

**MİMAR SİNAN GÜZEL SANATLAR ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FOTOVOLTAİK SİSTEMLER VE GÜNEŞE UYARLANABİLİR CEPHE  
SİSTEMLERİNİN ENERJİ ETKİNLİK YÖNÜNDEN DEĞERLENDİRİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Pelin KILIÇ KIZILTAŞ**

**Yapı Bilgisi Anabilim Dalı**

**Yapı Bilgisi Programı**

**Tez Danışmanı: Dr. Öğretim Üyesi N. Volkan GÜR**

**KASIM 2019**



Pelin Kılıç Kızıltaş tarafından hazırlanan 'Fotovoltaik Sistemler ve Güneşe Uyarlanabilir Cephe Sistemlerinin Enerji Etkinlik Yönünden Değerlendirilmesi' adlı bu tezin Yüksek lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi N. Volkan Gür

Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından Yapı Bilgisi Anabilim Dalında Yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Dr. Öğr. Üyesi N. Volkan Gür

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Emine S. Deniz

Üye : Dr. Öğr. Üyesi BİLGE YANARER DOĞAN

Bu tez, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.



Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel etik kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ücret karşılığı başka kişilere yazdırmadığımı (dikte etme dışında), uygulamalarımı yaptırmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

....



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>vii</b>
<b>KISALTMALAR</b> .....	<b>xi</b>
<b>SEMBOLLER</b> .....	<b>xiii</b>
<b>ÇİZELGE LİSTESİ</b> .....	<b>xv</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>xvii</b>
<b>ÖZET</b> .....	<b>xix</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>xxi</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Problemin Tanımı.....	1
1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı .....	2
1.3 Çalışmanın Planı ve Yöntemi.....	2
<b>2. BİNA CEPHELERİNDE KULLANILAN FOTOVOLTAİK SİSTEMLER...</b>	<b>3</b>
2.1 Fotovoltaik Sistem Tanımı ve Tarihi.....	3
2.2 Fotovoltaik Sistem Bileşenleri .....	4
2.2.1 Güneş hücreleri .....	4
2.2.2 İnvörtörler (Dönüştürücüler) .....	5
2.2.3 Aküler.....	5
2.3 Güneş Hücrelerinin Malzemesine göre Sınıflandırılması .....	5
2.3.1 Kristal silisyum güneş hücreleri .....	5
2.3.1.1 Monokristal yapılu güneş hücreleri.....	6
2.3.1.2 Polikristal yapılu güneş hücreleri.....	7
2.3.2 İnce film güneş hücreleri .....	7
2.3.2.1 Amorf silisyum güneş hücreleri .....	8
2.3.2.2 Kadmiyum tellür güneş hücreleri .....	8
2.3.2.3 Bakır indiyum galyum diselenid güneş hücreleri.....	9
<b>3. BİNA CEPHELERİNDE FOTOVOLTAİK SİSTEMLERİN GÜNEŞE</b>	
<b>UYARLANABİLİRLİĞİ</b> .....	<b>11</b>
3.1 Cephelerde Fotovoltaik Sistemlerin Güneşe Uyarlanabilirliği .....	11
3.2 Güneşe Uyarlanabilir Fotovoltaik Cephe Genel Tasarım Süreci .....	14
3.3 Güneş İzleme Sistemleri.....	16
3.3.1 Güneş konumunun belirlenmesi ve terminoloji .....	17
3.3.2 Güneş izleme sistemlerinin sınıflandırılması .....	18
3.3.3 Eksenlerine göre güneş izleme sistemleri .....	18
3.3.3.1 Tek eksenli izleyiciler .....	18
3.3.3.2 İki eksenli izleyiciler .....	19
3.3.3.3 Eksenlerine göre güneş izleme sistemlerinin karşılaştırılması....	20
3.3.4 Çalışma prensiplerine göre güneş izleme sistemleri .....	21
3.3.4.1 Pasif (mekanik) güneş izleme sistemleri .....	21
3.3.4.2 Açık döngülü güneş izleme sistemleri.....	28
3.3.4.3 Kapalı döngülü güneş izleme sistemleri .....	30

3.3.4.4 Hibrit döngülü güneş izleme sistemleri.....	34
3.3.4.5 Çalışma prensiplerine göre güneş izleme sistemlerinin karşılaştırılması .....	35
3.4 Güneşe Uyarlanabilir Fotovoltaik Sistem Bileşenleri .....	37
3.4.1 Fotovoltaik modül .....	38
3.4.2 Aktüatör.....	39
3.4.3 PV modül bağlantı elemanı .....	41
3.4.4 PV modül taşıyıcı çerçevesi .....	42
<b>4. GÜNEŞE UYARLANABİLİR CEPHE UYGULAMALARININ İNCELENMESİ .....</b>	<b>45</b>
4.1 Arab İnstitute (Paris, 1988) .....	46
4.2 River House (NewYork, ABD, 2009) .....	48
4.3 Architecture Science and Ecology Center (NewYork, ABD, 2009) .....	50
4.4 Al Bahr Towers (Abu Dhabi, 2012) .....	53
4.5 IBA Soft House (Hamburg, Germany, 2013).....	56
4.6 Henning Larsen’s University Building (Kolding, Denmark, 2014).....	61
4.7 The House of Natural Resources (Zurich, Switzerland, 2015) .....	64
<b>5. GÜNEŞE UYARLANABİLİR CEPHE SİSTEMLERİ İÇİN DEĞERLENDİRME KRİTERLERİNİN BELİRLENMESİ.....</b>	<b>71</b>
5.1 Cephe ile ilgili Performans Gereksinimleri .....	71
5.2 Cephelerde Güneşe Uyarlanabilir Sistemlere İlişkin Değerlendirme Kriterlerinin Belirlenmesi.....	73
5.2.1 Güneş kontrolü ve doğal aydınlatma .....	74
5.2.2 Enerji kazancı .....	74
5.2.3 Strüktürel etkinlik .....	75
5.2.4 PV malzemenin elektrik üretim düzeyi .....	75
5.2.5 Yaşam dönemi maliyeti .....	75
5.2.6 Etkin PV panel yüzey alanı .....	75
5.2.7 Güneşe uyarlanma düzeyi .....	76
5.2.8 Güneş hareketine tepki oluşturma süresi .....	76
5.3 Cephelerde Güneşe Uyarlanabilir Sistemler için Uygun Değerlendirme Yönteminin Belirlenmesi.....	77
5.3.1 Değerlendirmenin tanımı ve değerlendirme yöntemleri .....	77
5.3.2 Çok kriterli değerlendirme yöntemleri .....	79
5.3.3 Analitik hiyerarşi prosesi (AHP) yöntemi.....	79
5.3.3.1 Değerlendirme probleminin hiyerarşik yapısının belirlenmesi ...	80
5.3.3.2 Kriterlerin amaç için görelî önem değerlerinin belirlenmesi .....	80
5.3.3.3 Alternatiflerin her bir kriter için görelî önem değerlerinin belirlenmesi .....	84
5.3.3.4 Alternatiflerin tüm hiyerarşiyi kapsayan (amaç için) öncelik değerlerinin belirlenmesi .....	88
<b>6. GÜNEŞE UYARLANABİLİR CEPHE UYGULAMALARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....</b>	<b>91</b>
6.1 Değerlendirme Probleminin Hiyerarşik Yapısının Belirlenmesi .....	91
6.2 Kriterlerin Amaç için Görelî Önem Değerlerinin Belirlenmesi .....	92
6.3 Uygulamaların Her Bir Kriter için Görelî Önem Değerlerinin Belirlenmesi.	104
6.4 Uygulamaların Tüm Hiyerarşiyi Kapsayan (Amaç için) Öncelik Değerlerinin Belirlenmesi.....	123
<b>7. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME.....</b>	<b>129</b>
7.1 Sonuçlar.....	129



7.2 Değerlendirme .....	130
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>133</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>139</b>





## **KISALTMALAR**

<b>CIGS</b>	: Bakır indiyum galyum diselenid
<b>ICSF</b>	: Entegre konsantre güneş cephesi
<b>PLC</b>	: Programlanabilir mantıksal denetleyici
<b>PV</b>	: Fotovoltaik
<b>RG</b>	: Rassallık göstergesi
<b>SMA</b>	: Şekil hafızalı alarım
<b>TG</b>	: Tutarlılık göstergesi
<b>TO</b>	: Tutarlılık oranı
<b>UTC</b>	: Eşgüdümlü evrensel zaman



## SEMBOLLER

<b>cm<sup>2</sup></b>	: Santimetrekare
<b>DC</b>	: Doğru akım
<b>g</b>	: Gram
<b>h</b>	: Yükseklik
<b>km/h</b>	: Kilometre/saat
<b>kN</b>	: Kilo Newton
<b>kW<sub>p</sub></b>	: Kilowatt peak
<b>mm</b>	: Milimetre
<b>MPa</b>	: Mega Pascal
<b>N</b>	: Newton
<b>Σ</b>	: Toplam
<b>λ</b>	: Özdeğer



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 3.1 : Tek ve iki eksenli güneş izleme sistemlerinin karşılaştırılması. ....	20
Çizelge 3.2 : Çalışma prensiplerine göre güneş izleme sistemlerinin karşılaştırılması. .....	35
Çizelge 3.3 : Çerçeve ve kablo ağ özellikleri. ....	43
Çizelge 4.1 : Cephe uygulamalarına ilişkin genel bilgiler. ....	45
Çizelge 4.2 : Simülasyon sonuçları: net enerji talebi. ....	66
Çizelge 4.3 : Simülasyon sonuçları: toplam elektrik talebi. ....	67
Çizelge 5.1 : Kriterlerin göreceli önem derecelerini belirlemeye yönelik karşılaştırma ölçeği. ....	81
Çizelge 5.2 : Örnek bir İkili Karşılaştırma Matrisi. ....	82
Çizelge 5.3 : Kriterlerin amaç için göreceli önem değerleri matrisi. ....	82
Çizelge 5.4 : Rassallık göstergesi değerleri. ....	83
Çizelge 5.5 : Örnek alternatiflerin K1 kriteri için karşılaştırma matrisi. ....	84
Çizelge 5.6 : Örnek alternatiflerin K1 kriteri için göreceli önem değerleri matrisi. ....	85
Çizelge 5.7 : Örnek alternatiflerin K2 kriteri için karşılaştırma matrisi. ....	86
Çizelge 5.8 : Örnek alternatiflerin K2 kriteri için göreceli önem değerleri matrisi. ....	86
Çizelge 5.9 : Örnek alternatiflerin K3 kriteri için karşılaştırma matrisi. ....	87
Çizelge 5.10 : Örnek alternatiflerin K3 kriteri için göreceli önem değerleri matrisi. ..	87
Çizelge 5.11 : Örnek alternatiflerin tüm kriterler için önem değerleri matrisi. ....	88
Çizelge 5.12 : Kriterlerin önem değerleri matrisi. ....	88
Çizelge 5.13 : Örnek alternatiflerin toplam değerlerinin bulunması. ....	89
Çizelge 6.1 : Kriter puanlama matrisi. ....	92
Çizelge 6.2 : Kriterlerin amaç için göreceli önem değerleri matrisi. ....	102
Çizelge 6.3 : K1 kriterine göre cephe uygulaması karşılaştırma matrisi . ....	105
Çizelge 6.4 : Cephe uygulamalarının K1 kriteri için göreceli önem değerleri matrisi. .....	105
Çizelge 6.5 : K2 kriterine göre cephe uygulaması karşılaştırma matrisi. ....	107
Çizelge 6.6 : Cephe uygulamalarının K2 kriteri için göreceli önem değerleri matrisi. .....	108
Çizelge 6.7 : K3 kriterine göre cephe uygulaması karşılaştırma matrisi. ....	110
Çizelge 6.8 : Cephe uygulamalarının K3 kriteri için göreceli önem değerleri matrisi. .....	110
Çizelge 6.9 : K4 kriterine göre cephe uygulaması karşılaştırma matrisi. ....	112
Çizelge 6.10 : Cephe uygulamalarının K4 kriteri için göreceli önem değerleri matrisi. .....	112
Çizelge 6.11 : K5 kriterine göre cephe uygulaması karşılaştırma matrisi. ....	114
Çizelge 6.12 : Cephe uygulamalarının K5 kriteri için göreceli önem değerleri matrisi . .....	114

<b>Çizelge 6.13</b> : K6 kriterine göre cephe uygulaması karşılaştırma matrisi. ....	<b>116</b>
<b>Çizelge 6.14</b> : Cephe uygulamalarının K6 kriteri için görelî önem değerleri matrisi . .....	<b>117</b>
<b>Çizelge 6.15</b> : K7 kriterine göre cephe uygulaması karşılaştırma matrisi. ....	<b>118</b>
<b>Çizelge 6.16</b> : Cephe uygulamalarının K7 kriteri için görelî önem değerleri matrisi . .....	<b>119</b>
<b>Çizelge 6.17</b> : K8 kriterine göre cephe uygulaması karşılaştırma matrisi. ....	<b>121</b>
<b>Çizelge 6.18</b> : Cephe uygulamalarının K8 kriteri için görelî önem değerleri matrisi . .....	<b>121</b>
<b>Çizelge 6.19</b> : Cephe uygulamalarının tüm kriterler için önem değerleri matrisi. .	<b>123</b>
<b>Çizelge 6.20</b> : Kriterlerin amaç için önem değerleri matrisi. ....	<b>123</b>
<b>Çizelge 6.21</b> : Güneşe uyarlanabilir cephe uygulamalarının amaç için öncelik değerlerinin bulunması. ....	<b>127</b>





## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1 : Güneş hücresi çalışma prensibi. ....	4
Şekil 2.2 : Güneş hücrelerinin modül-panel-dizi olarak düzenlenmesi. ....	5
Şekil 2.3 : Monokristal güneş hücresi yapısı. ....	6
Şekil 2.4 : İnce film güneş hücreleri ve uygulanma biçimi. ....	7
Şekil 2.5 : Amorf silikon içeren üç fazlı yapının şematik gösterimi. ....	8
Şekil 3.1 : Çatı ve cephe arasındaki güneş ışınım farkı. ....	12
Şekil 3.2 : Güneş uyarlanabilir fotovoltaik cephe tasarım yaklaşımı. ....	13
Şekil 3.3 : Güneşe uyarlanabilir fotovoltaik cephe tasarım süreci. ....	15
Şekil 3.4 : Güneş sapma açısı. ....	17
Şekil 3.5 : Güneş azimut ( $\gamma_s$ ), yükseklik ( $\alpha_s$ ) ve zenit ( $\theta_z$ ) açıları. ....	17
Şekil 3.6 : Güneş izleme sistemleri sınıflandırması. ....	18
Şekil 3.7 : (a) Azimuth açısını (doğu-batı) izleme, (b) Güneş geliş açısını izleme. ....	19
Şekil 3.8 : İki eksenli güneş izleme sistemi. ....	19
Şekil 3.9 : (a) Akşamdan batıya yönelmiş şekilde kalan panelde, sabah alttaki tüp daha fazla ısınmakta ve içindeki sıvı genişmekte, (b) her iki tüp eşit düzeyde ısınana kadar panel dönmekte, (c) güneş hareketini panel takip etmekte, (d) panel, akşam batıya dönerek o yönde kalmaktadır. ....	22
Şekil 3.10 : Zomeworks Ltd. tarafından üretilen termal genişlemeye dayalı olarak çalışan pasif bir güneş takipçisi. ....	22
Şekil 3.11 : Bimetalik şerit kullanılarak üretilen pasif güneş takipçisi prototipi. ....	24
Şekil 3.12 : Güneş takipçisi sabah yönlenmesi (a) önce, (b) sonra. ....	26
Şekil 3.13 : Güneş takipçisi (a) planı, (b) görünüşü . ....	27
Şekil 3.14 : Sabit ve takipçili sistemlerde enerji karşılaştırması. ....	29
Şekil 3.15 : (a) Enlem açısı ile eşit eğim açılı tek eksenli güneş izleme sistemi, (b) Enlem açısı ile eşit eğim açılı iki eksenli ekvatorial güneş izleme sistemi, (c) iki eksenli azimut izleyicili sistem. ....	30
Şekil 3.16 : Gölge dengeleme prensibine dayalı güneş takip sistemi, (a) Güneş hedefleme algılayıcıları (b) Işık algılayıcılarının eğik montajı (c) Optik yönlendirici ile hassas güneş hedefleme. ....	31
Şekil 3.17 : 1 kWp güneş kurulumu için geliştirilen kapalı döngülü, iki eksenli güneş izleme sistemi. ....	32
Şekil 3.18 : (a) İzleme sisteminin planı, (b) düzeni. ....	33
Şekil 3.19 : Tek rotorlu, 4 panelli sistemin sabah ve öğleden sonraki pozisyonları. ....	34
Şekil 3.20 : Dinamik krigami yapıları. ....	38
Şekil 3.21 : Güneşe uyarlanabilir fotovoltaik sistem modülü. ....	39
Şekil 3.22 : Basınç altında bükülmüş yumuşak pnömatik aktüatör. ....	40
Şekil 3.23 : (a) Aktüatör planı, (b) Kesiti, (c), (d), (e) Bileşenleri, (f) Modeli. ....	40
Şekil 3.24 : (a) Sönük aktüatör, (b), (c), (d) 1., 2. ve 3. haznelerin sırasıyla şişme durumları. ....	41

Şekil 3.25 : Çift bükümlü ve lazer kesimli paslanmaz çelik tutucu giriş. ....	42
Şekil 3.26 : Çerçeve ve kablo ağ render görünümü. ....	42
Şekil 4.1 : Güneş kontrol elemanlarının kullanıldığı Paris Arap Enstitüsü bina cephesi. .....	46
Şekil 4.2 : Açılıp kapanarak güneş kontrolü sağlayan diyafram mekanizmalarının (a) dışarıdan görünümü, (b) içeriden görünümü. ....	46
Şekil 4.3 : Paris Arap Enstitüsü binası iç mekan görünümü. ....	47
Şekil 4.4 : Paris Arap Enstitüsü diyafram mekanizması cephe kesiti. ....	48
Şekil 4.5 : River House genel görünüm. ....	49
Şekil 4.6 : River House güneşe uyarlanabilir fotovoltaik sistemi. ....	49
Şekil 4.7 : Entegre konsantre güneş cephesi iç mekandan görünüm. ....	51
Şekil 4.8 : Entegre konsantre güneş cephesi. ....	51
Şekil 4.9 : Cam paneller arasına yerleştirilen piramit biçimli güneş yoğunlaştırıcı. ....	52
Şekil 4.10 : Entegre konsantre güneş cephesi çalışma prensibi. ....	52
Şekil 4.11 : Güneşe uyarlanabilir dinamik cephe tasarımına sahip Al Bahr Towers. .....	54
Şekil 4.12 : Birimlerin katlanarak açılma ve kapanma hareketi (soldan sağa: kapalı durumdan açık duruma). ....	55
Şekil 4.13 : Birimlerin birbirinden bağımsız olarak güneşe uyarlanan pozisyonlarının cephedeki görünümü. ....	55
Şekil 4.14 : IBA Soft House görünümü. ....	57
Şekil 4.15 : Tekstil membranların model üzerinden büküm değerlendirmesi. ....	57
Şekil 4.16 : Tekstil membran şeritlerin günün belli saatlerinde pozisyonları. ....	58
Şekil 4.17 : Tekstil membran şeritlerin bağlı olduğu DC motoru ile güneşe uyarlı durumu. ....	58
Şekil 4.18 : Sistem bileşenleri. ....	59
Şekil 4.19 : Henning Larsen's Üniversite binası genel görünümü. ....	61
Şekil 4.20 : Açılıp kapanarak güneş kontrolü sağlayan üçgen biçimli delikli panjurların (a) dışarıdan görünümü, (b) içeriden görünümü. ....	62
Şekil 4.21 : Henning Larsen's Üniversite binası güneşe uyarlanabilir panjur mekanizması plan detayı. ....	62
Şekil 4.22 : Henning Larsen's Üniversite binası güneşe uyarlanabilir panjur mekanizması iç konstrüksiyonu. ....	63
Şekil 4.23 : Simülasyon modeli. ....	65
Şekil 4.24 : (a) Özel bir güneş pozisyonu için gölgeleme deseni, (b) Mümkün modül dizisi bağlantısı. ....	66
Şekil 4.25 : (a) Ön görünüş, (b) kablo ağ ve aktüatörlerin arka görünüşü, (c) açık ve kapalı konfigürasyonlar. ....	67
Şekil 4.26 : Doğal kaynaklar evi güney cephe genel görünümü. ....	68
Şekil 5.1 : Değer kriterlerinin belirlenmesini etkileyen unsurlar. ....	73
Şekil 5.2 : Değerlendirmede genel aşamalar. ....	78
Şekil 5.3 : Problemin çözümüne yönelik değerlendirme hiyerarşisi. ....	80
Şekil 6.1 : Güneşe uyarlanabilir cephe sistemleri için değerlendirme hiyerarşisi. ...	92

# FOTOVOLTAİK SİSTEMLER VE GÜNEŞE UYARLANABİLİR CEPHE SİSTEMLERİNİN ENERJİ ETKİNLİK YÖNÜNDEN DEĞERLENDİRİLMESİ

## ÖZET

Bu çalışmada, güneşe uyarlanabilir cephe sistemleri, değişken atmosferik koşullar ve iç mekan kullanıcı gereksinimleri dikkate alınarak oluşturulan kriterler bağlamında değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmenin amacı, farklı tasarıma sahip güneşe uyarlanabilir cephe uygulamalarının avantaj ve dezavantajlarını görerek bu uygulamaların potansiyellerini ortaya çıkarmak ve verimliliklerinin artırılmasına katkı sağlamaktır.

Çalışma yedi bölümden oluşmuştur. İlk bölümde, problemin tanımı yapılmış, çalışmanın amacı, kapsamı ve yöntemi açıklanmıştır.

İkinci bölümde, fotovoltaik sistemler ile ilgili bilgi verilmiştir. Fotovoltaik sistemin tanımı yapılmış ve tarihesinden bahsedilmiştir. Fotovoltaik sistemin ana bileşenleri olan güneş hücreleri, invertörler ve aküler tanıtılmıştır. Güneş hücreleri malzemesine göre silisyum esaslı ve ince filmler olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Silisyum esaslı güneş hücreleri kendi içinde monokristal ve polikristal yapılı olmak üzere ikiye ayrılarak açıklamaları yapılmıştır. İnce filmler ise amorf silisyum, kadmiyum tellür ve bakır indiyum galyum diselenid olarak üç gruba ayrılmıştır.

Üçüncü bölümde, güneşe uyarlanabilirlik konusunun daha kolay anlaşılması için, uyarlanabilme kavramı ele alınmıştır. Cephelerin güneşe uyarlanma ihtiyacı ve uyarlanmanın yapıya sağladığı faydalar açıklanmıştır. Güneşe uyarlanabilir fotovoltaik sistemli bir cephenin genel tasarım süreci adım adım açıklanmıştır. Güneşi takip etmenin olmazsa olmaz bir gereği, güneş izleme sistemi ve özellikleri açıklanmıştır. Konunun daha kolay anlaşılabilmesi için gerekli güneş terminolojisi verilmiştir. Bundan sonra, güneş izleme sistemleri, eksenlerine ve çalışma prensiplerine göre olmak üzere iki gruba ayrılmıştır. Eksenlerine göre güneş izleme sistemleri tek ve iki eksenli olarak iki grupta açıklanmıştır. Eksenlerine göre güneş izleme sistemlerinin kendi içinde karşılaştırması yapılmıştır. Çalışma prensiplerine göre ise bu sistemler, pasif (mekanik), açık döngülü, kapalı döngülü ve hibrit döngülü güneş izleme sistemleri olarak dört grupta açıklanmıştır. Çalışma prensiplerine göre güneş izleme sistemlerinin de kendi içinde karşılaştırması yapılmıştır. Bundan sonra güneşe uyarlanabilir bir fotovoltaik sistemin ana bileşenleri açıklanmıştır. Bileşenler, fotovoltaik modül, aktüatör, PV modül bağlantı elemanı ve PV modül taşıyıcı çerçeve olarak dört grupta ayrı ayrı açıklanmıştır.

Dördüncü bölümde, değerlendirme için seçilen güneşe uyarlanabilir cephe uygulamaları detaylı olarak incelenmiştir.

Beşinci bölümde, değerlendirmede faydalanmak üzere bilinmesi gereken cephe ile ilgili performans gereksinimleri verilmiştir. Bundan sonra, fotovoltaik sistemin

entegre edildiği ve edilmediği güneşe uyarlanabilir cephe sistemlerinin değerlendirilmesinde kullanılmak üzere değerlendirme kriterleri belirlenmiştir. Kriterler;

1. Güneş kontrolü ve doğal aydınlatma
2. Enerji kazancı
3. Strüktürel etkinlik
4. PV malzemenin elektrik üretim düzeyi
5. Yaşam dönemi maliyeti
6. Etkin PV panel yüzey alanı
7. Güneşe uyarlanma düzeyi
8. Güneş hareketine tepki oluşturma süresi

olmak üzere sekiz adet değerlendirme kriteri ayrı başlıklar altında açıklanmıştır.

Değerlendirme kriterlerinin açıklanmasının ardından değerlendirme konusu üzerine bilgiler verilmiştir. Değerlendirmenin tanımı yapılmış ve değerlendirme yöntemleri açıklanmıştır. Çalışmada çok kriterli karar verme problemlerinde kullanılan Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) yöntemi uygulanmıştır. Bu değerlendirme yönteminin ilk aşamasını problemin hiyerarşik yapısının belirlenmesi oluşturmaktadır. İkinci aşamasını kriterlerin hedeflenen amaç için görelî önem değerlerinin belirlenmesi oluşturmaktadır. Kriterlerin hedeflenen amaç için görelî önem değerlerinin belirlenmesi işlemi için ikili karşılaştırma metodu kullanılmıştır. Bu metod uygulanırken karar vermeye yardımcı Saaty' nin geliştirdiği bir puanlama ölçeği (1-9) kullanılmıştır. Kriterlerin önem değerleri belirlendikten sonra tutarlılık hesabı gerçekleştirilmiştir. Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) yönteminin üçüncü adımını uygulamaların her bir kriter için görelî önem değerlerinin belirlenmesi oluşturmaktadır. Değerlendirilecek örnekler, bu adımda, her bir kriter için ayrı tablolarda yapılan ikili karşılaştırmalar ile önem puanları kazanır ve bu önem değerlerinin tutarlılık hesabı gerçekleştirilir. Tutarlılık oranı değeri, 0,1'den küçük ise tutarlı olarak değerlendirilir ve yönteme devam edilir. Tutarlı değil ise yeniden ikili karşılaştırmalar ile puanlama gerçekleştirilir. Her bir kriter için tüm örnekler bu şekilde ayrı ayrı değerlendirilir. Değerlendirmenin son aşamasında, uygulamaların tüm hiyerarşiyi kapsayan (amaç için) öncelik değerlerinin belirlenmesi yer almaktadır. Bunun için, kriterlerin görelî önem değerleri matrisi ile örneklerin görelî önem değerleri matrisi çarpılır. Sonuç olarak tüm örneklerin amaç için öncelik değerleri elde edilir.

Altıncı bölümde, belirlenen güneşe uyarlanabilir cephe uygulamaları üzerinde Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) yönteminin uygulanması gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın yedinci bölümünde güneşe uyarlanabilir cephe uygulamaları, değerlendirmede amaç için elde ettikleri öncelik değerlerine göre sıralanmıştır. Bu sıralamaya göre uygulamalar arasında değerlendirmeler yapılmıştır. Yapılan değerlendirmelere göre uyarlanabilir cephe sistemi teknolojilerinin gelişmişlik düzeyi ve diğer yapı teknolojileri ile etkileşim düzeyi, yapı enerji etkinliği düzeyinin belirlenmesinde büyük etkiye sahiptir.

# **EVALUATION OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS AND SOLAR ADAPTABLE FACADE SYSTEMS FOR ENERGY EFFICIENCY**

## **SUMMARY**

In this study, solar adaptable façade systems have been evaluated in the context of the criteria formed by taking into account the variable atmospheric conditions and interior user requirements. The aim of this evaluation is to see the advantages and disadvantages of solar adaptable façade applications with different designs, to reveal their potential and contribute to their efficiency.

The study consists of seven chapters. In the first part, the problem is defined and the purpose, scope and method of the study are explained.

In the second chapter, information about photovoltaic systems is given. The definition of photovoltaic system is made and its history is mentioned. The main components of the photovoltaic system are solar cells, inverters and batteries. According to the solar cell material, it is divided into silicon based and thin films. Silicon based solar cells are divided into two as monocrystalline and polycrystalline structure and their explanations are made. Thin films were divided into three groups as amorphous silicon, cadmium telluride and copper indium gallium diselenide.

In the third chapter, the concept of adaptability is discussed in order to make the understanding of solar adaptability easier. The need for facades to adapt to the sun and the benefits of adaptation to the structure are explained. The general design process of a facade with solar adaptive photovoltaic system is explained step by step. An essential necessity of tracking the sun, the solar monitoring system and its features are explained. Necessary solar terminology is given to make the subject easier to understand. Thereafter, solar monitoring systems are divided into two groups according to their axes and operating principles. According to the axis of the solar monitoring systems are described in two groups as uniaxial and biaxial. The comparison of the solar monitoring systems according to their axes has been made. According to operating principles, these systems are described in four groups as passive (mechanical), open loop, closed loop and hybrid loop solar monitoring systems. According to the working principles, solar monitoring systems are also compared in itself. Next, the major components of a solar adaptable photovoltaic system are described. The components are described separately in four groups as photovoltaic module, actuator, PV module connector and PV module carrier frame.

In the fourth chapter, the solar adaptable façade applications selected for evaluation are examined in detail.

In the fifth chapter, the performance requirements related to the facade which are required to be used in the evaluation are given. After that, evaluation criteria were determined to be used in the evaluation of solar adaptable façade systems with and without the photovoltaic system. Criteria;

1. Solar control and natural lighting
2. Energy gain
3. Structural activity
4. Electricity production level of PV material
5. Cost of life period
6. Effective PV panel surface area
7. Level of adaptation to the sun
8. Time to react to solar movement

eight evaluation criteria are explained under separate headings.

After the evaluation criteria were explained, information was given on the subject of evaluation. The definition of the evaluation was made and the evaluation methods were explained. In this study, Analytical Hierarchy Process (AHP) method, which is used in multi - criteria decision making problems, was applied. The first stage of this evaluation method is to determine the hierarchical structure of the problem. The second stage is the determination of the relative importance values of the criteria for the intended purpose. The paired comparison method was used to determine the relative significance values of the criteria for the intended purpose. In applying this method, a scoring scale (1-9) developed by Saaty, which helps decision-making, is used. After determining the importance values of the criteria, consistency calculation was performed. The third step of the Analytical Hierarchy Process (AHP) method is to determine the relative significance values of the applications for each criterion. In this step, the samples to be evaluated gain significance points by paired comparisons made in separate tables for each criterion and the consistency calculation of these significance values is performed. If the consistency ratio value is less than 0.1, it is evaluated as consistent and the method is continued. If it is not consistent, scoring is performed again with binary comparisons. All samples are evaluated separately for each criterion. In the final stage of the evaluation, the priority values of the applications covering the whole hierarchy (for the purpose) are determined. To do this, the relative significance values matrix of the criteria is multiplied by the relative significance values matrix of the samples. As a result, priority values of all samples are obtained for the purpose.

In the sixth chapter, Analytical Hierarchy Process (AHP) method is applied on the determined solar adaptable façade applications.

In the seventh part of the study, solar adaptive façade applications are listed according to the priority values obtained for the purpose in evaluation. According to this ranking, evaluations were made between the applications. According to the evaluations made, the level of development of adaptive façade technologies and the interaction level with other building technologies have a great effect in determining the level of building energy efficiency.







# 1. GİRİŞ

## 1.1 Problemin Tanımı

Sanayileşme ve makineleşme ile birlikte petrol türevi enerji kaynaklarına dayalı bir yaşam biçimi, rezervlerin tükenme olasılığını doğurmuştur. Bu durumu takiben bir çok yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelme gerçekleştiği gibi tüm enerjilerin kaynağı ve sonsuz olan güneş enerjisi de ön plana çıkmaya başlamıştır. Enerji tüketimi konusunda yapıların tükettiği enerji miktarı da önemli düzeydedir. Çünkü dünyanın enerji tüketiminin yaklaşık olarak yarısı yapılar tarafından gerçekleştirilmektedir. Bu durum, yapının, enerji tüketimini azaltan ve hatta enerji üretmesi mümkün olabilecek bir araca dönüşmesine vesile olmuştur. Bu doğrultuda yapının enerji etkinliğinde büyük rolü olan cephe, iç ve dış ortam arasında yer alan aktif bir arayüze dönüşmeye başlamıştır. Öncelikle cephelerin güneşe uyarlandığı uygulamalar ile yapıların enerji tüketiminin azaltılması başarılmıştır. Sonrasında cepheler yalnızca enerji tüketimini azaltmamış enerji üretimi gerçekleştirmeye başlamıştır. Cephedeki bu enerji üretimi fotovoltaik (PV) sistemlerin cephelerde kullanımı ile mümkün olmuştur. Güneş enerjisinden elektrik üreten PV sistemlerin cepheye entegre biçimde uygulaması, bir çok aşama kaydetmiştir. Ancak, yatay ve düşey yüzeylere düşen güneş ışınım miktarındaki fark, çatı uygulamalarını daha fazla ön plana çıkarmıştır. Aynı zamanda PV sistemlerin hareketsiz sistemler olması, gün ve mevsimler boyunca değişen açılarda gelen güneş ışınımını tam olarak yakalayamamalarına sebep olmuştur. Bunun sonucu olarak, cephelerde PV sistem uygulamaları düşük verimli olarak kalmıştır. Teknoloji ile paralel olarak PV sistemlerin de güneşe uyarlanabilmesi mümkün olmuştur. Bu bağlamda güneşe uyarlanabilir cephe sistemleri gelişmiş ve gelişmeye devam etmektedir.

Yukarıda belirtilen sebeplerden hareketle, ‘güneşe uyarlanabilir cephe sistemlerinin enerji etkinliğinin olabileceğinden daha düşük olması’ bu tezin problem alanı olarak belirlenmiştir.

## 1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Güneşe uyarlanabilir cephe uygulamalarının tez içinde belirlenen kriterler bağlamında değerlendirilmesi ve bu uygulamaların verimliliklerinin artırılması tezin amacını oluşturmaktadır. Bu amaç doğrultusunda fotovoltaik sistemler, bu sistemlerin güneşe uyarlanabilirliği ve güneşe uyarlanabilir cephe sistemleri tez kapsamında ele alınmıştır. Değerlendirilecek örnekler, değerlendirme kriterlerine mümkün olduğu kadar farklı cevaplar oluşturan uygulamalar olacak biçimde belirlenmiştir.

## 1.3 Çalışmanın Planı ve Yöntemi

Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında aşağıdaki aşamalardan oluşan bir yol izlenmiştir:

- Öncelikle, tez çalışması için problem alanı belirlenerek, bu problemin çözümüne yönelik olan amaç ve kapsamın oluşturulması
- Çalışmada, güneşe uyarlanabilir cephe sistemlerinin anlaşılması için, gerekli olan temel bilgiler, fotovoltaik (PV) sistem tanımı ve tarihçesi, fotovoltaik sistem bileşenleri, güneş hücrelerinin sınıflandırılması ve özellikleri, sistemin güneşe uyarlanabilirliği, sistemin genel tasarım süreci, güneş izleme sistemleri konularının açıklanması
- Değerlendirilecek güneşe uyarlanabilir cephe uygulamalarının açıklanması
- Cephe ile ilgili performans gereksinimlerinin belirtilmesi, güneşe uyarlanabilir sistemli cepheler için değerlendirme kriterlerinin açıklanması
- Güneşe uyarlanabilir cephe uygulamalarının analizine yönelik değerlendirme yönteminin belirlenmesi

Değerlendirmenin doğru bir şekilde gerçekleştirilmesi, ancak sistematik bir değerlendirme yöntemi ile mümkün olabilir. Değerlendirme süreci sonunda alternatiflerin amacı gerçekleştirme açısından önem değerlerinin ortaya konulmasına ve sürecin denetlenebilir olmasına imkan tanıyan Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) yöntemi, çalışmada kullanılabilecek uygun bir yöntem olarak tercih edilmiştir.

- Belirlenen değerlendirme yönteminin kriterler bağlamında incelenen güneşe uyarlanabilir cephe sistemleri üzerinde uygulanması
- Tez çalışmasından elde edilen sonuçların sunulması ve değerlendirmelerin yapılması

## 2. BİNA CEPHELERİNDE KULLANILAN FOTOVOLTAİK SİSTEMLER

### 2.1 Fotovoltaik Sistem Tanımı ve Tarihçesi

Fotovoltaik (photovoltaic), Yunanca ışık anlamına gelen “photos” sözcüğü ve elektrik akımının bulunmasını sağlayan makineyi tasarlayan Alessandro Volta'nın isminden gelen ‘voltaic’ sözcüğünün birleşmesi ile meydana gelmektedir. Fotovoltaik sistem, güneş ışığının doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülmesini sağlayan düzendir. Fransız fizikçi Becquerel ilk kez 1839 yılında, elektrolit içerisine daldırılan elektrotların arasındaki gerilimin (voltajın), elektrolit üzerine düşen ışığa bağımlı olduğunu gözlemleyerek fotovoltaik sistemi keşfetmiştir (Oktik, 2001; Özdoğan, 2005; Sayın ve Koç, 2011). Becquerel fotovoltaik etkiyi şöyle tanımlamaktadır:

“Enerjinin bir formu olan ışık, bir fotovoltaik hücrenin içine girer ve elektronları harekete geçirmeye yetecek enerjiyi ortaya çıkarır. Bu enerji elektronların bir elektrik akımı oluşturabilecekleri kadar voltajı üretmelerini sağlar (Sick ve Erge, 1996; Sayın ve Koç, 2011).”

Başlangıçta elektrolit (sıvı) içinde farkedilerek keşfedilen fotovoltaik etki, 1876 yılında G.W. Adams ve R.E. Day tarafından selenyum kristalleri üzerinde de farkedilmiştir. Sonraki yıllarda bakır oksit ve selenyuma dayalı fotovoltaik diyotlar, fotoğrafçılık alanında, ışık metrelerinde yaygın olarak kullanılmıştır. 1914 yılında güneş enerjisini %1 verimle elektrik enerjisine dönüştürmeyi sağlayan piller üretilmiştir. Ancak, bu güneş pillerinden yeterli düzeyde bir elektrik üretimi sağlanamamıştır. Güneş enerjisini %6 verimlilikle elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik diyotlar, 1956 yılında Chaplin ve Fuller tarafından üretilmiştir (Oktik, 2001; Özdoğan, 2005; Sayın ve Koç, 2011). Bu gelişmelerden sonra fotovoltaik sistemler, uzay teknolojisinde uydu araçlarında elektrik üretme amacı ile kullanılmaya başlanmıştır. Teknolojik gelişmeler doğrultusunda saat ve hesap makinelerinde, sokak aydınlatmasında kullanılmıştır. 1981 yılından beri de binalara entegre olarak kullanılmakta ve geliştirilmektedir. Binalarda ilk kez çatılarda uygulanmıştır.

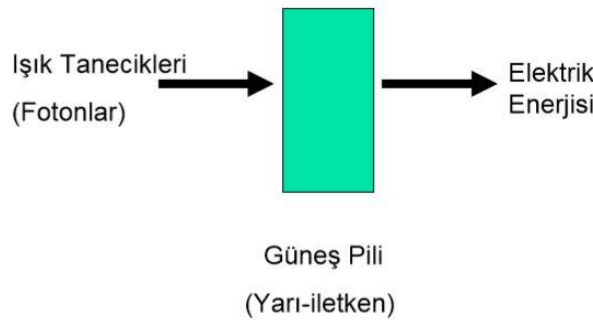
Çatılarda ilk kullanımlarda, özel olarak üretilen fotovoltaik çatı panelleri mevcut çatılara ayrı bir sistem olarak ilave edilmiştir, sonraları gelişen teknoloji ile doğrudan çatı kaplama malzemesi olarak üretilmiş ve uygulanmıştır. Güneş ışınım miktarının PV panel üzerindeki etkileri üzerine yapılan çalışmalar, fotovoltaiklerin bina cepesinde de etkin bir biçimde kullanılabilceğini göstermiştir. 1992'den bu yana uygulamalar artarak devam etmektedir (Çelebi, 2002; Özdoğan, 2005).

## 2.2 Fotovoltaik Sistem Bileşenleri

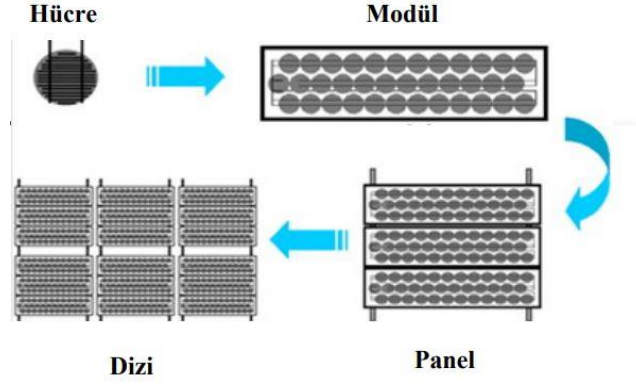
Fotovoltaik sistemlerde kullanılan temel bileşenler; güneş hücreleri, dönüştürücüler ve akülerdir. Sistemin güvenli çalışabilmesi için bazı yardımcı bileşenlerin kullanımı da gereklidir. Sistemde cihazların birbirine bağlanmasını sağlayan paralel veya seri bağlı kablolar, sigortalar, diyotlar, güç izleyicileri ve çeşitli sayaçlar gibi yardımcı bileşenlerde kullanılmaktadır (Kantaroglu, 2010). Tez kapsamında fotovoltaik sistemlerin temel bileşenleri ele alınacaktır.

### 2.2.1 Güneş hücreleri

Fotovoltaik modüllerin en küçük birimi güneş hücreleridir. Bu hücreler güneş enerjisi ile elektrik üreten yarı iletken malzemelerden üretilmişlerdir (Şekil 2.1). Tek bir hücreden elde edilen enerji çok az olduğu için hücreler birbirlerine seri veya paralel bağlanarak modüller oluşturulmaktadır. Modüller birleştirilerek paneller, paneller birleştirilerek fotovoltaik dizisi oluşturulmaktadır. Fotovoltaik modüller, 100 cm<sup>2</sup> civarında yüzey alanına sahip ve 0,2 veya 0,4 mm kalınlığa sahiptirler. Modül-panel ve dizi şekillerinde bağlanabildiği için istenilen boyutlarda uygulanabilmektedir (Şekil 2.2), (Ayçam ve Kanan, 2009; Sayın ve Koç, 2011; Yılmaz ve Vural, 2015).



Şekil 2.1 Güneş hücresi çalışma prensibi (Url-1).



**Şekil 2.2** Güneş hücrelerinin modül-panel-dizi olarak düzenlenmesi (Url-1).

### 2.2.2 İnvörtörler (Dönüştürücüler)

Fotovoltaik sistemde doğru akım enerjisi üretilmektedir. Bu enerjinin cihazlarda kullanılması için alternatif akıma dönüştürülmesini sağlayan PV sistem bileşenine invertör denilmektedir (Sayın ve Koç, 2011).

### 2.2.3 Aküler

Fotovoltaik sistemde üretilen elektrik enerjisi, tüketilmediği durumda depolanmalıdır. Enerji depolama görevini yerine getiren bileşenler, akülerdir. Her PV sistem için farklı sayıda aküye ihtiyaç vardır. Sistem için yapılacak hesaplama ile kaç adet aküye ihtiyaç olduğu tespit edilmektedir. Günümüzde kurşun-asit ve nikel kadmiyum tipi aküler PV sistemlerde tercih edilmektedir (Sayın ve Koç, 2011).

## 2.3 Güneş Hücrelerinin Malzemesine göre Sınıflandırılması

Güneş hücreleri, üretildikleri malzeme türüne göre iki grupta toplanabilmektedir. Birincisi, geleneksel silikon esaslı güneş hücreleridir. İkincisi, ince film güneş hücreleri olmaktadır.

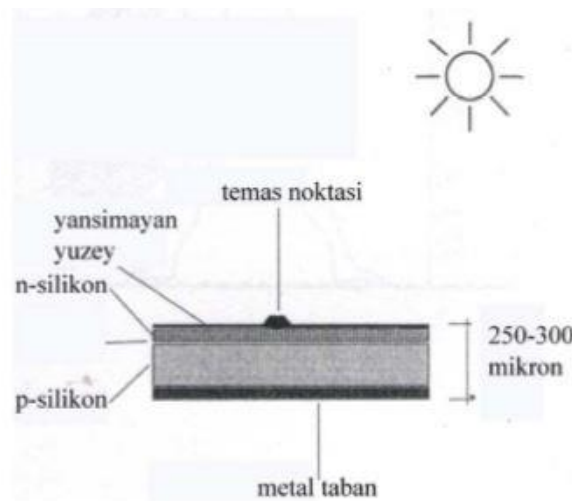
### 2.3.1 Kristal silisyum güneş hücreleri

Güneş ışınlarının elektrik enerjisine çevrilmesinde kullanılan hücrelerin temel yapıtaşı silisyum olan yarı iletken sistemlerdir. Kuartzın %90'ı silisyumdur. Kuartzın işlenmesi ile %99 silika elde edilir. Sonra, silikadan silisyum elde edilir. Silisyum güneş hücreleri, monokristal ve polikristal yapıları olarak incelenebilir. Silisyum saflaştırılarak yarı iletken niteliğinde çok kristalli silisyum elde edilmektedir. Çok kristalli

silisyumun eritilip, büyütülmesi ve elmas testere ile dilimlere ayrılması ile tek kristalli silisyum elde edilmektedir. Monokristal silisyum yapılı güneş hücrelerinin etkinliği %15 civarındadır. Polikristal yapılı güneş hücrelerinin etkinliği ise monokristal yapılı hücreden daha azdır. Fakat ucuzluğu ve üretim kolaylığı nedeniyle tercih edilmektedir (Oktik, 2001; Özdoğan, 2005; Sayın ve Koç, 2011; Gemicioğlu, 2011).

### 2.3.1.1 Monokristal yapılı güneş hücreleri

Monokristal yapılı güneş hücreleri, güneş ışınlarının elektrik enerjisine dönüştürülmesinde yüksek verimlilikle çalışan hücrelerdir. Bu hücreler, koyu mavi renkli ve ağırlığı 10 gramdan azdır. Hücrenin üst yüzeyinde, hücrenin üreteceği akımı toplayacak ve malzemesi genellikle bakır olan temas noktaları vardır. Bunların altında yansıtıcı özelliği olmayan bir kaplama tabakası bulunmaktadır. Bu tabaka, hücre yüzeyinden olan yansımayı önler. Hücrenin ön yüzeyi, normal olarak yansıyan ışığın bir kısmını daha yakalayabilmek amacıyla, piramitler ve konikler şeklinde tasarlanmıştır. Yansıtıcı olmayan kaplamanın altında, pilin elektrik akımının ortaya çıktığı iki farklı katmandan oluşan bir yapı bulunur. N-katmanı, fosfor atomları eklenmiş silisyumdan oluşan ve hücrenin negatif tarafını oluşturan katmandır. P-katmanı ise, bor atomları eklenmiş silisyumdan oluşmuş, hücrenin pozitif tarafıdır. İki katman arasında, p-n kavşağı denilen, pozitif ve negatif yüklü elektronların karşılaştığı bir bölge bulunur. Hücrenin arka yüzeyinde ise elektronların girdiği pozitif kontak görevi gören arka kontak yer almaktadır. Monokristal yapılı güneş hücresinin katman şeması Şekil 2.3’ de verilmektedir (Özdoğan, 2005; Sayın ve Koç, 2011; Gemicioğlu, 2011), (Şekil 2.3).



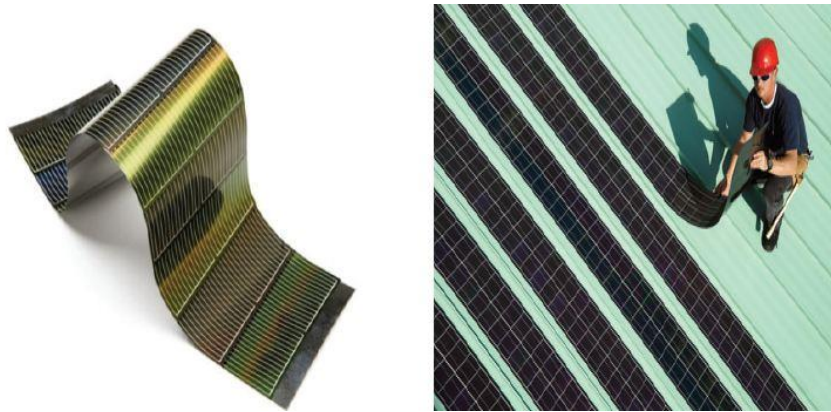
Şekil 2.3 Monokristal güneş hücresi yapısı (Özdoğan, 2005).

### 2.3.1.2 Polikristal yapılı güneş hücreleri

Gri-mavi renge sahip olan polikristal yapılı bu hücreler, monokristal yapılı silisyum güneş hücrelerine göre daha kolay üretilmekte aynı zamanda maliyetleri de daha düşük olmaktadır. Polikristal yapılı hücrelerin bir dezavantajı, verimliliklerinin monokristal yapılı hücrelere göre daha düşük olmasıdır. Bunun sebebi polikristalli hücrelerde bulunan damarların yapısal ve elektriksel olarak farklılık göstermesidir. Damarlar arasındaki süreksizlik ve bunun yarattığı kusurlar verimin düşmesine neden olmaktadır (Oktik, 2001; Özdoğan, 2005; Sayın ve Koç, 2011; Gemicioğlu, 2011).

### 2.3.2 İnce film güneş hücreleri

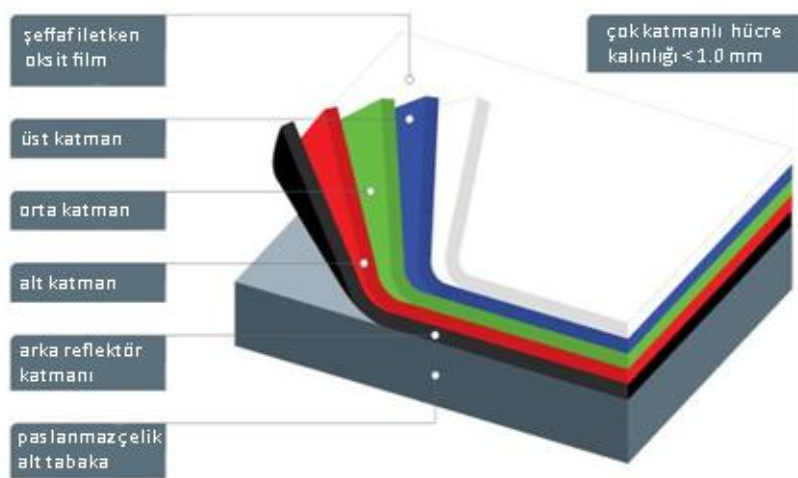
Güneş ışınlarını elektrik enerjisine çevirmede temel yapıtaşı olarak yarı iletken silikon atom elementinin kullanıldığı sistemdir. Silisyum esaslı güneş hücrelerinden boyut olarak daha küçüklerdir. Verimliliği %18'lere kadar çıkmış olsa da malzeme uzun dönemde kararlılığını koruyamamaktadır. Bu nedenle ince filmler üzerine yapılan yatırımlar kısıtlı kalmıştır. Silisyum esaslı sistemlerden nano tel, nano tüp, nano atom yapıtaşı özelliklerine göre farklılaşmaktadır. Atomlar farklılaşmalarını diziliş durumları ile sağlamaktadır. Nanoteknoloji ile üretim imkanı bulan ince film güneş pilleri, esnek yapıya sahiptirler. Bu sayede silikon esaslı geleneksel cam panellere göre çok daha geniş bir alanda kullanım bulmaktadır. Serbest formlu, eğrisel yüzeylerdeki PV malzeme uygulamalarına da imkan sağlamaktadır. Malzemenin hafifliği, yapı yükünün azalmasına katkıda bulunmaktadır. Esnek, hafif ve kırılmaz yapıları sayesinde geleneksel güneş hücrelerinin estetik anlamda yol açtığı olumsuzlukları ortadan kaldırmaktadırlar (Şekil 2.4), (Ayçam ve Kanan, 2009; Sayın ve Koç, 2011; Sev, 2014; Yılmaz ve Vural, 2015).



Şekil 2.4 İnce film güneş hücreleri ve uygulanma biçimi (Yılmaz ve Vural, 2015).

### 2.3.2.1 Amorf silisyum güneş hücreleri

İnce film güneş hücrelerinden olan inorganik amorf silisyum (a-si), ilk olarak 1981 yılında kullanılmaya başlanmıştır. Rengi kırmızımsı kahverengidir. Verimliliği laboratuvar ortamında %15'lere kadar çıkarılmış olsa da güneş ışığı altında malzeme bu verimini kaybetmektedir. Bu tür sıkıntılara karşın küçük ölçekli olarak enerji üretimi için yaygın olarak kullanılan güneş hücreleridir. Bu PV modülde mavi fotonları yakalayan üst hücre katmanı, a-Si alaşımını kullanmaktadır. Orta hücre katmanı, yaklaşık %10-15 Germanyum (Ge) içeren, yeşil fotonları emmek için ideal olan amorf bir silikon- germanyum (a- Si- Ge) alaşımıdır. Alt hücre katmanı, kızıl ve kızılötesi fotonları yakalamak için bir a- Si- Ge alaşım tabakasını kullanmaktadır. Hücrelerde absorbe olmayan ışık, dokulu alüminyum/çinko oksit (Al/ZnO) arka reflektöründen yansıtılmaktadır. Sistemde, esnek, paslanmaz çelik bir alt tabaka kullanılmaktadır (Şekil 2.5), (Oktik, 2001; Pagliaro vd. , 2008; Parmar, 2010; Sayın ve Koç, 2011).



Şekil 2.5 Amorf silisyum içeren üç fazlı yapının şematik gösterimi (Url-2).

### 2.3.2.2 Kadmiyum tellür güneş hücreleri

Periyodik tablonun ikinci grubunda bulunan kadmiyum elementinin ve altıncı grubunda bulunan tellür elementinin bir araya gelmesi ile oluşan kadmiyum tellür (CdTe), güneş enerjisini maksimum düzeyde elektrik enerjisine dönüştürmek için idealdir. Ancak, bu hücrelerin verimlilikleri henüz istenen düzeye ulaşamamıştır. Kadmiyum tellür güneş hücrelerinden laboratuvar şartlarında %16,4 ve enerji üretimi



için geliştirilen bir prototip modülde %10 verim elde edilmiştir. Üretim sürecinin maliyeti düşüktür. Hücrelerin şekilleri tüm ince filmlerde olduğu gibi esnektir. Hücreler, 3mm kalınlığa ilave olarak 0,008 mm kaplama kalınlığına sahiptir. Yapıları homojendir, renkleri de reflektif koyu yeşilden siyaha doğru değişmektedir (Oktik, 2001; Özdoğan, 2005; Sayın ve Koç, 2011; Gemicioğlu, 2011).

### **2.3.2.3 Bakır indiyum galyum diselenid güneş hücreleri**

Bakır indiyum galyum diselenid güneş hücreleri (CIGS), amorf silisyum hücrelerde olduğu gibi ışığa bağlı verim kaybına uğramamaktadır. Ancak, sıcak ve nemli koşullarda kararlılık sorunları ortaya çıkmaktadır. Bu yüzden nemli ortamlarda yalıtım, önem kazanmaktadır. Yapısında bulunan (CuInSe<sub>2</sub>) bakır indiyum diselenyum, mevcut ışığın %99' unun emilmesini sağlamaktadır. Bu yüzden CIGS hücreler, günümüzün verimli ince film teknolojilerinden biridir. Üretim maliyetleri amorf silisyum hücrelere göre yüksek olup, seri üretimle birlikte düşürülmesi hedeflenmektedir (Özdoğan, 2005; Pagliaro vd. , 2008; Parmar, 2010; Gemicioğlu, 2011; Url-3).



### **3. BİNA CEPHELERİNDE FOTOVOLTAİK SİSTEMLERİN GÜNEŞE UYARLANABİLİRLİĞİ**

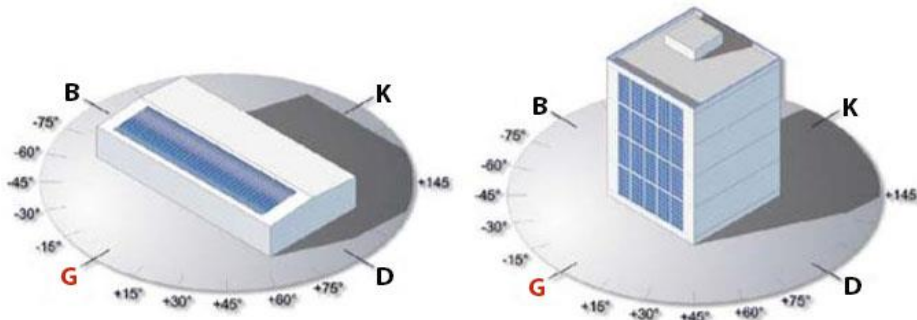
#### **3.1 Cephelerde Fotovoltaik Sistemlerin Güneşe Uyarlanabilirliği**

Uyarlı; sıfat niteliği taşıyan uyumlu, uyum sağlayan anlamlarına gelmektedir (Url-4). Bu sıfat, mimarlıkta dış etkenlere duyarlılığı olan ve uyarlanabilen cepheleri tanımlamak için kullanılabilir. Uyarlanabilirlik kavramı, yapıların dış etkenlere duyarlılığı ve uyum sağlama kapasitesini ifade eder. Bu kavram, yapıların dış etkenlere duyarlılığı ve uyum sağlama kapasitesini ifade eder. Bu kavram, yapıların dış etkenlere duyarlılığı ve uyum sağlama kapasitesini ifade eder.

Küresel iklim değişikliği ve kaynakların sınırlı olması ile yapı kabuğu kullanıcıya korunaklı bir alan sağlamanın yanında yapının enerji tüketimini azaltacak ve yapı için enerji üretme potansiyeline sahip bir araca dönüşmeye başlamıştır. Çünkü bir yapı cephesinin maliyeti, yapının toplam maliyetinin yaklaşık olarak %15' i ile %40' ını oluşturmaktadır. Ayrıca yapı cephesinin tesisat sistemlerine yaptığı etki nedeniyle toplamda %40' ı bulan maliyet artışlarına sebep olabilmektedir. Bu sebep ve sürdürülebilirlik endişesi ile yapı cephesinin iç ve dış ortam arasındaki pasif bir arayüz olmaktan çıkarak duyarlı, aktif ve uyarlanabilir bir katmana dönüşmesi zorunlu hale gelmiştir. Münih Teknik Üniversitesi Öğretim üyesi Profesör Thomas Herzog yapı cephesinin ekolojik işlevini vurgulamak için insan vücudu metaforunu kullanmaktadır: ‘ Cepheyi insan vücudunun üçüncü katmanı (vücudun kendisi ve üzerimizdeki kıyafetlerden sonra) olarak düşünerek, tasarım açısından bir benzeştirme yapabiliriz: Sabit bir vücut sıcaklığını sağlamak için dışarıdaki iklim koşullarının vücudumuzda yarattığı dalgalanmalar, sırasıyla, bu işlevsel katmanların her biri tarafından azaltılmalıdır...’ (Herzog vd., 2004). Bu yaklaşımdan yola çıkarak yapı cephesinin ekolojik işlevini yerine getirebilmesi için çok katmanlı tasarlanarak her katman bir işlevi sağlamalıdır. Ancak, yapı cephesi bu şekilde daha duyarlı bir katmana dönüşebilir. Bu yaklaşımın ilk uygulamaları, katlanır, kayar basit kepenkler ve hareketli panjurların kullanımı olmuştur. Gölge sağlayan, kamaşmayı önleyen, ışığı dağıtan, ısı ve enerji kazanımını düzenleyen aynı zamanda enerji üreten çeşitli

mekanizmalara sahip çok katmanlı cam cephe uygulamaları da gelişmiş ve gelişmeye devam etmektedir (Herzog vd., 2004; Orhon, 2016; Guzowski, 2017).

Yapıya entegre fotovoltaik sistem kullanımı, Avrupa'nın sıfır enerjili bina hedefinin vazgeçilmezi durumundadır. Çünkü fotovoltaik cephe sistemi, cepheye yönelik enerji sorunlarına uygun bir çözüm sağlama potansiyeline sahiptir. Fakat şimdiye kadar fotovoltaikler, yatay ve düşey yüzeylerdeki güneş ışınımı farkından dolayı daha çok çatıda kullanılmıştır (Şekil 3.1). Fotovoltaiklerin çatı uygulamaları, en büyük pazar payına sahiptir. Fakat yüksek yapılar başta olmak üzere bir çok binada olduğu gibi çatı alanı binanın ihtiyaç duyduğu tüm enerjiyi üretecek kadar büyük değildir. Aynı zamanda bina kabuğunun diğer bölümü olan cephede de fotovoltaik kullanımı elektrik üretimi açısından dezavantajlı olup, çatıda kullanımına göre daha az etkili bir çözüm olmuştur. Bu nedenle elektrik üretimi açısından tam performans sağlamayan cepheye entegre rijit fotovoltaik sistemlerin performansını iyileştirmeye yönelik uyarlanabilir kullanım yaklaşımları geliştirilmektedir (Şekil 3.2) Bu sistemde cephe sistemi güneş takip eden, mevsimlere göre değişebilen, hava koşullarına uyum sağlayabilen ve kullanıcıların gereksinimlerine göre hareketli, dinamik bir arayüz olarak tasarlanmaktadır (Orhon, 2016; Guzowski, 2017). Güneşe uyarlanabilir dediğimiz bu sistemin cephede kullanım amacı, işlev ve ekoloji açısından cephe gereksinimlerini karşılayabilmektir. Bu yüzden cephe için performans gereksinimlerinin net bir şekilde tariflenmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda gereksinimlerin karşılanmasına yönelik belirlenen değerlendirme kriterleri dikkate alınarak değerlendirmeler gerçekleştirilmelidir. Böylece, tasarlanan uyarlanabilir bir fotovoltaik cephe sistemi, kullanıcılara gün boyunca ve farklı mevsimlerde iç mekan koşullarını değiştirme olanağı sağlayarak, onların sürekli olarak değişen gereksinimlerine çözüm üretmesini sağlayacaktır (Guzowski, 2017).



**Şekil 3.1** Çatı ve cephe arasındaki güneş ışınım farkı (Moulin, 2011).



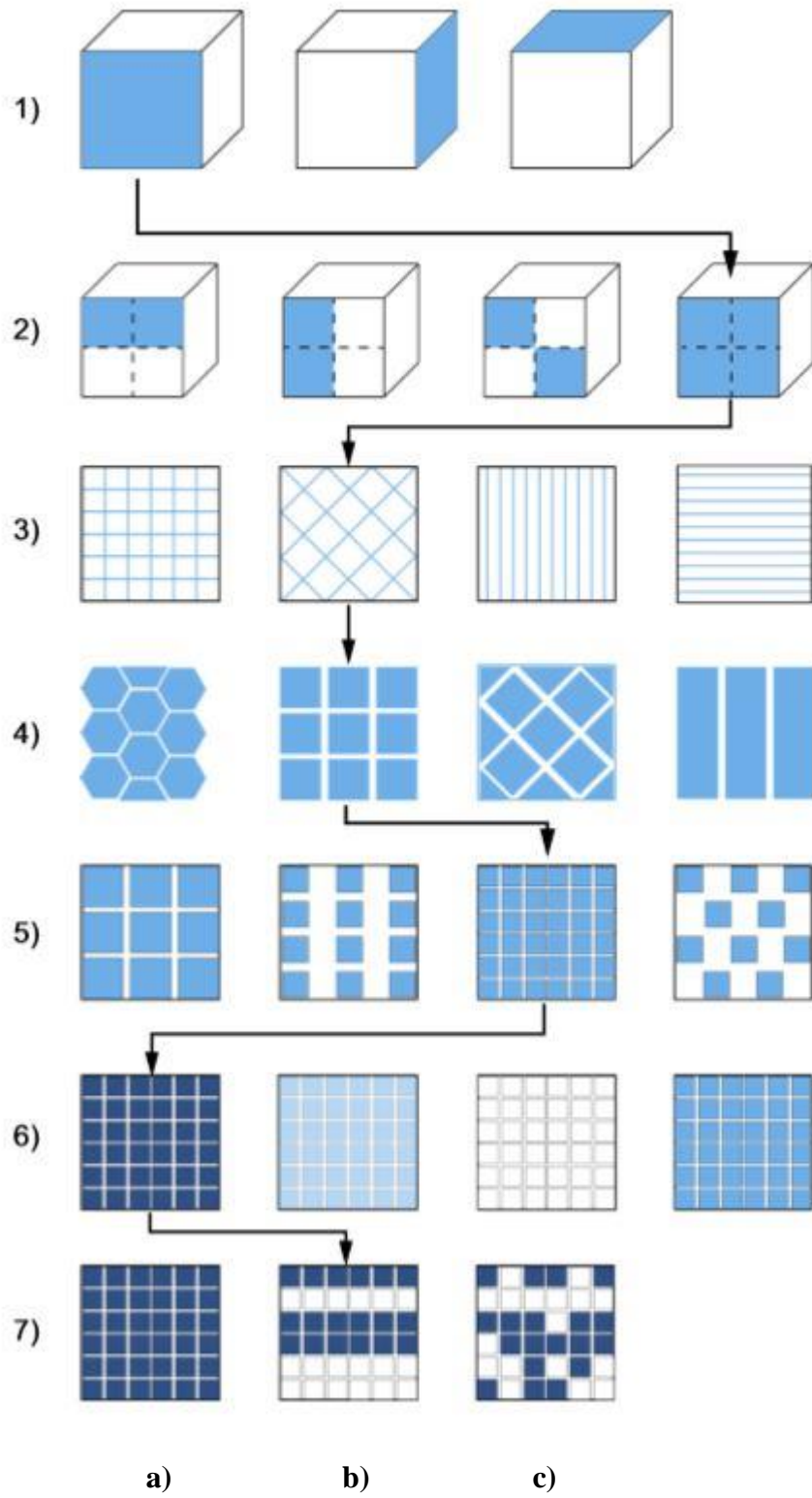
**Şekil 3.2** Güneşe uyarlanabilir fotovoltaik cephe tasarım yaklaşımı (Nagy vd., 2016). Uyarlanabilir bir fotovoltaik cephe sistemi, güneş izleme mekanizmasını kullanarak güneş ışığından maksimum düzeyde faydalanan yapı cephesine entegre, kullanıcıların çeşitli gereksinimlerini sağlamak üzere dinamik, hareketli olarak tasarlanan ve çeşitli teknolojilerin entegre edilebileceği gelişmeye açık bir fotovoltaik sistemdir. Bu sistem, elektrik üretme yanında gün ışığından yararlanma, kullanıcı gereksinimlerini daha geniş bir yelpazede karşılama, ısıtma ve soğutma yüklerinde azalma sağlayarak cephe enerji performansını artırmaktadır. Ayrıca uyarlanabilir gölgelendirme ile güneş kontrolü sağlamaktadır (Orhon, 2016).

Yakın zamanda geliştirilen güneşe uyarlanabilir modüler yaklaşımlı fotovoltaik cephelerin temel elemanı dinamik, çok fonksiyonlu modüldür. Bu modüller, homojen, doğal gün ışığı sağlarken, güneş kontrolü yapabilmektedir. Enerji üretimi gerçekleştirirken, enerji korunumu da sağlayarak iç mekan ısı konforunu optimum düzeyde tutmaya katkı sağlayabilmektedir. Dinamik, çok fonksiyonlu modüller, otonom davranış gösterebilmenin yanında küçük gruplar halinde de kümelenebilmektedir. Bu yaklaşımda kümelenen modüller, belirli bir iç mekan ile ilişki kurabilmektedir. Modüler yaklaşımda iç ve dış çevresel etkilere cevap olarak modüllerin her biri bağımsız bir şekilde hareket edebilmektedir. Bu yaklaşımla cephelerde kompleks geometriler ve desenler özellikle tasarlanmadan ortaya çıkabilmektedir. Başka bir deyişle, sistemin kompleksliği standart olmayan bileşenler kullanmak yerine bileşenin davranışıyla sağlanmaktadır. Basit bir (tuğla, fayans vs.)

grid desende bile birçok potansiyel çeşitlilik mümkün olmaktadır. Ayrıca modüllerden oluşan bu cephe deseni, önceden belirlenmiş bir boyut ve geometri ile sınırlı kalmamaktadır (Nagy vd., 2016).

### **3.2 Güneşe Uyarlanabilir Fotovoltaik Cephe Genel Tasarım Süreci**

1. Fotovoltaik cephelerin güneşe uyarlanabilir olarak tasarlanmasında öncelikle bölge ve iklim verileri dikkate alınarak yönlendirme kararı verilir.
  2. Seçilen cephe üzerinde modül yerleşiminin yoğunluk düzeyi kurgulanır.
  3. Cepheye entegre modülleri taşıyacak (çerçeve, kablo ağ vs.) yapının mevcut strüktürüne de uygun kullanılacak bir destek strüktürü tasarlanır.
  4. Gereklilikler doğrultusunda modül boyutlandırması ve formuna karar verilir.
  5. Cephe yerleşim kriterlerine göre (gölgeleme vs.) grid boyutları ve modül aralıkları belirlenir.
  6. İç mekan konfor gereksinimleri dikkate alınarak modül renkleri ve şeffaflık düzeylerine karar verilir.
  7. Cephenin çalışma prensibine karar verilir. Modüllerin güneşi izleme durumlarına göre hangi çalışma konfigürasyonu daha fazla verim sağlıyorsa o duruma karar verilir.
    - a) Tüm modüllerin birlikte hareket ettiği konfigürasyon.
    - b) Modüllerin bantlar halinde hareket ettiği konfigürasyon.
    - c) Modüllerin birbirlerinden bağımsız olarak dağılmış hareket ettiği konfigürasyon.
- (Şekil 3.3), (Nagy vd.,2016).



Şekil 3.3 Güneşe uyarlabilir fotovoltaik cephe tasarım süreci (Nagy vd., 2016).

### 3.3 Güneş İzleme Sistemleri

Güneş izleme sisteminin varlığı, bir güneş panelinin çalışması için gerekli değildir. Ancak güneş panelinin performansını artırmak için güneş izleme kaçınılmaz bir durumdur. Güneş takipçileri, güneş ışınlarının fotovoltaiik modül yüzeyine dik olarak gelmesini sağlayarak panelin performansını artırmaktadır. Güneş izleme amacıyla kurulan güneş takipçileri, PV sistemlerin enerji kazancını artırmasına rağmen, kurulumlarında maliyet, güvenilirlik, dayanıklılık, enerji tüketimi, hantal (ağır) yapı, mekanik karmaşıklık, bakım/onarım ve performans gibi sorun oluşturabilecek bazı durumlar düşünülmelidir. Güneş izlemenin ispatlanmış yüksek etkinliğine rağmen, güneş takipçileri bu sebeplerden dolayı yaygın olarak uygulanmamıştır. Düşük maliyetli ve düşük ağırlıklı daha basit teknikle yapılmış güneş izleyici ve aktüatörler için yeni yaklaşımların araştırılması ve geliştirilmesi yeni bir alan durumunda ve gelişmeye devam etmektedir (Mousazadeh vd., 2009; Nagy vd., 2016; Orhon, 2016).

Literatürde çok sayıda güneş takip sistemi bulunmaktadır. Genel olarak tüm takip sistemleri, aşağıdaki şekilde listelenen özelliklerden çoğunu ya da bir kısmını taşımaktadırlar (Mousazadeh vd., 2009; Oral, 2015).

- Tek ya da iki adet hareketli motor
- Işık algılama cihazı
- Otonom ya da yardımcı/yedek enerji kaynağı
- Işık takibi ya da takvime göre hareket
- Sürekli ya da adım adım hareket
- Tüm yıl boyunca takip ya da kış mevsimi hariç olacak şekilde takip
- Eğim açısı ayarlanmalı ya da ayarlanmasız yönlendirme ayarı

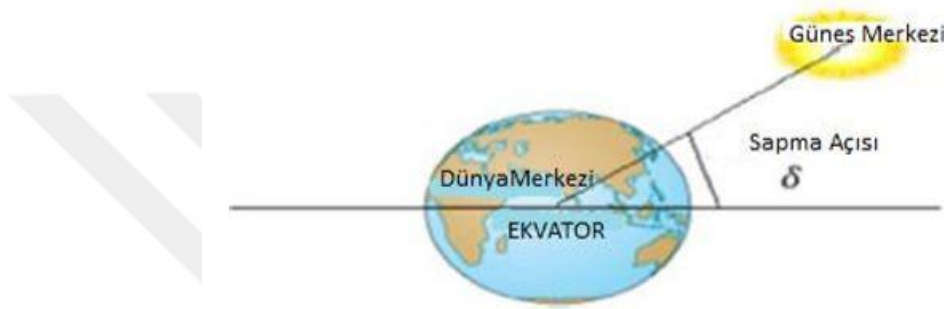
İdeal bir güneş takipçisi, güneşin azimuth açısındaki değişiklikler, mevsimsel değişiklik etkisinde meydana gelen güneşin enlemsel kayması ve gün boyunca meydana gelen güneşin yüksekliğindeki değişimleri karşılayarak, PV hücrenin etkin yüzey alanının maksimum olmasını sağlayacak biçimde güneşe yönelmesine izin verebilmelidir (Mousazadeh vd., 2009).



### 3.3.1 Güneş konumunun belirlenmesi ve terminoloji

Güneş izleme sistemi tasarımının maksimum verim alabilecek şekilde gerçekleştirilmesi bir çok güneş parametresine bağlı olmaktadır. Öncelikle güneş konumu ve yönünün doğru tespiti yapılmalıdır. Güneş konumu veya vektörünün doğru belirlenebilmesi, belli bir konum için güneşin sapma açısı, azimut açısı, yükseklik açısı, zenit açısı, ışıma ve yansıma açısı, güneş saati açısı gibi parametrelerin bilinmesini gerektirmektedir (Oral, 2015; Başçoşkun, 2018).

Sapma ( $\delta$ ): Güneş'in öğle saatlerinde Ekvator'a göre açısal pozisyonudur (Şekil 3.4).



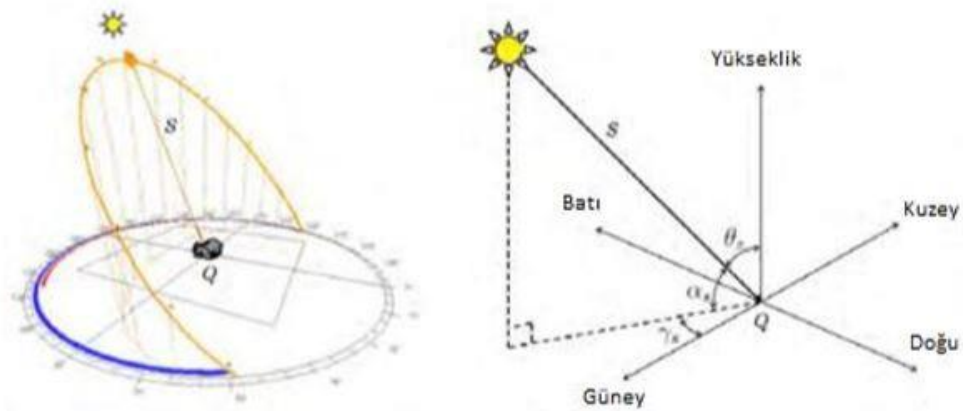
Şekil 3.4 Güneş sapma açısı (Başçoşkun, 2018).

Yüzey azimut açısı ( $\gamma$ ): Eğim yönü, yerel meridyene doğru saparak oluşmaktadır.

Güneş azimut açısı ( $\gamma_s$ ): Güneş'in güneyden saat yönünde lokal meridyene veya yüzey azimutuna göre açısıdır (Şekil 3.5).

Yükseklik açısı ( $\alpha_s$ ): Güneş vektörü yükseklik açısıdır (Şekil 3.5).

Zenit açısı ( $\theta_z$ ): Yatay bir yüzeyde güneş vektörü zıt açısıdır ( $90^\circ - \alpha_s$ ) (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 Güneş azimut ( $\gamma_s$ ), yükseklik ( $\alpha_s$ ) ve zenit ( $\theta_z$ ) açıları (Başçoşkun, 2018).

Işıma ve yansıma açısı ( $\theta$ ): Gelen güneş ışınması ile yüzey arasındaki açıdır.

Güneş saati açısı( $\omega$ ): Öğlen 12’de  $0^\circ$  ve 24 saatin  $360^\circ$  kabul edilerek güneş saatinin derece olarak hesaplanması ile bulunan açıdır.

Güneş hareketinin, konumunun ve yönünün doğru belirlenebilme derecesi, güneş izleme doğruluğunu doğrudan etkilemektedir. Güneş izleme doğruluğu ise üretim gücü ile doğru orantılı olarak izleme sisteminin performansını etkileyecektir (Prinsloo and Dobson, 2015; Başçoşkun, 2018).

### 3.3.2 Güneş izleme sistemlerinin sınıflandırılması

Güneş takip sistemlerinin çok fazla türü ve çok fazla sınıflandırması mevcuttur. Tez kapsamında bu sistemler, takip eksenleri ve çalışma prensiplerine göre iki ana başlık altında sınıflandırılarak incelenmiştir (Şekil 3.6).



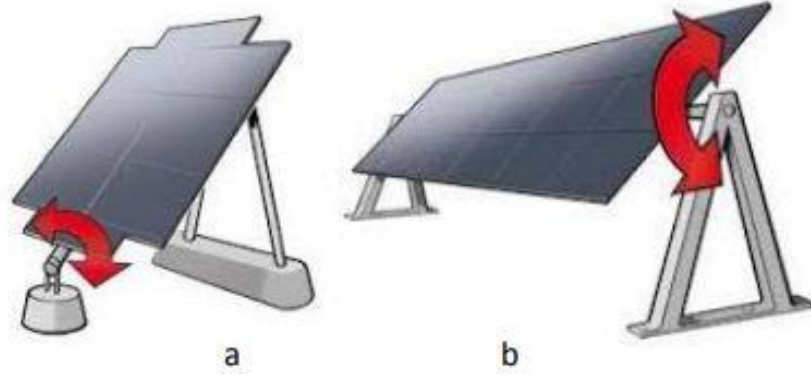
Şekil 3.6 Güneş izleme sistemleri sınıflandırması

### 3.3.3 Eksenlerine göre güneş izleme sistemleri

Şekil 3.6’ da verilen sınıflandırmada gösterildiği şekilde güneş izleme sistemleri, eksenlerine göre tek ve iki eksenli olarak ikiye ayrılmaktadır.

#### 3.3.3.1 Tek eksenli izleyiciler

Güneş paneli, azimuth veya güneşin geliş açısını izleyerek yalnızca tek eksenle hareket ediyorsa bu sisteme tek eksenli izleyici denilmektedir. Tek eksenli güneş izleme sistemlerinin güneşi izleme performansı düşüktür. Buna bağlı olarak etkin fotovoltaik panel yüzey alanı azalmakta ve üretim verimi düşmektedir (Şekil 3.7), (Önal, 2009; Anameriç, 2014; Orhon,2016; Başçoşkun, 2018; Url-5).



**Şekil 3.7 (a)** Azimuth açısını (doğu-batı) izleme, **(b)** Güneş geliş açısını izleme (Anameriç, 2014).

### 3.3.3.2 İki eksenli izleyiciler

Güneş paneli, hem azimuth hem de güneşin geliş açısını izleyerek iki eksende hareket ediyorsa bu sisteme iki eksenli izleyici denilmektedir. Bu tür izleme sisteminde iki eksende izleme gerçekleştiğinden güneşin konumu ile ilgili daha doğru tespitler yapılabilmekte dolayısıyla sistemin üretim verimi tek eksenli izleme sistemine göre daha yüksek olmaktadır. İki eksenli bu sisteme bilgisayar programı ile güneşin konum bilgisi iletilebilmekte veya sensörler kullanılmaktadır. Çift eksenli bir izleyiciyi içerebilecek çok az sayıda yapı entegre fotovoltaik kurulumu bulunmaktadır (Şekil 3.8), (Önal, 2009; Anameriç, 2014; Nagy vd., 2016; Orhon, 2016; Başçoşkun, 2018; Url-5).



**Şekil 3.8** İki eksenli güneş izleme sistemi (Anameriç, 2014).

### 3.3.3.3 Eksenlerine göre güneş izleme sistemlerinin karşılaştırılması

Çizelge 3.1 Tek ve iki eksenli güneş izleme sistemlerinin karşılaştırılması.

Parametreler	Tek Eksenli Güneş İzleme Sistemi	İki Eksenli Güneş İzleme Sistemi
<b>Güneş izleyici hareket alanı</b>	Sistem ya azimuth (doğu-batı) açısını izler ya da güneşin hareketini dikey ekseninde izler.	Sistem, güneşin azimuth açısına ilave olarak güneş hareketini dikey ekseninde de izlemeyi gerçekleştirir.
<b>Etkin PV panel yüzey alanı</b>	Etkin PV panel yüzey alanı azdır.	Etkin PV panel yüzey alanı daha fazladır.
<b>Enerji üretim verimi</b>	Elektrik enerjisi üretim verimi düşüktür.	Elektrik enerjisi üretim verimi daha yüksektir.
<b>Strüktürel etkinlik</b>	Güneş izleyicinin PV paneli taşıma performansı, rüzgar vb. dinamik hava koşulları altında fiziksel bir modelde değerlendirilmelidir.	Kompleks teknik yapılarının mukavemetleri, fiziksel bir model üzerinde değerlendirilmelidir.
<b>Kurulum maliyeti</b>	Teknik açıdan basit yapıya olduklarından düşük maliyetle kurulabilirler.	Karmaşık teknik sistemler gerektirdiklerinden kurulum maliyetleri yüksektir. Ayrıca, nitelikli eleman gerektirmektedir.
<b>Yapı cephesine uyarlanma düzeyi</b>	Cepheye entegre kurulumları, daha basit, maliyet olarak da daha olumludur. Fakat cephede enerji kazanımında çok avantajlı değildir.	Cepheye entegre kurulumları, kompleks sistemler gerektirdiğinden daha zor ve maliyetlidir. Fakat cepheden enerji kazanımına etkisi daha fazladır.
<b>Bakım, onarım maliyeti</b>	Basit yapıları olduklarından bakım, onarım maliyetleri düşüktür.	Kompleks yapıları olduklarından bakım, onarım maliyetleri yüksektir.

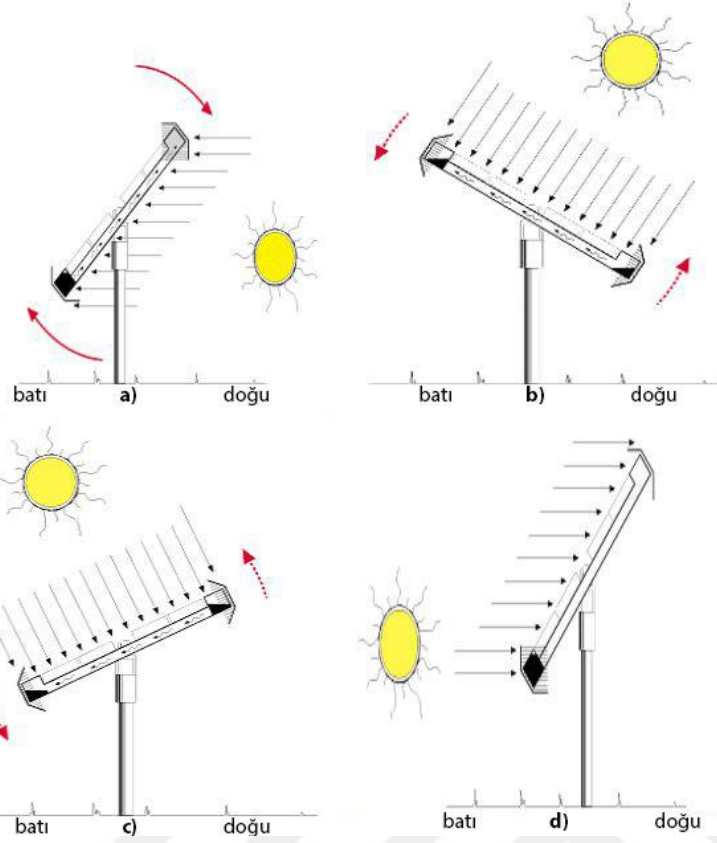
### **3.3.4 Çalışma prensiplerine göre güneş izleme sistemleri**

Şekil 3.6' da verilen sınıflandırmada gösterildiği şekilde güneş izleme sistemleri, çalışma prensiplerine göre pasif (mekanik), açık döngülü, kapalı döngülü ve hibrit olarak dört grup halinde incelenmektedir.

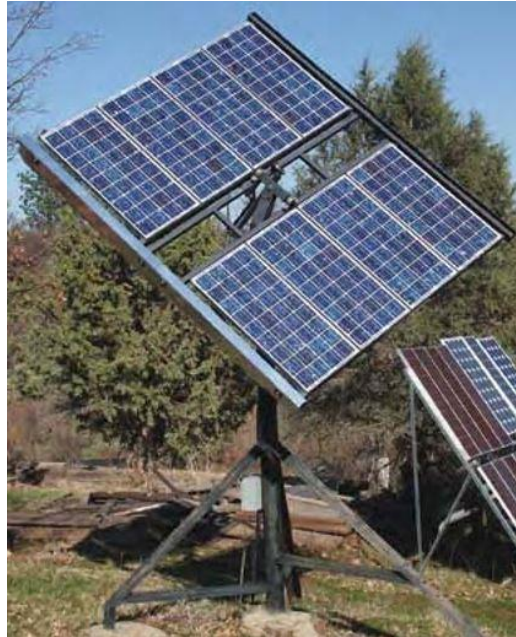
#### **3.3.4.1 Pasif (mekanik) güneş izleme sistemleri**

Pasif güneş izleme, bir maddenin termal genişmesine ya da şekil hafızalı alaşımlar üzerine dayalı olmaktadır. Bu izleme türünde elektronik eleman ve motor işlevli eleman bulunmamaktadır. İzleme tamamen mekanik olarak gerçekleşmektedir.

Termal genişmeye dayalı takipçiler için geliştirilen bir alternatifte güneşi izlemek için izleyicinin bir tarafından diğer tarafına kütle (ağırlık) aktarımı kullanılır. Bu kütle aktarımı, izleyicinin güneşi takip etmesi için doğudan batıya doğru dönmesine neden olur. Kısmi basınç altında bir akışkanla doldurulmuş iki özdeş silindirik tüpün kullanıldığı pasif bir güneş takipçisi çalışma prensibi Şekil 3.9' da gösterilmektedir. (Şekil 3.9). Stratejik olarak gölgelendirilmiş iki tüp, izleyicinin doğu ve batı taraflarına monte edilmiştir. Bu tüpler, nispeten düşük sıcaklıklarda buharlaşan bir malzeme (genellikle Freon) ile doldurulur. Güneş, Freon'u izleyicinin bir tarafında ısıtırken, Freon buharlaşır. Bu buhar, sıvı Freon'dan biraz daha fazla yer kaplayarak sıvı Freonun bir kısmını diğer tarafa iter, izleyicinin serin, gölgeli tarafında daha ağır, sıvı halde kalır. İzleyicinin ağır ve hafif olan kısımları, izleyici dengesini değiştirerek izleyicinin yön değiştirmesini sağlar. Güneş ısısı ile sürekli buharlaşma ve sıvılaşma dengesinde olan Freon sayesinde izleyici, güneşin gökyüzündeki hareketlerini izlemektedir. Zomeworks Ltd. tarafından üretilen termal genişmeye dayalı olarak çalışan pasif bir güneş takipçisi Şekil 3.10' da gösterilmektedir (Şekil 3.10), (Perez, 2004; Clifford ve Eastwood, 2004; Mousazadeh vd., 2009).



**Şekil 3.9** (a) Akşamdan batıya yönelmiş şekilde kalan panelde, sabah alttaki tüp daha fazla ısınmakta ve içindeki sıvı genişmekte, (b) her iki tüp eşit düzeyde ısınana kadar panel dönmekte, (c) güneş hareketini panel takip etmekte, (d) panel, akşam batıya dönerek o yönde kalmaktadır (Hassan, 2011).



**Şekil 3.10** Zomeworks Ltd. tarafından üretilen termal genişlemeye dayalı olarak çalışan pasif bir güneş takipçisi (Perez, 2004).

Termal genişlemeye dayalı olarak çalışan bu tür pasif izleyicinin en büyük avantajı, basit bir teknik donanıma sahip olmasıdır. Arızalanacak herhangi bir elektrikli parça yoktur. Freon, çalışmak için güneş enerjisi dışında enerji gerektirmeyen kapalı bir sistem içindedir. Bu izleyicinin ikinci bir avantajı da maliyettir. Genellikle elektrikle çalışan aktif izleyicilere göre daha ucuzdur (Perez, 2004; Mousazadeh vd., 2009).

Kısmi basınç altında uygun bir akışkanla doldurulan bu tür termal izleyicilerin bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Yalnızca güneş enerjisi ile çalıştıkları için güneş hareketine tepki verme süreleri çok uzun olmaktadır. Geceleri batıya bakar konumda çalışmaya ara vermektedirler ve sabah doğuya geri dönme süreleri ortam sıcaklığına ve rüzgara bağlı olarak bir saat veya daha fazla sürebilmektedir. Düşük sıcaklıklarda (kış mevsimi) termal izleyiciler, çalışmayı durdurmaktadır çünkü Freon'u buharlaştırmak için yeterli ısı oluşturulamamaktadır. Termal izleyiciler yalnızca güneşin günlük doğu-batı hareketini izlemektedir; Güneşin günlük ve mevsimsel kuzey-güney hareketini izleyemezler. Güneşin mevsimsel kuzey-güney hareketini telafi etmek için termal izleyicilerin yılda yaklaşık dört kez manuel olarak ayarlanması gerekir. Termal izleyicilerin bazı modelleri tamamen monte edilmiş olarak üretilmektedir. Bu durum, boyutu ve ağırlığı nedeniyle izleyicinin nakliyesini ve kurulumunu daha zor ve pahalı hale getirmektedir. Kısmen monte edilmiş termal izleyiciler, bu duruma çözüm olabilmektedir (Perez, 2004; Mousazadeh vd., 2009).

Termal genişlemeye dayalı pasif izleyici için diğer alternatif, bimetalik şeritlerin termal genişlemesine dayanmaktadır. Clifford ve Eastwood (2004) çalışmasında, bimetalik şeritlerin genişlemesine dayalı pasif bir güneş takipçisi bilgisayarla modellenmiş ve sunulmuştur. Bu pasif güneş takipçisi tasarımı, ahşaptan yapılmış bir çerçeve üzerinde konumlanan alüminyum ve çelikten imal edilmiş iki adet bimetalik şeritleri, merkezi yatay eksenlerin her iki tarafında simetrik olarak birleştirmektedir. Şekil 3.11' de belirtilen çalışma prensibine benzer yaklaşımla bimetalik şeritlerin biri gölgeli kalırken diğer şerit güneş ışınlarını emmektedir. Bimetalik şeritler ısıya maruz kaldığında, alüminyum daha yüksek genişleme katsayısına sahip olduğundan çeliğe göre daha fazla bükülmektedir. Bu bükülme şerit orta noktasında ve ona bağlı küttele maksimum saptmaya (dönmeye) sebep olmakta ve bu da hareket enerjisi üretmektedir. Güneşe doğru gerçekleşen bu hareketle güneş paneli çerçeve içinde sınırlı tutularak döndürülmektedir bunun sonucunda güneş panelinin yakaladığı güneş akısı artmaktadır. Bu tasarımı diğerlerinden ayıran bir kaç özellik mevcuttur. Özelliklerin



bazıları sistemin doğru şekilde çalışması için gerekli iken diğerleri sistemi daha etkin hale getirmektedir. Sistemin doğru çalışması için gerekli bir özellik, bimetalik şeritin güneş yönüne doğru bükülmesidir ki bunun sonucu olarak oluşan moment, güneş izleyicisinin güneş yönüne doğru dönüşünü sağlamaktadır. Sistemin etkinliğini artıran özelliklerden biri, sistemde oluşan gölgelerin güneş ışınımını gölgeli bimetalik şeritten uzakta bulunup, ısıyı alan bimetalik şerite yansıtmasıdır. Başka bir özellik ise bimetalik şeridin diğer pasif izleyicilere ( kısmi basınçla doldurulmuş akışkanlı izleyici vb.) göre yavaş tepkisi nedeniyle izleyicinin hareketini kontrol etmek için daha az sönümlendirme gerektirmesidir (Şekil 3.11), (Clifford ve Eastwood, 2004; Mousazadeh vd., 2009).



**Şekil 3.11** Bimetalik şerit kullanılarak üretilen pasif güneş takipçisi prototipi (Clifford ve Eastwood, 2004).

Bimetalik şeritlerin genişlemesine dayalı bu güneş takipçisi için Clifford ve Eastwood (2004) çalışmasında, deneysel verileri ve bilgisayar modeli ile elde edilen verileri kıyaslamıştır. Elde edilen veriler, birbirleri ile çok benzer sonuçlar vermiştir. Bu sonuçlara göre tasarlanan güneş takipçisi, güneş paneli etkinliğini yaklaşık % 23 oranında artıracak potansiyele sahiptir. Bu güneş takipçisinin gelecek gelişimi için



öneriler aşağıdaki şekilde listelenmiştir (Clifford ve Eastwood, 2004; Mousazadeh vd., 2009):

- Gece dönüş mekanizması

Gün batımından sabaha kadar çalışmasını durduran takipçinin sabah saatlerinde güneş ile uyarlanması yeteri kadar hızlı olamamaktadır bu nedenle gece dönüş mekanizması güneş panelinin verimliliğini artıracak bir özelliktir. Bu duruma olası bir çözüm, bir dönme sistemi olarak işlev görmek üzere üçüncü bir bimetalik şerit kullanmaktır. Bu bimetalik şeritin gece sıcaklığın düşük olduğu durumda termal genleşme/bükülme olayı gerçekleşecektir. Bu şekilde sistemin doğu yönü olan başlangıç noktasına döndürülmesi öngörülmüştür (Clifford ve Eastwood, 2004).

- Manuel olarak eğilmiş eksen

Sistem, ekvatorun 10-20° lik geometrik konumları için tasarlanmasına rağmen bu durum sistemin uygulanabilirliğini kısıtlamamalıdır. Bölgede yeterli seviyede güneş ışımasını sağlandığı takdirde ekvatorun 20° den daha büyük açılı bir çok geometrik konumunda da sistem çalışmalıdır. Yatay olmayan ve manuel olarak ayarlanabilir dönme eksenini, kullanıcıya güneş panelinin eğimini kontrol etmesi ve artan enlemlerde güneşin zirve açısını dengelemesine izin vermektedir. Sistemin uygulandığı alanın/bölgenin enlemine yakın bir eğim yıl boyunca panelin etkinliğini maksimize edecektir. Ekvatordan uzak olan bölgeler için etkinlikteki bu artış, takipçinin geleceği için önemli bir gelişmedir (Clifford ve Eastwood, 2004).

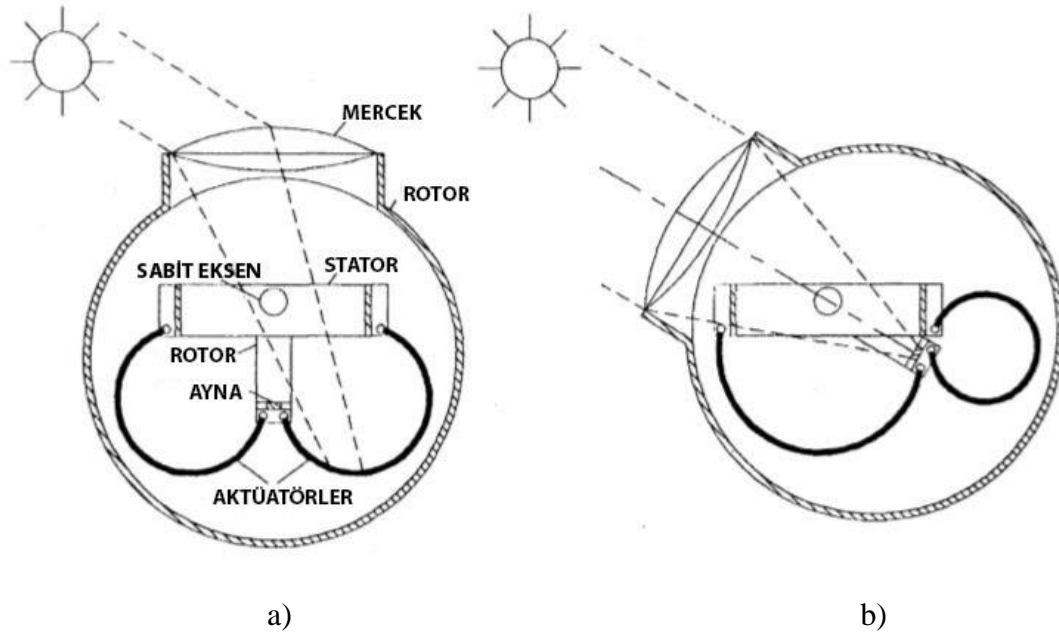
-Çift eksenli sistem

Eğilmiş eksenli güneş takipçisinden hareketle gelecek için çift eksenli sistemin gelişimi öngörülmüştür. Bununla birlikte, güneş panelinin hareket ettirilebileceği alanın artması mümkün olacaktır. İki farklı eksenle hareket, aynı prensibe göre gerçekleşmesine rağmen, her biri üzerindeki kısıtlamalar oldukça farklı olacaktır. Örneğin; Güneş yükseltisindeki değişim için uyarlanmaya göre güneş azimutundaki değişim için uyarlanma çok daha duyarlı olacaktır. Teoride, güneş paneli etkinliği açısından çift eksenli sistem, yıl boyunca her konum ve zamanda en büyük artışı sağlamaktadır (Clifford ve Eastwood, 2004).

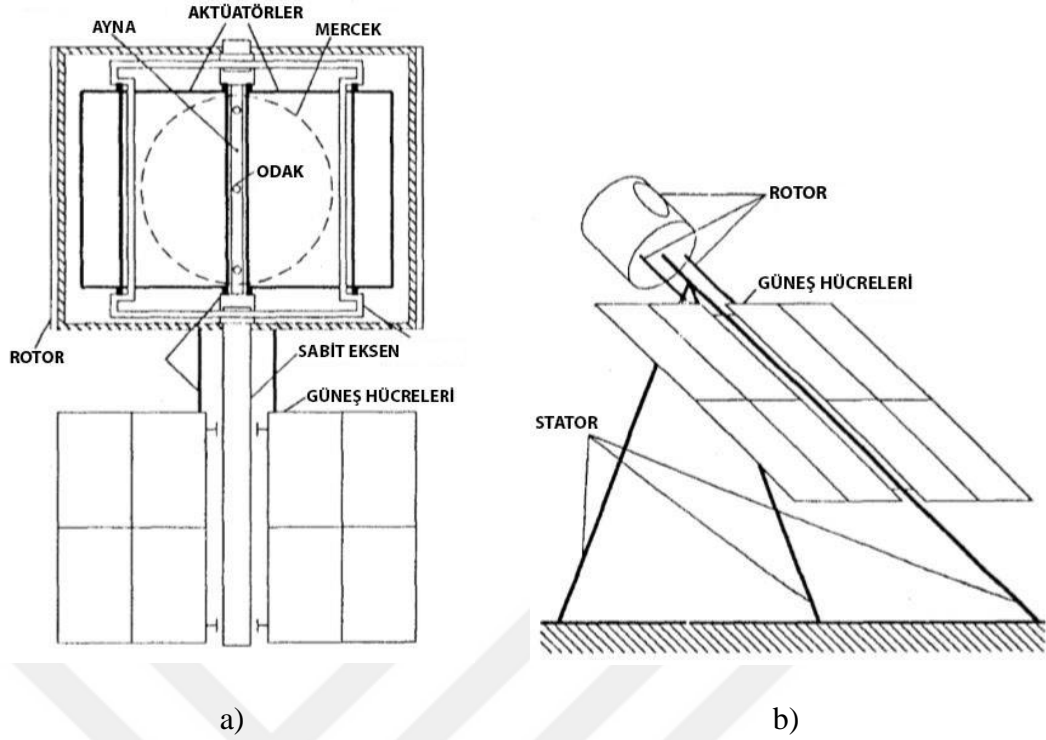
Şekil hafızalı alaşım aktüatörlerine (SMA- shape memory alloy) dayalı güneş takipçisi için NiTi, CuZnAl ve CuAlNi alaşımlı, tek eksenli pasif güneş takip cihazı Poulek (1994) çalışmasında test edilmiştir. İzleyicinin kasası 200 mm uzunluğunda ve 130

mm çapında silindirik bir kutudur. Yalıtılmış kutu, cihazı toza ve neme karşı korumaktadır. SMA aktüatörleri, bu yalıtılmış kutu içinde bulunmaktadır. SMA aktüatörleri, 70 °C' nin altındaki düşük sıcaklıklarda kolayca deforme edilebilmektedir. Dönüşüm sıcaklığının üzerinde bir sıcaklığa ısıtıldığında ise orijinal haline geri dönebilmektedir.. Termal dönüşümler esnasında SMA aktüatörü bir ısı motoru olarak çalışmaktadır. SMA aktüatörlerinin verimliliği hemen hemen % 2 ve yaklaşık olarak bimetalik aktüatörlerin verimliliğinden iki kat daha yüksek olarak bu çalışma sonuçlandırılmıştır (Poulek, 1994; Mousazadeh vd., 2009).

Mercek tarafından odaklanan güneş ışınımı enerjisi, bir SMA tüpünden yapılan iki SMA aktüatöründen birini ısıtmak için kullanılır, bunun sonucunda aktüatörlerde deformasyon meydana gelir. Her iki aktüatörün bir ucu bir statora (sabit), diğer ucu bir rotora (dönen) bağlıdır. Aktüatörlerin deformasyonu, merceğin odağı SMA aktüatörlerinin uçları arasında bulunan aynaya yönlendirilene kadar cihazı döndürür. Bunun sonucunda Güneş kolektörlerinin Güneş'e doğru yönlenmesi gerçekleşir (Şekil 3.12, Şekil 3.13), (Poulek, 1994).



Şekil 3.12 Güneş takipçisi sabah yönlenmesi (a) önce, (b) sonra (Poulek, 1994).



**Şekil 3.13** Güneş takipçisi (a) planı, (b) görünüşü (Poulek, 1994).

Sistem basit teknik donanımlı ve yalnızca 5 hareketli parçaya sahiptir. Ayrıca sistemin çalışması için dışarıdan kontrol veya enerji kaynağı gerekmemektedir. Merceğin odak noktasında alaşımın aşırı ısınmasını önlemek ve termal enerjinin aktüatörün hacmine eşit şekilde dağılması için yüksek termal iletkenlikli bakır tabanlı şekil hafızalı alaşım CuAlNi seçilmiştir. Ayrıca yine aşırı ısınmayı önlemeye yönelik nokta odaklı küresel mercek yerine silindirik merceğin kullanımı tercih edilmiştir. İzleyici, güneş ışınlarına yeteri kadar dayanımlı tasarlanmıştır. Son derece basit teknik yapı tasarımı ve kapalı kasası nedeniyle, takipçinin ömrü 10-20 yıl (7000 izleme döngüsü) olarak öngörülmektedir. Aktüatörlerin ömrü için tam olarak doğru tahmin yapılabilmesi, uzun süreli yaşam testlerine bağlı olmaktadır. Teorik olarak, iki aktüatör arasında salınım meydana gelebilir, ancak CuZnAl ve CuAlNi şekil hafızalı alaşımları bilinen tüm malzemelerin içinde en yüksek sönümlenme kapasitesine sahip malzemeler olduklarından laboratuvar testleri sırasında böyle bir durum gözlenmemiştir. Gece veya bulutlu havalarda izleyici daima yavaşça (maks.  $10^\circ$  / saat) denge pozisyonuna geri dönmektedir. Simetrik tasarım sayesinde izleyici, sadece sabahları değil, öğleden sonraları da güneşi takip etmeye başlayabilmektedir. İzleyicinin fırtınalara karşı korunmasına yönelik kendiliğinden kilitlenen sistem düşünülmüştür. Çünkü sistemde izleyicinin dönüşü, güneş panellerine iletilebilirken bu durumun ters yönde oluşması

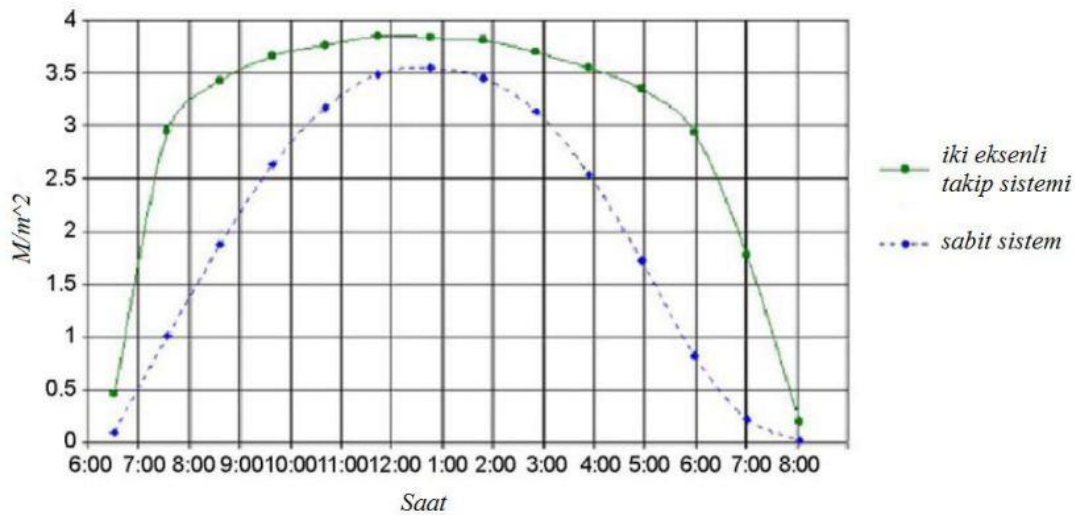
(güneş paneli dönüşünün izleyiciye iletilmesi) mümkün olmamaktadır. Kendiliğinden kilitlenen sistemin güneş izleyici performansına etkisi araştırılarak kendiliğinden kilitlenmeyen izleyici ile kıyası yapılmıştır. Aktüatör gücüne etki ederek gücü daha düşük olan aktüatör kullanımına imkan sağladığı sonucuna varılmıştır. Rüzgar korumasız bir izleyicide, özellikle rüzgarlı iklimlerde, rüzgarın neden olduğu sapmalara karşı 10 kata kadar daha güçlü aktüatörler kullanılması gerektiği öngörülmüştür. Kendini kilitleyen koruma sistemi, gece ve bulutlu havalarda da çalışmaktadır. Güneş izleyici 140° e kadar izleme açısı için tasarlanmıştır. Ölçülen izleme açısı hava durumuna göre 124° e kadar çıkmıştır. Her ne kadar bu izleme açısı beklenenden daha küçük olsa da, izleme açısının 120° üzerine çıkması, elde edilebilecek enerji miktarını yüksek oranda etkilemektedir. Otomatik sabah yönelimi olmayan pasif izleyiciler, sabah güneş ışığının önemli bir kısmını güneşe yönelme sağlayamadıkları için kaybetmektedirler. Otomatik sabah yönelimli bu izleyici, sabah güneşini yakalayabildikleri için avantajlı olmaktadır (Poulek, 1994).

#### **3.3.4.2 Açık döngülü güneş izleme sistemleri**

Açık döngülü güneş izleme sistemi, astronomik verilere dayanan bir izleme sistemidir. Bu izleme sistemi türünde, dünyada belli bir konum için herhangi bir zamanda güneşin konumu, o yer ve zamana ait astronomik verilerin bir yazılım programına girilmesi ile belirlenmektedir. Bu sistem sensör gerektirmemektedir ancak astronomik verilerin değişiminden dolayı her bölge için ayrı hesaplama gerektirmektedir. Güneş sensörü bulunmayan bu güneş izleme, UTC (eş güdümlü evrensel zaman) zamanıyla enlem ve boylam karşılaştırmasına dayanarak güneşin konumunu tespit eden mikro işlemci tarafından üretilen döngüsel bir astronomik algoritma kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Sistemin en büyük avantajı, yüksek hassasiyetli olarak ayarlanabilir olmasıdır. Kullanılan yazılım programı istenirse 0,01° istenirse de 25° hassasiyetle güneş ışınlarını algıyormuşçasına algılamadan çalışabilmektedir. Açık döngülü izleme sistemleri yalnızca astronomik parametreleri kullanmaktadır. Bu durumda da kusurlu kurulumdan kaynaklı hatalar, kalibrasyon hataları ve zaman parametreleri hatalarını algılamamakta ve dolayısıyla onaramamaktadır (Önal, 2009; Eren,2010; Anameriç, 2014).

PLC (Programlanabilir Mantıksal Denetleyici) ile kontrol edilen iki eksenli ve açık döngülü bir güneş izleme sistemi Abdallah ve Nijmeh (2004) çalışmasında tasarlanmış ve test edilmiştir. Geliştirilen bu izleme sisteminin çalışma prensibi,

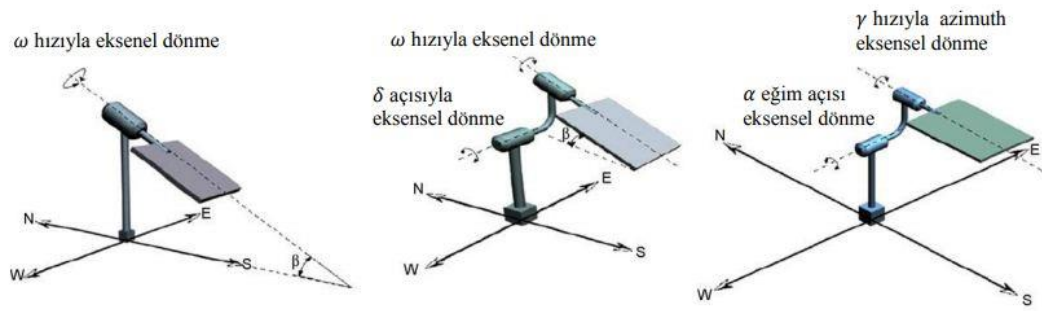
güneşin azimut açısı ve yüzey eğimi olarak iki açı tarafından tanımlanan yüzey pozisyonunun matematiksel tanımına dayanmaktadır. Eğim, güneşin zenit açısına eşit olarak kabul edilmiştir. İki izleme motorunun biri yatay ekseninde (kuzey-güney) dönüş için diğeri düşey ekseninde (doğu- batı) dönüş için kullanılmıştır. Gün ışığı dört aralığa bölünmüş ve her bir aralık için motor hızları ve güneş konumları PLC'ye tanımlanmış ve programlanmıştır. Motorları ve kontrol sistemini çalıştırmak için gereken gücün, takip sistemi ile elde edilen enerji tasarrufunun %3'ünü geçmediği belirtilmiştir. Şekil 3.14' de 32° sabit eğime sahip sistem ve takipçili sistem arasındaki enerji karşılaştırmasını göstermektedir. Sonuç olarak sabit eğimli yüzeye sahip sisteme göre iki eksenli takipçili sistemde, günlük toplam enerji üretiminde yaklaşık %41,34 oranında bir artış sağlanmıştır (Şekil 3.14), (Abdallah ve Nijmeh , 2004; Mousazadeh vd. , 2009; Oral, 2015).



**Şekil 3.14** Sabit ve takipçili sistemlerde enerji karşılaştırması (Oral, 2015).

Astronomik veriler üzerinden zaman kontrollü, adım adım açı değiştirerek hareketin sağlandığı açık döngülü güneş izleme sistemleri, Alata vd. (2005) çalışmasında tasarlanmış ve bilgisayar simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada üç değişik tasarım yer almaktadır. Şekil 3.15' de gösterildiği gibi tek eksenli olan izleyici yatay eksene göre 32° ( $\beta$ , enlem açısı) eğim açılı, güneye bakacak şekilde konumlandırılmıştır. İki eksenli olan izleyicide de güneş panelinin eğim açısı, enlem açısına eşit olarak tasarlanmıştır. Eğim/sapma açısının saatlik değişimi çok yavaş düşünülmüştür. Bundan dolayı tek eksenli izleme, gün boyunca yalnızca bir kez ayarlanabilmektedir. Enlem açısına eşit eğim açılı iki eksenli izlemede ise gün

boyunca birkaç kez ayarlanabilmektedir. Üçüncü sistemde ise iki eksenle hareketli azimut izleyici düşünülmüştür. Bu sistemde bir eksen yeryüzü düzlemine paralel iken, diğeri dik eksenle dönme gerçekleştirmektedir. Bu sistemlerin bilgisayar programları ile üç boyutlu modelleri oluşturulmuştur. Simüle edilmesinde kullanılan hesaplamalarda güneşin hareketini modelleyen algoritmalar kullanılmıştır. Çalışmada üç güneş takipçisi arasında kıyaslama durumuna yer verilse de daha çok güneş hareketini tanımlayan eşitliklerin/denklemelerin formülleştirilmesi üzerinde durulmuştur (Şekil 3.15), (Alata vd. , 2005; Mousazadeh vd. , 2009; Önal, 2009; Oral, 2015).

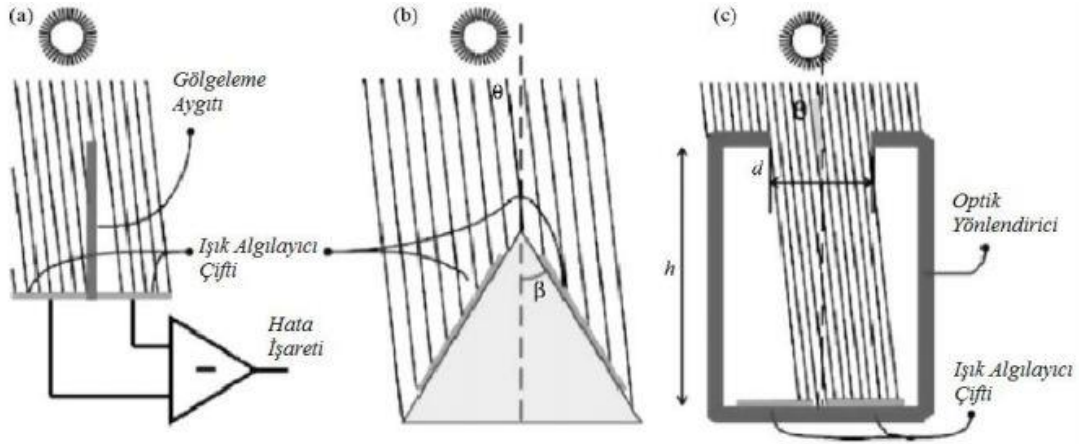


**Şekil 3.15** (a) Enlem açısı ile eşit eğim açılı tek eksenli güneş izleme sistemi, (b) Enlem açısı ile eşit eğim açılı iki eksenli ekvatorial güneş izleme sistemi, (c) iki eksenli azimut izleyicili sistem (Önal, 2009).

### 3.3.4.3 Kapalı döngülü güneş izleme sistemleri

Kapalı döngülü güneş izleme sisteminde, ışığa duyarlı sensörler olarak LED, foto diyot ve PV kullanılabilir. Bu sistemde sensörler elektronik devreler ile birbirine bağlanmaktadır. Bu karşılaştırmalı özellikteki elektronik devre, ışığın şiddetine göre sensör sinyallerini birbirleri ile karşılaştırmaktadır. Bu karşılaştırma sonucuna dayanarak PV panelin yönelimi gerçekleştirilmektedir. Sensörler, aydınlatmanın olduğu yöne panelin yönlendirilmesi ve yönlendirmeye güç sağlayan motorun çalışması için kontrol sinyali oluşturmaktadır. Şekil 3.16 (a)'da gösterilen kontrol sinyaline bağlı olarak ortaya çıkan hata işaretinden motorun çalışması ve panelin dengeye gelerek sıfır hata ürettiği konuma gelmesi için yararlanılmaktadır. Şekil 3.16 (b)'de görüldüğü gibi foto akım duyarlılığını artırmak için fotosensörler, eğik panellerin üzerine monte edilebilir. Güneş takip sistemlerinde güneş ışınlarını yoğunlaştırma işlevli kullanılan gölgeleme aygıtı, Şekil 3.16 (c)' de görüldüğü gibi optik yönlendirme tüpü olarak hazırlanmıştır. Bu sayede dağınık ışımaya önlenmekte ve güneşin konumu yüksek bir doğrulukla ölçülebilmektedir. Bu tür güneş izleme sistemleri teknik açıdan

karmaşık olup yüksek maliyetli olmaktadır (Şekil 3.16), (Heredia vd. , 2007; Mousazadeh vd. , 2009; Yıldırım vd. , 2010; Oral, 2015).



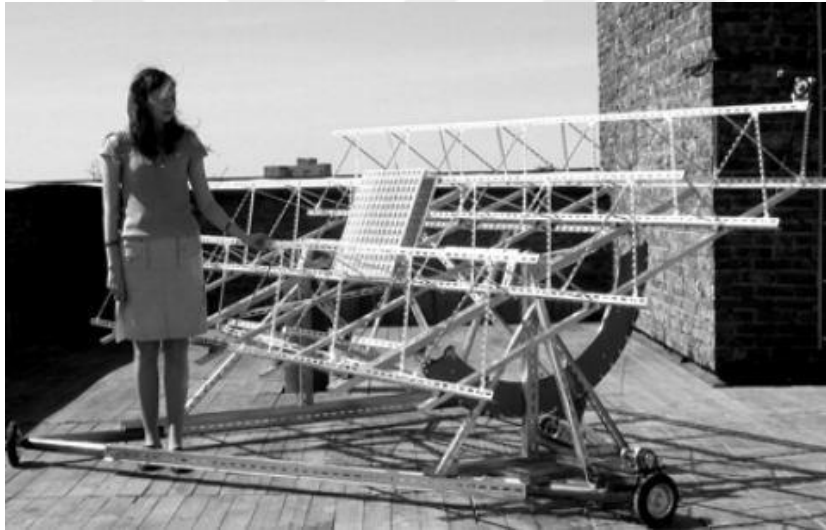
**Şekil 3.16** Gölge dengeleme prensibine dayalı güneş takip sistemi, (a) Güneş hedefleme algılayıcıları (b) Işık algılayıcılarının eğik montajı (c) Optik yönlendirici ile hassas güneş hedefleme (Oral, 2015).

Sistemde güneşi izleyen hareketin kontrolü için adım motorları kullanılmaktadır. Bu sistemin duyarlılık derecesini, kullanılan sensörlerin ve sensörleri bağlayan elektronik devrenin ayarlanabilir duyarlılığı etkilemektedir. Bu sistem ile  $0,5^\circ - 1^\circ$  duyarlılıkta güneş takibi yapmak mümkün olmaktadır (Eren, 2010; Anameriç, 2014; Başçoşkun, 2018).

Sensörlü kapalı döngülü sistemde, sensörler arası karşılaştırma olduğundan güneşi izleme, gün doğumu-batımı, yağmur, kar, sis gibi atmosferik koşullarda da gerçekleşmektedir. Bu koşullarda dahi sistem en fazla güneş ışınımının olduğu yöne yönelme eğilimindedir. Bu durumda sistem her koşulda enerji üretmeye devam ediyor olsa da, uzun süreli yağış olduğu ve havanın çok bulutlu olduğu dönemlerde yön bulma arayışında kalacağından sistemi harekete geçiren motorun üretilenden daha fazla enerji tüketmesi söz konusu olmaktadır. Dolayısıyla yaz aylarında bu sistem enerji üretimi konusunda çok daha etkin durumda olmaktadır (Yıldırım vd. , 2010; Anameriç, 2014; Url-5).

1 kW<sub>p</sub> değerli güneş kurulumları için kapalı döngülü, iki eksenli bir güneş izleme sistemi, Rummyantsev vd. (2004) çalışmasında tasarlanmış ve test edilmiştir. Güneş izleyicinin tasarımında galvanizli çelikten yapılmış, silindirik formlu kanallar kullanılmıştır. Güneşi takip, tamamen bir güneş sensörü tarafından gerçekleştirilmektedir. İzleyici, hareket eden iki ana bölümden oluşmaktadır. Bir

bölüm, düşey eksen etrafında hareket eden bir taban platformu iken diğer bölüm yatay eksen etrafında hareket eden PV modüllerden oluşan bir platform olmaktadır. Taban platformu, azimut eksenine bağlanmıştır. Taban platformu, büyük açılı bir çember/çark tarafından hareket ettirilmektedir. PV modüllerden oluşan asma platform ise bir merdivenin üç basamağı gibi bir forma sahip ve yoğunlaştırıcı modüllerin montajlandığı bir çerçeve olarak tasarlanmıştır. PV modüllerden oluşturulan asma çerçevenin pozisyonu, yatay ekseninde simetrik olacak şekilde  $\pm 45^\circ$  arasında değişmektedir. Eğer motorlar (DC 12 V) sürekli aktif ise platformların dönme hızı saatte yaklaşık 1 dönme olmaktadır. Bu durum normal bir takipçiye kıyasla daha hızlı olduğunu ifade etmektedir. Motorların sürekli aktif oluşu, izleyicinin gün batımından gün doğumu pozisyonuna geri dönmesi ve bulutlu dönemler sonrası güneşi daha hızlı yakalaması için bir çözüm olabilmektedir (Şekil 3.17), (Rumyantsev vd. , 2004; Mousazadeh vd. , 2009; Oral, 2018).

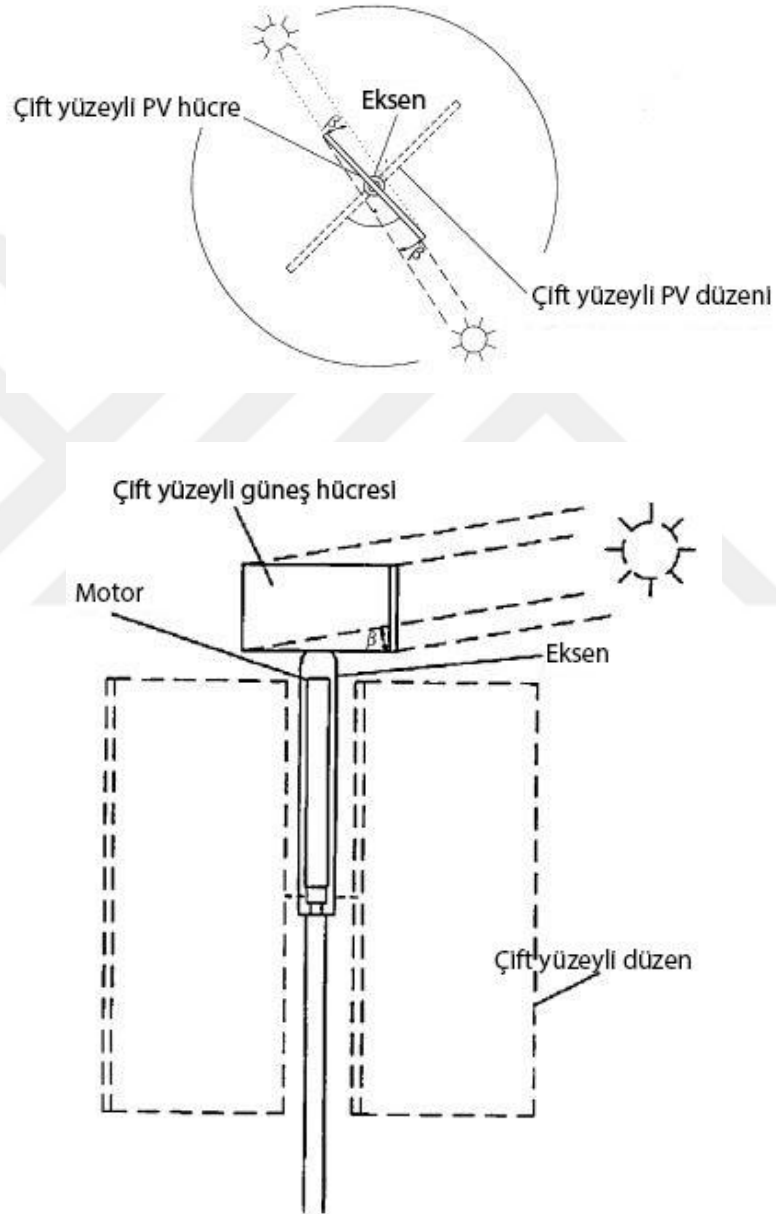


**Şekil 3.17** 1 kWp güneş kurulumu için geliştirilen kapalı döngülü, iki eksenli güneş izleme sistemi (Rumyantsev vd. , 2004).

Çift yüzeyli güneş panellerinin enerji üretmeye ek olarak sensör işlevi ile kullanıldığı ve doğrudan DC motora bağlandığı kapalı döngülü izleme olarak değerlendirilebilecek bir güneş izleme sistemi Poulek ve Libra (2000) çalışmasında test edilmiştir. Bu sistemde bataryalar gibi pahalı ve çok fazla güvenilir olmayan hiçbir elektronik bileşen kullanılmamıştır. Bu sistem  $- 40^\circ\text{C}$ ' nin altındaki düşük sıcaklıklarda bile çalışabilmektedir. Sistemdeki güneş izleyicili yani sensör işlevli güneş panelinin alanı hareketli diğer güneş panelleri alanları toplamının yaklaşık %1'i kadardır. Standart tek yüzeyli güneş panellerinden oluşan izleme sistemleri, maksimum  $120^\circ$  lik bir açı ile



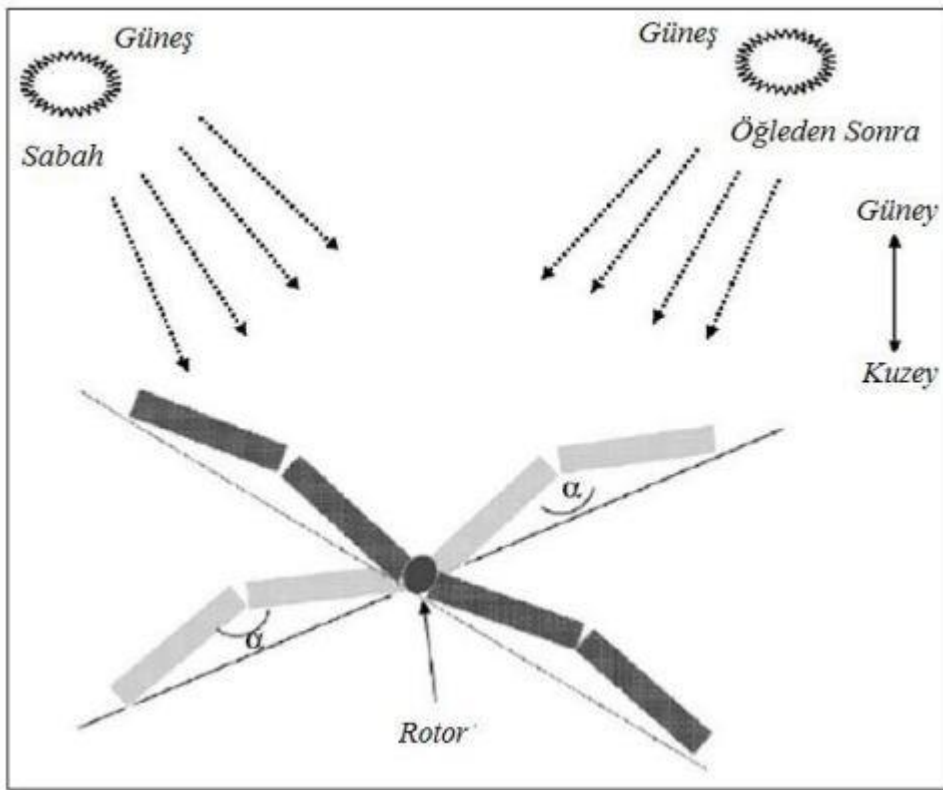
izleme/geri izleme yapabilirken, çift yüzeyle güneş panelleri ile birlikte destek (sensör işlevli) çift yüzeyle güneş panelli bu sistem, 360° lik izleme/geri izleme açısına olanak sağlamaktadır. Çalışmada, güneş izleyicisi olarak işlev gören PV hücrenin  $\pm 5^\circ$  lik sapmalarla güneşi izlediği ve standart bir takipçinin ürettiği enerjinin %95' inden daha fazla enerji ürettiği sonucuna varılmıştır (Şekil 3.18), (Poulek ve Libra, 2000; Önal, 2009; Mousazadeh vd. , 2009).



Şekil 3.18 (a) İzleme sisteminin planı, (b) düzeni (Poulek ve Libra, 2000).

Tek eksende hareket eden, tek rotorlu (döner), dört adet güneş panelinin kullanıldığı kapalı döngülü sistem olarak değerlendirilebilecek bir güneş izleme sistemi Karimov

vd. (2005) çalışmasında test edilmiştir. Bu sistemde ikincil eksenler de bulunmakta ve bu eksenler manuel olarak 23°, 34° ve 45° lik sabit açılar ile PV panellerin eğim açısını sabitlemek için ayarlanabilmektedir. Güneş panelleri kendi içinde iki eş bölüme ayrılmış ve bir parçadaki paneller arasındaki açı 170° olarak sabit tutulmuştur. Bu sistemde PV paneller enerji dönüşümü yanında sensör işlevini de yerine getirdiğinden kapalı döngülü bir izleme sistemi olarak değerlendirilebilir. Yapılan bu çalışmada, sabah ve akşam saatlerinde enerji üretiminin çok farklılaştığı gözlemlenmiş ve sabit modüllü sisteme kıyasla, %30'dan daha fazla enerji kazancı olduğu sonucuna varılmıştır (Şekil 3.19), (Karimov vd. , 2005; Mousazadeh vd. , 2009; Oral, 2015).



Şekil 3.19 Tek rotorlu, 4 panelli sistemin sabah ve öğleden sonraki pozisyonları (Oral, 2015).

#### 3.3.4.4 Hibrit döngülü güneş izleme sistemleri

Hibrit döngülü güneş izleme sistemleri, açık ve kapalı döngülü sistemlerin eleman ve özelliklerinin birlikte kullanıldığı izleme sistemi olarak tanımlanabilir. Bu güneş izleme sisteminde, (UTC) eş güdümlü evrensel zamanı kullanarak bir mikroişlemci ürettiği astronomik algoritmalar ile güneşin konum tespitini yaparken, sistemde tasarlanan yerlere yerleştirilen sensörler ile de güneşin konum doğruluğu kontrol edilmektedir.

PLC kontrollü, tek eksenli hibrit olarak değerlendirilebilecek bir güneş izleme sistemi Al-Mohamad A. (2004) çalışmasında tasarlanmış ve PV sistemin günlük güç üretimi izlenmiştir. Bu sistemde iki adet fotosensör kullanılmış ve sensörler bariyerle ayrılmıştır. Bu sayede bir sensörün diğer sensöre gölge oluşturması sağlanmıştır. Sensörler doğrudan PLC' ye bağlanarak sensörlerden gönderilen çıkış işaretleri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma prensibine dayanarak PV sistemin doğu-batı yönünde hareket etmesi sağlanmıştır. Sistem maksimum 120° lik bir açı tarayabilecek biçimde tasarlanmıştır. Bu sistem için güneş izleyicinin performansının bilgisayar ortamında hesaplandığı ve ekrana yansıtıldığı PLC ile uyum içinde çalışan özel bir yazılım programı tasarlanmıştır. Bu sayede gün boyunca sistem performansı izlenebilmiştir. Sonuç olarak gün boyunca sistemin performansı kıyaslandığında, 6.00-10.00 ve 15.00-17.00 ( günün erken ve geç saatlerinde) saatleri arasında üretimde, %40' lık bir artış gözlemlenmiştir. Öğle saatleri civarında önemli bir değerde (%2-4) artış gözlenmemiştir. Tüm gün için ortalama güç üretimi artışı ise sabit PV sisteme kıyasla %20 olarak hesaplanmıştır (Al-Mohamad A., 2004; Önal, 2009; Mousazadeh vd. , 2009).

### 3.3.4.5 Çalışma prensiplerine göre güneş izleme sistemlerinin karşılaştırılması

Çizelge 3.2' de hibrit döngülü güneş izleme sistemine, hem açık hem de kapalı döngülü sistemlerin sağladığı avantajlar kullanılarak tasarlanması açısından yer verilmemiştir.

**Çizelge 3.2** Çalışma prensiplerine göre güneş izleme sistemlerinin karşılaştırılması.

Parametreler	Pasif (Mekanik) Güneş İzleme Sistemi	Açık Döngülü Güneş İzleme Sistemi	Kapalı Döngülü Güneş İzleme Sistemi
<b>Güneş izleyici hareket alanı</b>	Sistem yalnızca güneşin azimuth (doğu-batı) açısını izleyebilmektedir.	Sistem, tek ve iki eksenli hareket kabiliyetine ek olarak hareketin hassasiyet düzeyi ayarlanabilir.	Uzun süreli olumsuz hava koşulları dışında sistem büyük açıları hızlı taramaktadır.

**Çizelge 3.2 (devam):** Çalışma prensiplerine göre güneş izleme sistemlerinin karşılaştırılması.

<b>Strüktürel etkinlik</b>	Basit mekanik kurulumla sahiptirler.	Kompleks teknik yapılı bu sistemin kurulum hatalarından kaynaklı strüktürel etkinlikleri düşük olabilmektedir.	Kompleks teknik yapılı bu sistemin kurulum hatalarından kaynaklı strüktürel etkinlikleri düşük olabilmektedir.
<b>Kurulum maliyeti</b>	Basit mekanik kurulumlar olduğu için kurulum maliyetleri düşüktür.	Karmaşık/kompleks teknik sistemler gerektirdiklerinden kurulum maliyetleri daha yüksektir. Ayrıca, nitelikli eleman gerektirmektedir.	Karmaşık/kompleks teknik sistemler gerektirdiklerinden kurulum maliyetleri daha yüksektir. Ayrıca, nitelikli eleman gerektirmektedir.
<b>Yapı cephesine uyarlanma düzeyi</b>	Büyük ölçekli üretimleri (boyut ve ağırlık) nedeniyle yapı cephesine uyarlanması pek mümkün gözükmemektedir.	Kompleks sistemler gerektirdiğinden cepheye entegrasyon zor ve maliyetlidir. Fakat teknik çözümlerle uyarlanma kolaylaştırılabilir.	Kompleks sistemler gerektirdiğinden cepheye entegrasyon zor ve maliyetlidir. Fakat teknik çözümlerle uyarlanma kolaylaştırılabilir.
<b>Bakım, onarım maliyeti</b>	Basit mekanik yapılı olduklarından bakım, onarım maliyetleri düşüktür.	Kompleks yapılı olduklarından bakım, onarım maliyetleri yüksektir. Ayrıca bu sistem türünde ana işlemcinin bozulması doğrudan sistemin tamamını etkiler.	Kompleks yapılı olduklarından bakım, onarım maliyetleri yüksektir.
<b>Güneşe uyarlanma düzeyi-güneş hareketine tepki verme süresi</b>	Yalnızca güneş enerjisi ile çalıştıkları için uyarlanma süreleri uzundur.	Sistemde astronomik verilerle çalışan işlemci, yüksek hassasiyetli ayarlandığında güneşe uyarlanma düzeyi artar.	Yüksek hassasiyetli sensörler ve ayarlanabilir elektronik devre ile güneşe uyarlanma düzeyi artmaktadır.

**Çizelge 3.2 (devam):** Çalışma prensiplerine göre güneş izleme sistemlerinin karşılaştırılması.

<b>Atmosferik koşullara dayanım</b>	PV panelde oluşacak kirlilik sistemin çalışmasını olumsuz etkilemektedir.	PV panelde oluşacak kirlilik sistemin çalışmasını olumsuz etkilemektedir.	PV panelde oluşabilecek kirlilik durumuna ilave olarak sensör üzerinde oluşabilecek kirler de sistemin çalışmasını olumsuz etkilemektedir.
-------------------------------------	---	---	--

### 3.4 Güneşe Uyarlanabilir Fotovoltaik Sistem Bileşenleri

Güneşe uyarlanabilir PV sistemlerin kurulumunda kullanılabilir güneş izleyiciler için bir çok yaklaşım mevcuttur. Ancak güneş izleyicilerin sert, rijit mekanik yapıları, karmaşık ve hantal yapılı olmaları, PV sisteme önemli düzeyde ağırlık eklemeleri ve yüksek maliyetlerinden dolayı uygulanması yaygınlaşmamıştır.

Konuyla ilgili (Lamoureux vd. , 2015) çalışmasında gösterildiği gibi, güneşi izlemek için basit teknik yapılı, düşük maliyetli ve hafif bir yöntem olarak ince film fotovoltaiklerden oluşturulan krigami yapıları geliştirilmiştir. Krigami, kağıt kesme ve katlama işlemlerinin birlikte uygulandığı, sanatsal modeller oluşturulan bir tekniktir. Krigami, origami kağıt katlama sanatı ile benzerdir. Ancak, origami yalnızca katlama tekniğinin kullanıldığı bir sanat iken krigami kağıdın önce katlanması ve sonra kesilerek belirli şekillerin elde edildiği bir sanattır (Jazebi, 2012, s.10 ; Sarıca, 2015, s.43). Lamoureux' un çalışmasında geliştirilen ince film fotovoltaiklerden oluşturulan krigami yapıları için ince film galyum arsenit güneş hücrelerinde kesim yapılarak desen oluşturulmaktadır. Sonra  $\pm 1^\circ$  arası kontrol edilebilecek bir dizi eğimli yüzey elemanı üretmek için gerilmektedir. Ahşabın higroskopik (nem çeken) yapısı kullanılarak, motor ve kontrole ihtiyaç duymadan hava nemindeki değişikliklere göre hareket eden yapı elde edilmektedir (Şekil 3.20), (Lamoureux vd. , 2015; Orhon, 2016).

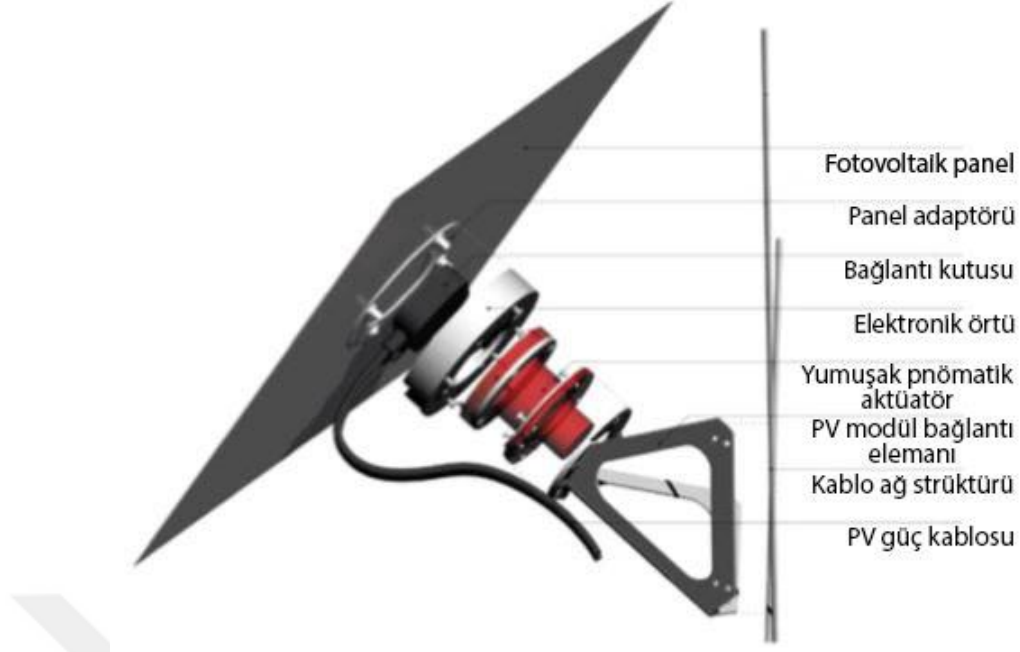


**Şekil 3.20** Dinamik krigami yapıları ( Lamoureux vd. , 2015).

Ayrıca başka bir çözüm olarak geliştirilmiş morfolojik karmaşıklığı düşük, yüksek güç/ağırlık oranına sahip, olumsuz atmosfer koşullarına dayanımı yüksek, üretimi kolay, maliyeti düşük, tasarım esnekliğine sahip ve modüler gölgeleme sistemleri ile birleştirilebilen yakın zamanda geliştirilmiş bir güneş izleme uygulaması, yapı cephesi ile entegrasyonda bazı avantajlar sağlamaktadır. Gölgeleme sistemi olarak da değerlendirilebilecek bu sistem, iç mekan ve fiziksel çevre arasındaki enerji akışını optimum şekilde düzenleyebilmekte, mahremiyet sağlayabilmekte kullanıcı kontrolü ile görsel konforu optimum düzeyde sağlayabilmektedir (Nagy vd. , 2016; Svetozarevic vd. , 2016). Tezin bu bölümünde güneşe uyarlı sistemin bileşenleri verilirken iki eksenli, yumuşak pnömatik aktüatörlü yakın zamanda geliştirilen bir sistem ele alınacaktır.

### **3.4.1 Fotovoltaik modül**

Güneşe uyarlanabilir fotovoltaik sistem için tercih edilebilecek modüller, sahip olduğu avantajlardan dolayı ince film modüllerdir. Geleneksel modüllere kıyasla ince film modüller, esneklik, kıvrılma, bükülme ve hafif yapıları sebebiyle avantajlıdır. İnce film fotovoltaik modüllerin hafif strüktürleri, cepheye entegrasyonda da avantaj sağlamaktadır. PV modül için ince film, hücre malzemesi bakır indiyum galyum selenit (CIGS) kullanılmaktadır. PV hücrelerin uygulandığı panel, 400x400 mm boyutunda ve 0,8 mm kalınlığına sahiptir. Alüminyum bir alt tabakaya sahiptir. Sistem modülünün toplam ağırlığı ortalama 800 g olmaktadır (Şekil 3.21), (Nagy vd., 2016; Svetozarevic vd. , 2016).

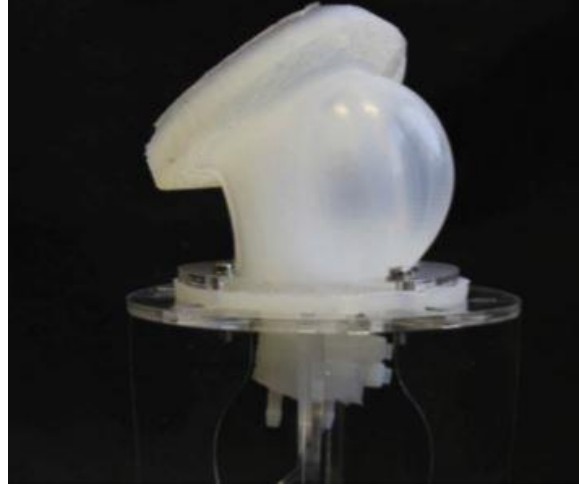


**Şekil 3.21** Güneşe uyarlanabilir fotovoltaik sistem modülü (Nagy vd., 2016).

### 3.4.2 Aktüatör

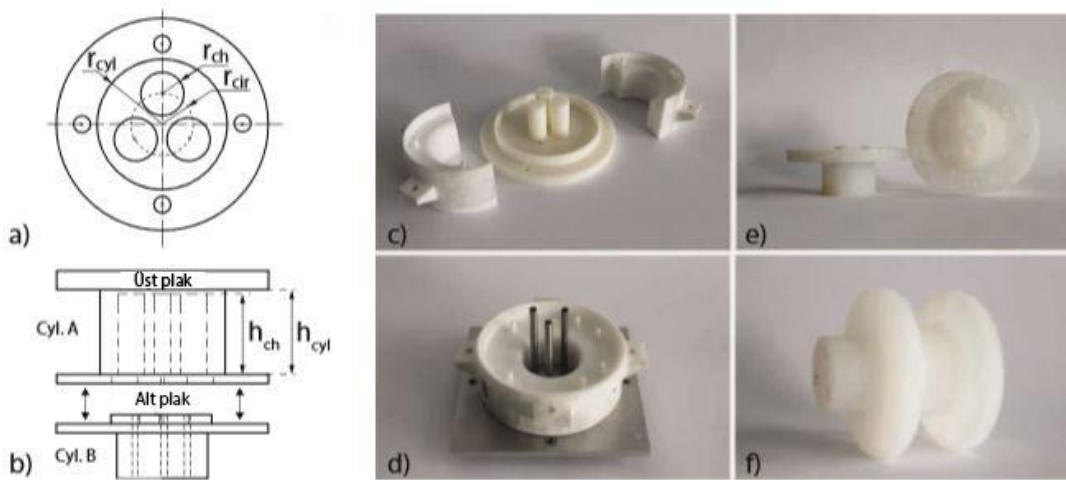
Aktüatör, bir mekanizmayı, sistemi kontrol eden veya hareket ettiren bir tür motordur. Aktüatörler, genellikle elektrik akımı, hidrolik akışkan basıncı veya pnömatik basınç sağlayan bir enerji kaynağı ile çalışmaktadır.

Yumuşak pnömatik aktüatör, silikon kauçuk gibi elastik materyallerden yapılmış ve basınçlı hava kullanılarak enerji verilmiştir. Bu aktüatör, PV sistem modülünün toplam 800 g'lık ağırlığının yaklaşık olarak 190 g'ını oluşturmaktadır. Silikon kauçuk malzeme, PV paneli taşıma kabiliyeti açısından avantaj sağlamaktadır. Özel olarak bu güneşe uyarlanabilir fotovoltaik sistem için geliştirilmiş yumuşak pnömatik aktüatörün Şekil 3.22' de uygulanan basınç altında bükülmüş durumu görülmektedir (Şekil 3.22), (Nagy vd., 2016; Svetozarevic vd. , 2016).



**Şekil 3.22** Basınç altında bükülmüş yumuşak pnömatik aktüatör (Nagy vd., 2016).

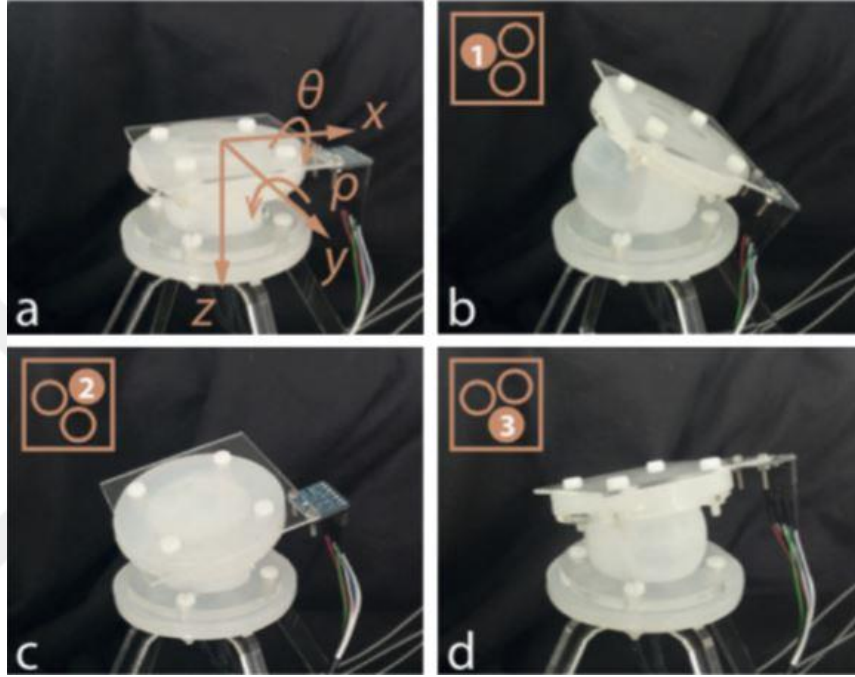
Yumuşak pnömatik aktüatör, merkez etrafına simetrik olarak dağıtılmış üç şişme haznesi (silindirik oda) içermektedir (Şekil 3.23 a, b). Şekil 3.23 a, b' de görüldüğü gibi haznelerin çapı  $r_{ch}$  ve yüksekliği  $h_{ch}$ , A silindirinin çapı  $r_{cyl}$  ve yüksekliği  $h_{cyl}$ , silindirik odaların merkezlerinin bulunduğu dairenin çapı ise  $r_{cir}$ ' dir. Hazneleri içeren çevre gövdesi (A silindiri), PV modülün montajlanmasına ve aktüatörün bağlantı elemanının cepheye montajlanmasına imkan vermek için iki yönde yatay olarak genişleyerek iki kalın disk oluşturmaktadır. Haznelerin düşey yönde deformasyonunu önleyecek biçimde üst ve alt disklerin kalınlıkları belirlenmektedir. Giriş borularının yerleştirildiği B silindirinin çap ve yüksekliği, alt ve üst disklerin çapları, montajda mekanik stabiliteyi sağlayacak şekilde esnek olarak seçilebilmektedir (Şekil 3.23 c, d, e, f), (Nagy vd. , 2016; Svetozarevic vd. , 2016).



**Şekil 3.23** (a) Aktüatör planı, (b) Kesiti, (c), (d), (e) Bileşenleri, (f) Modeli (Svetozarevic vd., 2016).



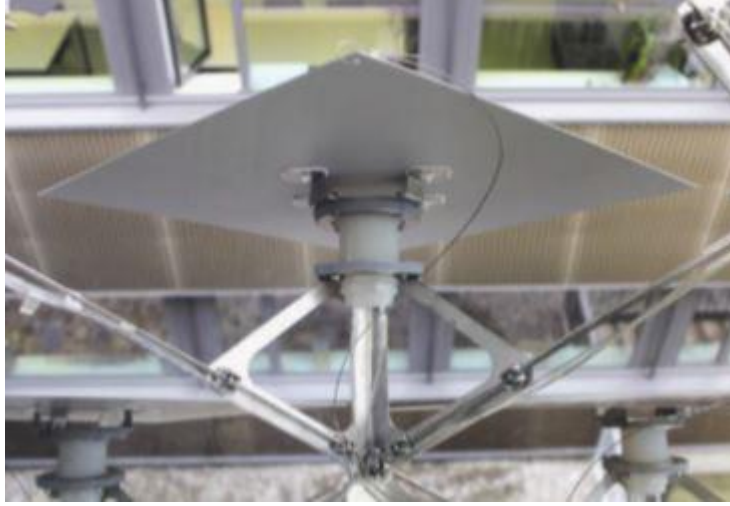
Haznelerin şişme ve sönme durumlarına göre aktüatörler, fotovoltaik modülü iki yönde yönlendirme kabiliyetine sahiptir. Haznelerden herhangi biri şişirildiğinde, üst ve alt diskler üzerinde basınç meydana gelmektedir. Bu basınç, üst platformun diğer iki hazneyi içeren A silindirin kalan kısmı olan hareket sınırlayıcı kısmının etrafında dönmesine neden olmaktadır. Üç haznenin sırasıyla şişme ve sönme durumlarına göre aktüatör hareketi, Şekil 3.24’ de verilmektedir (Şekil 3.24), (Nagy vd. , 2016; Svetozarevic vd. , 2016).



**Şekil 3.24** (a) Sönük aktüatör, (b), (c), (d) 1., 2. ve 3. haznelerin sırasıyla şişme durumları (Nagy vd., 2016).

### 3.4.3 PV modül bağlantı elemanı

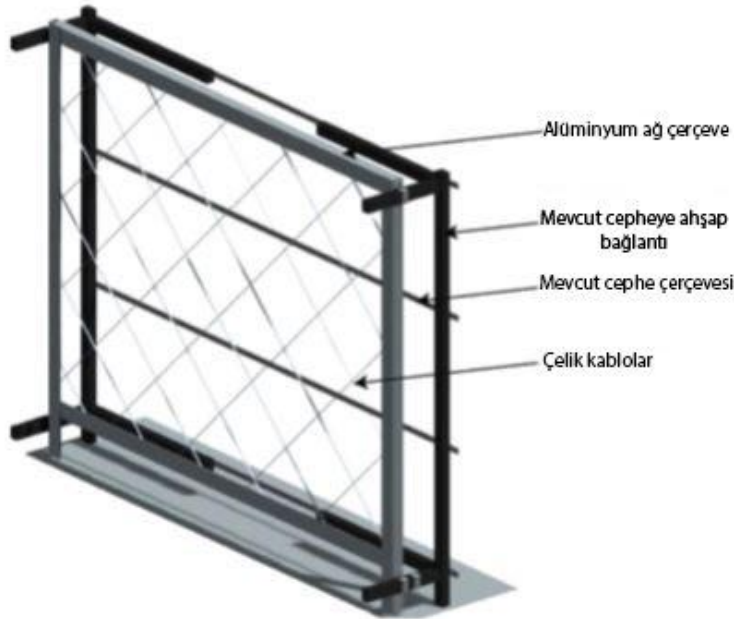
İnce film fotovoltaik paneli çerçeve/kablo ağına bağlayan kiriş/uzantı, PV paneli, aktüatörden alınan güç sayesinde gerekli yönlerde döndürmek için etkinleştirmektedir. PV panelin tamamen açık ve tamamen kapalı pozisyonlarını elde etmesini sağlamaktadır. Günümüz tasarımı, lazer kesim ile elde edilmiş çift bükümlü paslanmaz çelik tutucu/kiriş Şekil 3.25’ de görülmektedir. Güneşe uyarlı fotovoltaik sistem için kullanılan bu konsol kirişler, kullanıcının iç mekandan görüş/manzara konforunu etkilemeden, PV modülü taşıyıp güneşe göre yönlenmesine izin vermekte ve üzerine gelen diğer yapı yüklerine dayanım göstermektedir (Şekil 3.25), (Nagy vd., 2016).



Şekil 3.25 Çift bükümlü ve lazer kesimli paslanmaz çelik tutucu kiriş (Nagy vd., 2016).

#### 3.4.4 PV modül taşıyıcı çerçevesi

Paslanmaz bir çelik çerçeveyi sıkıca bağlayan kablo ağı, güneşe uyarlanabilir fotovoltaiik sistemin destek strüktürünü oluşturmaktadır (Şekil 3.26). Çerçeve ve kablo ağı yaklaşık olarak panel başına 500 N' luk bir rüzgar yüküne (yaklaşık 180 km/h lik bir rüzgar hızı ile eşdeğer) dayanabilecek şekilde tasarlanmıştır. Çerçeve, düşeyde 2 U bağlantı profili, yatayda 2 L profilinden oluşturulmaktadır. Çerçeve ve kablo ağı ile ilgili ayrıntılı özellikler Çizelge 3.3' de yer almaktadır (Çizelge 3.3), (Nagy vd., 2016).



Şekil 3.26 Çerçeve ve kablo ağı render görünümü (Nagy vd., 2016).

**Çizelge 3.3** Çerçeve ve kablo ağ özellikleri (Nagy vd., 2016).

	<b>Birim</b>	<b>Çelik kablo</b>	<b>Paslanmaz çelik çerçeve</b>
<b>Mekanik dayanım</b>	MPa		180
<b>Akma dayanımı</b>	MPa		502
<b>Düşey profil (U)</b>			80x45 mm, t= 6 mm
<b>Yatay profil (L)</b>			100x50 mm, t= 6 mm
<b>Min. kopma dayanımı</b>	kN	9.1	
<b>Öngerme</b>	N	500	
<b>Kablo yarıçapı</b>		D= 4 mm	



#### 4. GÜNEŞE UYARLANABİLİR CEPHE UYGULAMALARININ İNCELENMESİ

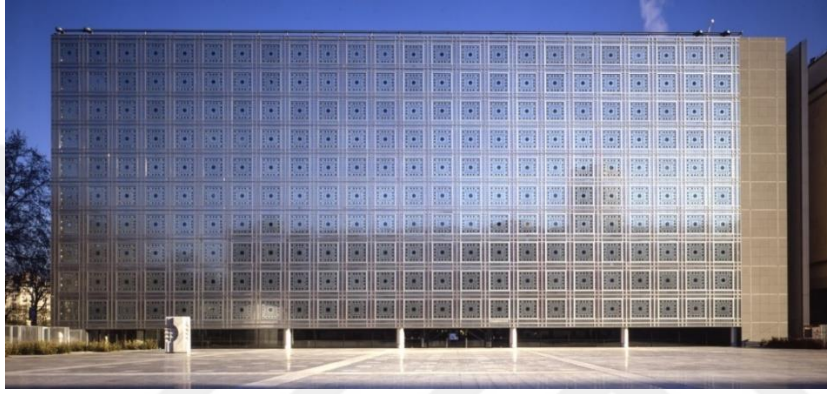
Değerlendirilecek örnekler, fotovoltaik sistemlerin entegre edildiği ve edilmediği güneşe uyarlabilir cephe uygulamalarından seçilmiştir. Amaç, değerlendirme sonunda güneşe uyarlabilir bir cephedeki fotovoltaik sistemin etkisini göstermektir. Güneşe uyarlabilir cephe uygulamaları seçilirken değerlendirme kriterlerine mümkün olduğunca farklı cevaplar veren uygulamalar olmasına özen gösterilmiştir (Çizelge 4.1).

**Çizelge 4.1** Cephe uygulamalarına ilişkin genel bilgiler

Cephe Uygulaması	Yapı İsmi	Yer, yıl	Mimarlar
U.1	Arab Institute	Paris, France, 1988	Jean Nouvel
U.2	River House	New York, ABD, 2009	Ennead ve Ismael Leyva
U.3	Architecture Science and Ecology Center	New York, ABD, 2009	Skidmore, Owings & Merrill LLP (SOM)
U.4	Al Bahr Towers	Abu Dhabi, 2012	Aedas Architects
U.5	IBA Soft House	Hamburg, Germany, 2013	Kennedy&Violich Mimarlık
U.6	Henning Larsen's University Building	Kolding, Denmark, 2014	Henning Larsen Architects
U.7	The House of Natural Resources (Uyarlı güneş cephesi prototipi)	Zurich, Switzerland, 2015	Zoltan Nagy, Johannes Hofer, Bratislav Svetozarevic, Jayathissa Prageeth, Moritz Begle, Stefan Caranovic

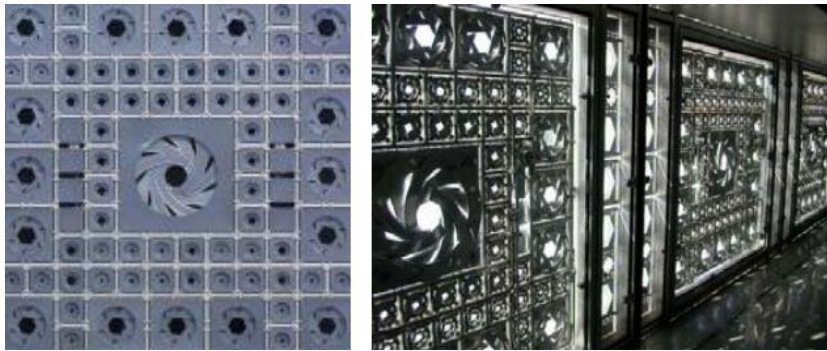
#### 4.1 Arab Institute (Paris, 1988)

Jean Nouvel tarafından Paris'te inşa edilmiş olan Arap Enstitüsü binası, güneşe uyarlanabilir olarak tasarlanmış bir cephe sistemine sahiptir. Güneşe uyarlanabilir olarak çalışan sistem yapının güney cephesi için uygulanmıştır. Bu sistem, cephe dış tarafındaki çift cam ünite ile iç tarafındaki tek cam arasında düzenlenmiştir. Sistem, 27.000 adet diyafram prensibi ile çalışan ayarlanabilir alüminyum güneş kontrol elemanından oluşmaktadır (Şekil 4.1), (Gür, 2007; Nady, 2017; Url-7; Url-8).



**Şekil 4.1** Güneş kontrol elemanlarının kullanıldığı Paris Arap Enstitüsü bina cephesi (Url-8).

Güneş kontrol elemanlarını oluşturan metal gözeler, gün ışığı koşullarına göre bir elektropnömatik mekanizma sayesinde genişleyebilmekte veya daralabilmektedir. İç mekanların aydınlık düzeyinin artırılması istenildiğinde genişleyerek gün ışığı geçişine daha fazla izin vermektedir. Daraldığında ise yapıyı ısı etkilerinden korumaktadır (Şekil 4.2), (Gür, 2007; Url-7; Url-9).



(a)

(b)

**Şekil 4.2** Açılıp kapanarak güneş kontrolü sağlayan diyafram mekanizmalarının (a) dışarıdan görünümü, (b) içeriden görünümü (Url-10).



Cephedeki metal gözeler, güneş ışığına göre uyarlanarak açılıp kapanma hareketi gerçekleştirmektedir. Bu durum metal gözelerin açılma pozisyonlarında iken iç mekanların doğal olarak aydınlatılmasını mümkün kılmıştır. İç mekanın doğal gün ışığı ile kontrollü aydınlatılması Şekil 4.3’ de gösterilmektedir (Şekil 4.3). Yapının güney cephesinde kullanılan bu sistem iç mekana alınan gün ışığı düzeyini kontrol ederken ayrıca istenmeyen ısı kazancını da azaltmaktadır. Dolayısıyla iç mekanları soğutma enerjisi ihtiyacı da azalmaktadır. Yapı enerji kontrolü açısından etkin iken, cephede PV malzeme kullanımı olmadığı için güneş enerjisi, elektrik üretiminde kullanılamamaktadır.



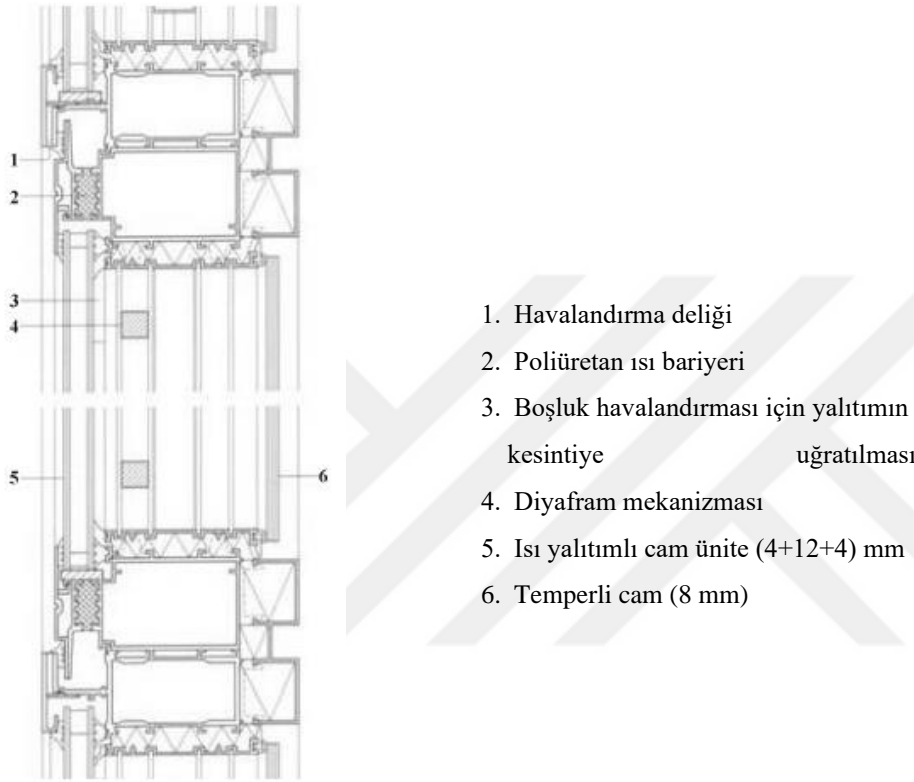
Şekil 4.3 Paris Arap Enstitüsü binası iç mekan görünümü (Url-11).

Cephede dış taraftaki çift cam ünite ile iç tarafta tek cam arasında metal malzemeli diyafram mekanizması düzenlenmiş olup yapı strüktürü ile entegredir. Bu durumun cephe strüktürünün mekanik dayanımının yüksek olmasını sağladığı söylenebilir. Ayrıca dinamik iklimsel koşullar altında malzeme dayanımlarının yüksek olduğu da ilave edilebilir (Şekil 4.4). Sistemdeki mekanizmalar ve elemanları dışarıdan görülebilir ve erişilebilirdir. Bu durum cephe bakım maliyetleri açısından olumlu bir özelliktir. Ayrıca, sistem mekanizmaları hassas bir bakım gerektirmemektedir.

Cephe sisteminin güneşi izlemesi, kapalı döngülü bir sistem olan ışığa duyarlı sensörler tarafından sağlanmaktadır. Işık yoğunluğuna göre hidrolik motorların sağladığı güç ile küçük çelik mekanik diyaframlar açılıp kapanmaktadır (Url-9). Bu cephe sisteminde mekanik diyaframlar ve sensörleri iki cam ünite arasında olup,

atmosferik koşullara maruz kalmadığı için sensör yüzeyleri kirlilik sorunu ile karşılaşmamakta ve bu da sistemin bakım maliyetlerini olumsuz yönde etkilememektedir.

Sistemde güneşi izleme tek ekseninde gerçekleşmekte olup, bundan dolayı güneşe uyarlanma düzeyi iki ekseninde güneşi izleyen bir sisteme göre daha zayıf olmaktadır.



Şekil 4.4 Paris Arap Enstitüsü diyafram mekanizması cephe kesiti (Gür, 2007).

#### 4.2 River House (New York, ABD, 2009)

Fotovoltaik cephelerin ilk uyarlanabilir kurulumları, mono kristal silisyum güneş hücreleri entegre edilmiş hareketli panjurlar olarak Ennead ve Ismael Leyva mimarlık tarafından tasarlanan LEED Gold sertifikalı Rockefeller Park'taki River House binasında uygulanmıştır (Şekil 4.5). Yalnızca yatay veya düşey yönde çalışmaya uyarlanabilir bu fotovoltaik sistem, yapının üç cephesinde uygulanmış ve pasif güneş izleme özelliğine sahiptir. Binadaki bu güneş uyarlanabilir fotovoltaik sistem, sabit bir fotovoltaik sistemli cephe çözümüne kıyasla %20 oranında bir verimlilik artışı sağlamıştır (Medio, 2013; Orhon, 2016; Url-12 ; Url-13).





**Şekil 4.5** River House genel görünüm (Medio, 2013).

Yatay ya da düşey ekseninde güneşi izleyerek hareketini gerçekleştiren panjurlar, iç mekanlara doğal ışık alımını sağlasa da asıl işlevi, elektrik üretimi gerçekleştirmektir (Şekil 4.6). Üretilen elektriğin yapı ısıtma-soğutma sistemlerinde kullanılması, yapının enerji ihtiyacını azaltmaktadır. Üretimin tek eksenli izleme sistemi ile sağlanması iki ekseninde güneşi izlemeye oranla enerji kazancı açısından daha az etkili olmaktadır.



**Şekil 4.6** River House güneşe uyarlabilir fotovoltaik sistemi (Medio, 2013).

Uyarlanabilir fotovoltaik sistem, yapıya dışarıdan doğrudan entegre edilmiştir. Cephe strüktürünün mekanik olarak dayanımının yüksek olduğu söylenebilir. Ancak, dinamik iklimsel koşullar altında malzemeler açıkta ve korunmasızdır. Bu yüzden PV panel yüzeylerinde atmosferik koşullardan kaynaklı kirlilik oluşabilmekte ve enerji üretimi performansı düşebilmektedir.

PV malzeme için kullanılan monokristal yapılı güneş hücreleri, güneş ışınlarının elektrik enerjisine dönüştürülmesinde yüksek verimlilikle çalışan hücrelerdir. Dolayısıyla PV malzeme türü enerji üretimini olumlu yönde etkilemektedir. Ancak, uyarlanabilir PV paneller ya yatay ya da düşey olmak üzere tek ekseninde hareket ettiklerinden bu durum etkin PV panel yüzey alanını iki ekseninde hareket eden bir panele göre azaltacaktır.

Uyarlanabilir fotovoltaik kurulumun elemanlarına erişim dışarıdan ve içeriden kolaydır. Bu durum cephe bakımını kolaylaştırmakta ayrıca maliyet açısından olumlu bir özelliktir.

Sistem, güneşi tek ekseninde izlemektedir. Dolayısıyla güneşe uyarlanma düzeyi iki ekseninde güneşi izleyen bir sisteme göre daha düşüktür.

Cephe sistemi panellerinin güneşi izlemesi, pasif olarak gerçekleşmektedir. Bu durum uyarlı PV sistemin hareketi için enerji tüketilmediğini göstermektedir.

#### **4.3 Architecture Science and Ecology Center (CASE), (New York, ABD, 2009)**

Skidmore, Owings & Merrill LLP (SOM) tarafından inşa edilmiş olan Architecture Science and Ecology Center, farklı bir yaklaşımla tasarlanmış fotovoltaik sistemli bir cepheye sahiptir. Entegre Konsantre Güneş Cephesi (ICSF) diye adlandırılan bu cephe, yapıya elektrik enerjisi, termal enerji ve daha fazla gün ışığı sağlarken istenmeyen ısı kazanımını da azaltmaktadır (Şekil 4.7). ICSF ile konsantre cam güneş reseptörleri, ışık kazanımını en üst düzeye çıkarmak için güneşin konumunu takip eden bir izleme mekanizmasına montajlanmaktadır. Kinetik reseptörler gelen ışığı büyütmekte ve reseptör merkezinde bulunan küçük bir fotovoltaik hücre üzerinde yoğunlaştırmaktadır. Ayrıca, Entegre Konsantre Güneş Cephesi (ICSF) sistemindeki reseptörler tarafından yakalanan termal enerji, yapının ısıtma ve soğutma sistemlerinde kullanılmak üzere dönüştürülmektedir. Mevcut güneş paneli teknolojilerinin aksine, ICSF bir binanın cephesi veya çatısına mimari olarak entegre

edilebilmektedir. ICSF' nin yarı saydam cam sisteminden oluşu, gün ışığının iç mekana dağıtılmasını sağlarken kullanıcı görüşünü engellemeyerek manzara sağlamaktadır (Şekil4.8). (Url-14; Url-15).



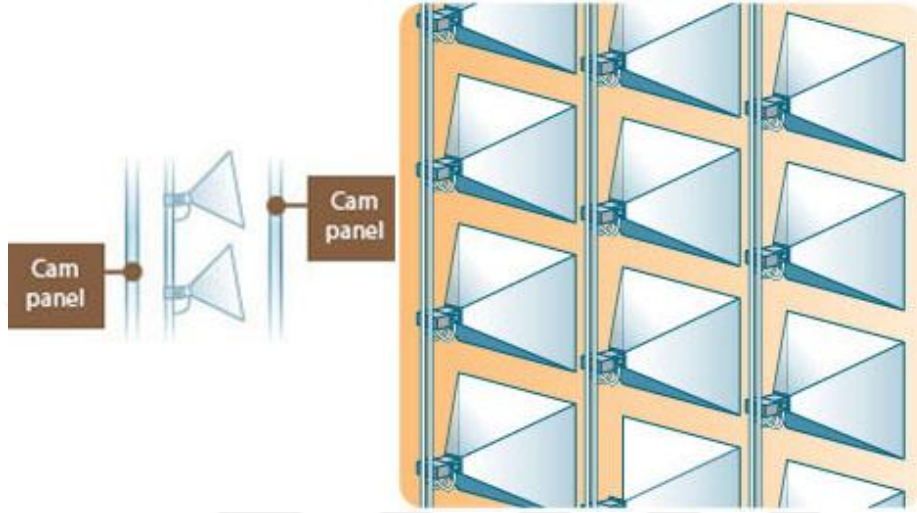
**Şekil 4.7** Entegre konsantre güneş cephesi iç mekandan görünüm (Url-15).



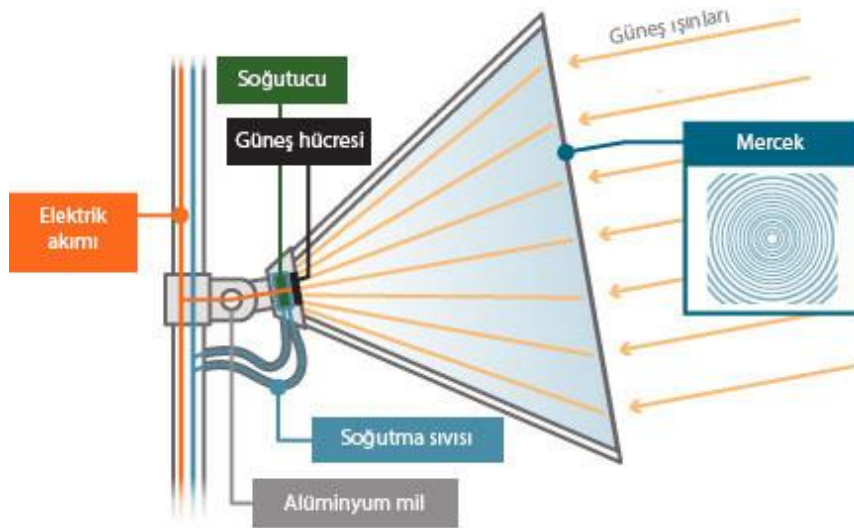
**Şekil 4.8** Entegre konsantre güneş cephesi (Url-15).

Sistemde cephenin dış ve iç tarafındaki cam paneller arasında piramit şeklindeki güneş yoğunlaştırıcılar yerleştirilmektedir (Şekil 4.9). Bu güneş yoğunlaştırıcılar

bağlandıkları pivot sayesinde hareket edebilmekte ve güneşi izleyerek güneş ışınlarının %85'ini yakalayabilme potansiyeline sahiptir. Sistemin bileşenleri Şekil 4.10' da verilmektedir. Sistemde bulunan fotovoltaik hücrenin arkasındaki iki tüpten birinde üretilen elektrik akımı geçmekte iken, diğesinde hücrenin verimli çalışmasını sağlayan soğutma sıvısı taşınmaktadır (Url-16); (Şekil 4.9, 4.10).



Şekil 4.9 Cam paneller arasına yerleştirilen piramit biçimli güneş yoğunlaştırıcı (Url-16).



Şekil 4.10 Entegre konsantre güneş cephesi çalışma prensibi (Url-16).

Entegre Konsantre Güneş Cephesi (ICSF), daha fazla gün ışığı sağlayarak iç mekanların doğal olarak aydınlatılmasını mümkün kılmıştır. Dolayısıyla yapay ışığa olan ihtiyacı azaltmaktadır. Bunları gerçekleştirirken cephenin asıl amacı olan elektrik üretimini de sürdürmektedir. Ayrıca, ısıtma-soğutma sistemlerinde kullanılmak üzere



enerjiyi de dönüştürerek yapının enerji kazancını artırmaktadır. Bu cephe sisteminde kullanılan piramit biçimli güneş yoğunlaştırıcılar, iki eksenli olarak hareket edebilme kabiliyetine sahiptir. İki eksenle güneşi izleyebilme durumu tek eksenli bir güneş izleme sistemine göre daha fazla güneş ışınımı yakalayabileceğinin göstergesidir.

Güneş yoğunlaştırıcıların entegre edildiği metal iskelet sistem, cephede dış ve iç taraftaki cam paneller arasında düzenlenmiş olup yapı strüktürü ile entegredir. Bu durumun dışarıdan yapıya entegre olup, atmosferik koşullar altında bulunan bir sisteme göre daha avantajlı olduğu söylenebilir. Çünkü cephe strüktürü rüzgar, yağmur, toz vb. dış fiziksel koşullardan korunmaktadır.

Entegre Konsantre Güneş Cehesi (ICSF) için kullanılan güneş hücresi malzemesinin ne olduğu bilinmemektedir. Ancak, bu cephe sistemi için önemli olan bileşen kullanılan mercektir. Çünkü mercek içerisine alınan güneş ışınları, büyütülerek mercek merkezinde bulunan fotovoltaik hücre üzerinde yoğunlaştırılmaktadır. Dolayısıyla yakalanan güneş ışınım miktarından çok daha fazlası fotovoltaik hücre üzerine iletilmektedir.

Kurulum maliyeti yüksek olan Entegre Konsantre Güneş Cehesi (ICSF) iskeletinin cephede iki cam panel arasında düzenlenmiş olması sistemi dış atmosferik koşullardan korumaktadır. Dolayısıyla temizlik, bakım gibi işleri azaltarak yaşam dönemi maliyetini azaltmaktadır.

Güneş hücresinin etkin yüzey alanı, güneş yoğunlaştırıcılar sayesinde zaten artırılmış iken, yoğunlaştırıcının iki eksenli olarak hareket edebilme kabiliyeti bu durumu sistem için daha da avantajlı hale dönüştürecektir.

Entegre Konsantre Güneş Cehesi (ICSF) güneş yoğunlaştırıcı merkezinde bulunan fotovoltaik güneş hücresi ile güneş takip sinyallerini oluşturarak kapalı döngülü bir güneş izleme sistemi özelliklerini taşıdığı söylenebilir. Bu izleme sisteminde güneş ışınımı mercekten geçerken yoğunlaştırılarak hücreye ulaştığından yüksek hassasiyetli sensör olarak değerlendirilebilmektedir. Bu durumda güneş hareketine tepki oluşturma süresi daha kısa olup, uyarlanma düzeyini olumlu etkilemektedir.

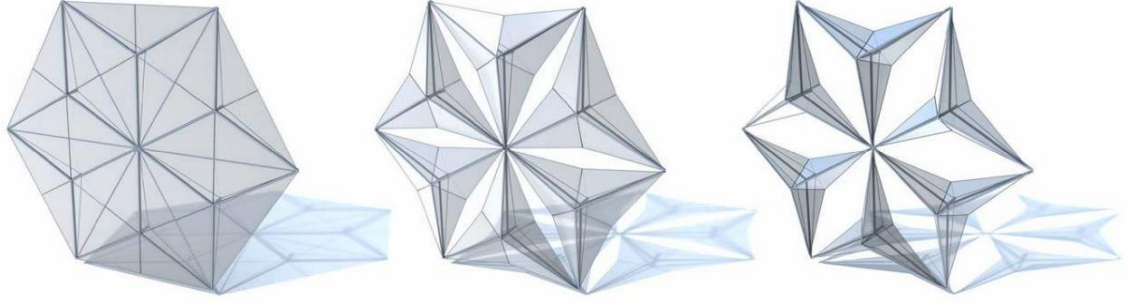
#### **4.4 Al Bahr Towers (Abu Dhabi, 2012)**

Aedas Architects tarafından inşa edilen Al Bahr Towers, güneşe uyarlanabilir olarak hareket eden bir dinamik cepheye sahiptir. Yapının inşa edildiği bölgenin iklim

koşulları gereği olarak güneşten kaynaklı aşırı ısı ve parlamanın kontrol altına alınması için bu dinamik cephe tasarımı gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.11), (Nady, 2017; Url-17). Aktif yüzeylerinin yapımında altıgen desenli membran kaplı birimler kullanılmıştır. Cephedeki bu birimler, güneşe ve değişen çevresel koşullara göre katlanarak açılma ve kapanma hareketi gerçekleştirmektedir (Şekil 4.12). Uyarlanabilir hareketin gerçekleşmesi, her birime monte edilen sensörler sayesinde olmaktadır. Cephe panelleri, yapının iki metre kadar uzağında yapıdan bağımsız biçimde inşa edilen bir cephe strüktürüne monte edilmiş olup, panellerin hareketi için enerji, her birimin bağlı olduğu aktüatörü tarafından sağlanmaktadır. Bu dinamik sistemin yapıya alınan güneş enerjisini % 20 oranında azaltması hedeflenmiştir. Bu sayede iç mekan konfor koşullarının iyileştirilmesi amaçlanmıştır (Nady, 2017; Url-17; Url-18).



**Şekil 4.11** Güneşe uyarlanabilir dinamik cephe tasarımına sahip Al Bahr Towers (Url-17).



**Şekil 4.12** Birimlerin katlanarak açılma ve kapanma hareketi (soldan sağa: kapalı durumdan açık duruma) (Url-17).

Cephe tasarımı yapı ölçeğinde uygulanmadan önce cephe panellerinin altıgen geometrisi için parametrik bir tanım kullanılarak, yılın farklı günlerinde güneş ışığı miktarı ve güneşin değişen açılarına göre cephe hareketi simüle edilmiştir. Güneş doğarken Doğu yönünde, paneller kapanmaya başlayacak ve güneş bina boyunca hareket ettikçe, her bir birim güneşle birlikte hareket edecektir (Şekil 4.13), (Url-17).



**Şekil 4.13** Birimlerin birbirinden bağımsız olarak güneşe uyarlanan pozisyonlarının cephedeki görünümü (Url-17).

Yapı iç mekanlarında yapay ışığa olan ihtiyacın azaltılması doğrultusunda cam sistemi için herhangi bir güneş kontrol önlemine gerek kalmayıp, doğal renkli cam kullanılmıştır. Bu durumda cephe birimlerinin açılma pozisyonlarında iken iç mekanların doğal olarak aydınlatılmasını mümkün kılmıştır.

Doğudan batıya güneyi tarayarak uygulanan bu sistem sayesinde yapının güneş enerjisi kazancının %50' den daha fazlasının azaltılması ve iç mekanları soğutma

enerji ihtiyacının azaltılması beklenmektedir. Yapı bu enerji kazanımları açısından hedefine ulaşmış iken, cephede PV malzeme kullanımının olmaması yönünden kazanılan enerji kazanımı potansiyelinin altında kalmaktadır.

Cephe strüktürü, yapıdan dışa doğru uzanan yaklaşık iki metre uzunluğundaki uzantılar ile yapıya sabitlenmektedir. Yapı 145 metrelik bir yüksek yapı olduğundan ve rüzgar vb. iklimsel koşullar düşünüldüğünde cephe strüktürünün etkinliğinin deneysel olarak ispatlanması gerekmektedir. Teorik olarak, böyle yüksek bir yapının yaklaşık iki metre dışında kurulan yapıdan bağımsız bir cephe sisteminin strüktürel etkinliğinin zayıf olduğu ve yükseklik arttıkça daha zayıfladığı söylenebilir.

Cephe sistemi birimlerinin güneşi izlemesi, kapalı döngülü bir sistem olan ışığa duyarlı sensörler tarafından sağlanmaktadır. Diğer izleme sistemlerine göre bu izleme sisteminde ayarlanabilir yüksek hassasiyetli sensörler sayesinde birimlerin güneş hareketine tepki oluşturma süresi daha kısa olup, uyarlanma düzeyini olumlu etkilemektedir.

Cephe sisteminin kurulum maliyeti yüksek olurken, yaşam dönemi maliyetini azaltmaya yönelik bakımı kolay olan membran kaplamaların tercih edildiği söylenebilir. Ancak, sensörlü izleme sistemi tercih edilmesi ve sensörlerin atmosferik koşullara maruz kalması ile sensör yüzeyleri kirlenmekte ve daha sık bakım gerektirmektedir. Aksi takdirde sensörler işlevini tam performans ile yerine getiremeyecek ve uyarlanma düzeyi düşecektir.

#### **4.5 IBA Soft House ( Hamburg, Germany, 2013)**

Uluslararası BauAustellung (IBA), (Hamburg' daki yapı fuarı) için Kennedy&Violich mimarlık firması tarafından tasarlanan Soft House, üç katlı, dört adet sıralı konut birimlerinden oluşmaktadır. Yapının tasarımında bölgenin yerel malzemesi olan yumuşak ahşap ladin ağaç kullanılmıştır. Yapı strüktürü, yapı ömrünü tamamladığında tamamen geri dönüştürülebilir. Yapı, tamamen ahşap bir yapıya sahip olup, uygulanmasında tutkal veya çivi kullanılmadan ahşap parçalar birbirleri ile birleştirilmiştir. Yapının esas özelliği, güney cephesinde esnek, bükülebilir PV modüllerin entegre edildiği tekstil membranlardan oluşturulan güneşe uyarlanabilen bir sistemin tasarlanmış olmasıdır (Şekil 4.14), (Orhon, 2016; Url-19; Url-20).





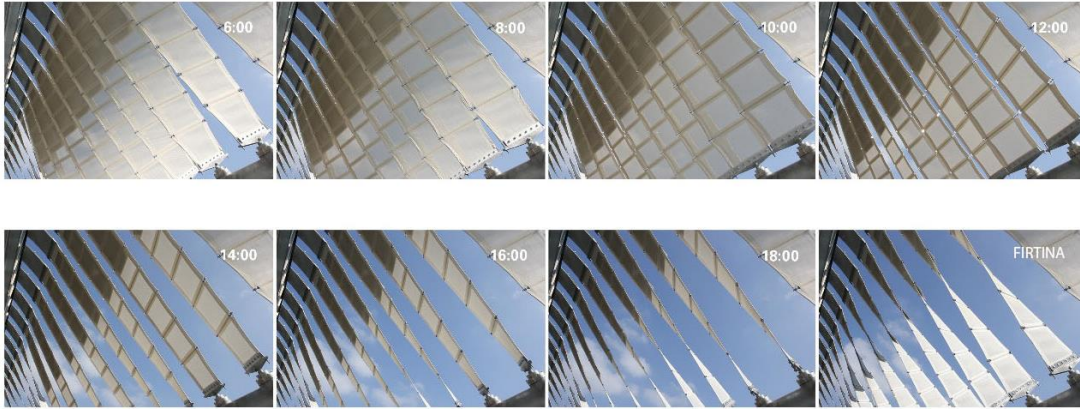
**Şekil 4.14** IBA Soft House görünümü (Url-21).

Elektrik üretimi, güneş kazancı, gölgeleme gibi çeşitli fonksiyonları yerine getirmesi için birbirlerinden bağımsız bir biçimde güneşi izleme odaklı çalışan tekstil membran şeritler DC motorlar kullanılarak bükülebilmekte ve yükseltilebilmektedir. Bu sistem yapı ölçeğinde hayata geçirilmeden önce büyük ölçekli bir fiziksel modelde tekstil membranların bükülme değerlendirmesi Soft House yapı mühendisi olan Jan Knippers tarafından gerçekleştirilmiştir. Şeritlerin bükülme, yükselme hareketleri sayesinde iki eksenli olarak çalışabildiği öngörülmüştür (Şekil 4.15).

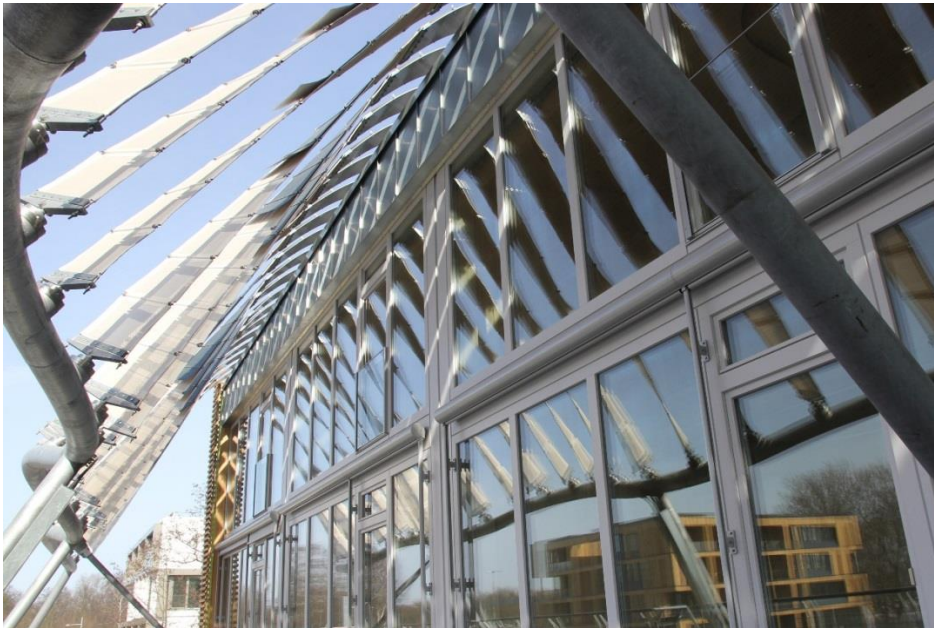


**Şekil 4.15** Tekstil membranların model üzerinden büküm değerlendirmesi (Url-20).

Cephe, gün boyunca güneşi izlemektedir. Şekil 4.16’ da gün boyunca belli saatlerde tekstil membran şeritlerin pozisyonları görülmektedir (Şekil 4.16). Tekstil membranlara entegre edilmiş esnek PV modüller, çatıda bulunan güneşin mevsimlik hareketine uyarlanabilen cam elyafı takviyeli esnek levhalara kadar uzanarak montajlanmıştır. Çatı ile bütünleşik tasarlanan güneşe uyarlı PV sistem, çatı ve cephede bir bütün halinde çalışmasını sürdürmektedir. PV modüllü tekstil membran şeritler, yaz aylarında cephede gölgeleme işlevi kazanmakta iken kış aylarında doğal gün ışığı ile iç mekanları doğal aydınlatmaya olanak sağlamaktadır. Ayrıca, yapı iç mekan ile dışarıyı arasındaki ilişkiyi başka bir deyişle kullanıcı görsel konforunu optimum düzeyde sağlamaktadır (Şekil 4.17), (Orhon, 2016 ; Url-21 ; Url-22).



**Şekil 4.16** Tekstil membran şeritlerin günün belli saatlerinde pozisyonları (Url-21).

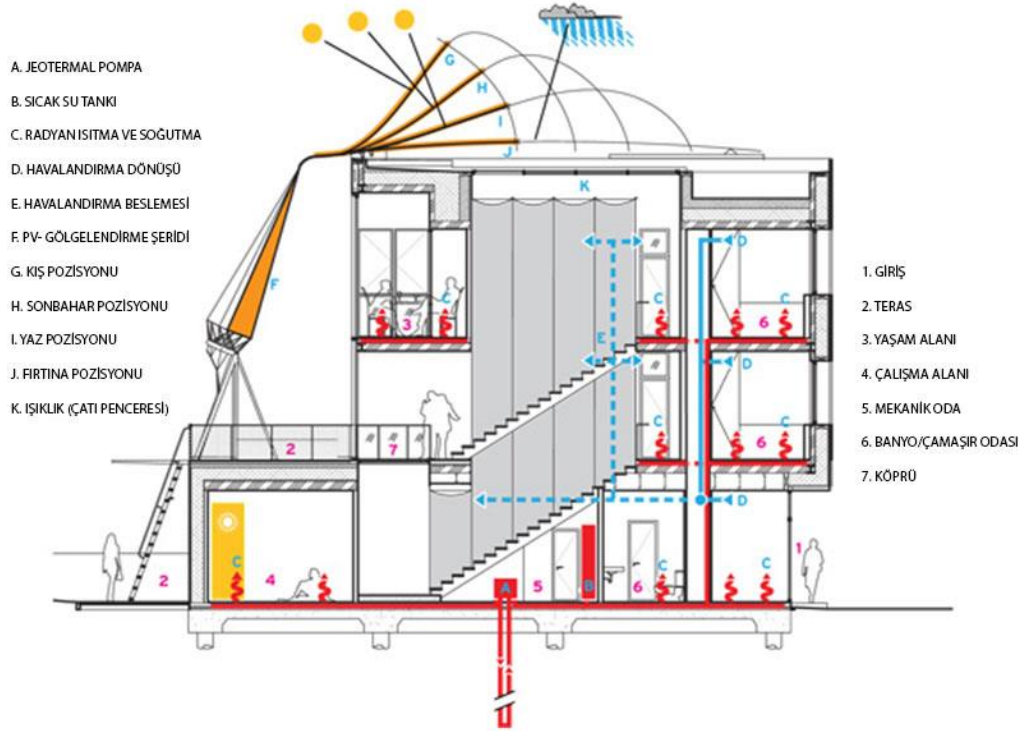


**Şekil 4.17** Tekstil membran şeritlerin bağlı olduğu DC motoru ile güneşe uyarlanabilir durumu (Url-21).



IBA Soft House' da güneşe uyarlanabilir PV sistem ile üretilen temiz enerji, akıllı bina yönetim sistemi tarafından denetlenmektedir. Akıllı bina yönetim sistemi, bir DC düşük gerilim şebekesini kullanarak zemin suyu pompalaması ve enerji tasarruflu LED aydınlatmaya enerji sağlamaktadır (Url-21).

Soft House için güneşe uyarlanabilir PV sistem strüktürü, PV modülün esnek, bükülebilir olması düşünülerek tasarlanmış ve uygulanmıştır. Esnek PV modüllü fotovoltaik sistemin kullanımı sayesinde yapı cephesi, günlük ortalama 9600 watt x 7 saat enerji üretim kapasitesine yıllık ise 24.000 kWh' in üzerinde bir enerji üretim kapasitesine sahip olmuştur. Esnek PV malzemelerin daha geniş açılar aralığında güneşi izleyebilmesi, kısmen güneşli veya bulutlu günlerde daha fazla enerji üretimine olanak sağlamıştır. Ayrıca sistemde, güneşin günlük doğudan batıya gerçekleşen hareketini izlemeye ilave olarak mevsimsel ayarlamalar yapıldığında PV sistemin verimliliği %15 oranında artırılmaktadır (Şekil 4.18), (Url-20).



Şekil 4.18 Sistem bileşenleri (Url-19).

Yapının güney cephesi için tasarlanan fotovoltaik modüllerin entegre edildiği ışığı geçiren tekstil membran şeritler, iç mekanlara gün ışığı sağlayarak doğal aydınlatmaya olanak sağlamaktadır. Aynı zamanda yaz aylarında güneş kontrolü sağlayan eleman niteliği taşıyarak kullanıcı görsel konforunu optimum düzeyde sağlamaktadır.

Cephe, elektrik üretmekte ve üretilen bu enerji akıllı bina yönetim sistemi tarafından denetlenerek yapıda bir çok kullanım için enerji sağlamaktadır. Enerji tüketimi de denetim sistemi sayesinde kontrollü biçimde gerçekleşmekte ve bu durum yapının enerji kazancını doğrudan etkilemektedir.

Güneşe uyarlanabilen PV modüllü tekstil membranlar, metal bir strüktür ile yapıya ve zemine sabitlenmektedir. Ayrıca, sistem çatıya kadar uzanarak montajlanmaktadır. Çatı ile bütünleşik bir biçimde çalışmasını sürdürmektedir. Rüzgar vb. atmosferik koşullar altında sistem strüktürü etkinliğinin, teorik olarak zemin tarafından da desteklendiği için yeterli olduğu söylenebilir. Sistemin bükülme değerlendirmesi büyük ölçekli bir fiziksel modelde gerçekleştirilmiş olup, yapı ölçeğinde uygulanması uygun bulunmuştur.

Tekstil membranlara entegre biçimde fotovoltaik malzeme olarak ince film güneş hücreleri kullanılmaktadır. İnce filmler, esnek yapısı, serbest olarak bükülebilir özellikleri ile silikon esaslı fotovoltaik panellere göre bu yapıda olduğu gibi daha fazla kullanım biçimine sahiptir. Ayrıca, malzeme hafif olduğundan sistem ve yapı yükünü azaltmaya destek olmaktadır.

Sistemde fotovoltaik modüllü tekstil membranların her birinin güneşi takip etme hareketi, ayrı ayrı motorlar tarafından enerji sağlanarak gerçekleştirilmektedir. Pasif olarak güneşi izleyen bir sisteme göre enerji tüketiminin daha fazla olduğu açık bir durumdur. Ancak, fotovoltaik malzeme ve tekstil membranların esnekliği sayesinde sistem güneşi daha geniş açılarda izleyebilmektedir. Bu durum, bulutlu veya kısmen güneşli günlerde bile sistemin enerji üretmeye devam etmesini sağlamaktadır. Dolayısıyla klasik biçimde tek eksenle güneş takibi yapan bir sisteme göre daha fazla güneş enerjisi dönüştürerek maliyeti azaltmaya katkı sağlamaktadır. Başka bir konu ise fotovoltaik ince film yüzeylerinin açıkta olduğundan atmosferik koşullara maruz kalmasıdır. Bu durum kirlilik sorunu doğurmakta ve daha sık bakım, temizlik gerektirmektedir. Aksi takdirde fotovoltaik filmler, güneş ışınlarını tam performans ile yakalayamamakta ve üretim verimi düşmektedir.

Tekstil membran ve ince filmlerin bükülebilme özelliği sayesinde fotovoltaik yüzey alanının etkinlik düzeyinin bulutlu günlerde bile verim sağlanan durumda olduğu söylenebilir. Tek eksenle güneşi izleyen klasik bir sisteme göre zaten daha fazla etkin

fotovoltaik yüzeye sahip olduğu açıktır. Ancak, iki eksenli olarak güneşi izleyen bir sistem ile kıyaslandığında etkin fotovoltaik yüzey alanı daha azdır.

Fotovoltaik filmlikli tekstil membran şeritler, doğu batı yönünde tek eksenli olarak bükülme hareketi gerçekleştirmektedir. Buna ilave olarak çatıya doğru yükselme hareketi de gerçekleştirdiğinden iki eksenli bir sisteme yakın düzeyde çalışabildiği söylenebilmektedir. Bu bağlamda güneşe uyarlama düzeyi tek eksenli bir sistemden daha yüksek olarak değerlendirilebilir.

#### 4.6 Henning Larsen's University Building (Kolding, Denmark, 2014)

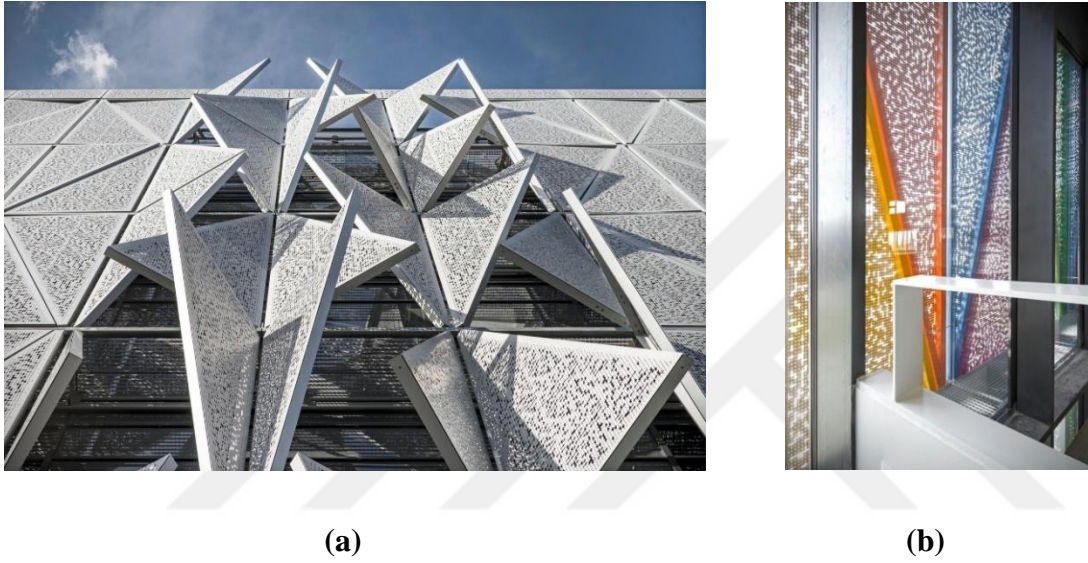
Henning Larsen Architects tarafından inşa edilen Henning Larsen's Üniversite binası, değişken sıcaklık ve gün ışığına uyarlabilir olarak hareket eden bir dinamik cepheye sahiptir. Gün ışığı ve iklimsel koşullar gün ve yıl boyunca değişmektedir. Buna bağlı olarak sıcaklık değerleri de sürekli olarak değişkenlik göstermektedir. Yapı cephesinde uygulanan bu sıcaklık ve gün ışığına uyarlabilir dinamik sistem ile iç mekanda en uygun gün ışığını ve iç mekan kullanıcı konforunu yakalamak hedeflenmiştir (Şekil 4.19), (Nady, 2017; Url-23).



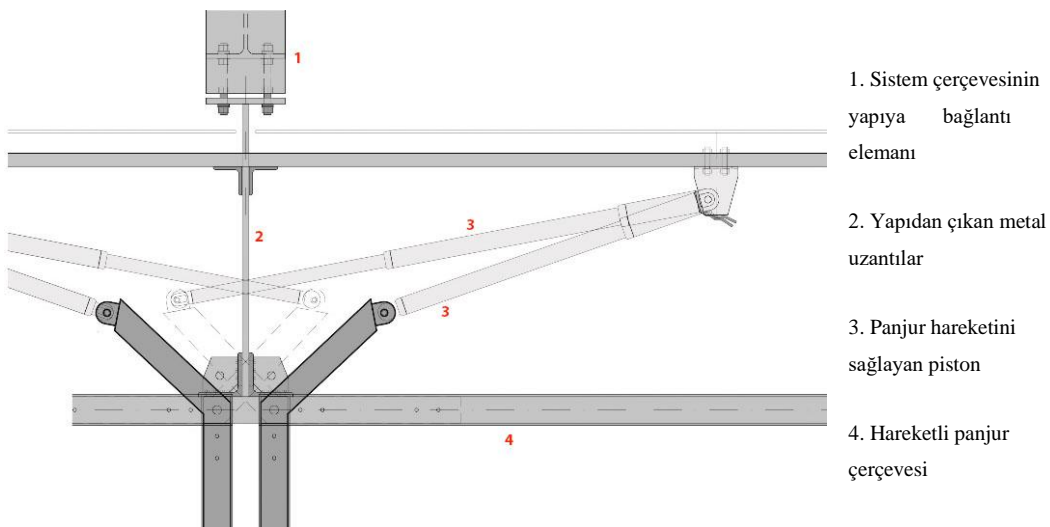
Şekil 4.19 Henning Larsen's Üniversite binası genel görünümü (Url-24).

Cephede uygulanan teknik ve mekanik anlamda güneş kırıcı olarak nitelendirilebilen bu sistem yaklaşık 1600 adet üçgen delikli çelik panjurdan oluşmaktadır. Panjurların delikli olarak tasarlanması, içeri alınmak istenen ışık miktarı ile enerji arasındaki optimum dengenin korunmasını sağlarken, iç mekanda ışık oyunları ile dinamik bir etki oluşturmuştur. Ayrıca panjurların bazılarının renkli olması da tamamen mimari tasarım gereği olarak düşünülmüştür. Üçgen biçimli delikli çelik panjurların dışarıdan

ve içeriden görünümü Şekil 4.20' de verilmektedir (Şekil 4.20). Şekil 4.20' de görüldüğü gibi panjurlar yarı açık veya tamamen açık olduklarında cepheden çıkıntı yapmaktadırlar. Bu çelik panjurlar, değişen gün ışığına uyarlanabilecek ve iç mekanda istenen ışık akısı miktarının sağlanması için hareket edebilecek şekilde yapı strüktürüne monte edilmektedir (Şekil 4.21, 4.22). Sistemde uyarlanabilir harekete imkan sağlayan ışık ve ısı seviyelerini sürekli olarak ölçen sensörler bu panjurlara monte edilmektedir. Ayrıca, panjur hareketi her panjur için küçük bir motor aracılığıyla mekanik olarak sağlanmaktadır (Nady, 2017; Url-23; Url-24; Url-25).

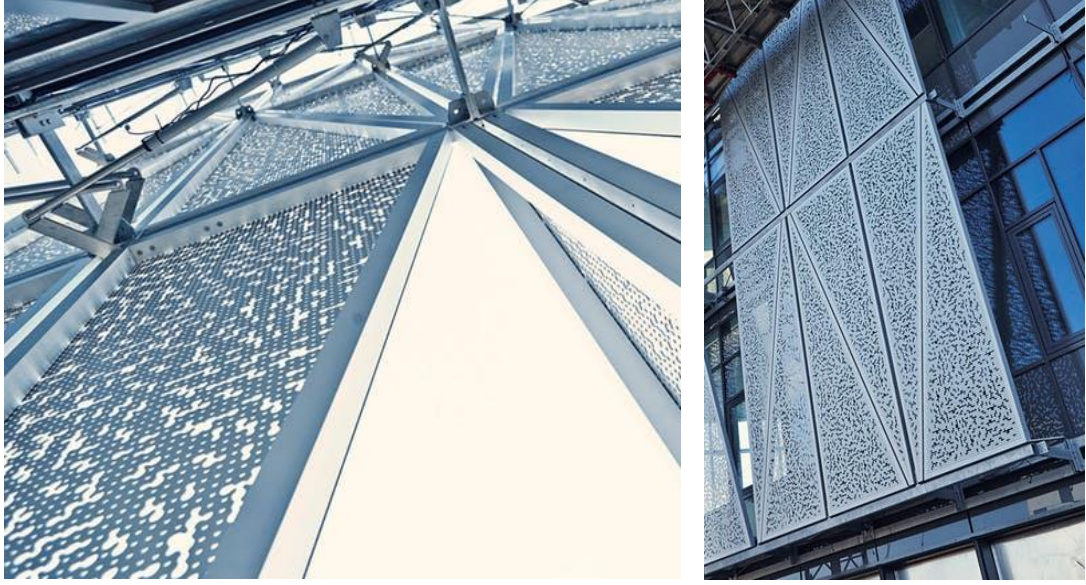


**Şekil 4.20** Açılıp kapanarak güneş kontrolü sağlayan üçgen biçimli delikli panjurların (a) dışarıdan görünümü, (b) içeriden görünümü (Url-23).



**Şekil 4.21** Henning Larsen's Üniversite binası güneşe uyarlanabilir panjur mekanizması plan detayı (Url-26).





**Şekil 4.22** Henning Larsen’s Üniversite binası güneşe uyarlanabilir panjur mekanizması iç konstrüksiyonu (Url-26).

Yapı cephesi ışık ve ısıya uyarlı olarak çalışmaktadır. Ancak, enerji üretimi gerçekleştiren fotovoltaik hücreler cephe tasarımında düşünülmemiştir. Yapının çatısına yerleştirilen fotovoltaikler ve güneş enerjili ısıtma panelleri ile şebekeden alınan enerji miktarı önemli ölçüde azaltılmıştır. Henning Larsen’s Üniversite binasının enerji tüketiminin çok düşük olduğu ispatlanmış ve entegre cephe sistemi ile birlikte Danimarka ve Dünyada ilk düşük enerjili üniversite kampüsü olmaktadır. Yapının aydınlatma, ısıtma, soğutma ve havalandırma için enerji tüketimi cephe önlemlerine ek olarak pasif önlemlerle de en aza indirilmiştir. Örneğin, termik ısı kazancından yararlanmak için iç mekanda beton plakalar açıkta bırakılmıştır. Havalandırma sistemi, geleneksel kanallar yerine enerji maliyetlerini düşüren tavan düzlemlerine entegre edilmiştir. Benzer ölçekli yapı örneklerindeki enerji tüketiminin %20-25'ine eşdeğer olan yaklaşık yıllık olarak 48 kWh / m<sup>2</sup> enerji tüketimi ölçülmüştür (Url-24; Url-25).

Cephedeki üçgen biçimli delikli panjurlar, güneş ışığına göre uyarlanarak açılıp kapanma hareketi gerçekleştirmektedir. Isı ve ışık duyarlı sensörlerle bilgisi iletilen iç mekanın doğal ışık ihtiyacı, panjurların açılma hareketi karşılanmaktadır. Isı ve ışık kazancının azaltılması gerektiğinde ise panjurlar kapalı konuma doğru harekete başlayacaktır. Ayrıca, tasarlanan panjur delikleri de güneş kontrolüne destek sağlamaktadır. Yapının enerji tüketimi, yapı genelinde düşünüldüğünde cephe önlemlerine ek olarak pasif önlemlerle de en aza indirilmiştir. Ancak, yalnızca cephe

sistemi değerlendirildiğinde enerji üretimi gerçekleştiren fotovoltaik hücrelerin entegre edilmeyişi, enerji kazancı bakımından olumsuz bir etki yaratmaktadır.

Cephe strüktürü, yapıdan dışa doğru uzanan kısa uzantılar ile yapıya sabitlenmekte ve panjurlar dışarı doğru açılma hareketi gerçekleştirmektedir. Rüzgar vb. iklimsel koşullar düşünüldüğünde cephe strüktürünün etkinliğinin deneysel olarak ispatlanması gerekmektedir. Teorik olarak, bağlantı elemanları ile yapıya entegre edilmiş bağımsız bir cephe sisteminin strüktürel etkinliğinin çok yüksek olmadığı söylenebilir. Ancak, yapıdan dışarı yöne olan çıkıntının miktarı az olduğundan panjur sisteminin konsol etkisi yaratmadığı belirtilebilir.

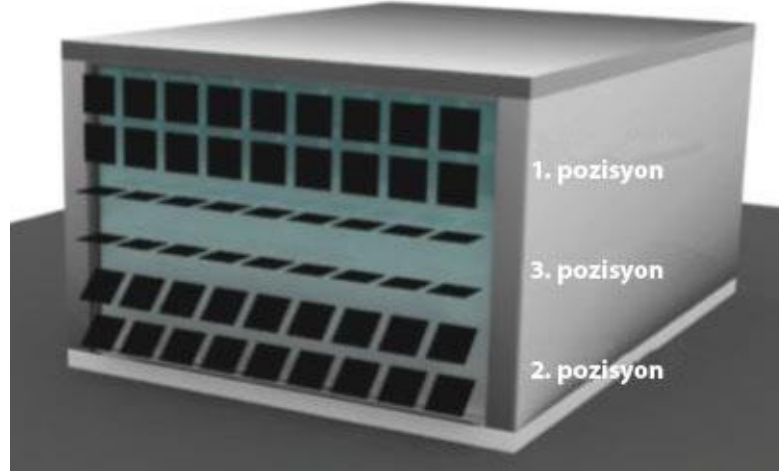
Sistemde panjurlara monte edilen ışık ve ısı seviyelerini sürekli olarak ölçen sensörler, atmosferik koşullara maruz kaldığından kirlilik sorunu ile karşı karşıyadır. Cephe sisteminin kurulum maliyetine ek olarak, yaşam dönemi maliyeti de bakım masraflarından kaynaklı yükselebilmektedir.

Panjurların güneşe uyarlanabilir hareketi, kapalı döngülü bir sistem olarak değerlendirilebilecek ısı ve ışığa duyarlı sensörler tarafından sağlanmaktadır. Ayarlanabilir yüksek hassasiyetli sensörler sayesinde panjurların güneş hareketine tepki oluşturma süresi daha kısa olup, uyarlanma düzeyi olumlu etkilenmektedir.

#### **4.7 The House of Natural Resources (Zurich, Switzerland, 2015)**

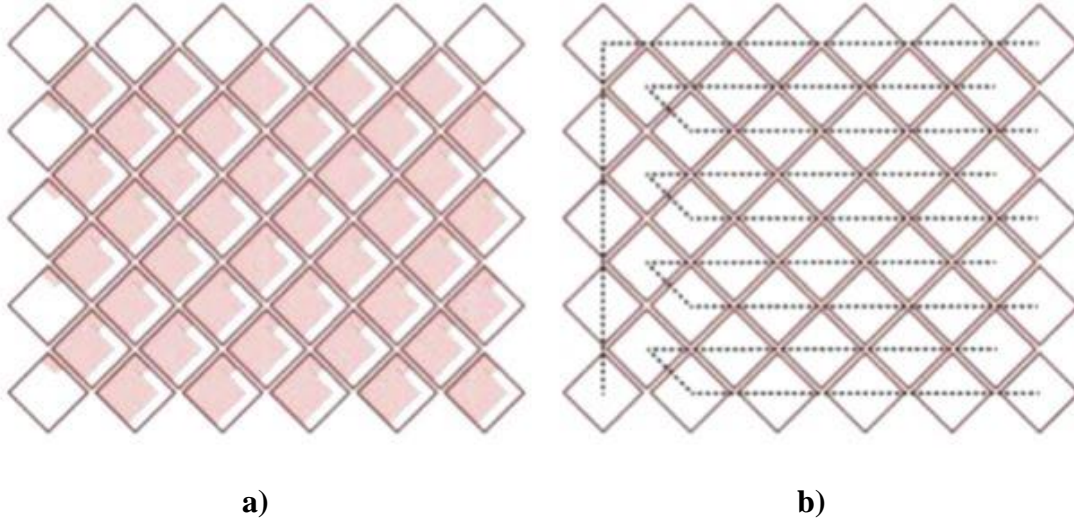
The House of Natural Resources binasında, modüler yaklaşımlı güneşe uyarlanabilir fotovoltaik cephe, uygulanmadan önce bazı analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler, bu yapının güney cephesinde yer alan bir ofis bölümü için yapılmıştır. Güneşe uyarlanabilir fotovoltaik cephenin uygulanabilirliğini analiz etmek için Rhinoceros 3D yazılımı ve onun Grasshopper pluginleri kullanılarak 2 simülasyon ortamı yaratılmıştır. Bu simülasyonlarda kullanılmak üzere cephenin basit bir tasarım modeli oluşturulmuştur. Birinci simülasyon ortamında, cephe modelinin ısıtma, soğutma ve elektrik enerjisi talebine etkisi incelenmiştir. İkinci simülasyon ortamı ise yıl boyunca güneşten elektrik üretimini analiz etmek için hazırlanmıştır. İkinci ortamda daha detaylandırılmış bir cephe tasarım modeli kullanılmıştır. Bu simülasyon analizi için kullanılan yapı modeli Şekil 4.23' de görülmektedir (Şekil 4.23), (Nagy vd., 2016).





**Şekil 4.23** Simülasyon modeli (Nagy vd., 2016).

Şekil 4.23’ de görülen modelde cephe modülleri, 40x40 cm olarak tasarlanmış olup, modüller üç bant halinde gruplanmıştır. Birinci gruptaki modüller, tamamen kapalı pozisyonda ( $0^\circ$ ), ikinci gruptaki modüller yatayla  $45^\circ$  lik açı yapacak pozisyonda ve üçüncü gruptaki modüller tamamen açık pozisyonda ( $90^\circ$ ) düşünülmüştür. Tüm modüller  $+90^\circ$ ’ den  $-90^\circ$ ’ ye kadar  $15^\circ$ ’lik adımlarla hareket edebilmektedir. Bu şekilde güneşe uyarlanabilir fotovoltaik cephenin 324 adet mümkün modül konfigürasyonu sonuçlarının her biri, bir yıllık periyotta saatlik zaman adımlarıyla tek bölgesel termal analizleri Energy Plus simülasyon programında gerçekleştirilmiştir. Bu aşamadan sonra, sonuçlar yılın her bir saati için en uygun konfigürasyonu belirlemek amacıyla MATLAB programında üretilmiştir (Nagy vd., 2016). Simülasyonlarda hafif, ince film CIGS PV modüller kullanılmıştır. Sistem konfigürasyonunu en uygun hale getirerek elektrik üretimini hesaplamak için 3D gölgeleme hesabı ve elektriksel modeli birleştiren entegre bir çerçeve geliştirilmiştir. İlk aşamada, uyarlanabilir PV modüllerin bir düzeninde cephenin dışarıdan görünümü ve modüllerin birbirini gölgelendirmesi simüle edilmiştir. Sonuçlar alınarak çeşitli modül ve cephe geometrileri değerlendirilmiştir. Değerlendirilen sonuçlardan biri, Şekil 4.24’ de görülmektedir. Şekil 4.24 (a)’ da özel bir güneş pozisyonu için modüllerin birbirini gölgeleme durumu gösterilmektedir. Hesaplama metodunu doğrulamak için ise aynı gölgeleme deseni LuxRender ile üretilen bir render karşılaştırılmaktadır. Bu sistem için gölgeleme deseninin bilinmesi, elektriksel sistem dışında modüllerin verimli bağlantıları için de önem taşımaktadır. Gölgeleme deseni düşünülerek mümkün bir bağlantı düzeni Şekil 4.24 (b)’ de görülmektedir (Şekil 4.24), (Nagy vd., 2016).



**Şekil 4.24 (a)** Özel bir güneş pozisyonu için gölgeleme deseni, **(b)** Mümkün modül dizisi bağlantısı (Nagy vd., 2016).

Analizde, ısıtma, soğutma ve aydınlatma için simüle edilen net enerji talebi, Switzerland ofisleri için dönüştürülmüştür. Ofis sıcaklığının düzenlenmesi için performans katsayısı 5 olan bir ısı pompası varsayılmıştır. Ofis havalandırması için gelen ilçe suyu kullanılmıştır. Bu yüzden, yalnızca pompalanan elektrik hesaba katılmıştır. Odanın 113 Watt'lık Led ile aydınlatıldığı varsayılmıştır. Bu simüle edilen güneşe uyarlanabilir fotovoltaik cephe için enerji tüketimi ve tasarrufu açısından elde edilen sonuçlar, iki referans düzenleme ile kıyaslanmıştır. Birinci referans durum (gölgesiz) hiçbir panjurun kullanılmadığı durum iken ikinci referans durum  $45^\circ$ 'ye sabitlenmiş panjurlu düzendir. Net enerji talebi ve toplam elektrik talebi için sonuçlar, sırasıyla Çizelge 4.2 ve 4.3' de verilmiştir (Nagy vd., 2016).

**Çizelge 4.2** Simülasyon sonuçları: net enerji talebi (Nagy vd., 2016).

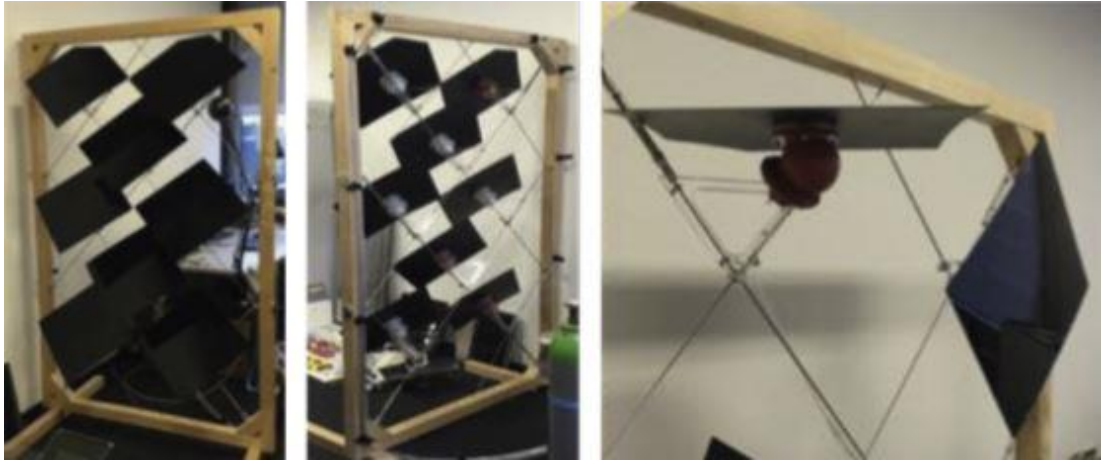
	1. Durum Panjursuz	2. Durum $45^\circ$ açılı sabit panjurlu	En Uygun Simülasyon Modeli	1. durumla kıyaslama (%)	2. durumla kıyaslama (%)
Isıtma (GJ)	4,64	5,29	4,70	-1	11
Aydınlatma (GJ)	1,56	1,65	1,60	-3	3
Soğutma (GJ)	13,5	4,53	2,39	82	47
Toplam (GJ)	19,7	11,5	8,69	56	24

**Çizelge 4.3** Simülasyon sonuçları: toplam elektrik talebi (Nagy vd., 2016).

	45° açılı sabit panjurlu	En Uygun Simülasyon Modeli	Kıyaslama (gerçek değer)	Kıyaslama (%)
Isıtma (kW/h)	301,2	267,4	33,0	11
Led aydınlatma (kW/h)	124,9	121,1	3,78	22
Isı pompası (kW/h)	4,17	3,24	0,9	3
Toplam (kW/h)	430	391,8	38,4	8,9

Yukarıda detaylı olarak anlatılan simülasyon çalışmaları sonucunda PV sistem bileşenleri, yapıya entegrasyonu, sistemin elektrik üretim potansiyeli hakkında bilgi edinilmiştir. Bu aşamadan sonra ilk prototipin üretimi gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4.25’ de gösterilen ilk prototip çalışması için ahşap bir çerçevede sekiz adet modül kullanılmıştır. Bu prototip ile iki eksenli, yumuşak pnömatik aktüatörlerin fonksiyonunun test edilmesi de amaçlanmıştır. Aktüatörler, bu prototipte  $\pm 40^\circ$  lik açılar arasında  $2^\circ$  lik adımlar ile dönebilmektedir (Şekil 4.25), (Nagy vd., 2016).



**Şekil 4.25** (a) Ön görünüş, (b) kablo ağ ve aktüatörlerin arka görünüşü, (c) açık ve kapalı konfigürasyonlar (Nagy vd., 2016).

Güneş uyarlanabilir fotovoltaik sistemler, tek başına bir sistem olarak kalmayıp olması gerektiği gibi bina sisteminin ayrılmaz bir bileşeni olarak kabul edilmiştir. Çünkü, bu sistemin verimliliği, aydınlatma, ısıtma ve soğutma gibi diğer yapı teknolojileri ile etkileşimine bağlı olmaktadır. Örneğin, güneş radyasyonu, iç mekanı ısıtma için

kullanılabilmekte veya modüllerin bazıları mekana alınan dolaylı ışığın tavandan yansıtılmasını sağlayarak yapay aydınlatma ihtiyacını azaltabilmektedir. Uyarlanabilir fotovoltaik sistemi cepheye entegre durumda gerçek fiziksel koşullar altında incelemek için, 2015 yılında İsviçre Federal Teknoloji Enstitüsü (ETH) Hönggerberg kampüsünde bulunan ofis binası işlevli Doğal Kaynaklar Evi güney cephesinde ilk prototip uygulaması gerçekleştirilmiştir. Hem enerjinin etkin kullanımına hem de kullanıcı konforuna odaklanan prototipin değerlendirilmesi yalnızca iç mekandaki sensörlere (sıcaklık, hava nemi, ışık) değil aynı zamanda kullanıcı memnuniyetini değerlendirmek için yapılan düzenli anketlere de dayanmaktadır (Şekil 4.26), (Svetozarevic vd., 2016 ; Orhon, 2016; Url-27).



**Şekil 4.26** Doğal kaynaklar evi güney cephe genel görünümü (Url-27).

Yapı, sürdürülebilir ahşap yapılar ve yenilikçi cepheler için bir araştırma laboratuvarı olarak hizmet vermektedir. Bu yapının güney cephesinde uygulanan uyarlanabilir fotovoltaik cephe, birbirlerinden bağımsız hareket eden modüllerden oluşmaktadır. Modüller, yapı cephesinde taşıyıcı bir kablo ağına montajlanmıştır. PV modül için yüksek verimli bakır indiyum galyum selenit (CIGS) ince film güneş pilleri tercih edilmiştir. Elektrik üretimini gerçekleştiren bu PV modüller, pnömatik kontrollü aktüatörler aracılığıyla hareket ettirilmektedir. Modüllerin farklı pozisyonları, sensörlerle kontrol edilmektedir. Bu sistem ayrıca, cepheden gelen güneş ışınım miktarını ayarlayarak iç mekan doğal aydınlatmasını ve ısını kontrol etmeye yardımcı olmaktadır. Bu durumlara ilave olarak panellerin hareketiyle sıcak aylarda gölgeleme ve doğal havalandırma olanağı sağlanmaktadır. Soğuk aylarda ise paneller

daha çok kapalı konumdayken su ve hava geçirmez bir dış kabuk oluşturmaktadır (Svetozarevic vd., 2016 ; Orhon, 2016).

Güneşe uyarlanabilir fotovoltaik sistemin entegre edildiği bu cephede 50 adet bireysel modülden oluşan 3.9\*3.2 m boyutlarında bir çerçeve sistem uygulanmıştır. 50 adet modül, 50 ayrı yumuşak robotik güneş takipçisi tarafından çalıştırılmıştır. Termal konfor, ısı, nem ve aydınlatma sensörleri de ofis içinde düşünülmüştür. Her bir PV modülün toplam ağırlığı, konsol taşıyıcı ve güneş izleyici dahil olmak üzere yaklaşık 0,8 kg' dır. Sistem çok hafif olduğu için bu yapıda olduğu gibi mevcut binalar dahil hemen hemen her yere montaj için uygun olan bir çözümdür. Bu yapıda PV modüller, yapının tasarımını takiben kare geometrili olarak uygulanmıştır ( Svetozarevic vd., 2016 ; Orhon, 2016 ; Nagy vd., 2016).

Yapının güney cephesi için tasarlanan uyarlanabilir fotovoltaik modüllü sistem, iç mekanda bulunan sıcaklık, nem, ısı gibi faktörleri ölçen sensörlere göre iç mekanlara gün ışığı sağlayarak doğal aydınlatmaya olanak sağlamakta ve iç mekan ısınısını kontrol etmektedir. Bu bağlamda güneş kontrolü ve doğal aydınlatma kriterinin konfor koşullarını sağlayacak düzeyde karşılandığı söylenebilir.

Yapıda uygulanan uyarlanabilir güneş cephesi iki ekseninde hareket ettirilen modüllerden meydana geldiği için ürettiği enerji miktarı yüksek olacaktır. Çünkü güneşi daha geniş açılarda ve farklı yönlerde tarayarak daha fazla etkin fotovoltaik yüzey alanına sahip olacaktır. Bu duruma ilave olarak sistemin diğer yapı teknolojileri ile etkileşime girmesi sonucunda enerji tüketimi de azalacaktır. Sistem yapı ölçeğinde bahsedilen bu şartlarda değerlendirilirse enerji kazancı açısından en olumlu örnek sistem olarak değerlendirilebilir.

Daha önce 3.4 Güneşe Uyarlanabilir Fotovoltaik Sistem Bileşenleri bölümünde Çizelge 3.3' de verilen ayrıntılı bilgilere göre çerçeve ve kablo ağ yaklaşık olarak panel başına 500 N' luk bir rüzgar yüküne dayanabilecek şekilde tasarlanmıştır. Çerçeve ise bu yapıda doğrudan yapı strüktürü ile bütünleşik durumdadır. Sistemin avantajlarından biri de hafif olmasıdır. Bu bilgilere göre sistemin strüktürel etkinliği teorik olarak iyi düzeyde değerlendirilebilir.

Fotovoltaik hücre malzemesi olarak ince film teknolojilerinden en verimli olan bakır indiyum galyum diselenid (CIGS) filmler kullanılmıştır. Sıcak ve nemli koşullarda yalıtım önlemi alınmaması durumunda kararlılık sorunları ortaya çıkması dezavantajlı



bir durumdur. Ayrıca, üretim maliyetlerinin amorf silisyum hücelere göre yüksek olması da maliyet açısından dezavantajlarından biridir.

Sistemde açıkta bulunan ışığa duyarlı sensörler ve panel yüzeyleri doğrudan atmosferik koşullara maruz kaldığından kirlilik sorunu ile karşı karşıyadır. Bu durum daha sık aralıklarla bakım gerektirerek yaşam dönemi maliyetini yükseltecektir.

Sistemde birbirinden bağımsız çalışan paneller iki eksenle hareket etmekte ve panellerin birbirlerini gölgeleme durumu hesabına göre etkin fotovoltaiik yüzey alanı fazla olacaktır. Bu duruma ek olarak bakır indiyum galyum diselenid (CIGS) hücrelerin yapısındaki bakır indiyum selenyum (CIS) hücrelerin güneş ışığının %99'unu emme potansiyeline sahip olması fotovoltaiik yüzeyinin daha da verimli çalışmasını sağlayacaktır.

Sistemin güneşe uyarlı hareketinin kapalı döngülü bir sistem olan ışığa duyarlı sensörler tarafından sağlanması, iki eksenli güneş takip durumu ve CIGS hücrelerinin varlığı güneşe uyarlanma düzeyini olumlu yönde etkileyen faktörler olacaktır.

## 5. GÜNEŞE UYARLANABİLİR CEPHE SİSTEMLERİ İÇİN DEĞERLENDİRME KRİTERLERİNİN BELİRLENMESİ

### 5.1 Cephe ile ilgili Performans Gereksinimleri

Cepheler, dış ve iç ortamlar arasında hem ayırıcı hem de bağlayıcı olarak işlev görmektedir. Bu bağlamda cephe ile ilgili performans gereksinimlerinin belirlenmesinde çevresel koşulların değişkenliği ve kullanıcı iç mekan konforunun sağlanması esas alınmalıdır. Konvansiyonel bir cepheden beklenebilecek performans gereksinimleri aşağıdaki şekilde listelenmiştir (Url-6), (Gür, 2007):

- Dayanıklı olmalı
- Yükleri aktarmalı
- Rüzgara dayanımlı olmalı
- Yağmura ve kara karşı dayanımlı olmalı
- Yangına karşı dayanımlı olmalı
- Kalıcı olmalı
- Güneş ışınlarını kontrol edebilmeli
- Gün ışığını kontrol edebilmeli
- Parlamayı kontrol edebilmeli
- Enerji etkin olmalı
- Görüşü sağlamalı
- Özel yaşamın görünmezliğini sağlamalı
- Kontrollü doğal havalandırmaya olanak vermeli
- Güvenli hareketli açılımlar sağlamalı
- Hava sızıntısını sınırlandırmalı

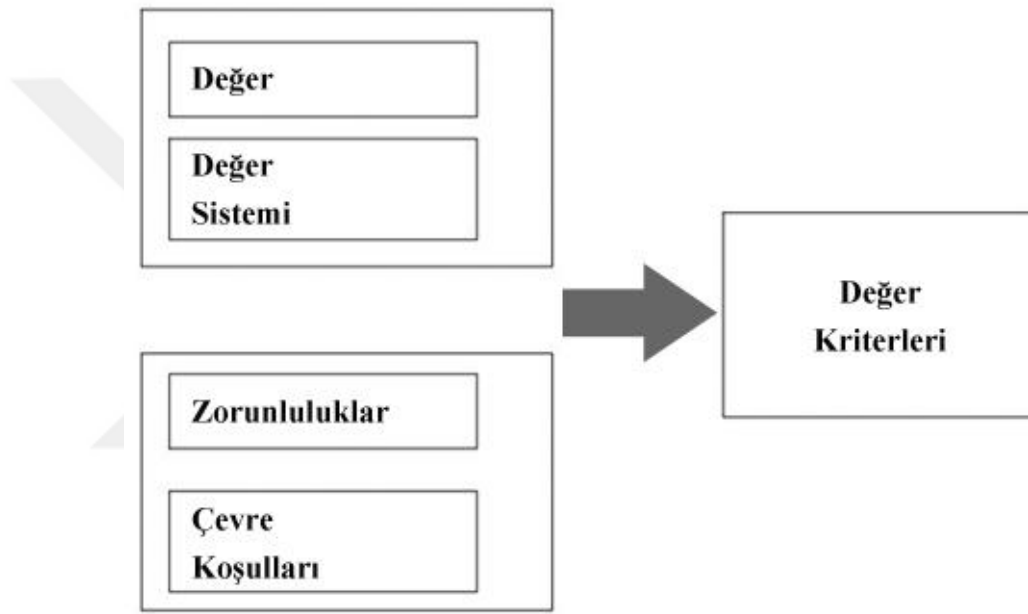
- Isı kayıplarını engellemeli
- Yoğuşmayı ve küf oluşumunu engellemeli
- Nemi kontrol etmeli
- Güvenliği sağlamalı
- Böcek, haşerat vb. girmesini engellemeli
- Bitki mantarlarının biyolojik zararlarını önlemeli
- Ses kontrolü sağlamalı
- Koku ve kir geçişine olanak vermemeli
- Bakım ve onarıma olanak vermeli
- Güzel görünümü olmalı
- Yapılabilirlik, taşıma ve depolama kriterlerini sağlamalı
- İmalat kolaylığı olmalı
- Uygun maliyetli olmalı

Yapı sektörü, dünya ekonomisi için en fazla enerji tüketen sektörlerden biri olmaktadır. Bu sebepten hareketle, yapıların enerji etkin kılınması için cepheler tasarlanırken detaylandırılması gereken veya dahil edilmesi gereken başka gereksinimler de vardır. Bu yüzden cephelerin binanın enerji performansını artırma stratejisi ile tasarlanması önem kazanmıştır. Enerji tüketimini azaltmaya hatta enerji üretmeye yönelik yapı cephesinin çevresi ile etkileşime girmesi gerekmektedir. Yapı cephesinin çevresi ile etkileşime girmesi iklime, güneşe uyarlanarak ondan fayda sağlaması ile gerçekleştirilebilir. Enerji üretimi sağlayan yapı kabuğunda fotovoltaik kullanımı, bu konuda önem kazanmaktadır. Çünkü fotovoltaik paneller, hareketsiz olarak yapıya entegre edilerek tekil bir önlem olarak kalmış ve geliştirilmemiştir. Değişen dış etkilere ve hava koşullarına göre, izleme sistemleri ile bu cephelerin uyarlanabilmesi, enerji verimliliğinde iyileştirmeler yaratılması için gerekli bir adım olmaktadır. Ancak bu şekilde cephenin dinamik dış çevresel koşullara cevap vermesi mümkün olacak ve iç mekan kullanıcı konforu tam anlamıyla sağlanabilecektir (Guzowski, 2017; Nady, 2017).



## 5.2 Cephelerde Güneşe Uyarlanabilir Sistemlere İlişkin Değerlendirme Kriterlerinin Belirlenmesi

Değerlendirme kriterlerinin belirlenmesini etkileyen unsurlardan biri, kişinin veya bir grubun planladığı sistemle ulaşmak istediği ve kendisine ait değerler sisteminin şekillendirdiği amaçtır. Diğeri ise amaca ulaşmakta çevre koşullarının getirdiği zorunluluklardır. Bu durumda ‘kriter’ amaca yönelik bir sistemi belirlemede ‘çevre verileri’ ve ‘amaç’ arasındaki ilişki sonucu olarak elde edilen bir ‘değer’ olgusu biçiminde tanımlanabilmektedir (Şekil 5.1), (Sey ve Tapan, 1976, s.27).



Şekil 5.1 Değer kriterlerinin belirlenmesini etkileyen unsurlar (Sey ve Tapan, 1976, s.27).

Güneşe uyarlanabilir cephe sistemlerinin (fotovoltaik sistemin entegre edildiği veya edilmediği) cephe performans gereksinimlerini karşılama düzeyini belirlemeye olanak sağlayan değerlendirme kriterleri şunlar olarak açıklanabilir:

- Güneş kontrolü ve doğal aydınlatma
- Enerji kazancı
- Strüktürel etkinlik
- PV malzemenin elektrik üretim düzeyi
- Yaşam dönemi (kurulum, bakım, onarım) maliyeti

- Etkin PV panel yüzey alanı
- Güneşe uyarlanma düzeyi
- Güneş hareketine tepki oluşturma süresi

### **5.2.1 Güneş kontrolü ve doğal aydınlatma**

Yaz aylarında iç mekanda güneşin etkisini azaltan önlemler alınması gerekirken, kış aylarında tersi önlemler alınmalıdır. Yaz ve kış aylarında yapı içerisine alınması gereken güneş ışınım miktarı, değişeceğinden cephede uygulanacak gölgeleme elemanları tasarımında güneş enerji stratejisi düşünülmelidir. Bu bağlamda cephe güneş kontrol sisteminin güneşe uyarlanabilir olarak tasarlanması çözüm sunmaktadır.

Doğal gün ışığı kullanımı, hem kullanıcı iç mekan konforu hem de yapay ışık gereksinimini azaltma açısından önemli olmaktadır. Doğal ışık, genellikle saydam yüzeyler ile iç mekana alınmaktadır, dolayısıyla cephede kontrollü saydamlık oranının fazla tutulması, gün ışığından maksimum fayda sağlamaya olanak vermektedir. Gün ışığı sistemleri, temel olarak pasif önlemlerle sağlanabilmektedir. Basit bir hareketli ışık rafı, tavanın yansıtıcılığından faydalanıp iç mekanı aydınlatarak, mekanın derinliklerine ışık yayılmasını sağlayabilmektedir (Gür, 2007; Nady, 2017).

Pasif önlemlere ilave olarak, cepheye entegre güneşe uyarlanabilir fotovoltaik sistemin dinamik özelliği sayesinde de saydamlık oranı istenen düzeyde sağlanabilir. Bu sistemlerin güneş kontrolüne gölgeleme elemanı olarak etkisi, gün ışığından faydalanma düzeyi ve kullanıcının görsel konforu sistemin hangi yönde, hangi cephe konfigürasyonlarında tasarlandığı ve güneşi izleme sisteminin niteliği ile ilişkili olmaktadır.

### **5.2.2 Enerji kazancı**

Guzowski, enerjii üzerinde düşünülmesi ve idareli harcanması gereken en önemli ve tek kaynak olarak belirtmiştir (Guzowski, 2017, s.19). Bu durumun ötesinde idareli tüketme fikrinin yerini üretme almış durumdadır. Enerji üreten fotovoltaik sistemlerin cephede rijit uygulamasının geliştirilen güneş izleme mekanizmaları sayesinde dinamik özellik kazanarak daha verimli hale gelmesi mümkün ve açıktır. Sistemin enerji kazancı, güneş izleme metodu, güneş izleme ile aktifleşen PV panel yüzey alanı, PV panel hücre malzemesi ile doğrudan ilişkilidir.

### **5.2.3 Strüktürel etkinlik**

Cephenin yapı strüktürüne entegre edilmesi ve birlikte çalışması önemli bir konudur. Strüktürde oluşabilmesi mümkün olan hareketlere cephe sistemi izin verecek şekilde tasarlanmalıdır. Sıcaklık değişimlerinden kaynaklı yapı elemanındaki ısıl hareketler ve nem değişiminden kaynaklı malzemenin kendisinde meydana gelen boyutsal değişimler için yeterli derzler ve hareket alanı bırakılmalıdır (Gür , 2015; Nady, 2017).

Cephenin yapı strüktürü ile birlikte çalışmasına ek olarak kabuk, değişen dış çevre koşullarına maruz kalmaktadır. Rüzgar yükü vb. dinamik etmenler göz önüne alınarak güneşe uyarlanabilir fotovoltaiik sistem elemanları ve detaylandırması yapılmalıdır.

### **5.2.4 PV malzemenin elektrik üretim düzeyi**

Güneşe uyarlanabilir sistem için panelin hücre malzemesi ve geometrisi, enerji üretimi açısından büyük rol oynamaktadır. Bükülebilir ince film güneş pilleri, çok yönlü hareket kabiliyetine sahip olup daha fazla güneş ışınımı yakalayabilir. Bu durum elektrik üretim düzeyini doğrudan etkiler. Ayrıca, sistemin elektrik üretim verimini fotovoltaiik hücre malzeme verimi de etkiler. Tezin ikinci bölümünde fotovoltaiik hücreler, malzemesine göre sınıflandırılmış ve verimleri ile ilgili detaylı bilgiler verilmiştir.

### **5.2.5 Yaşam dönemi maliyeti**

Güneşe uyarlanabilir PV sistemler, kompleks teknik yapılı olduklarından kurulum maliyetleri yüksektir. Bunun yanında kurulumları zor ve nitelikli eleman gerektirmektedir. Bu yüzden sistem tasarımı, zamanla hasar gören veya niteliğini kaybeden elemanların onarımı veya değişimine izin verecek biçimde yapılmalıdır. Aksi durumda bakım, onarım maliyetleri de yükselebilmektedir. Gür, iyi kalitede, ilk yatırım maliyeti fazla olan, uzun dönemdeki bakım programı iyi yapılmış bir cephe sisteminin, devamlı bakım veya onarım gerektiren ve ilk yatırım maliyeti düşük bir sistemden daha ekonomik ve sorunsuz olduğunu belirtmiştir ( Gür, 2007).

### **5.2.6 Etkin PV panel yüzey alanı**

Güneş sürekli hareket halinde olduğundan hareketsiz bir PV panel, güneş ışınlarını ancak ışınların PV panel yüzeyine dik olarak geldiği anlarda yakalayabilmektedir. Özellikle cephede uygulanan PV sistemlerde güneşten faydalanma düzeyi, çatı

uygulamalarına nazaran daha da düşmektedir. Geliştirilen güneş izleme sistemli PV paneller, bu duruma çözüm olmaktadır. Ancak, PV panelin etkin yüzey alanı da bu sistemlerin enerji performansı açısından önem taşımaktadır. Çünkü PV panel yüzeyinin gölgeleme durumundan kaynaklı etkin alanı azalarak üretim performansı düşmektedir.

### **5.2.7 Güneşe uyarlanma düzeyi**

Yeryüzündeki tüm canlılar yaşamlarını sürdürme ve enerjilerini en verimli şekilde değerlendirme amaçlı değişen ortam koşullarına uyum sağlama eğilimindedirler. Bazı çiçeklerin güneşe doğru yönelmesi, akşam kapanıp sabah açması, cildin sıcak havada terleme sonrası buharlaşma yoluyla soğumaya çalışması vb., durumlar değişen ortam şartlarına uyum sağlamaya örnek oluşturmaktadır (Gür , 2015).

Dünya kendi etrafında ve Güneş etrafında döndüğü için Dünyadan algılanan Güneş'in konumu hiç bir zaman sabit değildir. Sürekli hareket halinde olan Güneşe PV panelin uyarlanma düzeyi, Güneşin konum tespitine ve değişen Güneş konumlarını izlemeye bağlı olmaktadır. Çeşitli güneş izleme sistemlerinde Güneş konumu, farklı yöntemlerle tespit edilmektedir. Bazı sistemlerde matematiksel veriler kullanılarak algoritmalar üzerinden hesaplama yapılırken, bazılarında sensörler aracılığıyla Güneş konum sinyalleri oluşturulmaktadır. Bu konum verilerine bağlı olarak PV sistemde yönelme gerçekleşmektedir. Güneş hareketini takip etme hızı, harekete sistemin tepki oluşturma süresi gibi parametreler de sistemin uyarlanma düzeyini doğrudan etkilemektedir. Bu parametreler, güneş izleme sisteminin çalışma prensibine bağlı olmaktadır. Tezin ikinci bölümünde güneş izleme sistemleri, sınıflandırmaları ve karşılaştırmaları detaylı olarak verilmiştir.

### **5.2.8 Güneş hareketine tepki oluşturma süresi**

İşlemciler, sensörler gibi güneş izleme sistemi bileşenlerinin hassasiyet derecesinin artırılması, izleyicinin daha kısa sürede daha büyük açılar taramasını ve güneş hareketine tepki oluşturma süresinin kısılmasını sağlamaktadır. Dolayısıyla PV panelin daha fazla güneş ışınımını yakalayarak elektrik üretimini artırmaktadır.

Çalışmada yukarıda açıklanan sekiz adet değerlendirme kriteri, cephe uygulama örneklerinin değerlendirilme sürecinde kullanılacaktır.

## **5.3 Cephelerde Güneşe Uyarlanabilir Sistemler için Uygun Değerlendirme Yönteminin Belirlenmesi**

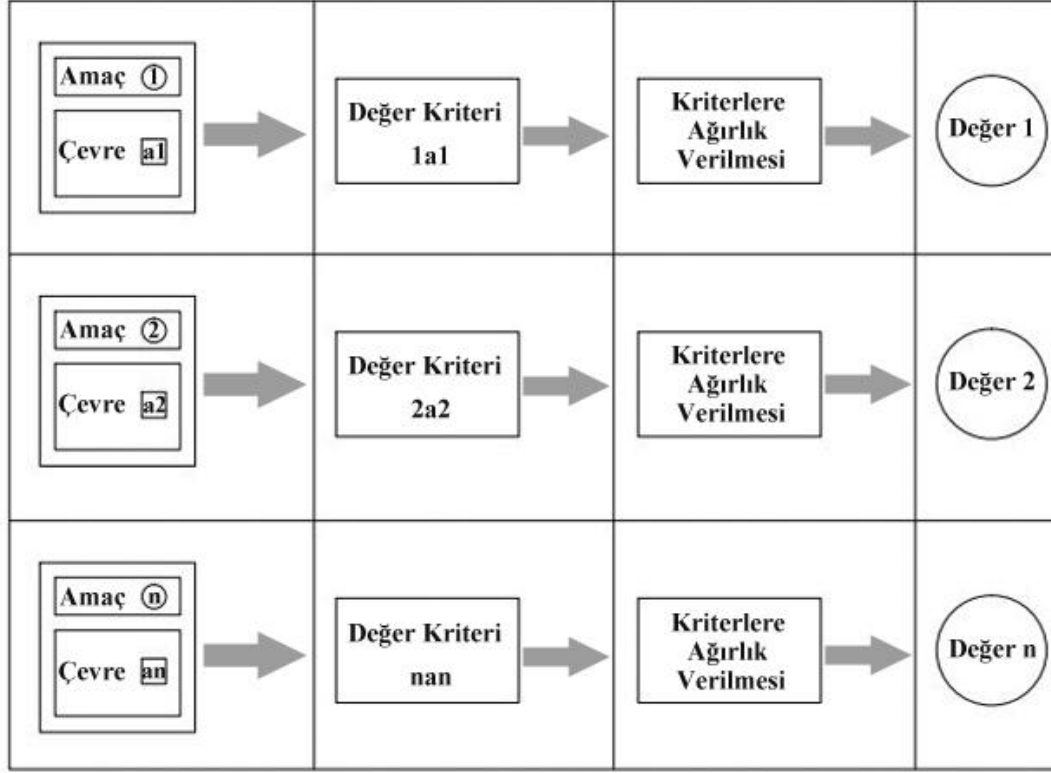
### **5.3.1 Değerlendirmenin tanımı ve değerlendirme yöntemleri**

Herhangi bir ürünün sağladığı faydayı belirleme sürecinde veya bir kaç ürün alternatifinden birini seçmek üzere karar verme sürecinde değerlendirme yapılması gerekmektedir. Değerlendirme, bir ürünün, o ürüne ilişkin değer kriterleri ile kıyaslama olgusu olarak tanımlanabilmektedir (Tapan, 2004, s.11 ; Gür, 2007, s.58). Değerlendirme, karar verme sürecinde izlenecek yollar (yöntem) arasından hedeflenen amaca en uygun seçimi yapmak için başvurulması zorunlu bir işlem olarak da tanımlanabilmektedir (Sey ve Tapan, 1976, s.93 ; Gür, 2007, s.58).

Mimarlıkta değerlendirme, alternatif ürünler arasından seçme veya bir ürünün varsayımsal bir ürünle karşılaştırılması işlemidir. Değerlendirmede temel amaç, hedeflenen amaca ilişkin belirlenen değer kriterlerinin ne oranda gerçekleştiğini saptamaktır (Gür, 2007).

Değerlendirme genel olarak üç aşamada gerçekleşmektedir (Şekil 5.2), (Sey ve Tapan, 1976, s.29-30 ; Tapan, 2004, s.21):

1. Hedeflenen amaca ilişkin değerlendirme kriterlerinin belirlenmesi
2. Değerlendirme kriterlerinin amacı gerçekleştirme açısından ikişer karşılaştırılması ile (önem düzeyi) ağırlıklıklarının belirlenmesi
3. Alternatiflerin hedeflenen amaç için, değerlendirme kriterlerini sağlamasına yönelik derecelendirilerek sıralanması; tüm sistem değerinin belirlenmesi



$$\sum_{n=1}^1 = \text{Toplam}$$

$$n = \text{Değer}$$

Şekil 5.2 Değerlendirmede genel aşamalar (Sey ve Tapan, 1976, s.30 ; Tapan, 2004, s.21).

Bu aşamalar, farklı yöntem ve teknikler ile gerçekleştirilebilmektedir. Yapı elemanları için değerlendirme yaparken kullanılacak yöntemler aşağıda verildiği gibi sınıflandırılabilir (Deniz, 1999, s.31; Gür, 2007, s.59).

- Fayda teorisine dayalı değerlendirme yöntemleri
- Alternatiflerin maliyetlerine dayalı değerlendirme yöntemleri
- Çok kriterli değerlendirme yöntemleri

Fayda teorisine dayalı değerlendirme yöntemlerinde, fayda fonksiyonu tanımlanarak, alternatiflerin sağladığı (amaçlara ulaşma değerleri) fayda değerleri hesaplanmakta ve faydası en yüksek olan alternatif seçilmektedir. Bu yöntem, birden fazla amaca yönelik gerçekleştirildiğinden karmaşık bir yönteme dönüşebilmekte ve çözüm bazı durumlarda imkansız olabilmektedir (Deniz, 1999, s.32 ; Gür, 2007, s.59-60).

Alternatiflerin maliyetlerine dayalı değerlendirme yöntemlerinde, aynı işleve sahip alternatifler, maliyet kriterine göre karşılaştırılmaktadır. Karşılaştırmalar sonucunda, en düşük maliyetli olan alternatif belirlenmektedir (Deniz, 1999 ; Gür, 2007).

Çok kriterli değerlendirme yöntemlerinde, ağırlıkları belirli olan birden fazla kriter mevcuttur. Alternatiflerin bu kriterleri belirli bir amaca yönelik karşılama dereceleri belirlenerek, en uygun alternatif seçimi gerçekleştirilmektedir (Deniz, 1999 ; Gür, 2007).

### **5.3.2 Çok kriterli değerlendirme yöntemleri**

Çok kriterli değerlendirme yöntemleri, aşağıdaki başlıklar altında sınıflandırılabilir (Deniz, 1999, s.35):

- Ağırlıklı değerlendirme teknikleri (tartma yöntemi, basit ağırlık yöntemi, kademeli ağırlık yöntemi, çarpılmış ağırlık yöntemi)
- Eleme teknikleri (özelliklere göre eleme yöntemi, alternatiflere göre eleme yöntemi, birincil kriterlere göre değerlendirme yöntemi)
- Matematik programlama teknikleri (lineer programlama yöntemi, hedef programlama yöntemi, etkileşimli çok kriterli programlama yöntemi).

Çok kriterli ağırlıklı değerlendirme yöntemlerinde, belirlenen kriterlere önemlilik düzeylerini belirten sayısal değerler verilmektedir. Alternatiflerin kriterlerin her birini karşılama değerleri, kendi ölçüm birimleri veya puanlama yöntemi gibi belirli bir yolla sayısal olarak belirlenmektedir. Sonra, her bir alternatif için sayısal değerleri, ilişkili oldukları kriterlerin önem dereceleri ile çarpılmakta ve çıkan puanlar toplanmaktadır. Son olarak tüm kriterler için en yüksek puanı alan alternatif seçilmektedir (Deniz, 1999, s.36; Gür, 2007, s. 71).

### **5.3.3 Analitik hiyerarşi prosesi (AHP) yöntemi**

Tez çalışmasında, güneşe uyarlanabilir cephe sistemlerinin enerji etkinliği açısından değerlendirilmesinde çok kriterli problemlerin çözümüne yönelik kullanılan ve ağırlıklı değerlendirme tekniklerinden Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) yöntemi uygulanmıştır.

### 5.3.3.1 Değerlendirme probleminin hiyerarşik yapısının belirlenmesi

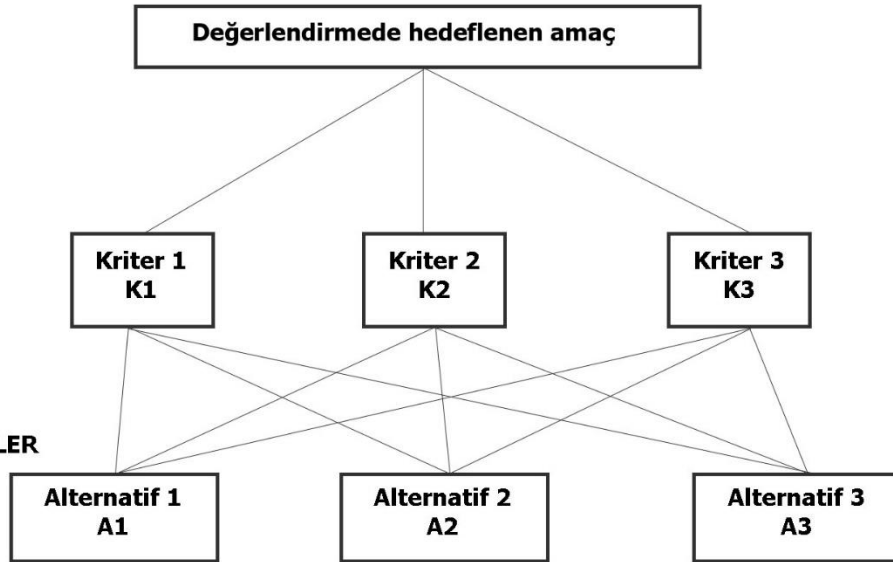
Değerlendirme süreci modeli, değerlendirme elemanlarının (amaç, kriterler, alternatifler) hiyerarşik düzende yapılandırılması ile elde edilmektedir. Bu hiyerarşik yapı, hedeflenen amacı gerçekleştirebilecek alternatifleri ve bunların amaç için değerlendirilmesinde ölçü olacak kriterleri ortaya koyarak aralarındaki ilişkiyi yansıtır.

Hiyerarşinin birinci düzeyinde değerlendirmede hedeflenen amaç yer almaktadır. Hedeflenen amacın gerçekleşmesi için alternatiflerde belli özelliklerin ölçülmesini sağlayan kriterler hiyerarşinin ikinci düzeyinde yer almaktadır. Hiyerarşinin üçüncü düzeyinde ise, değerlendirmesi yapılacak alternatifler bulunmaktadır (Şekil 5.3).

Düzyey 1:  
**AMAÇ**

Düzyey 2:  
**KRİTERLER**

Düzyey 3:  
**ALTERNATİFLER**



Şekil 5.3 Problemin çözümüne yönelik değerlendirme hiyerarşisi

### 5.3.3.2 Kriterlerin amaç için görelî önem değerlerinin belirlenmesi

Değerlendirme kriterlerinin ağırlıklarının belirlenmesi, yöntemin en önemli kısmıdır. Uygun bir ağırlık belirleme yöntemi ile bir sistemin farklı şartlardaki davranışı önceden tespit edilebilmektedir. Bu özellik, bütün değerlendirme yöntemlerinin temel niteliğini oluşturmaktadır ( Tapan, 2004 ).



Kriterlerin amaç üzerindeki etkisine ilişkin, kriterler arası ikili karşılaştırmalar yapılarak önem değerleri belirlenebilmektedir. İkili karşılaştırmalarda karar vermeye yardımcı bir puanlama yöntemi için Saaty'nin geliştirdiği Çizelge 5.1' de verilen ölçek kullanılabilir (Çizelge 5.1), (K.M.A.S, 2001 ; Saaty, 2008 ; Haas and Meixner, 2009).

**Çizelge 5.1** Kriterlerin görelî önem derecelerini belirlemeye yönelik karşılaştırma ölçeği (Saaty, 2008, s. 86 ; Deniz, 1999, s.46).

<b>Önem Derecesi</b>	<b>Tanım</b>	<b>Açıklama</b>
<b>1</b>	Eşdeğer önem	İki eleman amaca eşit düzeyde katkıda bulunur
<b>3</b>	Az miktarda daha fazla önem	Bir elemanın diğerine göre bir miktar daha fazla tercih edildiği tecrübe ve yargı söz konusudur
<b>5</b>	Esaslı veya kuvvetli derecede daha fazla önem	Bir elemanın diğerine göre kuvvetli bir biçimde daha fazla tercih edildiği tecrübe ve yargı söz konusudur
<b>7</b>	İspatlanmış ve çok kuvvetli derecede daha fazla önem	Bir eleman diğerine göre kuvvetli bir biçimde daha fazla tercih edilir ve onun üstünlüğü uygulamada açıkça görülür
<b>9</b>	Mutlak ve Aşırı derecede daha fazla önem	Bir elemanın diğerine göre daha fazla tercih edilmesine ilişkin üstünlük en yüksek ihtimal derecesindedir
<b>2,4,6,8</b>	İki yakın değer arasındaki orta değerler	Uzlaşma zamanında kullanılmak üzere gerekli olan değerlerdir

Çizelge 5.1' de verilen ölçek esas alınarak ikili karşılaştırmalar yapılırken karar vericiden aşağıdaki iki soruyu cevaplandırması beklenir (Deniz, 1999, s. 46):

-Amaç için kriterlerin hangisi daha önemlidir?

- Önem derecesi nedir?

Birinci soruya cevap aranırken kriterlerin hedeflenen amaç üzerindeki etkisi, ikili olarak karşılaştırılıp, kriterler önem sırasına konulur. İkinci soruda ise, belirlenen bu önem sırası, sayısal biçime dönüştürülür.

Amaca ilişkin kriterlerin ikişer karşılaştırılması ile aşağıda görüldüğü gibi bir örnek ikili karşılaştırma matrisi elde edilebilir (Çizelge 5.2).

**Çizelge 5.2** Örnek bir İkili Karşılaştırma Matrisi

<b>Kriterler</b>	<b>K1</b>	<b>K2</b>	<b>K3</b>
<b>K1</b>	1	1/2	1/4
<b>K2</b>	2	1	1/4
<b>K3</b>	4	4	1
Sütun toplamı	7	5,5	1,5

Çizelge 5.2’ de her bir kriter teker teker birbiriyle karşılaştırılır. K2 kriteri K1 kriterinden az miktarda daha fazla önemli olduğu için K1 sütunu ile K2 satırının kesişim hücrelerinde bu durum 2 değeri ile ifade edilmektedir. Bu durum, K1 satırı ile K2 sütununun kesişim hücrelerinde ise tersi biçimde 1/2 olarak belirtilmektedir. Tüm kriterler için bu şekilde teker teker ikili karşılaştırma yapılır. Bu kıyaslamalar sonucunda kriterler için bulunan bu önem düzeyi değerleri rölatif değerlerdir. Bulunan rölatif ağırlık değerleri ile de ancak rölatif bir sistem değeri elde edilebilmektedir. Gerçek sistem değerinin belirlenebilmesi için matrisin normalize edilmesi gerekmektedir. İkili karşılaştırma matrisinin her bir sütununun toplamı hesaplanır. Her bir matris elemanı bu sütun toplamına bölünür. Her sütun için bu işlem gerçekleştirilir. Elde edilen matrisin satır elemanlarının aritmetik ortalaması hesaplanır. Sonuç olarak bu ortalama değerler önem derecelerini yüz üzerinden ifade ederek kriterlerin amaç için görece önem değerleri olur (Çizelge 5.3), (K.M.A.S, 2001 ; Saaty, 2008 ; Haas and Meixner, 2009).

**Çizelge 5.3** Kriterlerin amaç için görece önem değerleri matrisi

<b>Kriterler</b>	<b>K1</b>	<b>K2</b>	<b>K3</b>	Satır toplamı	Görece önemler vektörü (W)
<b>K1</b>	0,143	0,091	0,167	0,401	0,401/ 3 = 0,13
<b>K2</b>	0,286	0,182	0,167	0,635	0,635/ 3 = 0,21
<b>K3</b>	0,571	0,727	0,667	1,965	1,965/ 3 = 0,66
Toplam	1	1	1	3	1

Kriterlerin ikili kıyaslanmasında karar verici tarafından verilen kararların tutarlı olması büyük önem taşımaktadır. Bu doğrultuda karşılaştırma sonuçlarının tutarlılığını

ölçmek için ‘bir tutarlılık derecesi belirleme’ yöntemi geliştirilmiştir. Tutarlılık derecesinin hesaplanmasında önce tutarlılık göstergesi hesaplanmaktadır. Elde edilen tutarlılık göstergesi değeri, belli çalışmalara dayanarak, (n) matris değerine göre belirlenmiş rassallık göstergesine (standart düzeltme değeri) bölünerek bir oran elde edilmektedir. Bu oran tutarlılık derecesini ifade etmektedir. Tutarlılık derecesinin geçerli olması için 0,1 değerinden küçük olması gerekmektedir (Çizelge 5.4), (K.M.A.S, 2001 ; Saaty, 2008 ; Haas and Meixner, 2009) , (5.1).

$$\text{Tutarlılık Göstergesi} = (\lambda_{\max} - n) / (n-1)$$

$$\text{Tutarlılık Oranı} = \text{Tutarlılık Göstergesi} / \text{Rassallık Göstergesi} \quad (5.1)$$

$$\text{Tutarlılık Oranı} < 0,1$$

**Çizelge 5.4** Rassallık göstergesi değerleri (K.M.A.S, 2001, s. 21).

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RG	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Tutarlılık göstergesi hesabı için gerekli olan en büyük özdeğerin ( $\lambda_{\max}$ ) hesabı için aşağıdaki matris çarpma işlemi sonucunda elde edilen satır toplamı (V) değeri, daha önce normalize edilmiş matriste elde edilen görelî önemler vektörü (W) ile oranlanır. Sonra elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması alınır. En büyük özdeğer ( $\lambda_{\max}$ ) hesaplandıktan sonra, tutarlılık göstergesi hesaplanabilir. Tutarlılık göstergesi hesabında kullanılmak üzere matris değeri (n) gerekmektedir. Verilen matris örneği için, n=3 değeri alınmalıdır (5.2), (5.3).

Satır toplamı (V)

$$\begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 1/4 \\ 2 & 1 & 1/4 \\ 4 & 4 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0,13 \\ 0,21 \\ 0,66 \end{bmatrix} = \begin{matrix} 0,13 + 0,11 + 0,17 = 0,41 \\ 0,26 + 0,21 + 0,17 = 0,64 \\ 0,52 + 0,84 + 0,66 = 2,02 \end{matrix} \quad (5.2)$$

$$\left[ \begin{array}{l} V / W \\ 0,41 / 0,13 = 3,15 \\ 0,64 / 0,21 = 3,05 \\ 2,02 / 0,66 = 3,06 \end{array} \right] \quad \begin{array}{l} \lambda_{\max} = ( 3,15 + 3,05 + 3,06 ) / 3 = 3,09 \\ \text{Tutarlılık göstergesi} = ( \lambda_{\max} - n ) / (n-1) \\ = ( 3,09 - 3 ) / (3-1) \\ = 0,045 \end{array} \quad (5.3)$$

Tutarlılık göstergesi hesaplandıktan sonra, tutarlılık oranı/derecesi hesaplanabilmektedir. Bunun için, rassallık tablosundan çeşitli matris değerlerine göre hesaplanmış rassallık göstergesi değerleri kullanılmaktadır. Verilen matris örneğinde, n=3 için rassallık göstergesi (RG) değeri 0,58 kullanılacaktır (5.4).

$$\text{Tutarlılık Oranı} = \text{Tutarlılık Göstergesi} / \text{Rassallık Göstergesi}$$

$$\text{Tutarlılık Oranı} = 0,045 / 0,58 = 0,078 \quad (5.4)$$

Tutarlılık Oranı = 0,078 < 0,1 olduğu için matris tutarlıdır.

### 5.3.3.3 Alternatiflerin her bir kriter için görelî önem değerlerinin belirlenmesi

Kriterlerin amaç için görelî önem değerlerinin belirlendiği ve tutarlılık oranının sağlandığı aşamadan sonra değerlendirilecek alternatifler, her bir kriterle göre karşılaştırılarak görelî önem değerleri belirlenir. Aşağıdaki çizelgelerde değerlendirilecek alternatiflerin sırasıyla K1, K2 ve K3 kriterlerini karşılama düzeylerini belirlemeye yönelik görelî önem değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 5.5, 5.6, 5.7, 5.8, 5.9, 5.10).

#### K1 kriterine göre örnek alternatiflerin karşılaştırılması

**Çizelge 5.5** Örnek alternatiflerin K1 kriteri için karşılaştırma matrisi

<b>K1</b>	<b>A1</b>	<b>A2</b>	<b>A3</b>
<b>A1</b>	1	1/5	1
<b>A2</b>	5	1	7
<b>A3</b>	1	1/7	1
Sütun toplamı	7	1,34	9

**Çizelge 5.6** Örnek alternatiflerin K1 kriteri için görelî önem değerleri matrisi

K1	A1	A2	A3	Satır toplamı	Görelî önemler vektörü (W)
A1	0,143	0,149	0,111	0,403	0,403/ 3 = 0,134
A2	0,714	0,746	0,778	2,238	2,238/ 3 = 0,746
A3	0,143	0,105	0,111	0,358	0,358/ 3 = 0,119
Toplam	1	1	1	3	1

Tutarlılık oranı hesabı :

$$\begin{bmatrix} 1 & 1/5 & 1 \\ 5 & 1 & 7 \\ 1 & 1/7 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0,134 \\ 0,746 \\ 0,119 \end{bmatrix} = \begin{matrix} 0,134 + 0,149 + 0,119 = 0,403 \\ 0,672 + 0,746 + 0,836 = 2,254 \\ 0,134 + 0,104 + 0,119 = 0,358 \end{matrix}$$

Satır toplamı (V)

$$\begin{bmatrix} V / W \\ 0,403 / 0,134 = 3,00 \\ 2,254 / 0,746 = 3,02 \\ 0,358 / 0,119 = 3,00 \end{bmatrix} \quad \begin{matrix} \lambda_{\max} = ( 3,00 + 3,02 + 3,00 ) / 3 = 3,01 \\ \text{Tutarlılık göstergesi} = ( \lambda_{\max} - n ) / (n-1) \\ = ( 3,01 - 3 ) / (3-1) \\ = 0,005 \end{matrix}$$

Tutarlılık Oranı = Tutarlılık Göstergesi / Rassallık Göstergesi

$$\text{Tutarlılık Oranı} = 0,005 / 0,58 = 0,009$$

Tutarlılık Oranı = 0,009 < 0,1 olduğu için matris tutarlıdır.

K2 kriterine göre örnek alternatiflerin karşılaştırılması

**Çizelge 5.7** Örnek alternatiflerin K2 kriteri için karşılaştırma matrisi

<b>K2</b>	<b>A1</b>	<b>A2</b>	<b>A3</b>
<b>A1</b>	1	8	4
<b>A2</b>	1/8	1	1
<b>A3</b>	1/4	1	1
Sütun toplamı	1,38	10	6

**Çizelge 5.8** Örnek alternatiflerin K2 kriteri için görelî önem değerleri matrisi

<b>K2</b>	<b>A1</b>	<b>A2</b>	<b>A3</b>	Satır toplamı	Görelî önemler vektörü (W)
<b>A1</b>	0,727	0,8	0,667	2,194	2,194/ 3 = 0,731
<b>A2</b>	0,091	0,1	1,167	0,358	0,358/ 3 = 0,119
<b>A3</b>	0,182	0,1	1,167	0,448	0,448/ 3 = 0,150
Toplam	1	1	1	3	1

Tutarlılık oranı hesabı :

Satır toplamı (V)

$$\begin{bmatrix} 1 & 8 & 4 \\ 1/8 & 1 & 1 \\ 1/4 & 1 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0,731 \\ 0,119 \\ 0,150 \end{bmatrix} = \begin{matrix} 0,731 + 0,954 + 0,598 = 2,283 \\ 0,091 + 0,119 + 0,150 = 0,360 \\ 0,183 + 0,119 + 0,150 = 0,452 \end{matrix}$$

$$\begin{bmatrix} V / W \\ 2,283 / 0,731 = 3,12 \\ 0,360 / 0,119 = 3,02 \\ 0,452 / 0,150 = 3,02 \end{bmatrix} \quad \begin{matrix} \lambda_{\max} = ( 3,12 + 3,02 + 3,02 ) / 3 = 3.05 \\ \text{Tutarlılık göstergesi} = ( \lambda_{\max} - n ) / ( n-1) \\ = ( 3,05 - 3 ) / ( 3-1) \\ = 0,025 \end{matrix}$$

Tutarlılık Oranı = Tutarlılık Göstergesi / Rassallık Göstergesi

$$\text{Tutarlılık Oranı} = 0,025 / 0,58 = 0,043$$

Tutarlılık Oranı = 0,043 < 0,1 olduğu için matris tutarlıdır.

K3 kriterine göre örnek alternatiflerin karşılaştırılması

**Çizelge 5.9** Örnek alternatiflerin K3 kriteri için karşılaştırma matrisi

<b>K3</b>	<b>A1</b>	<b>A2</b>	<b>A3</b>
<b>A1</b>	1	6	4
<b>A2</b>	1/6	1	1/2
<b>A3</b>	1/4	2	1
Sütun toplamı	1,42	9	5,5

**Çizelge 5.10** Örnek alternatiflerin K3 kriteri için görelî önem değerleri matrisi

<b>K3</b>	<b>A1</b>	<b>A2</b>	<b>A3</b>	Satır toplamı	Görelî önemler vektörü (W)
<b>A1</b>	0,706	0,667	0,727	2,100	2,100/ 3 = 0,700
<b>A2</b>	0,118	0,111	0,091	0,320	0,320/ 3 = 0,107
<b>A3</b>	0,176	0,222	0,182	0,580	0,580/ 3 = 0,194
Toplam	1	1	1	3	1

Tutarlılık oranı hesabı :

$$\begin{bmatrix} 1 & 6 & 4 \\ 1/6 & 1 & 1/2 \\ 1/4 & 2 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0,700 \\ 0,107 \\ 0,194 \end{bmatrix} = \begin{matrix} 0,700 + 0,640 + 0,774 = 2,114 \\ 0,117 + 0,107 + 0,097 = 0,320 \\ 0,175 + 0,213 + 0,194 = 0,582 \end{matrix}$$

Satır toplamı (V)

$$\left[ \begin{array}{c} V / W \\ 2,114 / 0,700 = 3,02 \\ 0,320 / 0,107 = 3,00 \\ 0,582 / 0,194 = 3,01 \end{array} \right] \quad \begin{array}{l} \lambda_{\max} = ( 3,02 + 3,00 + 3,01 ) / 3 = 3,01 \\ \text{Tutarlılık göstergesi} = ( \lambda_{\max} - n ) / (n-1) \\ = ( 3,01 - 3 ) / (3-1) \\ = 0,005 \end{array}$$

Tutarlılık Oranı = Tutarlılık Göstergesi / Rassallık Göstergesi

$$\text{Tutarlılık Oranı} = 0,005 / 0,58 = 0,009$$

Tutarlılık Oranı = 0,009 < 0,1 olduğu için matris tutarlıdır.

#### 5.3.3.4 Alternatiflerin tüm hiyerarşiyi kapsayan (amaç için) öncelik değerlerinin belirlenmesi

Her bir kriter için tüm örnek alternatiflerin görelî önemleri belirlendikten sonra, tüm elde edilen sonuçlar, tek bir çizelgede toplanır. Aşağıdaki Çizelge 5.11' de alternatiflerin tüm kriterler için önem değerleri verilmiştir ( Çizelge 5.11).

**Çizelge 5.11** Örnek alternatiflerin tüm kriterler için önem değerleri matrisi

	<b>K1 kriteri</b>	<b>K2 kriteri</b>	<b>K3 kriteri</b>
<b>A1</b>	0,134	0,731	0,700
<b>A2</b>	0,746	0,119	0,107
<b>A3</b>	0,119	0,150	0,194

Kriterlerin kendi aralarında ikili karşılaştırması bölüm 5.3.3.2' de yapılmıştır. Bu bölümden alınan tutarlılığı sağlanmış kriter önem değerleri aşağıdaki Çizelge 5.12' de belirtilmektedir ( Çizelge 5.12).

**Çizelge 5.12** Kriterlerin önem değerleri matrisi

<b>Kriterler</b>	<b>K1</b>	<b>K2</b>	<b>K3</b>
<b>Önem düzeyi değerleri</b>	0,13	0,21	0,66

Son olarak, daha önceki adımlarda elde edilen Çizelge 5.11 ve Çizelge 5.12' de toplanan verileri kullanarak sistemlerin toplam değerleri hesaplanır. Bu aşamada



Çizelge 5.11 ve 5.12’ de verilen matrisler arasında çarpma işlemi uygulanarak sonuca ulaşılmaktadır. Tüm kriterlerin önem değerleri ve örnek alternatiflerin her bir kriter için önem değerleri birlikte bir çizelgede gösterilmelidir. Çizelge 5.13, tüm kriterlerin önem değerleri ve örnek alternatiflerin her bir kriter için önem değerleri verilerinin kullanılarak örnek uygulamaların toplam önem değerinin elde edilmesini göstermektedir.

$$\begin{bmatrix} 0,134 & 0,731 & 0,700 \\ 0,746 & 0,119 & 0,107 \\ 0,119 & 0,150 & 0,194 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0,13 \\ 0,21 \\ 0,66 \end{bmatrix}$$

(K1 kriteri ağırlığı x Alternatifin K1 kriterini karşılama düzeyi)

+ (K2 kriteri ağırlığı x Alternatifin K2 kriterini karşılama düzeyi)

+ (K3 kriteri ağırlığı x Alternatifin K3 kriterini karşılama düzeyi)

= Alternatifin amaç için öncelik değeri

**Çizelge 5.13** Örnek alternatiflerin toplam değerlerinin bulunması

Alternatifler Kriterler	Kriterlerin amaç için görelî önem değeri		A1’in kriter için görelî önem değeri	A1’in kriterler için değeri	A2’nin kriter için görelî önem değeri	A2’nin kriterler için değeri	A3’ün kriter için görelî önem değeri	A3’ün kriterler için değeri
<b>K1</b>	0,13	X	0,134	0,017	0,746	0,097	0,119	0,015
<b>K2</b>	0,21	X	0,731	0,154	0,119	0,025	0,150	0,032
<b>K3</b>	0,66	X	0,700	0,462	0,107	0,071	0,194	0,128
Alternatiflerin amaç için öncelik değeri				<b>0,633</b>		<b>0,193</b>		<b>0,175</b>

A1’ in amaç için öncelik değeri :

$$(0,134 \times 0,13) + (0,731 \times 0,21) + (0,700 \times 0,66) = 0,017 + 0,154 + 0,462 = 0,633$$

A2’n in amaç için öncelik değeri :

$$(0,746 \times 0,13) + (0,119 \times 0,21) + (0,107 \times 0,66) = 0,097 + 0,025 + 0,071 = 0,193$$

A3' ün amaç için öncelik değeri :

$$(0,119 \times 0,13) + (0,150 \times 0,21) + (0,194 \times 0,66) = 0,015 + 0,032 + 0,128 = 0,175$$

Örnek alternatifler için hesaplanan öncelik değerlerine göre, en yüksek puanı alan Alternatif 1 olmuştur. Alternatifin en yüksek puanı alması amacı gerçekleştirme açısından diğer alternatiflere kıyasla daha tercih edilmesi gerektiğinin göstergesidir.



## **6. GÜNEŞE UYARLANABİLİR CEPHE UYGULAMALARININ DEĞERLENDİRİLMESİ**

Çalışmada, güneşe uyarlanabilir cephe sistemleri, değişken atmosferik koşullar ve iç mekan kullanıcı gereksinimleri dikkate alınarak oluşturulan kriterler bağlamında değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmenin amacı, güneşe uyarlanabilir cephe uygulamalarının avantaj ve dezavantajlarını görerek bu uygulamaların potansiyellerini ortaya çıkarmak ve verimlerini artırmaya katkı sağlamaktır.

Değerlendirilecek güneşe uyarlanabilir cephe uygulamalarının belirlenmesi, birbirlerinden farklı tasarıma sahip olan, değerlendirme kriterlerine mümkün olduğu kadar farklı cevaplar oluşturan, fotovoltaik sistemin entegre edildiği ve edilmediği uygulanmış örnekler ile sınırlandırılmıştır.

### **6.1 Değerlendirme Probleminin Hiyerarşik Yapısının Belirlenmesi**

Güneşe uyarlanabilir cephe sistemlerinin değerlendirilmesi sürecinin modeli, değerlendirme bileşenlerinin (amaç, kriterler, uygulamalar) hiyerarşik düzende yapılandırılması ile elde edilmektedir. Bu hiyerarşik yapı, hedeflenen amacı gerçekleştirebilecek güneşe uyarlanabilir cephe sistemlerini ve bunların amaç için değerlendirilmesinde ölçü olacak kriterleri ortaya koyarak aralarındaki ilişkiyi yansıtır.

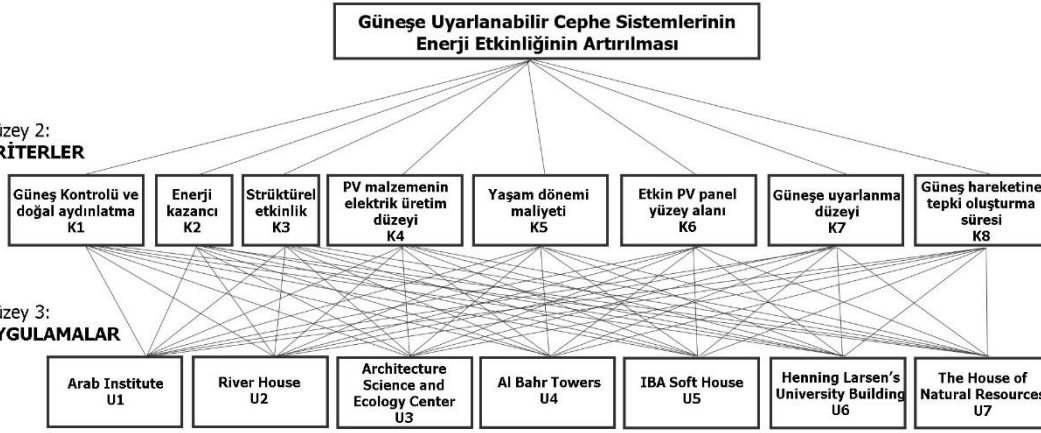
Hiyerarşinin birinci düzeyinde ‘güneşe uyarlanabilir cephe sistemlerinin enerji etkinliğinin artırılması’ olarak hedeflenen amaç yer almaktadır. Bu amacın gerçekleşmesi, güneşe uyarlanabilir cephe sistemlerinin enerji etkinliğini artıracak özelliklere sahip olmasını gerektirir. Değerlendirme sürecinde dikkate alınması gereken enerji etkinliğini artıracak özelliklerin ölçülmesini sağlayan ve çalışmanın kriterlerini oluşturan, ‘Güneş kontrolü ve doğal aydınlatma’, ‘Enerji kazancı’, ‘Strüktürel etkinlik’, ‘PV malzemenin elektrik üretim düzeyi’, ‘Yaşam dönemi maliyeti’, ‘Etkin PV panel yüzey alanı’, ‘Güneşe uyarlanma düzeyi’, ‘Güneş

hareketine tepki oluşturma süresi' kriterleri de hiyerarşinin ikinci düzeyinde yer almaktadır. Hiyerarşinin üçüncü düzeyinde ise, değerlendirmesi yapılacak güneş uyarlanabilir cephe uygulamaları bulunmaktadır (Şekil 6.1).

Düzye 1:  
**AMAÇ**

Düzye 2:  
**KRİTERLER**

Düzye 3:  
**UYGULAMALAR**



Şekil 6.1 Güneş uyarlanabilir cephe sistemleri için değerlendirme hiyerarşisi

## 6.2 Kriterlerin Amaç için Görelî Önem Değerlerinin Belirlenmesi

Kriterlerin amaç üzerindeki etkisine ilişkin, kriterler arası ikili karşılaştırmalar yapılarak görelî önem değerlerinin belirlenmesi Çizelge 6.1 ve 6.2'de açıklanmaktadır. Karşılaştırmalar yapılırken Saaty' nin önerdiği ölçek esas alınmıştır.

### Kriter Önem Puanı

- 1-Eşdeğer Önem
- 3-Az miktarda daha fazla önem
- 5-Esash veya kuvvetli derecede daha fazla önem
- 7-İspatlanmış ve çok kuvvetli derecede daha fazla önem
- 9-Mutlak ve aşırı derecede daha fazla önem
- 2, 4, 6, 8-İki yakın değer arasındaki orta değerler

### Kriterler

- K1-Güneş Kontrolü ve doğal aydınlatma
- K2-Enerji Kazancı
- K3-Strüktürel etkinlik
- K4-PV malzemenin elektrik üretim düzeyi
- K5-Yaşam dönemi maliyeti
- K6-Etkin PV panel yüzey alanı
- K7-Güneş uyarlanma düzeyi
- K8-Güneş hareketine tepki oluşturma süresi

Çizelge 6.1 Kriter puanlama matrisi

Kriter	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8
K1	1	1/9	1/5	1	1/7	1	1/5	1/8

**Çizelge 6.1 (devam):** Kriter puanlama matrisi

<b>K2</b>	9	1	4	6	1	6	1	1
<b>K3</b>	5	1/4	1	1/3	1/4	1/3	1/7	1/7
<b>K4</b>	1	1/6	3	1	1/5	1	1/7	1/7
<b>K5</b>	7	1	4	5	1	5	1	1
<b>K6</b>	1	1/6	3	1	1/5	1	1/6	1/6
<b>K7</b>	5	1	7	7	1	6	1	2
<b>K8</b>	8	1	7	7	1	6	1/2	1
<b>Sütun toplamı</b>	37	4,694	29,2	28,333	4,793	26,333	4,152	5,577

Kriterlerin hedeflenen amaç üzerindeki etkisi, ikili olarak karşılaştırılıp, kriterler arası önem puanları aşağıdaki şekilde açıklanabilir.

*Güneş Kontrolü ve Doğal Aydınlatma (K1) – Enerji Kazancı (K2) karşılaştırması :*

Maksimum düzeyde enerji üretimi ve minimum düzeyde enerji tüketimi sistemin asıl işlevlerinden biridir. Bu sebeple enerji kazanç kriteri, sistemin güneş kontrolüne etkisine göre aşırı düzeyde daha fazla öneme sahip olur. Bu durum, Çizelge 6.1’ de verilen kriter puanlama matrisinde ‘Güneş Kontrolü ve Doğal Aydınlatma – (K1) ’ kriterinin yer aldığı K1 sütunu ile ‘Enerji Kazancı – (K2) ’ kriterinin bulunduğu K2 satırının kesişim hücresi elemanında ‘9’ olarak belirtilmektedir. Bu durum, K1 satırı ile K2 sütununun kesişim hücresi elemanında ise tersi biçimde 1/9 olarak belirtilmektedir.

*Güneş Kontrolü ve Doğal Aydınlatma (K1) – Strüktürel Etkinlik (K3) karşılaştırması :*

☐ Güneşe uyarlanabilir PV cephe sisteminin yapı strüktüründen kaynaklı hareketlere tepki göstermesi başka bir deyişle yapı strüktürü ile birlikte çalışması önemlidir. Bununla birlikte iç ve dış arasında arayüz niteliği taşıyan cephe sisteminin değişen atmosferik koşullara karşı dayanım göstermesi de önemli bir konudur. Bu sebeplerden hareketle yapısal etkinlik, cephede güneş kontrolü etkinliğine göre çok daha önemli olarak kabul edilebilir. Bu durum, Çizelge 6.1’ de verilen kriter puanlama matrisinde ‘Güneş Kontrolü ve Doğal Aydınlatma – (K1) ’ kriterinin yer aldığı K1 sütunu ile ‘Strüktürel Etkinlik – (K3) ’ kriterinin bulunduğu K3 satırının kesişim hücresi

elemanında '5' olarak belirtilmektedir. Bu durum, K1 satırı ile K3 sütununun kesişim hücresi elemanında ise tersi biçimde 1/5 olarak belirtilmektedir.

Güneş Kontrolü ve Doğal Aydınlatma (K1) – PV Malzemenin Elektrik Üretim Düzeyi (K4) karşılaştırması : PV malzemenin elektrik üretim düzeyi, güneşe uyarlanabilir PV sistemin temel hedeflerinden biri olan enerji verimini doğrudan etkilemektedir. Ancak, cephede güneş kontrolünün sağlanması, iç mekanın doğal olarak aydınlatılma düzeyi de yapı enerji kazancını doğrudan etkilemektedir. Bu sebeplerden hareketle, enerji performansına bu iki kriterin etki düzeyi eşdeğer kabul edilebilir. Bu durum, Çizelge 6.1' de verilen kriter puanlama matrisinde 'Güneş Kontrolü ve Doğal Aydınlatma – (K1) ' kriterinin yer aldığı K1 sütunu ile 'PV Malzemenin Elektrik Üretim Düzeyi – (K4) ' kriterinin bulunduğu K4 satırının kesişim hücresi elemanında '1' olarak belirtilmektedir. Bu durum, K1 satırı ile K4 sütununun kesişim hücresi elemanında da 1 olarak belirtilmektedir.

Güneş Kontrolü ve Doğal Aydınlatma (K1) – Yaşam Dönemi Maliyeti (K5) karşılaştırması : Güneşe uyarlanabilir PV sistemler, kompleks teknik yapıya sahiptirler. Kurulum maliyeti yüksek olan bu sistemler için bakım, onarım programlarının iyi düzenlenmesi yaşam dönemi maliyetini doğrudan etkileyen önemli bir konudur. Ayrıca sistem bileşenlerinden herhangi birinin arızası durumunda tüm sistem çalışmayabilmektedir. Bu sebeplerden dolayı sistemin güneş kontrolü ve doğal aydınlatma etkinliği, maliyete göre dolaylı bir kriter özelliği taşımaktadır. Bu durum, Çizelge 6.1' de verilen kriter puanlama matrisinde 'Güneş Kontrolü ve Doğal Aydınlatma – (K1) ' kriterinin yer aldığı K1 sütunu ile 'Yaşam Dönemi Maliyeti – (K5) ' kriterinin bulunduğu K5 satırının kesişim hücresi elemanında '7' olarak belirtilmektedir. Bu durum, K1 satırı ile K5 sütununun kesişim hücresi elemanında ise tersi biçimde 1/7 olarak belirtilmektedir.

Güneş Kontrolü ve Doğal Aydınlatma (K1) – Etkin PV Panel Yüzey Alanı (K6) karşılaştırması : PV panel yüzeyi, enerji üretiminin gerçekleşmesi için temel yüzeydir. Bu yüzey aracılığıyla üretim artabilir veya azalabilir. PV panelin etkin olarak çalışan yüzey alanı ne kadar fazla ise sistem performansı da doğrudan etkilenecek o kadar fazla olur. PV panelin yüzeyinde atmosferik koşullara bağımlı olarak oluşabilecek kirlilik, panel yüzeyinin bir kısmını pasif duruma getirebilir. Ayrıca, cephe tasarımına da bağlı olarak panellerin birbirlerini gölgelemesi, tüm sistem performansını etkileyebilmektedir. Ancak, cephede güneş kontrolünün sağlanması, iç

mekanın doğal olarak aydınlatılma düzeyi de yapı enerji kazancını doğrudan etkilemektedir. Bu sebeplerden hareketle, enerji performansına bu iki kriterin etki düzeyi eşdeğer kabul edilebilir. Bu durum Çizelge 6.1’ de verilen kriter puanlama matrisinde ‘Güneş Kontrolü ve Doğal Aydınlatma – (K1) ’ kriterinin yer aldığı K1 sütunu ile ‘Etkin PV Panel Yüzey Alanı – (K6) ’ kriterinin bulunduğu K6 satırının kesişim hücresi elemanında ‘1’ olarak belirtilmektedir. Bu durum, K1 satırı ile K6 sütununun kesişim hücresi elemanında da 1 olarak belirtilmektedir.

*Güneş Kontrolü ve Doğal Aydınlatma (K1) – Güneşe Uyarlanma Düzeyi (K7) karşılaştırması :* PV sistemin karakteristik güneş hareketini takip etme özellikleri, güneş hareketine tepki oluşturarak yönlenebilmesi ve hızı gibi parametreler güneşe uyarlanmanın düzeyini belirlemektedir. Genel anlamda değerlendirilirse, güneşi maksimum verimle izleyen bir sistemin enerji üretimi de o denli yüksek olacaktır. Ancak, güneş kontrolü ve doğal aydınlatma etkinliği çok iyi olan bir sistemin enerji üretimi açısından etkinliğini net ve genel olarak belirlemek mümkün olmamaktadır. Bu değerlendirmelere bağlı olarak da sistemin güneşe uyarlanma düzeyi çok daha fazla önemli olmaktadır. Bu durum, Çizelge 6.1’ de verilen kriter puanlama matrisinde ‘Güneş Kontrolü ve Doğal Aydınlatma – (K1) ’ kriterinin yer aldığı K1 sütunu ile ‘Güneşe Uyarlanma Düzeyi – (K7) ’ kriterinin bulunduğu K7 satırının kesişim hücresi elemanında ‘5’ olarak belirtilmektedir. Bu durum, K1 satırı ile K7 sütununun kesişim hücresi elemanında ise tersi biçimde 1/5 olarak belirtilmektedir.

*Güneş Kontrolü ve Doğal Aydınlatma (K1) – Güneş Hareketine Tepki Oluşturma Süresi (K8) karşılaştırması :* Güneş izleme sistemlerinin tek ya da iki eksenli olması, çalışma prensiplerinin farklı olması gibi özellikler güneş takip hassasiyetini belirlemektedir. Güneş takip hassasiyetinin yüksek olması ise güneş takibinin ve güneş hareketine tepki oluşturma süresinin yüksek olmasını sağlamaktadır. Bu duruma bağlı olarak güneş hareketine tepki oluşturma süresi, cephede güneş kontrolü etkinliğine göre çok daha önemli olarak kabul edilebilir. Bu durum, Çizelge 6.1’ de verilen kriter puanlama matrisinde ‘Güneş Kontrolü ve Doğal Aydınlatma – (K1) ’ kriterinin yer aldığı K1 sütunu ile ‘Güneş Hareketine Tepki Oluşturma Süresi – (K8) ’ kriterinin bulunduğu K8 satırının kesişim hücresi elemanında ‘8’ olarak belirtilmektedir. Bu durum, K1 satırı ile K8 sütununun kesişim hücresi elemanında ise tersi biçimde 1/8 olarak belirtilmektedir.

Enerji Kazancı (K2) – Strüktürel Etkinlik (K3) karşılaştırması : Güneşe uyarlanabilir PV sistemin yapı strüktürü ile birlikte çalışması ve fiziksel çevre koşullarına dayanım sağlaması vazgeçilmez bir durumdur. Sistem, temel işlevi olan enerji üretimini yaparken daha fazla üretim hedefi ve tüketilen enerji miktarını minimize edip kazanç sağlaması da çok fazla önemli bir konudur. Bu iki önemli kriter kıyaslandığında, strüktürel etkinliğin belli düzeyde sağlandığı varsayılırsa enerji kazancının biraz daha fazla önem kazandığı kabul edilebilir. Bu durum, Çizelge 6.1’ de verilen kriter puanlama matrisinde ‘Strüktürel Etkinlik – (K3)’ kriterinin yer aldığı K3 sütunu ile ‘Enerji Kazancı – (K2)’ kriterinin bulunduğu K2 satırının kesişim hücresi elemanında ‘4’ olarak belirtilmektedir. Bu durum, K3 satırı ile K2 sütununun kesişim hücresi elemanında ise tersi biçimde 1/4 olarak belirtilmektedir.

Enerji Kazancı (K2) – PV Malzemenin Elektrik Üretim Düzeyi (K4) karşılaştırması: Sistemin bir çok parametreden etkilenen enerji kazancı kriteri, PV malzemenin elektrik üretim düzeyi kriterine göre çok daha önemli olarak kabul edilebilir. Çünkü tek başına PV malzemenin elektrik üretim düzeyinin yüksek olması, sistem performansını büyük ölçüde etkileyememektedir. Ancak, sistem için enerjiden kazanç sağlamak asıl amaçtır. Bu durum, Çizelge 6.1’ de verilen kriter puanlama matrisinde ‘PV Malzemenin Elektrik Üretim Düzeyi – (K4)’ kriterinin yer aldığı K4 sütunu ile ‘Enerji Kazancı – (K2)’ kriterinin bulunduğu K2 satırının kesişim hücresi elemanında ‘6’ olarak belirtilmektedir. Bu durum, K4 satırı ile K2 sütununun kesişim hücresi elemanında ise tersi biçimde 1/6 olarak belirtilmektedir.

Enerji Kazancı (K2) – Yaşam Dönemi Maliyeti (K5) karşılaştırması: Güneş uyarlanabilir PV sistemler için maliyet konusu çok fazla önem taşımaktadır. Çünkü bu sistemler daha çok kompleks teknik yapılıdır. Aynı şekilde enerji kazancı da bu sistemler için büyük önem taşımaktadır. Çünkü sistemin asıl amacı, enerji etkinliktir. Bu sebeple enerji kazancı ve yaşam dönemi maliyeti karşılaştırıldığında, eşdeğer öneme sahip oldukları söylenebilir. Bu durum, Çizelge 6.1’ de verilen kriter puanlama matrisinde ‘Enerji Kazancı – (K2)’ kriterinin yer aldığı K2 sütunu ile ‘Yaşam Dönemi Maliyeti – (K5)’ kriterinin bulunduğu K5 satırının kesişim hücresi elemanında ‘1’ olarak belirtilmektedir. Bu durum, K2 satırı ile K5 sütununun kesişim hücresi elemanında da 1 olarak belirtilmektedir.

Enerji Kazancı (K2) – Etkin PV Panel Yüzey Alanı (K6) karşılaştırması : Etkin PV panel yüzey alanı, enerji kazancı ile doğrudan ilişki içindedir. Çünkü etkinleşen PV



panel yüzeyinin artışı, enerji üretimini artıracaktır. Bu kriterleri önem düzeyleri bakımından kıyaslarken enerji kazancının çok daha önemli olduğu kabul edilebilir. Çünkü enerji kazancı kriteri, PV panel yüzey alanı kriterine göre çok parametrelili olup çok daha kapsamlı bir kriter olarak değerlendirilebilir. Bu durum, Çizelge 6.1’ de verilen kriter puanlama matrisinde ‘Etkin PV Panel Yüzey Alanı – (K6)’ kriterinin yer aldığı K6 sütunu ile ‘Enerji Kazancı – (K2)’ kriterinin bulunduğu K2 satırının kesişim hücresi elemanında ‘6’ olarak belirtilmektedir. Bu durum, K6 satırı ile K2 sütununun kesişim hücresi elemanında ise tersi biçimde 1/6 olarak belirtilmektedir.

*Enerji Kazancı (K2) – Güneşe Uyarlanma Düzeyi (K7) karşılaştırması* : Güneşe uyarlanan PV sistemin temel amaçlarından biri enerji kazancı iken diğeri güneşe uyarlanabilme hassasiyetini maksimum seviyelere çıkarmaktır. Bu bağlamda bu iki kriterin sistem performansı için eşdeğer öneme sahip oldukları söylenebilir. Bu durum, Çizelge 6.1’ de verilen kriter puanlama matrisinde ‘Enerji Kazancı – (K2)’ kriterinin yer aldığı K2 sütunu ile ‘Güneşe Uyarlanma Düzeyi – (K7)’ kriterinin bulunduğu K7 satırının kesişim hücresi elemanında ‘1’ olarak belirtilmektedir. Bu durum, K2 satırı ile K7 sütununun kesişim hücresi elemanında da 1 olarak belirtilmektedir.

*Enerji Kazancı (K2) – Güneş Hareketine Tepki Oluşturma Süresi (K8) karşılaştırması* : Güneş takip hassasiyetinin yüksek olması, sistem verimini belirlemede etkili olmaktadır. Aynı şekilde enerji kazancı da sistem verimini belirleyici özellik taşır. Bu bağlamda bu iki kriter de sistem performansı için eşdeğer öneme sahiptir. Bu durum, Çizelge 6.1’ de verilen kriter puanlama matrisinde ‘Enerji Kazancı – (K2)’ kriterinin yer aldığı K2 sütunu ile ‘Güneş Hareketine Tepki Oluşturma Süresi – (K8)’ kriterinin bulunduğu K8 satırının kesişim hücresi elemanında ‘1’ olarak belirtilmektedir. Bu durum, K2 satırı ile K8 sütununun kesişim hücresi elemanında da 1 olarak belirtilmektedir.

*Strüktürel Etkinlik (K3) – PV Malzemenin Elektrik Üretim Düzeyi (K4) karşılaştırması* : Güneşe uyarlanabilir PV sistemler için strüktürel etkinlik sağlanması vazgeçilmez bir durum iken PV malzemenin elektrik üretim düzeyi gerekli bir durumdur. Strüktürel etkinlik, belli düzeyde sağlanarak PV malzemenin elektrik üretim düzeyinin biraz daha fazla önem taşıdığı kabul edilebilir. Bu durum, Çizelge 6.1’ de verilen kriter puanlama matrisinde ‘Strüktürel Etkinlik – (K3)’ kriterinin yer aldığı K3 sütunu ile ‘PV Malzemenin Elektrik Üretim Düzeyi – (K4)’ kriterinin bulunduğu K4 satırının

kesişim hücresi elemanında '3' olarak belirtilmektedir. Bu durum, K3 satırı ile K4 sütununun kesişim hücresi elemanında ise tersi biçimde 1/3 olarak belirtilmektedir.

Strüktürel Etkinlik (K3) – Yaşam Dönemi Maliyeti (K5) karşılaştırması : Maliyet, bu sistemler için çok önemli bir konudur. Çünkü kurulum maliyetleri zaten yüksek olan bu sistemlerin bakım, onarım maliyetleri de hesaba katılmayan ayrıntılardan dolayı yükselebilmektedir. Strüktürel etkinliğin de belli düzeyde sağlanması vazgeçilmezdir. Bu sebeplerden hareketle, bu iki önemli kriter kıyaslandığında, strüktürel etkinliğin belli düzeyde sağlanarak, maliyetin mümkün olduğunca düşük tutulması üzerinde durulmalıdır. Bu durumda, maliyet kriterinin biraz daha fazla önem kazandığı kabul edilebilir. Bu durum, Çizelge 6.1' de verilen kriter puanlama matrisinde 'Strüktürel Etkinlik – (K3)' kriterinin yer aldığı K3 sütunu ile 'Yaşam Dönemi Maliyeti – (K5)' kriterinin bulunduğu K5 satırının kesişim hücresi elemanında '4' olarak belirtilmektedir. Bu durum, K3 satırı ile K5 sütununun kesişim hücresi elemanında ise tersi biçimde 1/4 olarak belirtilmektedir.

Strüktürel Etkinlik (K3) – Etkin PV Panel Yüzey Alanı (K6) karşılaştırması : PV malzemenin etkin yüzey alanı ne kadar fazla ise sistemin enerji üretimi de o düzeyde fazla olur. Strüktürel etkinliğin gereken düzeyde sağlandığı varsayılırsa PV malzemenin etkin yüzey alanının fazla olması üzerinde durulmalıdır. Bu sebeplerden hareketle, etkin PV panel yüzey alanına biraz daha fazla önem puanı verilebilir. Bu durum, Çizelge 6.1' de verilen kriter puanlama matrisinde 'Strüktürel Etkinlik – (K3)' kriterinin yer aldığı K3 sütunu ile 'Etkin PV Panel Yüzey Alanı – (K6)' kriterinin bulunduğu K6 satırının kesişim hücresi elemanında '3' olarak belirtilmektedir. Bu durum, K3 satırı ile K6 sütununun kesişim hücresi elemanında ise tersi biçimde 1/3 olarak belirtilmektedir.

Strüktürel Etkinlik (K3) – Güneşe Uyarlanma Düzeyi (K7) karşılaştırması : Sistemin güneşe uyarlanabilme düzeyinin maksimum seviyelere yükseltilmesi, bu sistemler için temel hedeflerden biridir. Çünkü, PV sistemin güneşe uyarlanması ile enerji üretimini artırma amacına erişilir. Bu yüzden güneşe uyarlanma düzeyi, çok kuvvetli derecede daha fazla önem taşımaktadır. Bu durum, Çizelge 6.1' de verilen kriter puanlama matrisinde 'Strüktürel Etkinlik – (K3)' kriterinin yer aldığı K3 sütunu ile 'Güneşe Uyarlanma Düzeyi – (K7)' kriterinin bulunduğu K7 satırının kesişim hücresi elemanında '7' olarak belirtilmektedir. Bu durum, K3 satırı ile K7 sütununun kesişim hücresi elemanında ise tersi biçimde 1/7 olarak belirtilmektedir.

Strüktürel Etkinlik (K3) – Güneş Hareketine Tepki Oluşturma Süresi (K8) karşılaştırması : Güneş hareketine tepki oluşturma süresi, sistemin güneşe uyarlanma düzeyini doğrudan etkilemektedir. Bu yüzden, strüktürel etkinlik kriteri ile kıyaslandığında çok kuvvetli derecede daha fazla önem taşır. Bu durum Çizelge 6.1’ de verilen kriter puanlama matrisinde ‘Strüktrel Etkinlik – (K3) ’ kriterinin yer aldığı K3 sütunu ile ‘Güneş Hareketine Tepki Oluşturma Süresi – (K8) ’ kriterinin bulunduğu K8 satırının kesişim hücresi elemanında ‘7’ olarak belirtilmektedir. Bu durum, K3 satırı ile K8 sütununun kesişim hücresi elemanında ise tersi biçimde 1/7 olarak belirtilmektedir.

PV Malzemenin Elektrik Üretim Düzeyi (K4) – Yaşam Dönemi Maliyeti (K5) karşılaştırması : Önceki bölümlerde yapılan ikili kıyaslamalarda belirtildiği gibi bu sistemler için maliyet kriteri çok büyük önem taşımaktadır. PV malzemenin elektrik üretim düzeyi ise sistemin enerji kazancına etki ederek katkı sağlayabilmektedir. Bu iki kriter kıyaslandığında ise maliyet kriteri çok daha öncelikli durumda olmaktadır. Bu durum, Çizelge 6.1’ de verilen kriter puanlama matrisinde ‘PV Malzemenin Elektrik Üretim Düzeyi – (K4) ’ kriterinin yer aldığı K4 sütunu ile ‘Yaşam Dönemi Maliyeti – (K5) ’ kriterinin bulunduğu K5 satırının kesişim hücresi elemanında ‘5’ olarak belirtilmektedir. Bu durum, K4 satırı ile K5 sütununun kesişim hücresi elemanında ise tersi biçimde 1/5 olarak belirtilmektedir.

PV Malzemenin Elektrik Üretim Düzeyi (K4) – Etkin PV Panel Yüzey Alanı (K6) karşılaştırması : Bu kıyaslamada her iki kriter de güneşe uyarlanabilir PV sistemin enerji üretimine etki etmektedir. Etki düzeyleri ise eşdeğer kabul edilebilir. Bu durum, Çizelge 6.1’ de verilen kriter puanlama matrisinde ‘PV Malzemenin Elektrik Üretim Düzeyi – (K4) ’ kriterinin yer aldığı K4 sütunu ile ‘Etkin PV Panel Yüzey Alanı – (K6) ’ kriterinin bulunduğu K6 satırının kesişim hücresi elemanında ‘1’ olarak belirtilmektedir. Bu durum, K4 satırı ile K6 sütununun kesişim hücresi elemanında da 1 olarak belirtilmektedir.

PV Malzemenin Elektrik Üretim Düzeyi (K4) – Güneşe Uyarlanma Düzeyi (K7) karşılaştırması : Önceki bölümlerde yapılan kıyaslamalarda ifade edildiği gibi bu sistemler için güneşe uyarlanma düzeyinin maksimum düzeylere yükseltilmesi amacın gerçekleşmesi bağlamında temel hedeflerden biri olmaktadır. Bu doğrultuda güneşe uyarlanma düzeyi kriteri, PV malzemenin elektrik üretim düzeyi kriterine göre çok daha fazla önemli olur. Bu durum, Çizelge 6.1’ de verilen kriter puanlama matrisinde

‘PV Malzemenin Elektrik Üretim Düzeyi – (K4) ’ kriterinin yer aldığı K4 sütunu ile ‘Güneşe Uyarlanma Düzeyi – (K7) ’ kriterinin bulunduğu K7 satırının kesişim hücresi elemanında ‘7’ olarak belirtilmektedir. Bu durum, K4 satırı ile K7 sütununun kesişim hücresi elemanında ise tersi biçimde 1/7 olarak belirtilmektedir.

PV Malzemenin Elektrik Üretim Düzeyi (K4) – Güneş Hareketine Tepki Oluşturma Süresi (K8) karşılaştırması : Önceki bölümlerde yapılan kıyaslamalarda ifade edildiği gibi bu sistemlerde güneş hareketine tepki oluşturma süresi, sistemin güneşe uyarlanma düzeyini belirlemede önemli parametrelerden biridir. Bu durum, Çizelge 6.1’ de verilen kriter puanlama matrisinde ‘PV Malzemenin Elektrik Üretim Düzeyi – (K4) ’ kriterinin yer aldığı K4 sütunu ile ‘Güneş Hareketine Tepki Oluşturma Süresi – (K8) ’ kriterinin bulunduğu K8 satırının kesişim hücresi elemanında ‘7’ olarak belirtilmektedir. Bu durum, K4 satırı ile K8 sütununun kesişim hücresi elemanında ise tersi biçimde 1/7 olarak belirtilmektedir.

Yaşam Dönemi Maliyeti (K5) – Etkin PV Panel Yüzey Alanı (K6) karşılaştırması : Önceki bölümlerde yapılan ikili kıyaslamalarda belirtildiği gibi bu sistemler için maliyet kriteri çok fazla önem taşıdığından etkin PV panel yüzey alanından önemli olur. PV panelin aktif yüzey alanı artışı, sistemin enerji üretimini artırarak katkı sağlasa da kurulum, bakım, onarım maliyetleri zaten yeterince yüksek olan sistem için maliyete üzerinde daha fazla durmak daha doğru olabilmektedir. Bu sebeplerden hareketle, Çizelge 6.1’ de verilen kriter puanlama matrisinde ‘Etkin PV Panel Yüzey Alanı – (K6) ’ kriterinin yer aldığı K6 sütunu ile ‘Yaşam Dönemi Maliyeti – (K5) ’ kriterinin bulunduğu K5 satırının kesişim hücresi elemanında ‘7’ olarak belirtilmektedir. Bu durum, K6 satırı ile K5 sütununun kesişim hücresi elemanında ise tersi biçimde 1/7 olarak belirtilmektedir.

Yaşam Dönemi Maliyeti (K5) – Güneşe Uyarlanma Düzeyi (K7) karşılaştırması : Güneşe uyarlanan PV sistemin temel amaçlarından biri güneşe uyarlanabilme hassasiyetini maksimum seviyelere çıkarırken maliyetinde optimum düzeyde kalmasını sağlamaktır. Bu bağlamda bu iki kriterin sistem performansı için eşdeğer öneme sahip oldukları söylenebilir. Bu durum, Çizelge 6.1’ de verilen kriter puanlama matrisinde ‘Yaşam Dönemi Maliyeti – (K5) ’ kriterinin yer aldığı K5 sütunu ile ‘Güneşe Uyarlanma Düzeyi – (K7) ’ kriterinin bulunduğu K7 satırının kesişim hücresi elemanında ‘1’ olarak belirtilmektedir. Bu durum, K5 satırı ile K7 sütununun kesişim hücresi elemanında da 1 olarak belirtilmektedir.

Yaşam Dönemi Maliyeti (K5) – Güneş Hareketine Tepki Oluşturma Süresi (K8) karşılaştırması : Güneş hareketine tepki oluşturma süresi, PV sistemin güneşe uyarlanma düzeyini doğrudan etkileyen en önemli parametre olarak kabul edilebilir. Maliyet kriteri de çok fazla önem taşıdığından bu iki kriter sistem performansı için eşdeğer öneme sahiptir. Bu durum, Çizelge 6.1’ de verilen kriter puanlama matrisinde ‘Yaşam Dönemi Maliyeti – (K5) ’ kriterinin yer aldığı K5 sütunu ile ‘Güneş Hareketine Tepki Oluşturma Süresi – (K8) ’ kriterinin bulunduğu K8 satırının kesişim hücresi elemanında ‘1’ olarak belirtilmektedir. Bu durum, K5 satırı ile K8 sütununun kesişim hücresi elemanında da 1 olarak belirtilmektedir.

Etkin PV Panel Yüzey Alanı (K6) – Güneşe Uyarlanma Düzeyi (K7) karşılaştırması : Önceki bölümlerde yapılan kıyaslamalarda ifade edildiği gibi bu sistemler için güneşe uyarlanma düzeyi, sistemin temel hedefi olan enerji performansını en fazla etkileyen kriterlerden biridir. Bu doğrultuda güneşe uyarlanma düzeyi kriteri, PV panelin etkin yüzey alanı kriterine göre daha fazla önemli olur. Bu durum, Çizelge 6.1’ de verilen kriter puanlama matrisinde ‘Etkin PV Panel Yüzey Alanı – (K6) ’ kriterinin yer aldığı K6 sütunu ile ‘Güneşe Uyarlanma Düzeyi – (K7) ’ kriterinin bulunduğu K7 satırının kesişim hücresi elemanında ‘6’ olarak belirtilmektedir. Bu durum, K6 satırı ile K7 sütununun kesişim hücresi elemanında ise tersi biçimde ‘1/6’ olarak belirtilmektedir.

Etkin PV Panel Yüzey Alanı (K6) – Güneş Hareketine Tepki Oluşturma Süresi (K8) karşılaştırması : Güneş hareketine tepki oluşturma süresinin PV sistemin güneşe uyarlanma düzeyini doğrudan etkilediği daha önceki bölümde belirtilmişti. Bu bağlamda güneş hareketine tepki oluşturma süresi kriteri, PV panelin etkin yüzey alanı kriterine göre daha fazla önemli olur. Bu durum, Çizelge 6.1’ de verilen kriter puanlama matrisinde ‘Etkin PV Panel Yüzey Alanı – (K6) ’ kriterinin yer aldığı K6 sütunu ile ‘Güneş Hareketine Tepki Oluşturma Süresi – (K8) ’ kriterinin bulunduğu K8 satırının kesişim hücresi elemanında ‘6’ olarak belirtilmektedir. Bu durum, K6 satırı ile K8 sütununun kesişim hücresi elemanında ise tersi biçimde ‘1/6’ olarak belirtilmektedir.

Güneşe Uyarlanma Düzeyi (K7) - Güneş Hareketine Tepki Oluşturma Süresi (K8) karşılaştırması : Güneşe uyarlanma düzeyinin belirlenmesi bir çok parametreye bağlıdır. Ayrıca, bu düzeyin maksimum seviyelere çıkarılmasında etkili olan en önemli parametrelerden biri güneş hareketine tepki oluşturma süresidir. Bu sebeplerden hareketle, güneşe uyarlanma düzeyinin güneş hareketine tepki oluşturma

süresine göre az miktarda fazla önem taşıdığı kabul edilebilir. Bu durum, Çizelge 6.1’ de verilen kriter puanlama matrisinde ‘Güneş Hareketine Tepki Oluşturma Süresi – (K8) ’ kriterinin yer aldığı K8 sütunu ile ‘Güneşe Uyarlanma Düzeyi – (K7) ’ kriterinin bulunduğu K7 satırının kesişim hücresi elemanında ‘2’ olarak belirtilmektedir. Bu durum, K8 satırı ile K7 sütununun kesişim hücresi elemanında ise tersi biçimde ‘1/2’ olarak belirtilmektedir.

Tüm değerlendirme kriterlerinin ikili karşılaştırılması ile elde edilen puanlar ve açıklamaları yukarıda verilmiştir. Bu aşamadan sonra, kriterlerin amaç için göreceli önem değerleri matrisinin elde edilmesi gerekmektedir. Kriterlerin amaç için göreceli önem değerleri matrisinin elde edilmesi için ikili karşılaştırma matrisinin her bir sütununun toplamı hesaplanır. Her bir matris elemanı bu sütun toplamına bölünür. Her sütun için bu işlem gerçekleştirilir. Kriterlerin amaç için göreceli önem değerleri matrisinin satır elemanlarının aritmetik ortalaması hesaplanır. Bu ortalama değerler önem derecelerini yüz üzerinden ifade ederek kriterlerin amaç için göreceli önem değerleri belirlenmiş olur (K.M.A.S, 2001 ; Saaty, 2008 ; Haas and Meixner, 2009) , (Çizelge 6.2).

**Çizelge 6.2** Kriterlerin amaç için göreceli önem değerleri matrisi

<b>Kriter</b>	<b>K1</b>	<b>K2</b>	<b>K3</b>	<b>K4</b>	<b>K5</b>	<b>K6</b>	<b>K7</b>	<b>K8</b>	<b>Göreceli önem vektörü (W)</b>
<b>K1</b>	0,027	0,024	0,007	0,035	0,030	0,038	0,048	0,022	$0,231/8 = 0,029$
<b>K2</b>	0,243	0,213	0,137	0,212	0,209	0,228	0,241	0,179	$1,662/8 = 0,208$
<b>K3</b>	0,135	0,053	0,034	0,012	0,052	0,013	0,034	0,026	$0,359/8 = 0,045$
<b>K4</b>	0,027	0,036	0,103	0,035	0,042	0,038	0,034	0,026	$0,340/8 = 0,043$
<b>K5</b>	0,189	0,213	0,137	0,176	0,209	0,190	0,241	0,179	$1,534/8 = 0,192$
<b>K6</b>	0,027	0,036	0,103	0,035	0,042	0,038	0,040	0,030	$0,350/8 = 0,044$

**Çizelge 6.2 (devam):** Kriterlerin amaç için göreceli önem değerleri matrisi

<b>K7</b>	0,135	0,213	0,240	0,247	0,209	0,228	0,241	0,359	1,871/8 =0,234
<b>K8</b>	0,216	0,213	0,240	0,247	0,209	0,228	0,120	0,179	1,652/8 =0,207

Tutarlılık oranı hesabı :

$$\begin{bmatrix} 1 & 1/9 & 1/5 & 1 & 1/7 & 1 & 1/5 & 1/8 \\ 9 & 1 & 4 & 6 & 1 & 6 & 1 & 1 \\ 5 & 1/4 & 1 & 1/3 & 1/4 & 1/3 & 1/7 & 1/7 \\ 1 & 1/6 & 3 & 1 & 1/5 & 1 & 1/7 & 1/7 \\ 7 & 1 & 4 & 5 & 1 & 5 & 1 & 1 \\ 1 & 1/6 & 3 & 1 & 1/5 & 1 & 1/6 & 1/6 \\ 5 & 1 & 7 & 7 & 1 & 6 & 1 & 2 \\ 8 & 1 & 7 & 7 & 1 & 6 & 1/2 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0,029 \\ 0,208 \\ 0,045 \\ 0,043 \\ 0,192 \\ 0,044 \\ 0,234 \\ 0,207 \end{bmatrix}$$

Satır toplamı  
(V)

$$\begin{aligned}
 & 0,029 + 0,023 + 0,009 + 0,043 + 0,027 + 0,044 + 0,047 + 0,026 = 0,247 \\
 & 0,260 + 0,208 + 0,180 + 0,255 + 0,192 + 0,263 + 0,234 + 0,207 = 1,798 \\
 & 0,144 + 0,052 + 0,045 + 0,014 + 0,048 + 0,015 + 0,033 + 0,030 = 0,381 \\
 & 0,029 + 0,035 + 0,135 + 0,043 + 0,038 + 0,044 + 0,033 + 0,030 = 0,386 \\
 = & 0,202 + 0,208 + 0,180 + 0,213 + 0,192 + 0,219 + 0,234 + 0,207 = 1,653 \\
 & 0,029 + 0,035 + 0,135 + 0,043 + 0,038 + 0,044 + 0,039 + 0,034 = 0,396 \\
 & 0,144 + 0,208 + 0,314 + 0,298 + 0,192 + 0,263 + 0,234 + 0,413 = 2,066 \\
 & 0,231 + 0,208 + 0,314 + 0,298 + 0,192 + 0,263 + 0,117 + 0,207 = 1,829
 \end{aligned}$$

$V / W$ $0,247 / 0,029 = 8,556$ $1,798 / 0,208 = 8,654$ $0,381 / 0,045 = 8,484$ $0,386 / 0,043 = 9,071$ $1,653 / 0,192 = 8,621$ $0,396 / 0,044 = 9,051$ $2,066 / 0,234 = 8,833$ $1,829 / 0,207 = 8,856$	$\lambda_{\max} = ( 8,556 + 8,654 + 8,484 + 9,071 +$ $8,621 + 9,051 + 8,833 + 8,856 ) / 8$ $= 70,126 / 8$ $= 8,766$ $\text{Tutarlılık göstergesi} = ( \lambda_{\max} - n ) / (n-1)$ $= ( 8,766 - 8 ) / (8-1)$ $= 0,766 / 7$ $= 0,109$
---	--

$$\text{Tutarlılık Oranı} = \text{Tutarlılık Göstergesi} / \text{Rassallık Göstergesi}$$

$$\text{Tutarlılık Oranı} = 0,109 / 1,41 = 0,078 < 0,1 \text{ olduğu için matris tutarlıdır.}$$

### 6.3 Uygulamaların Her Bir Kriter için Görelî Önem Değerlerinin Belirlenmesi

Kriterlerin amaç için görelî önem değerlerinin belirlendiği ve tutarlılık oranının sağlandığı aşamadan sonra değerlendirilecek uygulamalar, her bir kriter göre karşılaştırılarak görelî önem değerleri belirlenir. Çalışmanın bu kısmında dördüncü bölümde detaylı biçimde tanıtılan güneşe uyarlı cephe uygulamaları, her bir kriter göre birbirleri ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Sonra her kriter için uygulamaların görelî önem değerleri matrisi elde edilerek görelî önem vektörleri hesaplanmıştır. Son olarak karşılaştırma matrislerinin tutarlılık oranı hesabı gerçekleştirilerek güneşe uyarlı cephe uygulamalarının önem değerleri belirlenmiştir.



**Cephe uygulamalarının 'K1' (Güneş kontrolü ve doğal aydınlatma) kriteri için görelî önem değeri** (Çizelge 6.3, Çizelge 6.4)

<p><b>Önem Puanı</b></p> <p>1-Eşdeğer Önem  3-Az miktarda daha fazla önem  5-Esaslî veya kuvvetli derecede daha fazla önem  7-İspatlanmış ve çok kuvvetli derecede daha fazla önem  9-Mutlak ve aşırı derecede daha fazla önem  2, 4, 6, 8-İki yakın değeri arasındaki orta değerler</p>	<p><b>Cephe Uygulaması</b></p> <p>U1-Arab Institute  U2-River House  U3-Architecture Science and Ecology Center  U4-Al Bahr Towers  U5-IBA Soft House  U6-Henning Larsen's University Building  U7-The House of Natural Resources</p>
--	---

**Çizelge 6.3** K1 kriterine göre cephe uygulaması karşılaştırma matrisi

Kriter K1	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7
U1	1	3	1/5	3	1/6	1	1/7
U2	1/3	1	1/5	3	1/5	4	1/7
U3	5	5	1	7	1	6	1/3
U4	1/3	1/3	1/7	1	1/6	1/2	1/7
U5	6	5	1	6	1	7	1/3
U6	1	1/4	1/6	2	1/7	1	1/8
U7	7	7	3	7	3	8	1
<b>Sütun toplamı</b>	20,667	21,583	5,710	29,000	5,676	27,500	2,220

**Çizelge 6.4** Cephe uygulamalarının K1 kriteri için görelî önem değeri matrisi

Kriter K1	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	Görelî önem vektörü (W) (Satır toplamı/7)
U1	0,048	0,139	0,035	0,103	0,029	0,036	0,064	0,456/7= 0,065
U2	0,016	0,046	0,035	0,103	0,035	0,145	0,064	0,446/7= 0,064
U3	0,242	0,232	0,175	0,241	0,176	0,218	0,150	1,435/7= 0,205
U4	0,016	0,015	0,025	0,034	0,029	0,018	0,064	0,203/7= 0,029
U5	0,290	0,232	0,175	0,207	0,176	0,255	0,150	1,485/7= 0,212

**Çizelge 6.4 (devam):** Cephe uygulamalarının K1 kriteri için görelî önem değeri matrisi

<b>U6</b>	0,048	0,012	0,029	0,069	0,025	0,036	0,056	0,276/7= 0,039
<b>U7</b>	0,339	0,324	0,525	0,241	0,529	0,291	0,450	2,700/7= 0,386
<b>Toplam</b>	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	7/7= 1,000

*Tutarlılık oranı hesabı :*

$$\begin{bmatrix} 1 & 3 & 1/5 & 3 & 1/6 & 1 & 1/7 \\ 1/3 & 1 & 1/5 & 3 & 1/5 & 4 & 1/7 \\ 5 & 5 & 1 & 7 & 1 & 6 & 1/3 \\ 1/3 & 1/3 & 1/7 & 1 & 1/6 & 1/2 & 1/7 \\ 6 & 5 & 1 & 6 & 1 & 7 & 1/3 \\ 1 & 1/4 & 1/6 & 2 & 1/7 & 1 & 1/8 \\ 7 & 7 & 3 & 7 & 3 & 8 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0,065 \\ 0,064 \\ 0,205 \\ 0,029 \\ 0,212 \\ 0,039 \\ 0,386 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} & 0,065 + 0,191 + 0,041 + 0,087 + 0,035 + 0,039 + 0,055 = 0,514 \\ & 0,022 + 0,064 + 0,041 + 0,087 + 0,042 + 0,158 + 0,055 = 0,469 \\ & 0,326 + 0,319 + 0,205 + 0,203 + 0,212 + 0,237 + 0,129 = 0,381 \\ & 0,022 + 0,021 + 0,029 + 0,029 + 0,035 + 0,020 + 0,055 = 0,211 \\ = & 0,391 + 0,319 + 0,205 + 0,174 + 0,212 + 0,276 + 0,129 = 1,705 \\ & 0,065 + 0,016 + 0,034 + 0,058 + 0,030 + 0,039 + 0,048 = 0,291 \\ & 0,456 + 0,446 + 0,615 + 0,203 + 0,636 + 0,315 + 0,386 = 3,057 \end{aligned}$$

V / W
0,514 / 0,065 = 7,893
0,469 / 0,064 = 7,355
1,629 / 0,205 = 7,950
0,211 / 0,029 = 7,290
1,705 / 0,212 = 8,037
0,291 / 0,039 = 7,385
3,057 / 0,386 = 7,927

$$\lambda_{\max} = (7,893 + 7,355 + 7,950 + 7,290 + 8,037 + 7,385 + 7,927) / 7$$

$$= 53,838 / 7$$

$$= 7,691$$

$$\text{Tutarlılık göstergesi} = (\lambda_{\max} - n) / (n-1)$$

$$= (7,691 - 7) / (7-1)$$

$$= 0,691 / 6$$

$$= 0,115$$

n=7 için RG=1,32 (Çizelge 3.4)

$$\text{TO} = \text{TG} / \text{RG}$$

TO = 0,115 / 1,32 = 0,087 < 0,1 olduğu için matris tutarlıdır.

**Cephe uygulamalarının 'K2' (Enerji kazancı) kriteri için görelî önem değeri**  
(Çizelge 6.5, Çizelge 6.6)

**Önem Puanı**

- 1-Eşdeğer Önem
- 3-Az miktarda daha fazla önem
- 5-Esaslî veya kuvvetli derecede daha fazla önem
- 7-İspatlanmış ve çok kuvvetli derecede daha fazla önem
- 9-Mutlak ve aşırı derecede daha fazla önem
- 2, 4, 6, 8-İki yakın değer arasındaki orta değerler

**Cephe Uygulaması**

- U1-Arab Institute
- U2-River House
- U3-Architecture Science and Ecology Center
- U4-Al Bahr Towers
- U5-IBA Soft House
- U6-Henning Larsen's University Building
- U7-The House of Natural Resources

**Çizelge 6.5** K2 kriterine göre cephe uygulaması karşılaştırma matrisi

Kriter K2	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7
U1	1	1/5	1/7	1/2	1/6	1	1/8
U2	5	1	1/5	5	1/4	5	1/8
U3	7	5	1	7	2	7	1/2
U4	2	1/5	1/7	1	1/6	1/2	1/8
U5	6	4	1/2	6	1	6	1/4
U6	1	1/5	1/7	2	1/6	1	1/8
U7	8	8	2	8	4	8	1

**Çizelge 6.5 (devam):** K2 kriterine göre cephe uygulaması karşılaştırma matrisi

<b>Sütun toplamı</b>	30	18,600	4,13	29,500	7,750	28,500	2,250
----------------------	----	--------	------	--------	-------	--------	-------

**Çizelge 6.6** Cephe uygulamalarının K2 kriteri için görelî önem değerleri matrisi

<b>Kriter K2</b>	<b>U1</b>	<b>U2</b>	<b>U3</b>	<b>U4</b>	<b>U5</b>	<b>U6</b>	<b>U7</b>	<b>Görelî önem vektörü (W) (Satır toplamı/7)</b>
<b>U1</b>	0,033	0,011	0,035	0,017	0,022	0,035	0,056	0,208/7= 0,030
<b>U2</b>	0,167	0,054	0,048	0,169	0,032	0,175	0,056	0,702/7= 0,100
<b>U3</b>	0,233	0,269	0,242	0,237	0,258	0,246	0,222	1,708/7= 0,244
<b>U4</b>	0,067	0,011	0,035	0,034	0,022	0,018	0,056	0,241/7= 0,034
<b>U5</b>	0,200	0,215	0,121	0,203	0,129	0,211	0,111	1,190/7= 0,170
<b>U6</b>	0,033	0,011	0,035	0,068	0,022	0,035	0,056	0,259/7= 0,037
<b>U7</b>	0,267	0,430	0,484	0,271	0,516	0,281	0,444	2,694/7= 0,385
<b>Toplam</b>	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	7/7= 1,000

Tutarlılık oranı hesabı :

$$\begin{bmatrix} 1 & 1/5 & 1/7 & 1/2 & 1/6 & 1 & 1/8 \\ 5 & 1 & 1/5 & 5 & 1/4 & 5 & 1/8 \\ 7 & 5 & 1 & 7 & 2 & 7 & 1/2 \\ 2 & 1/5 & 1/7 & 1 & 1/6 & 1/2 & 1/8 \\ 6 & 4 & 1/2 & 6 & 1 & 6 & 1/4 \\ 1 & 1/5 & 1/7 & 2 & 1/6 & 1 & 1/8 \\ 8 & 8 & 2 & 8 & 4 & 8 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0,030 \\ 0,100 \\ 0,244 \\ 0,034 \\ 0,170 \\ 0,037 \\ 0,385 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
& 0,030 + 0,020 + 0,035 + 0,017 + 0,028 + 0,037 + 0,048 = 0,215 \\
& 0,148 + 0,100 + 0,049 + 0,172 + 0,043 + 0,185 + 0,048 = 0,745 \\
& 0,208 + 0,501 + 0,244 + 0,241 + 0,340 + 0,259 + 0,192 = 1,985 \\
& 0,059 + 0,020 + 0,035 + 0,034 + 0,028 + 0,018 + 0,048 = 0,244 \\
= & \\
& 0,178 + 0,401 + 0,122 + 0,206 + 0,170 + 0,222 + 0,096 = 1,395 \\
& 0,030 + 0,020 + 0,035 + 0,069 + 0,028 + 0,037 + 0,048 = 0,267 \\
& 0,237 + 0,802 + 0,488 + 0,275 + 0,680 + 0,296 + 0,385 = 3,163
\end{aligned}$$

$$\begin{array}{l}
V / W \\
0,215 / 0,030 = 7,248 \\
0,745 / 0,100 = 7,429 \\
1,985 / 0,244 = 8,135 \\
0,244 / 0,034 = 7,088 \\
1,395 / 0,170 = 8,205 \\
0,267 / 0,037 = 7,218 \\
3,163 / 0,385 = 8,219
\end{array}$$

$$\begin{aligned}
\lambda_{\max} &= (7,248 + 7,429 + 8,135 + 7,088 + \\
& 8,205 + 7,218 + 8,219) / 7 \\
&= 53,541 / 7 \\
&= 7,649
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{Tutarlılık göstergesi} &= (\lambda_{\max} - n) / (n-1) \\
&= (7,649 - 7) / (7-1) \\
&= 0,649 / 6 \\
&= 0,108
\end{aligned}$$

$$n=7 \text{ için } RG=1,32 \text{ (Çizelge 3.4)}$$

$$TO = TG / RG$$

$$TO = 0,108 / 1,32 = 0,082 < 0,1 \text{ olduğu için}$$

matris tutarlıdır.

**Cephe uygulamalarının 'K3' (Strüktürel etkinlik) kriteri için görelî önem değeri**  
(Çizelge 6.7, Çizelge 6.8)

**Önem Puanı**

- 1-Eşdeğer Önem
- 3-Az miktarda daha fazla önem
- 5-Esaslı veya kuvvetli derecede daha fazla önem
- 7-İspatlanmış ve çok kuvvetli derecede daha fazla önem
- 9-Mutlak ve aşırı derecede daha fazla önem
- 2, 4, 6, 8-İki yakın değer arasındaki orta değerler

**Cephe Uygulaması**

- U1-Arab Institute
- U2-River House
- U3-Architecture Science and Ecology Center
- U4-Al Bahr Towers
- U5-IBA Soft House
- U6-Henning Larsen's University Building
- U7-The House of Natural Resources

**Çizelge 6.7** K3 kriterine göre cephe uygulaması karşılaştırma matrisi

<b>Kriter K3</b>	<b>U1</b>	<b>U2</b>	<b>U3</b>	<b>U4</b>	<b>U5</b>	<b>U6</b>	<b>U7</b>
<b>U1</b>	1	6	2	8	4	6	4
<b>U2</b>	1/6	1	1/4	5	1/4	4	1/4
<b>U3</b>	1/2	4	1	6	2	4	2
<b>U4</b>	1/8	1/5	1/6	1	1/4	1/2	1/5
<b>U5</b>	1/4	4	1/2	4	1	3	1
<b>U6</b>	1/6	1/4	1/4	2	1/3	1	1/3
<b>U7</b>	1/4	4	1/2	5	1	3	1
<b>Sütun toplamı</b>	2,458	19,450	4,67	31,000	8,833	21,500	8,783

**Çizelge 6.8** Cephe uygulamalarının K3 kriteri için göreceli önem değerleri matrisi

<b>Kriter K3</b>	<b>U1</b>	<b>U2</b>	<b>U3</b>	<b>U4</b>	<b>U5</b>	<b>U6</b>	<b>U7</b>	<b>Göreceli önem vektörü (W)</b> (Satır toplamı/7)
<b>U1</b>	0,407	0,308	0,429	0,258	0,453	0,279	0,455	2,589/7= 0,370
<b>U2</b>	0,068	0,051	0,054	0,161	0,028	0,186	0,028	0,577/7= 0,082
<b>U3</b>	0,203	0,206	0,214	0,194	0,226	0,186	0,228	1,457/7= 0,208
<b>U4</b>	0,051	0,010	0,036	0,032	0,028	0,023	0,023	0,203/7= 0,029
<b>U5</b>	0,102	0,206	0,107	0,129	0,113	0,140	0,114	0,910/7= 0,130
<b>U6</b>	0,068	0,013	0,054	0,065	0,038	0,047	0,038	0,321/7= 0,046
<b>U7</b>	0,102	0,206	0,107	0,161	0,113	0,140	0,114	0,942/7= 0,135
<b>Toplam</b>	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	7/7= 1,000

Tutarlılık oranı hesabı :

$$\begin{bmatrix} 1 & 6 & 2 & 8 & 4 & 6 & 4 \\ 1/6 & 1 & 1/4 & 5 & 1/4 & 4 & 1/4 \\ 1/2 & 4 & 1 & 6 & 2 & 4 & 2 \\ 1/8 & 1/5 & 1/6 & 1 & 1/4 & 1/2 & 1/5 \\ 1/4 & 4 & 1/2 & 4 & 1 & 3 & 1 \\ 1/6 & 1/4 & 1/4 & 2 & 1/3 & 1 & 1/3 \\ 1/4 & 4 & 1/2 & 5 & 1 & 3 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0,370 \\ 0,082 \\ 0,208 \\ 0,029 \\ 0,130 \\ 0,046 \\ 0,135 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} & 0,370 + 0,494 + 0,416 + 0,232 + 0,520 + 0,275 + 0,539 = 2,847 \\ & 0,062 + 0,082 + 0,052 + 0,145 + 0,033 + 0,183 + 0,034 = 0,591 \\ & 0,185 + 0,330 + 0,208 + 0,174 + 0,260 + 0,183 + 0,269 = 1,610 \\ & 0,046 + 0,016 + 0,035 + 0,029 + 0,033 + 0,023 + 0,027 = 0,209 \\ = & 0,092 + 0,330 + 0,104 + 0,116 + 0,130 + 0,138 + 0,135 = 1,045 \\ & 0,062 + 0,021 + 0,052 + 0,058 + 0,043 + 0,046 + 0,045 = 0,326 \\ & 0,092 + 0,330 + 0,104 + 0,145 + 0,130 + 0,138 + 0,135 = 1,074 \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} \text{V / W} \\ 2,847 / 0,370 = 7,696 \\ 0,591 / 0,082 = 7,171 \\ 1,610 / 0,208 = 7,734 \\ 0,209 / 0,029 = 7,186 \\ 1,045 / 0,130 = 8,035 \\ 0,326 / 0,046 = 7,121 \\ 1,074 / 0,135 = 7,975 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} \lambda_{\max} &= ( 7,696 + 7,171 + 7,734 + 7,186 + \\ & 8,035 + 7,121 + 7,975 ) / 7 \\ &= 52,917 / 7 \\ &= 7,560 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Tutarlılık göstergesi} &= ( \lambda_{\max} - n ) / ( n-1 ) \\ &= ( 7,560 - 7 ) / ( 7-1 ) \\ &= 0,560 / 6 \\ &= 0,093 \end{aligned}$$

$$n=7 \text{ için } RG=1,32 \text{ (Çizelge 3.4)}$$

$$TO = TG / RG$$

$$TO = 0,093 / 1,32 = 0,071 < 0,1 \text{ olduğu için}$$

matris tutarlıdır.

**Cephe uygulamalarının 'K4' (PV malzemenin elektrik üretim düzeyi) kriteri için görelî önem değeri**(Çizelge 6.9, Çizelge 6.10)

İncelenen güneşe uyarlanabilir cephe uygulama örneklerinden fotovoltaik sistemin mevcut olmadığı örnekler için bu kriter değerlendirilmeyecektir. Fotovoltaik sistemin mevcut olduğu uygulamalar kendi arasında değerlendirilecektir.

**Önem Puanı**

- 1-Eşdeğer Önem
- 3-Az miktarda daha fazla önem
- 5-Esash veya kuvvetli derecede daha fazla önem
- 7-İspatlanmış ve çok kuvvetli derecede daha fazla önem
- 9-Mutlak ve aşırı derecede daha fazla önem
- 2, 4, 6, 8-İki yakın değeri arasındaki orta değerler

**Cephe Uygulaması**

- U2-River House
- U3-Architecture Science and Ecology Center
- U5-IBA Soft House
- U7-The House of Natural Resources

**Çizelge 6.9** K4 kriterine göre cephe uygulaması karşılaştırma matrisi

Kriter K4	U2	U3	U5	U7
U2	1	1/3	1/5	1/7
U3	3	1	1/3	1/5
U5	5	3	1	1/3
U7	7	5	3	1
Sütun toplamı	16,000	9,333	4,53	1,676

**Çizelge 6.10** Cephe uygulamalarının K4 kriteri için görelî önem değeri matrisi

Kriter K4	U2	U3	U5	U7	Görelî önem vektörü (W) (Satır toplamı/4)
U2	0,063	0,036	0,044	0,085	0,228/4= 0,057
U3	0,188	0,107	0,074	0,119	0,487/4= 0,122
U5	0,313	0,321	0,221	0,199	1,053/4= 0,263
U7	0,438	0,536	0,662	0,597	2,232/4= 0,558
Toplam	1,000	1,000	1,000	1,000	4/4= 1,000



Tutarlılık oranı hesabı :

$$\begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 1/5 & 1/7 \\ 3 & 1 & 1/3 & 1/5 \\ 5 & 3 & 1 & 1/3 \\ 7 & 5 & 3 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0,057 \\ 0,122 \\ 0,263 \\ 0,558 \end{bmatrix}$$

Satır toplamı  
(V)

$$\begin{aligned} 0,057 + 0,041 + 0,053 + 0,080 &= 0,230 \\ 0,171 + 0,122 + 0,088 + 0,112 &= 0,492 \\ 0,284 + 0,366 + 0,263 + 0,186 &= 1,099 \\ 0,398 + 0,609 + 0,790 + 0,558 &= 2,356 \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} \text{V / W} \\ 0,230 / 0,057 = 4,041 \\ 0,492 / 0,122 = 4,036 \\ 1,099 / 0,263 = 4,175 \\ 2,356 / 0,558 = 4,222 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} \lambda_{\max} &= ( 4,041 + 4,036 + 4,175 + 4,222 ) / 4 \\ &= 16,474 / 4 = 4,118 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Tutarlılık göstergesi} &= ( \lambda_{\max} - n ) / (n-1) \\ &= ( 4,118 - 4 ) / (4-1) \\ &= 0,118 / 3 = 0,039 \end{aligned}$$

n=4 için RG=0,9 (Çizelge 3.4)

$$\text{TO} = \text{TG} / \text{RG}$$

$$\text{TO} = 0,039 / 0,9 = 0,044 < 0,1 \text{ olduğu için matris tutarlıdır.}$$

**Cephe uygulamalarının 'K5' (Yaşam dönemi maliyeti) kriteri için görelî önem değeri** (Çizelge 6.11, Çizelge 6.12)

**Önem Puanı**

- 1-Eşdeğer Önem  
 3-Az miktarda daha fazla önem  
 5-Esaslı veya kuvvetli derecede daha fazla önem  
 7-İspatlanmış ve çok kuvvetli derecede daha fazla önem  
 9-Mutlak ve aşırı derecede daha fazla önem  
 2, 4, 6, 8-İki yakın değer arasındaki orta değerler

**Cephe Uygulaması**

- U1-Arab Institute  
 U2-River House  
 U3-Architecture Science and Ecology Center  
 U4-Al Bahr Towers  
 U5-IBA Soft House  
 U6-Henning Larsen's University Building  
 U7-The House of Natural Resources

**Çizelge 6.11** K5 kriterine göre cephe uygulaması karşılaştırma matrisi

Kriter K5	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7
U1	1	5	3	7	4	6	5
U2	1/5	1	1/4	4	1/2	2	1
U3	1/3	4	1	5	4	5	4
U4	1/7	1/4	1/5	1	1/4	1/3	1/3
U5	1/4	2	1/4	4	1	2	2
U6	1/6	1/2	1/5	3	1/2	1	1/3
U7	1/5	1	1/4	3	1/2	3	1
<b>Sütun toplamı</b>	2,293	13,750	5,15	27,000	10,750	19,333	13,667

**Çizelge 6.12** Cephe uygulamalarının K5 kriteri için görelî önem değerleri matrisi

Kriter K5	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	Görelî önem vektörü (W) (Satır toplamı/7)
U1	0,436	0,364	0,583	0,259	0,372	0,310	0,366	2,690/7= 0,384
U2	0,087	0,073	0,049	0,148	0,047	0,103	0,073	0,580/7= 0,083
U3	0,145	0,291	0,194	0,185	0,372	0,259	0,293	1,739/7= 0,248
U4	0,062	0,018	0,039	0,037	0,023	0,017	0,024	0,221/7= 0,032
U5	0,109	0,145	0,049	0,148	0,093	0,103	0,146	0,794/7= 0,113

**Çizelge 6.12 (devam):** Cephe uygulamalarının K5 kriteri için görelî önem değerleri matrisi

<b>U6</b>	0,073	0,036	0,039	0,111	0,047	0,052	0,024	0,382/7= 0,055
<b>U7</b>	0,087	0,073	0,049	0,111	0,047	0,155	0,073	0,594/7= 0,085
<b>Toplam</b>	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	7/7= 1,000

Tutarlılık oranı hesabı :

$$\begin{bmatrix} 1 & 5 & 3 & 7 & 4 & 6 & 5 \\ 1/5 & 1 & 1/4 & 4 & 1/2 & 2 & 1 \\ 1/3 & 4 & 1 & 5 & 4 & 5 & 4 \\ 1/7 & 1/4 & 1/5 & 1 & 1/4 & 1/3 & 1/3 \\ 1/4 & 2 & 1/4 & 4 & 1 & 2 & 2 \\ 1/6 & 1/2 & 1/5 & 3 & 1/2 & 1 & 1/3 \\ 1/5 & 1 & 1/4 & 3 & 1/2 & 3 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0,384 \\ 0,083 \\ 0,248 \\ 0,032 \\ 0,113 \\ 0,055 \\ 0,085 \end{bmatrix}$$

$$0,384 + 0,414 + 0,745 + 0,221 + 0,454 + 0,327 + 0,425 = 2,970$$

$$0,077 + 0,083 + 0,062 + 0,126 + 0,057 + 0,109 + 0,085 = 0,599$$

$$0,128 + 0,331 + 0,248 + 0,158 + 0,454 + 0,273 + 0,340 = 1,932$$

$$0,055 + 0,021 + 0,050 + 0,032 + 0,028 + 0,018 + 0,028 = 0,232$$

=

$$0,096 + 0,166 + 0,062 + 0,126 + 0,113 + 0,109 + 0,170 = 0,843$$

$$0,064 + 0,041 + 0,050 + 0,095 + 0,057 + 0,055 + 0,028 = 0,390$$

$$0,077 + 0,083 + 0,062 + 0,095 + 0,057 + 0,164 + 0,085 = 0,622$$

V / W
2,970 / 0,384 = 7,730
0,599 / 0,083 = 7,231
1,932 / 0,248 = 7,776
0,232 / 0,032 = 7,332
0,843 / 0,113 = 7,428
0,390 / 0,055 = 7,145
0,622 / 0,085 = 7,322

$$\lambda_{\max} = ( 7,730 + 7,231 + 7,776 + 7,332 + 7,428 + 7,145 + 7,322 ) / 7$$

$$= 51,963 / 7$$

$$= 7,423$$

$$\text{Tutarlılık göstergesi} = ( \lambda_{\max} - n ) / ( n-1 )$$

$$= ( 7,423 - 7 ) / ( 7-1 )$$

$$= 0,423 / 6$$

$$= 0,071$$

n=7 için RG=1,32 (Çizelge 3.4)

$$\text{TO} = \text{TG} / \text{RG}$$

TO = 0,071 / 1,32 = 0,053 < 0,1 olduğu için matris tutarlıdır.

**Cephe uygulamalarının 'K6' (Etkin PV panel yüzey alanı) kriteri için görelî önem değeri** (Çizelge 6.13, Çizelge 6.14)

İncelenen güneşe uyarlı cephe uygulama örneklerinden fotovoltaik sistemin mevcut olmadığı örnekler için bu kriter değerlendirilmeyecektir. Fotovoltaik sistemin mevcut olduğu uygulamalar kendi arasında değerlendirilecektir.

**Önem Puanı**

- 1-Eşdeğer Önem
- 3-Az miktarda daha fazla önem
- 5-Esaslı veya kuvvetli derecede daha fazla önem
- 7-İspatlanmış ve çok kuvvetli derecede daha fazla önem
- 9-Mutlak ve aşırı derecede daha fazla önem
- 2, 4, 6, 8-İki yakın değer arasındaki orta değerler

**Cephe Uygulaması**

- U2-River House
- U3-Architecture Science and Ecology Center
- U5-IBA Soft House
- U7-The House of Natural Resources

**Çizelge 6.13** K6 kriterine göre cephe uygulaması karşılaştırma matrisi

Kriter K6	U2	U3	U5	U7
U2	1	1/4	1/5	1/7
U3	4	1	1/3	1/5
U5	5	3	1	1/4
U7	7	5	4	1
<b>Sütun toplamı</b>	17,000	9,250	5,53	1,593

**Çizelge 6.14** Cephe uygulamalarının K6 kriteri için görelî önem değeri matrisi

<b>Kriter K6</b>	<b>U2</b>	<b>U3</b>	<b>U5</b>	<b>U7</b>	<b>Görelî önem vektörü (W)</b> (Satır toplamı/4)
<b>U2</b>	0,059	0,027	0,036	0,090	0,212/4= 0,053
<b>U3</b>	0,235	0,108	0,060	0,126	0,529/4= 0,132
<b>U5</b>	0,294	0,324	0,181	0,157	0,956/4= 0,239
<b>U7</b>	0,412	0,541	0,723	0,628	2,303/4= 0,576
<b>Toplam</b>	1,000	1,000	1,000	1,000	4/4= 1,000

Tutarlılık oranı hesabı :

$$\begin{bmatrix} 1 & 1/4 & 1/5 & 1/7 \\ 4 & 1 & 1/3 & 1/5 \\ 5 & 3 & 1 & 1/4 \\ 7 & 5 & 4 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0,053 \\ 0,132 \\ 0,239 \\ 0,576 \end{bmatrix}$$

Satır toplamı  
(V)

$$\begin{aligned} & 0,053 + 0,033 + 0,048 + 0,082 = 0,216 \\ = & 0,212 + 0,132 + 0,080 + 0,115 = 0,539 \\ & 0,265 + 0,397 + 0,239 + 0,144 = 1,044 \\ & 0,370 + 0,662 + 0,956 + 0,576 = 2,564 \end{aligned}$$

$$\left[ \begin{array}{c} V / W \\ 0,216 / 0,053 = 4,083 \\ 0,539 / 0,132 = 4,073 \\ 1,044 / 0,239 = 4,370 \\ 2,564 / 0,576 = 4,453 \end{array} \right] \quad \begin{array}{l} \lambda_{\max} = ( 4,083 + 4,073 + 4,370 + 4,453 ) / 4 \\ = 16,978 / 4 = 4,244 \\ \text{Tutarlılık göstergesi} = ( \lambda_{\max} - n ) / (n-1) \\ = ( 4,244 - 4 ) / (4-1) \\ = 0,244 / 3 = 0,081 \end{array}$$

n=4 için RG=0,9 (Çizelge 3.4)

$$TO = TG / RG$$

TO = 0,081 / 0,9 = 0,091 < 0,1 olduğu için matris tutarlıdır.

**Cephe uygulamalarının 'K7' (Güneş uyarlanma düzeyi) kriteri için görelî önem değeri** (Çizelge 6.15, Çizelge 6.16)

**Önem Puanı**

- 1-Eşdeğer Önem
- 3-Az miktarda daha fazla önem
- 5-Esash veya kuvvetli derecede daha fazla önem
- 7-İspatlanmış ve çok kuvvetli derecede daha fazla önem
- 9-Mutlak ve aşırı derecede daha fazla önem
- 2, 4, 6, 8-İki yakın değer arasındaki orta değerler

**Cephe Uygulaması**

- U1-Arab Institute
- U2-River House
- U3-Architecture Science and Ecology Center
- U4-Al Bahr Towers
- U5-IBA Soft House
- U6-Henning Larsen's University Building
- U7-The House of Natural Resources

**Çizelge 6.15** K7 kriterine göre cephe uygulaması karşılaştırma matrisi

Kriter K7	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7
U1	1	1/2	1/7	1/3	1/6	1/3	1/8
U2	2	1	1/5	1/2	1/4	1/2	1/6
U3	7	5	1	5	3	5	1/2
U4	3	2	1/5	1	1/4	1	1/5
U5	6	4	1/3	4	1	4	1/3
U6	3	2	1/5	1	1/4	1	1/5
U7	8	6	2	5	3	5	1

**Çizelge 6.15 (devam):** K7 kriterine göre cephe uygulaması karşılaştırma matrisi

<b>Sütun toplamı</b>	30,000	20,500	4,08	16,833	7,917	16,833	2,525
----------------------	--------	--------	------	--------	-------	--------	-------

**Çizelge 6.16** Cephe uygulamalarının K7 kriteri için göreceli önem değerleri matrisi

<b>Kriter K7</b>	<b>U1</b>	<b>U2</b>	<b>U3</b>	<b>U4</b>	<b>U5</b>	<b>U6</b>	<b>U7</b>	<b>Göreceli önem vektörü (W)</b> (Satır toplamı/7)
<b>U1</b>	0,033	0,024	0,035	0,020	0,021	0,020	0,050	0,203/7= 0,029
<b>U2</b>	0,067	0,049	0,049	0,030	0,032	0,030	0,066	0,322/7= 0,046
<b>U3</b>	0,233	0,244	0,245	0,297	0,379	0,297	0,198	1,894/7= 0,271
<b>U4</b>	0,100	0,098	0,049	0,059	0,032	0,059	0,079	0,476/7= 0,068
<b>U5</b>	0,200	0,195	0,082	0,238	0,126	0,238	0,132	1,210/7= 0,173
<b>U6</b>	0,100	0,098	0,049	0,059	0,032	0,059	0,079	0,476/7= 0,068
<b>U7</b>	0,267	0,293	0,491	0,297	0,379	0,297	0,396	2,419/7= 0,346
<b>Toplam</b>	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	7/7= 1,000

Tutarlılık oranı hesabı :

$$\begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 1/7 & 1/3 & 1/6 & 1/3 & 1/8 \\ 2 & 1 & 1/5 & 1/2 & 1/4 & 1/2 & 1/6 \\ 7 & 5 & 1 & 5 & 3 & 5 & 1/2 \\ 3 & 2 & 1/5 & 1 & 1/4 & 1 & 1/5 \\ 6 & 4 & 1/3 & 4 & 1 & 4 & 1/3 \\ 3 & 2 & 1/5 & 1 & 1/4 & 1 & 1/5 \\ 8 & 6 & 2 & 5 & 3 & 5 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0,029 \\ 0,046 \\ 0,271 \\ 0,068 \\ 0,173 \\ 0,068 \\ 0,346 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
& 0,029 + 0,023 + 0,039 + 0,023 + 0,029 + 0,023 + 0,043 = 0,208 \\
& 0,058 + 0,046 + 0,054 + 0,034 + 0,043 + 0,034 + 0,058 = 0,327 \\
& 0,203 + 0,230 + 0,271 + 0,340 + 0,519 + 0,340 + 0,173 = 2,075 \\
& 0,087 + 0,092 + 0,054 + 0,068 + 0,043 + 0,068 + 0,069 = 0,481 \\
= & 0,174 + 0,184 + 0,090 + 0,272 + 0,173 + 0,272 + 0,115 = 1,280 \\
& 0,087 + 0,092 + 0,054 + 0,068 + 0,043 + 0,068 + 0,069 = 0,481 \\
& 0,232 + 0,276 + 0,541 + 0,340 + 0,519 + 0,340 + 0,346 = 2,593
\end{aligned}$$

$$\left[ \begin{array}{c}
V / W \\
0,208 / 0,029 = 7,174 \\
0,327 / 0,046 = 7,117 \\
2,075 / 0,271 = 7,671 \\
0,481 / 0,068 = 7,075 \\
1,280 / 0,173 = 7,403 \\
0,481 / 0,068 = 7,075 \\
2,593 / 0,346 = 7,504
\end{array} \right]$$

$$\begin{aligned}
\lambda_{\max} &= ( 7,174 + 7,117 + 7,671 + 7,075 + \\
& 7,403 + 7,075 + 7,504 ) / 7 \\
&= 51,019 / 7 \\
&= 7,288
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{Tutarlılık göstergesi} &= ( \lambda_{\max} - n ) / (n-1) \\
&= ( 7,288 - 7 ) / (7-1) \\
&= 0,288 / 6 \\
&= 0,048
\end{aligned}$$

$$n=7 \text{ için } RG=1,32 \text{ (Çizelge 3.4)}$$

$$TO = TG / RG$$

$$TO = 0,048 / 1,32 = 0,036 < 0,1 \text{ olduğu için}$$

matris tutarlıdır.

**Cephe uygulamalarının 'K8' (Güneş hareketine tepki oluşturma süresi) kriteri için görelî önem değeri** (Çizelge 6.17, Çizelge 6.18)

**Önem Puanı**

1-Eşdeğer Önem  
3-Az miktarda daha fazla önem  
5-Esash veya kuvvetli derecede daha fazla önem  
7-İspatlanmış ve çok kuvvetli derecede daha fazla önem  
9-Mutlak ve aşırı derecede daha fazla önem  
2, 4, 6, 8-İki yakın değer arasındaki orta değerler

**Cephe Uygulaması**

U1-Arab Institute  
U2-River House  
U3-Architecture Science and Ecology Center  
U4-Al Bahr Towers  
U5-IBA Soft House  
U6-Henning Larsen's University Building  
U7-The House of Natural Resources



**Çizelge 6.17** K8 kriterine göre cephe uygulaması karşılaştırma matrisi

<b>Kriter K8</b>	<b>U1</b>	<b>U2</b>	<b>U3</b>	<b>U4</b>	<b>U5</b>	<b>U6</b>	<b>U7</b>
<b>U1</b>	1	3	1/7	1/3	1/5	1/2	1/8
<b>U2</b>	1/3	1	1/5	1/4	1/4	1/2	1/7
<b>U3</b>	7	5	1	6	3	6	1/2
<b>U4</b>	3	4	1/6	1	1/4	1	1/7
<b>U5</b>	5	4	1/3	4	1	5	1/3
<b>U6</b>	2	2	1/6	1	1/5	1	1/7
<b>U7</b>	8	7	2	7	3	7	1
<b>Sütun toplamı</b>	26,333	26,000	4,01	19,583	7,900	21,000	2,387

**Çizelge 6.18** Cephe uygulamalarının K8 kriteri için göreceli önem değerleri matrisi

<b>Kriter K8</b>	<b>U1</b>	<b>U2</b>	<b>U3</b>	<b>U4</b>	<b>U5</b>	<b>U6</b>	<b>U7</b>	<b>Göreceli önem vektörü (W)</b> (Satır toplamı/7)
<b>U1</b>	0,038	0,115	0,036	0,017	0,025	0,024	0,052	0,308/7= 0,044
<b>U2</b>	0,013	0,038	0,050	0,013	0,032	0,024	0,060	0,229/7= 0,033
<b>U3</b>	0,266	0,192	0,249	0,306	0,380	0,286	0,209	1,889/7= 0,270
<b>U4</b>	0,114	0,154	0,042	0,051	0,032	0,048	0,060	0,500/7= 0,071
<b>U5</b>	0,190	0,154	0,083	0,204	0,127	0,238	0,140	1,135/7= 0,162
<b>U6</b>	0,076	0,077	0,042	0,051	0,025	0,048	0,060	0,378/7= 0,054
<b>U7</b>	0,304	0,269	0,499	0,357	0,380	0,333	0,419	2,561/7= 0,366
<b>Toplam</b>	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	7/7= 1,000

Tutarlılık oranı hesabı :

$$\begin{bmatrix} 1 & 3 & 1/7 & 1/3 & 1/5 & 1/2 & 1/8 \\ 1/3 & 1 & 1/5 & 1/4 & 1/4 & 1/2 & 1/7 \\ 7 & 5 & 1 & 6 & 3 & 6 & 1/2 \\ 3 & 4 & 1/6 & 1 & 1/4 & 1 & 1/7 \\ 5 & 4 & 1/3 & 4 & 1 & 5 & 1/3 \\ 2 & 2 & 1/6 & 1 & 1/5 & 1 & 1/7 \\ 8 & 7 & 2 & 7 & 3 & 7 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0,044 \\ 0,033 \\ 0,270 \\ 0,071 \\ 0,162 \\ 0,054 \\ 0,366 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} & 0,044 + 0,098 + 0,039 + 0,024 + 0,032 + 0,027 + 0,046 = 0,310 \\ & 0,015 + 0,033 + 0,054 + 0,018 + 0,041 + 0,027 + 0,052 = 0,239 \\ & 0,308 + 0,164 + 0,270 + 0,428 + 0,487 + 0,324 + 0,183 = 2,163 \\ & 0,132 + 0,131 + 0,045 + 0,071 + 0,041 + 0,054 + 0,052 = 0,526 \\ = & 0,220 + 0,131 + 0,090 + 0,285 + 0,162 + 0,270 + 0,122 = 1,280 \\ & 0,088 + 0,065 + 0,045 + 0,071 + 0,032 + 0,054 + 0,052 = 0,408 \\ & 0,351 + 0,229 + 0,540 + 0,500 + 0,487 + 0,378 + 0,366 = 2,851 \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} V / W \\ 0,310 / 0,044 = 7,049 \\ 0,239 / 0,033 = 7,304 \\ 2,163 / 0,270 = 8,016 \\ 0,526 / 0,071 = 7,369 \\ 1,280 / 0,162 = 7,893 \\ 0,408 / 0,054 = 7,557 \\ 2,851 / 0,366 = 7,790 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} \lambda_{\max} &= ( 7,049 + 7,304 + 8,016 + 7,369 + \\ & 7,893 + 7,557 + 7,790 ) / 7 \\ &= 52,978 / 7 \\ &= 7,568 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Tutarlılık göstergesi} &= ( \lambda_{\max} - n ) / (n-1) \\ &= ( 7,568 - 7 ) / (7-1) \\ &= 0,568 / 6 \\ &= 0,095 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} n=7 \text{ için } \text{RG} &= 1,32 \text{ (Çizelge 3.4)} \\ \text{TO} &= \text{TG} / \text{RG} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{TO} &= 0,095 / 1,32 = 0,072 < 0,1 \text{ olduğu için} \\ &\text{matris tutarlıdır.} \end{aligned}$$

#### 6.4 Uygulamaların Tüm Hiyerarşiyi Kapsayan (Amaç için) Öncelik Değerlerinin Belirlenmesi

Her bir kriter için tüm cephe uygulamalarının önem değerleri belirlendikten sonra elde edilen sonuçlar, bu bölümde tek bir çizelgede toplanmıştır. Aşağıdaki Çizelge 6.19’ da cephe uygulamalarının tüm kriterler için önem değerleri verilmiştir (Çizelge 6.19).

**Çizelge 6.19** Cephe uygulamalarının tüm kriterler için önem değerleri matrisi

	<b>K1</b>	<b>K2</b>	<b>K3</b>	<b>K4</b>	<b>K5</b>	<b>K6</b>	<b>K7</b>	<b>K8</b>
<b>U1</b>	0,065	0,030	0,370	0	0,384	0	0,029	0,044
<b>U2</b>	0,064	0,100	0,082	0,057	0,083	0,053	0,046	0,033
<b>U3</b>	0,205	0,244	0,208	0,122	0,248	0,132	0,271	0,270
<b>U4</b>	0,029	0,034	0,029	0	0,032	0	0,068	0,071
<b>U5</b>	0,212	0,170	0,130	0,263	0,113	0,239	0,173	0,162
<b>U6</b>	0,039	0,037	0,046	0	0,055	0	0,068	0,054
<b>U7</b>	0,386	0,385	0,135	0,558	0,085	0,576	0,346	0,366

Kriterlerin kendi aralarında ikili karşılaştırması bölüm 6.2’ de yapılmıştır. Bu bölümden alınan tutarlılığı sağlanmış kriter önem değerleri aşağıdaki Çizelge 6.20’ de belirtilmektedir (Çizelge 6.20).

**Çizelge 6.20** Kriterlerin amaç için önem değerleri matrisi

<b>Kriterler</b>	<b>K1</b>	<b>K2</b>	<b>K3</b>	<b>K4</b>	<b>K5</b>	<b>K6</b>	<b>K7</b>	<b>K8</b>
<b>Önem değeri</b>	0,029	0,208	0,045	0,043	0,192	0,044	0,234	0,207

Son olarak, cephe uygulamalarının tüm kriterler için önem değerleri matrisi (Çizelge 6.19) ile kriterlerin amaç için önem değerleri matrisi (Çizelge 6.20) arasında çarpma işlemi uygulanır.

$$\begin{bmatrix} 0,065 & 0,030 & 0,370 & 0 & 0,384 & 0 & 0,029 & 0,044 \\ 0,064 & 0,100 & 0,082 & 0,057 & 0,083 & 0,053 & 0,046 & 0,033 \\ 0,205 & 0,244 & 0,208 & 0,122 & 0,248 & 0,132 & 0,271 & 0,270 \\ 0,029 & 0,034 & 0,029 & 0 & 0,032 & 0 & 0,068 & 0,071 \\ 0,212 & 0,170 & 0,130 & 0,263 & 0,113 & 0,239 & 0,173 & 0,162 \\ 0,039 & 0,037 & 0,046 & 0 & 0,055 & 0 & 0,068 & 0,054 \\ 0,386 & 0,385 & 0,135 & 0,558 & 0,085 & 0,576 & 0,346 & 0,366 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0,029 \\ 0,208 \\ 0,045 \\ 0,043 \\ 0,192 \\ 0,044 \\ 0,234 \\ 0,207 \end{bmatrix}$$

Her cephe uygulaması için önem değerleri aşağıdaki yol (matrislerin çarpma işlemi) ile hesaplanır.

$$\begin{aligned}
 & \text{(K1 kriteri ağırlığı x Cephenin K1 kriterini karşılama düzeyi)} \\
 & + \text{(K2 kriteri ağırlığı x Cephenin K2 kriterini karşılama düzeyi)} \\
 & + \text{(K3 kriteri ağırlığı x Cephenin K3 kriterini karşılama düzeyi)} \\
 & + \text{(K4 kriteri ağırlığı x Cephenin K4 kriterini karşılama düzeyi)} \\
 & + \text{(K5 kriteri ağırlığı x Cephenin K5 kriterini karşılama düzeyi)} \\
 & + \text{(K6 kriteri ağırlığı x Cephenin K6 kriterini karşılama düzeyi)} \\
 & + \text{(K7 kriteri ağırlığı x Cephenin K7 kriterini karşılama düzeyi)} \\
 & + \text{(K8 kriteri ağırlığı x Cephenin K8 kriterini karşılama düzeyi)} \\
 & = \text{Cephenin amaç için öncelik değeri}
 \end{aligned}$$

U1 Arab Institute için öncelik değeri :

$$\begin{aligned}
 & (0,029 \times 0,065) + (0,208 \times 0,030) + (0,045 \times 0,370) + (0,043 \times 0) + (0,192 \times 0,384) + \\
 & (0,044 \times 0) + (0,234 \times 0,029) + (0,207 \times 0,044) \\
 & = 0,0019 + 0,0062 + 0,0167 + 0 + 0,0737 + 0 + 0,0068 + 0,0091 \\
 & = \mathbf{0,1144}
 \end{aligned}$$

U2 River House için öncelik değeri :

$$(0,029 \times 0,064) + (0,208 \times 0,100) + (0,045 \times 0,082) + (0,043 \times 0,057) + (0,192 \times 0,083) \\ + (0,044 \times 0,053) + (0,234 \times 0,046) + (0,207 \times 0,033) \\ = 0,0019 + 0,0208 + 0,0037 + 0,0025 + 0,0159 + 0,0023 + 0,0108 + 0,0068 \\ = \mathbf{0,0647}$$

U3 Architecture Science and Ecology Center için öncelik değeri :

$$(0,029 \times 0,205) + (0,208 \times 0,244) + (0,045 \times 0,208) + (0,043 \times 0,122) + (0,192 \times 0,248) \\ + (0,044 \times 0,132) + (0,234 \times 0,271) + (0,207 \times 0,270) \\ = 0,0060 + 0,0508 + 0,0094 + 0,0053 + 0,0476 + 0,0058 + 0,0634 + 0,0559 \\ = \mathbf{0,2442}$$

U4 Al Bahr Towers için öncelik değeri :

$$(0,029 \times 0,029) + (0,208 \times 0,034) + (0,045 \times 0,029) + (0,043 \times 0) + (0,192 \times 0,032) + \\ (0,044 \times 0) + (0,234 \times 0,068) + (0,207 \times 0,071) \\ = 0,0008 + 0,0071 + 0,0013 + 0 + 0,0061 + 0 + 0,0160 + 0,0147 \\ = \mathbf{0,0460}$$

U5 IBA Soft House için öncelik değeri:

$$(0,029 \times 0,212) + (0,208 \times 0,170) + (0,045 \times 0,130) + (0,043 \times 0,263) + (0,192 \times 0,113) \\ + (0,044 \times 0,239) + (0,234 \times 0,173) + (0,207 \times 0,162) \\ = 0,0062 + 0,0354 + 0,0059 + 0,0113 + 0,0217 + 0,0105 + 0,0405 + 0,0335 \\ = \mathbf{0,1650}$$

U6 Henning Larsen's University Building için öncelik değeri:

$$(0,029 \times 0,039) + (0,208 \times 0,037) + (0,045 \times 0,046) + (0,043 \times 0) + (0,192 \times 0,055) + \\ (0,044 \times 0) + (0,234 \times 0,068) + (0,207 \times 0,054) \\ = 0,0011 + 0,0077 + 0,0021 + 0 + 0,0106 + 0 + 0,0159 + 0,0112 \\ = \mathbf{0,0486}$$

U7 The House of Natural Resources için öncelik değeri:

$$(0,029 \times 0,386) + (0,208 \times 0,385) + (0,045 \times 0,135) + (0,043 \times 0,558) + (0,192 \times 0,085) \\ + (0,044 \times 0,576) + (0,234 \times 0,346) + (0,207 \times 0,366)$$

$$= 0,0112 + 0,0801 + 0,0061 + 0,0240 + 0,0163 + 0,0253 + 0,0810 + 0,0758$$

$$= \mathbf{0,3198}$$

Tüm kriterlerin amaç için görelî önem değeri ve güneş uyarlanabilir cephe uygulamalarının her bir kriter için görelî önem değeri birlikte bir çizelgede gösterilmelidir. Çizelge 6.21, tüm kriterlerin amaç için görelî önem değeri ve güneş uyarlanabilir cephe uygulamalarının her bir kriter için görelî önem değeri verilerinin kullanılarak uygulamaların amaç için öncelik değerinin elde edilmesini göstermektedir.

**Çizelge 6.21** Güneşe uyarlanabilir cephe uygulamalarının amaç için öncelik değerlerinin bulunması

Uygulamalar Kriterler	Kriterlerin amaç için görelî önem değeri	U1 Arab Institute Kriter için görelî önem değerleri	U1 Arab Institute Kriterler için değeri	U2 River House Kriter için görelî önem değerleri	U2 River House Kriterler için değeri	U3 Architecture Science and Ecology Center Kriter için görelî önem değerleri	U3 Architecture Science and Ecology Center Kriterler için değeri	U4 Al Bahr Towers Kriter için görelî önem değerleri	U4 Al Bahr Towers Kriterler için değeri	U5 IBA Soft House Kriter için görelî önem değerleri	U5 IBA Soft House Kriterler için değeri	U6 Henning Larsen's üniversite binası Kriter için görelî önem değerleri	U6 Henning Larsen's üniversite binası Kriterler için değeri	U7 The House of Natural Resources Kriter için görelî önem değerleri	U7 The House of Natural Resources Kriterler için değeri
<b>K1</b>	0,029	0,065	0,0019	0,064	0,0019	0,205	0,0060	0,029	0,0008	0,212	0,0062	0,039	0,0011	0,386	0,0112
<b>K2</b>	0,208	0,030	0,0062	0,100	0,0208	0,244	0,0508	0,034	0,0071	0,170	0,0354	0,037	0,0077	0,385	0,0801
<b>K3</b>	0,045	0,370	0,0167	0,082	0,0037	0,208	0,0094	0,029	0,0013	0,130	0,0059	0,046	0,0021	0,135	0,0061
<b>K4</b>	0,043	0	0	0,057	0,0025	0,122	0,0053	0	0	0,263	0,0113	0	0	0,558	0,0240
<b>K5</b>	0,192	0,384	0,0737	0,083	0,0159	0,248	0,0476	0,032	0,0061	0,113	0,0217	0,055	0,0106	0,085	0,0163
<b>K6</b>	0,044	0	0	0,053	0,0023	0,132	0,0058	0	0	0,239	0,0105	0	0	0,576	0,0253
<b>K7</b>	0,234	0,029	0,0068	0,046	0,0108	0,271	0,0634	0,068	0,0160	0,173	0,0405	0,068	0,0159	0,346	0,0810
<b>K8</b>	0,207	0,044	0,0091	0,033	0,0068	0,270	0,0559	0,054	0,0147	0,162	0,0335	0,054	0,0112	0,366	0,0758
Uygulamaların amaç için öncelik değeri			<b>0,1144</b>		<b>0,0647</b>		<b>0,2442</b>		<b>0,0460</b>		<b>0,1650</b>		<b>0,0486</b>		<b>0,3198</b>





## 7. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

### 7.1 Sonuçlar

Bu çalışmada, güneşe uyarlanabilir cephe sistemlerinin değerlendirilmesinde, değişken atmosferik koşullar ve iç mekan kullanıcı gereksinimleri dikkate alınarak ve yapı enerji etkinliğinin artırılması hedeflenerek değerlendirme kriterleri oluşturulmuştur. Örnek uygulamaların enerji etkinlik özelliklerini ifade eden aşağıdaki kriterlerin kullanılması uygundur.

- Güneş kontrolü ve doğal aydınlatma
- Enerji kazancı
- Strüktürel etkinlik
- PV malzemenin elektrik üretim düzeyi
- Yaşam dönemi maliyeti
- Etkin PV panel yüzey alanı
- Güneşe uyarlanma düzeyi
- Güneş hareketine tepki oluşturma süresi

Değerlendirilecek örnekler, değerlendirme kriterlerine mümkün olduğu kadar farklı cevaplar oluşturan uygulamalar olacak biçimde belirlenmiştir.

Değerlendirmenin doğru bir şekilde gerçekleştirilmesi, ancak sistematik bir değerlendirme yöntemi ile mümkün olabilir. Değerlendirme süreci sonunda alternatiflerin amacı gerçekleştirme açısından önem değerlerinin ortaya konulmasına ve sürecin denetlenebilir olmasına imkan tanıyan Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) yöntemi, kullanılacak uygun bir yöntemdir.

Güneşe uyarlanabilir cephe uygulamalarının değerlendirilmesinden sonra, cephe uygulamaları kazandıkları önem değeri puanlarına göre sıralanmıştır. Elde edilen sıralama aşağıda verilmiştir.

1. The House of Natural Resources

2. Architecture Science and Ecology Center
3. IBA Soft House
4. Arab Institute
5. River House
6. Henning Larsen's University Building
7. Al Bahr Towers

## 7.2 Değerlendirme

Güneş uyarlanabilir cephe uygulamaları için yapılan öncelik değeri sıralamasına göre, fotovoltaik sistemin entegre edildiği ve edilmediği iki sistem arasındaki sıralamanın beklenenin tersi bir durumda olduğu görülmüştür. Uyarlanabilir fotovoltaik sistemli cephe uygulamasının olduğu River House, fotovoltaik sistemin mevcut olmadığı ancak güneş uyarlanabilir cephe sisteminin tasarlandığı Arab Institute yapısına göre daha az önem puanı kazanmıştır. Bu durum cephede elektrik üretiminin yapıyor olmasının yapı için enerji kazancı sağladığı anlamına gelmediğini göstermektedir. Çünkü River House cephesindeki hareket pasif olarak çok yavaş gerçekleşir diğer bir deyişle güneş hareketine tepki verme süresi çok yavaştır. Bu da güneş izlemenin optimum performans ile gerçekleşmediğini göstermektedir. Tüm kriterleri karşılama düzeyleri bakımından bu yapılar için böyle bir sonuç elde edilmiştir. Sonuç, diğer cephe uygulamaları için değerlendirilirse, iki eksenli gelişmiş teknoloji güneş izleme sisteminin entegre edildiği The House of Natural Resources, en yüksek puanı almıştır. Bu uygulama sahip olduğu güneş izleme sistemi sayesinde güneş uyarlanma düzeyi kriterini yüksek düzeyde karşılamış dolayısıyla fazla enerji üretimi gerçekleştirerek enerji kazancını doğrudan etkilemiştir.

Architecture Science and Ecology Center cephe uygulamasında gelen ışığı büyüten kinetik reseptörlerin bulunduğu güneş yoğunlaştırıcılar ve bunların iki eksenli hareket edebilme kabiliyeti uygulamanın diğer örnek cephelere göre uyarlanma düzeyini artırmıştır. Dolayısıyla güneş hareketine tepki oluşturma süresi, uyarlanma düzeyi ve enerji kazancı kriterlerini karşılama düzeyi doğrudan etkilenmiştir.

Bu cephe uygulamalarını izleyen sıradaki uygulama ise IBA Soft House olmuştur. Bu cephe uygulamasının da enerji kazancı, güneş hareketine tepki oluşturma süresi, uyarlanma düzeyi kriterlerini karşılama düzeyi yüksek olmuştur. İlk iki yapıya göre

güneş izlemenin iki ekseninde gerçekleştirilememesi bu uygulama için dezavantaj oluşturmuştur.

Henning Larsen's University Building ve Al Bahr Towers için uygulanan güneşe uyarlabilir cephe sistemlerinde enerji üretiminin olmaması bu yapıların PV performans ile ilgili kriterlere göre değerlendirilememesine sebep olmuştur. Kendi içinde bu iki cephe uygulaması kıyaslandığında, Henning Larsen's University Building cephe uygulamasının yaşam dönemi maliyeti daha az olarak değerlendirilerek diğer yapıya göre daha önde yer almıştır.

Çalışmada Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) yöntemi kullanılarak kriterlerin ağırlıkları, tutarlılık analizi hesapları ve örnek uygulamaların değerlendirilmesi için gerekli tüm hesaplar Microsoft Excel programında ve uzun sürede gerçekleştirilmiştir. Ancak, uygulanan bu yöntemin hesapları için bir yazılım geliştirilmesi durumunda tüm hesapların daha kısa sürede gerçekleştirilmesi mümkündür.



## KAYNAKLAR

- Abdallah, S. & Nijmeh, S.** (2004). Two axes sun tracking system with PLC control, *Energy Conversion and Management*, 45, 1931-1939. doi: 10.1016/2003.10.007.
- Alata, M., Al-Nimr, M. A., and Qaroush, Y.** (2005). Developing a multipurpose sun tracking system using fuzzy control, *Energy Conversion and Management*, 46, 1229-1245. doi: 10.1016/2004.06.013.
- Al Harbi, K.M.A.S.** (2001). Application of AHP in Project Management, *International Journal of Project Management*, 19, (pp. 19-27).
- Al-Mohamad, A.,** (2004). Efficiency improvements of photo-voltaic panels using a suntracking system, *Applied Energy*, 79, 345-354. doi: 10.1016/2003.12.004.
- Anameriç, M.** (2014). *Çift Eksende Mikrokontrollü Güneş İzleme Sistemi*. (Yüksek lisans tezi). Hacettepe Üniversitesi , Ankara.
- Ayçam, İ., & Kanan, N. Ö.** (2009). Ekolojik Mimarlık Kapsamında Bina Bütünleşik Nano-PV Malzemenin İncelenmesi, *V. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu*, pp 73-77.
- Başçoşkun, B.** (2018). *Açık ve Kapalı Döngü Güneş Takip Algoritmalarının Uzaktan Kontrollü (İnternet tabanlı) gerçek zamanlı Güneş Takip Sistemleri Üzerinde Karşılaştırılması*. (Yüksek lisans tezi). Afyon Kocatepe Üniversitesi , Afyon.
- Clifford, M.J. & Eastwood, D.** (2004). Design of a novel passive solar tracker. *Solar Energy*, 77, 269-280.
- Çelebi, G.** (2002). Bina Düşey Kabuğunda Fotovoltaik Panellerin Kullanım İlkeleri, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 17 (3), 17-33.
- Deniz, Ö. Ş.** (1999). *Çok Katlı Konut Tasarımında Kullanıcıların Esneklik Taleplerini Karşılacak Yapı Elemanlarının Seçimine Yönelik Bir Karar Verme Yaklaşımı*. (Doktora tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi , Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Eren, E.** (2010). *Piramid Sensör Tekniği ile Güneş İzleme Sistem Tasarımı*. (Yüksek lisans tezi). Zonguldak Karaelmas Üniversitesi , Zonguldak.
- Gemicioğlu, A. G.** (2011). Türkiye’de Enerji Verimliliği açısından PV Sistemlerin Performansının Değerlendirilmesinde Kullanılabilecek Bir Yaklaşım. (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi , Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Guzowski, M.** (2017). *Sıfır Enerji Mimarlığına Doğru, Yeni Güneş Enerjili Tasarım* (N. Güçmen ve T. S. Tağmat, Çev. ). YEM yayımları
- Gür, N. V.** (2007). *Mimaride Sürdürülebilirlik Kapsamında Değişken Yapı Kabukları için Bir Tasarım Destek Sistemi*. (Doktora tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi , Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Gür, N. V.** (2015). Gündüz Gökçe, Yükselen Ayaydın, Özer Erenman, Aydan Özgen Armağanı: Yapıda Yenilikçi Yaklaşımlar ( Kitap İçinde Bölüm/ Yapı Kabuğu ve Yenilikçi Yaklaşımlar), Yay. Haz. Koman, İ. , Yay. Koor. Suner, C. , Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Yayınları 809, Armağan 3, MSGSÜ Matbaası, İstanbul, Nisan, 158-188.
- Haas, R., Meixner, O.** (2009). *An Illustrated Guide to the Analytic Hierarchy Process, Lecture Notes, Institute of Marketing & Innovation, University of Natural Resources*. Retrieved from <https://eclass.aueb.gr>
- Hassan, F. A.** (2011). *Bilgisayar Kontrollü Güneş Takip Sistemi Tasarımı ve Kurulumu*. (Yüksek lisans tezi). Gazi Üniversitesi , Ankara.
- Heredia, I.L., Moreno, J.M., Magalhaes, P.H., Cervantes, R., Que´me´re´, G., and Laurent, O.** (2007). Inspira’s CPV sun tracking (concentrator photovoltaics), Springer, 221-251.
- Herzog, T., Krippner, R., and Lang, W.** (2004). *Facade Construction Manual*. Birkhauser, München.
- Jazebi, S.** (2012). *Origami, Kirigami, and The Modeling of Leaves: An Interactive Computer Application*. (Master’s thesis). The University Of Calgary, Calgary.
- Kantaroğlu, F.** (2010). Fotovoltaik Sistemler, *Türk Tesisat Mühendisleri Derneği Dergisi*, 28-34.
- Karimov, K. S., Saqib, M. A., Akhter, P., Ahmed, M. M., Chattha, J. A., and Yousafzai, S. A.** (2005). A Simple Photo-Voltaic Tracking System, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 87, 49-59. doi: 10.1016/2004.08.010.
- Lamoureux, A., Lee, K., Shlian, M., Forrest, S. R., and Shtein, M.** (2015). Dynamic kirigami structures for integrated solar tracking, *Nature communications*, 6, 1-6. doi: 10.1038/ncomms9092.
- Medio, S.** (2013). Photovoltaic Design Integration at Battery Park City, New York, *Buildings*, 3, 341-356. doi:10.3390/buildings3020341.
- Moulin, J. M.** (2011). Facade Integration: Challenges and Solutions for BIPV, *Sapa Building System Limited, Presentation in BIPV2 / BRE conference 2011*.
- Mousazadeh, H., Keyhani, A., and Javadi, A.** (2009). A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output. *Renewable and sustainable energy reviews*, 13(8), pp 1800-1818.
- Nady, R.** (2017). Dynamic Facades Environmental Control Systems for Sustainable Design, *Renewable Energy and Sustainable Development (RES D)*, 3 (1), 118-127. ISSN 2356-8569 (<http://dx.doi.org/10.21622/RES D.2017.03.1.118>).

- Nagy, Z., Svetozarevic, B., and Jayathissa, P.** (2016). The Adaptive Solar Facade: From concept to prototypes. *Frontiers of Architectural Research*, 5(2), pp 143-156.
- Oktik, Ş.** (2001). *Güneş-Elektrik Dönüşümleri Fotovoltaik Güneş Gözeleri ve Güç Sistemleri*. Temiz Enerji Vakfı Yayınları, Ankara.
- Oral, G.** (2015). *İki Eksenli Güneş İzleme Panelinin Kontrolü*. (Yüksek lisans tezi). Aydın Üniversitesi , İstanbul.
- Orhon, A. V.** (2016). A Review On Adaptive Photovoltaic Facades, *Solar Conference&Exhibition*, pp 463-470.
- Önal, M. A.** (2009). *İki Eksenli Güneş İzleme Sistemi Tasarımı*. (Yüksek lisans tezi). Sakarya Üniversitesi , Sakarya.
- Özdoğan, H. P.** (2005). *Ekolojik Binalarda Bina Kabuğunda Kullanılan Fotovoltaik Panellerin Tasarım Bağlamında İncelenmesi*. (Yüksek lisans tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Pagliaro, M., Ciriminna, R., and Palmisano, G.** (2008). Flexible Solar Cells, *ChemSusChem*, 1, 880-891. doi:10.1002/cssc.200800127.
- Parmar, R. D.** (2010). Thin Film Solar Cells: A Review, *Journal of information, knowledge and research in electronics and communication*, 01 (01), 62-64.
- Perez, R.** (2004). To track... or Not to Track, *Home Power 101, June & July*, pp 60-63.
- Poulek, V.** (1994). Testing the new solar tracker with shape memory alloy actors. *Conference Record of the Twenty Fourth IEEE Photovoltaic Specialists Conference 1*, (pp. 1131-1133). Hilton Waikoloa Village, Hawaii, December 5-9.
- Poulek, V. & Libra, M. A.** (2000). A very simple solar tracker for space and terrestrial applications, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 60 (2), 99-103. doi: 10.1016/S0927-0248(99)00071-9.
- Prinsloo, G. & Dobson, R.** (2015). *Solar Tracking, High Precision Solar Position Algorithms, Programs, Software, and Source-Code for Computing the Solar Vector, Solar Coordinates & Sun Angles in Microprocessors, PLC, Arduino, PIC and PC- Based Sun Traking Device sor Dynamic Sun Following Hardware*. 1st edn, ISBN:978-0-620-61576-1.
- Rumyantsev, V., Chalov, A., Ionova, E., Larionov, V., and Andreev, V.** (2004). Concentrator PV modules with multi-junction cells and primary/secondary refractive optical elements, *The 19th European photovoltaic solar energy conference*, Paris, France : June.
- Saaty, T. L.** (2008). Decision making with the analytic hierarchy process, *Int. J. Services Sciences*, 1 (1), (pp. 83-98).
- Sarıca, S.** (2015). *Endüstriyel ve Grafik Tasarım Bağlamında Kağıt Sanatları ve Bir Uygulama Örneği*. (Yüksek lisans tezi). Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
- Sayın, S. & Koç, İ.** (2011). Güneş Enerjisinden Aktif Olarak Yararlanmada Kullanılan Fotovoltaik (PV) Sistemler ve Yapılarda Kullanım Biçimleri, *Selçuk*

Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 26 (3), 89-106.  
ISSN: 1300-5200, ISSN: 1304-8708 (Elektronik).

**Sev, A. & Ezel, M.** (2014). Nanotechnology Innovations for the Sustainable Buildings of the Future, *International Journal of Civil, Architectural, Structural and Construction Engineering*, 8, 843-853.

**Sey, Y. & Tapan, M.** (1976). *Değerlendirmede Temel Sorunlar ve Mimarlıkta Değerlendirme*, İstanbul Teknik Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Yapı Araştırma Kurumu Yayınları, İstanbul.

**Sick, F. & Erge, T.** (1996). *Photovoltaics in Buildings: A Design Handbook for Architects and Engineers*. James & James Ltd, London.

**Svetozarevic, B., Nagy, Z., Hofer, J., Jacob, D., Begle, M., Chatzi, E., and Schlueter, A.** (2016). SoRo-Track: A two-axis soft robotic platform for solar tracking and building-integrated photovoltaic applications. *Robotics and Automation (ICRA), 2016 IEEE International Conference*, (pp. 4945-4950).

**Tapan, M.** (2004). *Mimarlıkta Değerlendirme*, İstanbul Teknik Üniversitesi Yayınevi, İstanbul. ISBN 975-561-249-1.

**Yıldırım, T., Kütük, O., Çimen, M.A., Elcik, E., Unan, S., Engin, Ş.N., ve Tırıs, M.** (2010). Güneş İzleyen Sistemler ve Bileşenleri. *Solar Future 2010 Bildiriler Kitabı*, (pp. 75-80). İstanbul, February 11-12.

**Yılmaz, S., & Vural, N.** (2015). Sürdürülebilir Yapıların Tasarlanmasında Nanoteknolojinin Rolü, *2nd International Sustainable Buildings Symposium*, Ankara.

**Url-1** < <http://www.yildiz.edu.tr/~okincay/dersnotu/gunespilleri1bolum.pdf>>, erişim tarihi: 25.01.2019

**Url-2** < <http://www.uni-solar.com/uni-solar-difference/technology/index.html>>, erişim tarihi: 25.01.2019

**Url-3** < <http://www.gunessistemleri.com/guneshucreleri.php>>, erişim tarihi: 26.01.2019

**Url-4** < <https://sozluk.gov.tr>>, erişim tarihi: 27.01.2019

**Url-5** <<https://www.degereenergie.de/>>, erişim tarihi: 05.02.2019

**Url-6** < <http://www.cwct.co.uk/index.html>>, erişim tarihi: 05.02.2019

**Url-7** < <http://www.mimdap.org/?p=41092>>, erişim tarihi: 21.04.2019

**Url-8** < <https://archello.com/project/arab-world-institute>>, erişim tarihi: 21.04.2019

**Url-9** < <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-265617/clasicos-de-arquitectura-instituto-del-mundo-arabe-jean-nouvel>>, erişim tarihi: 23.04.2019

**Url-10** < <https://yimingsu.files.wordpress.com/2010/12/arab-institute-jean-nouvel.pdf>>, erişim tarihi: 23.04.2019

**Url-11** < <https://architetour.wordpress.com/2009/10/13/instituto-do-mundo-arabe/instituto/>>, erişim tarihi: 24.04.2019

**Url-12** < <http://www.enclos.com/projects/riverhouse>>, erişim tarihi: 29.04.2019



- Url-13** < <http://www.altpower.com/projects/bipv/riverhouseat>>, erişim tarihi: 02.05.2019
- Url-14**<[http://www.som.com/ideas/slideshows/center\\_for\\_architecture\\_science\\_and\\_ecology](http://www.som.com/ideas/slideshows/center_for_architecture_science_and_ecology)>, erişim tarihi: 02.05.2019
- Url-15** < <http://www.case.rpi.edu/page/project.php?pageid=1>>, erişim tarihi: 16.05.2019
- Url-16** < <http://vault.sierraclub.org/sierra/201103/innovate.aspx>>, erişim tarihi: 19.05.2019
- Url-17** < <https://www.archdaily.com/270592/al-bahar-towers-responsive-facade-aedas>>, erişim tarihi: 25.05.2019
- Url-18** < <http://www.skyscrapercenter.com/building/al-bahar-tower-1/9129>>, erişim tarihi: 25.05.2019
- Url-19** < <https://www.architecturalrecord.com/articles/7986-soft-house-by-kennedy-violich-architecture>>, erişim tarihi: 03.06.2019
- Url-20** < <http://www.kvarch.net/projects/87>>, erişim tarihi: 03.06.2019
- Url-21** < <https://architizer.com/projects/soft-house/>>, erişim tarihi: 10.06.2019
- Url-22** < <https://www.detail.de/%20artikel/bewegliche-pv-membranen-soft-house-in-hamburg-8881/>>, erişim tarihi: 12.06.2019
- Url-23** < <https://www.archdaily.com/590576/sdu-campus-kolding-henning-larsen-architects>>, erişim tarihi: 03.07.2019
- Url-24** < <https://henninglarsen.com/en/projects/featured/0942-sdu-campus-kolding/>>, erişim tarihi: 03.07.2019
- Url-25** < <https://www.dezeen.com/2015/07/14/henning-larsen-syddansk-universitet-sdu-kolding-campus-building-denmark-green-standards-university/>>, erişim tarihi: 07.07.2019
- Url-26** < <http://arcdog.com/portfolio/sdu-university-of-southern-denmark-campus-kolding/>>, erişim tarihi: 16.07.2019
- Url-27** < <https://systems.arch.ethz.ch/research/active-and-adaptive-components/asf-adaptive-solar-facade.html>>, erişim tarihi: 28.07.2019



## ÖZGEÇMİŞ

1990 yılında İstanbul'da doğdu. 2003 yılında Orhan Cemal Fersoy Anadolu Lisesi'nde eğitime başladı. Aynı liseden 2007 yılında mezun oldu. Aynı yıl Sakarya Üniversitesi Kimya bölümüne başladı. 2010 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi Mimarlık Bölümü'nde lisans eğitimine başladı. 2016 yılında mimarlık lisans eğitimini tamamladı. 2017 yılında, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mimarlık Anabilim Dalı Yapı Bilgisi Programı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. Aynı yıl göreve başladığı İstinye Üniversitesi Güzel Sanatlar, Tasarım ve Mimarlık Fakültesi'nde eğitim ve araştırma faaliyetlerine devam etmektedir.

