

## Fotovoltaik Modüllerin Çatı Sistemleri ile Bütünleştirilmeleri ve İstanbul Örneği

**Mimar Ayşe MUTLU**<sup>1</sup>  
**Doç. Dr. Nil TÜRKERİ**<sup>2</sup>

### Konu Başlık No: 4 Sürdürülebilir Çatı ve Cephe Sistemleri

#### ÖZET

Türkiye’de sera gazı salınımının azaltılması, enerji üretiminde dışarıya bağımlılığın sınırlandırılması ve artan enerji taleplerinin karşılanabilmesi enerji politikalarının gündemini oluşturmaktadır. Bu gündemin bir sonucu olarak yenilenebilir kaynaklarla enerji üretimi binalarda enerji verimliliği politikalarında yerini almıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından fotovoltaiklerin yapı malzemesi olarak kullanılanlarına Binaya Entegre Fotovoltaik Modüller (BEFM) adı verilmektedir. BEFM uygulamaları için en verimli yapı yüzeyleri çatılardır. Dünyada BEFM’nin çatılarda uygulamasına 1980’lerde başlanmasına rağmen Türkiye’de 2003 yılında gerçekleştirilmiş yalnızca bir tane fotovoltaik entegre edilmiş çatı sistemi uygulaması vardır. Bunun ana nedeni ise fotovoltaik modüllerin maliyetlerinin yüksek olmasıdır. Ancak günümüzde fotovoltaik kullanım maliyetinin Avrupa ülkelerindeki gibi ulaşılabilir seviyelere çekilmek suretiyle kullanımının arttırılacağı ön görülmektedir. Bu noktada açığa çıkan sorun ise ülkemizde uygulama konusundaki deneyimsizlik ve fotovoltaik çatı sistemi alternatiflerinin pazarda bulunmamasıdır. Ayrıca fotovoltaik çatı uygulamaları ile ilgili herhangi bir yönetmelik yada standart da mevcut değildir. Bu durumda niteliksiz ve yapı ile bütünleşmeyen uygulamaların gerçekleşmesi kaçınılmazdır. Bu çalışmanın amacı fotovoltaik entegre edilmiş eğik çatı sistemlerinin yapısal tasarımı için mimarlara, çatı sistem, çatı kaplama malzemesi üreticilerine, yüklenicilere yol gösterebilecek bir model önerisi sunmak ve İstanbul ili örneği üzerinden modeli uygulayarak fotovoltaik entegre edilmiş eğik çatı sistemlerinin yapısal tasarım seçeneklerini ortaya koymaktır.

#### ANAHTAR KELİMELELER

Güneş Pili, Fotovoltaik, Çatı Sistemi, Yenilenebilir enerji, Binaya Entegre Fotovoltaik Modüller (BEFM)

Ayşe MUTLU [İstanbul Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Taksim- İstanbul, 34469, asemutlu@gmail.com]

<sup>2</sup> Doç. Dr. Nil TÜRKERİ [İstanbul Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Taksim- İstanbul, 34469, Telefon 0 212 2931300-2246, Faks 212 2514895, [sahal@itu.edu.tr](mailto:sahal@itu.edu.tr)]

## Giriş

Türkiye’de elektrik üretiminin %70’i termal enerjiden sağlanmaktadır ve termal enerjinin %85’i fosil kaynaklardan üretilmektedir [1]. Dünya Enerji Konseyi Türkiye Ulusal Komitesi’nin hazırladığı 2005-2006 *Türkiye Enerji Raporu*’nda enerji sektörleri arasında sera gazı salınımlarında en büyük paya sahip olan sektör elektrik sektörü olarak açıklanmıştır [2]. Bununla beraber Türkiye’de enerji tüketiminin büyük bir bölümü binalarda gerçekleşmektedir. Binalarda tüketilen enerji kaynakları arasında doğalgazdan sonraki en büyük pay elektrik enerjisine aittir [3]. Türkiye’de sera gazı salınımlarının belgelenmesi 2003’te Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi’nin imzalanması ile başlatılmıştır. Sera gazı salınımlarının kontrol altına alınması ve azaltılması ise ancak 2009’da imzalanan Kyoto Protokolü’yle gündeme gelmiştir. Öte yandan Türkiye enerji tüketiminin %70’ini ithal etmektedir ve büyüyen sanayi ile enerji talebi gün geçtikçe artmaktadır. Sonuç olarak sera gazı salınımlarının azaltılması, enerji üretiminde dışarıya bağımlılığın sınırlandırılması ve artan enerji taleplerinin karşılanabilmesi gereğince yenilenebilir enerji kaynakları ve enerji verimliliği Türkiye’nin enerji politikalarının gündemini oluşturmaktadır.

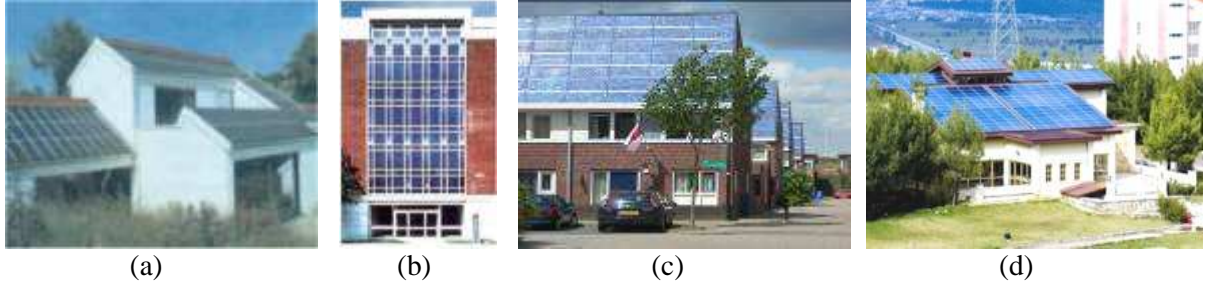
Türkiye’de binalarda enerji verimliliği ilk olarak 1970’de yürürlüğe giren TSE 825 *Binalarda Isı Yalıtım Kuralları Standardı* ile enerji korunumu açısından ele alındı. Zamanla çevre bilincinin artması ve enerji talebindeki sürekli artış nedeniyle, yenilenebilir kaynaklarla enerji üretimine de verimlilik politikalarında yer verildi. 2005’te yayınlanan *Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun*’la yenilenebilir kaynaklardan üretilen elektrik enerjisine tarife garantisi (5,5 euro cents/kWh) getirilerek, yenilenebilir kaynaklardan üretilen elektriğin şebekeye bağlanması yasallaştırıldı. 2007’de yürürlüğe giren *Enerji Verimliliği Kanunu*’nda ise yenilenebilir kaynaklardan enerji üretimine enerji verimliliği kapsamında bahsedildi. Son olarak 2008’de, yenilenebilir enerji kaynaklarının binalarda kullanımı *Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği*’nde yer aldı.

Fotovoltaik sistemler, buldukları yapıların elektrik tüketiminin tümü veya bir bölümünü, sınırlı fosil kaynakları tüketmeden yenilenebilir güneş enerjisini dönüştürerek karşılayabilen sistemlerdir. Ayrıca elektrik üretirken sera gazı salınımlarına veya herhangi bir atığın ortaya çıkmasına neden olmazlar. Yapı malzemelerinden tasarruf sağlayarak, yapının ekolojik ayak izini azaltmak için fotovoltaikler geleneksel yapı malzemeleri yerine de kullanılabilirlerdir. Yapı malzemesi olarak kullanılan fotovoltaiklere Binaya Entegre Fotovoltaik Modüller (BEFM) denilmektedir. Çoğunlukla BEFM uygulamaları için en verimli yapı yüzeyleri güneşe sürekli ve engelsiz maruz kalmaları nedeniyle, çatılardır. BEFM, yapılarda kaplama malzemesi yerine kullanılabilirliklerinin yanı sıra ek bir altyapı veya kurulum alanı da gerektirmezler. Ayrıca bu sistemlerin bir diğer avantajı ise üretim ve tüketici arasındaki mesafeyi kısaltarak elektrik iletimi ve dağıtım sırasında meydana gelen elektrik kayıplarını da azaltmalarıdır.

İlk BEFM çatı uygulaması 1985’de Saarbrücken-Almanya’da (Şekil1a) , ilk cephe uygulaması ise 1991’de yine Almanya’da Achen’da (Şekil1b) gerçekleştirilmiştir [4]. Bu ilk örneklerden sonra da Avrupa’da, Japonya’da ve ABD’de pek çok BEFM uygulamaları devletlerin ve çeşitli kuruluşların teşvikleri ile gerçekleştirilmiştir. Dünyanın ilk kentsel fotovoltaik projesi olan Nieuwland yerleşkesi 1999’da, Hollanda’da, yerel elektrik şebekesinin katkılarıyla gerçekleştirilmiştir (Şekil 1c). Bu yerleşkede 500 üzerinde konutta ve birkaç farklı işlevli binada fotovoltaik entegre edilmiş çatı sistemleri kullanılmıştır [5].

Türkiye, Avrupa ülkeleri arasında güneş enerjisi potansiyeli en yüksek ülkelerden biridir. Buna rağmen Türkiye’de fotovoltaik entegre edilmiş, yalnızca bir tane çatı sistemi uygulaması vardır (Şekil 1d). Bu uygulama 2003’de Muğla Üniversitesi kafeterya binasının, güneye bakan çatısının

yenilenmesi ile yapılmıştır. Diğer fotovoltaik çatı sistemi uygulamaları ise genellikle binanın kullanımı sırasında fotovoltaik modüllerin çatı kaplamasının üzerine yerleştirilmesi ile gerçekleştirilmiştir. Bu uygulamalarda fotovoltaik modüller çatı sistemine entegre edilmedikleri için kaplama malzemesinden tasarruf sağlanamamıştır.



Şekil 1: Türkiye ve Dünya'da BEFM uygulamaları.

Türkiye'de fotovoltaik çatı uygulamalarının sınırlı sayıda olmasının ana nedeni fotovoltaik modüllerin maliyetlerinin yüksek olmasıdır. Uygulamaların teşvik edilmesi için devletin veya yerel yönetimlerin herhangi bir destek programı mevcut değildir. 2009'da Kyoto Protokolü'nün imzalanması ile yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı gündeme gelmiştir. Ayrıca 5,5 euro cents/kWh olan tarife garantisinin artırılması da kanun teklifleri ile görüşülmektedir. Bu gelişmeler düşünüldüğünde fotovoltaik kullanım maliyetinin Türkiye'de de Avrupa ülkelerinde ki gibi ulaşılabilir seviyelere çekilerek, kullanımının arttırılacağı ön görülebilir. Bu noktada açığa çıkan sorun ise ülkemizde uygulama konusundaki deneyimsizlik ve fotovoltaik çatı sistemi alternatiflerinin pazarda bulunmamasıdır. Bu durumda da nitelsiz ve yapı ile bütünleşmeyen uygulamaların gerçekleşmesi kaçınılmazdır.

Bir diğer sorun ise Türkiye'de binalarda enerji verimliliği ile ilgili tasarımcılara doğru detaylandırma ve uygulama konusunda yön gösterebilecek çeşitli yönetmelikler, kanunlar veya standartlar mevcut olmasına rağmen fotovoltaiklerin yapı malzemeleri yerine kullanılması ve yapısal tasarımları ile ilgili bir kaynak henüz sunulmamıştır. Örneğin tipik ısı yalıtımı detayları Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği'nde ve Enerji Verimliliği Kanunu'nda ek olarak verilmektedir. Binalarda güneş enerjisinin ısı enerjisi olarak kullanılmasıyla ilgili ise Türk Standartları (TS EN 12975 Isıl güneş enerji sistemleri ve bileşenleri-Güneş enerjisi kolektörleri, TS 3817 Güneş Enerjisi - Su Isıtma Sistemlerinin Yapım Tesis ve İşletme Kuralları, TS ISO 9459 Güneş Enerjisiyle Isıtma-Konut Su Isıtma Sistemleri) mevcuttur. Benzer yönetmelik ve standartlar fotovoltaik çatı uygulamaları için bulunmamaktadır.

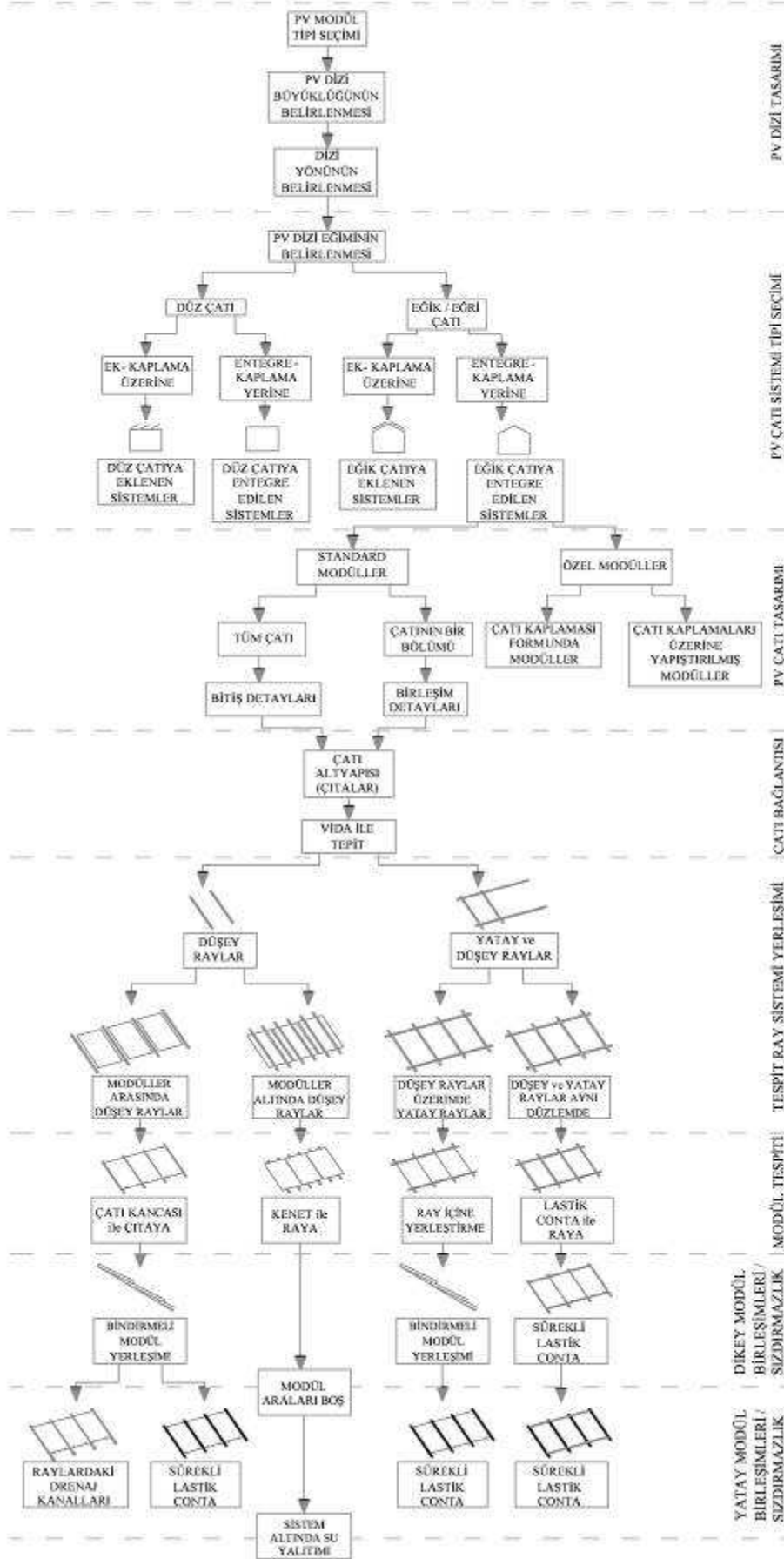
Yukarıda verilen sorunlara çözüm getirebilmek için İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Mimarlık Ana Bilim Dalı Çevre Kontrolü ve Yapı Teknolojisi Programı kapsamında bir Yüksek Lisans Tez çalışması yürütülmektedir. Tezin amacı, düz çatıya eklenen, düz çatıya entegre edilen, eğik çatıya eklenen ve eğik çatıya entegre edilen fotovoltaik sistemlerin doğru yapısal tasarımı için mimarlara, çatı sistem, çatı kaplama malzemesi üreticilerine, yüklenicilere yol gösterebilecek bir model önerisi geliştirmektir. Model, tasarım süreçlerinden meydana gelmektedir. Her süreçte adımlar vardır ve bu adımları etkileyen girdiler verilmektedir. Böylelikle girdiler her adımda tasarımcıyı en uygun seçeneğe doğru yönlendirirken, tüm alternatifler de aynı anda değerlendirilebilmektedir. Bu bildirinin amacı, modelin fotovoltaik entegre edilmiş eğik çatı sistemlerinin yapısal tasarımı için geliştirilen alt modeli açıklamaktır. Ek olarak alt model, İstanbul ili örneği için uygulanarak, İstanbul için fotovoltaik entegre edilmiş eğik çatı sistemleri için çeşitli yapısal tasarım seçenekleri geliştirilmiştir.

## Model

Fotovoltaik entegre edilmiş eğik çatı sistemi tasarımı için geliştirilen model, Şekil 2'de verilmiştir. Modelin ilk süreci, fotovoltaik dizi tasarımıdır. Bu süreçte çatı sisteminden bağımsız olarak fotovoltaik dizisinin modül tipi, büyüklüğü, yönü ve eğimi belirlenir. İlk adım, fotovoltaik modül tipi

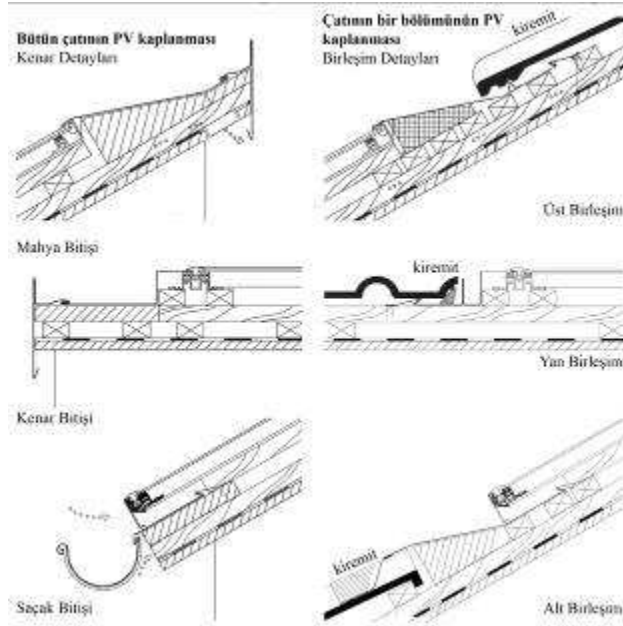
seçimidir. Modül tipi seçimini etkileyen girdiler, modül boyutları, modülün çıkış gücü(W), modüldeki hücrelerin cinsi (kristal silisyum, ince film), modülde bulunan hücre sayısı, modülün görünümü (rengi vs.), modül alt ve üst tabakalarının malzemeleri (cam-cam, cam-film, metal-film, film, teflon), tedarik edilme kolaylığı ve fiyatıdır. Fotovoltaik hücre cinslerinin ana farkları verimleridir; tekkristal silisyum hücreler yüzeylerine gelen güneş ışınının %14-17'ini, çokkristal silisyum hücreler %13-15'ini ve amorf silisyum hücreler ise %5-10'unu elektrik enerjisine dönüştürebilirler. İkinci adım ise fotovoltaik dizi büyüklüğünün belirlenmesidir. Bu kararın alınmasında, bir önceki modül tipi tercihinin yanı sıra toplam enerji ihtiyacı, mevcut alan, düşünülen fotovoltaik sistem kapasitesi(kWp) ve sistem için ayrılan bütçe etkili olmaktadır. Fotovoltaik dizi tasarımının üçüncü adımı, dizi yönünün belirlenmesidir. Dizinin yönüne yapının güneşe göre konumuna göre karar verilir; kuzey yarım kürede güney, güney yarımkürede kuzey yönü en verimli yönlenmedir. Bu sürecin en son adımı ise fotovoltaik dizi eğiminin belirlenmesidir. Dizi eğimi de yapının güneşe göre konumundan etkilenmektedir. Güneş ışınlarına dik yerleşen modüller maksimum enerji üretirler. Güneş ışınlarının geliş açıları gün içinde ve mevsimsel olarak değiştiği için en uygun açı, kullanım periodu da dikkate alınarak tayin edilebilir. Örneğin sadece yaz aylarında elektrik üretmesi beklenen bir sistemde, güneş ışınları yazın daha dik geldiği için modüller daha yatay yerleşebilir. Optimum dizi eğimi yapının konumunun ve dizinin kullanım periodunun girilebildiği PV-DesignPro (Mauisolar Software), PV SOL (Valentin EnergieSoftware), PV F-chart (F-Chart Software) ve PVSYST (University of Geneva) gibi bilgisayar yazılımları aracılığıyla bulunabilmektedir. Bu yazılımlar söz konusu bölgenin aylık veya saatlik ölçülmüş iklim verilerine dayanarak dizi eğimi ve yönü değişkenlerine göre üretilebilecek elektrik enerjisini hesaplamaktadır.

Modelin ikinci süreci fotovoltaik çatı sistemi seçimidir. Bu süreçte çatı formuna (düz veya eğik) ve sistemin ek veya entegre olmasına karar verilir. Sonuç olarak dört çeşit fotovoltaik çatı sistemi tanımlanmıştır: düz çatıya eklenen sistemler, düz çatıya entegre edilen sistemler, eğik çatıya eklenen sistemler ve eğik çatıya entegre edilen sistemler. Çatı formu iklim koşulları, çevredeki yapıların formları, çatı kaplama malzemesinin tercihi, yapım tekniği tercihi, ilgili yönetmelikler, yapının formu, yapının işlevi ve dizinin eğimi gibi pek çok tasarım girdisinin değerlendirilmesiyle belirlenir. Sistemin ek veya entegre olması kararında ise fotovoltaik dizisinin eğimi, yapının mevcut veya yeni bir yapı olması, malzeme tüketimi ve beklenen görsel etki dikkate alınır. Örneğin mevcut yapı uygulamalarında çatı kaplama malzemesinin korunması için fotovoltaik sisteminin çatı üzerine eklenen bir sistem olması tercih edilebilecek iken; yeni yapılacak bir yapıda fazladan kaplama malzemesi kullanılmaması için çatıya entegre fotovoltaik sistemleri tercih edilebilir. Aynı şekilde dizi eğimi ve çatı eğiminin birbirini tutması da entegre sistemlerin tercih edilmesi için bir nedendir. Bu bildiri eğik çatıya entegre edilen sistemlerin tasarım adımları ile devam edecektir.



Şekil 2: Fotovoltaik entegre edilmiş eğik çatı sistemi tasarımı için geliştirilmiş model.

Eğik çatıya entegre edilen sistemlerin tasarımında bir sonraki süreç, fotovoltaik çatı sistemi tasarımıdır. Bu süreçte çatılarda kullanılacak olan fotovoltaik modüllerinin çeşidine ve çatı alanının ne kadarının fotovoltaik modülleri ile kaplanacağına karar verilir. Çatı sistemlerinde kullanılan modüller standard modüller ve özel modüller olarak sınıflandırılabilir. Standard modüller çatı dışında, diğer fotovoltaik kurulumlarında da kullanılan modüllerdir. Özel modüller ise çatı kaplaması formunda üretilen veya çatı kaplaması üzerine yapıştırılmış olmak üzere iki çeşittir. Özel modüllerin standard modüllerden farkı daha küçük olmaları ve görsel olarak geleneksel çatı kaplamalarına benzemeleridir. Küçük oldukları için özel modüller uygulama sırasında daha kolay taşınabilmektedirler. Fakat birim uygulama alanı düşünüldüğünde, standard modüllere göre daha fazla modül döşenmesi gerektiğinden, özel modüllerde işçilik daha fazladır ve uygulamaları daha fazla zaman alır. Ayrıca modül başına kablolama yapıldığı düşünülürse, özel modüllerle yapılan uygulamalarda, yine birim alan başına kablo tüketimi de standard modül uygulamasına nispeten daha fazla olmaktadır. Çatının tümünün veya bir bölümünün fotovoltaik kaplanması kararı ise fotovoltaik dizisinin ve çatı alanının büyüklüklerine bağlı olarak alınır. Bu karar fotovoltaik sisteminin kenar detaylarını etkilemektedir. Eğer fotovoltaik sistemi çatının kenarına gelecek veya tümünü kaplayacak ise bitiş detaylarının; sistem çatının bir bölümünü kaplayacak yani başka bir kaplama malzemesi ile birleşecek ise birleşim detaylarının çözülmesi gerekmektedir, Şekil 3. İki durumda da sızdırmazlık sağlanmalı yani suyun çatı sisteminin içerisine girişine izin vermeyen detaylar düşünülmelidir. Sızdırmazlık için bu kenar detaylarında genellikle sisteme özel üretilen metal etekler (birleşim plakaları) ve yalıtım bantları kullanılmaktadır.



Şekil 3: Bitiş ve birleşim detayları.

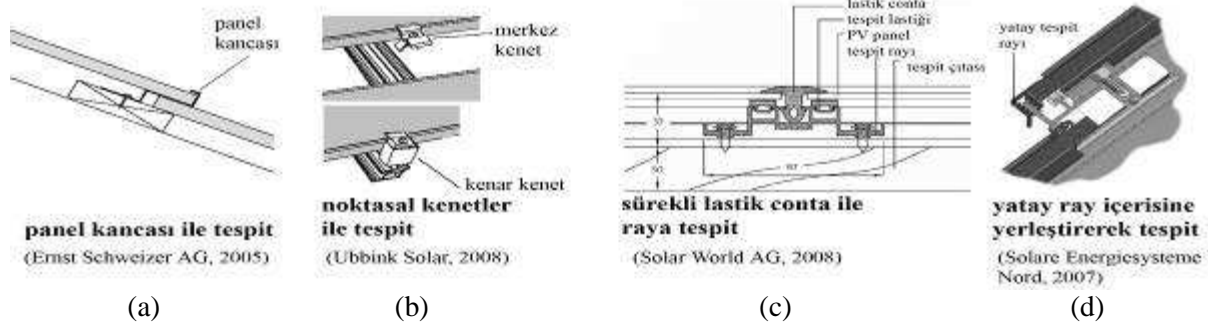
Özel modüllerin uygulanması formunu aldıkları veya üzerine yapıştırıldıkları çatı kaplamasının uygulanması ile aynıdır. Bu nedenle anlatıma standard modüllerin çatı kaplaması yerine, uygulanmasının tasarım adımları ile devam edilecektir.

Dördüncü süreç, çatı bağlantısı tasarımıdır. Çatı bağlantısı fotovoltaik dizinin üzerine kurulacağı alt yapıdır ve genellikle kiremit çatı uygulamasındaki gibi çatı çıtalarından oluşur. Altyapı modüllerin ana taşıyıcıdan bağımsız mesafelerle yereşebilmesinin sağlanması yanı sıra sistemin arkasında bir boşluk oluşturarak modüllerin arka yüzlerinin havalandırılmasını, bu yüzelerde yoğunlaşmanın olmamasını ve modül sıcaklığının aşırı artmamasını da sağlar. Bu alt yapının tasarımını seçilen modülün boyutları, geçilecek açıklıklar ve havalandırma ihtiyacı etkiler. Fotovoltaik modüllerin üzerine tespit edileceği metal ray sistemi, bu alt yapıya vida ile tespit edilir.



Beşinci süreç, sırasıyla tespit rayı sisteminin yerleşimi, modül tespiti ve modül birleşimleri (sızdırmazlık) adımlarından oluşmaktadır. Tespit rayı sisteminin yerleşiminde ilk olarak iki alternatif söz konusudur; düşey ray kullanımı veya düşey ve yatay rayların beraber kullanımı, Şekil 2. Bu adımda verilecek karar üzerinde modül boyutları ve geçilecek açıklıklar etkilidir.

Düşey ray kullanılmasına karar verilir ise iki alternatifle devam edilebilir; düşey rayların modüllerin aralarında veya modül altında kullanımı, Şekil 2. Raylar modül arasına yerleştirilirse modül tespiti çatı kancaları ile çatı altyapısına yapılır, Şekil 4a. Yatay modül birleşimlerinde sızdırmazlık düşey rayın oluşturduğu drenaj kanalları veya raya geçirilen lastik contalar ile sağlanırken; düşeyde ise kancalarla tespitten dolayı modüllerin bindirmeli yerleşimleri ile sağlanır. Bu sistemlerin avantajları az ray kullanılması ve -tercih ediliyor ise- bindirmeli çatı görünümüdür. Düşey rayların modüllerin altına yerleştirildiği sistemlerde ise modüller raylara noktasal kenetler ile tespit edilirler, Şekil 4b. Bu sistemlerde modül birleşimleri açıktır; bu nedenle mutlaka su yalıtımı kullanılması gerekmektedir. Avantajları ise açık birleşimler sayesinde modüller altında havalandırmanın kolaylıkla sağlanması ve noktasal kenetlerle tespit nedeniyle bir onarım veya söküm durumunda modüllerin birbirlerinden bağımsız sökülebilmeye imkanındır. Fakat noktasal tespitte her modül tek tek hizalanıp tespit edildiğinden işçilik artmaktadır.



Şekil 4: Modül tespit seçenekleri.

Düşey ve yatay rayların birlikte kullanıldığı sistemlerde iki ray yerleşim alternatifi söz konusudur; yatay rayların düşey rayların üzerinde kullanılması veya düşey ve yatay rayların aynı düzlemde kullanılması, Şekil 2. Yatay raylar düşey rayların üzerinde kullanılırsa modüller yatay rayların içerisine yerleştirilirler, Şekil 4d. Bu sistemde de modüller düşeyde birbirleri üzerlerine bindirmeli yerleşirler. Bindirmeli yerleşim sayesinde düşey modül birleşimlerinde sızdırmazlık sağlanırken, yatayda modüller arası sürekli lastik conta ile kapatılarak sızdırmazlık sağlanır. Düşey ve yatay rayların aynı düzlemde kullanıldığı sistemlerde ise modüller raylara sürekli lastik contalar ile tespit edilirler, Şekil 4c. Bu sayede sızdırmazlık da sağlanmış olur. Bu sistemde düz bir çatı yüzeyi elde edilir, fakat herhangi bir onarım durumunda bir modülün çıkarılması için tüm lastik contanın çıkartılması gerekli olacaktır.

## İstanbul için Fotovoltaik Entegre Eğik Çatı Sistem Seçenekleri

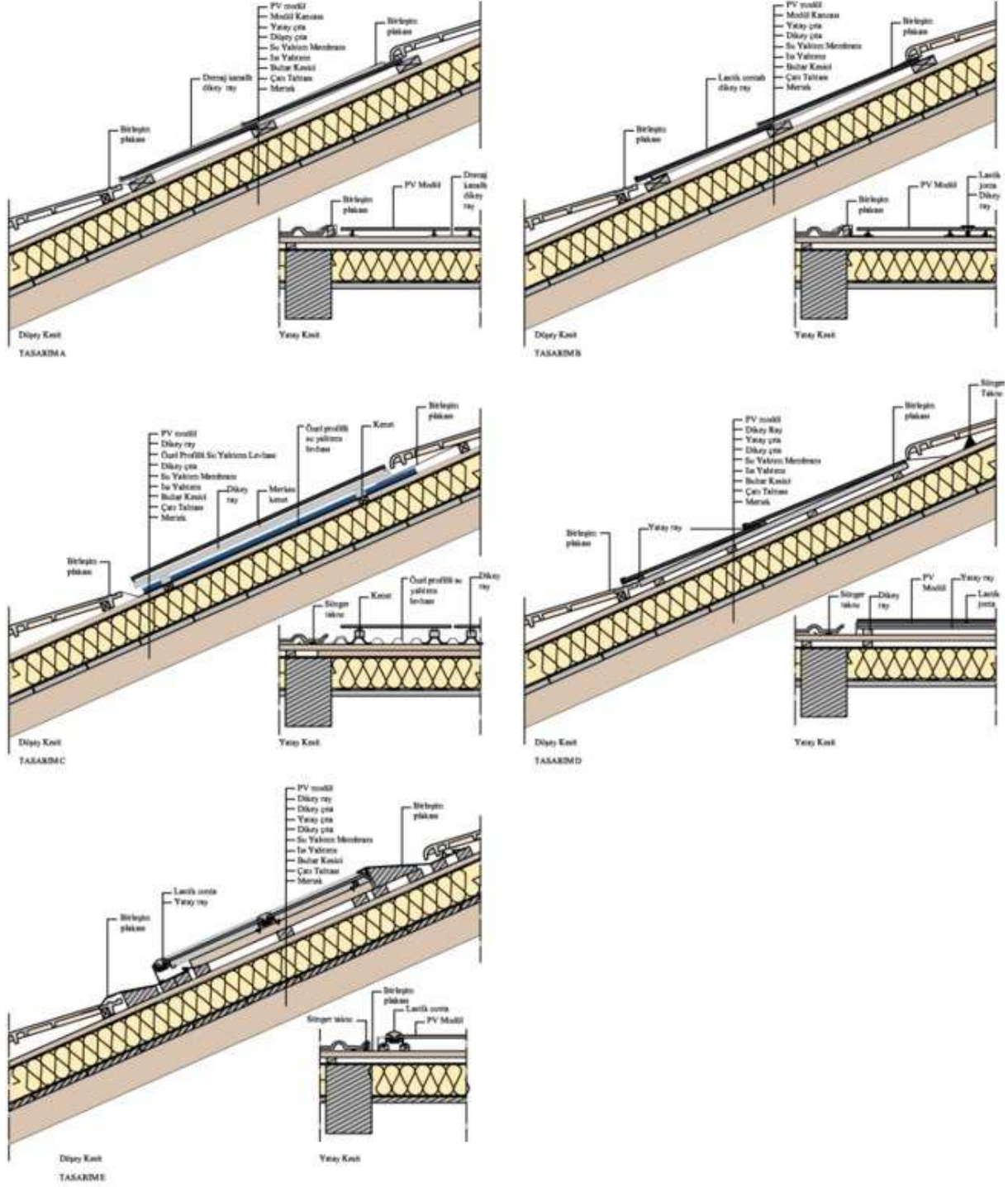
Bu bölümde, Şekil 2'de verilen model adımları kullanılarak, İstanbul'da yeni yapılacak bir bina için fotovoltaik entegre edilmiş eğik çatı sistem seçenekleri tasarlanmıştır. Bina İstanbul Kemerburgaz'da yer almaktadır ve konut olarak kullanılacaktır. Çatı formunun eğik olmasına; yapı formu, işlevi, karlı ve yağışlı İstanbul iklimi ve çevre yapılarla uyumu düşünülerek karar verilmiştir. Geleneksel bir yapım yöntemi kullanılması tercih edildiği için yerinde yapım; taşıyıcı sistem malzemesi olarak da ahşap tercih edilmiştir. Çatı sisteminin istenilen ısı geçirgenlik direncini karşılayabilmesi için mertekler arasına 8 cm kalınlığında geliştirilmiş polistren (EPS) ısı yalıtım levhası ve mertekler ile

ısı yalıtım levhasının üzerine 4 mm kalınlığında modifiye bitümlü su yalıtım örtüsü tasarlanmıştır. Buhar kesici olarak ise merteklerin ve ısı yalıtım levhasının alt yüzeyinde modifiye bitümlü bir tasarlanmıştır.

Fotovoltaik modül tipi toplam enerji ihtiyacı düşünülerek; modülün çıkış gücüne (170W), hücre tipine (tek kristal silisyum), modül boyutlarına (1.575 x 826 x 46 mm), modüldeki hücre sayısına (72 hücre), tedarik edilebilir durumuna ve alt ve üst tabakalarının malzemelerine (cam-film çerçevesi) göre seçilmiştir. Dizi büyüklüğü (5 modül, 650m<sup>2</sup>, 7900mmx4100mm) ise yine toplam enerji ihtiyacı, kullanılabilir çatı alanı ve bütçe düşünülerek belirlenmiştir. Dizi yönü, yapının kuzey yarım kürede bulunduğu ve bu konum için en verimli yönün güney olduğu düşünülerek güney olarak belirlenmiştir. PVSYST bilgisayar yazılımı kullanılarak İstanbul'da tüm yıl enerji üretmesi beklenen bir dizi için en verimli dizi eğimi, 26°-30° olarak bulunmuştur. Daha önce bahsedildiği gibi çatı formu eğik olarak belirlenmiştir. Sistemin çatıya entegre edilmesi düşünüldüğünden, dizinin ve çatının eğimleri eşit olacaktır. Fakat maksimum verim sağlanabilmesi için belirlenen 26°-30° dizi eğimi İstanbul imar yönetmeliğinde izin verilen en yüksek çatı eğimi derecesini (%45=24°) geçtiği için dizi eğimi çatı eğimine yani 24°'ye çekilmiştir. Böylelikle fotovoltaik çatı sistemi eğik çatıya entegre edilen sistem olarak belirlenmiştir. Fotovoltaik çatı sistemi tasarımında kolay temin edilmesi ve uygulamada az kablo harcanması açısından standart fotovoltaik modüllerin uygulanmasına karar verilmiştir. Dizi ve çatının büyüklükleri düşünüldüğünde ise çatının yalnızca bir bölümünün fotovoltaik kaplanmasına karar verilmiştir. Geri kalan çatı yüzeyinin ise kil esaslı kiremit malzeme ile kaplanması uygun görülmüştür. Birleşim yerlerinde çatı için özel üretilmiş metal plakalar (etekler), yalıtım bandları kullanılmasına karar verilmiştir. Sistemin çatı ile bağlantısı ise, ray yerleşimine uygun mesafelendirilmiş çatı çıtaları ile sağlanmıştır.

Yukarıda verilen adımlardan sonra ray yerleşimleri, modül tespiti ve bağlantıları olası alternatifleriyle çalışılmıştır. Tasarım alternatifleri Şekil 5'de verilmiştir. Tasarım A'da sadece düşey raylar modüllerin arasında kullanılmıştır. Modül tespiti panel kancaları ile çatı altyapısına yani çıtalara yapılmıştır. Modüller birbirleri üzerine bindirme yaptığı için düşey modül birleşimlerinde bu bindirme ile sızdırmazlık sağlanırken; yatay modül birleşimlerinde düşey raylarda bulunan drenaj kanalları ile suyun uzaklaştırılması sağlanmaktadır. Tasarım B'nin, A'dan farkı yatay modül birleşiminde drenaj kanalları yerine, düşey raya geçirilen lastik contalar ile sızdırmazlığın sağlanmasıdır. Tasarım A ve B'de modüllerin bindirmeli yerleşimi çatı görüntüsünü etkilemesinin yanı sıra modül yüzeyinin kendi kendine temizlenmesine de yardımcı olmaktadır. Tasarım C'de yine düşey raylar kullanılmış fakat raylar modüllerin altına yerleştirilmişlerdir. Modül tespiti, bu raylara noktasal kenetler ile yapılmıştır. Böylelikle modül birleşimleri boş bırakılmıştır. Bu alternatifte modüllerin arkasının havalandırmasının daha rahat sağlanması ve düz bir çatı yüzeyi elde edilmesiyle beraber sızdırmazlık fotovoltaik düzleminde sağlanmadığından sistemin altında mutlaka bir su yalıtımına ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca noktasal kenet ile tespitte modüller tek tek hizalanmak zorunda olunmasına rağmen onarım durumunda modüller birbirlerinden bağımsız sökülebilmektedir. Tasarım D'de yatay ve düşey raylar kullanılmış; yatay raylar düşey rayların üzerine yerleştirilmiştir. Modüller yatay rayların içerisine geçirilerek tespit edilmişlerdir. Modül birleşimlerinde yatay ve düşey raylara geçirilen lastik contalar kullanılmıştır. Bu tasarım seçeneğinde de çatı yüzü bindirmeli bir görüntüye sahiptir. Tasarım E'de ise yatay ve düşey raylar aynı düzlemde kullanılmıştır. Modüller lastik contalar ile raylara tespit edilirken; sızdırmazlık da bu contalar ile sağlanmaktadır. Böylelikle düz ve kapalı bir çatı yüzeyi elde edilir. Daha önce de bahsedildiği üzere lastik conta kullanımının dezavantajı onarım durumlarında bir modülü sökebilmek için tüm lastik contanın çıkarılmak zorunda olunmasıdır. Ayrıca Tasarım D ve E'de her iki yönde de ray kullanılması nedeniyle malzeme tüketimi fazladır.





Şekil 5: İstanbul örneği için fotovoltaik entegre eğik çatı sistemleri alternatifleri

## Sonuç

Türkiye’de enerji ihtiyacındaki artış, seragazı salınımı ve yüksek güneş enerjisi potansiyeli düşünüldüğünde binalarda enerji verimliliği yalnızca enerjinin korunumu açısından değil enerji üretimi açısından da ele alınmalıdır. Bina yüzeyleri sadece kabuk olarak değil, aynı zamanda enerji üreten jeneratörler olarak değerlendirilmelidir. Fotovoltaik ile enerji üretimi geleneksel enerji üretimlerine göre pahalı olsa da unutulmamalıdır ki, binalarda fotovoltaik sistemlerinin kullanılması ile işçilik ve malzemeden tasarruf edilecek ve maliyetler düşecektir. Bu nedenle binalarda fotovoltaik uygulamaları teşvik edilmelidir. Entegre sistemler, yapı malzemesinden tasarruf sağlanmasının yanı sıra sistemin parçalarının (kablolar vs.) hava etkilerinden korunması açısından da avantajlıdır. Dahası fotovoltaik’ler yapı malzemeleri ile karşılaştırıldığında oldukça uzun ömürleri (25-30 yıl) olduğu da görülmektedir. Öte yandan Türkiye’de BEFM uygulamaları için yeterli finansal destek sağlanamamaktadır. Kyoto protokolünü imzalanması ve yenilenebilir enerji kaynakları ile ilgili kanunların yürürlüğe girmesi ile teşviklerin artacağı beklenmektedir. Yetersiz bulunan tarife garantisinin (5,5 euro cent/kWh) artırılması ise kanun teklifleri ile Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı’na görüşülmektedir. Bu gelişmeler- çevresel katkıları dışında- enerjisinin %70’ini ithal etmek durumunda olan Türkiye için oldukça önemlidir. İlk olarak devlet yönetim binaları, okullar, müzeler, tren istasyonları, toplu konutlar gibi kamusal hizmet binalarına odaklanılmalı ve güneş enerjisi kullanım olanakları araştırılmalıdır. Fotovoltaik sistemler yapıların ilk tasarım aşamalarından itibaren projelere entegre edilerek, bu sistemler için en verimli yönlenme ve yüzey eğimleri düşünülerek tasarımlar gerçekleştirilmelidir. Bu gelişmeler sağlandığında mimarların fotovoltaik’lerin yapılarda kullanım alternatifleri konusunda özellikle yapısal tasarımıyla ilgili bilgilenmeleri ve doğru uygulamaları yapabilmeleri gereklidir. Bu sebeple bu çalışmada mimarlara fotovoltaik entegre edilmiş çatı sistemleri tasarımında yön göstererek bir model önerisi sunulmuş ve İstanbul’daki bir örnek üzerinden model uygulanmıştır. Tasarım alternatifleri malzeme kullanımı, görsel etki, işçilik, uygulama kolaylığı, uygulama hızı, uygulamada alet gerekliliği, uygulamada taşıma kolaylığı, havalandırma değeri, sökme kolaylığı, kir tutmama özelliği gibi pek çok tasarım girdisi ile değerlendirilmiştir. Böylelikle sadece alternatifler ortaya konulmamış; bu alternatifler arasından uygun tercih yapılabilmesi konusunda da yol gösterilmiştir. Model günümüzde kullanılan tespit sistemleri incelenerek oluşturulduğu için modeldeki alternatifler ve tasarım girdilerinden faydalanılarak gelecekte yeni sistemler tasarlanabilir. Fotovoltaik teknolojisindeki gelişmelere bağlı olarak da model güncellenebilir.

## Kaynaklar

- [1] Oğulata (2002) “Sectoral energy consumption in Turkey” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 6, Issue 5, Ekim 2002, pp 471-480.
- [2] Dünya Enerji Konseyi Türkiye Ulusal Komitesi (2007) “2005-2006 Türkiye Enerji Raporu” Ankara, ISSN: 1301-6318.
- [3] TMMOB Makina Mühendisleri Odası (2008) “Dünyada ve Türkiye’de Enerji Verimliliği Oda Raporu”.
- [4] Stark, T., Lutz, H.-P., Schneider, H. and Schneider, S. (2005). "Architektonische Integration von Photovoltaik-Anlagen." 29 Aralık 2009’da alındı:  
[http://www.wm.badenwuerttemberg.de/fm/1106/Architektonische%20Integration%20PV\\_Anlagen.pdf](http://www.wm.badenwuerttemberg.de/fm/1106/Architektonische%20Integration%20PV_Anlagen.pdf)
- [5] Pvdatabase (-) “Netherlands: Nieuwland 1 MW PV project” 29 Aralık 2009’da alındı:  
<http://www.pvdatabase.org/pdf/Nieuwland.pdf>