va Seliger ta’kidlaganidek, strategik qatlam raqamli va yashil transformatsiyaning muvofiqligini ta’minlaydi va korxonaning ikkala yo’nalishdagi investitsiyalarini optimallashtiradi [12].

**3-jadval.**

**Sanoat 4.0 texnologiyalari va yashil ishlab chiqarish samaradorligi o’rtasidagi bog’liqlik<sup>5</sup>**

<b>Texnologiya</b>	<b>Yashil ishlab chiqarishga ta’sir mexanizmi</b>	<b>Samaradorlik ko’rsatkichi</b>	<b>Manba</b>
<b>IoT sensorlari</b>	Real vaqtda energiya va resurs monitoringi; anomaliyalarni aniqlash	Energiya sarfi -15-25%	Xu et al. (2018) [19]
<b>Sun’iy intellekt (AI)</b>	Bashoratli texnik xizmat; ishlab chiqarishni optimallashtirish	Isrofgarchilik -20-30%	Li et al. (2020) [20]
<b>Big Data</b>	Resurs oqimlarini optimallashtirish; strategik qaror qabul qilish	Umumiy samaradorlik +18-25%	Zhong et al. (2017) [21]
<b>Digital Twin</b>	Virtual sinov; optimal parametrlarni aniqlash	Material isrofi -25-35%	Tao et al. (2019) [16]
<b>Cloud Computing</b>	Markazlashtirilgan ma’lumotlar boshqaruvi; resurslarni taqsimlash	IT infratuzilma xarajatlari -30-40%	Russ et al. (2016) [8]
<b>Kibernetik-fizik tizimlar</b>	Avtomatlashtirilgan jarayonlarni boshqarish; xatolarni kamaytirish	Yaroqsiz mahsulot -40-60%	Kagermann et al. (2013) [1]

3-jadvalda keltirilgan tahlil natijalari shuni ko’rsatadiki, har bir Sanoat 4.0 texnologiyasi yashil ishlab chiqarishning muayyan aspektiga yo’naltirilgan va aniq o’lchanadigan samaradorlik ko’rsatkichlariga ega. IoT sensorlari asosan energiya sarfini kamaytirish orqali, sun’iy intellekt isrofgarchilikni qisqartirish orqali, Big Data umumiy resurs samaradorligini oshirish orqali, raqamli egizak esa material isrofini kamaytirish orqali yashil ishlab chiqarish ko’rsatkichlarini yaxshilaydi.

Muhim nazariy xulosa shuki, bu texnologiyalarning individual ta’siridan ko’ra ularning integratsion ta’siri yanada kuchli. De Sousa Jabbour va boshqalar asoslagan nazariy pozitsiyaga ko’ra, Sanoat 4.0 texnologiyalari yashil ta’minot zanjiri boshqaruvining barcha bosqichlarida yashil xaridlardan yashil logistikagacha sinergik effekt yaratish qobiliyatiga ega [10]. Bu sinergiya bir texnologiyaning natijasi boshqa texnologiya uchun kiruvchi ma’lumot bo’lib xizmat qilishi, shu tariqa tizimning umumiy samaradorligi alohida komponentlar samaradorliklarining oddiy yig’indisidan oshishi bilan izohlanadi.

Kamble va boshqalarning tadqiqotiga tayangan holda, integratsiyaning muvaffaqiyatli amalga oshirilishi uchun bir necha kritik omillarni hisobga olish zarur [14]. Birinchidan, texnologik infratuzilmaning tayyorligi korxonada mavjud IT infratuzilmasi yangi texnologiyalarni qabul qilish qobiliyatiga ega bo’lishi lozim. Ikkinchidan, kadrlar salohiyati xodimlar raqamli va yashil texnologiyalar bilan ishlash ko’nikmalariga ega bo’lishi kerak. Uchinchidan, tashkiliy madaniyat korxonada rahbariyati innovatsiyalarni qo’llab-quvvatlaydigan va ekologik mas’uliyatni e’tirof etadigan muhitni yaratishi zarur. To’rtinchidan, davlat siyosatining qo’llab-quvvatlashi regulativ muhit va rag’batlantirish mexanizmlari integratsiya jarayonini tezlashtiradi.

Bag va boshqalarning aylana iqtisodiyot kontekstidagi tadqiqotlari ham integratsion modelning nazariy asoslanganligini mustahkamlaydi [13]. Ularning xulosalariga ko’ra, Sanoat 4.0 texnologiyalari aylana iqtisodiyot tamoyillarini amaliyotga tatbiq etishda muhim yoqlovchi omil sifatida namoyon bo’lgan. Xususan, IoT sensorlari mahsulot hayot siklini kuzatish, AI algoritmlari esa qayta ishlash jarayonlarini optimallashtirish imkonini bergan.

#### **Xulosa va takliflar**

Tadqiqot natijalarining umumlashtirilgan tahlili bir necha muhim nazariy va amaliy xulosalarni shakllantirish imkonini berdi. Birinchidan, Sanoat 4.0 texnologiyalari va yashil texnologiyalar integratsiyasi chiziqli emas, balki sinergik xarakterga ega ekanligi nazariy jihatdan asoslandi. Bu shuni anglatadiki, har bir texnologiyaning yashil ishlab chiqarishga individual hissasidan tashqari, ularning birgalikdagi qo’llanilishi qo’shimcha multiplikativ effekt yaratadi. Xalqaro tajribalar tahlili ko’rsatganidek, bu sinergik ta’sir resurs samaradorligini 25-40 foizga, energiya tejamkorligini 30-50 foizga oshirish potensialiga ega [3], [6], [18].

Ikkinchidan, taklif etilgan besh qatlamli integratsion model Sanoat 4.0 va yashil texnologiyalar integratsiyasining konseptual ramkasini tashkil etadi. Fizik infratuzilmadan strategik qarorlargacha bo’lgan har bir qatlam o’ziga xos texnologik komponentlar va yashil tamoyillarni birlashtiradi, qatlamlar orasidagi ma’lumot va resurs oqimlari esa tizimning yaxlit ishlashini ta’minlaydi. Bu model Lasi va boshqalar [7], De Sousa Jabbour va boshqalar [10] hamda Ghobakhloo [11] tomonidan ilgari surilgan nazariy yondashuvlarni integratsiyalashtiradi va kengaytiradi.

Uchinchidan, xalqaro tajribalarning qiyosiy tahlili turli mamlakatlarning o’ziga xos strategik yondashuvlarini aniqlash imkonini berdi. Germaniya, Finlyandiya va Janubiy Koreya tajribalari ko’rsatadiki, hukumatning faol ishtirokchi va qo’llab-quvvatlovchi roli integratsiya jarayonining tezligi va samaradorligi uchun hal qiluvchi ahamiyatga ega. Bunda davlat grantlari, soliq imtiyozlari va tartibga soluvchi normalar muhim instrument sifatida namoyon bo’lgan [18], [23].

Olingan natijalar asosida quyidagi takliflar shakllantirilgan:

Birinchiidan, sanoat korxonalarida Sanoat 4.0 va yashil texnologiyalar integratsiyasini bosqichma-bosqich joriy etish strategiyasini ishlab chiqish tavsiya etiladi. Birinchi bosqichda IoT sensorlari va energiya monitoring tizimlarini o'rnatish orqali ma'lumotlar bazasini shakllantirish, ikkinchi bosqichda SI va Big Data tahlillari orqali ishlab chiqarish jarayonlarini optimallashtirish, uchinchi bosqichda esa raqamli egizak va kibernetik-fizik tizimlarni joriy etish orqali to'liq integratsiyaga erishish maqsadga muvofiq.

Ikkinchidan, kadrlar tayyorlash tizimini integratsion model talablariga moslashtirish zarur. Oliy ta'lim muassasalarida "raqamli ishlab chiqarish va yashil texnologiyalar" yo'nalishida mutaxassislar tayyorlash, mavjud muhandis va texnik xodimlarni raqamli ko'nikmalar bo'yicha qayta tayyorlash dasturlarini joriy etish maqsadga muvofiq. Kamble va boshqalar ko'rsatganidek, kadrlar salohiyati integratsiya muvaffaqiyatining eng muhim omillaridan biridir [14].

Uchinchidan, kichik va o'rta korxonalar uchun maxsus qo'llab-quvvatlash mexanizmlarini ishlab chiqish tavsiya etiladi. Janubiy Koreya tajribasiga o'xshash tarzda [18], davlat grantlari, subsidiyalar va texnologik konsalting xizmatlari orqali KO'Klarning raqamli va yashil transformatsiyasini rag'batlantirish samarali natijalar berishi mumkin.

To'rtinchidan, sanoat tarmoqlarida ochiq innovatsiya ekotizimini rivojlantirish tavsiya etiladi. Universitetlar, tadqiqot institutlari, texnologiya kompaniyalari va sanoat korxonalarini o'rtasidagi hamkorlikni kuchaytirish orqali bilim transferi va texnologiya diffuziyasini tezlashtirish mumkin. Luthra va Manglaning nazariy xulosalariga ko'ra, innovatsiya ekotizimlari Sanoat 4.0 va barqarorlik integratsiyasining muhim katalizatori hisoblanadi [15].

Beshinchidan, integratsion modelning samaradorligini baholash uchun kompleks ko'rsatkichlar tizimini joriy etish zarur. Bu tizim iqtisodiy samaradorlik (resurs tejamlorligi, mehnat unumdorligi), ekologik samaradorlik (uglerod emissiyasi, chiqindilar hajmi, energiya iste'moli) va ijtimoiy samaradorlik (ish o'rinlari, xavfsizlik, malaka darajasi) ko'rsatkichlarini o'z ichiga olishi lozim [11].

Tadqiqotning cheklovlari sifatida quyidagilarni ta'kidlash lozim: integratsion model nazariy-konseptual xarakterga ega bo'lib, uning to'liq empirik tasdig'i qo'shimcha tadqiqotlarni talab etadi. Kelgusi tadqiqotlarda modelni muayyan sanoat tarmoqlariga (masalan, oziq-ovqat sanoati, kimyo sanoati, mashinasozlik) moslashtirilgan variantlarini ishlab chiqish va ularni amaliy sinovdan o'tkazish maqsadga muvofiq bo'ladi. Bundan tashqari, rivojlanayotgan mamlakatlar kontekstida integratsion modelni qo'llashning o'ziga xos to'siqlari va yoqlovchi omillarini chuqurroq o'rganish ilmiy va amaliy ahamiyatga ega.

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

1. Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. Final report of the Industrie 4.0 Working Group. Acatech — National Academy of Science and Engineering. <https://www.acatech.de/publikation/recommendations-for-implementing-the-strategic-initiative-industrie-4-0-final-report-of-the-industrie-4-0-working-group/>
2. UNEP. (2011). Towards a Green Economy: Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication. United Nations Environment Programme. <https://www.unep.org/resources/report/towards-green-economy-pathways-sustainable-development-and-poverty-eradication>

3. World Economic Forum. (2023). The Global Risks Report 2023. 18th Edition. <https://www.weforum.org/publications/global-risks-report-2023/>
4. Li, L. (2022). China's manufacturing locus in 2025: With a comparison of "Made-in-China 2025" and "Industry 4.0". *Technological Forecasting and Social Change*, 135, 66-74. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.05.028>
5. European Commission. (2020). A New Industrial Strategy for Europe. COM(2020) 102 final. [https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/europe-fit-digital-age/european-industrial-strategy\\_en](https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/europe-fit-digital-age/european-industrial-strategy_en)
6. Fraunhofer Institute. (2022). Energy Efficiency in Smart Manufacturing: Results from German Industry. Fraunhofer-Gesellschaft. <https://www.fraunhofer.de/en/research/current-research/industry-4-0.html>
7. Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H.G., Feld, T., & Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. *Business & Information Systems Engineering*, 6(4), 239-242. <https://doi.org/10.1007/s12599-014-0334-4>
8. Rüßmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, J., Engel, P., & Harnisch, M. (2015). Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries. Boston Consulting Group. [https://www.bcg.com/publications/2015/engineered\\_products\\_project\\_business\\_industry\\_4\\_future\\_productivity\\_growth\\_manufacturing\\_industries](https://www.bcg.com/publications/2015/engineered_products_project_business_industry_4_future_productivity_growth_manufacturing_industries)
9. Schiederig, T., Tietze, F., & Herstatt, C. (2012). Green innovation in technology and innovation management — an exploratory literature review. *R&D Management*, 42(2), 180-192. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9310.2011.00672.x>
10. De Sousa Jabbour, A.B.L., Jabbour, C.J.C., Foropon, C., & Godinho Filho, M. (2018). When titans meet — Can industry 4.0 revolutionise the environmentally-sustainable manufacturing wave? The role of critical success factors. *Technological Forecasting and Social Change*, 132, 18-25. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.01.017>
11. Ghobakhloo, M. (2020). Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 252, 119869. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119869>
12. Stock, T., & Seliger, G. (2016). Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 40, 536-541. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.129>
13. Bag, S., Pretorius, J.H.C., Gupta, S., & Dwivedi, Y.K. (2021). Role of institutional pressures and resources in the adoption of big data analytics powered artificial intelligence, sustainable manufacturing practices and circular economy capabilities. *Technological Forecasting and Social Change*, 163, 120420. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120420>
14. Kamble, S.S., Gunasekaran, A., & Gawankar, S.A. (2018). Sustainable Industry 4.0 framework: A systematic literature review identifying the current trends and future perspectives. *Process Safety and Environmental Protection*, 117, 408-425. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.05.009>
15. Luthra, S., & Mangla, S.K. (2018). Evaluating challenges to Industry 4.0 initiatives for supply chain sustainability in emerging economies. *Process Safety and Environmental Protection*, 117, 168-179. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.04.018>

16. Tao, F., Zhang, H., Liu, A., & Nee, A.Y.C. (2019). Digital twin in industry: State-of-the-art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(4), 2405-2415. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186>
17. Tranfield, D., Denyer, D., & Smart, P. (2003). Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review. *British Journal of Management*, 14(3), 207-222. <https://doi.org/10.1111/1467-8551.00375>
18. OECD. (2021). The Digital Transformation of SMEs. *OECD Studies on SMEs and Entrepreneurship*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/bdb9256a-en>
19. Xu, L.D., Xu, E.L., & Li, L. (2018). Industry 4.0: state of the art and future trends. *International Journal of Production Research*, 56(8), 2941-2962. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1444806>
20. Li, B.H., Hou, B.C., Yu, W.T., Lu, X.B., & Yang, C.W. (2017). Applications of artificial intelligence in intelligent manufacturing: a review. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 18(1), 86-96. <https://doi.org/10.1631/FITEE.1601885>
21. Zhong, R.Y., Xu, X., Klotz, E., & Newman, S.T. (2017). Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review. *Engineering*, 3(5), 616-630. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.05.015>
22. Grieves, M., & Vickers, J. (2017). Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In: Kahlen, F.J., Flumerfelt, S., Alves, A. (eds) *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*. Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4)
23. Ministry of Trade, Industry and Energy of Korea. (2022). Korean Smart Factory Program Annual Report 2022. <https://www.motie.go.kr/en/topic/smartFactory/smartFactoryProgram.do>
24. IEA. (2023). World Energy Outlook 2023. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>
25. UNIDO. (2020). Industrializing in the digital age. *Industrial Development Report 2020*. United Nations Industrial Development Organization. <https://www.unido.org/resources-publications-flagship-publications-industrial-development-report-series/idr2020>