

YOL AYDINLATMALARINDA FV-LED SİSTEMLERİNİN TEKNO-EKONOMİK ANALİZİ

Seyit Ahmet AKDAĞ
akdagse@itu.edu.tr

Önder GÜLER
onder.guler@itu.edu.tr

Emre ERKİN
erkinem@itu.edu.tr

Sermin ONAYGİL
onaygil@itu.edu.tr

İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, Enerji Planlaması ve Yönetimi ABD
Ayazağa Kampüsü, Maslak – İstanbul,

ÖZET

Bu çalışmada, M4 ve M5 aydınlatma sınıfı iki şeritli bir yol sırasıyla 56W ve 41W'lık LED armatürler kullanılarak ulusal ve uluslararası standartlara uygun olarak tasarlanmıştır. Yolu güneş ışınımı açısından orta dereceli olarak tanımlanan İzmir ilinde olduğu kabul edilerek, aydınlatma için gerekli elektrik enerjisinin şebekeden bağımsız şekilde tamamen fotovoltaik sistemler yani yenilenebilir enerji ile sağlanması durumunu karakterize eden simülasyonlar HOMER yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Ülkemizde şebekeden satın alınan elektrik enerjisinin birim maliyeti dikkate alındığında, şu andaki mevcut en verimli LED teknolojisini kullanıldığı standartlara uygun aydınlatılmış yollarda bile, çevresel açıdan çok önemli katkıları olmasına rağmen, henüz FV enerji sistemlerinin yol aydınlatmalarında kullanılmasının maliyet-etkin bir çözüm olamadığı görülmüştür.

1. GİRİŞ

Ülkelerin elektrik enerjisine olan gereksinimleri, artan nüfusa, ekonomik gelişmelere, refah düzeyine ve teknolojiye bağlı olarak artmaktadır. Günümüzde elektrik enerjisinin üretiminde çoğunlukla fosil kaynaklar kullanılmaktadır. Fosil kaynakların kısıtlı ve yakın gelecekte tükenecek olmaları, olumsuz çevresel etkileri gibi nedenlerden dolayı yenilenebilir enerji kaynakları üzerindeki çalışmalar yoğun bir şekilde devam etmektedir. Hükümetlerin oluşturmuş oldukları özel teşvik mekanizmaları ve desteklerle son yıllarda başta rüzgar enerjisi olmak üzere yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik enerjisi üretiminde artışlar sağlanmıştır. Bu sayede, yeni teknolojilerin kullanılması gereken bu yüksek maliyetli uygulamaların kullanıcı tarafındaki mali yükü hafifletilmeye çalışılmaktadır. Maksimum yararın elde edilebilmesi için, yatırımdaki teşviklerin yanı sıra yüksek maliyetli bu kaynaklarla birlikte, son tüketicide verimliliği yüksek cihazların ve ekipmanların kullanılması üzerinde de önemle durulmaktadır. Son yıllarda LED teknolojisinde yaşanan gelişmelere paralel olarak, enerji verimliliği çalışmaları kapsamında yol aydınlatmalarında da LED ışık kaynaklı armatürlerin kullanılması konusu gündeme

gelmiştir. Enerjinin verimli kullanılması, tasarruf elde edilmesi amaçlı yürütülen bu uygulamalarda ilk koşul, araç ve yaya güvenliği için gerekli görüş koşullarının sağlanması olmalıdır. Yeni ve verimli bir teknoloji olarak sunulan LED ışık kaynaklarının DC gerilim ile beslenmeleri nedeniyle eviriciye gerek duyulmaması, güneş enerjisi sistemleri ile birlikte kullanımlarını cazip hale getirmektedir. Bu nedenle yol aydınlatmalarında güneş enerjisi sistemlerinin kullanılabilir oranlarının belirlenmesini amaçlayan bu çalışmada, ışık kaynağı olarak LED seçilmiştir.

LED ışık kaynaklarının günümüz teknolojisi ile ulaşılabilir performansları dikkate alınarak, çalışmada ulusal ve uluslararası standartlara uygun aydınlatma kalite kriterlerinin rahatlıkla sağlanabildiği M4 ve M5 aydınlatma sınıfı yol aydınlatma tesisatları ele alınmıştır. Armatürlere ait fotometrik veriler tanınmış uluslararası armatür üreticilerinin kataloglarından temin edilmiştir. Önce kalite kriterlerini sağlayacak şekilde aydınlatma tasarım hesapları gerçekleştirilmiş, daha sonra tasarımla belirlenen yol aydınlatma düzeneklerinin olası elektrik enerjisi tüketimlerinin %100'ünün güneş enerjisi sisteminden

karşılanması durumu için enerji analizleri yapılmıştır. Güneş enerjisi gündüz üretileceği ve yol aydınlatılması için gerekli elektrik enerjisine ise gece ihtiyaç olacağı için, depolama sistemi olarak akü sistemleri de boyutlandırılmıştır. Bildirinin sunulduğu sempozyum yeri dikkate alınıp yol tesisatlarının İzmir ilinde olduğu varsayılarak, güneş enerjisi analizleri HOMER bilgisayar programı ile gerçekleştirilmiştir.

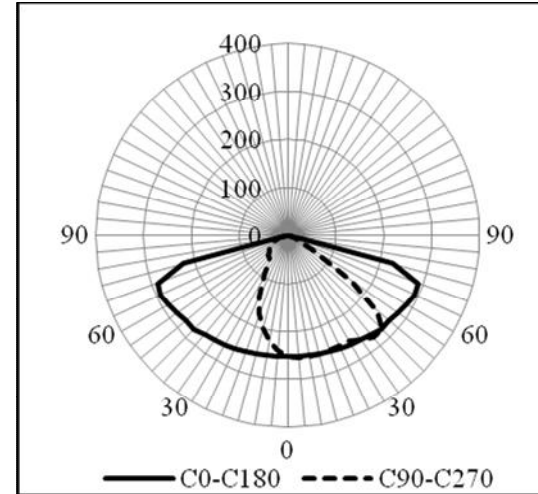
2. YOL AYDINLATMASI TASARIM HESAPLARI

Aydınlatma tasarım hesapları, her bir şerit genişliği 3.5m olan iki şeritli, soldan tek taraflı düzenekli R3 kaplama sınıflı yollar için Dialux aydınlatma yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir [1]. Hesaplamalarda bakım faktörü 0,89; gözlemci yaşı 23 olarak alınmıştır. Literatürdeki mevcut bilgilere göre, LED ışık kaynaklı armatürler enerji etkinlikleri, uzun ömürleri, iyi renk karakteristikleri, mezopik görmeyi artırma olasılıkları, ani rejime girme özellikleri, küçük-kompakt boyutları, yönlendirilebilen doğrultusal ışınları, loşlaştırılabilme kolaylıkları, mekanik dayanımları, çevre-dostu olma gibi özellikleri ile yol-sokak aydınlatmaları için iyi birer alternatif çözüm olarak sunulmaktadır. Ayrıca doğru gerilim ile direkt olarak beslenebilmeleri, fotovoltaiik sistemlerle birlikte kullanımlarında geleneksel armatürlere göre üstünlükleri olmaktadır. Bu nedenle, çalışma kapsamında mevcut LED yol aydınlatması armatür üreticilerinin katalogları

incelenerek, M4 ve M5 aydınlatma sınıfının gerektirdiği aydınlatma kriterlerini sağlayabilecek armatürler seçilmiştir. Hesaplamalarda kullanılan armatürlere ait bilgiler Tablo 1’de, ışık dağılım eğrisi ise Şekil 1’de gösterilmektedir. Hesaplar Türk Standardı olarak kabul edilen EN 13201’e göre M4 ve M5 aydınlatma sınıfı yollar için gereken minimum kriterler sağlanacak şekilde yapılmış ve Tablo 2’de verilen sonuçlar elde edilmiştir [2].

Tablo 1. Armatürlere ait bilgiler

P (W)	Φ_{arm} (lm)	e_{arm} (lm/W)	LOR (%)
56	5312	94,86	88
41	4029	98,27	89



Şekil 1. Armatüre ait ışık dağılım eğrisi

Tablo 2. Aydınlatma hesap sonuçları

Aydınlatma sınıfı	s [m]	h [m]	k [m]	Θ [°]	L_{ort} [cd/m ²]	U_0	U_1	TI [%]	SR
M4	32	7	1	0	0,75	0,52	0,72	12	0,60
M5	37	7	1	0	0,5	0,49	0,46	13	0,60

s: direkler arası açıklık; h: yükseklik; k: konsol boyu ; Θ : konsol açısı; Lort: yolun ortalama parlıltısı; U_0 : ortalama düzgünlük; U_1 : boyuna düzgünlük ; TI :bağıl Eşik Artışı ; SR: çevreleme oranı

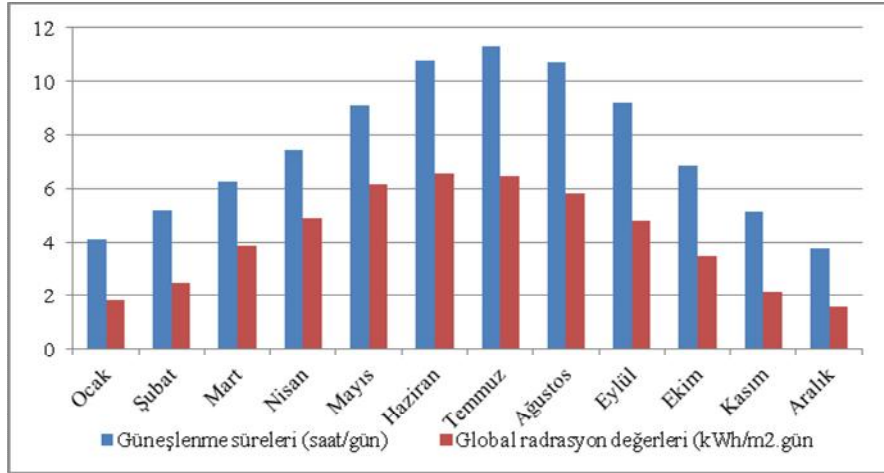
3. TÜRKİYE GÜNEŞ ENERJİSİ POTANSİYELİ

EİE (yeni adı Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü) tarafından yapılan Güneş

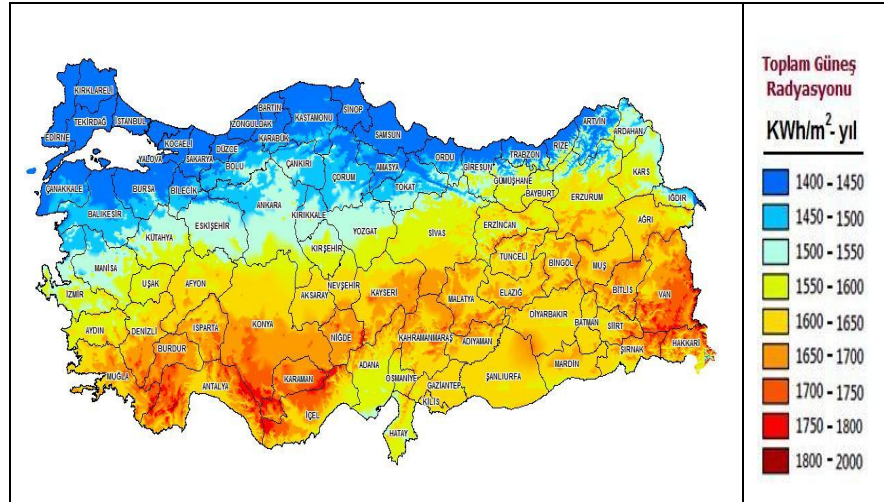
Enerjisi Potansiyel Atlası (GEPA) çalışmalarına göre, Türkiye'nin toplam yıllık, ortalama aylık ve günlük güneşlenme süreleri sırasıyla 2741,07;

228,42 ve 7,51 saattir. Toplam yıllık, ortalama aylık ve günlük ışı nım şiddeti değ erleri ise sırasıyla 1527,46; 127,29 ve 4;18 kWh/m² olarak açıklanmaktadır. Türkiye'nin aylara göre günlük güneşlenme süreleri ve günlük ışı nım şiddeti (küresel radyasyon) değ erlerinin değ iş imi Ş ekil 2' de gösterilmektedir. Ş ekilden de görüldüğü gibi en düşük ortalama günlük güneşlenme süresi 3,75 saat ile Aralık ayında, en yüksek ortalama güneşlenme süresi ise

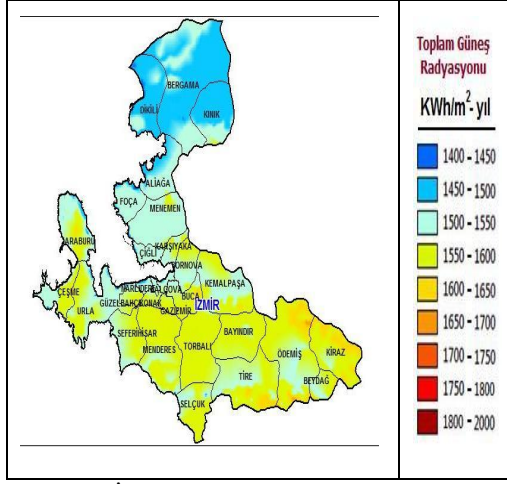
11,31 saat ile Temmuz ayında gerçekleşmektedir. Buna karş ılık günlük ışı nım şiddetinin en düşük değ erinin 1,59 kWh/m² ile yine Aralık, en yüksek değ erinin ise 6,57 kWh/m² ile Temmuz ayında olduğı görülmektedir. Türkiye'nin toplam yıllık ışı nım şiddetlerinin bölgesel değ iş imleri de Ş ekil 3' de verilmektedir. Ş ekilden de görüleceğı gibi Türkiye'nin güney bölgeleri, kuzey bölgelerine göre daha yüksek güneş potansiyeline sahiptir.



Ş ekil 2. Türkiye' nin günlük güneşlenme süreleri ve küresel radyasyon (günlük ışı nım şiddeti) değ erleri



Ş ekil 3. Türkiye'de yıllık ortalama ışı nım şiddetinin bölgesel değ iş imi

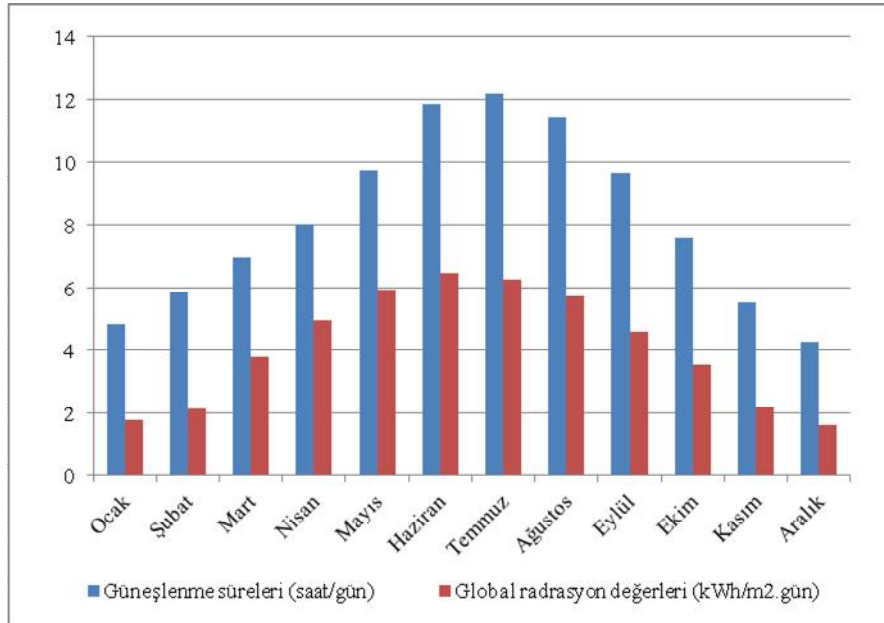


Şekil 4. İzmir iline ait yıllık ortalama güneş ışıma şiddetleri

Çalışma kapsamında simülasyonlarda kullanılan yolun, güneş potansiyeli orta düzeyde olan İzmir ilinde olduğu kabul

edilmiştir. İzmir ili sınırları içindeki bölgelerin yıllık güneş ışıma şiddetleri (radyasyon) düzeyleri Şekil 4’ te verilmektedir.

İzmir iline ait güneşlenme süreleri ve küresel radyasyon (ışıma şiddeti) değerlerinin aylara göre değişimi ise Şekil 5’ de gösterilmektedir. İzmir iline ait yıllık, aylık ve günlük güneşlenme süreleri sırasıyla 2985, 245,4 ve 8,2 saat, yıllık, aylık ve günlük güneş küresel radyasyon (ışıma şiddeti) değerleri ise sırasıyla 1497, 123 and 4,1 kWh/m²’ dir.



Şekil 5. İzmir iline ait güneşlenme süreleri ve küresel radyasyon (ışıma şiddeti) değerleri

4. SİMÜLASYONLAR

Simülasyonlar HOMER yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. HOMER Mikro Güç Optimizasyon modeli, ABD Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı’nda (NREL), mikro güç sistemlerinin tasarımlarını desteklemek ve enerji üretimi teknolojilerinin birçok farklı uygulamada karşılaştırılmalarını kolaylaştırmak için geliştirilmiş bir bilgisayar modelidir [4]. HOMER, bir enerji sisteminin fiziksel

davranışını ve sistemin kullanım ömrü boyunca gerçekleşen toplam kurulum ve işletme maliyeti olan, kullanım ömrü maliyetini modeller. Çalışma kapsamında simülasyonu gerçekleştirilen model Şekil 6’da gösterilmektedir. Simülasyonlarda elektrik enerjisi üretmek amacıyla her direkt bir fotovoltaik (FV) panel, gündüz üretilen elektriğin geceleri aydınlatmada kullanımı amacıyla depolanması için de aküler gerekmektedir. Yük olarak ise DC

gerilim ile beslenen M4 aydınlatma sınıfı yol için 56W ve M5 için de 41W güçlerinde LED ışık kaynaklı yol aydınlatma armatürleri kullanılmıştır.



Şekil 6. Simulasyon modeli

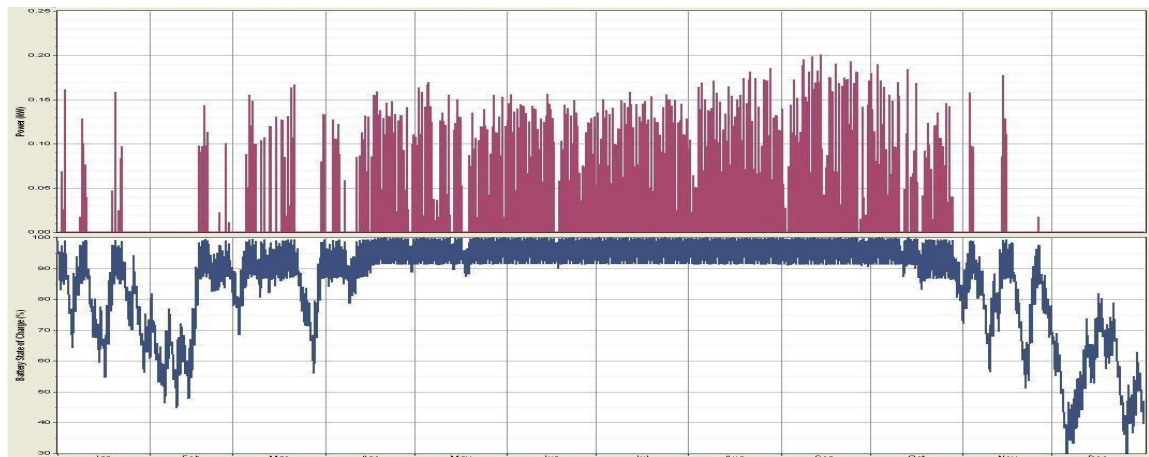
Simulasyonlar fotovoltaik panellerin gücü 100W'tan başlayarak 10 W'lık artışlarla 1000W' a kadar, akü sayısı 1 den başlayıp 1' er artırılarak 9' a kadar, fotovoltaik panellerin eğim açıları da 0'dan başlayarak 1' er derece aralıklarla 90 dereceye kadar yükseltilerek oluşturulmuş 400 000 adet senaryo için her iki aydınlatma yol sınıfı (M4 ve M5) için tekrarlanmıştır. Simülasyonlarda proje ömrü 20 yıl, fotovoltaik panelin fiyatı 3000 TL/kW, işletme ve bakım maliyeti 40 TL/yıl olarak alınmıştır. Başlangıçta tüm akülerin %100 dolu olduğu kabul edilmiş ve akü şarjlarının %30' a kadar düşmesine izin verilmiştir. Yol aydınlatma armatürlerinin 15 Nisan -15 Ekim arasındaki dönemde 8 saat, 15 Ekim - 15 Nisan arasındaki dönemde ise 12 saat devrede olduğu kabul edilmiştir.

Gücü 56 W olan LED armatürlerin kullanıldığı M4 aydınlatma sınıfı tesisat için aydınlatma armatürlerinin elektrik enerjisi ihtiyacının yılın tüm zamanlarında, güneş ışınımı bakımından en kötü kış koşullarında bile, karşılanma durumu için gerçekleştirilen senaryo sonuçları Tablo 3'

de verilmiştir. Tablodan, farklı eğim açılarında monte edilen fotovoltaik panellerin gücünün 240W ile 460W arasında, akü sayısının ise 3 ile 4 arasında değiştiği görülmektedir. M4 aydınlatma sınıfı yolda 56W'lık LED armatürlerin enerji ihtiyaçlarının %100 karşılanması için en uygun durumun 48 derecelik eğim açısında monte edilen 240W'lık fotovoltaik panel ve 4 aküden oluşan sistem olduğu belirlenmiştir. Bu durumda yatırımın bugünkü net değeri 1816 TL, üretilen elektriğin birim maliyeti ise 0,598 TL/kWh olarak hesaplanmıştır. Şekil 7' de ise M4 aydınlatma sınıfı yol için simüle edilen FV sistemin ihtiyaç dışı fazla elektrik üretimi ve kullanılan akülerin aylık şarj durumları gösterilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi, Aralık ayı boyunca akülerin şarj değerleri en alt seviye olan %30 civarındadır. M4 aydınlatma sınıfı yolun elektrik enerjisi ihtiyacının FV enerji sistemleri ile kısmen karşılanması durumu için elde edilen simülasyon sonuçları ise Tablo 4'de verilmektedir. Yer ve maliyet sorunları düşünülerek panel gücü 240W' tan 100W'lara düşürüldüğünde aydınlatma için gerekli enerjinin yıllık kullanım süresindeki karşılanmama oranı %45'lere ulaşmaktadır. Yol aydınlatması enerji tüketiminin tam olarak karşılandığı durumlarda enerji fazlalığı olmasına rağmen, kış aylarında güneş ışınım düzeyinin düşük olması ve kullanım sürelerinin uzun olması nedeniyle, kısmi karşılanma durumunda yıl içine dağılmış tam bir optimizasyon sağlanması mümkün olmamaktadır. Enerji ihtiyacının karşılanamadığı durumlarda, mümkünse şebekeden ya da başka bir enerji kaynağından ek enerji temini gerekecektir.

Tablo 3. M4 aydınlatma sınıflı yolun elektrik ihtiyacının FV enerji ile tamamen karşılanması durumu için analiz sonuçları

FV eğim açısı (°)	FV panel gücü (W)	Akü sayısı (adet)	Yatırım maliyeti (TL)	Yatırımın bugünkü net değeri (TL)	Elektrik birim maliyeti (TL/kWh)	FV üretimi (kWh)	Yükün karşılanmama oranı (%)	Yıllık fazla üretim (kWh)
48	240	4	1674	1816	0,598	372	0	139
46	310	3	1644	1828	0,602	484	0	248
40	250	4	1704	1851	0,610	396	0	162
72	250	4	1704	1851	0,610	332	0	97
36	320	3	1674	1863	0,614	509	0	273
34	260	4	1734	1887	0,622	414	0	181
82	260	4	1734	1887	0,622	308	0	73
33	330	3	1704	1899	0,626	526	0	290
89	270	4	1764	1923	0,634	290	0	55
29	340	3	1734	1935	0,636	541	0	305
24	350	3	1764	1971	0,648	553	0	317
20	360	3	1794	2007	0,660	563	0	327
17	370	3	1824	2043	0,672	573	0	337
15	380	3	1853	2079	0,684	583	0	348
12	390	3	1883	2115	0,696	591	0	355
10	400	3	1913	2150	0,708	600	0	364
8	410	3	1943	2186	0,719	608	0	372
6	420	3	1973	2222	0,731	615	0	380
4	430	3	2003	2258	0,743	621	0	386
3	440	3	2033	2294	0,755	631	0	396
1	450	3	2063	2330	0,767	635	0	401
0	460	3	2093	2366	0,779	644	0	410



Şekil 7. M4 aydınlatma sınıfı için FV sistemin fazla elektrik üretimi ve kullanılan akülerin aylık şarj durumları

Tablo 4. M4 aydınlatma sınıfı yolun elektrik ihtiyacının FV enerji ile kısmen karşılanması durumu için analiz sonuçları

FV eğim açısı (°)	FV panel gücü (W)	Akü sayısı (adet)	Yatırım maliyeti (TL)	Yatırımın bugünkü net değeri (TL)	Elektrik birim maliyeti (TL/kWh)	FV üretimi (kWh)	Yükün karşılanmama oranı (%)	Yıllık fazla üretim (kWh)
42	220	2	1136	1268	0,436	347	4	122
41	220	2	1136	1268	0,436	348	5	123
57	190	2	1046	1160	0,411	283	7	65
46	190	2	1046	1160	0,413	297	8	80
51	180	2	1016	1124	0,407	276	9	62
42	190	1	807	1072	0,403	300	13	93
46	180	1	777	1032	0,393	281	14	77
62	160	1	717	951	0,375	231	16	33
39	160	1	717	951	0,375	254	17	57
49	150	1	688	909	0,365	232	18	38
47	140	1	658	865	0,357	218	20	30
40	140	1	658	863	0,359	222	21	35
36	140	1	658	861	0,361	223	22	38
60	130	1	628	819	0,351	190	23	9
61	130	1	628	819	0,353	189	24	8
34	130	1	628	815	0,355	207	25	29
41	120	1	598	773	0,345	190	26	16
36	120	1	598	769	0,347	191	27	19
61	120	1	598	767	0,349	174	28	4
44	110	1	568	725	0,339	173	29	6
38	110	1	568	723	0,339	175	30	9
33	110	1	568	721	0,341	175	31	11
27	110	1	568	717	0,345	175	32	13
21	110	1	568	713	0,349	172	33	14
33	100	1	538	674	0,335	159	34	4
29	100	1	538	672	0,337	159	35	5
22	100	1	538	666	0,341	157	36	6
18	100	1	538	662	0,345	155	37	7
59	100	1	538	658	0,347	147	38	0
12	100	1	538	656	0,351	151	39	7
9	100	1	538	652	0,355	149	40	7
6	100	1	538	648	0,359	146	41	7
4	100	1	538	644	0,363	144	42	7
1	100	1	538	638	0,367	141	43	6
72	100	1	538	636	0,371	133	44	0
74	100	1	538	630	0,375	130	45	0

Gücü 41 W olan LED armatürlerin kullanıldığı M5 aydınlatma sınıflı tesisat için aydınlatma armatürlerinin elektrik enerjisi ihtiyacının yılın tüm zamanlarında, güneş ışıınımı bakımından en kötü kış koşullarında bile, karşılanma durumu için gerçekleştirilen senaryo sonuçları Tablo 5’ de verilmiştir. Tablodan, farklı eğim açılarında monte edilen fotovoltaik panellerin gücünün 180W ile 360W arasında, akü sayısının ise 2 ile 3 arasında değiştiği görülmektedir. M5 aydınlatma sınıflı yolda 41W’lık LED armatürlerin enerji ihtiyaçlarının %100 karşılanması için en uygun durumun 42 derecelik eğim açısında monte edilen 180W’lık fotovoltaik panel ve 3 aküden oluşan sistem olduğu belirlenmiştir. Bu durumda yatırımın bugünkü net değeri 1363 TL, üretilen elektriğin birim maliyeti ise 0,612 TL/kWh olarak hesaplanmıştır. Şekil 8’ de ise M5 aydınlatma sınıflı yol için simüle edilen FV sistemin ihtiyaç dışı fazla elektrik üretimi ve kullanılan akülerin aylık

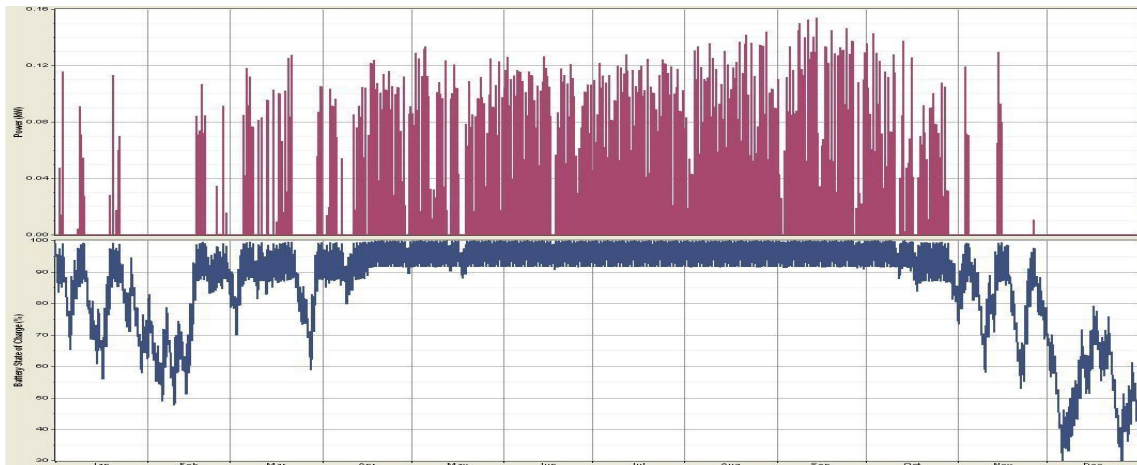
şarj durumları gösterilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi, Aralık ayı boyunca akülerin şarj değerleri en alt seviye olan %30 civarındadır. M4 aydınlatma sınıflı yolun elektrik enerjisi ihtiyacının FV enerji sistemleri ile kısmen karşılanması durumu için elde edilen simülasyon sonuçları ise Tablo 6’da verilmektedir. Yer ve maliyet sorunları düşünülerek panel gücü 180W’ tan 100W’lara düşürüldüğünde aydınlatma için gerekli enerjinin yıllık kullanım süresindeki karşılanmama oranı %38’lere ulaşmaktadır. Yol aydınlatması enerji tüketiminin tam olarak karşılandığı durumlarda enerji fazlalığı olmasına rağmen, kış aylarında güneş ışıınım düzeyinin düşük olması ve kullanım sürelerinin uzun olması nedeniyle, kısmi karşılanma durumunda yıl içine dağılmış tam bir optimizasyon sağlanması mümkün olmamaktadır. Enerji ihtiyacının karşılanamadığı durumlarda, mümkünse şebekeden ya da başka bir enerji kaynağından ek enerji temini gerekecektir.

Tablo 5. M5 aydınlatma sınıflı yolun elektrik ihtiyacının FV enerji ile tamamen karşılanması durumu için analiz sonuçları

FV eğim açısı (°)	FV panel gücü (W)	Akü sayısı (adet)	Yatırım maliyeti (TL)	Yatırımın bugünkü net değeri (TL)	Elektrik birim maliyeti (TL/kWh)	FV üretimi (kWh)	Yükün karşılanmama oranı (%)	Yıllık fazla üretim (kWh)
42	180	3	1256	1363	0,612	284	0	113
36	250	2	1226	1373	0,618	398	0	225
34	190	3	1285	1399	0,628	303	0	132
33	260	2	1256	1409	0,634	414	0	241
27	270	2	1285	1445	0,650	428	0	256
22	280	2	1315	1481	0,666	440	0	267
18	290	2	1345	1517	0,682	450	0	278
14	300	2	1375	1553	0,698	459	0	286
11	310	2	1405	1588	0,713	467	0	294
8	320	2	1435	1624	0,729	474	0	302
6	330	2	1465	1660	0,745	483	0	310
4	340	2	1495	1696	0,761	491	0	318
2	350	2	1525	1732	0,779	498	0	325
0	360	2	1555	1768	0,795	504	0	332

Tablo 6. M5 aydınlatma sınıfı yolun elektrik ihtiyacının FV enerji ile kısmen karşılanması durumu için analiz sonuçları

FV eğim açısı (°)	FV panel gücü (W)	Akü sayısı (adet)	Yatırım maliyeti (TL)	Yatırımın bugünkü net değeri (TL)	Elektrik birim maliyeti (TL/kWh)	FV üretimi (kWh)	Yükün karşılanmama oranı (%)	Yıllık fazla üretim (kWh)
55	150	2	927	1016	0,472	226	0,03	60
66	150	2	927	1016	0,472	210	0,04	44
32	160	2	957	1052	0,494	255	0,05	91
45	150	1	688	855	0,419	235	0,08	77
36	150	1	688	853	0,421	239	0,09	81
49	130	1	628	775	0,393	201	0,11	48
40	130	1	628	773	0,395	206	0,12	54
35	130	1	628	771	0,397	207	0,13	56
79	130	1	628	769	0,401	160	0,14	11
45	110	1	568	688	0,373	172	0,17	30
40	110	1	568	686	0,375	174	0,18	33
71	110	1	568	684	0,377	147	0,19	7
50	100	1	538	642	0,363	154	0,21	17
37	100	1	538	638	0,367	159	0,22	24
33	100	1	538	636	0,369	159	0,23	26
27	100	1	538	632	0,373	159	0,24	28
25	100	1	538	630	0,375	158	0,25	28
21	100	1	538	628	0,379	157	0,26	29
17	100	1	538	624	0,383	155	0,27	29
15	100	1	538	622	0,385	154	0,28	29
12	100	538	538	618	0,389	151	0,29	29
9	100	1	538	614	0,393	149	0,3	28
1	110	1	568	648	0,419	155	0,31	36
89	110	1	568	644	0,425	118	0,32	1
86	100	1	538	598	0,413	112	0,35	0
87	100	1	538	598	0,417	111	0,36	0
88	100	1	538	598	0,423	109	0,37	0
89	100	1	538	598	0,430	107	0,38	0



Şekil 8. M5 aydınlatma sınıfı için FV sistemin fazla elektrik üretimi ve kullanılan akülerin aylık şarj durumları

5. SONUÇ

Gerçekleştirilen çalışmada, İzmir ilindeki iki şeritli tek taraflı aydınlatma düzenekli ve LED ışık kaynaklı armatürlerin kullanıldığı bir yolun, M4 ve M5 aydınlatma sınıfı kriterlerini sağlayacak şekilde aydınlatılması için gerekli elektrik enerjisi ihtiyacının yıl boyunca tamamen veya kısmen fotovoltaiik (FV) sistemlerden karşılanması durumlarındaki en optimum sistem boyutlandırılması yapılmaya çalışılmıştır. 56W'lık LED armatürlerin kullanıldığı M4 aydınlatma sınıfı yollarda 240W'lık güneş paneli ve 4 adet aküye, 41W'lık LED armatürlerin kullanıldığı M5 aydınlatma sınıfı yollarda ise 180W'lık güneş paneli ve 3 adet aküye gereksinim olduğu belirlenmiştir. FV sistemlerle üretilen elektrik enerjisinin birim maliyeti ise aydınlatma armatürlerinin elektrik ihtiyacının kesintisiz bir şekilde sağlanması durumunda M4 aydınlatma sınıfında kWh başına 0,598 TL, M5 aydınlatma sınıfında ise 0,612 TL olarak hesaplanmıştır. Ülkemizde şebekeden satın alınan elektrik enerjisinin birim maliyetinin 0,3 TL/kWh olduğu göz önüne alındığında, şu andaki mevcut en verimli LED teknolojisinin kullanıldığı standartlara uygun aydınlatılmış yollarda bile, çevresel açıdan çok önemli katkıları olmasına rağmen, henüz FV enerji sistemleri kullanılmasının maliyet-etkin bir çözüm olamadığı görülmektedir. Önümüzdeki yıllarda fotovoltaiik panellerin fiyatlarının düşmesi, verimliliklerinin yükselmesi, LED aydınlatma sistemlerinin etkinlik faktörlerinin artması, hükümet politikalarında karbon vergisi gibi kavramların yer alması gibi gelişmelerle, M4 ve M5 aydınlatma sınıfı yol tesisatlarında FV-LED sistemlerle teknik yönden olduğu gibi ekonomik açıdan da uygulanabilir çözümlere ulaşılması beklenmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Dialux Software.
<http://www.dial.de/DIAL/en/dialux-international-download.html>
- [2] TS EN 13201-2 Yol Aydınlatması- Bölüm 2: Performans Özellikleri, Nisan 2006.
- [3] YEGM, Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü, Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası (GEPA).
<http://www.eie.gov.tr/MyCalculator/Default.aspx>
- [4] Homer Software.
<http://homerenergy.com/>