

Ağıllı şəhərlər üçün dayanıqlı istilik həlləri: Füzulidə geotermal və günəş enerjisi integrasiyalı istilik nasoslarının səmərəliliyi

Sevinc Babayeva^{1*} , Sübhan Xudayev² 

Xülasə. Tədqiqat işində Azərbaycanın “Yaşıl Enerji Zonası” kimi adlandırılan Füzuli rayonunun özünə xas olan iqlim və coğrafi şəraitində müxtəlif formalı hibrid istilik nasosu sistemlərinin enerji səmərəliliyi “GeoTsol” simulyasiya proqramı vasitəsilə müqayisəli şəkildə təhlil olunur. Tədqiqatın əsas hədəfi regionun yüksək günəş radiasiyası potensialı və geotermal ehtiyatlarından maksimum dərəcədə istifadə edərək, yaşayış binalarının isidilməsi üçün ən optimal və dayanıqlı texniki komponentləri müəyyən etməkdir. İş çərçivəsində dörd fərqli ssenari (HPS2, HPS3, HPS4 və HPS5) üzrə şaquli torpaq zondları və günəş termal kollektorlarının simulə edilməsi dinamik şəkildə tədqiq edilmişdir. Simulyasiya nəticələrinə əsaslanaraq deyə bilərik ki, torpaq-mənbəli istilik nasoslarının günəş enerjisi ilə sinergetik fəaliyyəti həm sistemin illik səmərəlilik göstəricilərini əhəmiyyətli dərəcədə artırır, həm də yay aylarında torpağın termal enerjisinin bərpasına imkan yaradaraq sistemin uzunmüddətli istismarı zamanı torpağın termal balansını qoruyur. Əldə olunan nəticələrə əsaslanaraq, təmiz enerji texnologiyalarının tətbiqi ilə ənənəvi enerji istehlakının və karbon emissiyalarının azaldılmasının mümkünliyünü sübut edir. Tədqiqatın nəticələri Füzuli rayonunda həyata keçirilən “Ağıllı şəhər” və “Ağıllı kənd” layihələrinin enerji infrastrukturunu üçün mühüm texniki-iqtisadi baza formalaşdırır.

Açar sözlər: istilik nasosu, GeoTsol, Füzuli, yaşıl enerji zonası, günəş enerjisi, geotermal enerji, hibrid sistemlər, COP

¹ Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti, texnika üzrə fəlsəfə doktoru, Bakı, Azərbaycan

² Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti, magistrant, Bakı, Azərbaycan

* Məsul müəllif. E-poçt: babayeva_sevinc64@mail.ru

Daxil oldu: 6 Fevral 2026; Qəbul edildi: 9 May 2026; Onlayn dərc edildi: 30 May 2026

© Müəllif(lər) 2026. Bu, Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 Beynəlxalq Lisenziyası (CC BY-NC 4.0) şərtləri altında paylanan açıq girişli məqalədir.

Sustainable Heating Solutions for Smart Cities: The Efficiency of Geothermal and Solar Energy Integrated Heat Pumps in Fuzuli

Sevinj Babayeva^{1*} , Subhan Khudayev² 

Abstract. In this study work, using “GeoTsol” simulation software, a comparative examination of the energy performance of various hybrid heat pump system designs in Fuzuli area of Azerbaijan, which is designated a “Green Energy Zone”, is presented. The main goal of the study is to determine the

most effective and sustainable technical configuration for residential heating using high solar radiation potential and geothermal resources of the region. A dynamic analysis of four different cases with vertical ground probes and solar thermal collectors (HPS2, HPS3, HPS4 and HPS5) was performed. The simulation findings show that the combined operation of the ground-source heat pumps with solar energy greatly improves the yearly Coefficient of Performance and provides long-term system stability by enabling the ground thermal recharge in the summer months. This method is efficient to keep the thermal balance of the soil for long term operation and maximizes the energy savings. Results of this study are an important techno-economic basis for the energy infrastructure of the projects “Smart City” and “Smart Village” implemented in the freed areas of Azerbaijan.

Keywords: heat pump, GeoTsol, Fuzuli, Green Energy Zone, Solar energy, Geothermal energy, Hybrid systems, COP

¹ Azerbaijan State Oil and Industry University, PhD in Engineering, Baku, Azerbaijan

² Azerbaijan State Oil and Industry University, Master's student, Baku, Azerbaijan

* Corresponding author. E-mail: babayeva_sevinc64@mail.ru

Received: February 6, 2026; Accepted: May 9, 2026; Published online: May 30, 2026

© Author(s) 2026. This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

Giriş

Qlobal iqlim dəyişikliyi və ekoloji tarazlığın qorunması müasir dövrdə bərpa olunan enerji mənbələrindən istifadəni zərurətə çevirmişdir. Azərbaycan Respublikasının 2030-cu ilə qədər olan milli prioritetləri çərçivəsində “Təmiz ətraf mühit və yaşıl artım ölkəsi” hədəfi xüsusi yer tutur. Bu kontekstdə işğaldan azad edilmiş ərazilərin, xüsusilə Füzuli rayonunun “Yaşıl Enerji Zonası” elan edilməsi, regionun bərpa olunan enerji potensialının mənimsənilməsi üçün geniş imkanlar açır. “Ağıllı şəhər” və “Ağıllı kənd” konsepsiyaları əsasında yenidən qurulan bu ərazilərdə enerji səmərəliliyi yüksək olan istilik sistemlərinin tətbiqi həm ekoloji, həm də iqtisadi baxımdan strateji əhəmiyyət kəsb edir (Hajiyeva və Karimli, 2021).

Füzuli rayonu özünün coğrafi mövqeyi və iqlim şəraiti ilə yüksək günəş enerjisi potensialına (illik günəş radiasiyası 1600-1700 kVt.st/m²) malikdir (Gulaliyev və b., 2020). Eyni zamanda, regionun geoloji quruluşu torpaq-mənbəli istilik nasoslarının səmərəli istifadəsi üçün əlverişli geotermal gradient təqdim edir (İslamzadə və Mukhtarov, 2024). Lakin ənənəvi istilik sistemlərindən fərqli olaraq, torpaq və günəş enerjisinin integrasiya olunduğu hibrid sistemlər həm enerji istehlakını minimuma endirir, həm də sistemin il boyu stabil fəaliyyətini təmin edir (Li və b., 2025; Nazari və b., 2023).

Tədqiqatlar göstərir ki, torpaq-mənbəli istilik nasosları təkbaşına istifadə edildikdə uzunmüddətli perspektivdə torpağın termal balansının pozulmasına və səmərəliliyin aşağı düşməsinə səbəb ola bilər (Bina və b., 2025). Bu problemin həlli üçün günəş termal kollektorlarının və fotoelektrik panellərin sistemə integrasiyası ən optimal çıxış yoludur (Wang və b., 2024; Sun və b., 2020). Günəş enerjisindən əldə olunan istiliyin yay aylarında torpağa ötürülməsi torpağın termal bərpasını təmin edərək, qış mövsümündə sistemin daha yüksək performansla işləməsinə şərait yaradır (Kropas və b., 2022; Nallimilli və b., 2025). Bu tədqiqat işində GeoTsol simulyasiya proqramı vasitəsilə Füzuli rayonundakı yaşayış binaları üçün dörd fərqli hibrid istilik nasosu ssenarisi (HPS2, HPS3, HPS4 və HPS5) tədqiq edilmişdir. Tədqiqatın əsas məqsədi regionun iqlim parametrlərini nəzərə alaraq, ən yüksək mövsümi səmərəlilik və fotoelektrik ötürülmə dərəcəsinə malik olan texniki konfigurasiyanı müəyyən etməkdir. Bu analizlər, Füzulidə həyata keçirilən yenidənqurma işlərində enerji infrastrukturunun layihələndirilməsi üçün elmi-praktiki baza rolunu oynayır (Hajiyeva və

Karimli, 2021; Islamzade və Mukhtarov, 2024).

Cədvəl 1

İllik enerji istehlakı və PV özünütəminatmə göstəriciləri

İstilik Mənbəyi	1. İstilik nasosunun	2. PV özünütəminatmə dərəcəsi (%)
	Elektrik istehlakı (kVt*saat)	
Torpaq Zond HPS2	1550	12.40%
Torpaq Zond HPS3	793	21.30%
Torpaq Zond HPS4	1079	18.50%
Torpaq Zond HPS5	1696	12.60%
Torpaq Kollektor HPS2	1567	11.60%
Torpaq Kollektor HPS3	898	19.90%
Torpaq Kollektor HPS4	1018	18%
Torpaq Kollektor HPS5	1839	13%

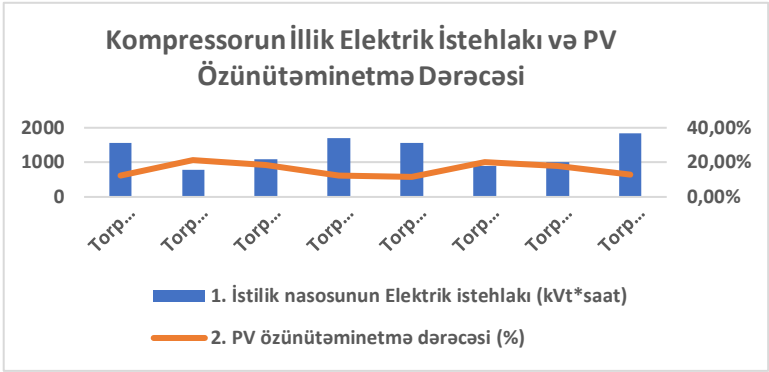
Tədqiqat

Tədqiqat işində istilik nasosu sistemlərinin layihələndirilməsi və optimallaşdırılması üçün beynəlxalq səviyyədə qəbul edilmiş GeoTsol dinamik simulyasiya proqramından istifadə edilmişdir. GeoTsol, torpaq, hava və su mənbəli istilik nasoslarının günəş termal kollektorları və fotoelektrik panellərlə hibrid integrasiyasını modelləşdirməyə imkan verən peşəkar mühəndis alətidir (Nallimilli və b., 2025). GeoTsol daxili *Meteonorm* məlumat bazasından istifadə edərək Füzuli rayonunun coğrafi koordinatlarına (enlik və uzunluq) uyğun saatlıq günəş radiasiyası, xarici hava temperaturu və küləyin sürəti kimi parametrləri simulyasiyaya daxil edir (Gulaliyev və b., 2020; Hacıyeva və Karimli, 2021). Proqram istilik nasosu, akkumulyasiya çəni, istehlakçı (bina) və istilik mənbəyi (zond/kollektor) arasındakı enerji axınlarını saniyəlik intervallarla hesablayır. Bu, sistemin real istismar şəraitindəki davranışını 95-98% dəqiqliklə proqnozlaşdırmağa imkan verir (Li və b., 2025; Wang və b., 2024).

Füzuli rayonunun “Yaşıl Enerji Zonası” konsepsiyasına uyğun olaraq, fərdi yaşayış binasının istilik təchizatı həmin proqram təminatı vasitəsilə modelləşdirilmişdir. Tədqiqatda torpaq-mənbəli istilik nasoslarının iki fərqli yerüstü istilik mübadiləsi sistemi – şaquli torpaq zonu və üfüqi torpaq kollektoru müqayisə edilmişdir. Hər bir sistem daxilində günəş enerjisinin integrasiya səviyyəsinə görə 4 müxtəlif hibrid ssenari (HPS2, HPS3, HPS4, HPS5) təhlil olunmuşdur.

Ssenarilər üzrə əldə olunan illik elektrik istehlakı göstəriciləri sistemin iqtisadi səmərəliliyini müəyyən edən əsas amildir. Tədqiqat nəticəsində əldə olunan enerji istehlakı qrafiki göstərir ki, hibridləşmə səviyyəsi artdıqca şəbəkədən asılılıq kəskin şəkildə azalır.

Cədvəldən göründüyü kimi, torpaq zonu tətbiq edilən HPS3 ssenarisi 793 kVt*saat/il istehlakla ən yüksək performans göstərmişdir. Bu ssenaridə PV panellər vasitəsilə sistemin enerji tələbatının 21.30%-i birbaşa günəş enerjisindən ödənilir. Bu, Füzuli rayonunun yüksək insolasiya dərəcəsi ilə birbaşa əlaqədardır (Gulaliyev və b., 2020; Hacıyeva və Karimli, 2021). HPS5 ssenarilərində istehlakın artması, yay aylarında torpağın termal bərpası üçün istifadə olunan aktiv nasos işi ilə əlaqədardır. Bu yanaşma cari enerji sərfiyyatını artırsa da, torpağın uzunmüddətli soyumasının qarşısını alır (Li və b., 2025; Nallimilli və b., 2025).



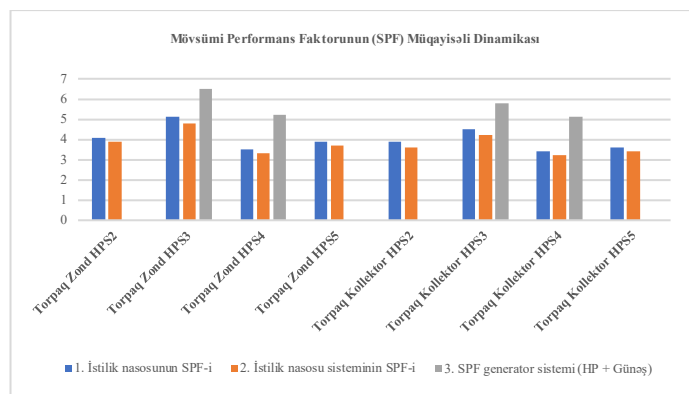
Şəkil 1
Ssenarilər üzrə illik elektrik istehlakı

Sistemin səmərəliliyi SPF göstəriciləri əsasında Şəkil 2-də müqayisə edilmişdir. Akademik tədqiqatlar göstərir ki, SPF göstəricisinin 4-dən yuxarı olması sistemin yüksək dərəcədə səmərəli olduğunu sübut edir (Blázquez və b., 2023; Emmi və Bottarelli, 2025). Generator Sisteminin Səmərəliliyi: HPS3 ssenarisində “HP + Günəş” generator sisteminin SPF göstəricisi 6.5-ə çatmışdır. Bu, istilik nasosunun yalnız torpaqdan deyil, həm də günəş termal kollektorlarından aldığı yüksək temperaturlu enerjini istifadə etməsinin nəticəsidir (Nazari və b., 2023; Wang və b., 2024). Zond və Kollektor: Şaquli zondlarda SPF-in üfüqi kollektorlardan orta hesabla 10-15% yüksək olması, Füzulidə qış aylarında torpağın 1.5 metr dərinliyində temperaturun $+5^{\circ}\text{C}$ -yə qədər düşməsi, 100 metr dərinlikdə isə sabit $+15^{\circ}\text{C}$ qalması ilə izah olunur (Bina və b., 2025; Islamzade və Mukhtarov, 2024).

Cədvəl 2
Ssenarilər üzrə mövsümi səmərəlilik əmsalları

İstilik Mənbəyi	İstilik nasosunun SPF-i	İstilik nasosu sisteminin SPF-i	SPF generator sistemi (HP + Günəş)
Torpaq Zond HPS2	4.1	3.9	0
Torpaq Zond HPS3	5.1	4.8	6.5
Torpaq Zond HPS4	3.5	3.3	5.2
Torpaq Zond HPS5	3.9	3.7	0
Torpaq Kollektor HPS2	3.9	3.6	0
Torpaq Kollektor HPS3	4.5	4.2	5.8
Torpaq Kollektor HPS4	3.4	3.2	5.1
Torpaq Kollektor HPS5	3.6	3.4	0

Aparılan tədqiqat sübut edir ki, Füzuli kimi yüksək günəş potensialı olan regionlarda “Ağıllı şəhər” infrastrukturunun qurulmasında HPS3 ssenarisi (Hibrid Torpaq-Mənbəli İstilik Nasosu + PV/T) ən optimal həlldir. PV özünütəminatmə dərəcəsinin 20%-in üzərində olması, binaların “Sıfır Enerji İstehlakı” hədəfinə yaxınlaşmasını təmin edir (Hajiyeva və Karimli, 2021; Nallimilli və b., 2025).



Şəkil 2
Ssenarilər üzrə mövsümi səmərəlilik əmsalları

Nəticə

Füzuli rayonunun “Yaşıl Enerji Zonası” konsepsiyası çərçivəsində aparılan bu tədqiqat, hibrid torpaq-mənbəli istilik nasosu sistemlərinin regionun iqlim və geoloji şəraitinə tam uyğunluğunu sübut etmişdir. GeoTsol simulyasiya proqramı vasitəsilə təhlil edilən 8 fərqli ssenari mühüm elmi və praktiki nəticələri çıxarmağa imkan verir. Tədqiq olunan bütün variantlar arasında *Torpaq Zond HPS3* ssenarisi ən yüksək enerji səmərəliliyi nümayiş etdirmişdir. İllik cəmi 793 kVt.st elektrik istehlakı və 21.30%-lik PV özünütəminatmə dərəcəsi ilə bu sistem digər ssenariləri əhəmiyyətli dərəcədə qabaqlayır. Tədqiq olunan hibrid sistemlərin tətbiqi, binaların karbon emissiyasını minimuma endirərək, Azərbaycanın işğaldan azad edilmiş ərazilərində “Sıfır Karbon” hədəfinə nail olmağa imkan verir. Bu sistemlər “Ağıllı kənd” layihələri üçün ən etibarlı və davamlı enerji infrastrukturunun əsasını təşkil edə bilər. Yekun olaraq, Füzuli rayonunda inşa ediləcək yeni yaşayış binalarında *PV-inteqrasiyalı şaquli torpaq zond sistemlərinin (HPS3 konfigurasiyası)* tətbiqi həm iqtisadi qənaət, həm də ekoloji davamlılıq baxımından ən səmərəli həll yolu kimi tövsiyə edilir.

Ədəbiyyat

- Blázquez, C. S., Nieto, I. M., Carrasco, J., García, P. C., Martín, A. F., & González-Aguilera, D. (2023). Comparative Analysis of Ground Source and Air Source Heat Pump Systems under Different Conditions and Scenarios. *Energies*, 16(3), 1289–1289. <https://doi.org/10.3390/en16031289>
- Bina, S. M., Fujii, H., Qaisova, D., Lein, R., Rahmatov, J. Sh., & Inagaki, F. (2025). Ground source heat pump systems in Central Asia: A case study from Dushanbe, Tajikistan. *Geothermics*, 128, 103281–103281. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2025.103281>
- Emmi, G., & Bottarelli, M. (2025). Energy performance of Ground Source Heat Pump systems with flat-panel ground heat exchangers. *Energy Efficiency*, 18(7). <https://doi.org/10.1007/s12053-025-10344-y>
- Hajiyeva, N., & Karimli, A. (2021). Economic Evaluation of “Green Energy” Potential in Nagorno-Karabakh and Neighboring Regions. *Modern Applied Science*, 15(3), 71–71. <https://doi.org/10.5539/mas.v15n3p71>
- Gulaliyev, M., Mustafayev, E. R., & Mehdiyeva, G. (2020). Assessment of Solar Energy Potential and Its Ecological-Economic Efficiency: Azerbaijan Case. *Sustainability*, 12(3), 1116–1116. <https://doi.org/10.3390/su12031116>
- Kropas, T., Streckienė, G., Kirsanovs, V., & Dzikēvičs, M. (2022). Investigation of Heat Pump Efficiency in Baltic States Using TRNSYS Simulation Tool. *Environmental and Climate Technologies*, 26(1), 548–560. <https://doi.org/10.2478/rtuct-2022-0042>

7. Islamzade, A. V., & Mukhtarov, A. Sh. (2024). Geological conditions for the development of geothermal energy in Azerbaijan. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 46(3). <https://doi.org/10.24028/gj.v46i3.306353>
8. Li, H., Zhou, J., Cao, J., Zhao, M., Chen, J., Liu, L., Cuce, E., & Liu, W. (2025). Advances in photovoltaic/thermal assisted ground source heat pump: structural design, material selection, coupling integration, and control strategy optimization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 229, 116669–116669. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116669>
9. Nazari, M. A., Rungamornrat, J., Prokop, L., Blažek, V., Misak, S., Al-Bahrani, M., & Ahmadi, M. H. (2023). An updated review on integration of solar photovoltaic modules and heat pumps towards decarbonization of buildings. *Energy Sustainable Development/Energy for Sustainable Development*, 72, 230–242. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2022.12.018>
10. Nallimilli, S. reddy, PATIL, N., Chauhan, M., Mishra, A., Chohan, J. S., Singh, R., Pattanayak, B., & Pant, R. (2025). Techno-economic optimization of a novel zero CO₂ emission solar energy-assisted ground source heat pump system: Comparative assessment with conventional GSHP. *Environmental Progress & Sustainable Energy*. <https://doi.org/10.1002/ep.70305>
11. Sun, T., Yang, L., Jin, L., et al. (2020). A novel solar-assisted ground-source heat pump with seasonal heat-storage and heat cascade utilization: Field test and performance analysis. *Solar Energy*, 201, 362–372. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.03.030>
12. Wang, Y., Quan, Z., Zhao, Y., Rosengarten, G., & Mojiri, A. (2024). Techno economic analysis of integrating photovoltaic-thermal systems in ground-source heat pumps for heating-dominated regions. *Applied Energy*, 377, 124677–124677. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124677>