

UOT 629.12.066

GƏMİ ELEKTROENERGETİK SİSTEMLƏRİNİN EKOLOJİ PROBLEMLƏRİ

Sultanov E.F., Səlimova A.K., Əlicanov R.R.

“Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyası” PHŞ

Az1000, Bakı şəh., Z.Əliyeva küç., 18

E-mail: elshen_sultanov@mail.ru, afag_sk@mail.ru, ralicanov@mail.ru

Xülasə. Məqalədə Beynəlxalq Dəniz Təşkilatının (BDT) yüksək qiymətli neft məhsullarından istifadənin azaldılması və qaz emissiyalarının minimuma endirilməsi üçün getdikcə sərtləşən qaydaları fonunda gəmiçilik sənayesinin ənənəvi dizel mühərriklərindən daha təmiz və səmərəli enerji mənbələrinə keçidindən bəhs olunur. Gəmi elektrik stansiyalarında tətbiq edilən əsas alternativ enerji mənbələrinin–günəş enerjisi, külək enerjisi, batareya saxlama sistemləri və hidrogen yanacaq hüceyrələrinin ətraflı və müqayisəli təhlili aparılır. Həmçinin məqalədə hər bir texnologiyanın texniki xüsusiyyətləri, iqtisadi üstünlüyü və ekoloji problemləri hesablamalara və qrafik asılılıqlara əsaslanaraq təhlil edilmişdir.

Abstract. The article discusses the transition of the shipping industry from traditional diesel engines to cleaner and more efficient energy sources, against the backdrop of increasingly stringent International Maritime Organization (IMO) regulations to reduce the use of high-value petroleum products and minimize gas emissions. A detailed and comparative analysis of the main alternative energy sources used in ship power plants - solar energy, wind energy, battery storage systems and hydrogen fuel cells - is carried out. The article also analyzes the technical characteristics, economic advantages and environmental problems of each technology based on calculations and graphical dependencies.

Аннотация. В статье рассматривается переход судоходной отрасли от традиционных дизельных двигателей к более чистым и эффективным источникам энергии на фоне всё более строгих требований Международной Морской Организации (ММО) по сокращению использования высококачественных нефтепродуктов и минимизации выбросов газов. Проведён подробный сравнительный анализ основных альтернативных источников энергии, используемых в судовых энергетических установках: солнечной энергии, энергии ветра, аккумуляторных систем хранения энергии и водородных топливных элементов. На основе расчётов и графических зависимостей проанализированы технические характеристики, экономические преимущества и экологические проблемы каждой технологии.

Açar sözlər: gəmi, alternativ enerji, elektrik stansiyası, günəş enerjisi, külək enerjisi, hidrogen yanacaq hüceyrələri, ekologiya

Key words: ship, alternative energy, power plant, solar energy, wind energy, hydrogen fuel cells, ecology

Ключевые слова: судно, альтернативная энергетика, электростанция, солнечная энергия, ветровая энергия, водородные топливные элементы, экология

Giriş. Tərkibində müxtəlif növ elektirik avadanlığı olan gəmi elektroenergetika sistemlərinin (GEES) vəzifəsi elektrik enerjisini hasil edib paylamaqdan ibarətdir. Bura, həmçinin, elektrik enerjisi çeviriciləri, o cümlədən transformatorlar da daxildir. Gəmi qurğularının əksəriyyətinin işləməsi üçün elektrik enerjisindən istifadə olunur. Buna əsas səbəb elektrik enerjisinin məsafəyə ötürülməsinin asan başa gəlməsi, elektrotexniki qurğuların yüksək iqtisadi göstəriciləri və elektriklişmiş mexanizmlərin idarəsində böyük imkanların yaranmasıdır. Gəmi elektrik stansiyasında əsas enerji mənbəyi olan generator aqreqatı elektromaşın generatoru və onu hərəkətə gətirən mühərrikdən ibarətdir. Hərəkətverici mühərrik kimi, dizellərdən, buxar və qaz turbinlərindən istifadə olunur [1].

Gəmilərin istismarı istər-istəməz ekoloji problemlərin yaranması və həllini nəzərdə tutur. Bütün digər insan fəaliyyətləri kimi dəniz və çay gəmiləri də ekoloji təhlükə mənbəyidir. Odur ki, layihələndirmə mərhələsi ətraf mühitə atılan zərərli maddələrin miqdarının qarşısını almaq və ya minimuma endirməklə ekoloji cəhətdən təhlükəli gəmi əməliyyatlarının qarşısının alınması məsələsini həll etməlidir.

Ən təhlükəli maddələrə gəmi energetik sistemlərində (dizel mühərrikləri, qazanlar, qaz turbinli mühərriklər) enerji daşıyıcısının (yanacaq) potensial enerjisinin çevrilməsi zamanı əmələ gələn və atmosfərə buraxılan maddələr daxildir [5,6,7].

Gəmilərdə yanacaq və sürtkü materiallarının istifadəsi aşağıdakıları əhatə edir:

- səfər üçün lazım olan miqdarda yanacaq və sürtkü materiallarının çənlərdə və gəmi konteynerlərində qəbulu;
- yanacaq və sürtkü materiallarının səfər üçün ayrılmış vaxt ərzində çənlərdə və gəmi konteynerlərində saxlanması;
- potensial enerjisini çevirmək üçün çatdırılmadan əvvəl yanacağın hazırlanması;
- yanacağın hazırlanması prosesindən tullantıların yığılması və utilizasiyası və təkrar istifadə olunan mühərrik yağlarının, habelə işlənmiş silindr yağlarının təmizlənməsi;
- təmizləyici mayelərdən istifadə etməklə çənlərin, qabların və digər avadanlığın yanacaq və yağ yataqlarının təmizlənməsi;
- çən, konteyner və digər təmizləyici tullantıların yığılması və quruya atılması.

Yanacaq və sürtkü materiallarından istifadə ətraf mühitin onların buxarlanma məhsullarından qorunması məsələsini gündəmə gətirir. Dəyişkənlik müxtəlif yanacaq və sürtkü materialları arasında dəyişir: benzin sürtkü və ya ağır yanacaq yağlarından əhəmiyyətli dərəcədə yüksək dəyişkənliyə malikdir. Neft məhsulunun dəyişkənliyi onun fraksiya tərkibi ilə müəyyən edilir. mi elektrik stansiyalarının ilkin dizel mühərrikləri tərəfindən havaya buraxılan qazlarının

zərərli olmasını və onun təsirini aradan qaldırılması üsullarını araşdırmaq məqsədi ilə məqalədə gəmi elektrik stansiyalarında tətbiq edilən əsas alternativ enerji mənbələrinin – günəş enerjisi, külək enerjisi, batareya saxlama sistemləri və hidrogen yanacaq hüceyrələrinin geniş, texniki xüsusiyyətləri, səmərəliliyi, iqtisadi üstünlüyü və ekoloji faydaları hesablamalara və qrafik asılılıqlara əsaslanaraq təhlil edilmişdir.

Məlum olduğu kimi, dəniz nəqliyyatı global ticarətin onurğa sütununu təşkil etsə də, eyni zamanda global istixana qazı emissiyalarının təxminən 3%-nə sahibdir. Beynəlxalq Dəniz Təşkilatı (BDT) 2050-ci ilə qədər gəmiçilikdən yaranan istixana qazı emissiyalarını 2008-ci il səviyyəsi ilə müqayisədə əhəmiyyətli dərəcədə azaltmağı hədəfləyir. Bu ambisiyalı hədəfə çatmaq üçün yeni texnologiyalara keçid zəruridir. Bu kontekstdə, ənənəvi dizel-generatorlarına alternativ olaraq günəş, külək, batareya və hidrogen kimi təmiz enerji mənbələrinin gəmi elektrik stansiyalarına inteqrasiyası getdikcə daha çox əhəmiyyət kəsb edir. Məqalədə, adı çəkilən alternativ enerji mənbələrinin müqayisəli təhlilini apararaq, onların texniki-iqtisadi və ekoloji göstəriciləri konkret hesablamalar və qrafiklər vasitəsilə təqdim edilmişdir [2,3,4].

Əsas hissə. Bu təhlildə hər bir alternativ enerji mənbəyinin kəfiyyətini qiymətləndirmək üçün standart bir yanaşma tətbiq edilmişdir. Müqayisə üçün orta ölçülü yük gəmisi nümunə “Maestro Niyazi (layihə 19610)” tipli quru yük gəmisi seçilmişdir. Hər bir texnologiya üçün aşağıdakı parametrlər nəzərə alınmışdır:

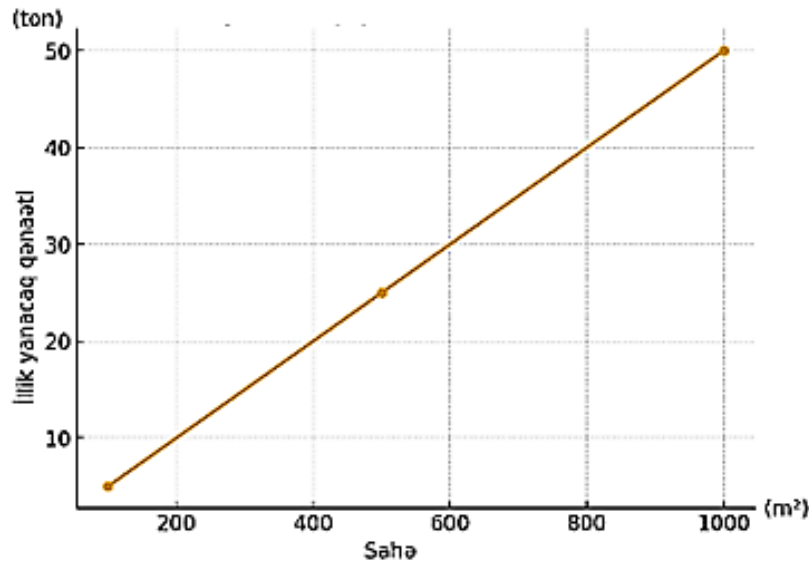
- *Enerji istehsalı: Vahid sahəyə və ya vahid qurğuya düşən enerji istehsalı və ya yanacağa qənaət;*
- *İlkin investisiya xərcləri: Sistemin alınması və quraşdırılması ilə bağlı bütün xərclər;*
- *Əməliyyat xərcləri: Baxım, təmir və digər cari xərclər;*
- *Yanacaq qənaəti və geri ödəmə müddəti: Texnologiyanın yanacaq sərfiyyatını nə qədər azaltdığı və ilkin investisiyanı nə qədər müddətə geri qaytardığı;*
- *Emissiyaların azaldılması: CO₂, SO_x, və NO_x kimi zərərli tullantıların azaldılma miqdarı.*

Hesablamalar üçün mövcud ədəbiyyatlardan, sənaye hesabatlardan və texniki xüsusiyyətlərdən əldə edilən real məlumatlardan istifadə edilmişdir.

Gəmilərin göyertəsindəki geniş boş sahələr fotovoltaiq (PV) panellərin quraşdırılması üçün əlverişli bir mühit yaradır. Günəş panelləri gəminin köməkçi enerji ehtiyaclarını (ışıqlandırma, naviqasiya avadanlıqları və s.) ödəməyə və bununla da əsas mühərrikin yükünü azaltmağa kömək edə bilər. Dəniz mühitində günəş panellərinin səmərəliliyi bir neçə faktordan asılıdır. Günəş radiasiyasının intensivliyi (kVt/m²/gün), panelin növü və temperatur. Ortalama olaraq, müasir tipli PV panellərinin səmərəliliyi 20-22% təşkil edir. Məsələn, 1 m² panel gündə təxminən 1-1.2 kVt enerji istehsal edə bilər. 500 m² sahəyə malik bir PV sistemi olan bir gəmi, gün ərzində təxminən 500-600 kVt elektrik enerjisi istehsal edə bilər. Bir PV sisteminin ilkin investisiya xərci təxminən 1000-1500 ABŞ dolları təşkil edir. 100 kVt gücündə bir sistem üçün bu, 100,000-150,000 ABŞ dolları deməkdir. Gəmi dizelinin hazırkı qiymətlərini nəzərə alsaq, belə bir sistemin təmin etdiyi yanacaq qənaəti ilə geri ödəmə müddəti 5-8 il arasında dəyişə bilər. Günəş panelləri istismar zamanı sıfır emissiya yaradır. 100 kVt gücündə bir sistem, ildə təxminən 50-60 ton CO₂ emissiyasının qarşısını ala bilər. Şəkil 1-də Sahə (m²) ilə illik yanacaq qənaəti (ton) arasındakı xətti asılılıq göstərilmişdir [2,3,4].

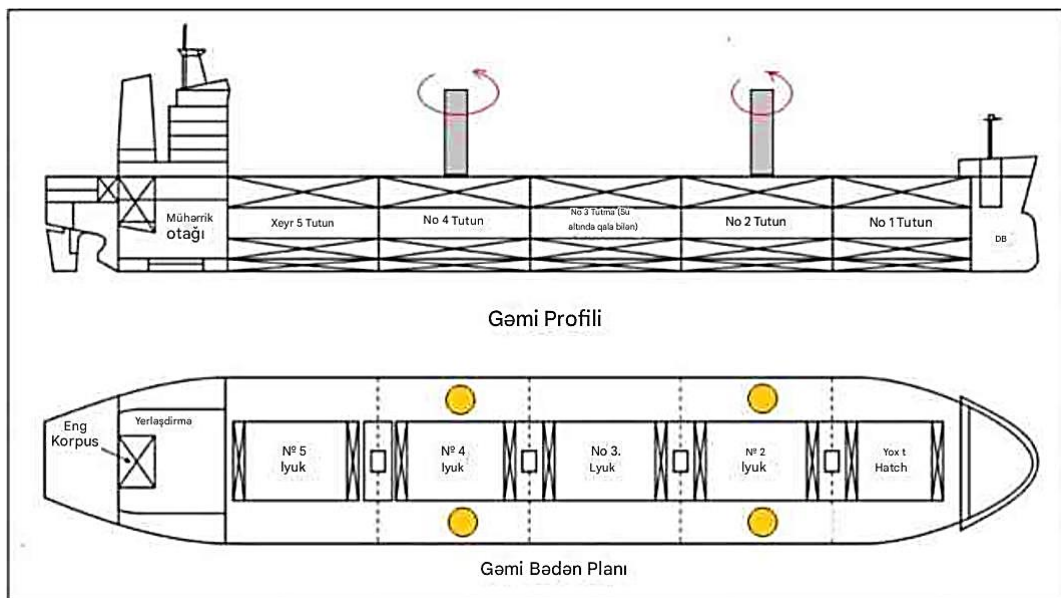
Günəş enerjisinin əsas məhdudiyyəti onun fasiləli olması (gecə və buludlu hava şəraiti) və göyertədə məhdud yerin olmasıdır.

Gəmilərdə külək enerjisi adətən Flettner rotorlu turbinləri ilə istehsal olunur. Flettner rotorları, Magnus effektinə əsaslanaraq külək enerjisini gəminin hərəkətverici qüvvəsinə çevirən fırlanan silindrlərdir. Bu texnologiya, xüsusilə küləkli hava şəraitində əhəmiyyətli dərəcədə yanacaq qənaəti təmin edə bilər [2,3].



Şəkil 1. Sahə (m²) ilə illik yanacaq qənaəti (ton) arasındakı xətti asılılıq

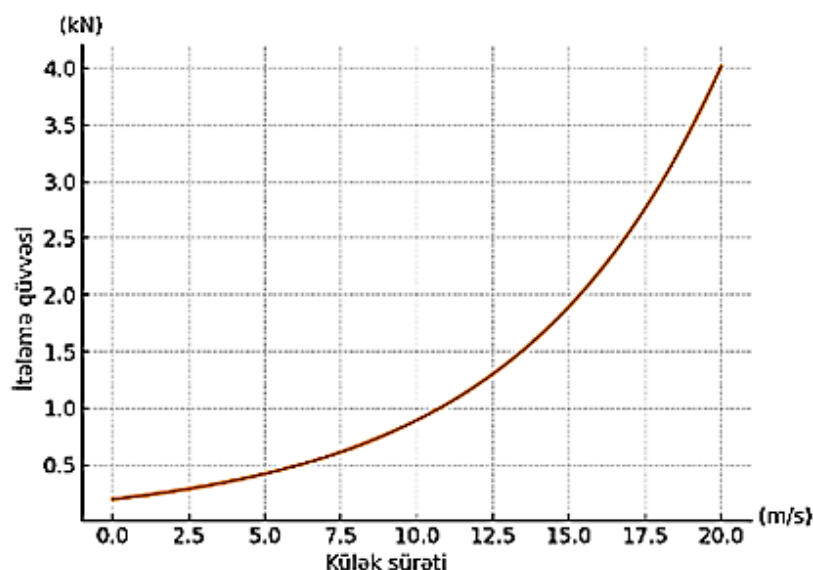
Flettner rotorlarının səmərəliliyi küləyin sürətindən və bucağından, həmçinin gəminin sürətindən asılıdır. Araşdırmalar göstərir ki, optimal şəraitdə Flettner rotorları 10-30% arasında yanacaq qənaəti təmin edə bilər. Bəzi xüsusi hallarda bu rəqəm 50%-ə qədər çatdı bilər. Məsələn, dörd rotorla təchiz edilmiş bir yük gəmisində aparılan bir araşdırma, illik yanacaq sərfiyyatında 22.28% azalma olduğunu göstərmişdir. Şəkil 2-də Flettner rotorların gəminin göyərtəsində yerləşdirilmə sxemi göstərilmişdir



Şəkil 2. Flettner rotorların gəminin göyərtəsində yerləşdirilmə sxemi

Bir Flettner rotorunun quraşdırılması milyonlarla dollara başa gələ bilər. Bununla belə, yüksək yanacaq qənaəti potensialı sayəsində geri ödəmə müddəti 4-9 il arasında ola bilər. Xüsusi təsnifat cəmiyyətləri tərəfindən hazırlanmış xüsusi hesablamalar, müxtəlif gəmi tipləri və hava şəraiti üçün potensial qənaəti hesablamağa imkan verir. Yanacaq sərfiyyatının azalması birbaşa

emissiyaların azalmasına gətirib çıxarır. 20% yanacaq qənaəti, eyni miqdarda CO₂, SO_x və NO_x emissiyalarının azalması deməkdir. Şəkil 3-də külək sürəti (m/s) ilə rotorun yaratdığı itələmə qüvvəsi (kN) arasındakı asılılıq qrafiki göstərilmişdir.



Şəkil 3. Külək sürəti (m/s) ilə rotorun yaratdığı itələmə qüvvəsi (kN) arasındakı asılılıq

Rotorların gəminin göyertəsində yer tutması, gəminin dayanıqlığına potensial təsiri və yalnız müəyyən külək şəraitində səmərəli olması əsas məhdudiyyətlərdir.

Batareya sistemləri, yüksək tələbat zamanı əlavə güc təmin etmək, mühərrikin optimal rejimdə işləməsini təmin etmək (peak shaving) və limanlarda sıfır emissiyalı əməliyyatlar həyata keçirmək üçün istifadə olunur. Onlar xüsusilə günəş və külək kimi fasiləli enerji mənbələri ilə birlikdə hibrid sistemlərdə effektivdir [2,4].

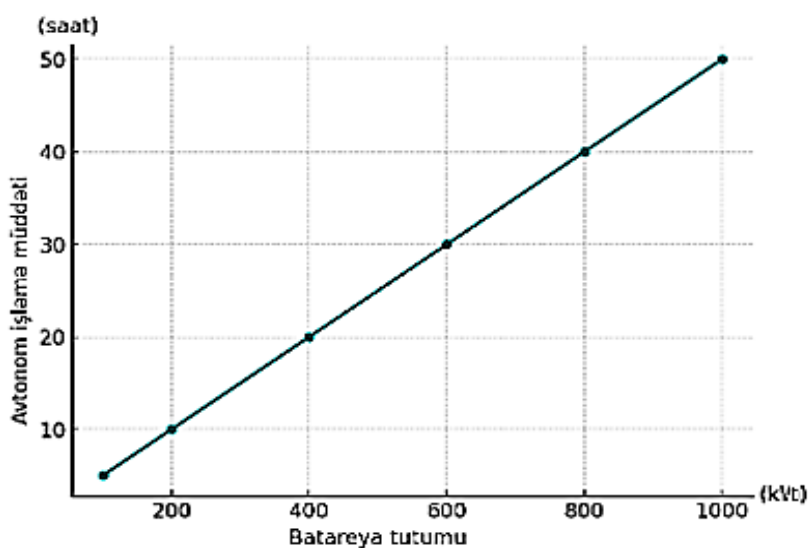
Yüksək enerji sıxlığına malik Litium-ion batareyalar geniş istifadə olunur. Enerji sıxlığı batareyanın çəkisi və həcmi üçün kritik bir göstəricidir. Müasir batareyalar 150-250 Vt/kq enerji sıxlığına malikdir. Batareya sistemlərinin ilkin investisiya dəyəri yüksəkdir (təxminən 500-800 ABŞ dolları). Lakin bu sistemlər yanacaq sərfiyyatını 10-15% azalda, mühərriklərin texniki xidmət xərclərini aşağı sala və limanlarda sahil qida mənbəyinə qoşulma ehtiyacını aradan qaldıraraq əlavə qənaət təmin edə bilər. Batareyalar enerji mənbəyindən asılı olaraq emissiyaları azaldır. Bərpa olunan mənbələrdən doldurulduqda, demək olar ki, təxminən sıfır emissiyalı bir həll təqdim edirlər. Limanlarda mühərrikləri söndürməyə imkan verməsi hava çirkliliyinin azaldılması üçün mühüm amildir. Şəkil 4-də batareya tutumu (kVt) ilə limanda avtanom işləmə müddəti (saat) arasındakı xətti asılılıq qrafiki göstərilmişdir.

Yüksək ilkin xərc, məhdud ömür, çəki və həcm, həmçinin təhlükəsizlik (yanğın riski) məsələləri batareya texnologiyasının əsas çətinlikləridir.

Hidrogen yanacaq hüceyrələri, hidrogen və oksigenin elektrokimyəvi reaksiyası nəticəsində elektrik enerjisi istehsal edir və yeganə əlavə məhsul sudur. Bu texnologiya, gəmiçiliyin tamamilə karbonsuzlaşdırılması üçün ən perspektivli uzunmüddətli həllərdən biri hesab olunur [3,4,5].

Proton mübadilə membranlı yanacaq hüceyrələri gəmiçilik üçün daha uyğun hesab edilir və səmərəliliyi 50-60% arasında dəyişir. Bərk oksid yanacaq hüceyrələri isə daha yüksək səmərəlilik (58%-ə qədər) təklif edir, lakin daha yüksək işləmə temperaturu tələb edir. Hazırda hidrogen yanacaq hüceyrə sistemlərinin və xüsusilə yaşıl hidrogenin (bərpa olunan enerji ilə istehsal olunan) istehsalı və saxlanması (mayeləşdirilmiş və ya sıxılmış formada) olduqca bahalıdır. Araşdırmalar

göstərir ki, hidrogenin qiyməti təxminən 2 ABŞ dolları/kq səviyyəsinə düşərsə, hidrogen yanacaqı gəmilərin ümumi dəyəri ənənəvi dizel gəmiləri ilə rəqabət apara bilər. Texnologiyanın inkişafı ilə 2025-2030-cu illərdə rəqabət qabiliyyətli ola biləcəyi proqnozlaşdırılır. Yaşıl hidrogen istifadə edildikdə, yanacaq hüceyrələri tamamilə sıfır istixana qazı emissiyasına malikdir.



Şəkil 4. Batareya tutumu (kVt) ilə limanda avtonom işləmə müddəti (saat) arasındakı xətti asılılıq

Beynəlxalq Dəniz Təşkilatı hazırda gəmilərdən dizel yanacağından azot oksidi emissiyalarını məhdudlaşdırmaq üçün qlobal razılaşma təklif edib. Oxşar regional təklif, Los-Anceles limanlarına gələn gəmilərdən azot oksidi emissiyalarına görə ödəniş etməyi təklif edən Kaliforniya Ətraf Mühitin Mühafizəsi Agentliyi (EPA) tərəfindən hazırlanmışdır.

Bu, BDT-nin uzunmüddətli dekarbonizasiya hədəflərinə çatmaq üçün ideal bir həlldir. Təhlillər göstərir ki, seçim gəminin növündən, təyinatından və əməliyyat istiqamətindən asılıdır. Qısa və ortamüddətli perspektivdə, günəş, külək və batareya sistemlərini özündə birləşdirən hibrid enerji sistemləri ən yaxşı yanaşma kimi görünür [3,6,7].

Aşağıdakı cədvəl təhlil edilən dörd alternativ enerji mənbələrinin əsas göstəricilər üzrə müqayisəsini ümumiləşdirir.

Alternativ enerji mənbələrinin əsas göstəricilərinin müqayisəsi

Texnologiya	İlkin investisiya	Yanacaq qənaəti / enerji təmini	Geri ödəmə müddəti	Emissiyaların azaldılması	Tərəqqi, inkişaf
Günəş panelləri	Orta	Köməkçi enerji (5-10%)	5-8 il	Orta	Yüksək
Flettner rotorları	Yüksək	Yüksək (10-30%)	4-9 il	Yüksək	Orta
Batareya sistemləri	Çox Yüksək	Orta (10-15%), Pik tələbat	6-10 il	Orta-Yüksək	Yüksək
Hidrogen. Yanacaq hüceyrəsi	Çox Yüksək	Tam əvəzetmə (100%)	Uzunmüddətli (>10 il)	Çox Yüksək (Sıfır)	Aşağı-Orta

Nəticə. Aparılmış təhlillərdən məlum olmuşdur ki, gəmi elektrik stansiyalarında alternativ enerji mənbələrinin tətbiqi artıq bir seçim deyil, zərurətdir. Həmçinin təhlillər göstərir ki, hər bir texnologiyanın özünəməxsus üstünlükləri və çətinlikləri var. Qısa və ortamüddətli gələcəkdə, günəş, külək və batareya sistemlərini özündə birləşdirən hibrid enerji sistemləri ən yaxşı yanaşma

kimi görünür. Bu cür sistemlər həm yanacaq səmərəliliyini artırır, həm emissiyaları azaldır və həmçinin də enerji təchizatının etibarlılığını yüksəldir. Uzunmüddətli dövrdə isə yaşıl hidrogen texnologiyasının inkişafı və maya dəyərinin azalması ilə yanacaq hüceyrələri gəmiçilik sənayesində inqilab edəcək və tamamilə təmiz dəniz nəqliyyatına keçidi təmin edəcəkdir.

Ədəbiyyat

1. Sultanov E.F., Cəlilov T.A. “Müasir gəmi elektrik stansiyaları və şəbəkələri” Bakı, 2018, 357 səh.
2. Sultanov E.F., İsmayılov S.S. “Gəmilərdə alternativ enerji mənbələrindən istifadə imkanlarının araşdırılması”/ ADDA Elmi əsərlər №2, Bak; 2021, səh. 151-157
3. Sultanov E.F., İsmayılov S.S., Əlicanov R.R. Günəş panelləri və onların gəmilərdə tətbiqinin araşdırılması. ADDA Elmi əsərlər №2, Bak; 2023, səh. 130-138.
4. Sultanov E.F., Məmmədov E.M., Əlicanov R.R. Hibrid texnologiyalardan istifadə etməklə gəmilərdə enerji səmərəliliyinin artırılması. “Elm və təhsilin əsasları” XIII Beynəlxalq elmi konfrans. Bakı 2025, səh. 236-240
5. Williamson, G., & D.T. Hall. Reeds Marine Engineering Series, Vol. 7: Marine Electrical Systems and Practice. Adlard Coles, 2018-544 səh.
6. IEEE Transactions on Marine Electrical Engineering and Automation, Vol. 48, Issue 2, pp. 215-228 p.
7. El-Hawary, M. E. Introduction to Marine Electrical Power Systems. CRC Press, 2017, 799 p.

Məqalə qəbul olunub: 30.10.25
Təvsiyə edib: dos. İsmayılov A.Ş.