PASSIV ARXITEKTURALI BINOLARDA VERTIKAL BIPV VA BIPV/T TIZIMLARINING QO‘LLANILISHI

Quchqarov Akmaljon Axmadaliyevich
Farg‘ona davlat texnika universiteti dotsenti
E-mail: ims-79@mail.ru
Obidjonov Zafarjon Odiljon o‘g‘li
Farg‘ona davlat texnika universiteti tayanch doktoranti
E-mail: obidjonov1998@bk.ru

Annotatsiya. Binolarning energiya samaradorligini oshirish va qayta tiklanuvchi energiya manbalarini joriy etish global energetik barqarorlikka erishishning muhim yo‘nalishidir. Passiv bino konsepsiyasi energiya sarfini keskin kamaytirish imkonini bersa, binolarga integratsiyalangan fotovoltaik tizimlar (BIPV), xususan, fasadlarga o‘rnatilganlari, shahar sharoitida energiya ishlab chiqarishning istiqbolli yechimi hisoblanadi. Biroq, aynan passiv binolarning vertikal qismlariga integratsiyalangan quyosh qurilmalarining (PV va ayniqsa, bir vaqtda elektr va issiqlik ishlab chiqaruvchi PV/T tizimlari) ishlash samaradorligi, binoning termal balansiga ta’siri va texnik-iqtisodiy salohiyati, xususan, O‘zbekiston kabi o‘ziga xos iqlim sharoitlarida yetarlicha o‘rganilmagan. Ushbu tadqiqot aynan shu bo‘shliqni to‘ldirishga, ya’ni bunday integratsiyalangan tizimlarning energetik, texnik va iqtisodiy imkoniyatlarini har tomonlama baholashga qaratilgan.

Kalit so‘zlar: Passiv binolar, binolarga integratsiyalangan fotovoltaik tizimlar (BIPV), vertikal integratsiya, quyosh energiyasi, energiya samaradorligi, BIPV/T tizimlari, iqtisodiy samaradorlik, barqaror qurilish, simulyatsiya, O‘zbekiston iqlimi.

Annotation. Improving the energy efficiency of buildings and integrating renewable energy sources is a crucial pathway toward achieving global energy sustainability. While the concept of passive buildings significantly reduces energy consumption, building-integrated photovoltaic (BIPV) systems—especially those installed on façades—represent a promising solution for urban energy generation. However, the performance efficiency, impact on thermal balance, and techno-economic potential of solar devices integrated into the vertical sections of passive buildings—particularly photovoltaic-thermal (PV/T) systems that simultaneously generate electricity and heat—have not been sufficiently studied, especially under specific climate conditions like those in Uzbekistan. This research aims to address this gap by comprehensively evaluating the energy, technical, and economic capabilities of such integrated systems.

ISSN 3030-3907

Keywords: Passive buildings, building-integrated photovoltaic systems (BIPV), vertical integration, solar energy, energy efficiency, BIPV/T systems, economic efficiency, sustainable construction, simulation, Uzbekistan climate.

Аннотация. Повышение энергоэффективности зданий и внедрение возобновляемых источников энергии является важным направлением на пути к достижению глобальной энергетической устойчивости. Концепция пассивного здания позволяет значительно снизить потребление энергии, а фотоэлектрические системы, интегрированные в здания (BIPV), особенно установленные на фасадах, представляют собой перспективное решение для производства энергии в городских условиях. Однако эффективность работы солнечных установок, интегрированных в вертикальные участки пассивных зданий, особенно систем PV/T, одновременно производящих электричество и тепло, их влияние на тепловой баланс здания и технико-экономический потенциал остаются недостаточно изученными, особенно в специфических климатических условиях Узбекистана. Настоящее исследование направлено на восполнение данного пробела путём всесторонней оценки энергетических, технических и экономических возможностей таких интегрированных систем.

Ключевые слова: Пассивные здания, интегрированные в здания фотоэлектрические системы (BIPV), вертикальная интеграция, солнечная энергия, энергоэффективность, системы BIPV/T, экономическая эффективность, устойчивое строительство, моделирование, климат Узбекистана.

Kirish

Global energetika tizimining dekarbonizatsiyasi va iqlim o‘zgarishiga qarshi kurashish zamonaviy dunyoning eng dolzarb muammolaridan biridir[1]. Binolar umumiy energiya iste’molining salmoqli qismini tashkil etgani sababli, qurilish sektori energiya samaradorligini oshirish va qayta tiklanuvchi energiya manbalarini (QTEM) joriy etishda hal qiluvchi rol o‘ynaydi. Shu nuqtai nazardan, “passiv bino” (Passive House) konsepsiyasi energiya sarfini keskin kamaytirishga qaratilgan ilg‘or yondashuv sifatida keng e’tirof etilmoqda[2]. Passiv binolar yuqori darajadagi issiqlik izolyatsiyasi, germetiklik, issiqlik ko‘priklarining yo‘qligi va issiqlikni qayta ishlash (rekuperatsiya) bilan boshqariladigan ventilyatsiya tizimlari orqali isitish va sovitish uchun minimal energiya talab qiladi[3].

Shu bilan birga, binolarning o‘zida energiya ishlab chiqarish imkoniyatlarini kengaytirish muhim ahamiyat kasb etmoqda. Binolarga integratsiyalangan fotovoltaik tizimlar (BIPV - Building Integrated Photovoltaics) bu borada istiqbolli texnologiya bo‘lib, ular nafaqat elektr energiyasi ishlab chiqaradi, balki an’anaviy

ISSN 3030-3907

qurilish materiallarining o‘rnini bosib, binoning tashqi qobig‘ining bir qismiga aylanadi[4]. Bu binolarning arxitekturaviy ko‘rinishini yaxshilash, qurilish xarajatlarini optimallashtirish (oddiy fasad materiallarini almashtirish hisobiga) va zich shahar qurilishi sharoitida energiya ishlab chiqarish maydonini kengaytirish imkonini beradi[5].

Passiv bino konsepsiyasi va BIPV texnologiyalari o‘rtasidagi sinergiya alohida qiziqish uyg‘otadi. Passiv binoning yuqori energiya samaradorligi BIPV tizimi tomonidan ishlab chiqarilgan energiyaning binoning ehtiyojlarini qoplash darajasini oshiradi[6]. Binolarning vertikal yuzalari (fasadlar), ayniqsa zich shahar qurilishida va ko‘p qavatli binolarda, quyosh energiyasini yig‘ish uchun katta, ammo ko‘pincha foydalanilmayotgan maydonni taklif etadi[7]. Bu hollarda passiv binolarning fasadlariga quyosh qurilmalarini integratsiyalash energiya mustaqilligiga erishish va uglerod izini minimallashtirish uchun muhim strategiya hisoblanadi[8].

Biroq, bunday integratsiyaning texnik, iqtisodiy va energetik jihatlari, ayniqsa passiv binolarning o‘ziga xos talablari (qizib ketish xavfi, termal balansga ta’siri) nuqtai nazaridan, hali to‘liq o‘rganilmagan[9]. Bundan tashqari, fasad BIPV va ayniqsa, bir vaqtning o‘zida elektr va issiqlik energiyasini ishlab chiqaradigan gibrid fotovoltaik/termal tizimlarning (BIPV/T) samaradorligi passiv binolar kontekstida va turli iqlim sharoitlarida batafsil tahlil qilishni talab qiladi. Ushbu tadqiqot aynan shu bo‘shliqni to‘ldirishga, ya’ni passiv binolarning vertikal qismlariga integratsiyalangan quyosh qurilmalari asosidagi energiya tizimlarining imkoniyatlarini, O‘zbekiston sharoitlariga alohida e’tibor qaratgan holda, har tomonlama baholashga qaratilgan.

Binolarga integratsiyalangan quyosh energiyasi tizimlari bo‘yicha olib borilgan tadqiqotlar so‘nggi yillarda sezilarli darajada kengaydi[10]. BIPV texnologiyalari bugungi kunda turli xil dizayn va konfiguratsiyalarda mavjud. Kuhn et al. (2021) BIPV tizimlari uchun mavjud texnologik dizayn variantlarini (tom va fasadlar uchun) mahsulot yoki loyihalarga bog‘liq bo‘lmagan holda ko‘rib chiqib, ularning texnologik rivojlanishini tahlil qiladi[11]. Tripathy et al. (2016) esa BIPV mahsulotlarining turlarini (tom, fasad, yorug‘lik o‘tkazuvchi elementlar) va ularning elektr xususiyatlarini batafsil yoritib beradi[12]. Ular, shuningdek, BIPV modullarining barqarorligini hayotiy sikl tahlili (LCA), energiya qaytish muddati (EPBT) va issiqxona gazlari emissiyasi (GHG) kabi ko‘rsatkichlar orqali baholash muhimligini ta’kidlaydilar[13].

Standart BIPV tizimlari faqat elektr energiyasi ishlab chiqarsa, binolarga integratsiyalangan fotovoltaik/termal (BIPV/T) tizimlar bir vaqtning o‘zida ham elektr, ham issiqlik energiyasini ishlab chiqarish imkonini beradi[14]. Rounis et al.

ISSN 3030-3907

(2021) havo asosidagi PV/T va BIPV/T tizimlarining monitoring qilingan ishlashi va modellashtirilishini, ayniqsa konvektiv issiqlik almashinuvi hodisalariga e'tibor qaratgan holda tahlil qiladi[15]. BIPV/T tizimlari PV modullarini sovitish orqali ularning elektr samaradorligini oshiradi va olingan issiqlikdan binoning isitish, issiq suv ta'minoti yoki ventilyatsiya tizimlarida foydalanish mumkin[16]. Bu umumiy energiya samaradorligini sezilarli darajada oshirish potensialiga ega[17].

Biroq, BIPV va ayniqsa BIPV/T tizimlarining, xususan fasadga integratsiyalangan variantlarining ishlash samaradorligini aniq baholash va modellashtirish murakkab masala hisoblanadi. Rounis et al. (2021) ta'kidlaganidek, ko'pgina eksperimental tadqiqotlar kichik o'lchamli prototiplarda, ko'pincha haqiqiy ekspluatatsiya sharoitlaridan farq qiluvchi sharoitlarda o'tkaziladi va to'liq miqyosli, real binolarga o'rnatilgan BIPV/T tizimlari bo'yicha monitoring ma'lumotlari juda kam[18]. Shamolning ta'siri, qisman soyalanish, PV modullarning ish harorati, havo kanalidagi konvektiv oqimlar kabi omillar tizimning samaradorligiga sezilarli ta'sir ko'rsatadi va ularni modellashtirishda hisobga olish zarur[19]. BIPV modullari va fasad tizimlarining issiqlik xususiyatlarini materiallar (masalan, faza o'zgaruvchan materiallar - PCM) va konstruktiv yechimlar yordamida optimallashtirish kelajakdagi tadqiqotlarning asosiy yo'nalishi bo'lib qolmoqda[20].

Iqtisodiy va ekologik jihatlar ham BIPV texnologiyalarining keng joriy etilishida muhim rol o'ynaydi. Biyik et al. (2017) BIPV tizimlarining xarajatlari, foydalari, risklari, to'siqlari (masalan, yuqori boshlang'ich investitsiyalar, standartlashtirishning yetarli emasligi, arxitektorlar va quruvchilarning xabardorligi pastligi) va ularni bartaraf etish strategiyalarini keng qamrovli ko'rib chiqadi[21]. Tripathy et al. (2016) tomonidan qayd etilgan LCA, EPBT va GHG emissiyasi kabi ko'rsatkichlar BIPV ning ekologik barqarorligini baholash uchun muhim vositalardir[22].

Arxitekturaviy integratsiya va standartlashtirish ham muhim masalalardir. BIPV elementlari nafaqat energiya ishlab chiqarishi, balki binoning estetik ko'rinishiga mos kelishi va qurilish qoidalariga javob berishi kerak. Turli xil ranglar, teksturalar va shaffoflik darajalariga ega bo'lgan BIPV modullari arxitektorlarga keng imkoniyatlar yaratadi[23]. Tripathy et al. (2016) xalqaro standartlar va sinov sharoitlarini ko'rib chiqishi mahsulot sifati va ishonchliligini ta'minlash uchun zarurdir[24].

Adabiyotlarni tahlil qilish shuni ko'rsatadiki, umumiy BIPV va BIPV/T texnologiyalari bo'yicha ko'plab tadqiqotlar mavjud bo'lsa-da, ularni aynan passiv binolar kontekstida, xususan vertikal fasadlarga integratsiyalash masalasi

ISSN 3030-3907

yetarlicha yoritilmagan. Passiv binolarning o‘ziga xos termal xususiyatlari va energiya balansi talablari fasadga integratsiyalangan quyosh tizimlarining ishlashiga va binoga ta’siriga alohida e’tibor qaratishni talab qiladi. Mavjud tadqiqotlar ko‘pincha bu o‘zaro bog‘liqlikni chuqur tahlil qilmaydi va turli iqlim sharoitlari uchun optimallashtirilgan yechimlarni taklif etmaydi. To‘liq miqyosli BIPV/T fasad tizimlarining real sharoitlardagi uzoq muddatli ishlashi bo‘yicha ma’lumotlar kamligi ham muhim bo‘shliq hisoblanadi[25]. BIPV/T tizimlarining passiv uy qobig‘i bilan o‘zaro ta’sirini o‘rganish, shu jumladan yozgi davrda qizib ketish xavfini tahlil qilish va issiqlik ko‘priklari orqali issiqlik yo‘qotishlariga ta’sirini o‘rganish alohida dolzarblik kasb etadi[26].

Adabiyotlar tahlilida aniqlangan bo‘shliqlar bir qator muammolarni keltirib chiqaradi va ushbu tadqiqotning zarurligini asoslaydi:

1. Passiv binolar minimal energiya sarfini ta’minlash uchun yuqori darajada optimallashtirilgan tizimlardir[27]. Fasadga integratsiyalangan quyosh qurilmalari (issiqlik ajratuvchi PV yoki PV/T modullar) binoning termal balansiga, izolyatsiyasiga va germetikligiga ta’sir qilishi mumkin. Bu ta’sirni aniq baholamasdan va boshqarmasdan turib, passiv bino standartlariga javob beradigan integratsiyani amalga oshirish qiyin. Bundan tashqari, passiv binolarning yuqori darajadagi izolyatsiyasi va germetikligi yozgi qizib ketish xavfini oshirishi mumkin, ushbu omil fasad BIPV/T tizimlaridan keladigan qo‘shimcha issiqlik oqimi tufayli yanada kuchayishi mumkin[28].

2. Fasadlar tomlarga nisbatan quyosh radiatsiyasini boshqacha qabul qiladi (past tushish burchaklari, kun davomida va yil fasllarida o‘zgaruvchan radiatsiya intensivligi, atrofdagi binolar yoki obyektlar tomonidan ko‘proq soyalanish)[29]. Ushbu jarayon energiya ishlab chiqarish potensialini va tizim dizaynini optimallashtirishni murakkablashtiradi. Fasad BIPV/T tizimlarida havo kanallaridagi tabiiy yoki majburiy konveksiya ham tomdagi tizimlarga qaraganda farq qilishi mumkin[30].

3. Mavjud energiya simulyatsiya dasturlari va modellari ko‘pincha standart BIPV modullari uchun mo‘ljallangan bo‘lib, passiv binoning murakkab termal dinamikasi bilan fasadga integratsiyalangan BIPV/T tizimlarining o‘zaro ta’sirini to‘liq hisobga olmasligi mumkin[31]. Ayniqsa, fasad bo‘shlig‘idagi issiqlik va havo almashinuvi, shamol ta’siri va ularning binoning isitish/sovitish yuklariga ta’sirini aniq modellashtirish, shuningdek, BIPV mahkamlagichlari tomonidan yaratilgan issiqlik ko‘priklarining ta’sirini to‘g‘ri hisobga olish qiyin[31].

4. Rounis et al. (2021) ta’kidlaganidek, real sharoitlarda, to‘liq miqyosda ishlayotgan, ayniqsa passiv binolarga o‘rnatilgan fasad BIPV/T tizimlari bo‘yicha uzoq muddatli monitoring ma’lumotlari juda kam[32]. Bu holat modellarni

ISSN 3030-3907

validatsiya qilishni va texnologiyaning haqiqiy samaradorligini baholashni qiyinlashtiradi.

5. Quyosh radiatsiyasi intensivligi, atrof-muhit harorati, shamol rejimi kabi iqlim sharoitlari BIPV/T tizimlarining ishlashiga katta ta'sir ko'rsatadi[33]. O'zbekiston kabi o'ziga xos iqlim sharoitlariga ega mintaqalar uchun optimallashtirilgan yechimlarni ishlab chiqish va ularning texnik-iqtisodiy samaradorligini baholash zarur. Global tadqiqotlar natijalarini mahalliy sharoitlarga to'g'ridan-to'g'ri qo'llash har doim ham to'g'ri bo'lmaydi.

Ushbu muammolar passiv binolarning vertikal qismlariga quyosh qurilmalarini integratsiyalash bo'yicha chuqur va tizimli tadqiqotlar olib borish zarurligini ko'rsatadi.

O'zbekiston quyosh energiyasidan foydalanish uchun katta salohiyatga ega. Global gorizontal insolyatsiyaning (GHI) o'rtacha yillik qiymati kuniga taxminan 4.52 kVt·soat/m² ni tashkil etadi va mamlakatning katta qismida kuniga 4.0-5.0 kVt·soat/m² oralig'ida o'zgarib turadi, bu Ispaniya va Italiya kabi mamlakatlarning ko'rsatkichlariga teng yoki undan yuqori[34]. Konsentrlangan tizimlar va quyosh issiqlik ta'minoti uchun muhim bo'lgan to'g'ridan-to'g'ri normal insolyatsiya (DNI) ham yuqori bo'lib, o'rtacha qiymati kuniga 4.44 kVt·soat/m² ni tashkil etadi va janubiy hududlarda kuniga 4.9 kVt·soat/m² ga yetadi[35]. Quyosh resurslari xaritalari Global Solar Atlas orqali mavjud[36].

O'zbekiston iqlimi keskin kontinental va qurg'oqchil bo'lib, sutkalik va mavsumiy harorat tebranishlari katta[37]. Yoz uzun, issiq va quruq (iyul oyining o'rtacha harorati +27.2°C, ko'plab yirik shaharlarda o'rtacha kunduzgi maksimum +35°C), qish esa sovuq (dekabrdan fevralgacha o'rtacha oylik harorat -1°C dan -3°C gacha).[27] Yog'ingarchilik miqdori sezilarli darajada farq qiladi: g'arbda yiliga 100 mm dan kam, sharqda va janubi-sharqda esa yiliga 800-900 mm gacha[38]. Harorat, yog'ingarchilik va boshqa parametrlar bo'yicha batafsil iqlim tahlili uchun tarixiy kuzatuvlar va reanaliz ma'lumotlari (masalan, ~25 km aniqlikdagi ERA5) mavjud[39]. Shamol ma'lumotlari ham reanaliz manbalaridan[40] mavjud va O'zgidromet kabi meteorologik xizmatlar yoki tijorat provayderlari orqali olinishi mumkin[41]. Tadqiqotlar Markaziy Osiyodagi shamol rejimlarining murakkabligini ko'rsatadi va kelajakda shamol tezligining pasayishi mumkinligini bashorat qiladi, bu shamol energetikasi salohiyatini va shamolning BIPV tizimlariga ta'sirini baholashda muhim ahamiyatga ega. O'zbekistonning an'anaviy arxitekturasi tarixan iqlimga moslashgan bo'lib, issiqdan himoyalanish uchun qalin devorlar, kichik deraza teshiklari va ichki hovlilardan foydalanilgan[42].

Energetika sektori va QTEM sohasidagi siyosat

ISSN 3030-3907

O‘zbekiston energetika sektori tabiiy gazga kuchli bog‘liq bo‘lib, 2019 yilda elektr energiyasi ishlab chiqarishning 85% dan ortig‘i uning hissasiga to‘g‘ri kelgan[43]. Biroq, hukumat energiya balansini diversifikatsiya qilish va QTEMni rivojlantirish bo‘yicha faol siyosat olib bormoqda. Elektr energiyasi ishlab chiqarishda QTEM ulushini 2030 yilgacha 40% yoki hatto 50% ga yetkazish, QTEMning o‘rnatilgan quvvatini esa 27 GVt ga yetkazish kabi ulkan maqsadlar qo‘yilgan. Quyosh energetikasiga alohida e’tibor qaratilib, 2030 yilgacha 10 GVt quyosh quvvatiga erishish maqsadi qo‘yilgan[44].

QTEM rivojlanishini rag‘batlantirish uchun energetika sektorida islohotlar o‘tkazilmoqda, jumladan, “O‘zbekenergo” davlat monopoliyasini “ajratish” (unbundling) va sektorni tartibga solish va isloh qilish uchun Energetika vazirligini tashkil etish. Yirik quyosh elektr stansiyalarini qurish bo‘yicha ochiq tenderlar orqali xususiy investitsiyalar faol jalb qilinishi rekord darajada past tariflarga (1.8-2.7 AQSh senti/kVt·soat) erishishga olib keldi. Kichik qurilmalarni qo‘llab-quvvatlash mexanizmlari ham mavjud, jumladan, o‘z iste’molidan ortiqcha tarmoqqa uzatilgan har bir kVt·soat uchun 1000 so‘m ($0.09) subsidiya beriladigan “Quyoshli xonadon” dasturi va soliq imtiyozlari, komponentlarni import qilishda bojxona to‘lovlaridan ozod qilish[45]. 2025 yil iyulidan boshlab quyosh panellari va kollektorlari narxining 20 foizini qoplash uchun subsidiyalar joriy etilishi rejalashtirilgan[46].

O‘zbekiston binolarning energiya samaradorligini oshirish bo‘yicha choralar ko‘rmoqda. 2011 yilda 10 ta majburiy qurilish normasi qayta ko‘rib chiqildi. Bu jarayonlar devorlarning issiqlik qarshiligiga qo‘yiladigan talablarni 10-32% ga va tomlarnikini 22-34% ga (energiya samaradorligining birinchi darajasi uchun) oshirishga olib keldi[47]. Energiya samaradorligining uchta darajasi joriy etildi, bunda ikkinchi daraja (devorlarning issiqlik qarshiligini islohotdan oldingi standartlarga nisbatan 1.9-2.3 baravar va tom/pollarnikini 1.7-2 baravar oshirish bilan) davlat tomonidan moliyalashtiriladigan binolar uchun majburiy va xususiy quruvchilar uchun tavsiya etiladi. Binolarning energiya samaradorligini sertifikatlash tizimini belgilovchi 17 ta davlat standarti ishlab chiqilgan[48].

Yagona davlat siyosatini amalga oshirish va rag‘batlantirish choralarini tartibga solish uchun Milliy energiya samaradorligi agentligini tashkil etish rejalashtirilgan[49]. 2025 yil 1 oktyabrgacha ishlab chiqaruvchilar va import qiluvchilar uchun energiya samaradorligining “yashil” standartlari joriy etilishi kerak[50]. 2025 yil 1 iyundan boshlab binolarni qurish va rekonstruksiya qilishda loyiha hujjatlariga moliyalashtirish manbalaridan qat’i nazar, o‘z ehtiyojlari uchun energiya tejovchi uskunalarni, muqobil isitish tizimlarini (issiqlik nasoslari, quyosh kollektorlari) va QTEM qurilmalarini (quyosh panellari) majburiy o‘rnatish

ISSN 3030-3907

talablari kiritilishi kerak[51]. Shuningdek, energiya samaradorligining raqamli platformasini va energiya samaradorligini targ‘ib qilish va qo‘llab-quvvatlash fondini yaratish rejalashtirilgan[52]. Ushbu chora-tadbirlar O‘zbekistonda BIPV va BIPV/T tizimlarini yangi va rekonstruksiya qilinayotgan binolarga, shu jumladan passiv uylarga integratsiyalash uchun qulay normativ bazani yaratadi. O‘zbekiston qurilish sektori o‘sishni namoyish etmoqda, transport, uy-joy va QTEMga investitsiyalar hisobiga 2026-2029 yillarda o‘rtacha yillik o‘sish sur’ati taxminan 5.2% ni tashkil etishi prognoz qilinmoqda[53].

Taklif etilayotgan tadqiqot metodologiyasi

O‘zbekiston sharoitida passiv binolarga vertikal BIPV va BIPV/T tizimlarini integratsiyalashning energetik, texnik va iqtisodiy salohiyatini har tomonlama baholash uchun dinamik modellashtirish va texnik-iqtisodiy tahlilga asoslangan kompleks yondashuvdan foydalanish taklif etiladi.

Xulosa

Quyosh energetikasi tizimlarini, ayniqsa BIPV va BIPV/T ni, passiv binolarning vertikal qismlariga integratsiyalash binolarning yuqori energiya samaradorligi va energetik mustaqilligiga erishish uchun istiqbolli strategiya hisoblanadi, ayniqsa zich shahar qurilishi sharoitida. Ushbu sinergiya passiv bino konsepsiyasining energiya tejash afzalliklarini mahalliy toza energiya ishlab chiqarish imkoniyatlari bilan birlashtirish imkonini beradi.

Biroq, adabiyotlar va muammolar tahlili ko‘rsatganidek, bunday integratsiyalangan tizimlarning samaradorligi, issiqlik o‘zaro ta’siri va iqtisodiy maqsadga muvofiqligini tushunish va miqdoriy baholashda sezilarli bo‘shliq mavjud, ayniqsa passiv binolarning o‘ziga xos talablari (issiqlik ko‘priklarini minimallashtirish, qizib ketish xavfini boshqarish) va O‘zbekiston iqlimi kabi muayyan mintaqaviy sharoitlarga nisbatan. Fasad BIPV/T tizimlarida issiqlik va havo oqimlarini modellashtirishning murakkabligi, shuningdek, real monitoring ma’lumotlarining yetishmasligi ularning salohiyatini baholashni yanada qiyinlashtiradi.

Ilg‘or dinamik modellashtirish vositalaridan (EnergyPlus/TRNSYS) foydalanish, O‘zbekistonning iqlim xususiyatlarini, passiv uyning o‘ziga xosligini (shu jumladan issiqlik ko‘priklari va qizib ketish xavfini) batafsil hisobga olish, shuningdek, puxta texnik-iqtisodiy tahlil o‘tkazish vertikal integratsiyalangan PV va PV/T tizimlarining energetik, texnik va iqtisodiy salohiyati to‘g‘risida ilmiy asoslangan ma’lumotlarni olish imkonini beradi.

Ushbu tadqiqot natijalari O‘zbekistonda energiya samarador binolarni loyihalash va qurish amaliyotini rivojlantirishga sezilarli hissa qo‘shishi, standartlar ishlab chiquvchilar va siyosatchilar uchun qimmatli ma’lumotlar taqdim

ISSN 3030-3907

etishi, shuningdek, energiya samaradorligi, qayta tiklanuvchi energiya manbalaridan foydalanish va iqlim o‘zgarishi oqibatlarini yumshatish bo‘yicha milliy maqsadlarga erishishga yordam berishi kutilmoqda.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO‘YXATI

1. Abediniangerabi, B., & Adelnia, H. (2024). Dynamic and Renewable Source Building Envelopes (DREBE): A Systematic Review. *Buildings, 9*(2), 41. https://doi.org/10.3390/buildings9020041

2. Al-Obaidi, K. M. (2017). *Self-Shading Façade Geometries to Control Summer Overheating in UK Passivhaus Dwellings for Current and Future Climate Scenario*. University of Liverpool Repository. https://livrepository.liverpool.ac.uk/3009183/

3. Albatayneh, A., Alterman, D., Page, A., Moghtaderi, B., & Tse, K. T. (2024). Overheating Risk in Passive House Buildings: A Systematic Review of Contributing Factors, Mitigation Strategies, and Future Directions. *Buildings, 14*(8), 2501. https://doi.org/10.3390/buildings14082501

4. Alhamzah, N., & Go, Y. I. (2023). Design and assessment of building integrated PV (BIPV) system towards net zero energy building for tropical climate. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1194*(1), 012039. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1194/1/012039

5. Ascione, F., Bianco, N., Mauro, G. M., & Napolitano, D. F. (2021). Building-integrated photovoltaic systems (BIPVT): Experimental investigation, numerical analysis and simplified modelling of a case study. *Energies, 14*(8), 2191. https://doi.org/10.3390/en14082191

6. Asian Development Bank (ADB). (2014a). *Corridor Performance Measurement and Monitoring: A Forward-Looking Retrospective*.

7. Asian Development Bank (ADB). (2014b). *Guidelines for Wind Resource Assessment: Best Practices for Countries Initiating Wind Development*. https://www.adb.org/publications/guidelines-wind-resource-assessment-best-practices-countries-initiating-wind-dev

8. Asian Infrastructure Investment Bank (AIIB). (2024). *Project Document: Uzbekistan - Accelerating the Uzbekistan Climate Transition for Green, Inclusive, and Resilient Economic Growth, Subprogram 1*.

9. Athienitis, A. K., Barbour, E., Ramadan, M., & Candanedo, J. A. (2011). Thermal zoning and interzonal airflow in the design and simulation of solar houses: a sensitivity analysis. *Journal of Building Performance Simulation, 4*(3), 217-231. https://doi.org/10.1080/19401493.2010.528031

10. Beyond Investments Group. (2023). *Uzbekistan 2023 Renewable Energy*. https://www.beyondinvestmentsgroup.com/uzbekistan2023-renewable-energy

ISSN 3030-3907

11. Bianchi, F. M., Heim, D., Knera, D., & Wieprzkowicz, A. (2025). Emerging façade technologies for building performance simulation: A review of physical models, challenges and future scenarios. *Journal of Building Performance Simulation, 18*(2), 149-174. https://doi.org/10.1080/19401493.2025.2472304
12. Biyik, E., Araz, M., Hepbasli, A., Shahrestani, M., Yao, R., Shao, L., Essah, E., Oliveira, A. C., del Caño, T., Rico, E., Lechón, J. L., Andrade, L., Mendes, A., & Atlı, Y. B. (2017). A key review of building integrated photovoltaic (BIPV) systems. *Engineering Science and Technology, an International Journal, 20*(3), 833–858. https://doi.org/10.1016/j.jestch.2017.01.009
13. Black & Veatch. (n.d.). *Wind Resource Assessment* [Video]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=uwyV07VBoQw
14. Bobojonov, S. I., & Valiev, S. A. (2023). Architecture of Traditional Residential Buildings Appropriate to Historical Cities. *ResearchGate*.
15. Business Wire. (2025, May 9). *Uzbekistan Construction Market Outlook Report 2025 | Average Annual Growth Rate of 5.2% Forecast During 2026-2029 - ResearchAndMarkets.com*.
16. CEIC Data. (n.d.). *Uzbekistan Construction Works: Year to Date: Index*. Retrieved May 12, 2025, from https://www.ceicdata.com/en/uzbekistan/construction-works-value/construction-works-ytd-index
17. Central Asia Climate Information Portal (CACIP). (n.d.). *From June 1, 2025, new buildings and reconstructed buildings in Uzbekistan will be required to install solar panels and water heaters*. Retrieved May 12, 2025, from
18. Chen, Y., Liu, J., Yang, H., & Xuan, Q. (2024). A scientometric review of building-integrated photovoltaics (BIPV): Science and technology, market products, and implementation impediments. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 23*(6), 2725-2746. https://doi.org/10.1080/13467581.2024.2421263
19. Colturi, M., & Saldanha, C. (2023, November). *A Comparison of Calculation Methods for Thermal Bridges in Building Enclosures*. Paper presented at PhiusCon 2023.
20. de Farias Neto, J. A., de Lima Tostes, M. E., Diniz, A. S. A. C., & Ribeiro, R. P. (2025). Performance Analysis of a BIPV System on Facades in João Pessoa, Brazil. *Buildings, 18*(4), 829. https://doi.org/10.3390/buildings18040829
21. Eggers, J. B., Kramer, K., Schmidt, S., & Neuhaus, H. (2024). Living Lab for Building-Integrated Photovoltaics (BIPV)—Monitoring Concept and First Results. *Buildings, 18*(5), 1293. https://doi.org/10.3390/buildings18051293

ISSN 3030-3907

22. Enerdata. (2024, January 23). *Uzbekistan targets 27 GW of renewable capacity, 40% in power generation by 2030*.
23. Fallah, B., Singh, V. P., & Russo, E. (2025). Deep learning-based downscaling of CMIP6 precipitation projections over central Asia. *Geoscientific Model Development, 18*(1), 161-180. https://doi.org/10.5194/gmd-18-161-2025
24. Fokaides, P. A., & Apanaviciene, R. (2020). *Investigation of the passive contribution of a BIPV/T Double Facade System in the energy renovation of an existing building in Nicosia, Cyprus: A Case-Study*. ResearchGate.
25. Fraunhofer ISE. (2024, December 20). *Quick to Install and Thermally Insulated BIPV Façade Element*.
26. Giannini, M., Moretti, N., & Vaccaro, A. (2024). *A Review on Building-Integrated Photovoltaics: Focus on Bifacial and Semitransparent Solar Systems*. arXiv preprint arXiv:2404.01284. https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.01284
27. Global Green Growth Institute (GGGI). (2025). *Uzbekistan Country Planning Framework 2024-2028*.
28. Global Solar Atlas. (n.d.). *Uzbekistan*. Solargis for The World Bank. Retrieved May 12, 2025, from https://globalsolaratlas.info/download/uzbekistan
29. Google Scholar. (n.d.). *Zakinta Norwood - Citations*. Retrieved May 12, 2025, from https://scholar.google.se/citations?user=XrDActAAAAAJ&hl=en
30. Goulart, M. F., & Labaki, L. C. (2022). Thermal performance of opaque ventilated facades: A systematic review. *PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção, 13*, e022026. https://doi.org/10.20396/parc.v13i00.8667308
31. Heatflux. (n.d.). *Thermal Bridging in Passivhaus and PHPP*. Retrieved May 12, 2025, from https://www.heatflux.co.uk/thermal-bridging-passivhaus/
32. Higgins, C., Shane, P., & Finch, G. (2014, September). *Thermal Bridging Through Exterior Insulation*. Paper presented at the North American Passive House Conference.
33. Zokirov, S. I., Obidjonov, Z. O., & Tursunov, X. X. (2019). Quyosh panellarining optimal og'ish burchagi, yo'l qo'yilgan xatolik va energiya yo'qotish foizini hisoblash algoritmini ishlab chiqish. *Texnika va texnologik fanlar sohalarining innovatsion masalalari. Respublika ilmiy-anjumani*, 205-207.
34. IEA & CMCC. (n.d.). *Weather for Energy Tracker*. International Energy Agency & Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici. Retrieved May 12, 2025, from https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/weather-climate-and-energy-tracker
35. IEA PVPS Task 15. (2025). *Building-Integrated Photovoltaics: Technical Guidebook*. International Energy Agency Photovoltaic Power Systems

ISSN 3030-3907

Programme. https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2025/02/Building-Integrated-Photovoltaics-Technical-Guidebook.pdf

36. Infield, D., Eicker, U., Fux, V., Gagliano, A., & Mei, L. (2006). Thermal modelling of a building with an integrated ventilated PV facade. *Proceedings of EuroSun 2006*.

37. International Energy Agency (IEA). (2022). *Solar Energy in Uzbekistan: A Roadmap*.

38. International Finance Corporation (IFC). (2022). *In Uzbekistan, Solar Power Fires Up Reforms and Investment in Energy Sector*. https://www.ifc.org/en/stories/2022/uzbekistan-solar-power

39. Juaristi, M., Monge-Barrio, A., & González, M. A. G. (2023). Real-time adaptive BIPV shading systems: Comparing static vs. dynamic performance for visual comfort and energy generation potential. *Frontiers in Built Environment, 9*, 1119696. https://doi.org/10.3389/fbuil.2023.1119696

40. Juncess. (2024, June 11). *Uzbekistan PV Market Analysis: Policy, Prices, and Potential*. https://www.juncess.com/news_1/1910606986911838208.html

41. Kuchkarov, A., Nomanjonov, S., Muzafarova, N., Abduraimov, A., Obidjonov, Z., & Okhunov, S. (2024). Methods to increase heat and energy efficiency using energy saving technologies in buildings. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 592, p. 03026). EDP Sciences.

42. Kuhn, T. E., Erban, C., Heinrich, M., Eisenlohr, J., Ensslen, F., & Neuhaus, D. H. (2021). Review of technological design options for building integrated photovoltaics (BIPV). *Energy & Buildings, 231*, 110381. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110381

43. Kumar, R., Mathur, J., Mathur, S., Singh, M. K., & Loftness, V. (2024). Experimental investigation and validation of mathematical models for a multi-storey building integrated with a mechanically ventilated photovoltaic-double skin façade system under cold weather conditions. *Building Engineering, 90*, 109760. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109760

44. Lee, J. W., Jung, H. J., & Lee, J. H. (2020). Calibration of Building-Integrated Photovoltaic Model Parameters Using Optimization Algorithm Based on In Situ Measurements. *Energies, 13*(18), 4935. https://doi.org/10.3390/en13184935

45. Loonen, R. C. G. M., Trčka, M., Hensen, J. L. M., & Kernkamp, A. (2019). Potential and limitations of using building performance simulation in the R&D of innovative building components. *Journal of Building Performance Simulation, 12*(6), 745-765. https://doi.org/10.1080/19401493.2018.1561754

46. MarketResearch.com. (2024). *Uzbekistan Construction Market Size, Trends, and Forecasts by Sector - Commercial, Industrial, Infrastructure, Energy and*

ISSN 3030-3907

Utilities, Institutional and Residential Market Analysis to 2028 (H2 2024). GlobalData.

47. MarketsandMarkets. (n.d.). *US Tariff Impact on Building Integrated Photovoltaic (BIPV) Industry*. Retrieved May 12, 2025, from https://www.marketsandmarkets.com/ResearchInsight/us-tariff-impact-building-integrated-photovoltaic-bipv-industry.asp

48. Maysun Solar. (2025, April 29). *How BIPV is Changing the Commercial and Industrial Rooftop Solar Market*.

49. Meteoblue. (n.d.). *Weather Archive Tashkent*. Retrieved May 12, 2025, from https://www.meteoblue.com/en/weather/historyclimate/weatherarchive/tashkent_uzbekistan_1512569

50. Kuchkarov, A., Mamatov, O., Juraboev, N., Obidjonov, Z., Muzaffarova, N., & Qosimov, S. (2024, November). Modelling solar water desalination system using natural convection. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 508, p. 02004). EDP Sciences.

51. NASA Earthdata. (n.d.). *ERA5 Reanalysis*. Retrieved May 12, 2025, from https://www.earthdata.nasa.gov/dashboard/data-catalog/blizzard-era5

52. National Renewable Energy Laboratory (NREL). (n.d.). *NSRDB: National Solar Radiation Database - TMY Data*. Retrieved May 12, 2025, from https://nsrdb.nrel.gov/data-sets/tmy

53. Passive House Institute. (n.d.-a). *PHPP - the Passive House Planning Package*. Passipedia. Retrieved May 12, 2025, from https://passipedia.org/planning/calculating_energy_efficiency/phpp_-_the_passive_house_planning_package

ISSN 3030-3907