



**YÜKSEK YAPILARDA FOTOVOLTAİK PANEL KULLANIMININ
CEPHE BAĞLAMINDA İNCELENMESİ**

Mustafa Furkan GÜNDÜZ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MİMARLIK ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2022

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Mustafa Furkan GÜNDÜZ

27/06/2022

YÜKSEK YAPILARDA FOTOVOLTAİK PANEL KULLANIMININ CEPHE BAĞLAMINDA İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Mustafa Furkan GÜNDÜZ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2022

ÖZET

Dünya genelinde sanayileşme ve nüfusun artması, ihtiyaçların çeşitlenmesi sebepleriyle talep edilen enerji miktarı artmaktadır. Artan talebin karşılanabilmesi için fosil yakıtların kullanımını daha çok tercih edilmektedir. Binalar ise dünya enerji tüketiminin yaklaşık %40'ını teşkil etmektedir. Binaların fosil kaynaklı enerji tüketimlerini azaltmak için yenilenebilir enerji stratejileri öne çıkmaktadır. Güneşten elektrik enerjisi üretebilmek için en fazla kullanılan sistemler fotovoltaik panel sistemleridir. Çok katlı yapılar, taban alanı yönüyle aynı ölçülere sahip az katlı yapılara oranla çok daha geniş ve büyük cephe yüzeylerine sahiptir. Bu cephe yüzeyi, fotovoltaik sistemlerin kullanımı için büyük oranda avantajlı sayılmaktadır. Bu çalışmanın odak noktasına, çok katlı yapıların cephelerinde fotovoltaik panellerin kullanımı alınmıştır. Çalışmada amaç; yapı üretiminde en hakim konuma sahip olan mimarlar için çok katlı yapılarda fotovoltaik sistemlerin kullanımına dair bilince katkı sağlamaktır. Çalışma kapsamında nitel araştırma yöntemlerinden veri toplama ve iz sürme metotları kullanılarak detay ve tasarım çeşitliliğine göre dünya genelinden 10 adet yapı örneği değerlendirilmiştir. Daha sonra Ankara'nın Çankaya İlçesi'nde seçilen ve aktif şekilde kullanılan bir çok katlı bina cephesinde çeşitli kombinasyonlarda PV sistemler tasarlanıp kurgulanmış, PvSyst programı ile karar verilen tüm kombinasyonların elektrik enerjisi üretim simülasyonları yapılmıştır. Ankara'da bulunan özel bir firma ile yürütülen ortak çalışmalar ile tüm kombinasyonların maliyetlerine ve konstrüksiyon tasarımlarına dair veriler elde edilmiştir. Sonuç olarak her ne kadar 90 derecelik kombinasyon konstrüksiyon maliyeti açısından en verimli sonucu sağlamış olsa da, toplam kullanım ömrü süresince kazanılan enerji ve fotovoltaik sistem geri dönüşleri yönüyle 34 derecelik kombinasyonun çok daha avantajlı ve verimli olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Bilim Kodu : 80114

Anahtar Kelimeler : Fotovoltaik sistemler, yapı cephesi, yenilenebilir enerji, yüksek yapılar

Sayfa Adedi : 75

Danışman : Doç. Dr. Zeynep Yeşim İLERİSOY

INVESTIGATION OF USING PHOTOVOLTAIC PANEL IN THE CONTEXT OF FACADE ON HIGH RISE BUILDINGS

(M. Sc. Thesis)

Mustafa Furkan GÜNDÜZ

GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2022

ABSTRACT

Energy demand, which increases as a result of reasons such as the increasing population, needs and industrialization, is increasing day by day. Around the World, fossil fuels are mainly used to meet the energy demand. In order to reduce this consumption in buildings that constitute approximately 40% of worldwide energy consumption, clean energy concept that include performance improvement strategies distinguish. The most common used technological systems to generate energy from the sun are photovoltaic panels (PV). High-rise buildings having much more surface area than low-rise buildings with the same floor area. This facade surface is considered substantially advantageous for the use of photovoltaic systems. In this study, the use of PV panel systems in the context of facades in high-rise buildings is focused on. The aim of the study is contributing to design awareness on high-rise buildings which have more facade area compared with other buildings for architects who have the most dominant role in building production. In this study, 10 building samples from around the world were evaluated according to design and detail diversity by using data collection and tracing methods from qualitative research methods. Afterwards, a photovoltaic system in different combinations was designed for a high-rise building's facade determined and actively used in the province of Ankara. Energy simulations of all combinations determined with PvSyst software were made. As a result of the collaborative works carried out with a private company, data on the construction designs and costs of the different combinations were obtained. As a result, although the 90 degree combination provided the most efficient result in terms of construction cost, it has been concluded that the 34 degree combination is much more advantageous and efficient in terms of the energy gained during the total lifetime and the photovoltaic system cost return.

Science Code : 80114

Key Words : Photovoltaic systems, buildings facade, renewable energy, high-rise building

Page Number : 75

Supervisor : Assist. Prof. Dr. Zeynep Yesim ILERISOY

TEŞEKKÜR

Öncelikle tez alıőmamın her aşamasında değerli katkılarıyla bana yol gösteren, gece gündüz demeden büyük bir sabır ile beni yönlendiren ve destek olan, bilim insanı kiőilięinden ve insaniyetinden çok őey öğrendiğim değerli hocam Doç. Dr. Zeynep Yeşim İLERİSOY'a sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Tez çalıőmam sürecinde her türlü maddi ve manevi desteklerini arkamda hissettiğim kıymetli annem Halime GÜNDÜZ ve kıymetli babam Mümtaz GÜNDÜZ 'e teőekkürü borç bilirim.

Son olarak tez çalışması sürecimdeki kıymetli desteklerinden dolayı ERL Solar Montaj Sistemleri firmasına çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. PV PANELLERİN YAPISI VE ÖZELLİKLERİ.....	5
2.1. Fotovoltaiklerin Yapısı ve Çalışma Prensibi.....	5
2.2. Fotovoltaik Sistem Bileşenleri.....	6
2.3. Fotovoltaik Panel Çeşitleri.....	9
2.4. Türkiye’de Güneş Enerjisi Potansiyeli.....	12
3. YAPILARDA PV PANEL KULLANIMI.....	15
3.1. Yapıların Çatılarında PV Panel Kullanımı	16
3.1.1. Çatıdan bağımsız kullanılan fotovoltaik sistemler.....	16
3.1.2. Çatı ile bütünleşik kullanılan fotovoltaik sistemler	17
3.2. Yapıların Cephelerinde PV Panel Kullanımı.....	18
3.2.1. Giydirme cephe elemanı olarak kullanımı	18
3.2.2. Güneş kırıcı olarak kullanımı	19
3.2.3. Cepheye monte havalandırma boşluklu PV sistemler olarak kullanımı...	20
4. PV SİSTEMLERİN TASARIMINA YÖNELİK KAVRAMSAL ÇERÇEVE	21

	Sayfa
5. ÇALIŞMANIN YÖNTEMİ.....	27
5.1. Yüksek Yapı Cephelerinde PV Panel Kullanımında Mevcut Durum Analizi....	28
5.2. PV Panel Sisteminin Enerji Simülasyonu; PVSyst Yazılımı ile Modelleme	39
5.3. Konstrüksiyon Esaslarına göre PV Panellerin Yapım Maliyeti Hesaplama Esasları	44
6. ALAN ÇALIŞMASI	49
7. BULGULAR.....	55
7.1. Kombinasyonların Enerji Analiz Bulguları	55
7.2. Kombinasyonların konstrüksiyon maliyeti bulguları	59
7.3. Bütünleşik Değerlendirme	61
8. DEĞERLENDİRME VE SONUÇ.....	65
KAYNAKÇA.....	69
ÖZGEÇMİŞ	75

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. (a) Fotovoltaik pilin yapısı (b) Fotovoltaik pilin çalışması	5
Şekil 2.2. Fotovoltaik hücre, modül,panel ve dizi ilişkisi.....	7
Şekil 2.3. Fotovoltaik sistem dönüştürücü(İnvertör)	7
Şekil 2.4. (a) Fotovoltaik sistem bileşeni olan aküler (b) Şarj denetim birimi	8
Şekil 2.5. Fotovoltaik sistem bileşenleri	8
Şekil 2.6. Monokristal Fotovoltaik hücreler	10
Şekil 2.7. Monokristal ve Polikristal fotovoltaik hücreler	10
Şekil 2.8. İnce Film Fotovoltaik hücre.....	11
Şekil 2.9. Dünya genelinde hücre türlerine göre yıllık fotovoltaik sistem elektrik üretimi	12
Şekil 2.10. Türkiye güneş enerjisi potansiyeli atlası.....	13
Şekil 2.11. Türkiye aylık ışıınım değerleri (kWh/m ²) ve güneşlenme süreleri(saat)	13
Şekil 2.12. Almanya ve Türkiye güneş potansiyeli kıyası.....	14
Şekil 3.1. Düz çatıya monte fotovoltaik paneller.....	16
Şekil 3.2. Eğimli çatıya monte fotovoltaik paneller	17
Şekil 3.3. Çatı ile bütünleşik fotovoltaik sistem	17
Şekil 3.4. Giydirme cephe fotovoltaik sistem tasarım yaklaşımı.....	18
Şekil 3.5. Güneş kırıcı olarak kullanılan fotovoltaik sistemler.....	20
Şekil 3.6. (a)Yağmur perdesi olarak kullanılan fotovoltaik sistemler (b) PV sistem detayı.....	20
Şekil 5.1. 4 Times Square Binası	29
Şekil 5.2. CIS Tower Binası	30
Şekil 5.3. Torregarena Binası.....	30
Şekil 5.4. Darnaise District Binası.....	31

Şekil	Sayfa
Şekil 5.5. Schapfen Mill binası.....	32
Şekil 5.6. (a) Bauerfeind AG Ofis Binası (b) Solar Tower Binası	32
Şekil 5.7. Pearl River Tower.....	33
Şekil 5.8. Pearl River Tower cephesinde kullanılan sabit 0 derece güneş kırıcılar	34
Şekil 5.9. Hanwha Head Quarters Binası.....	35
Şekil 5.10. Federation of Korean Industries binası.....	35
Şekil 5.11. PVSyst 6.8.1. program ara yüzleri.....	39
Şekil 5.12. PVSyst 6.8.1. sistem seçim ekranı şebeke bağlantılı sistemin seçimi.....	40
Şekil 5.13. PVSyst 6.8.1. programında konum ayarlarının girilmesi	41
Şekil 5.14. PVSyst 6.8.1. programında orientation bölümündeki kurulum tipi, analiz süreci seçimi, yönlendirme ve panel eğimi seçiminin yapıldığı ekran.....	41
Şekil 5.15. Panel, invertör, kurulu güç miktarı ayarlarının yapıldığı ekran.....	42
Şekil 5.16. (a)Modelleme ve cephe panel kurgusunun yapıldığı ‘‘near shadings’’ kısmı, (b)‘‘According to module string’’ seçeneğinin seçilmesi.....	43
Şekil 5.17. PVSyst 6.8.1. programı modelleme ekranı	43
Şekil 5.18. Kullanılan PV panel özellikleri	45
Şekil 5.19. TS EN 1991-1-4 yönetmeliğine göre bina yüksekliği bölmelendirilmesi....	47
Şekil 5.20. Binanın uzun ve kısa kenarı baz alınarak hesaplanan yükseklik bölümleri	47
Şekil 6.1. Seçilen referans binanın konumu.....	51
Şekil 6.2. (a) Alan çalışması için belirlenen yüksek yapı grubu (b) Kat planı	51
Şekil 6.3. (a)Güney cephe; (b)Doğu-batı cephe panel yerleşimleri.....	53
Şekil 6.4. EPDK tarafından onaylanan tarifeler.....	54

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Fotovoltaik hücre çeşitleri	9
Çizelge 3.1. Fotovoltaik sistemlerin yapılarda kullanımı	15
Çizelge 3.2. Yapılarda fv panellerin giydirme cephe elemanı olarak kullanımı	19
Çizelge 3.3. PV panellerin havalandırma durumlarına göre verimliliklerindeki değişimler.....	20
Çizelge 5.1. İncelenen örnek yüksek yapılar	27
Çizelge 5.2. PV panellerin kurgulandığı örnek yüksek yapılar	36
Çizelge 5.3. Panel açalarına ve yüksekliğe göre panele etki eden rüzgar yükü	48
Çizelge 6.1. Alan çalışmasındaki konstrüksiyonlar ve cephe detayları.....	52
Çizelge 6.2. Cephelere göre fotovoltaik panel sayıları	53
Çizelge 7.1. Kombinasyonlara göre üretilen enerji miktarı.....	55
Çizelge 7.2. Kombinasyonlara göre üretilen elektrik enerjisinden kazanılan yıllık toplam TL miktarı.....	56
Çizelge 7.3. Kombinasyonlara göre cephe bazlı yıllık toplam elektrik üretim miktarları	57
Çizelge 7.4. Cephe ve Kombinasyonlara göre panel başı yıllık elektrik üretim miktarları	57
Çizelge 7.5. Yapı grubunun bloklara ve aylara göre elektrik tüketim değerleri.....	58
Çizelge 7.6. Kombinasyonların ürettiği elektrik enerjisi-bina yıllık enerji tüketimi oranı	58
Çizelge 7.7. Kombinasyonlara göre konstrüksiyon bilgileri ve detayları.....	60
Çizelge 7.8. Kombinasyonlara göre konstrüksiyon maliyetleri.....	61
Çizelge 7.9. Konstrüksiyon maliyeti geri dönüş süreleri.....	61
Çizelge 7.10. 30 yıllık süreçteki toplam kazanım.....	62
Çizelge 7.11. PV sistem maliyet geri dönüş süreleri	63

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

m³

Metreküp

m²

Metrekare

Kısaltmalar

Açıklamalar

PV

Photovoltaic

FV

Fotovoltaik

DC

Direct current (doğru akım)

AC

Alternative current (alternatif akım)

A-Sİ

Amorf silisyum

CdTe

Kadmiyum tellür

CIS

Bakı indiyum diselenid

BIPV

Building integrated photovoltaic

EPW

Energy plus weather file

SWERA

Solar and wind energy resource assessment

MPPT

Maximum power point tracking

GES

Güneş enerjisi santrali

TL

Türk lirası

1. GİRİŞ

Çevresel problemlerin temeli, bilimsel ve teknolojik ilerlemelerle birlikte ihtiyaçların artmasıyla doğanın kaynak olarak kullanılmasına ve sanayi devriminin ortaya çıkardığı etkilere dayanmaktadır. 20. Yüzyılın sonlarından itibaren çevre kirliliği, küresel ısınmanın etkilerinin artması, yaşanan doğal afetler, biyoçeşitliliğin azalması ve dünya enerji krizi gibi problemlerin gün geçtikçe daha büyük boyutlara eriştiği görülmektedir (Hamidabad ve Begeç, 2015). Bu etkilere ek olarak teknolojik ve ekonomik ilerlemelerle birlikte konforlu yaşam arayışları artmakta, buna bağlı olarak dünya enerji talebinde keskin artışlar meydana gelmektedir (Peng, Lu, Yang, Han, 2013).

Yaşadığımız devirde çok katlı yapıların meydana gelmesine sebep olan sosyal, kültürel teknolojik ve ekonomik sebeplerin değişimi ve dönüşümü, yüksek yapıların artışına sebep olmaktadır. Dünya üzerinde enerji tüketiminin yaklaşık %40 'ını da binalar teşkil etmektedir. Yüksek yapılar ise bu oranın içinde önemli bir pay sahibidir. Bu açıdan çok katlı binalar yüksek miktarda enerji kullanan kompleks sistemleri bünyelerinde bulundukları için bina enerji üretim ve tüketim planlamalarının titizlikle yapılması önemlidir(Katuk, 2014). Konusu geçen planlamanın yürütülebilmesi sürecinde öncelikle enerji kullanım ve tüketim kararlarında ana iki farklılığa gidilmesi gerekmektedir; İlk adımda enerji tüketiminde kullanılan kaynakların korunabilmesi yönünde etkili adımlar izlenmelidir, ikinci adımda ise yenilenebilir enerji kaynaklarından olan güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, jeotermal enerji gibi kaynakların fosil kaynaklı enerjiler yerine kullanıma geçirilebilmesidir (Radhi, 2010).

Binalarda enerji kazanımı ve yönetimi yönüyle aktif ve pasif enerji sistemleri kullanılmaktadır. Fotovoltaik sistemler, elektrik enerjisi üretimi amacıyla aktif sistemlerden biri olarak kullanılmaktadır. Fotovoltaik sistemler, güneş enerjisini elektrik enerjisine çeviren sistemlerdir. Bahsedilen sistemlerin, ilk kullanılmaya başlandığı zamanlarda sistem verimlilikleri çok düşük olmasına karşın yürütülen çalışmalar ve gelişen teknolojilerle birlikte enerji verimlilikleri yükseltilmiştir. Sürecin ilerlemesi ile birlikte gerek uzay teknolojilerinde gerek de saat, hesap makinası gibi cihazlarda kullanımları yaygınlaşan PV sistemler hem geniş arazilerde enerji üretimi için kullanılmakta, hem de yapı kabuklarında kullanılmaktadır. Bu yenilenebilir enerji sistemlerinin yaygınlaştırılmasındaki amaç, çevre bilincini yükseltmek, fosil kaynaklı yakıtların kullanımı sonucu çevreye verilen zararları en aza indirmektir (Uçar, 2018).

Binaların fosil kaynaklı enerji tüketimlerini düşürmek amacıyla tercih edilen aktif sistemlerin yapı kabuğunda kurgulanarak kullanılması günümüzde üzerinde yapılan çalışmaların arttığı bir konu haline gelmiştir. PV sistemler güncel şekilde yapı çatılarında ve cephelerinde kullanılmaktadır. Yapı kabuğunda çatı ve cephe elemanı olarak kurgulanan bu fotovoltaik sistemlerin, her bir farklı yapı için özgün şekilde tasarımı yapılmaktadır. Bu bağlamda, yapı tasarım sürecinin başında, ilk tasarım sürecinde olsun, yapı iyileştirmesi bağlamında sonradan uygulamalarda olsun mevcut yapının enerji özellikleri doğru şekilde ortaya konmalıdır. Sonuç olarak, PV sistemlerin değerlendirme ve analizleri yapılarak bina için en verimli kurguya karar verilmesi ve uygulanması sağlanmalıdır (Karaca ve Uçar, 2018).

Fotovoltaik sistemlerin bina kabuğunda kullanımına yönelik bir seçenek ise bina cephe yüzeyleridir. PV sistemlerin yapı cephelerindeki kullanım durumları farklılık göstermektedir. Cephede bulunan kapı ve pencere boşluklarında yarı-saydam PV çözümler elde edilebildiği gibi cephe sağır yüzeylerinde opak uygulamalar da görülebilmektedir. Cephe yüzeyleri bakımında büyük alanlara sahip olması yönüyle çok katlı binalar, fotovoltaik cephe sistemlerinin kullanımını açısından avantaj teşkil etmektedir. Ek olarak yüksek yapı cephelerinde, diğer yapı tiplerine oranla çevresel etkilere bağlı olarak daha az cephe gölgelenmesi görülmektedir. Bu da Pv sistemlerin cephe kullanımları açısından avantaj sayılabilir.

Bu çalışmada yüksek yapılarda cephe bağlamında PV panel sistemlerinin kullanımı incelenmiştir. İnceleme, PV sistemlerin konstrüktif detaylarının farklılaşması ile beraber ortaya çıkan maliyet ve performans farkları açılarından ele alınacaktır. Ortaya çıkan araştırma sorusu “*PV sistemlerin konstrüktif detaylarındaki farklılık ile beraber ortaya çıkan performans farkları nelerdir?*” ile oluşturulmuş ve sonrasında detay ölçeği arttırılarak; “*Bu detay farklılıklarından kaynaklanan ilk kurulum maliyet farkları, maliyet-geridönüş sürelerine nasıl etki eder?*” şeklinde ele alınmıştır.

1 MW üstü kurulu güç ile kurulmak istenen GES’lerde lisans alma zorunluluğu bulunmaktadır. 1 MW’ın altında kurulu güç ile kurulacak olan GES’ler için lisans alma zorunluluğu yoktur ve bu santraller “Lisanssız elektrik üretimine dair yönetmelik” kapsamında kurulmaktadır. Lisanssız kurulan elektrik santralleri, daha çok üretilen elektriğin satılmasından çok bireysel şekilde kullanılmasına yönelik bir uygulamadır. Bu açıdan Lisanslı GES’lere göre bir takım avantajları bulunmaktadır (www.piagrid.com).

Çalışmanın Amacı

Dünyada elektrik kullanımının büyük bir kısmını binalar teşkil etmektedir. Bu sebeple, yenilenebilir enerji kaynaklarının binalarda kullanımı üzerine birçok araştırma yürütülmektedir. Bu husustaki gelişmeler birçok ülkenin gelecek planları arasında yer almaktadır. Bu konuda Türkiye’de en güncel gelişme 2019 yılında yürürlüğe giren ‘‘Lisanssız elektrik üretimine dair yönetmelik’’ te lisanssız şekilde elektrik üretmek için arazide PV panellerin kullanılması sınırlandırılmış ve binalarda çatı ve cephelerde kullanımına yönelik ibareler yönetmeliğe girmiştir. Çatı ve cephe ibarelerinin ilk kez kullanılması bu noktadan ilerideki süreçte yapıların çatı ve cephelerinde fotovoltaik panellerin yaygınlaşacağına ve bu konuya yönelik bilincin artacağına işaret etmektedir. Bu çalışmanın amacı, yapı üretiminde en hakim role sahip olan mimarlar için bu bilince katkı sağlamaktır. Diğer bina tiplerine kıyasla en fazla cephe yüzey alanı elde edilebilen çok katlı yapılarda fotovoltaik panel kullanımının tasarım ve detay çeşitliliğine göre bütünleşik performansının araştırılması istenilmektedir. Enerji üretimi farklarına ek olarak, konstrüksiyon detaylarındaki farklardan kaynaklanan ilk yatırım maliyetlerinin kıyaslanarak en verimli senaryonun ortaya koyulması hedeflenmektedir.

Çalışmanın Kapsamı ve Yöntemi

Belirlenen hedefler doğrultusunda öncelikle literatür taraması ile ulusal-uluslararası ar-ge kapsamında mimari tasarım ölçeğinde mevcut durum analizi yapılmıştır.

İlk adım olarak PV sistemler hakkında uygulama bilgileri derlenmiş, sonrasında veri toplama ve iz sürme metotları kullanılarak PV panel sistemlerinin uygulandığı, dünya genelinden seçilmiş örnek yüksek yapılar tasarım ve detay çeşitliliğine göre değerlendirilmiştir. Mimari tasarım, çalışmanın en önemli anahtar kelimesi olduğu için PV panel kullanımında, konstrüksiyon detay farklılıklarının olduğuna ulaşılmıştır. Bu doğrultuda çalışmanın kapsamı detay çeşitliliğinden kaynaklanan maliyet ve enerji üretimi farklarının kıyaslanarak, en verimli senaryonun ortaya koyulması olarak belirlenmiştir. Bu süreçte, yüksek yapılarda PV panel kullanımına yönelik sayısal modelleme gerçekleştirilmiştir. Modelleme sürecinde cephelerde farklı açılar ile uygulanmış detayların elektrik enerjisi üretim simülasyonu ve konstrüksiyon maliyet hesaplaması yapılmıştır. Analiz yöntemi olarak elde edilen veriler aşamalı olarak karşılaştırılmıştır.

Sınırlılıklar

Bahsi geçen nicel analiz yöntemlerinde senaryolarda tek değişkenin konstrüktif detaylar olması sebebiyle referans bir yüksek yapı ele alınmıştır. Bu yapı Ankara'daki mevcutta uygulanmış ve aktif şekilde ofis fonksiyonunda kullanılan bir yapıdır. Yapı kararında Ankara ilinde daha fazla ışınım almak istendiği için Çankaya ilçesi seçilmiştir. Seçilen referans yapı üzerinde karşılaştırmanın yapılacağı, örnek yapılar üzerindeki mevcut durum analizleri ile elde edilen üç farklı konstrüksiyon detayı;

- 1) PV panellerin cephede yatay şekilde kullanılması (0 derece)
- 2) PV panellerin cephede eğimli şekilde kullanılması (34 derece)
- 3) PV pnallerin cephede dikey şekilde kullanılması (90 derece)

olarak belirlenmiştir. Kurguların hepsinde birebir aynı fotovoltaiik paneller kullanılmıştır (aynı boyut, W_p değeri, cins, marka, ağırlık). Bu sayede fotovoltaiik panel ve özellikleri, bir değişken olmaktan çıkarılmıştır.

Tez çalışmasında yapılacak olan simülasyon modeli için; ağaçlar, çevredeki binalar ve diğer çevresel etkenlerden kaynaklı gölgelenmeler kapsam dışında tutulmuştur. Böylece tek değişkenin konstrüksiyon farklılıkları olması sağlanmıştır.

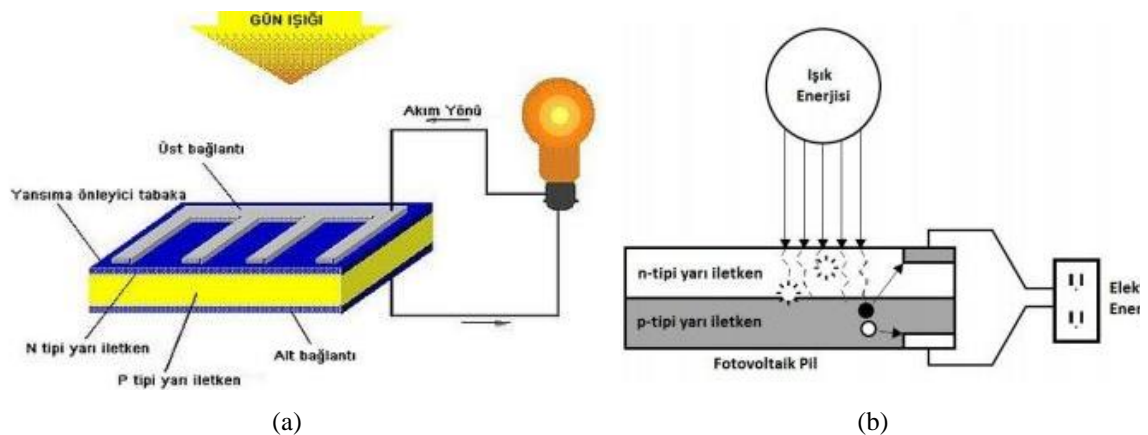
Ayrıca mimarlar için enerji verimli yapı cephesi tasarlama sürecinde yol gösterici bir çalışma ortaya koymak amaçlandığı için, analizlerin derinleşmesine sebep olan kirlilik hususu dikkate alınmamış, panellerin kirlenmesinden kaynaklanan verim kayıpları kapsam dışı bırakılmıştır.

2. PV PANELLERİN YAPISI VE ÖZELLİKLERİ

Terim olarak fotovoltaik Yunanca'dan gelen "phos" ve elektrikte ileri gelenlerden Alessandro Volta'nın "voltaic" tabirlerinin birlikte kullanılmasından oluşmaktadır (www.gunessistemleri.com). 1839 yılında A. Edmond Becquerel ilk kez fotovoltaik elektrikleme etkisini keşfetmiştir. Platin tabletlerle ilgili yürüttüğü çalışmalar sürecinde Becquerel, bu etkiyi ortaya çıkarmıştır. 1873 'te bilim insanı Willoughby Smith , foto iletkenlik etkisini selenyumda ortaya çıkarmış ve ilk fotovoltaik düzeneği oluşturmuştur. İlk defa 1883 yılında bilim insanı Charles Fritts %1 verime sahip fotovoltaik hücreyi geliştirmiştir. Ardından 1946 yılında Russell Ohl bilinen modern PV panelin patentini almıştır. Bunun ardın gelen yıllarda çeşitli çalışmalarla beraber fotovoltaik panellerin verimleri giderek arttırılmıştır ve günümüzdeki fotovoltaik panellerin gelişimi hala devam etmektedir (Uyar, 2015).

2.1. Fotovoltaiklerin Yapısı ve Çalışma Prensibi

Fotovoltaik piller yarı iletken malzemelerden elde edilirler ve fotovoltaik özellik sonucu elektrik enerjisi üretirler. Pillerin en üst tabakasında, üretilen akımı bir araya getirecek ve çoğunlukla bakır malzemeli olan üst bağlantılar vardır. Bunlar negatif üst bağlantılardır. Şekil 2.1.'de görüldüğü gibi üst bağlantının altında kalınlığı 150 nm olan, yansıtıcılığı olmayan bir kaplama bulunur. Bahsedilen bu katmanın olmaması durumunda, silisyum, aldığı ışının büyük bir kısmını geri yansıtacaktır. Bu katman, pil yüzeyindeki yansımayı engeller. Pillerin ön kısmı, normal olarak yansıyan ışığın bir kısmını daha yakalayabilmek amacıyla, piramit ve konikler biçiminde tasarlanmıştır (Cer, 2015).



Şekil 2.1. (a) Fotovoltaik pilin yapısı (b) Fotovoltaik pilin çalışması (Cer, 2015)

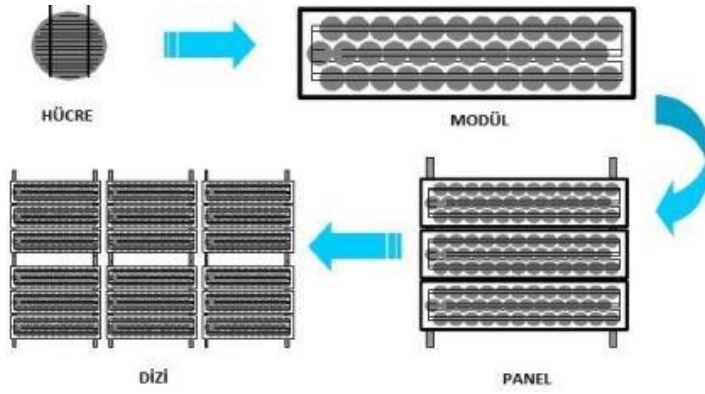
Elektrik akımının meydana geldiği kısım yansıma önleyici tabakanın altında bulunur ve iki ana bölümde meydana gelir. İlk kısım (n-katmanı) alınan ışımının neredeyse tamamını soğuracak kalınlıkta, fosfor atomları eklenmiş silisyumdan meydana gelen ve pilin negatif tarafını oluşturan bir katmandır. Fotonlar bu tabakada soğurularak elektron-hol çifti meydana gelmesine sebep olur. İkinci bölüm (p-tabakası) ise, bor atomları eklenmiş silisyumdan oluşmuş, pilin pozitif tarafıdır. Bu iki tabaka arasında, negatif ve pozitif yüklü elektronların karşılaştığı p-n eklemi isminde bir alan bulunur. Fotovoltaik pil, elektronları n bölgesine, holleri de p bölgesine iten bir pompa gibi çalışır. Elektron-hol birleşimlerinin ayrılmasıyla, güneş pilinin uç kısımlarında kullanılabilir bir enerji çıkışı meydana gelir. Aynı işlemlerin tekrarlanmasıyla aynı olaylar meydana gelmeye devam eder (Cer, 2015).

2.2. Fotovoltaik Sistem Bileşenleri

Fotovoltaik sistemler, güneş enerjisini kullanılabilir elektrik enerjisine dönüştürmek ve bu enerjiyi kullanıcılara sağlamak için farklı bileşenlerden oluşmaktadır. Bu bileşenler sırasıyla PV modüller, şarj denetim birimleri ,dönüştürücüler (invertörler), aküler ve diğer sistem bileşenleri olarak ifade edilebilir.

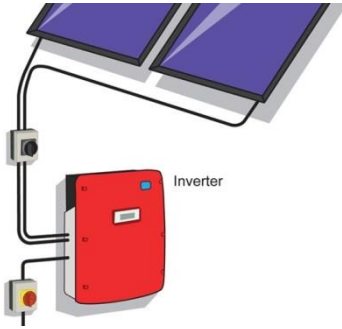
Sistemlerin en fazla öneme sahip birimleri, fotovoltaik modüllerdir. Yarı iletken davranış gösteren malzemeler, fotovoltaik panellerin üretimlerinde kullanılmaktadır. Bu yarı iletken malzemeler, güneş ışığının elektriğe dönüşümünde rol alırlar. Mikron boyutlarında inceliklere sahip olan bu hücreler çoğunlukla dairesel, kare veya dikdörtgen olur ve çeşitli büyüklüklerde bulunmaktadır. Bir fotovoltaik hücre enerji eldesi açısından yetersizdir. Enerji eldesini yükseltebilmek amacıyla birçok hücreden modüller, birçok modülden de paneller türetilir. Elektrik üretim miktarı iyice artırılmak istenirse bu sefer birçok panel kullanılarak fotovoltaik diziler meydana getirilir (Sayın ve Koç, 2011).

Şekil 2.2.'de görüldüğü gibi bir fotovoltaik pilden üretilen enerji miktarı çoğunlukla yeterli olmadığı için enerji eldesini arttırmak amacıyla hücreler paralel veya seri şekilde birleştirilerek modülleri, modüller bir araya gelerek panelleri, paneller de bir araya gelerek diziyi oluştururlar (Cer, 2015).



Şekil 2.2. Fotovoltaik hücre, modül, panel ve dizi ilişkisi (Cer, 2015)

İnvertör, İngilizce kökenli bir kelime olup dönüştürücü anlamına gelmektedir. Güneş panellerinin ürettiği doğru akımı, evlerimizde direkt kullanamayız. Evlerimizdeki cihazlar alternatif akımla çalışmaları için, invertör bir doğru akım kaynağından elde ettiği gerilimi dönüştürerek alternatif akım elde etmek için kullanılan elektronik bir cihazdır (İnvertör nedir, 2020).



Şekil 2.3. Fotovoltaik sistem dönüştürücü (invertör) (www.viridiansolar.co.uk, 2021)

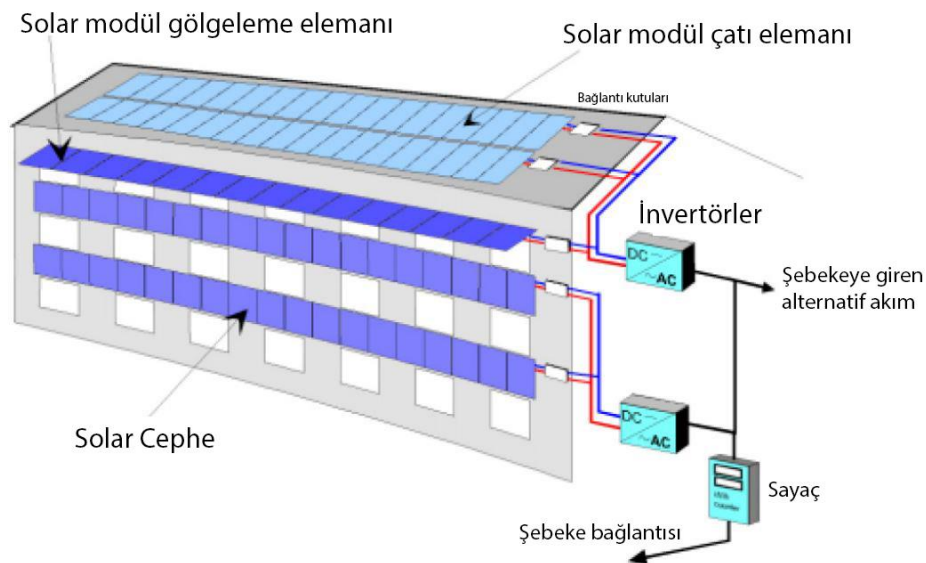
Kritik diğer bir sistem bileşeni ise solar akülerdir. Solar aküler, fotovoltaik sistemler için enerji depo eden derin döngülü akülerdir. Solar akülerin çalışma prensipleri, diğer akülerden çok farklıdır. Solar aküler, derin döngülü olması sebebiyle uzun, sürekli tekrarlı şarj işlemlerine karşı dayanıklıdırlar. Bağımsız şebekeli solar sistemlerde enerjinin depolanıp tekrar kullanılabilmesi için solar aküler gerekir. Solar akülerin olmadığı durumlarda, gece elektrik kullanımı olmayacak veya sadece jeneratörden gelen enerji kullanılabilir. Solar akülerin fiyatları, kalitelerine, sistem özelliklerine, akü üretim materyaline, verimine, dayanım süresine göre farklılaşır. Maliyetleri düşük değildir fakat uzun vadeli kullanımlarda maliyet geri dönüş sağlanabilecektir (www.incitas.com.tr).



Şekil 2.4. (a)Fotovoltaik sistem bileşeni olan aküler (b)şarj denetim birimi
(www.tesisat.org, 2018)

Şarj denetim birimleri fotovoltaik paneller ile akü arasındaki gerilimi düzenlemeye yardımcı birimlerdir. Fotovoltaik panelden elde edilen düzensiz gerilimin direk aküye iletimi akü açısından sakıncalıdır. Şarj denetim birimleri de; aküyü aşırı şarja karşı korumak, aküyü derin deşarjdan korumak ve panelden elde edilen gerilimi düzenleyerek aküye iletmek gibi amaçlar doğrultusunda kullanılmaktadır (Cer, 2015).

Fotovoltaik sistemlerin düzgün işleyebilmesi için aküler, hücre ve modüller gibi bileşenlerden başka sistem elemanlarına da gereksinim duyulmaktadır. Bu elemanlar, kablolama elemanları, sigorta elemanları, topraklama parçaları, anormal akımdan koruma elemanları, bağlantı kesme parçaları ve montaj elemanlarıdır. Gündüz üretildikten sonra akülere elektrik gönderilir. Gece ise bu depolanan elektriğin sisteme geri dönmesinin ve akülerin boşalmasının önüne geçmek gerekmektedir. Bu sebeple bloklama diyotu kullanılır (Sayın ve Koç, 2011).

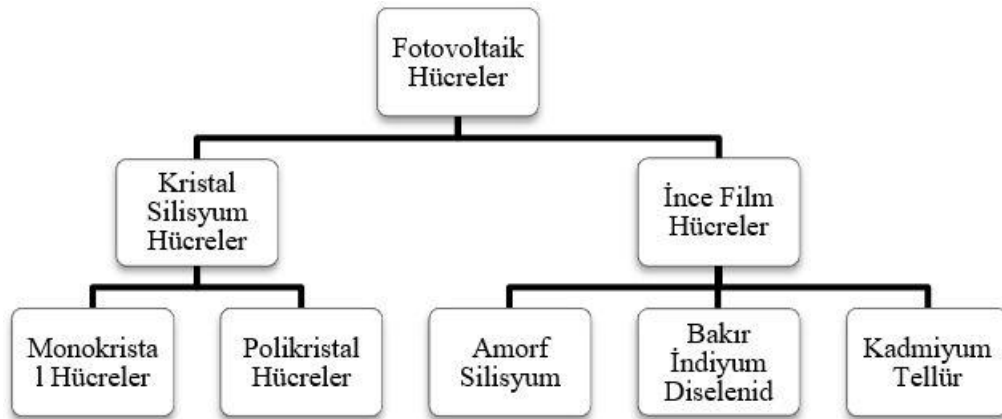


Şekil 2.5. Fotovoltaik sistem bileşenleri

2.3. Fotovoltaik Panel Çeşitleri

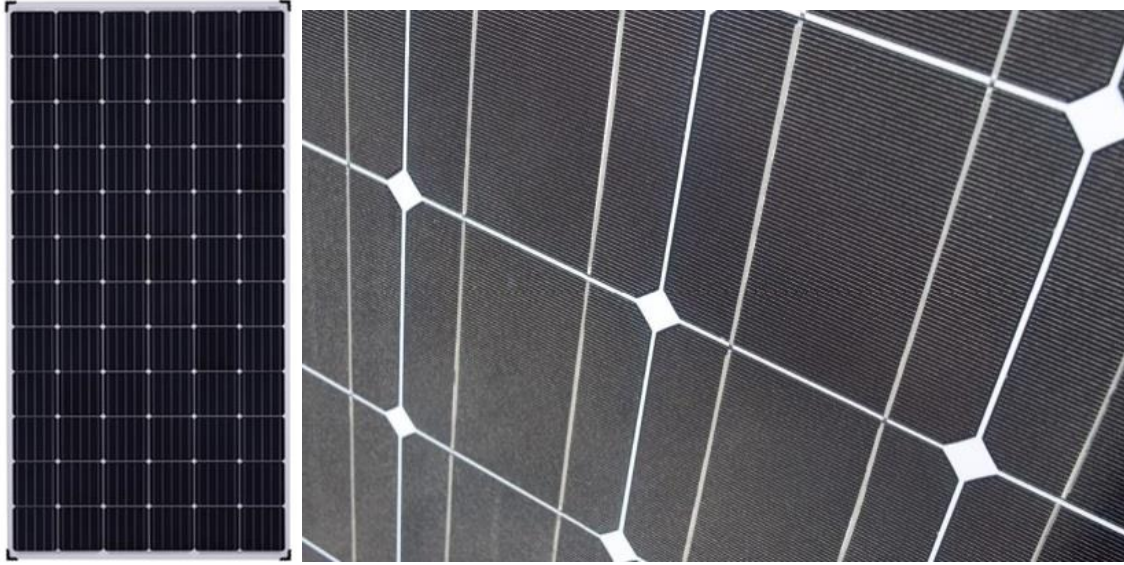
Fotovoltaik hücreler, imal edildikleri malzeme çeşidine göre iki grupta toplanabilir. İlki, geleneksel silikon esaslı fotovoltaik hücrelerdir. İkincisi, ince film fotovoltaik hücrelerdir.

Çizelge 2.1. Fotovoltaik hücre çeşitleri



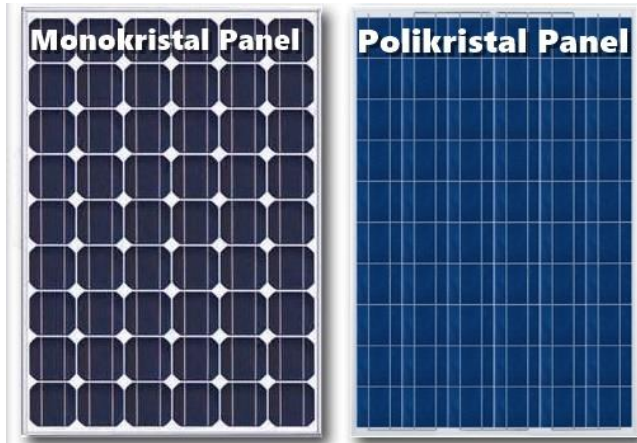
Silisyum, kristal PV hücrelerin en kritik malzemesidir. Doğal ortamda ilk sırayı alan oksijenden sonra en fazla bulunan element Silisyumdur. Ancak Silisyum doğal şartlarda saf şekilde mevcut değildir. Silisyum oksijenle bileşik oluşturarak kuvars veya kum şeklinde bulunur. Kuartz, oran olarak %90 silisyumdan meydana gelmektedir. Kuartzın işlenmesi ile %99 oranında silika elde edilir. Ardından silika, silisyum eldesi için kullanılır. Silisyum güneş hücreleri, polikristal ve monokristal olarak incelenebilir (Kızıldaş, 2019). Işınları soğurma miktarı düşük olmakla beraber verimlilikleri %12-18 arasındadır. Üreticiler için cazip olan bir seçenektir. Pazar payının %93'ünü kristal silisyum fotovoltaik hücreler oluşturmaktadır. Üreticiler, ortalama 25 yıllık bir kullanım ömrü sunmaktadır. Monokristal yapıları hücreler ve polikristal yapıları hücreler olmak üzere iki kısma ayrılırlar (www.gunessistemleri.com).

Monokristal fotovoltaik hücreler, verim açısından en yüksek performansa sahip hücrelerdir. Silisyum malzemesi, kendi özelliklerini uzun süre muhafaza edebilme yeteneği sayesinde ve maddenin yapısal dağılımının, hücre içerisinde her noktada aynı oranda olması sebebiyle bu hücre çeşidinde yüksek verimler elde edilebilmesi sağlanmaktadır. Her ne kadar verimleri yüksek olsa da maliyetleri çok fazladır. Laboratuvar verilerine göre yaklaşık ortalama %24-29 verim elde edilmiş olsa da, uygulamada paralel bağlantıya sahip fotovoltaik sistemlerde verimleri yaklaşık %15-18 arasında kalmaktadır. Homojen görünüşlerde ve genelde koyu renklerde olmaktadır (Şekil 2.6.) (Cer, 2015; Sayın ve Koç, 2011).



Şekil 2.6. Monokristal Fotovoltaik hücreler (www.dsneg.com)

Polikristal hücreler, renkleri genelde monokristal fotovoltaik panellere göre daha açık olan ve monokristalli hücrelere göre daha kolay üretilen fotovoltaik hücrelerdir (Şekil 2.7.). Monokristal hücrelere göre daha az kayba neden olduğu ve üretimleri de monokristallere göre daha kolay olduğu için, üretim maliyetleri daha azdır. Damar yapıları açısından süreksiz bir kurguya sahip oldukları için verimleri, monokristal fotovoltaik hücrelere göre daha düşüktür. Üretim süreci denemelerinde, labaratuarda %18 gibi bir verimliliğe ulaşılırken, üretim verileri %12-15 arasındadır (Cer, 2015; Sayın ve Koç, 2011).



Şekil 2.7. Monokristal ve Polikristal fotovoltaik hücreler (Güneş sistemlerinde neden mono veya polikristal panel tercih etmeliyim, 2019)

İnce film fotovoltaik hücrelerin çıkışı , maliyet ve kullanılan malzemenin azaltılması isteğine dayanır. Kristal silisyum fotovoltaik hücrelere göre daha az malzeme kullanılmıştır ve üretimleri daha kolay olduğu için daha az maliyete sahiptir. Temel olarak, fotovoltaik özellikteki malzemenin ince katmanlar halinde kesilerek çeşitli materyaller üzerine kaplanmasıyla oluşturulur. Ayrıca ince film fotovoltaik paneller elastik bir yapıya da sahiptirler (Şekil 2.8.).

Üretim maliyetleri her ne kadar kristal silisyum fotovoltaik hücrelerden düşük te olsa, yapısal kararsızlıkları sebebiyle verimleri daha düşüktür. Ayrıca uzun süre kullanım imkanı çok düşüktür. Malzeme yapısındaki kararsızlıklar sebebiyle, kullanım süresi bir hayli düşüktür. Bu sebeplerle, sektörde genelde çok daha az tercih edilen bir hücre çeşididir. İnce film fotovoltaik hücrelerin en çok kullanılanları amorf silisyum (a-Si), kadmiyum tellür (CdTe) ve bakır indiyum-diselenid (CuInSe₂ yada CIS)'dir (Cer, 2015).



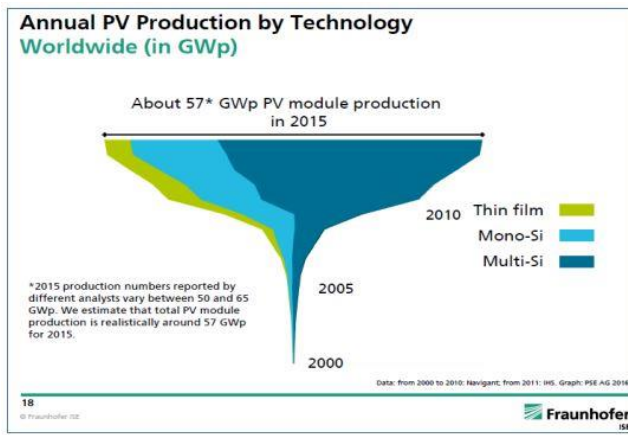
Şekil 2.8. İnce Film Fotovoltaik hücre (İnce film güneş paneli nedir, 2018)

Verimlilikleri ortalama %9 civarlarında olan Amorf Silisyum fotovoltaik hücreler çok yaygın bir kullanıma sahip değildir. Kısa zaman içerisinde yüksek verim kayıplarına uğraması sebebiyle kullanımı kısıtlı kalmıştır. Genelde kırmızı ve tonlarındadır (Cer, 2015; Sayın ve Koç, 2011).

Kadmiyum elementinin doğada bol bulunması ve üretim teknolojisi nedeniyle maliyetleri oldukça düşük olan kadmiyum tellür fotovoltaik piller laboratuvar koşullarında %16 civarında verim sağlarken uygulamada bu oran %6-8 olmaktadır (Cer, 2015).

Üretim sürecindeki deneylerde yaklaşık %17 oranında verim sağlanan bakır indiyum-diselenid fotovoltaik hücrelerde uygulama sürecinde %9-11 oranında verim sağlanmaktadır. Diğer fotovoltaik hücre tiplerine göre daha ince yapıda oldukları için uygulama kolaylığı sağlarlar (Cer, 2015).

Yukarıda görüldüğü gibi birçok çeşit solar hücre tipi bulunmaktadır ve her biri dünya genelinde çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Bu kullanım; maliyet, verimlilik ve dayanıklılık gibi kavramlara bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu etkenlere bağlı olarak dünya genelinde kullanılan fotovoltaik panel cinsi farklılık göstermektedir. Temelde en az maliyetle en çok elektrik enerjisi üretimi amaçlanmakta, bu doğrultuda kurulan sistemler için en verimli panel seçimi yapılmaktadır. Dünya genelinde maliyet-verimlilik açısından en avantajlı olan panel cinsi monokristal ve polikristal panellerdir. Bu sebeple de dünya genelinde en çok kullanılan iki panel cinsi monokristal ve polikristal fotovoltaik panellerdir. Şekil 2.9.'da dünya genelinde hücre türlerine göre yıllık fotovoltaik sistem elektrik üretimi ifade edilmiştir.

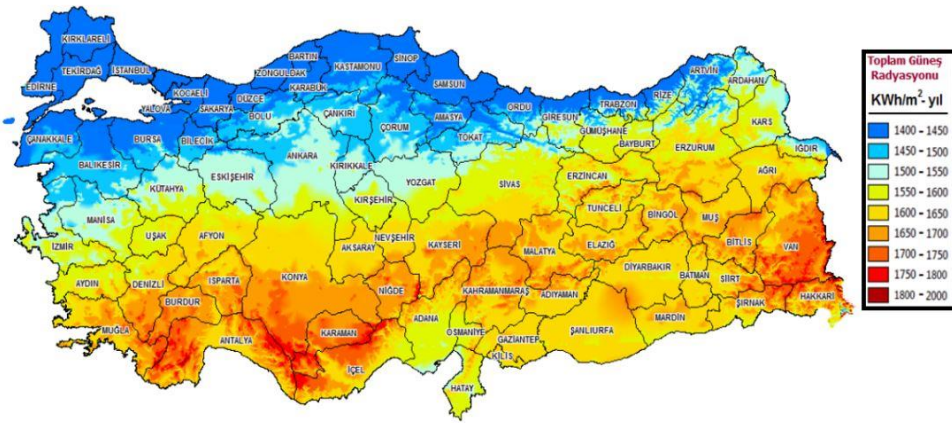


Şekil 2.9. Dünya genelinde hücre türlerine göre yıllık fotovoltaik sistem elektrik üretimi

2.4. Türkiye’de Güneş Enerjisi Potansiyeli

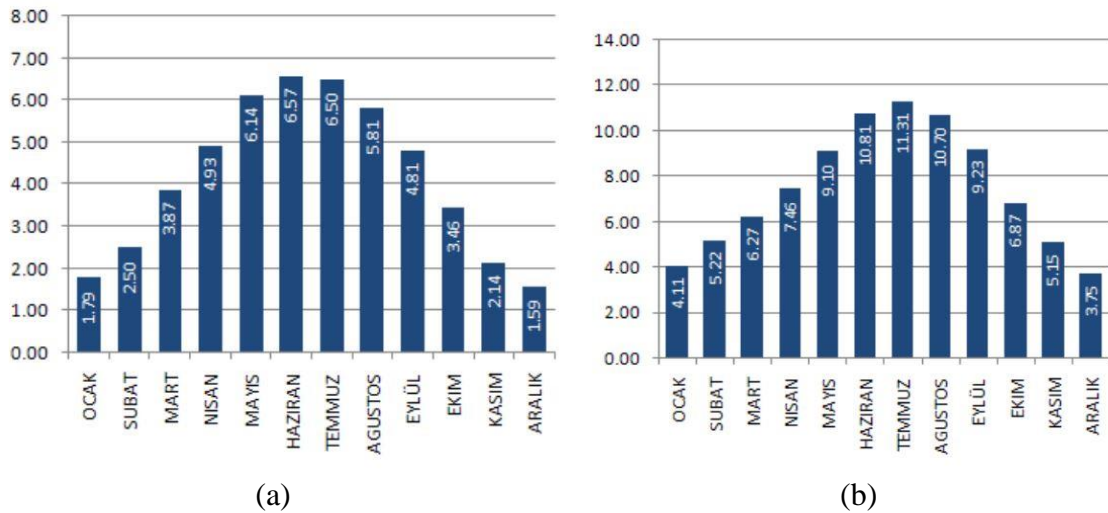
Güneşlenme süreleri ve güneş enerjisi açılarından Türkiye çoğu ülkeye kıyasla son derece avantajlı bir coğrafi konumda yer almaktadır. Türkiye’nin güneş enerjisinden yararlanma kapasitesi İspanya haricindeki bütün Avrupa ülkelerinden yüksektir. Ülkemiz 1400-1800 kWh/m²/yıl değerlerinde güneş enerjisinden yararlanabilme kapasitesine sahiptir (Ceylan ve Gürel,2018). Fakat Türkiye *güneş kuşağı* isimli ve güneş enerjisi açısından verimli bir coğrafi konumda bulunmasına rağmen, diğer Avrupa ülkelerine nispeten güneş enerjisinden gerektiği kadar istifade edememektedir (Öztürk, 2012).

Şekil 2.10.'da Türkiye enerji atlası görülmektedir. Atlasa bakıldığında Güneydoğu Anadolu ve Akdeniz bölgelerinin güneşlenme oranları diğer bölgelere göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca Türkiye’ni birçok bölgesinde de güneşlenme oranının iyi seviyelerde olduğu görülmektedir.



Şekil 2.10. Türkiye güneş enerjisi potansiyeli atlası

Türkiye’de güneş ışınım şiddetleri ve güneşlenme süreleri aylık verileri Şekil 2.11.’de ifade edilmiştir. Ülkemizde güneşlenme süresi ve bununla ilişkili güneş enerjisi potansiyeli Temmuz-Haziran aylarında en yüksek seviyelere ulaşmaktadır. Birçok güneş enerjisi uygulama ve yararlanma yöntemi açısından ifade edilecek olursa Türkiye’de henüz güneş enerjisi potansiyeli gereğince verimli şekilde kullanılamamaktadır (Ceylan ve Gürel,2018).



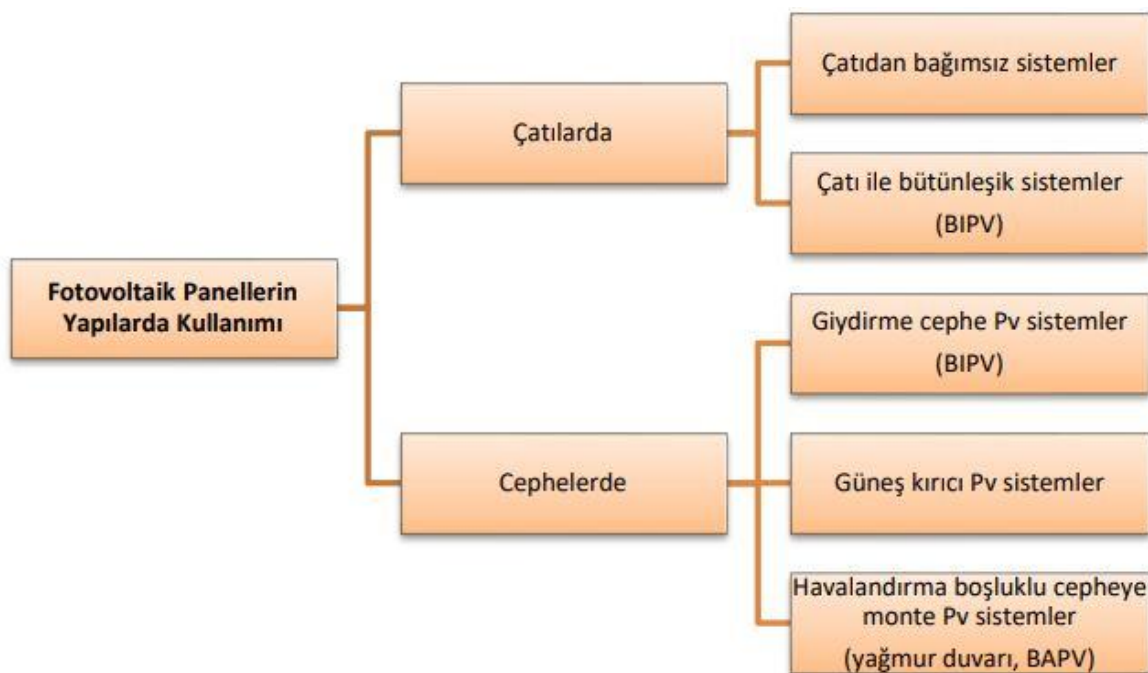
Şekil 2.11. Türkiye aylık ışıınım değerleri (kWh/m²) ve güneşlenme süreleri (saat)

Türkiye’de güneşlenme süreleri bölgesel bazda farklılık gösterdiği gibi aylık süresi bazında da farklılık göstermektedir. Dünyada güneş enerjisi kullanımı açısından öncü ülkelerden olan Almanya’nın yıl içinde aldığı en fazla ışıınım değeri olan 1200 kWh/m², Türkiye’deki bölgeler arasında en düşük ışıınım miktarına sahip Karadeniz Bölgesi’ndeki değerlere çok yakındır (Şekil 2.12.) (Yiğit ve Atmaca, 2018).

3. YAPILARDA PV PANEL KULLANIMI

Günümüzde yapılarda gerek yatay bileşen olarak, gerek düşey bileşen olarak enerji üretimi için PV panel sistemleri uygulanmaktadır. Yapı kabuğunda, yani çatılarda ve cephelerde kullanılan fotovoltaik panellerin o yere göre analizleri yapılarak, her bina için özgün ve optimum çözümler elde edilir. Bu doğrultuda, yapıların tasarım aşamasında enerji kullanımlarını doğru analiz etmek çok önemlidir. Bu analizlerde elde edilen verilere göre kullanılacak olan fotovoltaik sistemin kurgusu yapılmalıdır. Yapılarda PV panel sistemlerinde elde edilecek verimi maksimum seviyelere çıkarabilmek için tasarım sürecinde pasif enerji ilkelerine uygun şekilde hareket etmek gerekmektedir. Yapının çevre binalara göre konumu, bölgedeki hakim rüzgar doğrultusu, yapının yönlenmesi ve alandaki konumuna dikkat edilmelidir. Bunlarla birlikte bölge iklim verileri de göz önünde tutulursa, Pv sistemlerden alınacak verimler en üst seviyelere çıkabilmektedir. Fotovoltaik sistemler yapılara ilk tasarım aşamasında uygulandığı gibi mevcut yapılara da gerekli tedbirler alınarak uygulanmaktadır. Güneşlenme potansiyeli ve çatı eğimi durumlarına bağlı olarak fotovoltaik sistemlerin çatı kullanımları, daha avantajlı görülmektedir. Ancak araştırmaların genişlemesi, uyumlu sistemlerin ve uygun ortamların elde edilebilmesiyle birlikte cephelerde kullanılan fotovoltaik sistemlerin verimi günbegün artmaktadır. Fotovoltaik sistemlerin binalarda kullanımı incelenirken, cephe kullanımları ve çatı kullanımları olarak iki kısma ayrılabilir (Uçar, 2018; Sayın ve Koç, 2011; Cer, 2015).

Çizelge 3.1. Fotovoltaik sistemlerin yapılarda kullanımı (Gündüz ve İlerisoy, 2021)



3.1. Yapıların Çatılarında PV Panel Kullanımı

Çatılar, oluşturdukları yüzey açısından fotovoltaik sistemlerin kullanımı için verimli yüzeylerdir. Uygun yönlenme ve eğim açısının ayarlanabilmesi, kolay montaj imkanı, daha az gölgelenme potansiyeline sahip olması ve estetik kaygılara gerek duyulmaması gibi sebeplerle PV sistemlerin çatı kullanımları, avantaj oluşturmaktadır. Farklı tip binalarda, bina yüzey alanının miktarına göre uygulamalar çeşitlenmekte ve elde edilen verimler de farklılaşmaktadır (Cer, 2015; Sayın ve Koç, 2011; Uçar, 2018). Kış mevsimlerinde çatılarda, karın yoğun şekilde birikmesi fotovoltaik sistemler açısından büyük dezavantajdır. Bu sebeple, kar ve kir tabakasının çatı yüzeyine tutunamaması ile birlikte eğimli çatılarda PV sistemlerin kullanımı oldukça avantajlı hale gelmektedir (Karaca ve Uçar, 2018).

Çatılarda kullanılan fotovoltaik sistemler çatıdan bağımsız kullanılan ve çatı ile bütünleşik kullanılan olmak üzere iki şekilde incelenebilir.

3.1.1. Çatıdan bağımsız kullanılan fotovoltaik sistemler

Fotovoltaik sistemler, hem eğimli hem de düz çatılarda uygulanabilmektedir. Düz çatılarda uygulanan fotovoltaik sistemlerde genellikle metal ayaklar kullanılır ve bu metal ayaklar çatı yüzeyine sabitlenerek fotovoltaiklerin montesi sağlanır. Burada , eğim açıları, fotovoltaik sistemlerin uygulandığı binanın bulunduğu bölgenin iklim verilerine göre ayarlanır. Ayrıca panellerin arka kısımları boş olduğu için, verimin yükselmesinde etkili olan havalandırma sağlanmış olmaktadır. Paneller, Şekil 3.1.'de görüldüğü gibi yüzeye eğimli şekilde yerleştirildikleri için gölgelenmeden kaynaklı birbirlerini olumsuz etkileyebilir. Bu sebeple, tasarım aşamasında hesapların doğru şekilde yapılması ve aralarındaki mesafelerin uygun şekilde ayarlanması gerekmektedir (Cer, 2015; Uçar, 2018).



Şekil 3.1. Düz çatıya monte fotovoltaik paneller (www.solar.inventoturkiye.com)

Eğimli çatılarda fotovoltaik sistemlerin kullanılması ise, sistemin ihtiyaç duyduğu güneş açısını sağlayabilmesi sebebiyle verimli bir kullanım sayılabilir. Yine sistem ve çatı arasında boşluk kaldığı için havalandırma sağlanacak, eğimle beraber kar biriktirmeyecek ve yağmur suyunun akması ile birlikte yüzey kirlerinden bir miktar arınmış olacaktır (Cer, 2015).



Şekil 3.2. Eğimli çatıya monte fotovoltaik paneller (www.solar.inventoturkiye.com)

3.1.2. Çatı ile Bütünleşik Kullanılan Fotovoltaik Sistemler

Çatı ile bütünleşik fotovoltaik sistemler, çatı yüzeyinde görsel bir bütünlük oluşturmaktadır. Bu sistemler Şekil 3.3.'te de görüleceği gibi çatının kaplama malzemesi olarak uygulanabilmektedir. Bu uygulamaların daha hafif olması sebebiyle yapıya ek ağırlık azalacaktır. Bu sistemler, çatı ile bütünleşik olarak hareket ettikleri için alt kısımları da kapalı olmaktadır. Bu da bir havalandırma probleminin ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Doğal havalandırma ile ısınma önlenemediği için panel verimleri düşmektedir. Bu tasarım esnasında, ek bir havalandırma sistemi, panellerin fazla ısınmasından kaynaklanan verim düşüşlerinin önüne geçebilir (Karaca ve Uçar, 2018).



Şekil 3.3. Çatı ile bütünleşik fotovoltaik sistem (www.curiousengineers.wordpress.com)

3.2. Yapıların Cephelerinde PV Panel Kullanımı

Bina cepheleri, çoğunlukla yapı kabuğu toplam yüzey alanının büyük bir kısmını teşkil etmektedir. Dışarıdan bakıldığında ilk algılanan kısmın bina cephe yüzeyi olması nedeniyle cephe tasarım süreci oldukça önemli hale gelmektedir. Ayrıca tasarımcılar, anlayışlarını ifade edebilmeleri sebebiyle de bina cephe yüzeyleri özenle tasarlanmalıdır. Tasarım yönüyle, PV panellerin cephe yüzeyine uygulanması, çatı kullanımlarına göre çok daha fazla dikkat gerektirir. Bina cephe yüzeylerine kurgulanacak PV panel sistemleri karmaşık detay tasarımlarına sahip olabilmektedir. Fotovoltaik sistemler cephede giydirme cephe elemanı olarak, güneş kırıcı sistemler olarak ve havalandırma boşluklu cepheye monte sistemler olarak kullanılmaktadır (Sayın ve Koç, 2011).

3.2.1. Giydirme Cephe Elemanı Olarak Kullanımı



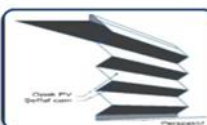
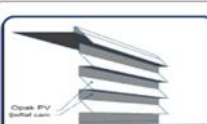

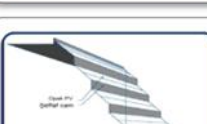

PV sistemlerin giydirme cephe elemanı olarak kullanılmasında elemanlar, bizzat bina kabuğunu meydana getirmektedir. Biçimsel anlamda farklı uygulamaları bulunmaktadır. Fotovoltaik elemanların da dahil olduğu elemanların tümü çelik ızgara sistemlerine, bu sistemler ise bina taşıyıcı sistemine bağlanır. Bu noktada, hava ve su yalıtımının sağlanabilmesi için süregelen giydirme cephe detay çözümleri uygulanabilmektedir. PV sistemlerin giydirme cephe elemanı olarak uygulanma çeşitleri Çizelge 3.2’de verilen şekilde biçimsel özelliğine göre sıralanabilmektedir (Uçar, 2018; Sayın ve Koç, 2011).

Fotovoltaik sistemlerin giydirme cephe elemanı olarak kullanımlarında gün ışığı etkisi, manzara açısı, PV panel elektrik üretimi gibi kriterler belirleyici olmaktadır. Cephelerde PV sistem tasarımı yapılırken bu kriterlerin hepsini birlikte düşünüp kompakt bir tasarım anlayışı ile ilerlemek gerekmektedir. Şekil 3.4.’te cephelerde fotovoltaik sistemlerin tasarımı sürecinde dikkate alınacak bazı hususlar ve bunların cephedeki konumlarına göre önem grafikleri ifade edilmiştir.



Şekil 3.4. Giydirme cephe fotovoltaik sistem tasarım yaklaşımı (Kızıлтаş, 2019)

Çizelge 3.2. Yapılarda fotovoltaik panellerin giydirmeye cephe elemanı olarak kullanımı
(Sayın ve Koç, 2011)

	<p>Düzlemsel Giydirmeye Cephe</p> <ul style="list-style-type: none"> •Geniş açıklıklı cephelere sahip ofis binalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Sistemin yükü binanın taşıyıcı sistemine aktarılır. Gün ışığı kontrolü sağlamak için opak ve yarı saydam fotovoltaik paneller birlikte kullanılabilir.
	<p>Düşeyde Kırıklı Giydirmeye Cephe</p> <ul style="list-style-type: none"> •Yapı cephesindeki giydirmeye cephe tasarımı kırıklı şekilde gerçekleşmektedir. Bu sebeple fazladan bir konstrüksiyon sistemine ihtiyaç duyulur ve maliyet artışı yaşanır.
	<p>Akordeon Giydirmeye Cephe</p> <ul style="list-style-type: none"> •Katlanmış plaka şeklinde uygulanan bu sistemler karmaşık bir kurguya sahiptir. Uygulama açısından diğer sistemlere göre zordur. Bu sebeple de maliyet artışı yaşanmaktadır. Ayrıca cephe temizliği kapasitesi çok zayıftır.
	<p>Yatayda Kırıklı Giydirmeye Cephe</p> <ul style="list-style-type: none"> •Fotovoltaik paneller cephede yatay şekilde kullanılır. Cephe kurgusu kırıklı şekilde yapıldığı için bu sistemde de ek maliyet artışı yaşanmaktadır. Buna karşın, fotovoltaik paneller, güneş ışınlarını daha dik açılarla alacak ve daha fazla elektrik enerji üretecektir.
	<p>Eğimli Düzlemsel Giydirmeye Cephe</p> <ul style="list-style-type: none"> •Bu cephe kurgusu, en yüksek verimlerin elde edilebildiği kurgudur. Yapının yapılacağı konuma ve iklim tipine göre cephenin eğim açısı ayarlanmalıdır. Farklı eğim açılarında farklı etkiler sağlanır.
	<p>Eğimli Kırıklı Giydirmeye Cephe</p> <ul style="list-style-type: none"> •Bu cephe sisteminde yüksek maliyet sorun teşkil etmektedir. Performansı eğimli düzlemsel giydirmeye cephe sistemine çok yakındır. Dik kısımlarda cam kullanılarak yapının dış mekan ile bağlantısı ve doğal ışık imkanı sağlanmıştır.
	<p>Taşıyıcı Cam Cephe</p> <ul style="list-style-type: none"> •Uygulanan bu sistemlerde cephe, taşıyıcı özellik göstermektedir. Cephe, yapının taşıyıcı strüktürünün bir parçası olarak görev yapmaktadır. Strüktürel kurgu arasında kalan kısımlara da fotovoltaik paneller yerleştirilir.

3.2.2. Güneş Kırıcı Olarak Kullanımı

Fotovoltaik sistemler güneş kırıcı işlevi ile de kullanılabilir. Güneş kırıcı olarak kullanımlarda , aynı zamanda Şekil 3.5.'te görüldüğü gibi hem mekânsal ışık yönetimi ve denetimini sağlamak, hem de binada kullanılacak elektrik enerjisini üretebilmek mümkündür. Hem ilk tasarım evresinde uygulanmakta, hem de bina cephelerinde sonradan iyileştirme uygulamaları olarak görülebilmektedir. Uygulamalarda, ek bir taşıyıcı konstrüksiyon sistemine ihtiyaç duyulur (Sayın ve Koç, 2011).



Şekil 3.5. Güneş kırıcı olarak kullanılan fotovoltaik sistemler (www.solarportall.com)

3.2.3. Cepheye monte havalandırma boşluklu PV sistemler olarak kullanımı

Bina cephesini dış etkenlere karşı koruyan, bununla birlikte elektrik üretimine yarayan PV sistemlerdir. Şekil 3.6.(a)'de görüldüğü gibi yapı kabuğuna monte edilirler (Sayın ve Koç, 2011).



(a)



(b)

Şekil 3.6. (a)Yağmur perdesi olarak kullanılan fotovoltaik sistemler (b)PV sistem detayı

Şekil 3.6.(b)'deki gibi Taşıyıcı sistem kurgusu ile tüm yükler bina strüktürüne aktarılır. Panellerin alt kısımlarında boşluklu yapıya sahip kullanımlar olduğu gibi, ısı yalıtım malzemesi ile kaplanmış uygulamalar bulunmaktadır. Panellerin arkasını boşluklu yapıda olması, doğal bir havalandırmaya sebep olacak, bu şekilde PV paneller doğal şekilde soğutulmuş ve verimleri yükseltilmiş olacaktır (Sayın ve Koç, 2011). Tablo 3.2.'de fotovoltaik panel verimliliklerinin havalandırma durumu ile bağlantılı olarak nasıl değiştiği ifade edilmiştir.

Çizelge 3.3. PV panellerin havalandırma durumlarına göre verimliliklerindeki değişimler (Yanardağ, 2015)

Havalandırma Durumu	ÇATI		CEPHE	
	Verim Kaybı (%)	Sıcaklık (°C)	Verim Kaybı (%)	Sıcaklık (°C)
İyi Havalandırma	2,1	29	3,9	35
Zayıf Havalandırma	2,6	32	4,8	39
Havalandırma Olmadan	5,4	43	8,9	55

4. PV SİSTEMLERİN TASARIMINA YÖNELİK KAVRAMSAL ÇERÇEVE

Literatür taraması yapılırken öncelikle konu ile ilgili genel bilgilerin yer aldığı çalışmalar analiz edildikten sonra yüksek yapıların cephe tasarımlarında PV panel kullanımı hususu özelinde araştırmalar yapılmıştır.

Literatür taraması iki aşamalı şekilde gerçekleştirilmiştir.

- Fotovoltaik panellerin bina cephelerinde kullanılmasına dair yönetmelikler, makale ve tezler incelenmiş ardından
- Fotovoltaik panellerin yüksek yapı bina cephelerinde kullanılmasına dair makale ve tezlerin incelemesi yapılmıştır.

2013 yılında resmi gazetede yayımlanan lisanssız elektrik üretimine dair yönetmelik yürürlükten kaldırılmıştır. Bu yönetmelikte, PV panellerin arazide kullanımı ile ilgili maddeler vardır (Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretimine İlişkin Yönetmelik, 2013).

Yeni yönetmelik 12 Mayıs 2019 tarihli resmi gazetede yayımlanarak yürürlüğe konmuştur. Bu yönetmelikle beraber lisanssız şekilde elektrik üretmek için arazide PV panellerin kullanılması sınırlandırılmış ve bu kullanım binalarda çatı ve cephelerde kullanılmasıyla kısıtlanmıştır. Ayrıca yönetmelikte ilk defa çatı ve cephe ifadeleri yönetmeliğin 4. Maddesinde fotovoltaik panellerin elektrik üretebilmek için çatı ve cephede kullanılabileceği şeklinde yer almıştır (Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretimine İlişkin Yönetmelik, 2019).

Yücel'in fotovoltaik sistemlerin binalarda kullanımı üzerine gerçekleştirdiği çalışmada küresel enerji probleminden bahsedilmiştir. Enerji elde edilmesinde fosil yakıtların kullanımının arttığı, bu sebeple fosil kaynakların tükenmekte olduğu ve dünyanın fazlasıyla kirlendiği belirtilmiştir. Bu sebeple de yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının yaygınlaştırılması gerektiğinden bahsedilmiştir. Yücel çalışmasında, fotovoltaik panellerin cephede genel olarak düşey olarak kullanıldığını, diğer binalar sebebiyle cepheye gölge düştüğü için uygulanacak fotovoltaik sistemin baştan iyi şekilde kurgulanması gerektiğini ifade etmiştir. Ayrıca arkasında hava geçişi olan panellerin sıcaklıklarının düşeceğini ve böylece panel veriminin artacağını ifade etmiştir. Çalışmada fotovoltaik modül boyutlarının belirlenmesi, maliyeti düşürmek, sistem kurgusunun yapılması ve cephe kurgusunda

optimum çözümleri yakalamak için belli kriterlerin varlığından bahsedilmiştir. Türkiye’de ve dünyada fotovoltaik panellerin yapılarda kullanım örneklerinin incelendiği çalışmada bu sistemlerin önemi vurgulanmış, Türkiye açısından değerlendirmelerde bulunulmuş ve çözüm önerileri ortaya konmuştur (Yücel, 2016).

Nguyen ve diğerlerinin fotovoltaik sistemlerin cephede kullanılması üzerine yaptığı çalışmada Vietnam’da bir ticari yapı cephesine fotovoltaik panel entegre edilmesi incelenmiştir. Çalışmada , cephe için kullanılan PV paneller cephe cam PV paneller, giydirme cephe PV paneller, yağmur perdesi PV paneller ve PV aksesuarlar olarak ele alınmıştır. Mikro invertör konfigürasyonunun öneminden bahsedilen bu çalışmada, cephede kullanılan PV panellerle çatıda kullanılan PV panellerin bir farkı belirtilmiştir. Cephede, diğer komşu binalar, ağaçlar v.b. gibi etkenlerle gölgeleme oluşacağı için, kullanılan invertör şekli de çatıdaki ile aynı olamamaktadır. Bu kullanımın amacı, gölge alan PV paneller yüzünden almayanların verimliliğinin azalmasını engellemektir. Merkezi invertör aksine, mikro invertörlerin, her bir panel için maksimum elektrik enerjisi dönüşümü sağlayacağı belirtilmiştir. Devamında bir PV cephe tasarım modeli önerilmiş, prototip fotovoltaik cephe duvarı tasarımı, cephe fotovoltaik simülasyonu, ve yapı enerji simülasyonu olarak üç aşama belirtilmiştir. Gelecek planı olarak, bu prototip PV sistemi gerçek verilerle test ederek simülasyon verileri ile karşılaştıracaklarını ifade etmişlerdir (Nguyen, Ngoc, Cong, Thuong, Van, Minh ve Le, 2019).

Çelebinin binalarda düşey şekilde fotovoltaik sistemlerin kullanımı ile ilgili yaptığı çalışmada fotovoltaik panellerin yapı cephesinde uygulanmasını mimari tasarım kriterlerini göz önünde bulundurarak işlemiştir. PV teknolojilerinde görülen gelişmeler ile birlikte PV lerin yapı kabuğuna entegre edilmesiyle beraber yapı kabuklarının, enerji üretimi sağlayan bileşenler haline geleceği belirtilmiştir. Burada mimari biçim oluşturulması ve iç-dış ortam arasındaki denetimin sağlanması amacı ile kullanılacak PV panellerin detay çözümlerinin büyük bir öneme sahip olduğu vurgulanmıştır. Yine Çelebi’ye göre süreç olarak fotovoltaik sistemlerin yapı kabuğuna entegre edilmesinde kritik ilkeler, ışınların yüzeylere düşme açıları, yapı yönlenmesi ve yapının biçimsel özellikleri olarak ifade edilebilir. Ayrıca kış mevsimlerinde güneş, konum olarak daha eğik ve yere daha yakın bir yörünge izler. Bu durum, kış aylarında yapı cephelerinin daha dik ışınımlara maruz kalacağı anlamına gelmektedir. Sıcaklık artışının fotovoltaik panel performansına olumsuz etkisi ve kirlenme etkileri de PV panelin kabuktaki tasarımına etki eden kriterler olarak ifade edilmiştir. Çelebi yaptığı çalışmayla bina kabuğunda PV panellerin uygulanma olanaklarını incelemiş , sonuç

olarak PV panellerin bina cephelerinde kurgulanması koşulunda özellikle eğim açısı ve yörüngesel hareketi dikkate alarak biçim kurgusunun gerçekleştirilmesi gereklilikler arasında olduğunu ifade etmiştir (Çelebi, 2002).

Koçer ve diğerlerinin yaptığı Ankara ve ilçeleri bazlı çalışmada güneş panellerinin verimlerinin maksimuma taşınması doğrultusunda en uygun eğim açılarının belirlenmesi üzerine araştırma yapılmıştır. Aylık ortalama güneş ışınım miktarının ve aylık yatay düzleme gelen güneş ışınım miktarının bilinmesinin ileride yapılacak hesaplamalar açısından oldukça önemli olduğu vurgulanmıştır. Ankara'da ışınım değerlerinin şehir kapsamında ve aylık farklılık gösterdiği ifade edilmekle beraber güney ve doğu yönlerine gidildikçe ayrıca Temmuz-Ağustos aylarında artış gözlemlendiği ifade edilmektedir. Ankara'nın bazı ilçeleri yıllık olarak en fazla oranda ışınım maruz kalmaktadır. En fazla radyasyona maruz kalan ilçeler Çankaya, Şereflikoçhisar, Haymana, Elmadağ, Bala, Mamak ve Çamlıdere'dir. Güneş açılarının hesaplamalar sonucu Ankara İli'ne yıl içinde en eğik şekilde kış mevsiminde $26,7^\circ$ ile geldiği bulunmuştur. Güneş ışınlarının Ankara İli'nde yer yüzüne en dik şekilde ulaştığı dönem yaz mevsimidir. Yaz ayları içerisinde bulunan 21 Haziran tarihinde, güneş ışınları Ankara'ya $73,5$ derece ile en dik şekilde ulaşır. Güneş ışınlarının Ankara'yı ısıttığı süre 15 saatlere çıkarak en yüksek seviyelerini görür. Kısacası, Ankara İli'nde güneş ışınlarının yeryüzü ile yaptığı açılar minimum $26,7$ ve maksimum $73,5$ derece olarak sırasıyla kış ve yaz ayları için ifade edilebilir. Yine güneş ışıkları $61,9$ ve $39,5$ derece ile sırası ile ilkbaharda ve sonbaharda yeryüzüne düşmektedir. Yeryüzünün maruz kaldığı çeşitli dönemlere ait ışınım verilerinin elde edilebilmesi için bir yazılım programlanmıştır. Bu yazılım vasıtasıyla Ankara ve ilçelerinin en uygun açı ve maksimum ışınım değerleri elde edilmiştir. Analizlerde Ocak ayına denk gelen en uygun açı değeri 65 derece olarak elde edilmiştir. Ayrıca yine Ocak ayında fotovoltaik panelin soğurduğu ışınım miktarı $436,62$ MJ/m² -ay olarak elde edilmiştir. Haziran ayına denk gelen en uygun açı ise 1 derecedir. Fotovoltaik panelin soğurduğu ışınım miktarı ise $652,52$ MJ/m² -ay olarak hesaplanmıştır. Eğer sabit fotovoltaik sistemler kullanılacaksa yıllık bazda hesaplanan ortalama en uygun eğim açısı baz alınabilir. Yıllık, yıl boyu sabit sistem baz alındığında, en uygun açı, Ankara için 34 derece bulunmuştur. Sonuç olarak yapılan bu çalışma ile Ankara ve ilçeleri bazında en uygun eğim açılarını ortaya konmuştur. Ay bazında düşünüldüğünde en uygun eğim açısı Haziran için 1 derece, Aralık için 67 derece olmakla birlikte yıllık en uygun açının 34 derece olduğu bulunmuştur (Koçer, Şevik ve Güngör, 2016).

Freitas ve diğerkleri, entegre fotovoltaiik panellerin yapılarda kullanımına yönelik yaptığı çalışmada farklı yapı tiplerinde farklı PV panel konfigürasyonlarının analizlerini yaptıktan sonra bir sonuca varmışlardır. Ayrıca bu çalışma ile beraber Rhinoceros yazılımının Grasshopper ve Ladybug eklentileri ile birlikte ilk mimari tasarım ve sonradan entegre etme işlemlerinde analiz yapılmasının ne derecede uygulanabilir ve kolay olduğunu göstermek istemişlerdir. Bütün bu evrelerde sadece bu yazılım ve eklentileri kullanarak modelleme, simülasyon ve analiz yapabilmek amaçlanmıştır. Çalışmanın metodu, Brezilya'da 7 farklı bina üzerinde uygulanacak olan PV sistemlerin tasarımı, simülasyonu ve analizinden oluşmaktadır. İklimsel verilerin EPW (EnergyPlus Weather File) ve SWERA (Solar and Wind Energy Resource Assessment) tarafından sağlandığı belirtilmiştir. İlk olarak, gölgelenmeler ve mevcut güneşlenme değerleri çerçevesinde PV paneller için en uygun cepheler belirlenmiştir. Ardından bu cepheler için belirli PV panel model tasarımları belirlenmiştir. Son olarak yıllık enerji tüketim verileri de hesaba katılarak enerji dengesi hesaplanmıştır. Analizde kullanılacak yapılar 2 kata kadar, 2 ve 6 kat arası, 6 kattan fazla olmak üzere üç grup olarak belirlenmiştir. Yine analizde Polikristal silikon cinsi PV panel kullanılmıştır. İlk olarak bu yapılar içerisinde yüksek katlı olan ve geniş yüzey alanına sahip olan yapı seçilmiştir. Yapılan analizlere göre yapının en uygun cephelerinin doğu, batı ve kuzey cepheleri olduğu belirlenmiştir. Ardından 3 farklı tasarım seçeneği sunulmuştur: ilki cephede 20 derece eğimle kullanılan güneş kırıcı PV paneller. İkincisi cephede 20 dereceden 90 dereceye kadar kullanılan PV paneller. Üçüncüsü cephede çift cidarlı cephe olarak kullanılan (90 derece) PV paneller. Analizler sonucu en yüksek enerji dengesi oranına sahip yapıların geniş yüzey alanına sahip olan yüksek katlı yapılar olduğu görülmüştür. Bunun sebeplerinden birisi, gölgelenme sebebiyle etkilenmelerinin çok az oluşudur. Sonuç olarak bu simülasyon ve modelleme programlarının kullanım kolaylığı ve ilk tasarım evresinde olsun, sonradan iyileştirme evresinde olsun kolaylık sağladığı vurgulanmıştır. Sonuçlara göre, eğimli şekilde gölgeleme elemanı olarak kullanılan PV paneller daha verimli olsa da, binaya entegre PV panellerin (90 derece) toplam ürettiği enerji, kullanıldığı yüzey alanı miktarının fazlalığı sebebiyle daha fazladır. Enerji üretimi miktarına bakıldığında bina yüksekliği ne kadar artarsa, cephe yüzeyine entegre edilmiş PV panellerin ürettiği enerji miktarı da o kadar artmaktadır. Üzerinde çalışılan yapının enerji tüketimi fazla olmasına rağmen, cephede kullanılan BIPV sistemi sayesinde üretilen enerji miktarı yıllık tüketimin %10,56'sı kadardır. Bu da yapı yıllık enerji maliyetinin düşürülmesinde verimli bir yol olarak kabul edilmelidir (Freitas, Cronemberger ve Soares, 2019).

Yapılan araştırmalar sonucunda; yürütülen projelerin farklı bgelerde, farklı yaklaşımlarla ele alındığı anlaşılmıştır. Fakat lisanssız elektrik yönetmeliğine dair 2019 yılında meydana gelen değişim ve çatı-cephe ibarelerinin yönetmelikte kullanılmasından sonra tez kapsamında Ankara'da bir çok katlı ofis yapısı üzerinden fotovoltaik sistemlerin konstrüksiyon farklarına göre cephe kurgularının ele alındığı bir çalışmaya ulaşılamamıştır. Bu alışma, yönetmelik değişimi ardından cephe kullanımlarının incelenmesi ve başkent Ankara'ya yönelik fark edilen açığın kapatılması açısından önemli görülmektedir.

5. ÇALIŞMANIN YÖNTEMİ

Dünyadaki enerji kullanım oranının günbegün artmasıyla birlikte hükümetler çevre bilincini sağlamak amacı ile çeşitli politikalar izlemektedir. Bu noktada Türkiye’de elektrik üretimine ilişkin önemli gelişmelerden biri olan lisanssız elektrik üretiminin bina çatı ve cephelerinde gerçekleştirilmesine dair ifade ile PV panel uygulamalarının gelecekte kullanımının ve öneminin artacağı düşünülmektedir. Özellikle bina tasarımında ana karar verici rolde olan mimarların bu sistemlere ait karar aşamasında bilinçli tasarım kararları alması ve detay çözümlmelerine hakimiyet kurmaları rasyonel uygulamalar elde edilmesinde önem teşkil etmektedir.

Tez kapsamında mimarlar için karar vermeyi kolaylaştıracak bir karşılaştırma yapmak hedefiyle alan çalışmasında iki aşamalı bir araştırma gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında yüksek yapılarda PV panel kullanımına yönelik mevcut durum analiz edilmiştir. Bu bölümde veri toplama ve iz sürme metotları kullanılarak dünya üzerinde farklı konumlardan seçilen ve cephelerinde fotovoltaiik sistemlerin kullanıldığı yüksek yapılar yapım yıllarına göre kronolojik olarak sıralanmıştır (Çizelge 5.1).

Çizelge 5.1. İncelenen örnek yüksek yapılar

Yapı ismi	4 Times Square Binası	Solar Tower	Bauerfein AG Ofis Binası	Schapfen Mill Tower	Torre Garena
Yapım yılı	1996	1999	2004	2005	2005
Kat adedi/bina yüksekliği	48 kat	19 kat	14 kat	115m	20 kat
Bulunduğu ülke	ABD	Almanya	Almanya	Almanya	İspanya
Yapı ismi	Darnaise District	CIS Tower	Pearl River Tower	Federation of Korean Industries T.	Hanwha Headquarters Binası
Yapım yılı	2005	1959 (yapı) 2006 (PV cephe)	2011	2013	2018(cephe iyileştirmesi)
Kat adedi/bina yüksekliği	17 kat	25 kat	71 kat	50 kat	124m
Bulunduğu ülke	Fransa	Birleşik Krallık	Çin	Kore	Kore

Tasarım kararlarına göre detaylandırılan örneklem grubunda, PV panel sisteminin özellikle cephelerde hangi oranlarda kullanıldığı, hangi açılar ile kullanıldığı ve kullanılan panel türleri gibi uygulama kararları incelenmiş ve değerlendirilmiştir.

İkinci aşama ise nicel bir araştırma yöntemi olan simülasyon programı aracılığı ile incelenecek senaryoların 3 boyutlu şekilde modellenmesi ve simülasyonunun yapılması şeklinde gerçekleştirilmiştir. Alan çalışması yapılırken ilk olarak bir referans yüksek yapı seçilmiştir. Literatürden alınan bilgilere dayanarak en verimli 3 cephesine karar verilmiş ve bu cephelere çeşitli eğim açılarında fotovoltaik panel sistemi tasarlanmıştır. Eğim açılarının çeşitlenmesi beraberinde konstrüksiyonun da farklılaşmasını getirmiştir. Bu 3 farklı eğim açısına sahip kurgular, simülasyon yazılımı vasıtası ile modellenmiş ve enerji simülasyonu yapılmıştır. Ayrıca her bir eğim açısının sahip olduğu karar verilen konstrüksiyon sistemi profesyoneller tarafında tasarlanmış ve maliyet hesabı elde edilmiştir. Bu veriler ile konstrüksiyon maliyeti-enerji üretimi-kazanılan kar oranları incelenmiş ve en verimli sonuç ortaya konmuştur.

5.1. Yüksek yapı cephelerinde PV panel kullanımında mevcut durum analizi

Modern kentsel bölgelerde, çok katlı yapılar incelendiğinde, çatı alanlarına oranla çok daha büyük cephe yüzey alanlarına sahip oldukları anlaşılmaktadır (Gündüz ve İlerisoy, 2021). Yüksek binalar için, kat adedi arttıkça bina toplam dış cephe yüzey alanı da artmaktadır. Bu sebeple birim metrekare başına düşen güneş enerjisinden yararlanılacak çatı alanı, cephelere oranla çok daha düşük seviyelere inmektedir (Kılış, 2020). Bu doğrultuda, tez araştırmasının ilk aşamadaki mevcut durum ile amaçlanan, seçilen örnek yüksek yapılar üzerinden cephelerde kurgulanan PV sistemlere yönelik tutumu incelemek, analiz etmek, değerlendirmek ve nihayetinde hem tasarım hem yapım tekniği açısından önemli noktaları ortaya koymaktır. Öncelikle örnekler üzerinden PV sistemler hakkında kısa bilgi verilmiştir.

4 Times Square Binası (ABD, 1996)

48 katlı 4-Times Square binası New York'un 1990'larda yapılmış en büyük binası olup aynı zamanda Amerika'nın ilk büyük fotovoltaik uygulamasıdır (Özdoğan, 2005). Binada fotovoltaik modüller cephede dik (90 derece) kullanılmıştır (Şekil 5.1). Tasarımcılar, çeşitli analizler sonucu fotovoltaik sistemin uygulanacağı yüzey için en uygun alanın 37. ve 43. katlar arasında güney ve doğu cephelerinin olduğunu saptamışlardır. Bu yükseklikte, en yüksek binalar bile kısa gölgeler oluşturur ve böylelikle fotovoltaik yüzeylere gölge düşmeyecektir. Binada 15 kW'lık amorf silikon ince film modüller kullanılmıştır. Toplam 278 m² PV modüller güney ve doğu cephelerinde 37. ve 42. katlar arasında kullanılmıştır. 150.83 cm x 92.86 cm, 74.30 cm x 92.86 cm, 150.83 cm x 72.72 cm, 74.30 cm x 72.72 cm olmak üzere 4 farklı boyutta toplam 288 modül kullanılmıştır.

PV'lerden; yılda 21.000 kWh enerji elde edilmektedir (Özdoğan, 2005). Türkiye'deki elektrik kullanımını miktarı ile Türkiye'de hane başı birey sayısının ortalama dört kişiden oluştuğu bir ailenin yıllık ortalama elektrik tüketimi değeri 3036 kWh şeklinde ifade edilmiştir (www.gazelektrik.com, 2021). Buna göre bu yapının yıllık elektrik üretimi, yaklaşık 7 adet ailenin yıllık enerji tüketimine eşittir.



Şekil 5.1. Four Times Square Binası

CIS Tower (Birleşik Krallık, 1959)

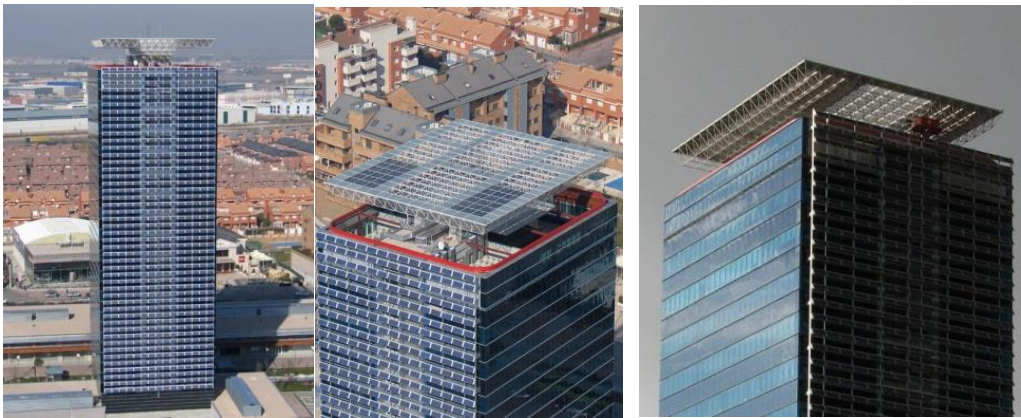
Manchester'da ofis binası olarak kullanılan CIS Tower, inşa edildiği tarihten itibaren 40 yıl boyunca aktif şekilde kullanılmış, yıllar içerisinde birçok yönden problemleri artınca 2006 yılında enerji kullanımı ve tüketimi açısından yapıya katkı sunacak büyük değişiklikler meydana getirilmiştir (www.wikipedia.org). CIS Tower, yaklaşık 11 milyon dolar harcanarak cephe iyileştirmesine gidilerek PV paneller entegre edilmiştir. 3 cephesine kaplanan PV paneller ile yılda 390.000 kWh enerji üretmektedir (www.solaripedia.com). Yapının PV panel ile donatılan ön cephesi güney yönüne bakmakta, diğer iki cephesi ise doğu ve batı yönlerine bakmaktadır (Şekil 6.2). En çok enerji üreten cephesi güney cephesidir. Yapı, kuzey yarım kürede yer aldığı için kuzey cephesine PV panel konmamıştır. Bu proje, Birleşik Krallık'taki en büyük yenilenebilir enerji projesidir. Bu sistem, binanın yıllık enerji ihtiyacının %10'unu karşılamaktadır (www.solaripedia.com). Türkiye'deki hane başı elektrik tüketiminin ortalaması ile kıyaslandığında ise binanın fotovoltaiik sistem vasıtası ile yıllık ürettiği enerji yaklaşık 128 haneni tükettiği yıllık enerji miktarına eşittir (www.gazelektrik.com)



Şekil 5.2. CIS Tower Binası

Torregarena (İspanya, 2005)

İspanya'nın Madrid şehrinde bulunan binanın yapımı 2005 yılında tamamlanmıştır. Alcalá de Henares'in en sembolik binalarından biri olan Torre Garena'ya entegre edilmiş 80 kW'lık bir PV şebekesine bağlı sistemden oluşmaktadır (Şekil6.3). PV sisteminin tasarımında, çevreye ve estetiğe entegrasyonuna özel bir önem verilmiştir. Polikristal güneş pillerinden oluşan PV modülleri, mevcut güneş ışığından tam olarak yararlanmak için 60° eğimde kurulmuştur. Çatı PV kurulumu, her biri 100 Wp nominal güce sahip bir dizi 93 Cam-Cam polikristalin güneş hücresi modülü içerir. Binanın tasarımına entegre edilmiş güney yönüne doğru 30° eğimli fotovoltaik hücreler çatıda yer alırlar (www.pvdatabase.org). Binanın cephesi ve çatısı 2 farklı güneş PV enerji üretim tesisi içerir: cephedeki PV kurulumu, 75,8 kWp toplam güce sahip 948 PV modülü kullanılarak inşa edilmiştir. bu kararın yılda 85 ton CO2 emisyonu tasarrufu sağladığı hesaplanmıştır.



Şekil 5.3. Torregarena Binası

Darnaise District(Fransa,2005)

Fransanın La Darnaise bölgesinde yer alan Darnaise District, bina cephesine 12 kWp güneş panelleri entegre edilmiş bir konut yapısı kompleksidir. Bu proje, 16 katlı 11 blok (740 konut) dahil olmak üzere Darnaise bölgesi rehabilitasyonunun bir parçasıdır. Projenin amaçlarından biri konut sakinlerinin enerji giderlerinin düşürülmesidir (www.pvdatabase.org).

11 blok içerisindeki her bir blok kendi PV sistemine, kendi anlaşmasına ve kendi şebeke bağlantısına sahiptir. PV sistemler için gereken şebeke bağlantı sistemi, yine diğer binaların şebeke bağlantı sistemlerinin yakınına kurulmuştur. Çok katlı yapılar genelde PV panel kullanımı için çok sınırlı bir çatı alanı sunarlar, özellikle de çatının termal enerji için kullanıldığı durumlarda. Bu sebeple proje tasarımcısı, çatıya fotovoltaik sistem kurmak istememiş, cephenin sağladığı alandan yararlanmak istemiştir (www.pvdatabase.org).



Şekil 5.4. Darnaise District Binası

Schapfen Mill Binası(Almanya,2005)

Almanya'nın Ulm kentinde yer alan bu silo binasının yapımı 2005 yılında tamamlanmıştır. 115 metre yüksekliğindeki Silo Kulesi olan bina, Bavyera Güneş Enerjisi Geliştirme Derneği'nin entegre fotovoltaik sistemleri inşa etme yarışmasında beş ödülünden birini kazanan projedir. Güney tarafındaki cephe, yılda yaklaşık 70.000 kWh elektrik üreten 1300 CIGS güneş modülünden oluşan bir fotovoltaik sistemle donatılmıştır (Şekil 6.5.). Bununla birlikte, dikey montaj nedeniyle, tesis teorik olarak mümkün olan verimin yalnızca yaklaşık yüzde 70'ini verir.



Şekil 5.5. Schapfen Mill binası

Bauerfeind AG Ofis Binası(Almanya,2004)

Almanya'nın Thüringen eyaletinde bulunan 57 metre ile Bauerfeind idari binası, bölgedeki en yüksek bina ve 1990'lardan sonra tek yeni yüksek binadır. Ofis işlevli binanın eliptik zemin planı, 14 katlı bina yüksekliği ve kullanılan malzemeler cam, metal ve doğal taş bu yapısal kabuğun tasarımını oluşturur (Şekil 6.6a). Kulenin güney cephesi tamamen 272 m²'lik bir alana ve 34 kWp'lik bir kapasiteye sahip fotovoltaik elemanlardan inşa edilmiştir (www.pvdatabase.org).



(a)



(b)

Şekil 5.6. (a) Bauerfeind AG Ofis Binası (b) Solar Tower Binası

Solar Tower(Almanya Hauptbahnhof Freiburg,1999)

60 metre yüksekliğiyle Freiburg'daki Güneş Kulesi, yapıldığı yıllarda Almanya'nın güney kesimindeki en yüksek fotovoltaik cepheye sahiptir (Şekil 6.6b). 19 kat alanına yayılan toplam 327m² alana sahip 246 modül inşa edilmiştir. Binanın inşası başlamadan önce, çevredeki binalar aracılığıyla gelecekteki fotovoltaik sistemin gölgelendirmesini analiz etmek için bir ışıma-gölge simülasyonu yapılmıştır. Fotovoltaik sistem sayesinde, yılda 16 ton karbondioksit, 11 kg kükürt dioksit, 17 kg azot oksit ve 4 kg karbon monoksitin çevreye salınımı önlenmiştir (www.pvdatabase.org). Her yıl 24.000 kWh elektrik üreten Solar Tower, Baden-Wuerttemberg eyaleti fotovoltaik mimari ödülüne layık görülmüştür (www.visit.freiburg.de).

Pearl River Tower (Çin,2011)

2011 yılında yapımı tamamlanan ofis binası Çin'in Guangzhou kentinde yer almaktadır. Pearl River kulesindeki PV modülleri, hem bina spandrel panelleri hem de güç jeneratörü olarak kullanılmaktadır (Frechette ve Gilchrist, 2008).



Şekil 5.7. Pearl River Tower

Pearl River Tower'daki güneş ışımasını dikkatlice araştırılmıştır. Bina kabuklarının belirli bölümlerinde kullanıldığında PV hücrelerinin kullanılması daha verimli olabileceği belirlenmiştir. BIPV'lerin dağılımı, güneş tarafından sunulan güneş enerjisini nerede optimize edecekleri ile doğrudan ilişkilidir. Doğu ve batı cephelerinde özel camlarla birlikte yatay (0 derece) şekilde gölgeleme elemanları kullanılmıştır (Şekil 6.8)(www.asce.org). Bu sayede sistem sadece binaya elektrik sağlamakla kalmaz, aynı zamanda doğrudan güneş ışığının olumsuz etkilerine karşı bir önlem de alınmış olur (Tumurbaatar, 2019).



Şekil 5.8. Pearl River Tower cephesinde kullanılan sabit 0 derece güneş kırıcılar

Hanwha Headquarters Tower (Kore,2018)

Yapı Güney Kore’de, Seul şehrinde yer almaktadır. Cephe iyileştirmesi bağlamında 2018 yılında Pv sistemler yapıya uygulanmıştır. Projede, 107 kWp kapasiteli fotovoltaiik sistem, çatı ve cepheye uygulanmıştır. Yapıda kurgulanan cephe enerji tüketim oranını azaltmakla birlikte dış görünüm ve günışığı performanslarını iyileştirmek adına cam ve alüminyum sistemler ile birlikte hem opak hem yarı saydam paneller kurgulanmıştır. Cephe kurgusunu yapan firma, fotovoltaiik panelleri, gün ışığından en çok verim alınacak açı ve miktarda Güney cephede kurgulamıştır (Tumurbaatar, 2019).

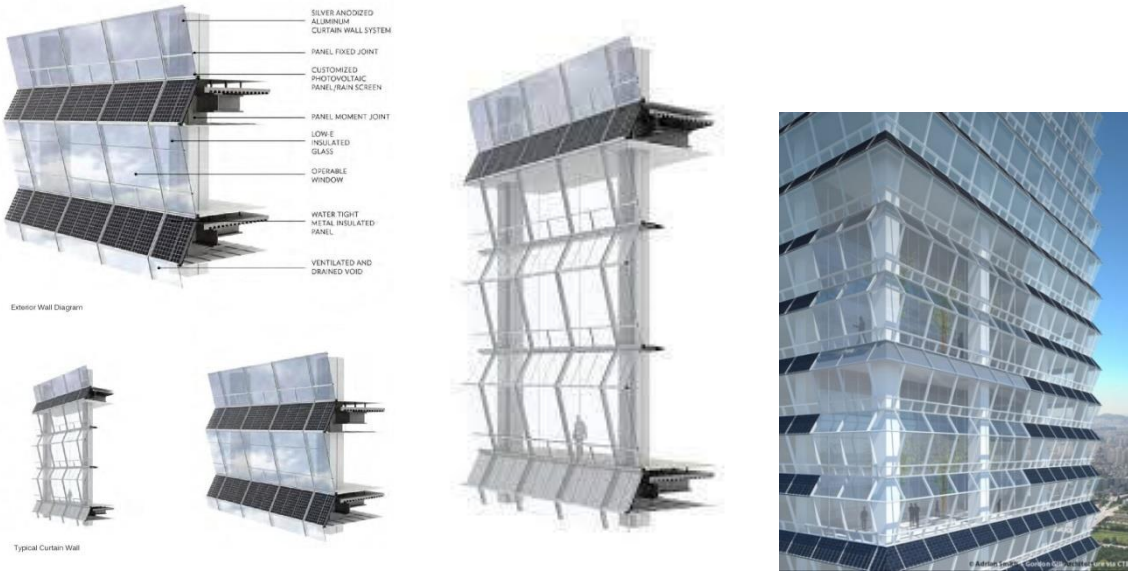
Binaya doğrudan güneş ışığı etkisi, camın doğrudan güneş ışığından uzak tutulmasıyla sağlanan gölgeleme ile azaltılırken, Güney cephesinin üst kısmı doğrudan güneş ışığını alacak şekilde açılıdır. Tüm cephelerde %55 şeffaflık elde etmek için pencereden duvara kadar olan oranı göz önünde bulundurarak, PV hücreleri eğimli şekilde optimum miktarda doğrudan güneş ışığının bulunduğu açık bölgelerde Şekil 5.9.1. de görüldüğü gibi Güney/Güneydoğu cephesindeki opak panellere yerleştirilir. Ayrıca, PV panelleri, güneşten gelen enerjinin en iyi şekilde alınabileceği cephelerde açılıdır (Tumurbaatar, 2019).



Şekil 5.9. Hanwha Head Quarters Binası

Federation of Korean Industries Tower Binası (Kore, 2013)

Federation of Korean Industries Tower binası, Güney Kore'nin Seul kentinde bulunmaktadır ve 2010-13 yılları arasında yapımı tamamlanmıştır. Fotovoltaik paneller cephede spandrel yüzeye entegre edilmiştir. 1100 adet fotovoltaik panel optimum eğim açısı ile cepheye yerleştirilmiştir. Bu eğim ile hem üretilen enerjinin artması hem de estetik bir görünüm elde edilmesi amaçlanmıştır (Gündüz ve İlerisoy, 2021).



Şekil 5.10. Federation of Korean Industries binası

Farklı bölgelerde uygulanan 10 farklı yapının kronolojik olarak incelenmesi ile dünyadaki PV panel uygulamalarının yüksek yapı ölçeğindeki tutumu ortaya konmaya çalışılmıştır. Yapılar tasarım evresi, entegrasyon tipi, cephede uygulanma oranı, PV panel cinsi, eğimi, şebeke bağlantısı ve panel opasitesi başlıklarına göre karşılaştırmalı analiz tablosu oluşturulmuş ve değerlendirmeler yapılmıştır (Çizelge 5.2).

Çizelge 5.2. PV panellerin kurgulandığı örnek yüksek yapılar (Gündüz ve İlerisoy, 2021)

Yapılar	Tasarım Evresi	Entegrasyon tipi	Cephede Uygulanma Oranı	Pv Panel Cinsi	Pv Panel Eğimi	Şebeke bağlantısı	Panel opasitesi
4 Times Square Binası	İlk tasarım	BIPV	37. ve 43. Katlar arası, güney ve doğu cephesinde 278 m ² lik alan	Amorf silikon İnce film Panel	Dik(90°)	Ulaşılamadı	Opak
Solar Tower	İlk Tasarım	BIPV	327 m ² lik alan. Cephenin yaklaşık %40'ını teşkil eder.	Ulaşılamadı	Dik(90°)	On-grid (Şebeke bağlantılı)	Opak
Bauerfein AG Ofis Binası	İlk Tasarım	BIPV	Güney cephesine 272 m ² lik alana uygulanmıştır. Cephenin yaklaşık %60'ını teşkil eder.	Polikristal Fotovoltaik	Dik(90°)	On-grid (Şebeke bağlantılı)	Opak
Schapfen Mill Tower	İlk Tasarım	BIPV	Güney cephesine, cephenin yaklaşık %60'ına uygulanmıştır.	İnce Film Fotovoltaik Panel (Bakır-Selenid)	Dik(90°)	On-grid (Şebeke bağlantılı)	Opak
Torre Garena	İlk tasarım	Sabit gölgeleme elemanı BIPV	Uygulandığı cephenin tamamına kurulmuş.	Polikristal Fotovoltaik	Eğimli	On-grid (Şebeke bağlantılı)	Opak
Darnaise District	Yenilenme (Retrofit)	BAPV	Uygulandığı cephenin %25'lik kısmını kaplamıştır.	Polikristal Fotovoltaik	Dik(90°)	On-grid (Şebeke bağlantılı)	Opak
CIS Tower	Yenilenme (Retrofit)	BIPV	Güney, doğu ve batı cephelerine toplamda cephenin %90ı kadar uygulanmış.	Polikristal Fotovoltaik	Dik(90°)	On-grid (Şebeke bağlantılı)	Opak
Pearl River Tower	İlk Tasarım	BIPV ve hareketli güneş kırıcı	Batı cephesinin tamamına uygulanmış. Güney cephesinde şeritler halinde cephenin %8 ini teşkil eder.	Ulaşılamadı	Yatay (0°)	Ulaşılamadı	Opak
Federation of Korean Industries T.	İlk Tasarım	BIPV	Alan olarak uygulandığı cephelerin yaklaşık %40'ını teşkil etmektedir.	Monokristal Pv	Eğimli	On-grid (Şebeke bağlantılı)	Opak
Hanwha Headquarters Binası	Yenilenme (Retrofit)	Sabit-Giydirme cephe BIPV	Güney ve Güneydoğu cephelerinde toplam alan bakımından çok küçük bir kısmında uygulanmıştır.	Monokristal Pv	Eğimli	Ulaşılamadı	Opak

Fotovoltaik panellerin, bina dış kabuğunun ayrılmaz bir parçası olarak, bina tasarımına entegrasyonu yaygınlaşmaktadır. İncelenen örneklerde tasarım evresi bakımından çoğunlukla ilk tasarım aşamasında bu sistemlerin uygulandığı projeler olsa da kronolojik olarak günümüze yaklaştıkça cephe yenileme bağlamındaki uygulamalar dikkat çekmektedir.

Örnekler entegrasyon tipi açısından değerlendirildiğinde BIPV (yapıya entegre pv) sistemlerin daha fazla oranda kullanıldığı görülmektedir. Fotovoltaik sistemlerin binaya uygulanma evresine bağlı olarak ta değişen bu süreçte, ilk tasarım evresinde kullanımına karar verilen fotovoltaik sistemler cephede çoğunlukla bütünleşik olarak kullanılmıştır.

Fotovoltaik sistemlerin cephe genel tutumundaki etkisi dengelidir. Örnekler arasında çok baskın şekilde cephede okunan fotovoltaik sistemler olduğu gibi, baskın olmayan sistemler de bulunmaktadır. Bu da mimarın, yapı tasarımındaki öngörülerine, yapı için tasarlanan fotovoltaik sistemin kurgusuna ve miktarına bağlıdır. Özellikle güncel yapılarda tasarım

anlamında arayışların arttığı gözlemlenmektedir. Binaya entegre ve binaya özgü detaylar ile çözümlenmiş uygulamalar bina cephelerindeki mekanik etkiyi azaltmakta hatta yok etmektedir. Ayrıca fotovoltaik paneller cephede uygulanırken en temel yönlendirici etmenlerden biri de gölgeleme etkisidir. Uygulanacak yüzeylerin çevresindeki ağaçlar veya binalar ile güneş ışığının gölgelenmesi sistemin verimliliğini azaltmaktadır. Sistemlerin gölgelenmesine sebep olabilecek bu durumlar tasarım aşamasında önlemler ile en aza indirilmektedir. Özellikle yoğun kent dokuları için büyük bir sorun olan bu durum yüksek yapılarda bir miktar önemini yitirmektedir. Yapıların cephelerine fotovoltaik panel entegre edilirken gölgelenme-günlüğü analizi yapılarak en uygun bölgelere panel entegrasyonu yapılmıştır. İncelenen yapılarda, gölgeleme etkisinin olmadığı yapılar olduğu gibi çevre binalardan kaynaklı gölgeleme etkisine maruz kalan binalar da bulunmaktadır. Bu etkiye göre önlem alındığı, gölgelemenin en az olduğu kısımlarda panel kurgusunun gerçekleştirildiği görülmektedir. Konumların etkilediği yönlenme kriteri için en temel kaygının güneşin doğuş ve batış yönü olduğu gözlemlenmiştir. İncelenen örneklerin hepsi kuzey yarım kürede yer almaktadır. Bu sebeple de fotovoltaik panel yönlenmeleri çoğunlukla doğu, batı ve güney yönlerinde olduğu tespit edilmiştir.

PV panel cinsi açısından ise örneklerin %40'ında Polikristal PV panel, %20'sinde Monokristal PV panel, %20'sinde ince film PV panel kullanılmıştır. Geri kalan %20'lik kısım için bilgiye ulaşılamamıştır. 2010'lu yıllara kadar polikristal hücrelerin maliyetlerinin nispeten düşük olması, kolay imal edilmesi ve nispeten verimlerinin monokristal ile yakın olması sebebi ile yapılarda daha fazla kullanılmaktadır. Şu anda ise yapılan ar-ge çalışmaları ile monokristal panellerin maliyetleri de düşürülmüş, birim alandaki enerji üretimleri daha yüksek olduğu için çok tercih edilen panel cinsleri arasına girmiştir.

Panel eğimi açısından bakıldığında da incelenen örneklerin %60'ında panellerin dik şekilde kullanıldığı, %30'unda eğimli şekilde kullanıldığı, %10'unda ise yatay (0 derece) güneş kırıcı olarak kullanıldığı tespit edilmiştir. Panel eğimi kararları; cephe tasarımı, panel kurulumu için konstrüksiyon karmaşıklığı ve maliyeti, elde edilen enerji oranı gibi kriterleri doğrudan etkilemektedir.

Şebeke bağlantısı açısından bakıldığında; incelenen örneklerin %70'inde şebeke bağlantılı(on-grid) sistemlerin kullanıldığı tespit edilmiştir. %30'u için ise veriye ulaşılamamıştır. İstenildiği takdirde üretilen elektriğin şebeke bağlantısı sayesinde satılabilmesi, sistemin elektrik üretmediği zamanlarda şebekeden elektrik kullanılabilmesi,

şebekeden bağımsız sistemlerin sistem elemanları (depolama bataryaları v.s) fazlalığı nedeni ile maliyetinin çok yükselmesi gibi sebeplerle şebeke bağlantılı sistemler daha avantajlı görülmektedir.

Panel opasitesi yönünden ise örneklerin %100'ünde opak PV paneller kullanılmıştır. Yarı-transparan PV panellerin maliyetlerinin daha yüksek, verimlerinin ise opak panellere göre daha düşük olması sebebiyle yapılarda opak PV panellerin kullanımı çok daha yaygındır.

İncelenen örnek yapıların %20'sinde, yapı kabuğunda cephe kullanımına ek olarak çatıda da fotovoltaik panel kullanılmıştır. Yüksek yapıların çatılarına bakıldığında, genelde asansör kulesi, havalandırma motorları ve tesisatları gibi altyapı elemanları ile kaplı olduğu görülmektedir. Bu noktada dikey yüzey alanları sunan cepheler, toz ve kiri nispeten daha az barındırması ve büyük oranda kullanılabilir alanlar oluşturması açısından büyük bir potansiyel teşkil eder (Ghazali ve diğ., 2017). Bu sebeple bu yapı tipolojisinde cephe özellikleri, kullanım alanı oluşturması açısından çok daha avantajlıdır.

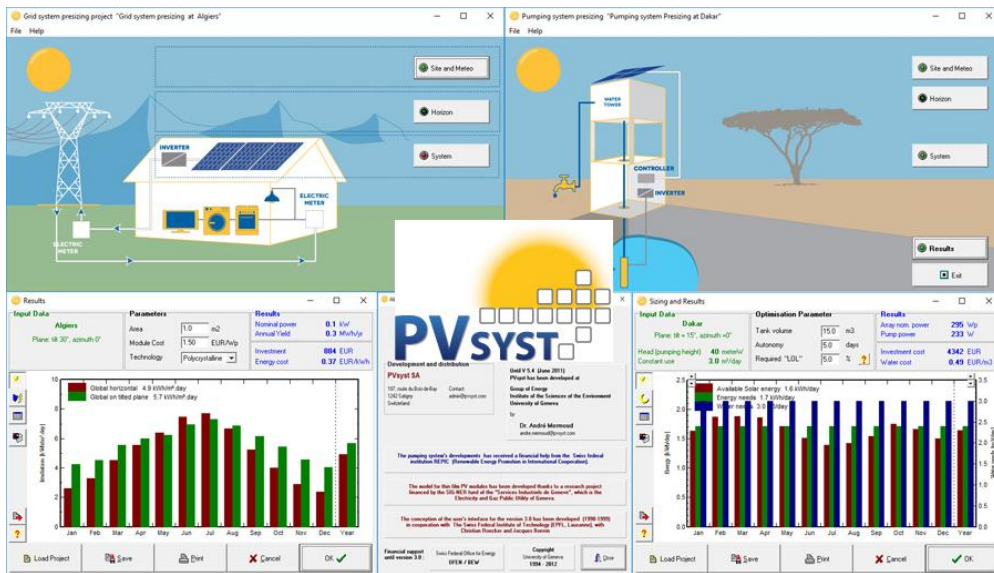
Fotovoltaik sistemleri tasarlarken mimarların, yapıya getireceği yük etkisi, panellerin temizliği için uygun sistemlerin oluşturulması, gerekli yalıtım işlemleri, gölgelenme etkilerinin hesaplanması, modül tiplerinin iyi belirlenmesi, estetik kaygıların güdülmesi gibi hususlarda derinleşmelidir (Sayın ve Koç, 2011).

Fotovoltaik paneller cephelerde, sağır yüzeylere uygulandığında fiziksel herhangi bir kısıt oluşturmamaktadır. Cam ve pencere boşlukları gibi cephe açıklıklarında opak fotovoltaik sistemlerin kullanılamaması, bir sınırlılık sayılabilir. Bu açıdan, opak sistemlerin kullanılacağı cephelerde, her bir pencere ve kapı açıklığı, opak panel kullanım sayısını azaltacaktır. Fotovoltaik sistemler cephede renk, malzeme ve ifade farklılığı sebebi ile tasarımsal kısıtlamalara neden olmaktadır. Bu da tamamen tasarımcının kurgusuna bağlıdır. PV sistemlerin cephe uygulamalarında mimarlar tarafından birçok kriter de göz önünde bulundurularak kurgulanması gerekliliği, ortaya konan örneklerdeki başarılı ve nispeten daha az başarılı uygulamalarla özetlenmiştir.

5.2. PV panel sisteminin enerji simülasyonu; PVSyst Yazılımı ile modelleme

Bu tez çalışmasında simülasyon yazılımı olarak; emsallerine göre detaylı hesaplamalara ve çeşitli girdi çeşitlerine imkan veren bir program (Akcan, Kuncan ve Minaz, 2020) olan PVSyst 6.8.1 kullanılmıştır. İsviçre’de geliştirilen bu program ile On-grid(şebeke bağlantılı), off-grid(şebekeden bağımsız) fotovoltaik sistemlerin, fotovoltaik sulama sistemlerinin ve diğer türdeki şebeke sistemlerinin tasarlanması ve enerji üretim simülasyonlarının yapılabilmesi imkanı vardır. Sonuçlarının bir çıktısı olarak elde edilebildiği PVSyst’in bir diğer avantajı ise bünyesinde 3B modelleme imkanının olmasıdır. Bu durum özellikle mimari tasarım aşamasındaki genel etkinin takip edilebilir olması sebebiyle önemlidir. Ayrıca bu modelleme sırasında gölgelenme analizinin yapılabilmesi, bir projenin daha detaylı ve doğruya daha yakın simülasyonunun yapılabilmesini sağlamaktadır (Özyağcı, 2020).

PV paneli sistemlerinin seçiminde ve kurulum sürecinde birçok alt başlık bulunmaktadır. Bu alt başlıklar üzerinde yapılacak çalışmalar, sistemin verimli ve güvenli çalışabilmesi çok önemlidir. Yazılım ara yüzünde hem yönelim, panel eğim açısı, PV panel özellikleri gibi tasarımsal bilgilerin hem de invertör özellikleri, konumu, PV sistem çeşidi gibi teknik bilgilerin de işlenebilmesini sağlayan bölümler bulunmaktadır.



Şekil 5.11. PVSyst 6.8.1. program ara yüzleri

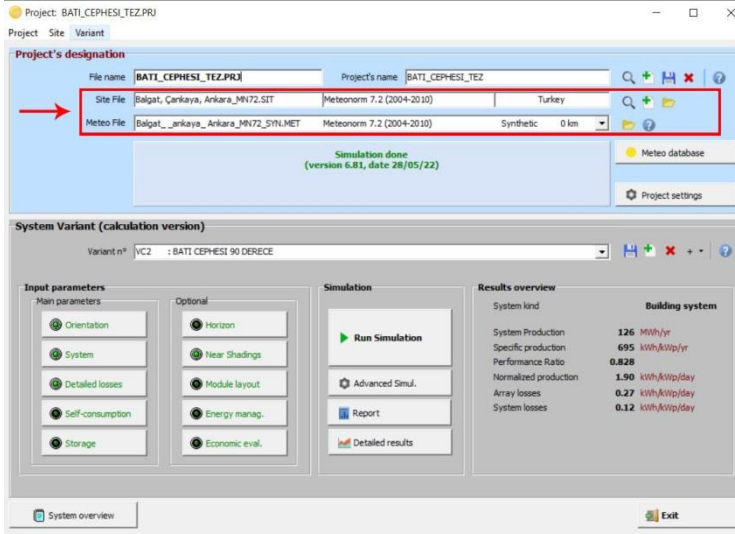
Veri girişinde, akıllı menülerle; sistem özellikleri, şebeke bağlantı tipi, kurgulanacak sistemin bulunacağı konum, panel yönelimleri ve konstrüksiyon tipi(sabit konstrüksiyon), analizlerin yıllık mı mevsimlik mi yapılacağına dair seçim, panel ve invertör seçimi ve panel kurgusunun modellenmesine dair bilgiler sırasıyla belirlenerek düzenlenmiştir.

Öncelikle çeşitli sistem varyantlarının bulunduğu giriş ekranında oluşturulacak PV sisteminin grid-connected (şebeke bağlantılı) sistem olduğu işaretlenmiştir. Şebekeye bağlı sistemler, batarya zorunluluğunun olmaması, binanın ürettiği fazla elektrik enerjisini şebekeye aktarılabilmesi avantajları sebebiyle tercih edilmiştir.



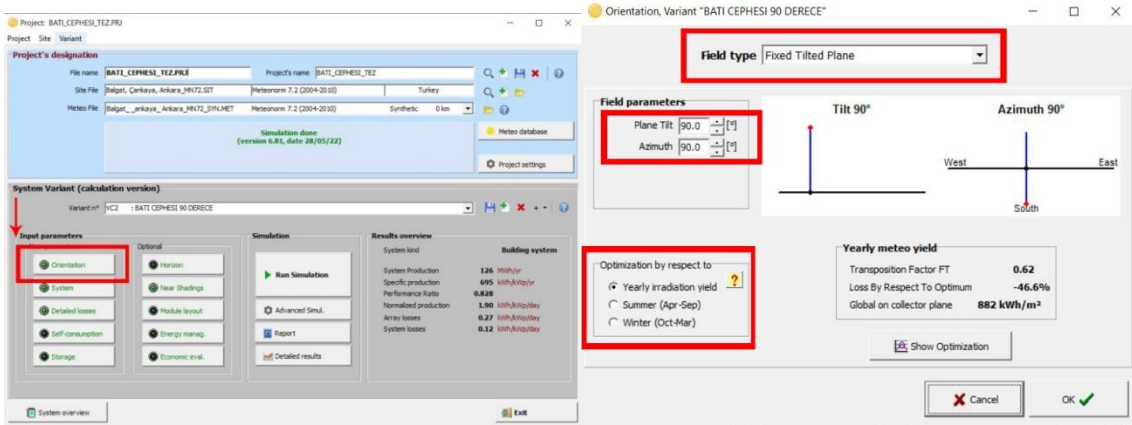
Şekil 5.12. PVSyst 6.8.1. sistem seçim ekranı şebeke bağlantılı sistemin seçimi

Daha sonra binanın bulunduğu konumun koordinatı programa girilerek Meteonorm 7.2 veri tabanından konum ile ilgili iklim ve güneş verileri elde edilmiştir. Türkiye için güneşlenme süresinin ve ışıma miktarının fazla olması, bu sistemler ile elde edilecek enerji kazanımlarında avantaj sağlayacaktır.



Şekil 5.13. PVSyst 6.8.1. programında konum ayarlarının girilmesi

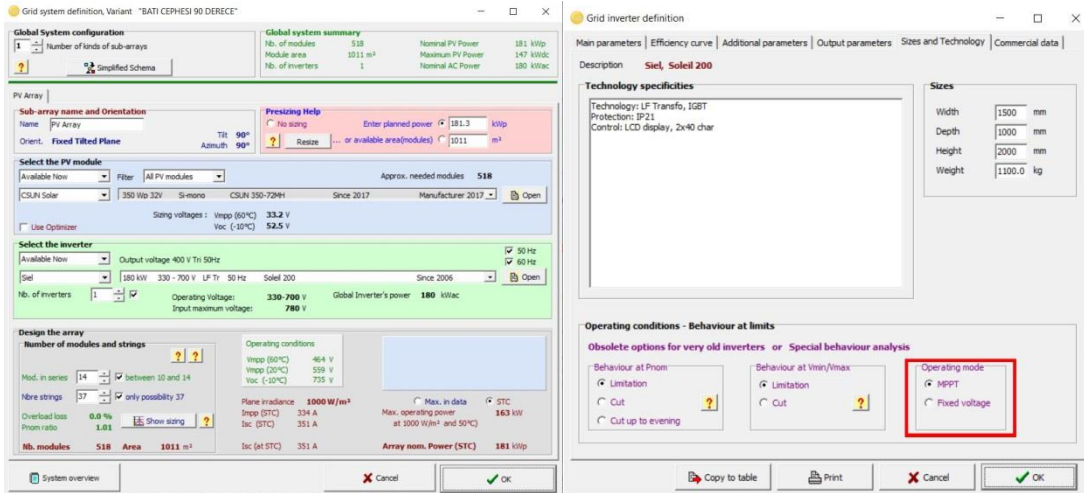
Sonrasında Orientation kısmından kurgulanacak cepheye göre panel yönelimleri ve panel eğimleri işlenmiştir. Ayrıca bu kısımda panellerin sabit şekilde kullanıldığı seçenekte işlenmiştir. Yine burada sadece yaz mevsimine göre, sadece kış mevsimine göre ve yıllık sürece göre analizin yapılacağına dair seçeneklerden yıllık periyot seçeneği ile çalışmaya devam edilmiştir.



Şekil 5.14. PVSyst 6.8.1. programında orientation bölümündeki kurulum tipi, analiz süreci seçimi, yönlenme ve panel eğimi seçiminin yapıldığı ekran

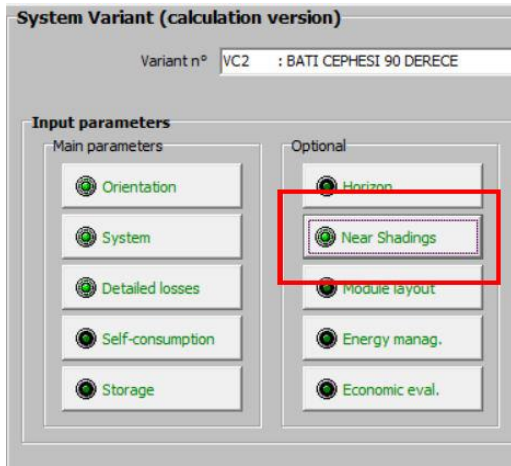
Programın 'system' kısmında toplam kurulu panel alanı ve toplam kurulu güç bilgileri işlenmiştir. Fotovoltaik panel seçimine dair veriler, invertör seçimine dair veriler yine bu kısımda işlenmiştir. İnvörtör seçimi yapıldıktan sonra invertör özellikleri kısmından invertörün MPPT (maximum power point tracking) özelliğe olmasına dikkat edilmiştir.

MPPT özelliği kısaca sıcaklık ve radyasyon değer aralığının ne olduğu fark etmeksizin PV panel enerji üretimini maksimumda tutacak önlemlerin otomatik alınması olarak ifade edilebilir (Ort, 2016).

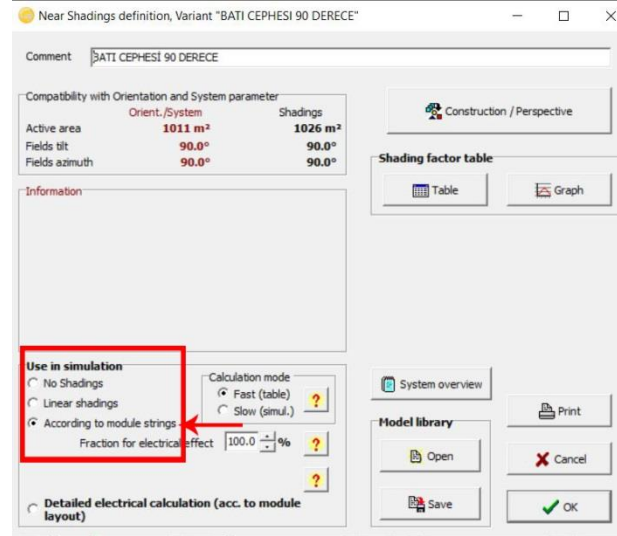


Şekil 5.15. Panel, invertör, kurulu güç miktarı ayarlarının yapıldığı ekran

Kullanılan sistem türü, depolama olmayan sistem olarak seçilmiştir. ‘‘Near Shadings’’ kısmında analizin hangi yolla yapılacağına dair üç seçenek bulunmaktadır. Bunlardan birincisi ‘‘No shadings’’ gölgeleme ihmal edilerek yapılan analizdir. Gölgeleme etkisinin olduğu bir bölgede gerçeğe en uzak analiz sonucunu verecek seçenektir. İkincisi ‘‘Linear Shadings’’ seçeneğidir. Bu seçenekte panel üzerine düşen gölge alanı kadar kısmı hesaplamadan çıkarıp geri kalan alanı hesaplamaya katarak yapılan analizdir. Gerçekte bir panelin küçük bir kısmına dahi gölge düşerse o panel neredeyse tamamen elektrik üretmez hale gelebilmektedir (Karafil, 2021). Bu sebeple bu seçenek panelin gerçek davranışını tam olarak ortaya koymaz ve daha genel bir sonuca ulaşılmasını sağlayabilir. Bir önceki seçeneğe göre ise gerçek sonuçlara daha yakın bir analiz sağlar. Son seçenek ise ‘‘According to module string’’ seçeneğidir. Burada, modeli yapılan panel kurgusunda panellerin dizeleri model üzerine işlenir. Bu durum, program tarafından panel kurgusunun gölgeleme analizini dikkate alarak simülasyonu gerçekleştirmesini sağlar. Gerçek değerlere en yakın sonucun elde edildiği seçenektir. Tez kapsamındaki simülasyon gerçekleştirilirken ‘‘According to module string’’ kısmı seçilmiştir.



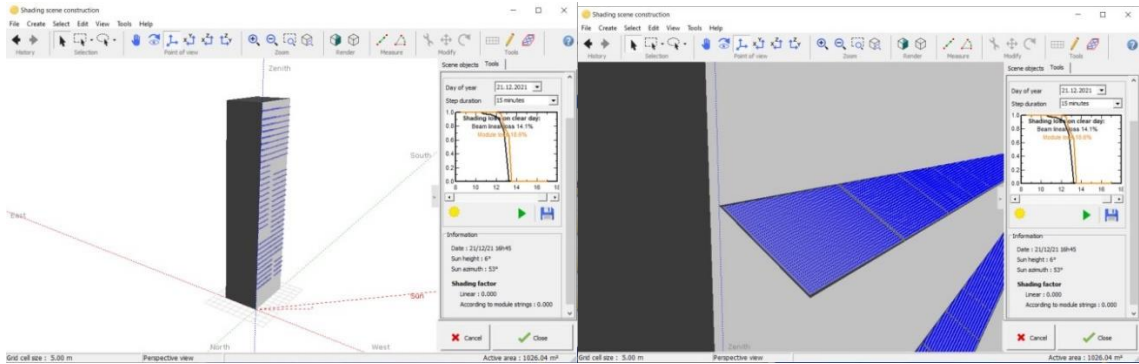
(a)



(b)

Şekil 5.16. (a) Modelleme ve cephe panel kurgusunun yapıldığı “near shadings” kısmı, (b) “According to module string” seçeneğinin seçilmesi

“Near Shadings” kısmında ayrıca modellemeye imkan sağlayan 3B ara yüz kısmı bulunmaktadır. Burada yapının modeli, gerçek ölçülerine göre oluşturulmuş, cephe panel kurguları ise karar verilen şekilde model cephesine işlenmiştir. Tüm bu verilerin programa girilmesinin ardından simülasyon her cephe ve kombinasyon için ayrıca gerçekleştirilmiş, programdan sonuç raporları elde edilmiştir.



Şekil 5.17. PVsyst 6.8.1. programı modelleme ekranı

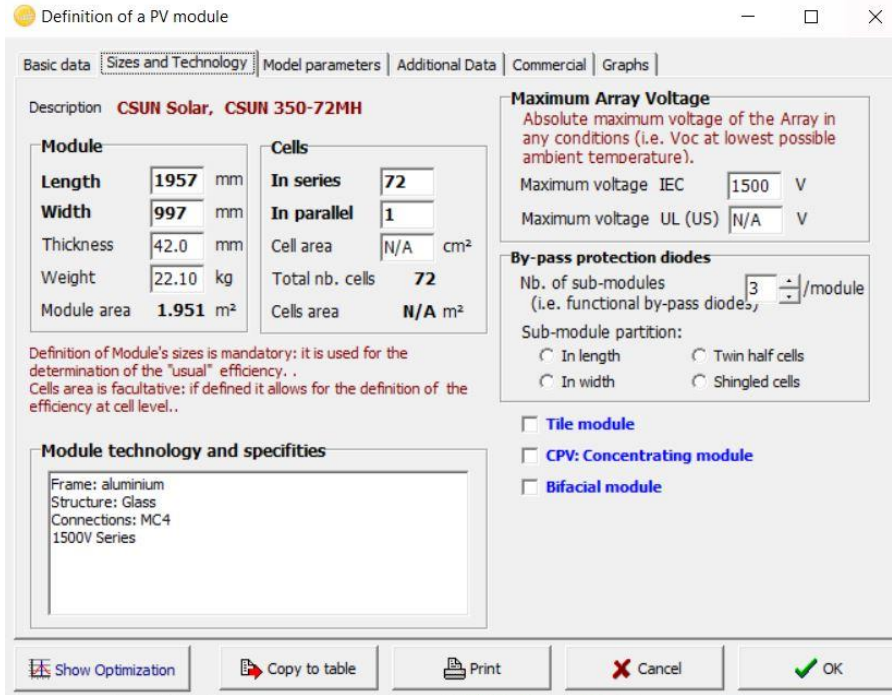
5.3. Konstrüksiyon esaslarına göre PV panellerin yapım maliyeti hesaplama esasları

Tez kapsamında farklılaşan eğim açlarına göre araştırılan her bir PV sistem bileşenin bina kabuğuna dışarıdan entegre edilerek oluşturulması planlanmıştır. Bu sistemlerin çözümleri binanın taşıyıcı sistemi içinde hiçbir görev üstlenmemektedir. İlgili detaylara yönelik kendi taşıyıcı konstrüksiyonlarından beklenen kendi ölü yükü ve etkilendiği rüzgar, kar, deprem gibi yükleri tasarlanan bağlantılarla yapının taşıyıcı sistemine iletmesidir. Bu tarz konstrüktif detaylarda, tasarımı yapılan her proje için tüm detaylar binaya özel olarak hazırlanmalıdır. Bu süreçte ise binanın bulunduğu bölge ve iklim koşullarına, yüksekliğine, kullanım amacına göre kullanılacak sistemin malzeme seçimine karar verilmelidir.

PV sistemler için panelleri taşıyan konstrüksiyon sistemi, panel kurulum sürecinin temel başlıklarından biridir. Fotovoltaik panel sisteminin uygulanacağı alana göre güvenli bir şekilde sabitlenmesi için en uygun konstrüksiyon çözümleri aranmalıdır (www.ekonomiksolar.com). Cephede uygulanacak olan konstrüksiyonun biçimsel olarak kararları alındıktan sonra, sistemi oluşturacak parçaların kesitlerine ve statik davranışlarına dair hesaplamaların yapılması aşamasına geçilir.

Konstrüksiyon tasarımı ve kurulumu sürecinde etkili olan birçok faktör bulunmaktadır. En temelde statik olarak sisteme etkileyen tüm kuvvetler tespit edilmelidir. Tez çalışmasında konstrüksiyonun taşıyacağı PV panellerin özelliği ve ağırlığı, ayrıca kat adedine ve yüksekliğine bağlı toplam bina yüksekliği ile değişen bölgedeki rüzgar yükü, bölgedeki kar yükü cephede uygulanacak olan PV sistemin stabilitesi ile ilgili esas yük bileşenlerini teşkil eder. Tez kapsamında deprem kuvvetleri kapsam dışı bırakılmıştır.

Öncelikle, fotovoltaik sistemde kullanılacak olan fotovoltaik panel boyutları ve ağırlıkları konstrüksiyon tasarımı sürecinde büyük etki sahibidir. Panel boyutları ve ağırlıklarına göre yapılan hesaplama sonuçları, konstrüksiyon tasarımında kullanılacak malzemelerin sayı ve boyutlarına direkt etki etmektedir (www.ekonomiksolar.com). Farklı eğimlerde kullanılan tüm paneller aynı tip ve boyutlarda seçilmiş, aynı sayıda kullanılması ile yapının maruz kaldığı yük miktarı sınırlandırılmıştır. Kullanılan paneller; monokristal özellikte olup boyutları cephede optimum yerleşim sağlayacak nitelikte 1957mmx997mm ölçülerinde seçilmiştir. Panel bilgileri CSUN firmasında alınmış, CSUN 350-72MH paneline ait bilgiler Şekil 5.18.'de verilmiştir (wedosolarindonesia.com).



Şekil 5.18. Kullanılan PV panel özellikleri

Sistemin kendi ağırlığı sonrasında cepheye etkiyen tüm yükler entegre yapılacak konstrüksiyonlara da etki etmektedir. Bu etkenlerden ilki rüzgar ve kar etkileridir. Rüzgâr ve kar etkileri, konstrüksiyonun dayanım hesaplamalarında baz alınan doğal etkilerdendir. Konstrüksiyonun kurulumunda bu yükler altındaki statik durumun önceden iyi analiz edilmesi ve sonuçlara göre tasarımın yapılması önem teşkil etmektedir (www.teknoraysolar.com). Statik gerekliliklere bağlı olarak kullanılacak olan civata, klemp ve dübel gibi bağlantı elemanı sayıları farklılık gösterecektir. Bu farklılıklar ise doğrudan maliyet hesaplama sürecine etki etmektedir. Tez kapsamında güneş paneli konstrüksiyon sistemi tasarımında kar ve rüzgar yükleri, Ankara/Çankaya bölgesi için geçerli değer olarak belirlenmiş ve bu yük değerlerine göre hesaplamalar yapılmıştır.

Kar yükü hesap değeri (P_k) için alınacak yük, kar yağışı artış şartlarına göre değişkenlik gösterir. Kar yükü (P_{ko}), hareketli yük sınıfına girer. Bunun bağlı olduğu etkenler coğrafi ve meteorolojik şartlardır. Kar yağmayan yerlerde kar yükü hesap değeri sıfır alınır.

30°'ye kadar eğimli çatılarda kar yükü hesap değeri (P_k), kar yükü (P_{ko}) değerine eşit kabul edilir ve çatı alanının plandaki düzgün yayılı yük olarak dikkate alınır. Eğim açısı arttıkça da çatı eğimine (α) bağlı olarak azaltma değeri (m) ile düzenleme yapılır.

Tez çalışmasında PV panellerin;

- zemin düzlemine dik olduğu durumda (90 derecelik kombinasyon) sistem TS EN 1991-1-4 Yönetmeliği'ne göre düşey duvar olarak çözülmüştür. Kar yükünü bu kombinasyonda herhangi gibi etkisi yoktur.
- yere paralel olduğu durumda (0 derecelik kombinasyon) sistem TS EN 1991-1-4 yönetmeliğine göre 0 derece sundurma olarak çözülmüştür. Kar yükü 0.64 kN/m^2
- 34 derecelik eğimli konumlandırıldığı durumda sistem TS EN 1991-1-4 yönetmeliğine göre sundurma olarak çözülen yük miktarı çatı eğimine (α) bağlı olarak azaltma değeri olan 0.90 kat sayısı ile çarpılarak $0,57 \text{ kN/m}^2$

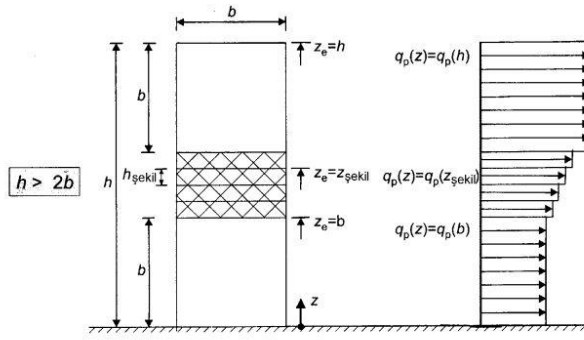
olarak alınmıştır.

Cephelerinin maruz kaldığı diğer bir yük rüzgardır. Rüzgar cephedeki sistem aracılığı ile taşıyıcı kayıtlar üzerine belirli bir kuvvet uygular, bina taşıyıcısına mesnetlenen konstrüksiyon ise bu kuvveti binaya iletir.

Rüzgâr yükünün hesaplamasına ilişkin veriler TS EN 1991-1-4 dikkate alınarak elde edilir. Bu standart binaların ve inşaat mühendisliği işlerinin yapısal tasarımında doğal rüzgâr etkilerinin tayini için kılavuz bilgiler içerir. Tahkik edilecek yapının geometrisi, yüksekliği ve bulunduğu bölge şartları rüzgâr yükü değerini etkiler.

Tez kapsamında dikdörtgen prizması formunda çok katlı bir yapıya etki edecek rüzgar yükü hesaplanmıştır. Rüzgar yükü, yükseklik arttıkça değişeceğinden dolayı bina yüksekliğince dağılan rüzgar yüklerinin hesaplanması gerekmektedir. Bu noktada da doğrultusu genellikle yatay kabul edilen rüzgar yükünün, her yönde en büyük değerinde tesir eden değeri hesaplamalara katılır.

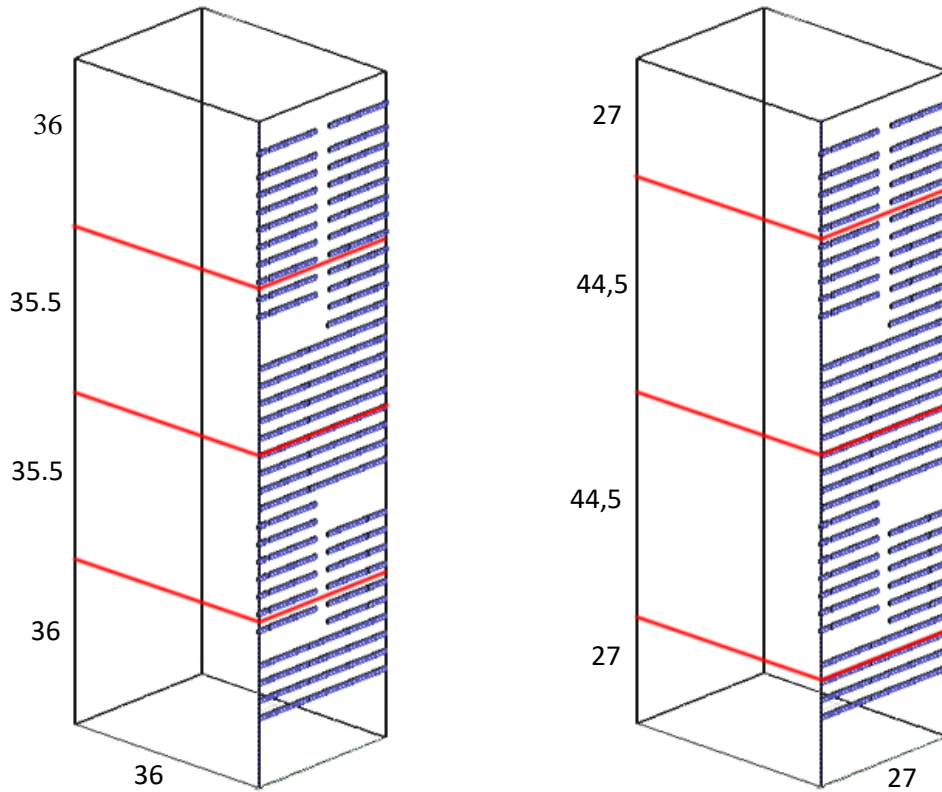
Bu yönetmeliğe göre binanın yüksekliği (h) bina genişliğinin (b) iki katından fazla ise rüzgar yükleri hesaplamaları için bina yüksekliğinin bölmelenmesi gerekmekte olup, Şekil 5.19.'daki gibi uygulanmaktadır. Tez çalışmasında ele alınan yapı hem dikdörtgen plan tipine sahip hem de 143 metre yüksekliğindedir. PV panel kurulumu gerçekleştirilen kenarlardan biri uzun kenar, ikisi ise kısa kenar niteliğindedir. Bu doğrultuda yönetmelikteki standartları uygulamak için 2 farklı bölümlenmeye sahip cephe tipi için rüzgâr basıncı hesabı yapılmaktadır.



Not - Dikkate alınan her yatay şerit için hız kaynaklı rüzgâr basıncının düzgün yayılı olarak etkidiği kabul edilmelidir.

Şekil 5.19. TS EN 1991-1-4 yönetmeliğine göre bina yüksekliği bölmelendirilmesi

Cepherden ilki yapının 36 metre genişliğindeki güney cephesidir. Bu cepheye göre bina yüksekliği bölümlendirilecek olursa; Şekil 5.20 a 'daki gibi 36m ve 35.5m uzunluğunda 4 kısma ayrılmıştır. Cepherden ikincisi yapının 27 metre genişliğindeki cephesidir. Bu cepheye göre ise bina yüksekliği bölümlendirilecek olursa; Şekil 5.20 b'deki gibi 27m ve 44.5 m uzunluğunda dört kısma ayrılmıştır.



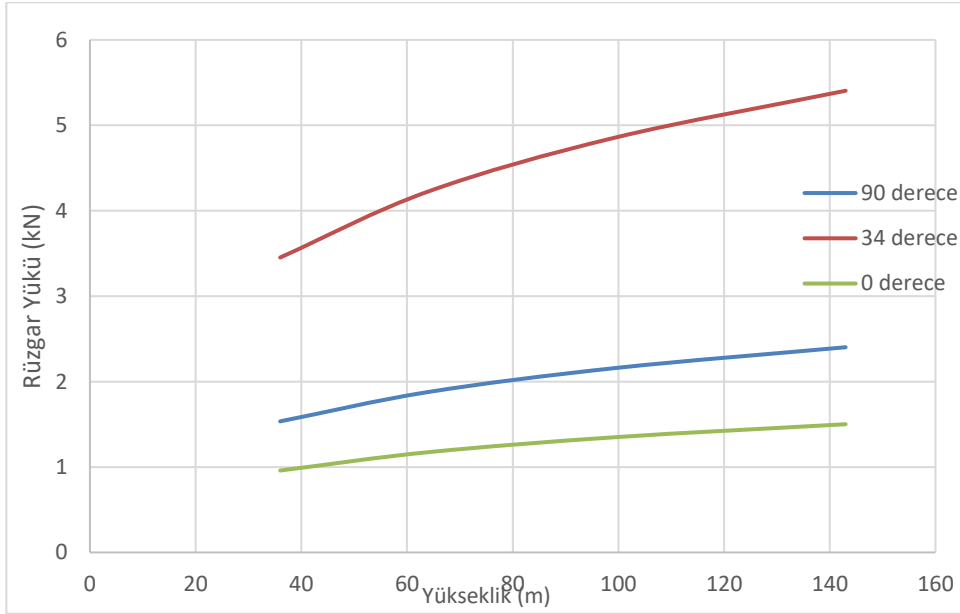
(a)Uzun kenar baz alınarak bölmelendirme

(b)Kısa kenar baz alınarak bölmelendirme

Şekil 5.20. Binanın uzun ve kısa kenarı baz alınarak hesaplanan yükseklik bölümleri

Yapılan rüzgar yüklerinin hesabında dikkate alınan her yatay şerit için hız kaynaklı rüzgâr basıncının düzgün yayılı olarak etkideği kabul edilmektedir. Bu yüksekliklerin her birinde rüzgar yükü farklılık gösterecektir. ERL Enerji firması tarafından hesabı yapılan konstrüksiyon malzeme özellikleri, yapılan bu rüzgar yükleri hesabında çıkan değerlerin her birine dayanım sağlayacak şekilde hesap edilmiştir. Üç durum için hesaplanan yükler karşılaştırıldığında çizelge 5.3.'deki gibi bir grafik elde edilir. Grafik kısa kenara sahip cephe yüzeyi baz alınarak oluşturulmuştur.

Çizelge 5.3. Panel açılara ve yüksekliğe göre panele etki eden rüzgar yükü



Sonuç olarak, tariflenen yüklemeler sonucunda güvenli bir sistem elde etmek adına tüm yüklerle karşı dayanım sağlayacak özelliklerde konstrüktif tasarımlar elde edilmiştir. Bu tasarımların ve konstrüksiyon maliyetlerinin elde edilmesi sürecinde, fotovoltaik panel konstrüksiyon tasarımı kapsamında ulusal ve uluslararası ölçekte çalışmalar yürüten ERL Enerji firmasından yardım alınmıştır.

6. ALAN ÇALIŞMASI

PV sistemlerin mimariye etkileri, yapılan literatür taraması ile incelenmiştir. Estetik yönden değerlendirildiğinde, olumsuz etkisi aktif güneş enerjisi sistemlerinin sübjektif bir dezavantajdır. Ancak bu durumu kıran, yapı ile iyi bir şekilde kombine edilen örnekler de literatürde mevcuttur. Yapılan incelemelerle PV sistemlerin kurulumunda farklı konstrüktif detay çözümlerinin olduğu, böylece mimari tasarım kapsamında estetik kaygılarla üretime imkan sağlayacak kararların farklılaşabileceği anlaşılmıştır. Ancak bu farklılıkların çeşitli etkenlere bağlı olarak enerji sağlama performanslarının da farklılaştığı tespit edilmiştir. Bu tez çalışmasında da hem tasarım, hem enerji hem de uygulama detayları kapsamında bütünlük bir karşılaştırma yapılması hedeflenmiştir. Bu durumda ortaya çıkan araştırma sorusu şu şekilde ifade edilebilir:

PV sistemlerin konstrüktif detaylarındaki farklılık ile beraber ortaya çıkan performans farkları ve bu detay farklılıklarından kaynaklanan konstrüksiyon maliyet farkları, maliyet-geri dönüş sürelerine nasıl etki eder?

Tezin amacı doğrultusunda kıyaslamaların sağlıklı şekilde yürütülebilmesi için çeşitli sınırlamaların konulması gerekmektedir. Bu bölümde tez çalışması sürecinde belirlenen analiz kombinasyonları, çeşitli kabuller ve sınırlılıklar ele alınacaktır.

Çalışmada yapı cinsi olarak aynı taban alanına sahip az katlı yapılara göre çok daha geniş cephe yüzey alanına sahip olma ve daha az gölgelenmeye maruz kalma gibi özellikleri sebebiyle yüksek yapılar seçilmiştir.

Yapılacak değerlendirmede sonuçlara doğrudan etki etmesi sebebiyle bölge ve iklim verileri önem teşkil etmektedir. Türkiye, güneşlenme süresi ve yıllık alınan ışınım miktarı açısından çok avantajlı bir bölgede bulunmaktadır. Tez çalışmasının yapıldığı bölge, Ankara ise karasal iklime sahiptir. Karasal iklim, Trakya'nın iç kısımlarında, Doğu Anadolu Bölgesinde, Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nin büyük bir kısmında ve İç Anadolu Bölgesinde görülmektedir. Yazları sıcak ve kurak, kışları soğuk ve kar yağışlı geçmektedir Bu iklim çeşidi Türkiye'de yaygın şekilde görülmektedir (www.tr.wikipedia.org).

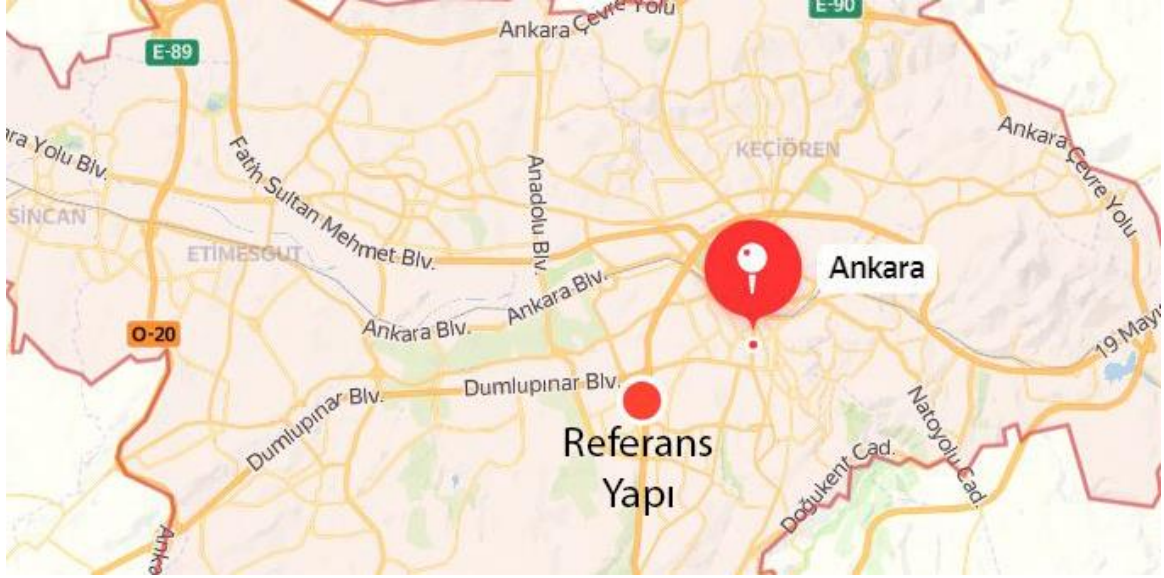
Karasal iklimin Türkiye'de yaygın olarak görülmesi doğrultusunda, İstanbul'dan sonra en çok yüksek yapıyı barındıran Ankara İli olarak sınırlandırma yapılmıştır.

Ankara ili TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları Yönetmeliği'ne göre 3. Bölge iklim sınıfında yer almaktadır. Yıllık ortalama sıcaklık 12.6 °C olmakla birlikte ortalama 6,4 saat güneşlenme süresine sahiptir. En yüksek güneşlenme süresi 10,6 saat ile Temmuz ayında, en düşük güneşlenme süresi ise 2,2 saat ile Ocak ayında gerçekleşmektedir (<https://www.mgm.gov.tr>).

Ankara'da ışınım değerlerinin şehir ölçeğinde ve aylık bazda farklılık gösterdiği ifade edilmekle beraber güney ve doğu yönlerine gidildikçe ayrıca Temmuz-Ağustos aylarında artış gözlemlendiği ifade edilmektedir. Ankara'nın bazı ilçeleri yıllık olarak nispeten daha fazla oranda ışınım maruz kalmaktadır. Daha fazla radyasyona maruz kalan ilçeler Çankaya, Şereflikoçhisar, Haymana, Elmadağ, Bala, Mamak ve Çamlıdere'dir (Koçer, Şevik ve Güngör, 2016). Literatürden elde edilen bu veriler ışığında Ankara ilinde belirlenecek yüksek yapının nispeten daha fazla ışınım alan bölgede olması sebebiyle Çankaya ilçesinde belirlenmesine karar verilmiştir.

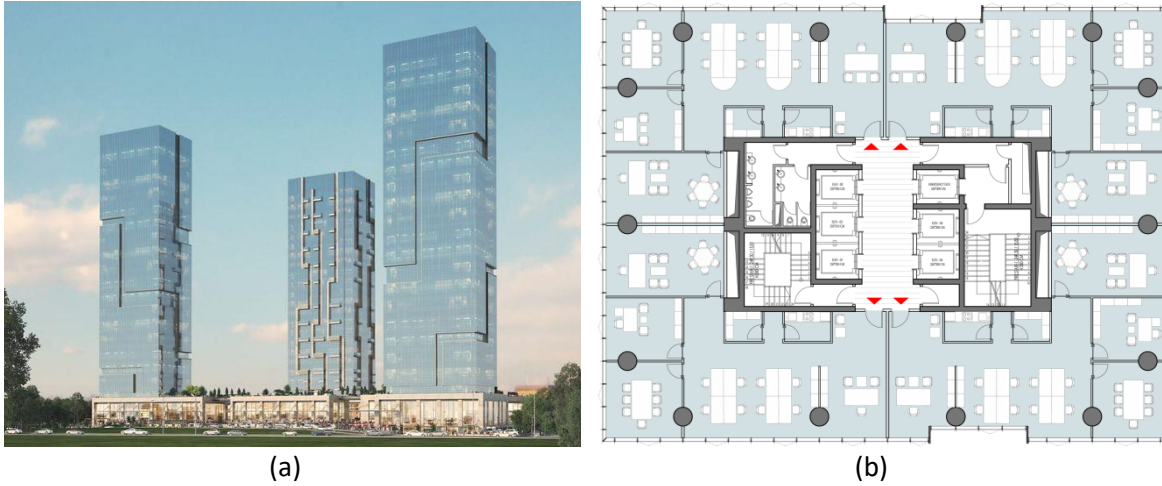
Enerji tüketimi bakımından da yapıların fonksiyonu önem teşkil etmektedir. Analizler kapsamında yüksek yapı fonksiyonu ofis olarak seçilmiştir. Ofis yapıları çalışma saatleri açısından gündüz vakitlerinde aktif olmaktadır. Ofis yapıları ortalama sabah saat 8.00 ile akşam saat 18.00 aralığında aktif şekilde kullanılmaktadır (Ofis binaları için klima seçimi nasıl olmalı, 2021). Bu da ayrıca bir gün içerisinde güneşten faydalanılabilecek en verimli saatlere denk gelmektedir. Kurulacak bir fotovoltaik sistem, ofis yapılarının çalışma ve enerji kullanımı saatlerinde aktif şekilde enerji üretebilecektir. Hedeflenen analizler için referans olacak ofis binası Ankara'da aktif kullanılan bir yapı olarak seçilmiştir.

Seçilen referans yapı Ankara ilinin Çankaya ilçesinde bulunmaktadır. Yapılan simülasyonlarda ve analizlerde yapının koordinatları 39° 54' enlemi ve 32° 48' boylamı olarak işlenmişti. Çankaya ilçesi, Ankara ilçeleri içinde nispeten daha fazla güneşlenme süresine ve yıllık ışınım miktarına sahip ilçelerden biridir. Bu anlamda üzerinde analiz yapılacak referans yapı bu bölgede seçilmiştir.



Şekil 6.1. Seçilen referans binanın konumu

Çankaya ilçesinde yüksek yapı olarak belirlenen referans bina, 20 000m²'lik bir alan üzerine kurulan yapı grubundan seçilmiştir. 3 bloktan oluşan tasarımda A blok zemin +32 kat, B blok zemin +35 kat, C blok ise zemin +27 kattan oluşmaktadır. Tez çalışmasında fonksiyon olarak ofis yapıları üzerinde durulduğu için, ofis bloğu olan ve en fazla kat adedine sahip olan B blok üzerinde çalışma sürdürülmüştür.

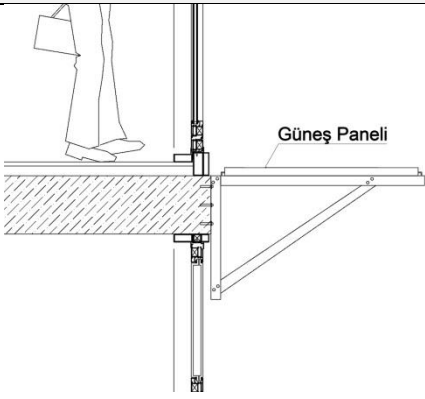
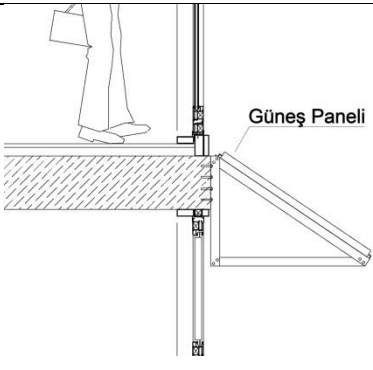
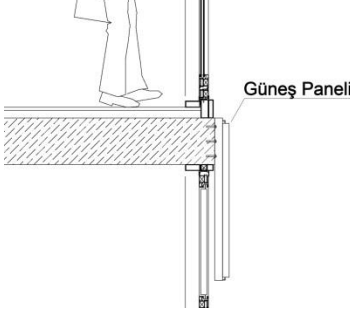


Şekil 6.2. (a) Alan çalışması için belirlenen yüksek yapı grubu (b) Kat planı
(www.dormakaba.com; www.atasarim.com.tr)

İncelemede, PV sistemlerin konstrüktif detaylarının farklılaşması ile beraber ortaya çıkan farklar ele alınacağı için mevcut durum aracılığı ile PV panellerin cephede kullanımı bakımından detayda farklılaşan senaryolar belirlenmiştir.

Öncelikle senaryolarda kullanılacak panellerin konstrüksiyon tipine kara verilmiştir. Senaryolarda sabit konstrüksiyonlu fotovoltaik panel sistemi kullanılacaktır. Sonrasında örnekleme 3 farklı detay çözümü ile çeşitlilik gösteren eğim durumu temel alınmıştır. Bunlar: panellerin yatay (0 derece) kullanımı, panellerin eğimli (34 derece) kullanımı, panellerin dikey (90 derece) kullanımındır. Panellerin eğimli kullanımında eğim açısının belirlenmesinde literatür taramasından yararlanılmıştır. Koçer ve diğerleri (2016) yaptığı çalışmada Ankara’da kullanılacak PV panellerin optimum eğim açılarını tespit etmişlerdir. Bu çalışmaya göre Ankara merkez ve ilçeleri için yıllık sabit konstrüksiyon sistemlerde en uygun eğim açısı 34 derece olarak hesaplanmıştır (Koçer, Şevik ve Güngör, 2016). Bu çalışmada PV panellerin sabit kurulumlu olduğu kabul edildiği için optimum eğim açısı olan 34 derece olarak belirlenmiştir (Çizelge 6.1).

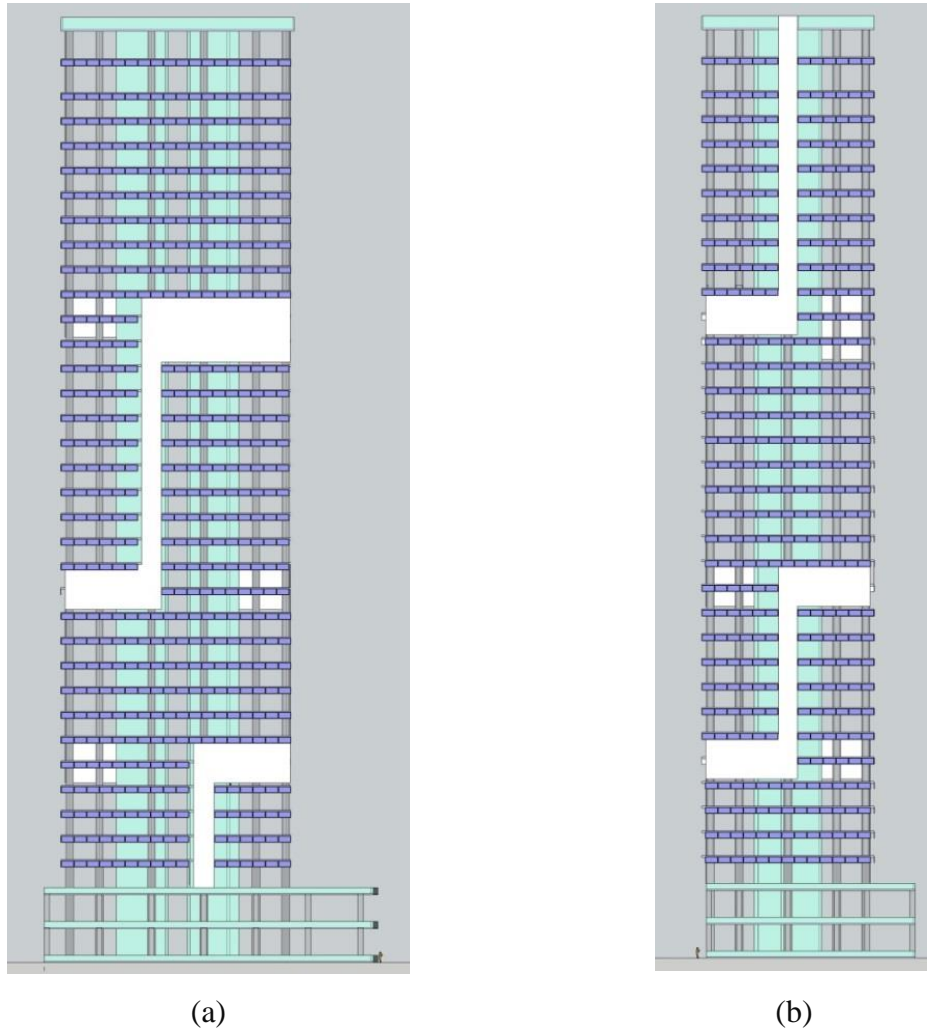
Çizelge 6.1. Alan çalışmasındaki konstrüksiyonlar ve cephe detayları

Kombinasyonlar	Açıklama	Detay gösterimi
0 derece	Bu senaryoda fotovoltaik paneller cephede yatay şekilde 0 derecelik açılar ile konumlandırılmıştır.	
34 derece	Bu senaryoda PV paneller yapı cephesine 34 derece eğimli şekilde konumlandırılmıştır. Daha önceki literatür taramasında Ankara için yıllık sabit optimum eğim açısının 34 derece olduğu bilgisine ulaşılmıştır (Koçer, Şevik ve Güngör, 2016). Bu sebeple cephede uygulanacak PV paneller için 34 derece eğim açısı seçilmiştir.	
90 derece	Bu senaryoda PV paneller yapı cephesinde uygun görülen yerlere 90 derecelik bir açı ile dik şekilde konumlandırılmıştır.	

Detay farklarından kaynaklanan değişimlerin kıyaslanabilmesi için, fotovoltaik sistemin cephe kurgusu sürecinde toplam kullanılan fotovoltaik panel sayısının ve kullanılan panel cinsinin her senaryo için aynı tutulmasına dikkat edilmiştir. Yapının 3 cephesine(güney, doğu, batı) toplam 1293 adet fotovoltaik panel kurgulanmıştır. Bu sayı, her üç kombinasyon için de aynıdır. Cephelere göre güney cephesinde 528 adet panel, doğu cephesinde 379 adet panel, batı cephesinde ise 386 adet fotovoltaik panel kullanılmıştır (Çizelge 6.2). Literatürden elde edilen bilgiler doğrultusunda yapının en verimli cephesi güney cephe olduğu için en fazla sayıda panel kurulumu güney cephesinde gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 6.2. Cephelere göre fotovoltaik panel sayıları

	Cephelere Göre Panel Sayıları
BATI	386
DOĞU	379
GÜNEY	528
TOPLAM	1293 ADET PANEL



Şekil 6.3. (a) Güney cephe; (b) Doğu-batı cephe panel yerleşimleri

Tez çalışmasında monokristal fotovoltaik panel türü seçilmiştir. Panelin uzunluğu 1997mm, genişliği 997mm, kalınlığı ise 42mm'dir. 1 adet panelin ağırlığı 22,10 kg'dir. 1 adet fotovoltaik panel alanı 1,961 m² 'dir.

Referans bina fonksiyonunun ofis binası olması, bu yapıları elektrik dağıtım şirketlerince "ticarethane" grubunda değerlendirmeye almaktadır. Bu bilgi çalışmanın enerji tüketimi değerlendirmelerinde kullanılacaktır. Binanın tükettiği enerjinin birim fiyatları, EPDK tarafından onaylanan Tedaş şirketine ait 1 Haziran 2022 tarihli yıllık elektrik tarifelerinden elde edilmiştir. Bu değerlendirme aşaması için ise binanın son 1 yılda tükettiği elektrik enerjisi miktarı mevcutta kullanımda olan yapının bina yönetiminden elde edilmiştir. Kurgulanan fotovoltaik sistemlerden elde edilen enerji, binada kullanılacaktır. Bu sebeple yıllık üretilen elektrik enerjisi miktarınca elektrik faturasından elde edilecek olan kar hesabı yapılmıştır.

Şekil 6.4. EPDK tarafından onaylanan tarifler

EPDK Tarafından Onaylanan ve 1 Haziran 2022 Tarihinden İtibaren Uygulanacak Faaliyet Bazlı Tarifeler										
1/6/2022		Faaliyet Bazlı Tüketici Tarifeleri (kr/kWh)				Güç Bedelli Hariç Toplam Tarifeler (kr/kWh)				
Tüketim Sistemi Kullanıcıları	Görevli Tedarik Şirketinden Enerji Alan İletim Sistemi Kullanıcıları	Perakende Tek Zamanlı Enerji Bedeli	Perakende Gündüz Enerji Bedeli	Perakende Puant Enerji Bedeli	Perakende Gece Enerji Bedeli	Dağıtım Bedeli	Tek Zamanlı	Gündüz	Puant	Gece
		Tüketici	245,3607	248,3693	392,2113	132,2746	0,0000	245,3607	248,3693	392,2113
Dağıtım Sistemi Kullanıcıları	Dağıtım Sistemi Kullanıcıları	Perakende Tek Zamanlı Enerji Bedeli	Perakende Gündüz Enerji Bedeli	Perakende Puant Enerji Bedeli	Perakende Gece Enerji Bedeli	Dağıtım Bedeli	Tek Zamanlı	Gündüz	Puant	Gece
		Orta Gerilim Çift Terimli				Orta Gerilim Çift Terimli				
	Sanayi	248,3714	251,3801	395,2221	135,2853	14,7972	263,1686	266,1773	410,0193	150,0825
	Kamu ve Özel Hizmetler Sektörü ile Diğer	230,2455	232,5236	363,0085	128,7021	23,0611	253,3066	255,5847	386,0696	151,7632
	Mesken	152,9207	155,4131	246,1925	82,8186	22,8419	175,7626	178,2550	269,0344	105,6605
	Tarımsal Faaliyetler	157,6777	159,2914	251,4048	85,6839	18,9925	176,6702	178,2839	270,3973	104,6764
	Aydınlatma	212,2218				22,1336	234,3554			
		Tek Terimli				Tek Terimli				
	Sanayi	256,6870	259,8001	408,5735	139,7250	16,3448	273,0318	276,1449	424,9183	156,0698
	Kamu ve Özel Hizmetler Sektörü ile Diğer	235,0787	237,3568	367,8417	133,5347	28,7660	263,8447	266,1228	396,6077	162,3007
	Mesken	154,5685	157,0611	247,8392	84,4656	28,2039	182,7724	185,2650	276,0431	112,6695
	Tarımsal Faaliyetler	159,7360	161,3497	253,4633	87,7413	23,6477	183,3837	184,9974	277,1110	111,3890
	Aydınlatma	216,7131				27,6100	244,3231			
		Alçak Gerilim Çift Terimli				Alçak Gerilim Çift Terimli				
	Sanayi	262,2851	265,2400	406,5304	151,2050	25,2888	287,5739	290,5288	431,8192	176,4938
	Kamu ve Özel Hizmetler Sektörü ile Diğer (30 kWh/gün ve altı)	174,6438	246,0159	376,5007	142,1943	34,2716	208,9154	280,2875	410,7723	176,4659
	Kamu ve Özel Hizmetler Sektörü ile Diğer (30 kWh/gün üstü)	243,7383	246,0159	376,5007	142,1943	34,2716	278,0099	280,2875	410,7723	176,4659
	Mesken (8 kWh/gün ve altı)	95,5452	161,7720	252,5509	89,1764	33,5187	129,0639	195,2907	286,0696	122,6951
	Mesken (8 kWh/gün üstü)	159,2790	161,7720	252,5509	89,1764	33,5187	192,7977	195,2907	286,0696	122,6951
	Sehit Aileleri ve Muharip Malul Gaziler	38,7776				22,7335	61,5111			
	Tarımsal Faaliyetler	164,3828	168,6088	258,1106	92,3882	28,1603	192,5431	196,7691	286,2709	120,5485
	Aydınlatma	224,9134				32,8247	257,7381			
	Genel Aydınlatma	204,7600				32,8247	237,5847			

Bu şekilde, her bir senaryoda birim alandaki enerji üretimi ve toplam kurulum maliyetleri kıyaslanabilmiş ve hangi senaryonun konstrüksiyon bazlı maliyet-geri dönüş süresi açısından en verimli sonucu verdiği ortaya konabilmiştir.

7. BULGULAR

Bu bölümde , oluşturulan model, simülasyon yazılımı vasıtası ile analiz edilmiştir. PVSyst yazılımında modeli oluşturulan binanın güneş paneli enerji analizi detaylı şekilde yapılmıştır. Enerji analiz yazılımına girdi olarak yapının konum bilgisi, yapının bulunduğu şehrin iklim verileri, yönelimler, PV panel detayları, invertör detayları, kurulu fotovoltaik alan, panel sayısı ve panel eğimi gibi veriler girilmiştir. Bu veriler ışığında panellerin birbirine yaptığı gölgeleme etkileri, farklı cephelerin diğer cephelerdeki panellere yaptığı gölgeleme etkisi de yazılımda hesaba katılarak bir simülasyon yapılmış, her cepheye ve kombinasyona dair enerji üretim verileri elde edilmiştir.

Bütün bu girdilerle beraber elde edilecek olan enerji kazanım değerleri, sistem kurulum maliyeti ile birlikte yorumlanacaktır. Sonuç olarak konstrüksiyon bazlı maliyet-geri dönüş süreleri açısından en verimli senaryo ortaya konacak, tasarım sürecinde en aktif rol izleyen mimarların süreçteki bilinçlerine katkı sağlanacaktır.

7.1. Kombinasyonların enerji analiz bulguları

Bu bölümde tasarlanan fotovoltaik sistemin enerji analiz bulgularına yer verilmiştir.

PVSyst yazılımı ile modeli ve simülasyonu yapılan PV sistemlerin 1293 panel için her bir kombinasyondan üretilen enerji miktarları aşağıda verilmiştir.

Çizelge 7.1. Kombinasyonlara göre üretilen enerji miktarı

Kombinasyonların Enerji Üretim Miktarları	
Kombinasyon	Üretilen Elektrik(Kwh/Yıl)
90 DERECE	362 200,0
34 DERECE	438 800,0
0 DERECE	298 600,0

Çizelgeden de anlaşılacağı üzere bir yıl içerisinde en çok elektrik enerjisi üretimi 438,8 MWH ile 34 derece eğimli kombinasyondan sağlanmıştır. 0 derece eğimli kombinasyon ise 298,60 MWH ile yıllık oranda en az elektrik üreten kombinasyon olmuştur.

Seçtiğimiz yapı tek terimli tek zamanlı Ticarethane OG(orta gerilim) sınıfında yer almaktadır. Bu tabloda görüldüğü üzere orta gerilim elektrik tarifesinde birim kWh başına ikinci en yüksek ücretin ödendiği yapı grubu, ticarethanelerdir. Ofis yapıları,

ticarethane(kamu ve özel hizmetler sektörü ile diğer) grubunda değerlendirildiği için, yıllık elektrik tüketimi daha yüksek birim fiyata sahip yapı grubu arasında yer almaktadır. Bu açıdan ofis yapılarında fotovoltaik panel sistemlerin kullanılması ayrıca önem taşımaktadır. Kurulacak olan bir fotovoltaik sistemden elektrik üreterek, elektrik faturasından kar etmek daha avantajlı hale gelmiştir.

Tablodaki verilerden elde edilen tek zamanlı enerji bedeli ve dağıtım bedeli birim fiyatlarını kullanarak bir maliyet hesabı yapılmıştır. Bu maliyet hesabına %18 KDV ve %5 elektrik ve havagazı tüketim vergisi de dahil edilmiştir. Aktif tek zaman ve dağıtım bedelleri toplamı üzerinden %18 KDV hesaplanmıştır. Aktif tek zaman bedeli üzerinden ise %5 elektrik ve havagazı vergisi hesaplanmıştır. Ulaşılan maliyet sonuçları, elektrik üretiminden kazanılacak vergiler dahil toplam fiyatı ifade etmektedir.

Çizelge 7.2. Kombinasyonlara göre üretilen elektrik enerjisinden kazanılan yıllık toplam TL miktarı

Her Kombinasyonun Yıllık Kazandırdığı Değer(TL)						
kombinasyon	üretilen elektrik(kwh/yıl)	tek zaman aktif toplam bedeli(tl/yıl)	elektrik dağıtım bedeli(tl/yıl)	elekt. ve hvg. tük. Vergisi (%5) (tl/yıl)	kdv(%18) (tl/yıl)	kazanılan son toplam (tl/yıl)
90 DERECE	362 200	851 455,05	104 190,45	42 572,75	172 016,19	1 170 234,45
34 DERECE	438 800	1 031 525,34	126 225,21	51 576,27	208 395,10	1 417 721,91
0 DERECE	298 600	701 945,00	85 895,28	35 097,25	141 811,25	964 748,77

Tablodan anlaşılacağı üzere yıllık en çok TL kazancı sağlayan kombinasyon 1.417.721,91 TL ile 34 derece eğimli kombinasyondur. Ardından 1.170.234,45 TL kazanç sağlayan 90 derece eğimli kombinasyon gelmektedir. Yıllık en az kazanç sağlayan kombinasyon ise 964.748,77 TL ile 0 derecelik kombinasyondur.

Kombinasyonların bina cephelerine göre enerji üretim oranları yönlenmeye ve kombinasyon eğim açılarının değişmesine göre farklılaşmaktadır. Fotovoltaik panel kurgusu toplam 3 cephede ve 3 farklı kombinasyonla gerçekleştirilmiştir. Güney, doğu ve batı cephelerinde kurgulanan paneller, yapının mevcut cephe karakteristiğine uygun konumlandırılmıştır.

Yapı plan düzleminde dikdörtgen formudur. Bu sebeple güney cephe uzun kenar, doğu ve batı cepheleri ise kısa kenarları teşkil etmektedir. Yapının cephe karakteristiğine uygun

kurgulama ve cephe ölçülerinin farklı olması sebepleriyle 3 cephede de farklı sayıda panel kullanılmıştır. Yapının doğu cephesinde 379 adet panel, güney cephesinde 528 adet panel, batı cephesinde ise 386 adet panel olmak üzere üç cephede toplam 1293 adet panel kullanılmıştır. Çizelge 7.3'te kombinasyonlara göre cephe bazlı yıllık toplam elektrik üretim miktarları ifade edilmiştir.

Çizelge 7.3. Kombinasyonlara göre cephe bazlı yıllık toplam elektrik üretim miktarları

kombinasyon	Cephelere göre enerji üretim miktarları(toplam)		
	batı cephesi üretim(mwh/yıl)	doğu cephesi üretim(mwh/yıl)	güney cephesi üretim(mwh/yıl)
90 DERECE	100 %27,60	94,6 %26,11	167,6 %46,29
34 DERECE	116 %26,44	110,8 %25,25	212 %48,31
0 DERECE	76,6 %25,66	72,7 %24,34	149,3 %50

Panel başı elektrik üretim oranının en yüksek olduğu cephe ve kombinasyona karar verilebilmesi için her cephe ve kombinasyonda üretilen elektrik miktarları ayrı ayrı o cephelerde bulunan panel sayılarına bölünmüş ve ortalama bir değer elde edilmiştir. Çizelge 7.4.'te cephe ve kombinasyonlara göre 1 panelin yıllık elektrik üretim miktarları ifade edilmiştir.

Çizelge 7.4. Cephe ve Kombinasyonlara göre panel başı yıllık elektrik üretim miktarları

Cephelere Göre Enerji Üretim Miktarları(1 Panel Başı)			
Kombinasyon	Batı Cephesi	Doğu Cephesi	Güney Cephesi
	Üretim(Mwh/Yıl)	Üretim(Mwh/Yıl)	Üretim(Mwh/Yıl)
90 DERECE	0,259	0,249	0,317
34 DERECE	0,300	0,292	0,401
0 DERECE	0,198	0,191	0,282

Tabloda ifade edilen verilere göre panel başına ortalama en yüksek elektrik üretimine sahip cephe ve kombinasyon güney cephe 34 derecelik kurgudur. Bundan hemen sonra ikinci sırada güney cephe 90 derecelik kombinasyon yer almaktadır. Verimlilik açısından en düşük değere sahip cephe ve kombinasyon ise doğu cephesi 0 derecelik kurgudur. Diğer bölümlerde çıkan sonuçlarla paralel olarak, 34 ve 90 derecelik kombinasyonlar 0 dereceye göre daha verimli sonuçlar sunmaktadır. Özellikle doğu ve batı cephelerine bakıldığında 90 ve 34 derecelik kombinasyonlar arasındaki farkın azaldığı gözlenmektedir. Güneşin

doğduğu ve en yüksek noktasına kadar ulaşırken geçirdiği evrede, 90 derecelik paneller daha fazla dik açılı ışınımına maruz kalırlar. Bu sebeple 90 derecelik panellerin doğu ve batı cephesindeki verimlilikleri artar. Ayrıca kış ve sonbahar aylarında da güneşin daha eğik açılar ile hareket etmesi, 90 derecelik kombinasyonun üretim verimini artırır.

Bina Ankara’da bulunan 35 katlı bir ofis yapısıdır. Bu ofis yapısının en çok enerji tükettiği saat aralıkları günün sabah 08.00 ile akşam 18.00 saatleri arasındadır. Tez çalışmasında kullanılan bina 3 bloktan oluşan yapı grubunun B bloğudur. Bina yönetiminden 2021 yılı içerisinde hangi bloğun ne kadar elektrik tükettiğine dair Çizelge 7.5.’teki veriler elde edilmiştir.

Çizelge 7.5. Yapı grubunun bloklara ve aylara göre elektrik tüketim değerleri

2021 YILI BLOKLAR VE ORTAK ALAN KWH DEĞERLERİ																
NOT: TRAFİK KAYIPLARI İHMAL EDİLMİŞTİR.																
				ISITMA	ISITMA	ISITMA	ISITMA	ISITMA	SOGUTMA	SOGUTMA	SOGUTMA	SOGUTMA	SOGUTMA	ISITMA	ISITMA	ISITMA
				31.12.2020	1.02.2021	1.03.2021	1.04.2021	1.05.2021	1.06.2021	1.07.2021	2.08.2021	1.09.2021	1.10.2021	1.11.2021	1.12.2021	31.12.2021
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
				OCAK	ŞUBAT	MART	NİSAN	MAYIS	HAZİRAN	TEMMUZ	AĞUSTOS	EYLÜL	EKİM	KASIM	ARALIK	
32 KATLI	OFİSLER	ATOPLAM	A BLOK		34.000	32.500	35.000	29.500	38.500	71.500	85.000	98.000	71.500	31.000	30.000	32.000
35 KATLI	OFİSLER	BTOPLAM	B BLOK		32.000	26.880	28.800	23.680	36.480	81.280	96.640	115.840	85.120	35.840	25.600	28.160
27 KATLI	REZİDANS	CTOPLAM	C BLOK		46.720	40.960	46.080	37.120	60.160	147.840	167.680	121.600	80.000	28.160	38.400	44.160
3 KAT	OTOPARK	ORTAK	OGAT		4.700	4.950	5.200	4.100	2.850	2.950	2.750	2.700	2.950	3.150	3.000	3.050
					117.420	105.290	115.080	94.400	137.990	303.570	352.070	338.140	239.570	98.150	97.000	107.370

Buradan elde edilen verilere göre B bloğunda yıllık 616,32 MWH elektrik tüketimi meydana gelmiştir. Bu veri daha sonraki karşılaştırma ve analizlerde binanın yıllık ortalama elektrik tüketimi verisi olarak baz alınacaktır. Aşağıda her kombinasyonda üretilen elektrik enerjisi miktarları ile bina yıllık elektrik tüketimi miktarının kıyas edildiği tablo yer almaktadır.

Çizelge 7.6. Kombinasyonların ürettiği elektrik enerjisi-bina yıllık enerji tüketimi oranı

Her Kombinasyonun Ürettiği Enerji Miktarının Bina Yıllık Enerji Tüketimine Oranı Yüzdeler Hesap			
Kombinasyon	Üretilen Elektrik(Kwh/Yıl)	Bina Yıllık Elektrik Tüketimi(Kwh/Yıl)	Her Kombinasyonun %'lik Değeri
90 DERECE	362 200,00	616 320,00	%58,8
34 DERECE	438 800,00		%71,2
0 DERECE	298 600,00		%48,4

Çizelgede her bir kombinasyonun yıllık elektrik üretim miktarları, bina yıllık elektrik tüketim miktarı ve bu iki değerin birbiri ile kıyası sonucu ortaya çıkan değerler verilmiştir. Her bir kombinasyonda üretilen elektrik enerjisinin, bina yıllık elektrik tüketim miktarının yüzde kaç olduğunu ifade eden değerlere göre bina yıllık elektrik tüketim miktarının %71,2 'sini karşılması ile en verimli kombinasyon 34 derecelik kombinasyondur. İkinci sırada %58,8'lik değer ile 90 derecelik kombinasyon yer almaktadır. Son sırada %48,4 ile 0 derecelik kombinasyon yer almaktadır. Burada da diğer bölümlerdeki sonuçlara benzer şekilde en verimli iki kombinasyon 34 ve 90 derece kombinasyonları olmuştur.

7.2. Kombinasyonların konstrüksiyon maliyeti bulguları

Fotovoltaik panel sistemlerinin kurgulanmasındaki en önemli kısımlardan biri konstrüksiyon tasarımı ve kurgusudur. Çeşitli etkenler göz önünde bulundurularak konstrüksiyon tasarımı yapılmalıdır.

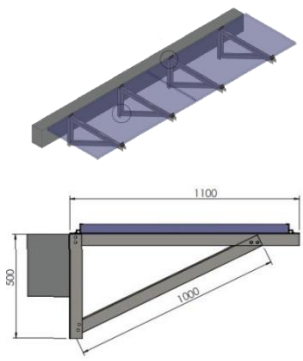
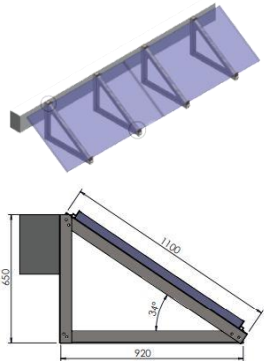
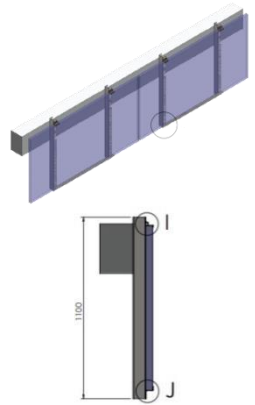
Piyasada fotovoltaik panel konstrüksiyon tasarımı kapsamında ulusal ve uluslararası ölçekte çalışmalar yürüten ERL Enerji firmasıyla uygulama fiyatları ve tasarım detaylarına dair ortak çalışmalar yürütülmüş, bu çalışmalara göre maliyet hesabı gerçekleştirilmiştir.

Ayrıca elde edilen literatür bilgisi ışığında yapının doğu, batı ve güney cephelerinde en fazla verim elde edildiği için kurgu, bu üç cephede gerçekleştirilmiştir. Kuzey cephe ışınım alma ve güneşlenme süresi açısından çok zayıf olduğu için kuzey cephede fotovoltaik panel kurgusu yapılmamıştır.

Panel konstrüksiyonu tasarımında çeşitli türlerde profiller, civatalar, klempler ve dübeller kullanılmıştır. Bu parçaların maliyetleri farklılık göstermektedir. Ayrıca kombinasyonlara göre de parça miktarları değişkenlik göstermektedir. Bu da her kombinasyon için konstrüksiyon maliyetinin değişmesine sebep olmuştur. Cıvata, klemp ve dübeller birim adetlere göre hesaplanırken profiller birim ağırlığa göre hesaplanmaktadır.

Çizelge 7.7.'de kombinasyonlara göre konstrüksiyon kurulumunda kullanılan çeşitli parçalar ve bu parçaların kilogram ve adet cinsinden miktarları verilmiştir.

Çizelge 7.7. Kombinasyonlara göre konstrüksiyon bilgileri ve detayları

	Kombinasyon-1	Kombinasyon-2	Kombinasyon-3
	Sfır derece(yatay) kullanım	34 derece(eğimli) kullanım	90 derece(dikey) kullanım
Kombinasyon detayları			
Profil (kg)	21 233,07	21 868,76	12 119
Köşe klemp (adet)	5 172	5 172	2 586
Cıvata+somun+pul set (adet)	15 516	15 516	2 586
Dübel (adet)	7 758	10 344	7 758
Z profil (kg)	-	-	3 129
Konstrüksiyon düzenlemesi	Panelin her iki kenarı da klempler ile sabitlenecektir	Panelin her iki kenarı da klempler ile sabitlenecektir	Panelin bir kenarı Z profil ile sabitlenecek, diğer kenarı ise 2 adet klemp ile sabitlenecektir

Her 3 kombinasyonda da adet ve kg cinsinden değerler toplamda farklılık göstermektedir. Konstrüksiyon çeşidine göre değişen hesaplar sonucu kullanılan z profili, dübel, cıvata, köşe klemp ve profil miktarları farklılık göstermiş, bu da maliyetin farklılaşmasına sebep olmuştur. ERL Enerji firmasından alınan maliyet hesaplamalarında malzeme fiyatları, dolar kuru, şirketin piyasa takibi hususları fiyatların belirlenmesinde etkili olmuştur. Ayrıca Çizelge 7.7.'deki malzeme ve miktarlarının belirlenmesinde çeşitli etkenler rol oynamıştır.

Tüm bu hesaplamalar ışığında belirlenen ve konstrüksiyonu meydana getiren malzemelerin maliyet hesapları yapılmıştır. Bu maliyetler Çizelge 7.8.'de ifade edilmiştir.

Çizelge 7.8. Kombinasyonlara göre konstrüksiyon maliyetleri

Kombinasyon	Konstrüksiyon maliyeti(USD)	Konstrüksiyon maliyeti(TL)
90 DERECE	39 531,90	652 276,35
34 DERECE	81 455,05	1 344 008,33
0 DERECE	70 015,70	1 303 759,05

Çizelge 7.8.'den anlaşılacağı üzere konstrüksiyon maliyeti açısından en verimli kombinasyon, 652 276,35 TL maliyet ile 90 derecelik kombinasyondur. 90 derecelik kombinasyon maliyeti, diğer kombinasyon maliyetlerinin yaklaşık %50'sidir. Arada çıkan büyük fark, bu kombinasyonda kullanılan malzeme miktarının en az olmasından kaynaklanmaktadır.

7.3. Bütünleşik değerlendirme

Konstrüksiyon maliyetinin sistem tarafından üretilen enerji miktarı ile kendi kendini amorti edeceği süre önem kazanmaktadır. Tasarımcılara bir referans oluşturması için ilk etapta bu değerlendirme yapılmıştır.

İncelenen 3 ayrı kombinasyon için konstrüksiyon maliyet analizi bölüm 7.2.'de ortaya konmuştur. Bu aşamada ise maliyet verileri her kombinasyon için hesaplanan enerji üretimi ve kazanılan enerjiye karşılık gelen TL hesabı ile karşılaştırılmış ve geri dönüş süreleri ortaya konmuştur. Geri dönüş süresi, her kombinasyonun maliyetinin kazandırdığı TL değerine oranlanması ile ay cinsinden bir değer elde ederek hesaplanmıştır.(Çizelge 7.9).

Çizelge 7.9. Konstrüksiyon maliyeti geri dönüş süreleri

Kombinasyon	Konstrüksiyon Maliyeti Geri Dönüş Süreleri			
	Üretilen Elektrik		Konstrüksiyon Maliyeti(TL)	Geri Dönüş Süresi(Ay)
	miktarı (Kwh/Yıl)	TL karşılığı (TL/Yıl)		
90 Derece	362 200,00	1 170 234,45	652 276,35 (39 531,90 USD)	6,69
34 Derece	438 800,00	1 417 721,91	1 344 008,33 (81 455,05 USD)	11,38
0 Derece	298 600,00	964 748,77	1 303 759,05 (70 015,70 USD)	16,22

Çizelge 7.9.'daki verilere göre maliyet-geri dönüş süresi en kısa olan kombinasyon 6,69 ay ile 90 derecelik kombinasyondur. Enerji üretimi 34 dereceye göre daha düşük olmasına

karşın imal edilme sürecinde sistem davranışı dolayısıyla daha kolay imal edildiği ve konstrüksiyon kurgusunda daha az malzeme kullanıldığı için konstrüksiyon maliyeti daha düşük çıkmıştır. Bu sebeple konstrüksiyon maliyetini amorti etme süresi hesaplandığında 90 derecelik kombinasyon çok daha avantajlı ve verimlidir.

Maliyet-geri dönüş süresi en uzun olan kombinasyon 16,22 ay ile 0 derecelik kombinasyondur. Enerji üretiminin en düşük olması ve konstrüksiyon maliyetinin de yüksek olması sebebiyle bu kombinasyon, maliyet geri dönüş açısından en verimsiz seçenektir.

Fotovoltaik panel üretici firmalar, panelleri için belli sürelerde kullanım ömrü biçmekte ve bu kullanım ömrü için garanti vermektedir. Bu süre büyük çoğunlukta 25-30 sene aralığında değişmektedir. Bu çalışmada da belirlenmiş bir süre sonunda toplam kazancımızın ne olacağı üzerinde durulmuştur.

Kullanılacak olan PV panellerin ömrü 30 sene olarak belirlenmiştir. Hesap yapılırken, her bir kombinasyonun 30 sene sonunda ürettiği toplam elektrik enerjisi ve buna karşılık gelen TL kazanım değeri hesaplanmış, bu toplam değerden her bir kombinasyonun konstrüksiyon maliyetleri çıkarılmıştır. Sonuçta konstrüksiyon maliyetlerinin de işlendiği bir hesap ile kazanılan toplam TL miktarı ortaya çıkmıştır.

Çizelgede her bir kombinasyona ait yıllık kazanılan TL miktarı, 30 yıllık bir süreçte toplam kazanılan TL miktarı, konstrüksiyon maliyetleri ve konstrüksiyon maliyetlerinin de çıkarılmasıyla elde edilen 30 yıllık toplam TL kazancı ifade edilmiştir

Çizelge 7.10. 30 yıllık süreçteki toplam kazanım

30 yıllık toplam kazanç (TL)				
Kombinasyon	Yıllık kazanılan miktar (TL/YIL)	30 yıllık kazanılan miktar (TL)	Konstrüksiyon maliyeti (TL)	30 yıllık net kazanılan miktar (TL)
90 DERECE	1 170 234,45	35 107 033,40	652 276,35	34 454 757,05
34 DERECE	1 417 721,91	42 531 657,25	1 344 008,33	41 187 648,92
0 DERECE	964 748,77	28 942 463,20	1 303 759,05	27 638 704,15

Güneşin optimum açıda panellere ulaşması ve gölgelemenin 0 dereceye nispeten daha az olması sebepleriyle panel üretimi ve verimi artmıştır. Bu sebeple 30 yıllık süre sonunda 34 derece açığa sahip kombinasyonun 41 187 648,92 TL ile en fazla kazanç sağladığı görülmektedir. Bu kazancı takip eden 90 derecelik kombinasyondur. 34.454.757,05 TL ile

ikinci sırada yer alan 90 derecelik kombinasyon önemli ölçüde kazanç sağlamıştır. Panellerin birbirine gölgeleme etkisinin olmadığı bu seçenekte verim artmıştır. Güneş ışınımlarını dik alamamaktan kaynaklanan verim düşüşü, gölgelemenin sifıra düşmesi ve kış-sonbahar aylarında daha dik açılara maruz kalmasıyla tolere edilmiştir. Son sırada ise 27.638.704,15 TL ile 0 derecelik kombinasyon yer almaktadır. En yüksek kazanım değerine sahip 34 derecelik kombinasyon baz alınrsa, 90 derece 34 derecenin %83,65'ine, 0 derece ise 34 derecenin %67.10'una eşittir. Bu değerlerden de anlaşılacağı üzere diğer iki kombinasyona göre 0 derecelik kombinasyon hem konstrüksiyon maliyeti açısından hem de 30 yıllık süreç sonunda kazandırdığı toplam TL miktarı açısından dezavantajlıdır ve nispeten verimsizdir. Panellerin birbirine gölgeleme etkisinin en çok görüldüğü kombinasyon 0 derecelik kombinasyondur. Bu da verimin çok düşmesine sebep olmaktadır.

Çizelge 7.11. PV sistem maliyet geri dönüş süreleri

PV sistem maliyet-geri dönüş süresi					
Kombinasyon	Kazanılan miktar(TL/YIL)	Konstrüksiyon maliyeti(TL)	PV panel maliyeti(TL)	PV Sistem kurulum maliyeti	Sistem maliyeti-geri dönüş süresi(yıl)
90 DERECE	1 170 234,45	652 276,35	7 375 500,00	8 027 776,35	6,8
34 DERECE	1 417 721,91	1 344 008,33		8 719 508,33	6,1
0 DERECE	964 748,77	1 303 759,05		8 679 259,05	9

Bir solar panel firmasından alınan fotovoltaik sistem kurulumuna dair fiyat teklifine göre yaklaşık maliyet 7.375.500 TL (447.000USD)'dir. PV panel fiyatları ve konstrüksiyon maliyetlerinin toplamı ile elde edilen fotovoltaik sistem kurulum maliyeti ile yıllık kazanılan TL miktarı kıyaslanarak, tüm sistemin geri-dönüş süreleri ortaya konmuştur. Bu verilere göre 6.1 yıl geri dönüş süresi ile en avantajlı kombinasyon 34 derece olmuştur. Geri dönüş süresi en uzun olan ve diğerlerine göre verimliliği en düşük olan seçenek ise 9 yıl geri dönüş süresi ile 0 derecelik kombinasyon olmuştur.

Literatürden elde edilen bilgiye göre Ankara için yıllık sabit konstrüksiyon ile optimum eğim açısı 34 derecedir (Koçer, Şevik ve Güngör, 2016). Bilinen bir kabul olan bu sonucun ekonomik etkileri, Ankara'da belirlenen bir yüksek yapı üzerinde analiz edilerek nümerik olarak hesaplanmıştır.

8. DEĞERLENDİRME VE SONUÇ

Fosil kaynakların tükenmesi ve gezegenimizi fazlaca kirletmeye başlaması problemleri, son yüzyılda fazlasıyla gündemde olan problemlerdir. Dünya üzerinde enerji tüketim oranı günden güne yükselmekte, yüksek çevresel bilince ulaşma yolunda hükümetler farklı politikaları takip etmektedir. Dünya üzerindeki enerji kullanımının büyük bölümünü teşkil eden binalar hakkında özellikle önlemler alınmakta ve enerji performanslarının iyileştirilmesi adına üzerinde çalışmalar yürütülmektedir.

Binalarda kullanılan enerji miktarının düşürülmesi yolunda birçok önlem alınmaktadır. Buna bağlı olarak binalarda kullanılan aktif ve pasif enerji önlemleri daha da önem kazanmakta, binaların enerji kullanımları mümkün olan en alt seviyeye indirilmeye çalışılmaktadır. Binalarda kullanılan enerji miktarının azaltılması yolunda alınan birçok önlemden biri aktif enerji üretim sistemlerinden olan fotovoltaik sistemlerin bina kabuğunda kullanılmasıdır. Yapıların hem çatılarında hem cephelerinde kullanılmakta olan fotovoltaik sistemler aracılığı ile üretilen elektrik enerjisi ile yapıların enerji ihtiyaçlarının bir kısmı karşılanmaktadır.

Bu çalışma kapsamında, çok katlı yapı cephelerinde fotovoltaik panel sistemlerinin konstrüksiyon detay farklılıklarından kaynaklanan maliyet ve enerji üretimi farklarının kıyaslanarak , en verimli senaryonun ortaya koyulması amaçlanmıştır. Literatürde yapı çatısında kullanılan fotovoltaik panellerin daha verimli olduğunu ve yapı cephesinde yapılan çalışmalar ile yüksek verimli enerji eldesi sağlanabileceği belirtilmiştir. Çok katlı yapılar, yüksek miktarda cephe yüzey alanı sunmaları sebebiyle fotovoltaik panel sistemleri kullanılarak enerji üretiminin bir avantaj sağlaması önemli görülmüştür. Ayrıca lisanssız elektrik üretimine dair yönetmelikte meydana gelen değişikliklerle beraber ilk defa çatı ve cephe ibareleri yönetmeliğe girmiştir. Bu açılarından, çok katlı binaların cephelerinde PV panel sistemlerinin kullanımının incelenmesi önemli görülmektedir.

Öncelikle dünya genelinde farklı lokasyonlarda bulunan ve her birinin cephesinde fotovoltaik panel sistemleri kullanılmış 10 adet çok katlı bina örneği seçilmiştir. Bu binalarda kullanılan fotovoltaik sistemler tasarım evresi, entegrasyon tipi, cephede uygulanma oranı, fotovoltaik panel cinsi, fotovoltaik panel eğimi, şebeke bağlantısı ve panel opasitesi gibi hususlar açısından incelenmiş ve değerlendirilmiştir.

Çalışmada belirlenen üç senaryonun modeli yapılmış; üç senaryo panellerin cephede yatay(0 derece), eğimli(34 derece) ve dik(90 derece) kullanımı şeklinde detaylandırılarak araştırma konusu ele alınmıştır. Eğimli kullanım için literatür taramasından elde edilen veriler ışığında Ankara için optimum sabit eğim açısı belirlenmiştir. Yine literatürden elde edilen veriler ışığında senaryolar kurgulanırken belli sınırlılıklar getirilmiş, kurgunun nasıl yapılacağına karar verilmiştir. Panellerin yerleşiminde, cephe şeffaf-sağır yüzeylerin kurgusu, yönlendirme, yapının bulunduğu konum, yapının mevcut cephe kurgusu etkili olmuştur.

Çalışma kapsamında Ankara'da mevcutta var olan bir yüksek yapı belirlenmiştir. Belirlenen çok katlı ofis yapısının detaylı enerji simülasyonu ve modeli PVSyst yazılımı vasıtasıyla yapılmıştır. Simülasyon sürecinde yapıya ait koordinatlar programa girilmiş, yapının bulunduğu konuma ait iklim ve güneşlenme verileri, Meteonorm 7.2 veri tabanından elde edilmiştir. Ayrıca simülasyonda panel sayısı, panel cinsi, panel eğimleri, yönelimler, invertör özellikleri v.b. gibi veriler programa işlenmiştir. Model süreci ve fotovoltaik panel cephe kurgusu, mevcut bina cephe özellikleri dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Belirlenen tüm kombinasyonlar ve tüm cepheler için simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.

Fotovoltaik panel konstrüksiyon tasarımı yapan bir şirket ile yürütülen ortak çalışmalar vasıtasıyla tüm sistemin tasarımı ve maliyeti elde edilmiştir. Sistem tasarımı; kar yükü, rüzgar yükü, panel ağırlıkları gibi etkenlerin her biri dikkate alınarak tasarlanmış ve hesaplanmıştır. Her kombinasyonda kullanılacak elemanlar ayrıca belirlenmiştir. Sonuçta tüm kombinasyonlardaki elemanların ayrı ayrı miktarları elde edilmiş ve maliyetleri hesaplanmıştır.

Yapılan simülasyonlar sonucu elde edilen veriler tasnif edilmiş ve bu veriler, binanın yıllık ortalama elektrik tüketimi ve sistem konstrüksiyon maliyeti gibi verilerle kıyaslanmıştır. Sonuçta bütünlük bir değerlendirme yapılmıştır.

Sistemin kurulduğu tüm cephelerde(güney, doğu, batı) toplam 1293 panel kurulmuştur. Kurgulanan tüm paneller vasıtasıyla yıllık üretilen elektrik enerjisi kombinasyonlara göre sırasıyla 90 derecelik kombinasyondan 362,2 MWh, 34 derecelik kombinasyondan 438,8 MWh, 0 derecelik kombinasyondan 298,6 MWh'tir. Yıllık bazda en çok elektrik üreten ve en verimli sonuçların elde edildiği kombinasyon 34 derecelik kombinasyon olmuştur.

Fotovoltaik sistem kurgusunda on-Grid(şebeke bağlantılı) sistem seçilmiştir. Bu şekilde depolama ihtiyacı olmadan üretilen elektrik binada doğrudan kullanılacaktır. Bu sebeple,

yıllık elektrik üretimi ve bu elektrik enerjisinin binada kullanılması sebebiyle elektrik faturasından elde edilen kar hesaplanmıştır. Bu hesap yapılırken EPDK'nın 1 Haziran 2022 tarihinde yayınladığı güncel elektrik birim fiyatlarından yararlanılmıştır. Aynı zamanda bu hesaba KDV ve vergiler de dahil edilmiştir. Yapılan hesaba göre yıllık kazanç sırasıyla; 90 derecelik kombinasyondan 1.170.234,45 TL, 34 derecelik kombinasyondan 1.417.721,91 TL, 0 derecelik kombinasyondan 964.748,77 TL olmuştur. Üretilen enerji oranında yıllık en çok kazanç sağlayan kombinasyon 34 derecelik kombinasyon olmuştur.

Cephelerde kullanılan fotovoltaik panel sayıları değişkenlik göstermektedir. Bunlar sırası ile güney cephesinde 528 adet panel, doğu cephesinde 379 adet panel, batı cephesinde 386 adet panel olarak ifade edilebilir. Cephe ve kombinasyona göre yıllık en çok elektrik üretiminin sağlandığı cephe ve kombinasyon 212 MWh/yıl ile 34 derece güney cephesidir. Yıllık üretimin en az olduğu cephe ve kombinasyon ise 72,7 MWh/yıl değeri ile doğu cephesi 0 derecelik kombinasyondur. Her cephede kullanılan panel sayısının farklılık göstermesi sebebi ile, üretilen enerji/panel sayısı oranlanarak 1 panel başına üretilen enerji miktarları da kıyaslanmıştır. Panel başı verimin en yüksek olduğu cephe ve kombinasyon 0,401 MWh/yıl ile güney cephesi 34 derece olmuş, en düşük verim ise 0,191 MWh/yıl verim ile doğu cephesi 0 derecelik kombinasyon olmuştur.

Bina içerisinde elektrik kullanımına dair tüm veriler dikkate alınarak yıllık bina elektrik tüketim miktarı belirlenmiş ve bu değer ortalama bir değer olarak hesaplarda kullanılmıştır. Bina elektrik tüketimi yıllık 616,32 MWh'tir. Her bir kombinasyonun ürettiği yıllık elektrik enerjisi ile bina yıllık elektrik tüketim değeri kıyaslanmış ve bu oran ortaya konmuştur. Bina yıllık elektrik tüketiminin %71.2'sini karşılaması ile 34 derecelik kombinasyon en verimli senaryo olmuştur. Bina yıllık elektrik tüketiminin %48.4'ünü karşılaması ile verimi en düşük olan senaryo, 0 derecelik kombinasyondur.

Her kombinasyonda değişen panel açıları sebebiyle farklılaşan yükler ortaya çıkmaktadır. Bu da her kombinasyonda kullanılan malzemelerin miktarlarında veya özelliklerinde farklılaşmaya sebep olmaktadır. Bu fark ile de kombinasyonların konstrüksiyon maliyetleri farklılaşmaktadır. Konstrüksiyon maliyetleri, kombinasyonlara göre sırasıyla; 90 derecelik kombinasyonun konstrüksiyon maliyeti 652.276,35 TL, 34 derecelik kombinasyonun konstrüksiyon maliyeti 1.344.008,33 TL, 0 derecelik kombinasyonun konstrüksiyon maliyeti 1.303.759,05 TL'dir. Maliyeti en yüksek olan seçenek 34 derecelik kombinasyondur. %50'ye yakın bir maliyet düşüklüğü ile en düşük maliyetli seçenek ise 90

derecelik kombinasyondur. Kurulum maliyeti açısından en verimli seçenek 90 derecelik kombinasyondur.

Her kombinasyonun konstrüksiyon maliyeti ile ürettiği yıllık elektrik miktarı ve buna bağlı faturadan kazanılan kar miktarı kıyaslanmıştır. Bu kıyaslama ile her kombinasyon için maliyet geri-dönüş süresi hesaplanmıştır. 90 derecelik kombinasyonun maliyet geri dönüş süresi 6,69 ay, 34 derecelik kombinasyonun 11,38 ay, 0 derecelik kombinasyonun ise 16,22 aydır. Bu sonuçlara göre, konstrüksiyon maliyet geri dönüş süresi açısından en avantajlı ve verimli seçenek 90 derecelik kombinasyondur.

Konstrüksiyon maliyeti bazlı geri dönüş süresi ile birlikte her kombinasyonun, fotovoltaik panellerin kullanım ömrü boyunca kazandıracığı toplam kar oranları hesaplanmıştır. Bir fotovoltaik panelin ortalama ömrü 30 yıl olduğu kabul edilerek yapılan hesapta, sırasıyla; 90 derecelik kombinasyon 34.454.757,05 TL kazandıracak, 34 derecelik kombinasyon 41.187.648,92 TL kazandıracak, 0 derecelik kombinasyon ise 27.638.704,15 TL kazandıracaktır. Bu kazanım değerleri, konstrüksiyon maliyetlerinin de toplam kazanımdan çıkarılarak elde edilmesiyle ulaşılan sonuçlardır. Ayrıca PV sistem kurulum maliyeti geri dönüş süresi açısından 6.1 yıl ile en avantajlı seçenek 34 derecelik kombinasyondur. Bu durumda, her ne kadar konstrüksiyon maliyeti geri dönüş süresi açısından 90 derecelik kombinasyon çok daha verimli olsa da, 30 yıllık süreçteki toplam kazanım ve PV sistem kurulum maliyeti geri dönüş süreleri dikkate alındığında 34 derecelik kombinasyon çok daha verimli ve avantajlıdır.

Elde edilen bu verilerin analizi sonucu en uygun senaryo ortaya konmuş, maliyet-geri dönüş süreleri hesaplanarak ülkemizde yüksek yapılar için fotovoltaik panellerin kullanımının verimliliği tartışılmıştır. Ayrıca biz mimarlar olarak, yapı tasarımında enerji etkin önlemler alırken nasıl bir yol izlememiz gerektiği ortaya konmuştur. Ulaşılan sonuçlar, gelecek çalışmalara ışık tutması ve temel oluşturması açısından önemli görülmektedir. Yüksek yapılarda fotovoltaik panellerin cephede kullanım detaylarının çeşitlendirilmesi, detay çözümleri ile birlikte cephe tasarımı süreçlerinde fotovoltaik sistemlerin estetik etkilerinin araştırılması ve derinleştirilmesi gibi konular üzerinde durulması planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- Akcan, E., Kuncan, M., Minaz, M.R. (2020). PVSyst yazılımı ile 30 kW şebekeye bağlı fotovoltaik sistemin modellenmesi ve simülasyonu. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 18, 248-261.
- Betancur, J. (2017). Multitasking façade: how to combine BIPV with passive solar mitigation strategies in a high-rise curtain wall system. *International Journal of High-Rise Buildings*, 6(4), 307-313.
- Cer, S. T. (2015). *Gölgeleme Bileşeni Olarak Kullanılan Fotovoltaik Panellerin Enerji Etkinliğinin Değerlendirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 37-50.
- Ceylan, İ., Gürel, E. (2018). *Güneş Enerjisi Sistemleri ve Tasarımı* (İkinci Baskı). Bursa: Dora Yayınevi, 16.
- Çelebi, G. (2002). Bina Düşey Kabuğunda Fotovoltaik Panellerin Kullanım İlkeleri. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 17(3), 17-33.
- Freitas, J. D. S., Cronemberger, J., Soares, R. M. (2019). *Using Rhinoceros Plugins Grasshopper and Ladybug to Assess BIPV Façades in Brasilia*. Konferans Bildirisi. 16th IBPSA International Conference and Exhibition, Roma, 4467-4472.
- Ghazali, A., Salleh, E. I., Haw, L. C., Mat, S., Sopian, K. (2017), Feasibility Of Vertical Photovoltaic System On High-Rise Building İn Malaysia: Performance Evaluation. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 12, 263–271.
- Gündüz, M. F., İlerisoy, Z.Y. (2021). *Fotovoltaik Panel Sistemlerin Yüksek Yapılarda Cephe Uygulamaları Üzerinden Değerlendirilmesi*. Middle East International Conference on Contemporary Scientific Studies-V, 3, 357-373.
- Hamidabad, D. B., Begeç, H. (2015). *Enerji Etkin Tasarım Anlayışının Yüksek Yapılarda İncelenmesi*. 2.Ulusal Yapı Kongresi ve Sergisi Yapı Üretimi, Kullanımı ve Koruma Süreçleri, Ankara, 1-12.
- İnternet: Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretimine İlişkin Yönetmelik. (2013). URL: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2013/10/20131002-3.htm>, Son Erişim Tarihi: 12.06.2021.
- İnternet: Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretimine İlişkin Yönetmelik. (2019). URL: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2019/05/20190512-1.htm>, Son Erişim Tarihi: 12.06.2021.
- İnternet: Güneş sistemlerinde neden mono veya polikristal panel tercih etmeliyim. (2019). URL:<https://www.enerjigazetesi.ist/gunes-sistemleri-nde-neden-mono-veya-polikristal-panel-tercih-etmeliyim/>, Son Erişim Tarihi: 25.05.2022.

- İnternet: İntertör Nedir. (2020). URL: <https://www.powerenerji.com/invertor-inverter-nedir-solar-panel-gunes-enerjisi-elektrik-uretimi.html>, Son Erişim Tarihi: 02.01.2022.
- İnternet: Lisanslı ve Lisanssız güneş enerji sistemleri. (2022). URL: <https://www.piagrid.com/rehber/lisansli-ve-lisanssiz-gunes-enerjisi-sistemleri>, Son Erişim Tarihi: 25.05.2022.
- İnternet: M1 W201 Photovoltaic Ventilated Façade System Handbook. (2020). URL: <https://mlsystem.pl/do-pobrania/>, Son Erişim Tarihi: 02.01.2022.
- İnternet: Ofis binaları için klima seçimi nasıl olmalı. (2021). URL: <https://klimatamircisi.com.tr/klima/ofis-binalari-icin/>, Son Erişim Tarihi: 10.06.2022.
- İnternet: Özyağcı, A. (2020). PVSyst 7.0 vs PV-Sol Premium 2020 hangisini seçmeliyim. URL: <https://medium.com/@ozcayci/PVsyst-7-0-vs-PV-sol-premium-2020-hangisini-se%C3%A7meliyim-198bd54ddac6>, Son Erişim Tarihi: 25.05.2022.
- İnternet: Solar Akü Nedir? Çeşitleri Nelerdir. (2022). URL: <https://www.incitas.com.tr/bilgi-merkezi/blog/solar-aku-nedir-cesitleri-nelerdir>, Son Erişim Tarihi: 02.01.2022.
- İnternet: Türkiye'deki İklim Çeşitleri. (2022). URL: https://tr.wikipedia.org/wiki/Türkiye%27deki_iklim_çeşitleri, Son Erişim Tarihi: 10.06.2022.
- İnternet: URL: <https://www.skyscrapercenter.com/building/4-times-square/907>, Son Erişim Tarihi: 12.06.2021.
- İnternet: URL: http://www.PVdatabase.org/projects_view_detailsmore.php?ID=276, Son Erişim Tarihi: 12.06.2021.
- İnternet: URL: http://www.PVdatabase.org/projects_view_detailsmore.php?ID=248, Son Erişim Tarihi: 12.06.2021.
- İnternet: URL: <https://visit.freiburg.de/en/attractions/solartower-at-the-central-station>, Son Erişim Tarihi: 12.06.2021.
- İnternet: URL: https://www.som.com/projects/pearl_river_tower, Son Erişim Tarihi: 12.06.2021.
- İnternet: URL: https://www.asce.org/uploadedFiles/Technical_Areas, Son Erişim Tarihi: 12.06.2021.
- İnternet: URL: <https://inhabitat.com/unstudio-to-renovate-hanwha-headquarters-with-solar-led-facade-in-seoul/>, Son Erişim Tarihi: 12.06.2021.
- İnternet: URL: <https://archello.com/story/23370/attachments/photos-videos/>, Son Erişim Tarihi: 12.06.2021.
- İnternet: URL: <https://www.nrel.gov>, Son Erişim Tarihi: 12.06.2021.

İnternet: URL: https://tr.wikipedia.org/wiki/CIS_Kulesi,_Manchester, Son Erişim Tarihi: 12.06.2021.

İnternet: CIS Tower. (2009). URL:[http://www.solaripedia.com/13/117/cis_tower_solar_skyscraper_retrofit_\(manchester,_uk\).html](http://www.solaripedia.com/13/117/cis_tower_solar_skyscraper_retrofit_(manchester,_uk).html), Son Erişim Tarihi: 12.06.2021.

İnternet: URL: http://www.PVdatabase.org/projects_view_detailsmore.php?ID=218, Son Erişim Tarihi: 12.06.2021.

İnternet: URL: <https://mapcarta.com/W165660888>, Son Erişim Tarihi: 12.06.2021.

İnternet: URL: http://www.PVdatabase.org/projects_view_detailsmore.php?ID=83, Son Erişim Tarihi: 12.06.2021.

İnternet: URL: http://www.PVdatabase.org/projects_view_detailsmore.php?ID=267, Son Erişim Tarihi: 12.06.2021.

İnternet: Schapfen Mill Tower. (2017). URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Schapfen_Mill_Tower, Son Erişim Tarihi: 12.06.2021.

İnternet: URL: <http://energinltdenergysavingsolutions.yolasite.com/solar-cladding.php>, Son Erişim Tarihi: 25.05.2022.

İnternet: Düz Çatı Montaj Sistemleri. (2020). URL: <http://solar.inventoturkiye.com/duz-cati-montaj-sistemi/>, Son Erişim Tarihi: 25.05.2022.

İnternet: URL: <http://solar.inventoturkiye.com/egimli-cati-montaj-sistemi/>, Son Erişim Tarihi: 25.05.2022.

İnternet: Solar Panel Cepheler. (2021). URL: <http://soloyapi.com.tr/solar-panel-cepheler-fotovoltaiklar/>, Son Erişim Tarihi: 25.05.2022.

İnternet: URL: <http://wedosolarindonesia.com/wp-content/uploads/2019/02/CSUN350-72M-Datasheet.pdf>, Son Erişim Tarihi: 10.06.2022.

İnternet: URL: <http://www.gunessistemleri.com/fotovoltaiktarihce.php>, Son Erişim Tarihi: 02.01.2022.

İnternet: Güneş Hücreleri. (2021). URL:<http://www.gunessistemleri.com/guneshucreleri.php>, Son Erişim Tarihi: 02.01.2022

İnternet: URL: <http://www.solarportall.com/gunes-kirici-panel/>, Son Erişim Tarihi: 25.05.2022.

İnternet: PvSyst 6.8.1. (2020). URL: <https://academia.ingnova.es/cursos-online/fotovoltaiica/PVsyst-6-81>, Son Erişim Tarihi: 25.05.2022.

- İnternet: URL: <https://curiousengineers.wordpress.com/2014/02/07/solar-kolektorlu-kiremitler/>, Son Erişim Tarihi: 25.05.2022.
- İnternet: URL: <https://gazelektrik.com/faydali-bilgiler/elektrik-tuketimi>, Son Erişim Tarihi: 25.05.2022.
- İnternet: URL: <https://gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator/>, Son Erişim Tarihi: 10.06.2022.
- İnternet: URL: <https://vhf.alsecco.de/en/finishes/photovoltaicsfacade-litho-photovoltaic.html>, Son Erişim Tarihi: 25.05.2022.
- İnternet: URL: https://www.aliexpress.com/item/32848905186.html?aff_platform=api-new-product-detail&aff_trace_key=f17d3b2afacb4bd5ba46b04c8fabd5b5-1611078826808-00126&dp=34659-62817.17096448&terminal_id=dccd18a9a69c4aab8c2c08c0dcb60077&tmLog=new_Detail, Son Erişim Tarihi: 25.05.2022.
- İnternet: URL: <https://www.atararim.com.tr/tr/proje/kizilirmak-ofis-ve-konutlari>, Son Erişim Tarihi: 10.06.2022
- İnternet: URL: <https://www.dormakaba.com/tr-tr/urunler-ve-cozumler/referanslar/referans-kutuphanesi/basari-oykusu/ankara-1071-1186570>, Son Erişim Tarihi: 25.05.2022.
- İnternet: URL: <https://www.dsneg.com/solar-panel/mono-solar-panel/72-cells-365w-dual-glass-mono-solar-module.html>, Son Erişim Tarihi: 25.05.2022.
- İnternet: Alüminyum Konstrüksiyon. (2018). URL: <https://www.ekonomiksolar.com/al%C3%BCminyum-konstr%C3%BCksiyon>, Son Erişim Tarihi: 25.05.2022.
- İnternet: Solar. (2021). URL: <https://www.teknoraysolar.com.tr/konstruksiyon/>, Son Erişim Tarihi: 25.05.2022.
- İnternet: URL: <https://www.thesisat.org/gunes-akuleri-ve-solar-regulator-sarj-kontrol-unitesi.html>, Son Erişim Tarihi: 02.01.2022.
- İnternet: Solar Şarj Cihazları. (2021). URL: <https://www.victronenergy.com.tr/solar-charge-controllers/smartsolar-250-85-250-100>, Son Erişim Tarihi: 02.01.2022.
- İnternet: URL: <https://www.viridiansolar.co.uk/resources-4-5-Solar-PV-Inverter.html>, Son Erişim Tarihi: 02.01.2022.
- İnternet: İnce film güneş paneli nedir. (2018). URL: <https://www.enerjiportali.com/ince-film-gunes-paneli-nedir/>, Son Erişim Tarihi: 25.05.2022.
- İnternet: URL: <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?k=H>, Son Erişim Tarihi: 10.06.2022.

- İnternet: Uyar, F. (2015). Güneş Panelleri Teknolojisinin Tarihsel Gelişimi. URL: <https://www.enerjibes.com/gunes-panelleri-teknolojisi-ve-tarihcesi/>, Son Erişim Tarihi: 02.01.2022.
- Karaca, Ü. B., Uçar, S. (2018). *Konut Çatı ve Cephelerinde Farklı Fotovoltaik Sistem Uygulamalarının Değerlendirilmesi*. *Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19(2), 65-76.
- Karafil, A. (2021). Kısmi Gölgeleme Durumundaki Seri Bağlı Fotovoltaik (FV) Panellerde Bypass Diyotunun Kullanılmasının Sistem Gücü Üzerine Etkisi. *DEÜFMD* 23(68), 621-630.
- Katuk, Ö. S. (2014). *Yüksek yapılarda sürdürülebilir enerji*, Yüksek Lisans Tezi, Haliç Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 18-25.
- Kazek, V. (2012). *Evaluation of Integrated Photovoltaic Systems on Facades*, Yüksek Lisans Tezi, Doğu Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazimağusa, 25-40.
- Kılıkış, B. (2020). Yapılardaki kat adedinin büyük kentlerin güneş enerjisinden akılcı yararlanmasına etkileri. *Mühendis ve Makine*, 61(699), 81-115.
- Kızıldaş, P. K. (2019). *Fotovoltaik Sistemler ve Güneşe Uyarlanabilir Cephe Sistemlerinin Enerji Etkinlik Yönünden Değerlendirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 6-20.
- Koçer, A., Şevik, S., Güngör, A. (2016). Ankara ve ilçeleri için Güneş kolektörü Optimum Eğim Açısının Belirlenmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 21, 1
- Kosic, T. (2015). *Economic aspect of solar thermal collectors' integration into facade of multifamily housing*. Proceedings of COST Action TU1205 Sempozyumu, 48-57.
- Lotfabadi, P. (2015). Solar considerations in high-rise buildings. *Energy and Buildings*, 89, 183-195.
- Nguyen, L. D. L., Ngoc, S. D., Cong, D. T., Thuong, D. L., Van, N. S., Minh, V. N. H., Le, N. T. (2019). *Facade integrated Photovoltaic systems: Potential applications for commercial building in Vietnam*. International Conference on System Science and Engineering (ICSSE), 219-223.
- Ort, M. İ. (2016). *Fv sistemlerde güneşi takip eden sistem tasarımı ve MPPT kontrolü ile enerjinin yüke maksimum olarak aktarılması*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 4-10.
- Özdoğan, H. P. (2005). *Ekolojik Binalarda Bina Kabuğunda Kullanılan Fotovoltaik Panellerin Tasarım Bağlamında İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 30-65.
- Öztürk, H. (2012). *Güneş Enerjisi ve Uygulamaları* (Birinci Baskı). İstanbul: Birsen Yayınevi, 39.

- Peng, J., Lu, L., Yang, H., Han, J. (2013). Investigation on the annual thermal performance of a photovoltaic wall mounted on a multi-layer façade. *Applied energy*, 112, 646-656.
- Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems. (2016). Photovoltaics Report. *Freiburg*, 1-52.
- Qadourah, J. A. (2020). *Architectural integration of photovoltaic and solar thermal technologies in multi-family residential buildings in the Mediterranean area Case study of Amman, Jordan*, Doktora Tezi, Berlin Sanat Üniversitesi Mimarlık ve Şehir Planlama Enstitüsü, Berlin, 130-160.
- Radhi, H. (2010). Energy analysis of façade-integrated photovoltaic systems applied to UAE commercial buildings. *Solar Energy*, 84(12), 2009-2021.
- Sayın, S., Koç, İ. (2011). Güneş Enerjisinden Aktif Olarak Yararlanmada Kullanılan Fotovoltaik(PV) Sistemler ve Yapılarda Kullanım Biçimleri. *S.Ü. Müh.-Mim. Fak. Derg.*, 26, 3.
- Grand View Research. (2016). Solar Cell Market Analysis By Product (Silicon Wafer, Monocrystalline, Multicrystalline, Cadmium Telluride, Copper Indium Gallium Selenide, Amorphous silica), And Segment Forecasts To 2022. San Francisco, 30-40.
- Tumurbaatar, A. (2019). *Yüksek Yapılarda Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Kullanımında Farklı Mimari Yaklaşımlar*, Yüksek Lisans Tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 99-104.
- Uçar, S. (2018). *Çatı ve Cephelerde Fotovoltaik Panel Uygulamaları Üzerine bir Çalışma Burdur Örneği*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Arel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 54-60.
- Yanardağ, H. M. (2015). *Farklı Bina Formlarında Güneş Pili Uygulamalarının Enerji ve Maliyet Etkinliği Açısından Değerlendirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 60-64.
- Yiğit, A., Atmaca, İ. (2018). *Güneş Enerjisi Mühendislik Uygulamaları*. (İkinci Baskı). Bursa: Dora Yayınevi, 6-7.
- Yücel, Y. (2016). *Güneş Enerjisinden Yararlanmak Amacı ile Fotovoltaik Sistemlerin Binalarda Kullanımı*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Arel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 90-100.



GAZİ GELECEKTİR..