

MİMAR SİNAN GÜZEL SANATLAR ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MEVCUT BİNALARIN ENERJİ ETKİNLİĞİNİ ARTIRMADA ÜRETKEN
TASARIM İLE ÇATI YÜZEYİ OPTİMİZASYONU**



YÜKSEK LİSANS TEZİ

Burcu Ölçer

Enformatik Anabilim Dalı

Mimari ve Kentsel Enformatik Lisansüstü Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Salih OFLUOĞLU

TEMMUZ 2022

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

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

beyan ederim.





Anneme,



İÇİNDEKİLER

Sayfa

İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET	xv
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1 Çalışmanın Amacı ve Önemi	6
1.2 Hipotez	6
1.3 Varolan Çalışmalar.....	7
1.4 Araştırma Metodu	10
1.5 Tez Özeti	12
2. BİNALARDA ENERJİ KULLANIMI VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK.....	13
2.1 Enerji Türleri	13
2.1.1 Fosil Yakıtlar.....	14
2.1.2 Yenilenebilir Enerji	15
2.1.2.1 Güneş Enerjisi	18
2.2 Türkiye’de Enerji Kullanımı	21
2.2.1 Binalarda Enerji Kullanımı	23
2.3 Fotovoltaik Teknolojiler.....	24
2.3.1 Binaya Bütünleşmiş Fotovoltaik Sistemler.....	28
2.4 Binalarda Sürdürülebilirlik.....	29
2.4.1 Yeşil Bina.....	32
2.4.2 Yeşil Bina Sertifikasyonları	33
2.5 Bina Tasarımı ve İklim Değişikliği	35
3. BIM DESTEKLİ ÜRETKEN TASARIM.....	37
3.2 BIM	42
3.2.1 BIM Boyutları	43
3.2.2 Yeşil BIM.....	47
3.2.3 Bina Performans Analizleri.....	48
3.3 Optimizasyon	49
3.3.1 Tek ve Çok Amaçlı Optimizasyon Problemleri	51
3.3.2 Optimizasyon Yöntemleri	55
3.3.3 Optimizasyon Algoritmaları	56
3.3.3.1 Evrimsel Algoritma.....	57
3.3.3.2 Genetik Algoritma.....	58
3.3.3.3 Baskın Olmayan Sıralama Genetik Algoritması II (NSGA-II).....	61
3.4 Üretken Tasarım	61
3.4.1 Üretken Tasarım Çalışma Kriterleri.....	64
3.4.2 Üretken Tasarım Metodları	65

3.5 Üretken Tasarım ve BIM Entegrasyonu	68
3.6 Metin Tabanlı Programlama	69
3.7 Görsel Programlama	69
3.8 Hibrit Programlama	70
4. ÜRETKEN TASARIM İLE ÇATI YÜZEYİ OPTİMİZASYONU ÖNERİSİ	71
4.1 Çalışma Alanı ve Kullanılan Veri	74
4.2 Mevcut Durumun Modellenmesi ve Analizinin Gerçekleştirilmesi.....	77
4.3 Üretken Tasarım Çalışma Prensibi	81
4.3.1 Tasarım Değişkenlerinin ve Kısıtlamalarının Belirlenmesi	81
4.3.2 Simülasyon Aracının Seçilmesi ve Bir Temel Modelin Oluşturulması	82
4.3.3 Amaç İşlevlerin Seçimi	83
4.3.4 Optimizasyon Algoritmasının Seçimi	85
4.3.5 Optimizasyon Yakınsaması Elde Edilene Kadar Simülasyon Çalıştırma.	86
4.3.6 Verilerin Yorumlanması ve Sunulması	87
4.4 Üretken Tasarım Kısıtlayıcılarının Değiştirilmesi ile Optimizasyonların Tekrarı	88
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	91
KAYNAKLAR.....	98

KISALTMALAR

FV	: Fotovoltaik
CO₂	: Karbondioksit
m²	: Metrekare
kW	: Kilowatt
kWh	: Kilowatt saat
MW	: Megawatt
BBFV	: Binayla Bütünleşik Fotovoltaik
OSM	: Open Street Map
SHURA	: Enerji Dönüşüm Merkezi
ETKP	: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
UNECE	: Birleşmiş Milletler Avrupa Ekonomik Komisyonu
TEİAŞ	: Türkiye Elektrik İletim A.Ş.
EİGM	: Enerji İşleri Genel Müdürlüğü
BEreel	: Belçika Enerji Verimli Yaşam İçin Renovasyon Çalışması
YPK	: Yüksek Planlama Kurulu
API	: Uygulama Programlama Arayüzü
GA	: Genetik Algoritma
NSGA II	: Baskın Olmayan Genetik Algoritması II
UNFCC	: Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1 : Çalışma Alanı Bina Bilgileri	75
Çizelge 4.2 : Eğim Parametresi Artış Miktarının Değiştirilerek Optimizasyon Gerçekleştirilmesi (Eğim aralıkları %10-45).	89
Çizelge 4.3 : Eğim Parametresi Artış Miktarının Değiştirilerek Optimizasyon Gerçekleştirilmesi (Eğim Aralıkları %33-45).	90



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : İklim Krizi ile mücadelede yıllara göre karbon emisyonu azaltımında hedeflenen oranlar.....	5
Şekil 1.2 : Çalışmanın ana kurgusu.	11
Şekil 2.1 : Güneş Radyasyon Haritası (EİGM, 2022).	20
Şekil 2.2 : Türkiye Güneş Enerjisi Politikaları (WorldBank, 2018).	22
Şekil 2.3 : Fotovoltaiklerin çalışma prensibi (Eiffert & Kiss, 2000).....	25
Şekil 2.4 : Şebeke bağlantılı FV sistem çalışma prensibi (Solar One, 2021).	27
Şekil 2.5 : BBFV kategorileri (International Energy Agency Photovoltaic Power System Programme, 2019).....	29
Şekil 2.6 : Yeşil Bina Tasarımı Ana Unsurları.	32
Şekil 2.7 : İyi geliştirilmiş (sağda) ve keşfedilmemiş (solda) alanları gösteren binalar ve iklim değişikliği araştırmalarındaki başlıca konular.	36
Şekil 3.1 : Parametrik Tasarım Çalışma Prensibi	41
Şekil 3.2 : BIM boyutları.	44
Şekil 3.3 : Bina performans çalışmalarında simülasyon tabanlı optimizasyona uygulanan döngü.	51
Şekil 3.4 : Optimizasyon tekniklerinin türleri ve hedeflenen çözümler.	53
Şekil 3.5 : Pareto kümesinden en iyi çözümün seçilmesi (ütopya noktasına en yakın)	54
Şekil 3.6 : Optimizasyon Yöntemlerinin Sınıflandırılması (Reddya & Kumar, 2020).	55
Şekil 3.7 : Farklı optimizasyon algoritmalarının kullanım sıklığı, Elsevier'in SciVerse Scopus tarafından verilen 200'den fazla bina optimizasyon çalışmasından elde edilmiştir.	56
Şekil 3.8 : Genetik Algoritmaların varsayılan kodları (Reddya & Kumar, 2020).....	59
Şekil 3.9 : Üretken Tasarım- Tasarımcı ilişkisi	62
Şekil 3.10 : Üretken Tasarım çalışma prensibi.	63
Şekil 3.11 : Optimize Etme Metodu Çalışma Prensibi.	66
Şekil 3.12 : Rastgale Metodu Çalışma Prensibi.....	67
Şekil 3.13 : Çapraz Çarpım Metodu Çalışma Prensibi.	67
Şekil 3.14 : Bunun Gibi Metodu Çalışma Prensibi.	68
Şekil 4.1 : Çalışmanın ana kıstasları.....	72
Şekil 4.2 : Çalışmada kullanılan programlar.	74
Şekil 4.3 : Çalışma alanı.	75
Şekil 4.4 : OSM web sayfası, veri girişi.	77
Şekil 4.5 : OSM bina verisinin Dynamo ile okunması.	78

Şekil 4.6 : OSM ağaç verisinin Dynamo ile Revit modeline dönüştürülmesi.	78
Şekil 4.7 : Dynamo içinde hava durumu verisi oluşturma.....	79
Şekil 4.8 : Mevcut çatı tasarımları ile yapılan Güneş Radyasyonu sonuçları.....	80
Şekil 4.9 : Yıllık Elektrik Enerjisi Üretiminin hesaplanması.	80
Şekil 4.10 : Çatı yüzeyleri için eğim aralıklarının belirlenmesi.	83
Şekil 4.11 : Girdilerin tanımlanması.....	84
Şekil 4.12 : Bina 1 çatı modeli için yapılan parametrik kodlama düğümleri.	85
Şekil 4.13 : Dynamo kodu ve Üretken Tasarım ara yüzü.	86
Şekil 4.14 : Üretken Tasarım optimizasyonu sırasında oluşan tasarımlar.....	87
Şekil 4.15 : Çatı Yüzey Eğimlerinin Farklı Aralıklar ile Değiştirilmesini Sağlayan Dynamo Modülü.	89



MEVCUT BİNALARIN ENERJİ ETKİNLİĞİNİ ARTIRMADA ÜRETKEN TASARIM İLE ÇATI YÜZEYİ OPTİMİZASYONU

ÖZET

Sanayi devriminden sonra, hızla artan fosil tabanlı enerji kullanımının sonucu olarak, günümüzde, İklim Krizi ile mücadele edilmektedir. Fosil yakıtların kullanılması ile oluşan sera gazları Dünya'ya ulaşan güneş ışınlarının yerkürede hapsolmasına neden olmakta; bu da yerkürenin ısınmasına yol açmaktadır. Yapılan bilimsel araştırmalar yerkürede süregelen enerji kullanımı alışkanlıklarımızın devam etmesi halinde çok yakın bir gelecekte Dünya'nın daha fazla ısınacağını, buna bağlı olarak olağandışı hava olaylarının çok daha fazla görüleceğini, bunların göçe, kıtlığa, kuraklığa, sellere neden olabileceği yönündedir. İklim değişikliğinin etkilerini azaltabilmek için yapılması gerekli en önemli adım, sera gazı emisyonlarını azaltmaktır. Bunun için enerji ihtiyacını karşılamak için kullanılan fosil yakıtların, sera gazı oluşturmeyen ve sürdürülebilir enerji kaynakları ile değiştirilmesi gereklidir.

Mevcut bina stokunun işletim aşamasında kullandığı enerji, Dünya'da tüketilen nihai enerjinin büyük bir bölümünü oluşturmaktadır. Bu nedenle binalarda kullanılan enerji türünün sürdürülebilir ve düşük karbon emisyonlu yeni sistemler ile değiştirilmesi; iklim değişikliğinin etkilerini azaltmak için önemli bir adım olarak görülmektedir. Bunun için önerilen çalışma, mevcut yapıların enerji ihtiyaçlarını kendi ekosistemi içinde karşılayacak, doğaya zararlı gaz salınımında bulunmayan çözümlerdir. Türkiye'nin bulunduğu coğrafi konum ve buna bağlı olarak güneşlenme süreleri dikkate alındığında önerilebilecek çözümlerden birisi; yapıların çatılarında kullanılacak fotovoltaik paneller ile yapının kendi enerji ihtiyacını karşılamasıdır. Ancak mevcut binaların çatı çözümleri güneş enerjisinden maksimum düzeyde yararlanmak için tasarlanmamıştır. Bu nedenle bu tez çalışmasında mevcut binaların enerji etkin binaya dönüşümünde çatı tadilatlarının yapılmasının gerekliliği vurgulanmakta ve bu tadilatların yapımına başlanmadan önce güneş enerjisi potansiyelinden maksimum düzeyde yararlanabilmek için tasarlanabilecek çatı alternatiflerinin Üretken Tasarım metodu ile gerçekleştirilmesinin öneminden bahsedilmektedir. Üretken Tasarım, BIM araçları ile kullanılabilen görece yeni bir hesaplamalı tasarım yöntemidir ve tekrarlanan karmaşık süreçleri otomatikleştirerek geleneksel yöntemlerle yapılması uzun zaman gerektiren adımları kısa sürede gerçekleştirir. Parametrik olarak modellenen çatı yüzeylerinin, belirlenen kısıtlayıcılar ve hedef çıktı doğrultusunda, Üretken Tasarım metodu ile tasarım alternatiflerinin oluşturulması ve amaçlanan hedefe en yakın tasarım alternatifinin bulunması amaçlanmıştır. Bu çalışma, mevcut yapı stokunun enerji etkin binalara dönüşümünde yer alacak proje paydaşlarının kullanacağı ön görülerek gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: İklim Krizi, Sürdürülebilirlik, Yüksek Performanslı Bina, Üretken Tasarım, Güneş Enerjisi.



ROOF SURFACE OPTIMIZATION WITH GENERATIVE DESIGN TO ENHANCE THE ENERGY EFFICIENCY OF EXISTING BUILDINGS

SUMMARY

As a result of the rapidly increasing use of fossil-based energy after the industrial revolution, today the Climate Crisis is being battled. Greenhouse gases produced by the use of fossil fuels cause the sun's rays to reach the Earth to be trapped in the Earth's atmosphere, which leads to the warming of the Earth. Scientific studies show that if our current habits of energy use continue, the Earth will warm up more in the very near future, which will lead to more unusual weather events, which may cause migration, famine, drought, and floods. The most important step to mitigate the effects of climate change is to reduce greenhouse gas emissions. For this purpose, fossil fuels used to meet energy needs should be replaced with sustainable energy sources that do not generate greenhouse gases.

The energy used by the existing building stock during the operational phase constitutes a large portion of the final energy consumed in the world. Therefore, replacing the type of energy used in buildings with new sustainable and low carbon emission systems is seen as an important step to reduce the impacts of climate change. For this purpose, the proposed study provides solutions that will meet the energy needs of existing buildings within their own ecosystem and do not emit harmful gases to nature. Considering the geographical location of Turkey and the sunshine hours, one of the solutions that can be proposed is to meet the energy needs of the building with photovoltaic panels to be used on the roofs of the buildings. However, the roof solutions of existing buildings are not designed to utilize solar energy at the maximum level. For this reason, this thesis emphasizes the necessity of roof renovations in the transformation of existing buildings into energy-efficient buildings and mentions the importance of realizing the roof alternatives that can be designed to make maximum use of solar energy potential with the Generative Design method before starting the construction of these renovations. Generative Design is a relatively new computational design method that can be used with BIM tools and automates repetitive complex processes and performs steps that require a long time to be done with traditional methods in a short time. It is aimed to create design alternatives of parametrically modeled roof surfaces in line with the specified constraints and target output by using the Generative Design method and to find the closest design alternative to the intended target. This study was carried out in anticipation of the project stakeholders who will be involved in the transformation of the existing building stock into energy-efficient buildings.

Keywords: Climate Crisis, Sustainability, High Performance Building, Generative Design, Solar Energy.



1. GİRİŞ

Mevcut durumdaki artış hızları devam ederse, 21. Yüzyılın sonunda dünya nüfusunun muhtemelen ikiye katlanacağı, küresel enerji ihtiyacının ise enerji etkinliği yönünden yapılan ilerlemelere rağmen büyük olasılıkla iki ile dört kat artacağı öngörülmektedir. Mevcut tüketim seviyelerinde bile, mevcut enerji sistemlerinin insan sağlığı ve doğal çevre üzerinde birçok zararlı etkisi vardır. Özellikle, fosil yakıt yakma yoluyla salınan karbondioksit ve diğer sera gazları, dünyanın ikliminde benzeri görülmemiş değişikliklere neden olma tehdidinde bulunmakta ve bu da çoğunlukla olumsuz etkilerle sonuçlanmaktadır. İklim değişikliğinin etkilerinin hafifletilmesi için uzun vadede Dünya'nın düşük veya sıfır karbonlu enerji kaynaklarına geçmesi gerekeceği konusunda geniş bir fikir birliği bulunmaktadır (Boyle, Everett, & Ramage, 2003).

Birleşmiş Milletler Hükümetler arası İklim Panelinin (IPCC) 2018 Ekim ayında yayınladığı raporda küresel ısınmada 2°C derecelik bir artışın meydana gelmesi sonucunda, gezegenin 5'te biri ile 12'de biri arası bir büyüklükte yeşil alanın çölleşmesi, mercanların %99'unun yok olması, 450 milyon insanın yüksek sıcaklıkların etkisi altında kalması, yüz milyonlarcasının iklim değişikliğine bağlı olarak yoksulluk sınırının altına düşmesi anlamına geldiği belirtilmektedir. Küresel ısınmanın kontrol altına alınamaması durumunda, deniz seviyesindeki yükselmenin tarım alanlarını ve su kaynaklarını kirletmesine bağlı olarak gıda ve su kıtlığı krizlerinde artma görülmesi ve çölleşen toprak miktarında artış olacağı öngörülmektedir. Ortaya çıkacak bu sonuçlar sonrası, kaynak savaşlarının sıklaşması, açlıktan ve savaşlardan kaçan göçmen nüfusun, Avrupa ve ABD gibi ülkelerin siyasi dengelerini etkileme riskini de beraberinde getirmektedir (IPCC, 2018).

Küresel ısınmaya neden olan faktörlerin başında sera gazları gelmektedir. Yerküre Güneş'ten gelen ışınlardan çok, bu ışınların uzaya geri yansımaları engelleyen sera gazları nedeniyle ısınmaktadır. Dünya genelinde salınan ve küresel ısınmaya neden olan sera gazlarının başlıcaları arasında Karbondioksit (CO₂), su buharı, Ozon (O₃), Metan (CH₄) gelmektedir. Doğal yollarla ortaya çıkan sera gazlarındaki oranının fazla olmamasına rağmen insan faaliyetleri sonucu ortaya çıkan miktardan dolayı

karbondioksit iklim krizini önlemek için salınımının azaltılması gereken gaz olarak ortaya çıkmaktadır. İnsan faaliyetleri sonucunda ortaya çıkan ve önlenabilir karbon miktarı ile ilgili 2005 yılında yürürlüğe giren Kyoto Protokolü ile taraf ülkeler karbon emisyonlarını azaltmayı beyan etmişler ancak protokolün geçerlilik süresinin sonunda hedeflenen değerlere ulaşamamıştır. Protokolün yürürlük tarihi sonlandığı için, 2015 yılında Kyoto'nun devamı olarak Paris Antlaşması imzalanmıştır, bu antlaşma ile küresel sıcaklık artışını 1.5°C ile sınırlandırmak hedeflenmiştir.

Dünya'nın Paris Anlaşması'nın hedeflerine ulaşma yolunda ilerleyebilmesi için, enerji kaynaklı CO₂ emisyonlarının bugünden 2050 yılına kadar yılda yaklaşık %3,5 oranında düşürülmeli ve bu tarihten sonra da azaltılmaya devam edilmelidir. Giderek daha fazla elektrikle çalışan ulaşım ve ısıtmaya yönelik uygulamalar, yenilenebilir enerji üretimindeki artışlarla birleştirildiğinde, 2050 yılına kadar ihtiyaç duyulan enerji kaynaklı CO₂ emisyonu düşüşlerinin yaklaşık %60'ını sağlayacaktır. Yenilenebilir enerjilerin doğrudan kullanımından kaynaklanan ilave düşüşler dikkate alınırsa, bu pay %75'e, enerji verimliliği de eklendiğinde %90'ın üzerine çıkmaktadır (IRENA, 2019a).

Avrupa Birliği'nin 2050 düşük karbonlu yol haritasında, 2030 yılı için hedeflenen 1990 yılı karbon salınımına oranla karbon emisyonunun %40, 2050 yılında ise %80 oranında azaltmak vardır. Tüm ekonomik sektörlerde emisyonla mücadele eden geniş bir Avrupa Birliği (AB) politikaları vardır ve bunlar sürekli olarak gelişmekte ve ek politikalar ile desteklenmektedirler. Temel AB iklim politikalarından biri de binalarda ve cihazlarda enerji verimliliğini arttırmaya yönelik Binalarda Enerji Performansı ve EkoTasarım yönetmeliğidir (EuropeanCommission, 2018).

IPCC'nin 2013 yılında yayımladığı raporda küresel ısınmaya yol açan karbon emisyonu dağılımında en büyük etki %25 ile elektrik ve ısı üretiminde görülmektedir. Binaların işletme aşamasında kullandıkları son enerji tüketiminin neden olduğu toplam küresel sera gazı emisyonlarının oranı ise %30 ile %40 aralığındadır (Rode, Burdett, & Gonçalves, 2011). Bu nedenle mevcut yapı stokunun kullandığı fosil yakıtlı ısıtma-aydınlatma seçeneklerinin değiştirilmesi önemli görülmektedir. Almanya gibi endüstrileşmiş ülkelerde mevcut yapıların tadilatları sırasında tüketilen enerji miktarını azaltmanın büyük bir potansiyele sahip olduğu bilinmektedir (Achtnicht & Madlener, 2014).

World Resources Institute için Becqué ve arkadaşlarının yaptığı çalışmaya göre, Paris Anlaşmasının hedeflerini tutturmak için 2050 yılına kadar tüm binaların net sıfır karbon salınımı yapması gerekmektedir ve günümüzde sıfır karbon yönetmeliğini sağlayan binaların oranı %1'in altında kalmaktadır. Bu hedefi tutturmak için binalarda alınması gereken en önemli ve kolay yol enerji kullanımını değiştirmektir (Becqué, et al., 2019). Enerji tüketiminin iyileştirilmesi için yapılarda fiziksel ya da operasyonel değişikliklerle kullanılan donanımların değiştirilmesi ve kullanıcıların enerji tüketimini azaltmak için bilinçlendirilmesi de önemli bir yer tutmaktadır (Jafari & Valentin, 2017)

Türkiye, Paris Anlaşmasına taraf olmamakla birlikte, Niyet Edilen Ulusal Katkı Beyanını 30 Eylül 2015'te iletmıştır. Buna göre, sera gazı emisyonlarının 2030 yılında referans senaryoya göre artıştan %21 oranına kadar azaltılması öngörülmüştür. "Paris Anlaşmasının Onaylanmasının Uygun Bulunduğuna Dair Kanun Teklifi" TBMM'den geçerek yasalaştı ve kanun 7 Ekim 2021 tarihinde resmi gazetede yayımlandı.

Avrupa Komisyonunun 2018'de paylaştığı bilgilere göre şu an mevcut olan yapı stokunun %80'i 2050'de de var olmaya devam edecektir. Bu nedenle komisyon Avrupa'daki nihai enerji tüketiminin %40'ından sorumlu olan binalar için çözüm önerileri sunmuştur. Bu çözümler arasında ısıtma için enerji kullanımını azaltmayı sağlayacak iyi bina yalıtımlarının yapılması gerekliliğinden bahsedilmiştir ve bunun de-karbonizasyonda kilit bir rol oynayacağı vurgulanmıştır. Kalan enerji ihtiyacının karşılanması için ise yerel ve yenilenebilir (güneş enerjisi, yenilenebilir gaz, biogaz, hidrojen vb.) enerji kaynaklarının teşvik edilmektedir.

Amerika, İngiltere ve Avustralya gibi gelişmiş ülkelerde mevcut yapıların enerji verimliliğini arttırmak için çeşitli girişimlerde bulunulmuştur. Bu girişimler arasında şartnameler, finansal ve teknik destekler yer almaktadır (Akande & Olagunju, 2016).

Londra Planı Yenilenebilir Enerji Politikası; İl ve ilçe belediyeleri, yenilenebilir enerji üretimi ile binalarda %20 CO₂ emisyon azaltımını; konutlar için ise (Sürdürülebilir Konutlar Yönetmeliği'nin Kasım 2010 hedeflerine göre) %25 CO₂ emisyon azaltımının gerçekleştirilmesi gerektiğini belirtmektedir (LondonPlan, 2011).

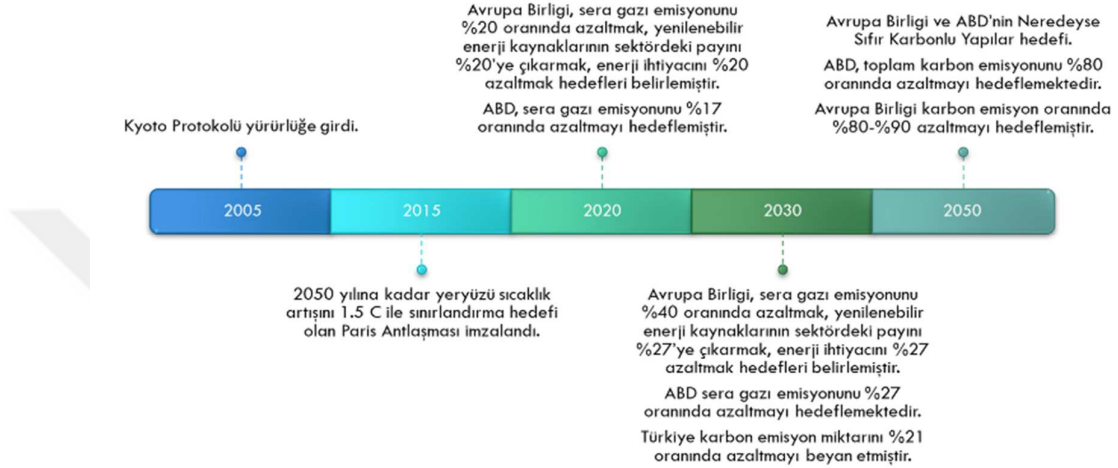
Avrupa'nın bina stokunun enerji performansının iyileştirilmesi, yalnızca AB'nin 2020 ve 2030 hedeflerine ulaşmak için değil, aynı zamanda düşük karbonlu ekonomi yol haritası 2050'de belirtilen daha uzun vadeli iklim hedeflerine ulaşmak için de çok

önemlidir. 2050 hedefi olan Neredeyse Sıfır Karbonlu Binalara (NZEB) giden yol, Avrupa'da mevcut yıllık %1 ile %1,5 arasında olan bina yenileme oranının üç katına çıkmasını gerektirmektedir. NZEB, birincil enerji ihtiyacı çok az olan enerji performansı yüksek binaları tanımlamak için kullanılmaktadır. Bu yapılar ihtiyaçları olan düşük orandaki enerjiyi de ya kendi yapı sistemleri içinde ya da yakın çevresinde bulunan sürdürülebilir enerji kaynaklarından karşılayan yapılardır (Corti, Bonomo, Frontini, Macé, & Bosch, 2020) Yeşil altyapıların binalarda (yeşil teraslar, çatılar veya duvarlar gibi) entegrasyonu, kentsel çevrenin koşullarını iyileştirebilir. Çatılar, binalarda enerji verimliliğini arttırmak ve dayanıklılığı arttırmak için çok önemli yapı bileşenleridir. Mevcut yapıların enerji verimli hale getirilmesi Avrupa'daki toplam enerji ihtiyacını %5 ile %6 oranında azaltacağı ve salınan karbonun da %5 oranında azaltacağı öngörülmektedir. Derin tadilatların mutlaka zahmetli ve zaman alıcı olması gerekmemektedir. LIFE CONIPHER projesi tarafından test edilen "tak ve çalıştır" paneller, konut stokunun enerji verimliliğini ve esnekliğini arttıran yüksek performanslı bir yalıtımlı fotovoltaik kabuk sağlamaktadır. %85 geri dönüştürülmüş malzemeden üretilen panellerin, aynı zamanda bina kabuğuna FV sistemlerinin entegrasyonu sayesinde birincil enerji kullanımını %60 ve sera gazı emisyonlarını %75 azaltması beklenmektedir (BEreel, 2019).

Amerika'da ise Architecture 2030 tarafından hazırlanan 2050 için Yol Haritası raporunda, 2050 hedefine ulaşmak için mevcut yapı stokunun yıllık %2-%3'lük kısmının yenilenmesi gerektiği belirtilmiştir. Bu yenileme yaklaşımı ile yüksek performanslı bina özelliği kazanacak yapıların yıllık enerji ihtiyaçlarının %50 oranında azaltılması beklenmektedir (Architecture2030, 2014). 2019 yılında New York belediyesi ise, 2030 yılına kadar 1 gigawatt güneş enerjisi taahhüdünde bulunmuştur. Bu hedefe ulaşabilmek için özel mülklerin katkısının gerekli olduğu görülmüş ve 2019 tarihli 92 ve 94 sayılı Yerel Kanunlar, tüm yeni çatılarda güneş enerjisi ya da yeşil çatıları zorunlu kılmıştır (Solar One, 2021).

Kanada'da inşaat sektörünün karbonsuzlaşması yolundaki çalışmalara destek olmak için, Yeşil Bina Hibe Programı 2004 yılında Kanada Kent Enstitüsü ve British Columbia Gayrimenkul Vakfı ile ortaklaşa başlatılmıştır. Bu program, mevcut binalarda büyük çaplı yenileme veya güçlendirme gerektiren projeleri finanse etmek, sürdürülebilir bina geliştirme ve uygulamasını ilerletmek için mevzuat değişiklikleri sağlamak ve pratik sürdürülebilir bina stratejilerinin anlaşılmasını ve kullanımını

artırmak için eğitim programları sağlamak için hibe sunmaktadır (CanadianUrbanInstitute, 2008). Şekil 1.1’de 2005’ten bu yana yürürlüğe giren karbonsuzlaşma yol haritalarının bir özeti gösterilmiştir. 2050 için dünyanın büyük bir bölümünün hedefi neredeyse sıfır karbon hedefi iken, bu konuda Türkiye’nin şu an için bir stratejik planı görünmemektedir.



Şekil 1.1 : İklim Krizi ile mücadelede yıllara göre karbon emisyonu azaltımında hedeflenen oranlar.

Avrupa birliği ülkeleri enerji ihtiyaçlarını karşılamak üzere değiştirdikleri ham madde türü ile salınan karbon emisyonlarını azaltmaya başlamışlardır. Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC)'nin İnternet sitesinden alınan verilere göre Türkiye Paris Antlaşmasına taraf ülkeler arasında 1990 yılından 2018 yılına kadar olan karbon emisyonu miktarındaki %160,63 artış oranı ile en yüksek seviyede karbon emisyonu artışına sahip ülke konumundadır (UN, Time Series - Annex I, 2021). Bu oran çoğu taraf ülkede azalış olarak görülmektedir. Türkiye’de «Enerji Verimliliği Strateji Belgesinde 2012-2023» kapsamında 2010 yılındaki yapı stokunun en az dörtte birinin (1/4) 2023 yılına kadar sürdürülebilir yapı haline getirilmesine ve toplu konutlarda yerinden üretim uygulamalarının yaygınlaştırılmasına yönelik stratejik amaçlar tanımlanmıştır (YPK, 2012). Bu hedeflere ulaşılabilmesi için Avrupa ve Amerika başta olmak üzere, Dünya genelinde binaların işletim aşamasında salınan karbon miktarının neredeyse sıfır düzeyine çekilmesi adına, önemli adımlardan biri olarak görülen, çatıların elektrik enerjisi üretmek için fotovoltaik panellerle kaplanması ya da kentsel ısı ada etkisini azaltmak için yeşil çatı çözümleri ile desteklenmesi gibi çözümlerin ülkemizde de uygulamaya alınması ve teşviki gerekmektedir. Türkiye bulunduğu coğrafi konum dolayısıyla,

güneş enerjisinden yararlanma konusunda avantajlı bir durumdadır. Binaların çatılarında kullanılacak fotovoltaik sistemler ile şebeke enerjisine duyulan ihtiyaç azaltabilir veya ortadan kaldırabilir.

1.1 Çalışmanın Amacı ve Önemi

Bu çalışmada, mevcut yapı stokunun talep ettiği enerji miktarını azaltmak, kullanılan enerji kaynağı çeşidini değiştirerek salınan karbon emisyon değerini düşürmek amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, Türkiye'nin bulunduğu coğrafi konum ve buna bağlı olarak güneşlenme süreleri dikkate alındığında önerilebilecek çözümlerden birisi yapıların çatılarında kullanılacak fotovoltaik paneller ile yapının kendi enerji ihtiyacını karşılamasıdır. Mimari ve kentsel estetik değerler göz önüne alınarak klasik FV panellerin uygulanması yerine Binaya Entegre Fotovoltaik Paneller (BBFV) ile yapılacak çözümler üretilmesi hedeflenmiştir. Bunun yanı sıra bina cephelerinde yapılacak yalıtım iyileştirmesinin de önemli bir role sahip olacağı düşünülmektedir. Mevcut yapı stokundaki çatılarda kullanılması öngörülen fotovoltaik panellerin, bulunduğu konum, çevre binaların gölge etkisi gibi çevresel koşullara bağlı olarak değişen verimliliğini artırmak için çatılarda tadilata gidilmesi ve yeni yapılacak çatı tasarımlarının bulunduğu ilin imar koşullarını göz önünde tutarak, maksimum güneşlenme süresini elde edecek tasarımların uygulanması, buna bağlı olarak binalarda ısı ve aydınlatmada kullanılan enerji kaynağının değiştirilmesi ve ortaya çıkan karbon emisyon miktarını azaltmak amaçlamaktadır. Çalışma, Türkiye'deki yapıların yaklaşık %87'sini (Kabakçı, 2019) oluşturan konutların yenilenmesi durumunda elde edilecek CO₂ emisyon miktarındaki azalışı tespit etmek amacı ile bir yapı adası üzerindeki çatıların dönüşümü üzerinden gerçekleştirilmiştir.

1.2 Hipotez

Güneşlenme süresi dikkate alınarak geleneksel yöntemlerle yapılacak yeni çatı tasarımlarının kısıtlı alternatif seçenekleri içinde kalması ve hesaplamalar için harcanacak sürenin uzunluğu göz önüne alındığında bu süreçlerin otomatikleştirilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle BIM altyapısı ile, parametrik tasarım ve üretken tasarım kullanarak oluşturulabilecek çatı alternatifleri için maksimum güneş radyasyonuna sahip olan çözümü bulmak adına optimizasyon algoritmalarının kullanılması, Türkiye'nin 2030 karbon emisyon azaltımı hedeflerine ulaşabilmesi için

mevcut yapılardaki iyileştirmenin hızlı ve verimli şekilde yapılmasına olanak sağlayacaktır.

1.3 Varolan Çalışmalar

Mevcut yapı stokunun enerji verimli hale dönüştürülmesi için BIM tabanlı programlardan yararlanılarak yapılan birçok çalışma yer almaktadır. Bunlardan biri Gabr ve Mekawy tarafından yapılan mevcut bina cephelerine şeffaf güneş panellerinin entegrasyonunun BIM tabanlı analizi ve değerlendirilmesi çalışmasıdır. Araştırma, iki farklı FV panel alternatifinin (Kristalli Silikon ve Amorf Silikon) ideal yerleşimi, konfigürasyonu ve cephedeki farklı oranlarda kullanım yüzdesine bağlı olarak yıllık optimum enerji kazançlarını belirlemek için bir iş akışının ana hatlarını çizmeyi amaçlamaktadır. Çalışmada Autodesk Revit ve Dynamo, modelleme, analiz ve optimizasyonda kullanılmıştır. Araştırma sonuçlarına göre en iyi senaryoda binanın estetik değerinden herhangi bir şey kaybetmeden, mevcut cam cepheler yerine yarı transparan FV panellerin kullanılması halinde binada tüketilen enerjinin %9.4'lük kısmı cephede kullanılması öngörülen paneller tarafından üretilabilmektedir (Gabr & Mekawy, 2017).

Esfahani ve diğerleri, yıl boyunca elde edilebilecek güneş enerjisini maksimuma çıkarmayı sağlayacak optimum çatı tasarımını bulmayı hedefledikleri bir çalışma yapmışlardır. Bu hedefe ulaşmak için analitik modelleme, sayısal simülasyon ve evrimsel algoritma yöntemlerinin bir kombinasyonu seçilmiştir. Çalışma güney yarım küre için geleneksel yaklaşımın aksine 25 derece eğim açısına sahip çatı tasarımlarının daha fazla güneş enerjisi elde edebileceğini ortaya koymuştur. Ayrıca tek eğimli çatı tasarımının baz çalışmaya göre %15.7 daha fazla solar radyasyon ürettiğini bulmuşlardır (Esfahani, ve diğerleri, 2021).

Avrupa Birliği tarafından finanse edilen PVSITES projesi, cam cepheler, pencereler, çatılar gibi geleneksel yapı bileşenlerinin yerini alabilecek yeni nesil güneş panelleri geliştirmektedir. Binaya bütünleşik güneş panellerinin yanı sıra, bina enerji yönetim sistemleri ve mimarların yeni güneş panellerini tasarımlarına daha iyi entegre etmelerine yardımcı olacak tasarım yazılımları geliştirmektedir. Projenin amacı, etkili enerji üretiminin gerçekleştiği, uygun maliyetli yapı çözümlerinin kullanılmasıdır (IRENA, 2019b). Projenin CO₂ emisyonu için hedefi ise, 2020-2024 yılları arasında 1.263 MW'lık ek kurulu güç sağlayarak, 156.500 konutun elektrik talebini karşılamak

ve toplamda %6.6 oranında CO₂ emisyonunda azalma gerçekleştirmektedir (PVSITES, 2022). Kurumun çalışmanın etkilerini görmek için yapmış olduğu saha çalışmalarından birisi, Belçika’da 2015-2016 yılları arasında enerji etkin tasarım kriterleri baz alınarak inşa edilen bir müstakil konut projesinin mevcut çatı kaplamalarının sökülerek fotovoltaik paneller ile değiştirilmesi işidir. Mevcut çatı kaplamasının sökülmesi 3 işçi ile 2 günde tamamlanmış, güneş panellerinin kurulumu ise takip eden 6 gün içinde bitirilmiştir. Bina, ev sahibi tarafından kullanılmakta ve elektrik tüketimi, oda sıcaklığı ve bağıl nem açısından izlenmektedir. Yapının 99.6 m²’lik çatı alanına 8.2 kWp gücünde güneş panelleri yerleştirilmiştir (PVSITES, 2022).

Urfan, 2018’de yayınladığı yüksek lisans tezi çalışmasında Kadıköy-Fikirtepe kentsel dönüşüm alanında bulunan bir ofis yapısının binaya entegre fotovoltaik sistemler ile kurgulanması üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışma kapsamında güneş enerjisi potansiyellerini hesaplamak için ilk olarak ArcGIS programı ile eğim, yükselti ve bakı analizleri yapılmıştır. Bu çalışma ile yapının uygun yönelimle araziye yerleştirilmesi sağlanmıştır. Seçilen alan için aylık güneş ışınları geliş açıları Andrew Marsh web uygulama aracı ile elde edilmiş, bu veriler sayesinde optimum aylık panel eğimleri hesaplanmıştır. Ancak aylar bazında bulunan eğim açılarındaki yüksek orandaki farklar nedeni ile yıllık optimum panel açısını hesaplamak için PVGIS web uygulamasından yararlanılmıştır ve çatıda uygulanacak paneller için optimum açı 31 derece olarak hesaplanmıştır. Yapının güney cephesinde 1232 m² lik alanda kullanılmak üzere Thin-Film PV panel çeşidi tercih edilmiş, 953 m²’lik çatı alanında kullanılmak üzere seçilen panel türü ise Kristal Silikon’dur. CM SAF web uygulamaları ile bu iki panel çeşidi için yıllık enerji üretim değerleri elde edilmiş ve yapının yıllık enerji tüketimine oranı hesaplanmıştır. Bu hesaplama göre yapının güney cephesinde ve çatıda kullanılacak olan fotovoltaik paneller ile yapının enerji ihtiyacının %75’e yakınının güneş enerjisi ile karşılanabileceği ortaya konulmuştur (Urfan, 2018).

Güneş enerjisi hesaplama uygulamaları için çeşitli yönlerdeki yüzeylere gelen güneş radyasyonunun aylık ortalama değerleri gereklidir. Yatay bir yüzeye gelen günlük güneş radyasyonunun aylık ortalamaları birçok yer için mevcuttur. Ancak, eğik yüzeyler üzerindeki radyasyon verileri genellikle mevcut değildir. Doğrudan ekvatora bakan yüzeyler için basit bir yöntem daha önce yapılan bir çalışmada ortaya

konulmuştur (Liu & Jordan, 1961). Bakırcı bu yöntemi kullanarak Türkiye’de bulunan sekiz ana bölge için, eğim açısı 0 ile 90 derece aralığında 1 derecelik değişimlerle eğimli yüzeylere gelen radyasyon değerlerini hesaplayarak günlük toplam güneş radyasyonunun maksimum olduğu eğim açıları aranarak hesaplama yapılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucu tüm yıl için güney cepheye bakan yüzeyler için optimum eğim açı aralığının aylar bazında 0° ile 65° arasında değiştiği gözlenmiştir. 0°’de maksimum radyasyon sağlanan zaman dilimi haziran ayı, 65°’de maksimum radyasyon sağlanan zaman dilimi ise aralık ayı olarak bulunmuştur. Yıllık ortalama maksimum radyasyon değerlerinin sağlanması için optimum eğim açılarının 8 farklı il için 31.2° ile 34.3° olduğu yapılan matematiksel optimizasyon formülü ile tespit edilmiştir. Bu çalışmaya göre İstanbul için güney cepheye bakan yüzeyler için yıllık maksimum güneş radyasyon değeri 32.6°’lik açı ile sağlanmaktadır (Bakırcı, 2012).

BBFV sistemi, açık alanların bulunmadığı ve çok sayıda yüksek binanın yer aldığı alanlar için en uygun güneş enerjisi sistemi olarak kabul edilmektedir. Mimari planlama ve tasarımın ilk aşamalarına yansıtılması gereken BBFV sistem kurulumunun uygunluğunu belirlemek, uzmanlık bilgisinden yoksun mimarlar ve inşaatçılar için zordur, çünkü sistem performansı, modül türüne, kurulum türüne ve kurulum koşullarına göre önemli ölçüde farklılık gösterir. Bunun için bir çözüm, BBFV sistemlerini, mimarın sezgilerinden ziyade tasarım kriterleri aracılığıyla programlama yoluyla uygulamanın mümkün olduğu bina bilgi modellemesi (BIM) ile birleştirmektir. Bu amaç doğrultusunda Kim ve diğ. yukarıdaki kriterlere dayalı olarak sistem uygunluğunu doğru bir şekilde belirleyerek yaratıcı bir şekilde optimum BBFV tasarım alternatifleri üretebilen mimarlara yönelik bir BIM tabanlı tasarım ortamı oluşturmuşlardır. Çalışmada Autodesk ürünü olan Revit Yazılım Geliştirme Kiti (SDK) kullanılmış ve Revit API’de eklenti olarak tasarlanmıştır. Tasarımcılar çalışacakları yüzey alanı seçtikten sonra gölgeleme yapabilecek çevre bina yüzeyleri de eklenti sayesinde seçilebilmektedir. Güneşin belirlenen lokasyona geliş açısına göre hesaplama yapılmaktadır. Eklentide aynı zamanda FV modül ve evirici seçimlerinin tasarımcı tarafından yapılmasına da izin verilmektedir. Seri ve paralel dizi analizi, kurulum kapasitesini, maliyeti, BIPV üretim gücü miktarını, tahmini enerji tüketim miktarını rapor çıktısında veri olarak vermektedir. Yapılan bu çalışma ile geliştirilen BIM’e dayalı bir BBFV kütüphanesi kullanarak, kurulum kapasitesini, ilk yatırım maliyetlerini, yenilenebilir enerji çıkışını ve BBFV tasarımı sırasında beklenen enerji

kullanımını otomatik olarak hesaplamak mümkündür. Hiç deneyimi olmayan mimarlar bile çeşitli kurulum koşullarına göre enerji üretimini tahmin edebilir ve tasarım aşamasında sistemin uygunluğunu hızlı ve basit bir şekilde belirleyebilir (Kim, Jeon, Jun, & Lee, 2019).

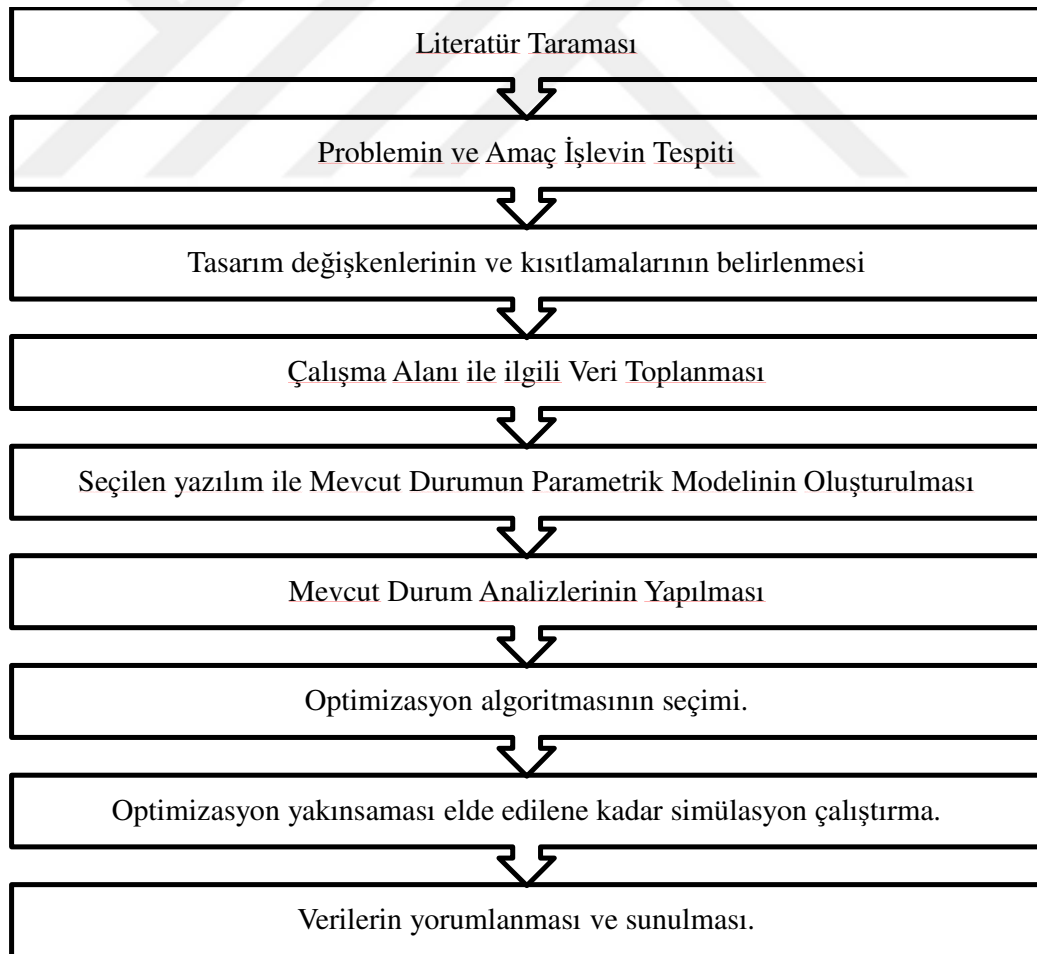
Lobaccaro ve diğerleri, sıfır emisyonlu bir bina tasarlamak için, somutlaşmış sera gazı emisyonlarını ve işletme sırasında kullanılacak enerjiyi en aza indirerek işletim sırasında çıkacak karbon miktarını azaltmak için güneş radyasyonu ve gün ışığı gibi enerji analizleri ile çevresel etki analizi yapmak için Grasshopper ortamında parametrik tasarıma dayalı özgün bir üretken iş akışı geliştirmişlerdir. İş akışı, bina şeklini, yapı bileşenlerinin boyutlarını ve malzeme miktarını değiştirirken çeşitli bina özelliklerini parametrik olarak kontrol etmek için oluşturulmuştur. İş akışı, Galapagos ve Octopus evrimsel çözümleyiciler aracılığıyla yinelemeli simülasyonlar çalıştırarak Baz Senaryo'nun başlangıç şeklini değiştirilmesine olanak tanır. Tasarım optimizasyonunun her aşaması için, pasif ve aktif stratejiler aracılığıyla, bina tasarımının enerji ve çevresel etki açısından nasıl değişeceğini değerlendirmek ve tasarım üzerindeki etkilerini belirlemek için somutlaştırılmış emisyonlar ve enerji dengeleri hesaplanmıştır. Bu çalışma, Üretken Tasarım yaklaşımının tasarımcıya düşük seviyede somutlaştırılmış emisyonu sahip tasarım seçenekleriyle, işletim sırasında düşük enerji kullanımı sağlayan tasarımların, nasıl otomatik olarak oluşturulup optimize edilebileceğini göstermiştir (Lobaccaro, ve diğerleri, 2018).

Yapılan tez çalışması, mevcut yapıların çatı optimizasyonunu gerçekleştirmesi açısından diğer çalışmalardan ayrılmaktadır. Literatürdeki çalışmalar çoğunlukla yeni yapılacak bina optimizasyon çalışmalarına odaklanmaktadır. Ayrıca bina çatılarında kullanılacak fotovoltaik panellerin verimliliğini artırmak için çatı yüzeyinde yapılacak iyileştirmeleri inceleyen fazla sayıda bir çalışma yer almamakta, var olan çalışmalar ise bulunduğu alandaki imar koşullarını göz ardı ederek sadece farklı çatı şekillerinin irdelenmesine odaklanmıştır.

1.4 Araştırma Metodu

Çalışma kapsamında konut binalarında yapılacak iyileştirmenin ülke bazında karbon salınımına etkisi araştırılacaktır. Bu çalışmada nicel araştırma yöntemi kullanılmıştır. Bu bağlamda İstanbul'da yer alan bir yapı adasında bulunan konut birimleri, bitişik ve ayrık nizam düzeninin beraber yer aldığı ve farklı kat yüksekliklerinde binalara sahip

olduğu için seçilmiştir. Güneş enerjisinden maksimum düzeyde faydalanmak için yapılacak çatı tadilatı projelerinde, optimum çatı tasarımına ulaşmak için simülasyon tabanlı entegre bir optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Yöntemin kullanılabilmesi için, çatılar parametrik olarak modellenmiş, yıllık güneş radyasyon değerleri görsel programlama yazılımı olan Dynamo içerisinde çalıştırılan güneş radyasyonu analiz düğümü ile hesaplanmış ve girilen parametre kısıtlayıcıları içerisinde genetik algoritma yolu ile tasarlanan alternatifler, çatı yüzeylerinde fotovoltaik panellerle maksimum elektrik üretimini sağlayacak alternatifin geliştirilmesi için kullanılmıştır. Çalışmada kısıtlayıcı olarak kullanılan çatı eğimi değerleri farklı artış adımlarına göre çalıştırılarak, çalışma süresinin kısaltılmasına karşın optimum tasarım alternatifine ulaşıp ulaşılamayacağı test edilmiştir. Kullanılan Dynamo kodları çalışılacak herhangi bir yapı adası için de daha sonradan kullanılabilir. Yapılan çalışmanın ana kurgusu Şekil 1.2’de özetlenmiştir.



Şekil 1.2 : Çalışmanın ana kurgusu.

1.5 Tez Özeti

Bu tez çalışması beş ana bölümden oluşmaktadır.

- Birinci bölümde, çalışmanın amacı ve önemi anlatılmış, hipotez ortaya konulmuş ve yapılan çalışmaya benzer çalışmalardan bahsedilmiştir. Araştırma metodundan bu bölümde bahsedilmektedir.
- İkinci bölümde, çalışmanın çıkış noktasını oluşturan enerji kavramı ve binalarda kullanımından bahsedilmiştir. Sürdürülebilir enerji kaynaklarından bahsedilmiş ve yapıyla bütünleşmiş çözümler irdelenmiştir. Son olarak sürdürülebilir mimari ve yüksek performanslı bina tanımları yapılmış, bu başlıkların iklim krizi konusundaki etkileri anlatılarak tez çalışmasına yön verilmiştir.
- Üçüncü bölümde, BIM'in çalışma prensibi ve uygulama alanlarından bahsedilmiştir. Yüksek performanslı bina tasarımlarında sağladığı yararlar ile simülasyon çalışmalarındaki etkilerinden bahsedilmiştir. Tasarımların enerji etkinliğinin hesaplanmasında parametrik tasarımın öneminden bahsedilmiş, parametrik tasarım ve tezin ana konusunu oluşturan üretken tasarım detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Üretken tasarımın gerçekleşmesi için gerekli programlama dilleri hakkında bilgi verilerek bölüm tamamlanmıştır.
- Dördüncü bölüm, kendisinden önce gelen üç bölümün sentezlendiği bir bölümdür. Burada tezin ana çalışmasından bahsedilmiştir. Çalışma alanı olarak belirlenen yapı adasındaki durum güneş radyasyon analizi ile daha sonrasında parametrik olarak modellenen bina çatılarının üretken tasarım metodu ile tasarım alternatifleri maksimum güneş radyasyonu kazancına göre geliştirilmiştir.
- Beşinci bölüm olan son bölümde ise çalışmanın özeti yapılmış ve çalışmanın avantajlarından bahsedilmiştir.

2. BİNALARDA ENERJİ KULLANIMI VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK

Tarih boyunca enerjinin kullanımı insan topluluklarının gelişimi ve işleyişinde merkezi bir konumda yer almıştır. Enerji, yemek pişirmek, ısınmak gibi temel ihtiyaçların çözümünde kullanıldığı gibi aynı zamanda teknolojik gelişmeler, ulaşım, sağlık sistemi gibi her türlü alanın temel yapı taşı olma özelliğindedir. Ancak mevcut durumdaki insan popülasyonundaki artış hızı devam ederse yüzyılın sonunda insan popülasyonunun iki katına, enerji talebinin ise enerji alanındaki büyük gelişmelere rağmen iki ila dört katına çıkacağı beklenmektedir. Bu büyük miktardaki talebin kısıtlı fosil tabanlı yakıtlarla karşılanamayacağı, karşılanması halinde ise sera gazı emisyonları nedeni ile dünyanın daha fazla ısınmasına bağlı olarak, birçok yıkıcı sonucun ortaya çıkacağı beklenmektedir. Bu nedenle insan alışkanlıkları için yapı taşı olan enerjinin sürdürülebilir ve temiz enerji kaynaklarından karşılanması büyük bir önem taşımaktadır.

Binalar, dünyadaki enerji tüketiminin ve sera gazı emisyonlarının büyük bir bölümüne katkıda bulunmaktadır. Binaların yapım aşamasında kullanılan malzemelerin üretimi, inşaat alanına sevk edilmesi, burada montajının yapılması esnasında karbon gazı emisyonları gerçekleşmektedir ve bu somutlaşmış karbon olarak adlandırılmaktadır. Binaların işletme aşamasındaki faaliyetler ise (iklimlendirme ve aydınlatma gibi) bina yaşam döngüsü boyunca karbon emisyonlarının yaklaşık %52'sini oluşturmaktadır. Araştırmacılar, binalarda enerji kullanımını ve bina işletimlerinden kaynaklanan karbon emisyonlarını en aza indirmek için bina tasarımlarında yapılabilecek optimizasyonlara odaklanmışlardır. 2011'de ABD Enerji Bakanlığı tarafından yapılan çalışmalar, düşük karbonlu yeşil binaların %25 daha az enerji tükettiğini ve %34 daha düşük sera gazı emisyonu ürettiğini göstermiştir. Bu nedenle, düşük karbonlu yeşil binaların tasarlanması, büyük ölçüde enerji tasarrufu ve karbon azalımı sağlamak için önemli bir strateji olarak düşünülmektedir (Gan, ve diğerleri, 2019).

2.1 Enerji Türleri

Modern anlamda enerji kavramı 1800'lerin başında bilim adamları tarafından, ısı transferi, elektrik akışı, gezegenlerin hareketi, makinelerin işleyişi gibi çeşitli fenomenlerin davranışları hakkındaki gözlemlerini tanımlamak ve karşılaştırmak için geliştirilmiştir. Günümüzdeki bilimsel tanımı ise, enerjinin iş yapabilme kapasitesi

olduğu şeklindedir; yani, bir nesneyi direnen bir kuvvete karşı hareket ettirmektir. Güç, iş yapma hızı, yani enerjinin bir formdan diğerine dönüştürülme veya bir yerden diğerine iletilme hızı olarak tanımlanır. Enerjinin ana ölçüm birimi Joule'dur (J) ve ana güç ölçüm birimi, saniyede bir Joule hızı olarak tanımlanan Watt'tır (W) (Boyle, Everett, & Ramage, 2003).

Temel olarak üç enerji kaynağı vardır ve bunlar; fosil, yenilenebilir ve bölünebilir olarak ayrılır. Fosil enerji kaynakları petrol, kömür, doğal gaz, bitümler ve katranlı kumlardır; yenilenebilir enerji kaynakları biokütle, güneş, rüzgâr, jeotermal ve hidroelektriktir ve bölünebilir enerji kaynakları uranyum ve toryumdur (Demirbaş, 2009).

2.1.1 Fosil Yakıtlar

Tarih boyunca enerji kullanımı, insan toplumlarının işleyişinde ve gelişiminde merkezi konumda olmuştur. Ancak on dokuzuncu ve yirminci yüzyıllarda insanlık, fosil yakıtların içerdiği yüksek konsantrasyonlu enerji formlarını nasıl kullanacağını öğrendiğinde, sanayi devrimini yönlendiren gücü sağladı ve dünyadaki milyonlarca insana refah ve üretkenlikte benzersiz artışlar getirdi (Boyle, Everett, & Ramage, 2003). Sanayi çağımızda öncelikli olarak kullandığımız enerji kaynakları tükenebilir niteliktedir. Bu yüzyılın ilk üçte birinde, kolayca çıkarılabilen petrol ve doğal gaz rezervlerinde (teknik ve ekonomik açıdan) bir arz sıkıntısı beklenmektedir. Büyük yeni rezervler keşfedilse bile, fosil yakıtlar sadece birkaç yıl daha dayanabilir görünmektedir (The German Energy Society (DGS), 2008). Bununla birlikte, üçüncü binyıla girerken, enerji ihtiyaçlarımızı uzun vadeli olarak sürdürülebilir bir şekilde karşılamak için dünyanın enerji sistemlerinin radikal bir şekilde değiştirilmesi gerektiğine dair artan bir farkındalık oluştu (Boyle, Everett, & Ramage, 2003) .

Ayrıca, fosil yakıtlardan enerji üretimi, yüksek sera gazı emisyonlarına neden olur. Fosil yakıtların veya enerji ihtiyaçlarının küresel kullanımı, hızla dünya çapında kritik çevre sorunlarına yol açmaktadır (Demirbaş, 2009). Fosil yakıtlar için en umut verici yaklaşım, onları hidrojene dönüştürmek, karbon içeriklerini atmosfere giremeyecek şekilde yakalamak ve tecrit etmek ve hidrojeni yakıt hücrelerinde atmosferik oksijenle birleştirerek temiz ve verimli bir şekilde elektrik ve ısı üretmek olabilir. Nükleer yakıtlar karbonsuz olmasına rağmen, nükleer enerji ile ilgili maliyet, güvenlik, yayılma ve atık bertaraf sorunları konusunda endişeler devam etmektedir. Bununla

birlikte, yeni füzyon reaktörü tasarımları bu tür endişeleri hafifletmeye yardımcı olabilir ve daha uzun vadede nükleer füzyon teknolojik, ticari ve çevresel olarak uygulanabilir bir seçenek olduğunu kanıtlayabilir. Yenilenebilir enerji kaynakları, esas olarak, fosil veya nükleer yakıtlardan daha sürdürülebilir görünmektedir, ancak birçok teknoloji hala geliştirilme aşamasındadır ve bazılarının maliyetleri şu anda yüksektir. Araştırma, geliştirme ve dağıtımına yapılan yatırımların artmasıyla, yenilenebilir enerji kaynakları dünya enerjisinin çok daha büyük bir bölümünü karşılayabilir (Boyle, Everett, & Ramage, 2003).

2.1.2 Yenilenebilir Enerji

İklim değişikliği, hava kirliliğinin sağlık üzerindeki etkileri, enerji güvenliği ve enerjiye erişim konularında artan endişeler ve son on yıllardaki değişken petrol fiyatları, yenilenebilir enerji kaynakları gibi alternatif, düşük karbonlu teknoloji seçeneklerinin üretilmesi ve kullanılması ihtiyacını doğurmuştur. Solar PV, yenilenebilir enerjinin öncülerinden biri olmuştur (IRENA, 2019b). Yenilenebilir enerji, yenilenebilir kaynaklardan elde edilen, güneş enerjisi, rüzgâr, jeotermal ve biyokütle gibi doğal elementleri kullanan bir enerji çeşididir (Boyle, Everett, & Ramage, 2003). Yenilenebilir enerji kaynakları insanlık tarihinin başından itibaren insanlar için önemli olmuştur. Yenilenebilir enerji, günlük yaşam enerji ihtiyacını doğal hayata zarar vermeden karşılayabilecek etkili bir enerji çeşididir. Yenilenebilir enerji kaynakları hem hava kirleticilerinin hem de sera gazlarının sıfır ya da sıfıra yakın salınımını sağlayacak potansiyele sahiptir (Demirbaş, 2009). Yenilenebilir enerji kaynakları 2020 yılında küresel elektrik ihtiyacının yaklaşık olarak %29'unu karşılamıştır (Now, 2021).

Yenilenebilir enerji kaynaklarından olan biyokütle, ısınma, yemek pişirme, güç üretimi için uzun yıllardır kullanılmaktadır. Biyokütle, bitkilerden (algler dahil), ağaçlardan ve ekinlerden elde edilen tüm organik maddeler için kullanılan bir terimdir. Bu nedenle biyokütle kaynakları, organik atık maddeleri, tarım ve ormancılık faaliyetleri kalıntılarının yanı sıra ısı, yakıt ve elektrik üretmek için yetiştirilen mahsuller (enerji tarlaları) de dahil olmak üzere çok çeşitlidir. Özellikle gelişmekte olan ülkelerde biyokütle kaynaklarından olan yakacak odun, ısınma ve pişirme ihtiyaçlarını gidermek için kullanılır. Ancak bazı bölgelerde biyokütlenin geleneksel yöntemler ile kullanılması, toprağı gerekli besinlerden mahrum bırakabilir, iç ve dış

mekanlarda hava kirliliğine neden olabilir, ayrıca sera gazı emisyonlarına da yol açarak ekosistemi etkileyebilir (Turkenburg, 2000). Bu nedenlerden dolayı yenilenebilir enerji olarak görülse de enerji kaynaklarının bilinçli bir şekilde tüketilmesi gerekmektedir.

Rüzgarlar, güneş radyasyonu Dünya'nın çok çeşitli yüzeyine eşit olmayan bir şekilde ulaştığında, sıcaklık, yoğunluk ve basınç farklılıkları yaratarak oluşur. Tropikal bölgeler güneş radyasyonu nedeniyle net bir ısı kazancına sahipken, kutup bölgeleri net bir ısı kaybına maruz kalır. Bu da Dünya atmosferinin ısıyı tropik bölgelerden kutuplara doğru taşımak için sirkülasyon yapması gerektiği anlamına gelir. Dünya'nın dönüş hızı ile, topografik özellikler ve yerel sıcaklık değişimleri de rüzgâr enerjisi dağılımını değiştirir (Rogner, 2000). Rüzgâr enerjisi, sanayi devriminden önce bir enerji kaynağı olarak yaygın bir şekilde kullanılmış, ancak daha sonra maliyetler ve güvenilirlik konusundaki farklılıklar nedeniyle fosil yakıt kullanımı ile yer değiştirmiştir. Ancak 1970'lerdeki petrol krizi, şebekeye bağlı elektrik üretimi, su pompalama ve uzak bölgelerde güç temini için rüzgâr enerjisi teknolojisine olan ilgiyi yeniden tetiklemiştir (World Energy Council, 1994). 1980 yılında ilk modern şebekeye bağlı rüzgâr tribünleri kurulmuştur (Turkenburg, 2000). Rüzgâr kaynaklarından, rüzgâr gücü yoğunluğunun yerden 30 metre yükseklikte metrekaşe başına en az 400 watt (veya 50 metrede metrekaşe başına 500 watt) olduğu alanlarda yararlanılabilir (Rogner, 2000). Rüzgâr türbinlerinin çevresel etkileri sınırlı olup, gürültü ve görsel estetik en fazla soruna neden olmakta ve yoğun nüfuslu yerlerde yeni türbinlerin kurulmasına karşı kamu direncini artırmaktadır (Turkenburg, 2000).

Güneş enerjisi ile suyun doğal yollarla buharlaşmasına dayanan hidroelektrik, elektrik üretimi için kullanılan en büyük yenilenebilir kaynaktır. Birim yüzey alanı başına su buharlaşması okyanuslarda karalardan daha fazladır ve rüzgârın da yardımıyla su buharının okyanuslardan yağış yoluyla karalara sürekli transferinin başlıca nedenidir. Küresel su dengesinin korunması, karada tutulan suyun eninde sonunda nehirler aracılığıyla akış olarak okyanuslara geri dönmesini gerektirir. Tüm yenilenebilir kaynaklarda olduğu gibi, yüzey sularının miktarı belirli bir süre için sınırlıdır, ancak diğer tüm koşullar eşit olduğunda, bu sınırlı miktar sonsuza kadar kullanılabilir. Hidrolojik döngü bilgisini uygulayarak, dünya çapındaki yüzey suyu miktarı oldukça doğru bir şekilde değerlendirilebilir. Hidroelektrik, suyun potansiyel enerjisinin mekanik enerjiye dönüşmesiyle elde edilir. Bu nehirlerde kurulan barajlar ile

gerçekleştirilmektedir. Enerji potansiyelinin değerlendirilmesi, yüzey suyunun yerel ve coğrafi faktörleriyle ilgili ayrıntılı bilgi gerektirir (mevcut su yüksekliği, zaman birimi başına akış hacmi vb.) (Rogner, 2000). Hidroelektriğin kusursuz bir yenilenebilir enerji kaynağı olduğu, tükenmediği, çevreyi kirletmediği ve diğer seçeneklere göre ekonomik açıdan daha cazip olduğu yönünde genel bir görüş vardır. Hidroelektrik santralleri, termik santrallere göre çok daha az sera gazı yaymaktadır. Hidroelektrik santrallerin sera gazı emisyonları, su altında kalan bölgelerdeki bitki örtüsünün çürümesinden ve baraj inşaatında yoğun çimento kullanımından kaynaklanmaktadır. Ne yazık ki, nehirlerin kullanımının ekolojik olduğu kadar sosyal etkileri de vardır ve insanlar bu etkilerin yaşam standartlarını nasıl etkilediğinin farkına vardıkça önem kazanmaktadır. Bu etkiler arasında, balık miktarı ve balık biyo çeşitliliğindeki değişiklikler, tortulaşma, su kalitesinin bozulması, biyo çeşitliliğin azalması, insan sağlığına olan dolaylı etkileri ile nehirlerin doğal akış yönünü bozmaları gelmektedir. Hidroelektrik üretimine yönelik eleştiriler göz önüne alındığında özellikle büyük ölçekli barajların inşa sürecinde sosyal ve ekonomik etkilerini en aza indiren çeşitli teknolojileri sisteme dahil etmek gerekmektedir (Turkenburg, 2000).

Jeotermal enerji yerkürenin içinde depolanan ısı olarak tanımlanmaktadır. Yerkürenin sıcaklığı her 100 metre derinlikte 3 santigrat derece artar, ancak bu değer oldukça değişkendir. Isı, yerkürenin erimiş iç kısmından ve burada bulunan radyoaktif maddelerin bozulmasından dolayı açığa çıkar. Dört farklı jeotermal enerji tanımlanmıştır. Bunlardan 100-450 metre derinlikte bulunan sıcak su ya da buhar enerjisinden elde edilen hidrotermal enerji, ticari olarak elektrik üretiminde kullanılan jeotermal enerji türüdür (Rogner, 2000). Jeotermal enerji binlerce yıldır banyo yapmak ve temizlik için kullanılmaktadır, ancak alan ısıtması, endüstriyel enerji kullanımı ve elektrik üretimi için büyük ölçekte kullanılması ancak 20. yüzyılda gerçekleşmiştir. Prens Piero Ginori Conti 1904 yılında İtalya'daki Larderello'da jeotermal buhar ile elektrik enerjisi üretimini başlatmıştır. İlk büyük belediye bölgesel ısıtma hizmeti 1930'larda İzlanda'da başlamıştır. Jeotermal kaynaklar 80'den fazla ülkede tespit edilmiştir (Turkenburg, 2000).

Jeotermal akışkanlar değişken miktarda gaz içermektedir. Büyük ölçüde nitrojen ve karbondioksit ile bir miktar hidrojen sülfür ve daha küçük oranlarda amonyak, cıva, radon ve bor bulunmaktadır. Bu miktarlar farklı sahaların jeolojik koşullarına bağlıdır.

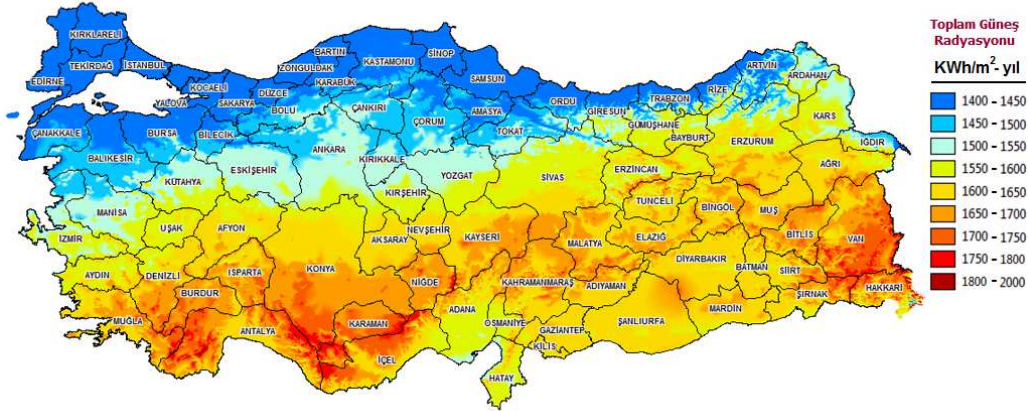
Kimyasalların çoğu atık suda yoğunlaştırılır, rutin olarak sondaj deliklerine yeniden enjekte edilir ve böylece çevreye salınmaz. Gazların konsantrasyonları genellikle zararlı değildir ve hidrojen sülfür gibi gazların jeotermal buhardan uzaklaştırılması, gaz içeriğinin yüksek olduğu jeotermal enerji santrallerinde rutin bir konudur. Dünyada elektrik üretimi için kullanılan yüksek sıcaklıktaki jeotermal sahalardan kaynaklanan karbondioksit emisyonları kilowatt-saat başına 13-380 gram arasında değişmekte olup fosil yakıtlı elektrik santrallerinden daha azdır. Düşük sıcaklıklı jeotermal kaynaklardan kaynaklanan gaz emisyonları normalde elektrik üretimi için kullanılan yüksek sıcaklıklı sahalardan kaynaklanan emisyonların sadece bir kısmıdır. Düşük sıcaklıktaki suyun gaz içeriği çoğu durumda çok düşüktür. Reykjavik, İzlanda'da karbondioksit içeriği soğuk yeraltı suyundan daha düşüktür. Paris havzası gibi tortul havzalarda gaz içeriği salınamayacak kadar yüksek olabilir. Bu gibi durumlarda jeotermal akışkan kapalı bir devre (jeotermal çift) içinde basınç altında tutulur ve herhangi bir gaz giderme işlemi yapılmadan rezervuara yeniden enjekte edilir. Çökeltme havzalarındaki geleneksel jeotermal planlar genellikle rezervuara yeniden enjekte edilen ve dolayısıyla asla çevreye salınmayan tuzlu sular üretir. Dolayısıyla bunlardan kaynaklanan karbondioksit emisyonu sıfırdır (Turkenburg, 2000).

Bir diğer yenilenebilir enerji çeşidi olan güneş enerjisi tez çalışmasının ana konularından birisi olduğu için ayrı bir başlık altında incelenmiştir.

2.1.2.1 Güneş Enerjisi

Güneş ışınım yoluyla enerji sağlayarak Dünya'da yaşamın var olmasını sağlamaktadır. Enerji, hidrojen atomlarının helyuma füzyonu yoluyla güneşin çekirdeğinde üretilir ve hidrojenin kütesinin bir kısmı enerjiye dönüştürülür. Başka bir deyişle, güneş bir nükleer füzyon reaktörüdür. Güneş, Dünya'dan çok uzakta olduğu için, güneş radyasyonunun yalnızca çok küçük bir kısmı (yaklaşık iki milyonda biri) Dünya'nın yüzeyine ulaşır. Atmosfere ulaşan güneş ışığındaki enerji miktarı, dünyanın toplam enerji ihtiyacının yaklaşık 10.000 katına eşittir. Bu parlaklık seviyesine Dünya yüzeyinde ulaşılmaz. Dünya atmosferi yansıma, absorpsiyon (ozon, su buharı, oksijen ve karbon dioksit yoluyla) ve saçılma (hava molekülleri, toz parçacıkları veya kirlilik nedeniyle) yoluyla güneş ışığını azaltır. Küresel ısınım, doğrudan ve yayılmış ısınımın toplamı olarak ifade edilir. Öğle saatlerinde açık havalarda, Dünya yüzeyindeki ısınım

1000W/m²'ye ulaşabilir. Bu değer, konumdan nispeten bağımsızdır. Maksimum güneşlenme, parçalı bulutlu, güneşli günlerde gerçekleşir. Geçen bulutlardan yansıyan güneş radyasyonunun bir sonucu olarak, güneşlenme kısa süreler için 1400W/m²'ye kadar çıkabilir. Güneş radyasyonunun enerji içeriği bir yıllık süre için hesaplanırsa, bu, yıllık küresel radyasyonu olarak adlandırılır ve kWh/m² olarak ölçülür. Bu değer Dünya yüzeyindeki konuma bağlı olarak büyük ölçüde değişiklik gösterir (The German Energy Society (DGS), 2008). Türkiye için yıllık güneş radyasyonu değeri ortalama 1527 kWh/m²'dir. Ortalama günlük toplam güneşlenme süresi ise 7.5 saat olarak ölçülmüştür. En yüksek küresel radyasyon değerine haziran ayında ulaşılmakta, en düşük değer ise aralık ayında gözlemlenmektedir (EİGM, 2022). Türkiye Güneş Radyasyonu Haritası Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Bu değerler Türkiye'nin birçok diğer ülkeye göre güneş enerjisinden yararlanması açısından avantajlı bir konumda olduğunu göstermektedir. İstanbul'un bulunduğu alan yıllık ortalama 1400-1450 kWh/m² lik bir değere sahiptir. Çatı üstü FV sistemlerinin, şebeke ölçeğindeki sistemlere göre %20 daha düşük kapasite faktörüne sahip olduğu düşünülmektedir (Andrews, 2022). Bu kapasite faktörlerinin gölgeleme katsayılarını içerdiği varsayılmaktadır (SHURA, 2020). Güneş ışığından, güneş enerjisiyle ısıtma (genellikle su), fotovoltaik, konsantre güneş termal enerjisi ve ayrıca güneş havuzları, alan ısıtması, erimiş tuz enerji santralleri ve hatta yapay fotosentez dahil olmak üzere sürekli gelişen ve ustaca kullanılan bir dizi yolla yararlanılabilir. Bu teknolojilerden bazıları, iklim değişikliğini ve fosil yakıtların yakılmasından kaynaklanan atmosferik karbondioksit birikimini azaltmanın yolları olarak sadece son 30 yılda geliştirilmiştir (Letcher & M., 2018).



Şekil 2.1 : Güneş Radyasyon Haritası (EİGM, 2022).

Güneş enerjisinin binalarda kullanılması pasif ve aktif sistemler olarak iki şekilde gerçekleşmektedir. Pasif sistemler herhangi bir ek teknolojik ürün kullanılmadan, genellikle yapı elemanlarının iklim ve çevre verileri dikkate alınarak kullanılması yoluyla gerçekleşmektedir. Isı depolamayı sağlayan duvar malzemeleri, pencere açıklıklarının yeri ve boyutu, çatılarda kullanılan su depolayıcıları ya da güneş odaları gibi çözümler pasif sistemler olarak adlandırılır (Wachberger & Wachberger, 1988). Aktif sistemler ise, güneş ışınımını yutarak, istenilen enerji çeşidine çeviren mekanik ve/veya elektronik elemanlardan oluşan sistemlerdir (Mutlu, 2010). Aktif sistemler, ısıtma amaçlı ve elektrik üretme amaçlı olarak geliştirilmişlerdir. Isıtma amaçlı teknolojilerden en yaygın olarak kullanılanları güneş kolektörleridir ve kolektörler ısı enerjisini akışkan madde yoluyla ısıtılması gereken alana iletmektedirler. Güneş kolektörlerinde ısıtılan akışkan madde olarak genellikle su tercih edilmektedir. Yapıların ısıtılması için kullanılabildiği gibi direk sıcak su ihtiyacını karşılamak için de kullanılmaktadır (Özçelik, 2018). Elektrik üretmek amaçlı kullanılan teknolojiler ise fotovoltaik sistemler ile yoğunlaştırıcı sistemlerdir. Yoğunlaştırıcı sistemler ile elde edilen buhar, buhar tribününe aktarıldıktan sonra jeneratör aracılığı ile elektrik üretilir (Grozdev, 2010). Güneşten gelen küresel ışınımın fotovoltaik hücreler aracılığı ile elektrik enerjisinin üretildiği sistemler ise fotovoltaik teknolojiler olarak adlandırılır (Aksangör, 2019). Güneş enerjisi teknolojileri işletim sırasında emisyonla neden olmaz, ancak üretim sırasında ve hizmet dışı bırakma sırasında emisyonla neden olurlar. Sektörün büyümesiyle birlikte, artık güneş teknolojilerinin çevresel etkilerine karşı büyük ilgi duyulmaktadır. Fotovoltaik sistemlerin ve bileşenlerin çevresel yaşam

döngüsü analizleri (Nieuwlaar & Alsema, 1997) fotovoltaiik modüllerin üretiminde farklı malzemelerin ve süreçlerin geliştirilmesine yol açmıştır (Tsuo, J.M. Gee, Strebkov, Pinov, & Zadde, 1998). Teknik şartname dışı veya reddedilen modüller için çeşitli geri dönüşüm süreçleri geliştirilmiştir (Turkenburg, 2000).

2.2 Türkiye’de Enerji Kullanımı

Türkiye'deki enerji tüketiminin yaklaşık %73'ü ithal enerjiden sağlanmaktadır ve bu da 2012'de ülkeye 60 milyar dolardan fazla bir maliyeti olmuştur. Yükselen sermaye piyasaları petrol ve diğer fosil yakıtları doğrudan etkilemiş ve bu piyasalardaki belirsizlikler enerji fiyatlarındaki dalgalanmaları doğrudan etkilemektedir. Enerji fiyatlarındaki artan oynaklık, ekonomiyi ve Türk enerji tüketicisini güçlü bir şekilde etkilemiş, konuyu en kritik belirsizlik haline getirmiş ve ülke içindeki enerji liderleri için öncelikli bir alan haline gelmiştir (World Energy Council, 2014). Ayrıca güncel çalışmalar gösteriyor ki Türkiye'nin elektrik ve gaz ihtiyacı Avrupa'daki diğer ülkelere göre daha fazla artmaktadır. Bu artış 2021 yılı için doğalgazda %21, elektrikte ise %8'dir (World Energy Council, 2022). 2017 yılında Türkiye’de, nihai enerji tüketiminde en fazla payı mesken ve hizmet sektörü (%32,32) ile sanayi sektörü (%31,71) almış, bunları ulaştırma sektörü (%25,51) ve tarım-hayvancılık sektörü (%3,84) takip etmiştir (Enerji Bakanlığı, 2019). Türkiye'deki elektrik enerjisi üretiminde kullanılan ham maddelerden oran olarak en yüksek paya sahip olanlar 2020 yılı için %23.13 doğalgaz ve %22.13 ile kömürdür (TEİAŞ, 2021). Üretilen elektriğin %4'ü güneş enerjisinden karşılanmış, bu üretim lisanssız üreticiler tarafından sağlanmıştır (TEDAŞ, 2020).

Türkiye'nin Paris Antlaşması için yapmış olduğu ulusal katkı beyanında yer alan bilgilere göre Türkiye’de 2012 yılı kişi başı emisyon miktarı, 5.9 ton/kişidir. Beyan’da 2030 yılı itibari ile elektrik üretimindeki kapasitenin 10 GW’lik kısmını güneş enerjisinden 16.5 GW’lik kısmını ise rüzgâr enerjisinden sağlamanın hedeflendiği belirtilmiştir. Ayrıca vergi indirimi, kredi sağlama gibi teşvikler ile enerji kullanımını azaltan ve kendi enerjisini üreten yapıların yapılmasını teşvik edileceği belirtilmiştir. Ülkemizde güneş enerjisinden yararlanma oranı 2020 yılı için 2030 senesi hedeflerini sağlamış görünse de toplam enerji üretimindeki payı %3.57 ile sınırlı kalmıştır (TEİAŞ, 2021). Şekil 2.2’de, Türkiye’de güneş enerjisi ile ilgili politikaların gelişimini göstermektedir. Şekil 2.2’de görüldüğü üzere Kyoto Protokolünün yürürlüğe girdiği

2005 yılında Türkiye’de de Yenilenebilir Enerji Yasası yürürlüğü sokulmuştur. Ancak Türkiye’de her sene artan karbon emisyonu oranlarına baktığımızda bu yasanın yeterince işlev gösteremediğini söylemek mümkün görünmektedir. 2005 yılında yürürlüğe giren yasa daha sonraki yıllarda yapılan değişiklikler ve yeni oluşturulan stratejik planlar ile geliştirilmiştir. 2010 yılında yapılan değişiklik ile sürdürülebilir enerji santralleri kurulumu için gerekli ekipmanların yerli olması yönünde yapılan teşvikler, malzemelerin sevkiyatı sırasında salınan karbon emisyonunu da azaltacağı için önemli görülmektedir. Ayrıca Türkiye 2023 yılında güneş enerjisinden faydalanma oranı olarak belirlediği 5 GW kurulu güce ulaşmış olmasına rağmen, güneş enerjisinin enerji üretimindeki payı henüz yeterli bir noktaya ulaşamamıştır.



Şekil 2.2 : Türkiye Güneş Enerjisi Politikaları (WorldBank, 2018).

Yukarıda belirtilen politikalar haricinde, Türkiye’de Mayıs 2019’da yürürlüğe giren net ölçüm yasasına göre (ResmiGazete, 2019), gerçek veya tüzel kişiler bu tarihten sonra lisans almadan veya şirket kurmadan elektrik üretebilecek ve üretim fazlasını şebekeye satabilecek, bu düzenlemenin ardından güneş enerjisi üretiminde bir artış beklenmektedir (SHURA, 2020).

2.2.1 Binalarda Enerji Kullanımı

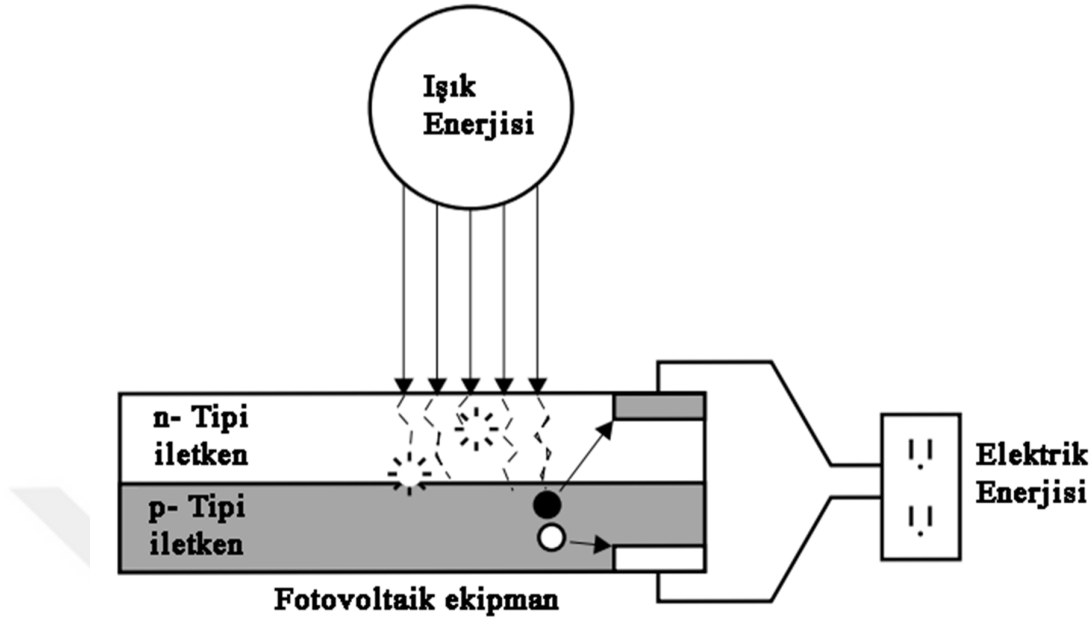
Türkiye’de 2019 yılında meskenlerde tüketilen elektrik miktarı, ülkede toplam tüketilen elektrik miktarının %21.8’ini oluşturmuştur (TEDAŞ, 2020). Türkiye’de bina taban alanı başına birincil enerji tüketimi konutlar için yılda 100-250 kWh/m², ticari, kamu ve endüstriyel binalar için yılda 50-300 kWh/m²; eğitim binaları için yılda 60-150 kWh/m²; oteller için yılda 100-350 kWh/m²; sağlık binaları için yılda 200-600 kWh/m² ve alışveriş merkezleri için yılda 150-250 kWh/m²’dir (Kabakçı, 2019). Kentleşme ve nüfus artışındaki hız nedeniyle binaların toplam enerji talebinin daha da artması beklenmektedir. Binalarda enerji, ısınma, soğutma, aydınlatma, elektrikli aletlerin kullanımı, kullanım suyunun ısıtılması gibi ihtiyaçların karşılanması için kullanılmaktadır. Türkiye’deki binalarda ısınma ihtiyacı genellikle doğalgazdan karşılanırken, elektrik üretimi için büyük oranda kömür santrallerinde üretilen elektrik enerjisi kullanılmaktadır. Her iki enerji türünün de karbon emisyon değerleri oldukça yüksektir. Geleneksel enerji üretim teknolojilerine ek olarak, yenilenebilir enerji üretim sistemleri, özellikle de çatı üstü fotovoltaik (FV) sistemler, binaların artan enerji talebini karşılama potansiyeline sahiptir. Çatı üstü FV sistemlerinin üretim kabiliyetleri, elektrik şebekelerine olan ihtiyacı azaltabilir ve dağıtım kayıplarını azaltarak şebeke verimliliğini artırabilir. Çatı üstü FV sistemleri Türkiye’deki binaların birincil enerji talebini %11 oranında azaltabilir. Bu sayede ithal edilen doğalgaz miktarında %2.9’luk bir azalış sağlanabilir ve çatı üstü FV panellerin kömür bazlı elektrik üretiminin yerini aldığı varsayıldığında, Türkiye’nin yıllık elektrik sektöründen kaynaklı CO₂ emisyonunu %3.5 oranında azaltmak mümkündür. (SHURA, 2020). Çatı üstü FV panel sistemleri için global ölçekte birçok finansal destek paketi açıklanmış ve yönetmelikler geliştirilmiştir. Türkiye’de hayata geçirilebilecek çatı üstü fotovoltaik sistem potansiyeline ait çalışmalar son zamanlarda artış göstermektedir. Bunlardan biri olan 2018 yılı Dünya Bankası raporunda çatı üstü FV sistemlerinin Türkiye’de yaygınlaşması için gerekli düzenlemelerin hayata geçirilmesinin yanı sıra, kapsamlı planlama ve teknik kapasitenin artırılması

gerekliliği vurgulanmaktadır (WorldBank, 2018). Ayrıca Dünya Bankası Türkiye'deki çatı sistemleri için özel bir kredi paketi üzerinde çalışmaktadır (SHURA, 2020).

2.3 Fotovoltaik Teknolojiler

Bilim insanları, 1818 gibi erken bir tarihte, selenyum gibi bazı malzemelerin elektrik iletkenliğinin güneş ışığına maruz kaldığında birkaç kat arttığını fark etmiştir (Letcher & M., 2018). 19. Yüzyılda Fransız fizikçi Alexandre Edmond Becquerel fotovoltaik etkiler üzerine gözlemlerini kayıt altına almıştır, bu fotovoltaik ile ilgili yapılan ilk tanımdır ve bu tanımda foto, ışığı, voltaik ise elektrik üretimini ifade eder. Bu çalışmadan sonra birçok bilim insanı bu etkiyi baz alan enerji teknolojileri geliştirmek için çalışmıştır (Eiffert & Kiss, 2000). Ancak silikonun etkili bir güneş pili olarak kullanılabileceğini Bell Telefon Laboratuvarları'nda transistörler üzerinde çalışan bilim insanları 1950'lerde ortaya koyana dek güneş pilleri üzerinde etkili bir çalışma yapılamamıştır. Bu durum çok geçmeden silikon güneş pillerinin uzay araçlarında kullanılmasına yol açtı ve 1958 yılında Vanguard 1 bu yeni buluşu kullanan ilk uydu oldu. Bu uygulama daha iyi ve daha ucuz güneş pilleri için daha fazla araştırma yapılmasının önünü açtı. Bu çalışmalar 1970'lerdeki hızlı petrol fiyat artışından sonra daha da teşvik edildi. ABD Hükümeti 1977 yılında Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı'nı kurdu (Letcher & M., 2018).

Güneş panelleri olarak bilinen fotovoltaik sistemleri, güneş ışığından gelen enerjiyi absorbe ederek, yarı iletken malzemeler aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştüren cihazları kullanarak güç üretirler (U.S. Solar Energy Technologies Office, 2022a). Şekil 2.3'te fotovoltaik cihazların çalışma prensibi gösterilmiştir. Güneş ışığı fotonlardan oluşur. Fotonlar bir PV hücresine çarptığında, bazıları yarı iletken malzeme tarafından emilir ve enerji elektronlara aktarılır. Elektronlar yeni buldukları enerjiyle ilişkili oldukları atomlardan ayrılır ve bir elektrik devresinde akım olarak ilerlerler.



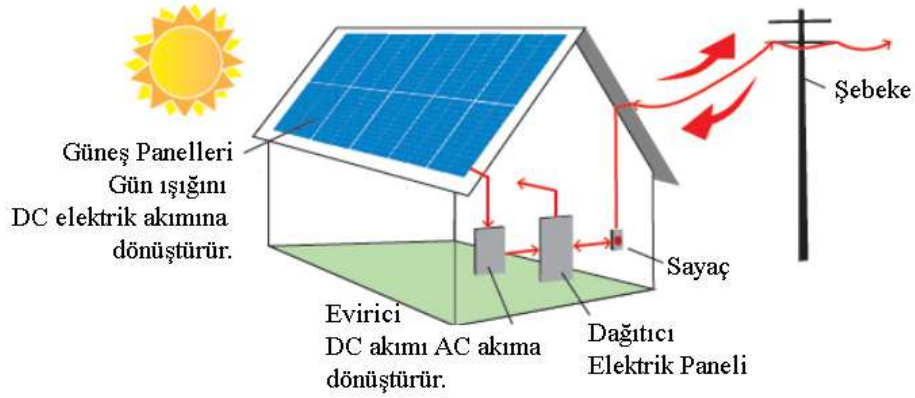
Şekil 2.3 : Fotovoltaiklerin çalışma prensibi (Eiffert & Kiss, 2000).

Yakın zamana kadar mevcut olan tek güneş levha üretimi hem maliyetli hem de üretimi sırasında fazla enerjiye gerek duyulan saf silikondan (99.9999 saflıkta) yapılmaktaydı. Levha teknolojisine yönelik son araştırmalar, kadmiyum tellürid (CdTe), bakır indiyum galyum selenid (CIGS), amorf silikon (aSi) gibi farklı alaşımlarla perovskitler gibi malzemeleri içeren bir seri yeni yarı iletken güneş levhası malzemesi geliştirildi. Bunlardan bazıları, az bulunan elementleri; bazıları da kadmiyum gibi zehirli elementleri içermektedir. Bu nedenle fotovoltaik malzemeler için yeni arayışlar devam etmektedir. Silikon levhalar son yirmi yılda önemli ölçüde gelişmiştir ve verimlilikleri %20 mertebesinde. Ayrıca, seri üretimle birlikte, silikon levha fiyatları büyük ölçüde düşmüştür (Letcher & M., 2018). FV hücreleri, modüller veya paneller olarak bilinen daha büyük güç üreten birimler oluşturmak üzere birbirine bağlanırlar (U.S. Solar Energy Technologies Office, 2022a). Bu bağlanma seri ya da paralel olarak gerçekleştirilebilir. Tek bir FV hücresi genel olarak 1-2 Watt enerji üretir. Modüller tek başına kullanılabildikleri gibi diziler oluşturularak da kullanılabilirler (U.S. Solar Energy Technologies Office, 2022b). Fotovoltaik malzemeler kristal, polikristal veya ince film şeklinde sınıflandırılır (Solar One, 2021). Dış mekân koşullarına uzun yıllar boyunca dayanabilmeleri için cam ve/veya plastik koruyucu malzemeler arasına sıkıştırılır (U.S. Solar Energy Technologies Office, 2022b). Günümüzde kurulan güneş panellerinin çoğunluğu kristal silikon FV

modülleridir. Bir kristal silikon güneş modülü tipik olarak alüminyum çerçeve, cam, FV modüllerin içerisine mikro toz ve su girmesini engelleyen, darbe ve titreşimlerin etkisini azaltan kavrama ve yapışma özelliği olan enkapsülant malzeme olan EVA, koruyucu arka levha ve güç çıkışının diğer güneş modüllerine, eviricilere veya güç düzenleyicilere bağlanabilen kablolarla yönlendirildiği bir bağlantı kutusu ile birbirine bağlı 60 veya 72 adet güneş hücresinden oluşur (Solar One, 2021).

Binalar için ilk FV çözümleri 1970'lerde ortaya çıkmaya başladı, bu FV modülleri genellikle elektrik şebekesine erişimi olmayan uzak bölgelerdeki binalarda kullanıldı. 1980'lerde ise çatılarda uygulanmaya başlamıştır (Eiffert & Kiss, 2000).

Güneş enerjili elektrik sistemleri, güneş panelleri, paneller için montaj elemanları, invertörler ve kablo kanalı, kablolar ve bağlantı kesme gibi daha küçük bileşenlerden oluşur. FV sistemleri bağlantı tipleri, şebeke bağlı, şebekeden bağımsız ve karma sistemler olarak üçe ayrılır. Mesken yapılarında solar FV panelleri genel olarak şebeke etkileşimlidir, bu da solar FV sistemi ile elektrik şebekesinin her ikisinin de binaya güç sağladığı anlamına gelir. Nedeni çoğu FV sistemlerinin enerji depolamak için yüksek maliyetlerden dolayı bataryaya sahip olmaması, gün ışığının yeterli olmadığı gündüz saatleri ile gece saatlerinde şebeke enerjisine ihtiyaç duyulmasından kaynaklanmaktadır (Solar One, 2021). Tipik bir şebeke bağlantılı FV sistem çalışma prensibi Şekil 2.4'te gösterilmiştir. Güneş enerjisi, güneş pilleri tarafından emilerek doğrusal elektrik (DC) akımı oluştururlar. Doğrusal elektrik akımı alternatif akıma (AC) çeviren evirici sistem sayesinde üretilmiş olan enerji, elektrik enerjisine ihtiyaç duyan ekipmanlar tarafından kullanılabilir duruma getirilmiş olur ve dağıtıcı panele iletilir. Gün içinde ihtiyaçtan fazla üretilen enerji ile gece şebekeden alınan enerji miktarı bir sayaç yardımıyla ölçülmektedir.



Şekil 2.4 : Şebeke bağlantılı FV sistem çalışma prensibi (Solar One, 2021).

Fotovoltaik sistemler geliştirildikleri zamandan bu yana maliyetlerinin çok yüksek olması nedeni ile genellikle şebeke elektriğinin sağlanamadığı yerlerde tercih edilmiş, yaygın olarak kullanılması mümkün olmamıştır. Ancak son yıllarda iklim krizinin etkilerinin daha fazla görülmesi, mevcut doğalgaz ve petrol ithalatçısı ülkelerdeki değişken durumlar nedeni ile birçok ülkenin enerji bakanlıkları yenilenebilir enerji çalışmalarına daha fazla destek sağlamaya başlamışlardır. Bu sayede araştırma-geliştirme çalışmaları hız kazanmış ve 2010'dan bu yana şebeke ölçekli güneş fotovoltaik (PV) projelerinden elde edilen elektrik maliyetindeki düşüş dikkat çekici düzeylere inmiştir. 2010 ve 2018 yılları arasında fotovoltaiklerden elde edilen küresel ağırlıklı ortalama elektrik maliyeti (LCOE) %77 oranında azalmıştır (IRENA, 2019b).

PV dizileri, kirlenmeleri veya tozlu yerlerde kullanılmaları durumunda yüzeylerin ara sıra temizlenmesi dışında bakım gerektirmemektedir. Ancak, düzgün çalışmaları için kardan, yabancı otlardan ve diğer gölgeleme kaynaklarından uzak tutulmaları gerekir. PV hücreleri seri olarak bağlanır, bu nedenle bir modüldeki bir hücrenin bile gölgelenmesi tüm modülün verimini önemli ölçüde azaltacaktır (Eiffert & Kiss, 2000).

Geniş kaynak mevcudiyeti, önemli pazar potansiyeli ve maliyet rekabetçiliği göz önüne alındığında, FV'nin önümüzdeki on yıl boyunca çeşitli bölgelerde genel yenilenebilir enerji büyümesini yönlendirmeye devam etmesi beklenmektedir. IRENA'nın REmap analizi, bugünkü seviyelerden güneş PV enerji kurulumlarının önümüzdeki on yıl içinde neredeyse altı kat artarak 2030 yılına kadar küresel olarak 2840 GW kümülatif kapasiteye ulaşabileceğini ve 2050 yılına kadar 8519 GW'a yükselebileceğini göstermektedir. Bu, 2050 yılında toplam kurulu kapasitenin 2018'dekinden neredeyse on sekiz kat daha fazla olacağı anlamına gelmektedir.

Küresel ölçekte, 2050'deki toplam güneş FV kapasitesinin yaklaşık %60'ı şebeke ölçeğinde, geri kalan %40'ının ise dağıtılmış (çatı üstü) olması öngörülmektedir (IRENA, 2019b).

2.3.1 Binaya Bütünleşmiş Fotovoltaik Sistemler

70'li yıllarda ilk uygulamaları yapılan FV sistemler, yakın bir zamana kadar sadece elektrik üretmek için bir çözüm olarak görüldü. Standart panel tasarımları ile sadece bina çatılarında kullanılıyor olsalar da en yaygın mimari tasarım ilkeleri ile çelişki gösterdiler. Son yıllarda, enerji üretim aracı olarak fotovoltaik fikri, güneş unsurlarını binaların ve gerçek inşaat malzemelerinin bütünleşmiş bir parçası olarak görme fikriyle tamamlandı. Bu metamorfoz 40 yıldan biraz fazla bir sürede gerçekleşti. Binaya bütünleşmiş fotovoltaiklerin (BBFV) ilk uygulamasının 1982 yılında Thomas Herzog tarafından denenmesinden bu yana, entegrasyon fikrinin yanı sıra estetik ilkeler, teknoloji ve sosyal alışkanlıklar da giderek değişmiştir. Yaratıcılık ve tasarım felsefeleri, günlük yaşam kalitesi, mimarlık dilleri, inşaat süreçleri ve yaklaşımları, güneş enerjisi tarafından yönlendirilen sürdürülebilir evrim kapsamında değişmektedir. FV'nin çatılar, cepheler ve aksesuar sistemleri de dahil olmak üzere binalara aktarılması, bina yüzeylerini aktif hale getirmenin en umut verici yolu olarak günümüzde çağdaş mimaride ve FV'de yeniliğin somut bir nedenidir. Bu teknik bir olasılıktan çok daha fazlasıdır: yapı estetiği, etiği ve teknolojisinde yeni bir temeldir (Corti, Bonomo, Frontini, Macé, & Bosch, 2020).

Binalarda kullanılan binaya entegre fotovoltaik sistemler, binaların çatı ve cephelerindeki dış cephe kaplama malzemelerinin yerine FV modülü yerleştirir; elektrik üretmenin yanı sıra binalar için kaplama olarak da kullanılabilecekleri gibi bazı durumlarda da gölgeleme elemanı olarak da işlevlendirilebilirler. BBFV standardı EN 50583, beş BBFV kategorisi tanımlamaktadır. Bunlar Şekil 2.5'te gösterildiği gibi; (A) eğimli ya da yatay yüzey alanda uygulanmış, erişilebilir olmayan, (B) eğimli ya da yatay yüzey alanda uygulanmış, erişilebilir olan, (C) düşey yüzeyde uygulanmış, erişilebilir olmayan, (D) düşey yüzeyde uygulanmış, erişilebilir olan ve (E) yapıya harici olarak entegre edilmiş sistemlerdir (International Energy Agency Photovoltaic Power System Programme, 2019).



Şekil 2.5 : BBFV kategorileri (International Energy Agency Photovoltaic Power System Programme, 2019).

Bina görünümünün ve mimari kimliğin korunması gereken mevcut yapıların güçlendirilmesi ve tadilatı sırasında yapı entegreli güneş panelleri inşaat sektöründe önemli bir yer tutmaktadır (Gabr & Mekawy, 2017). Bütünleştirici bir çözümde, çatı veya cephe yapı bileşenleri fotovoltaik bileşenlerle değiştirilir, fotovoltaik sistem bina kabuğunun bir parçası haline gelir ve güç üretme işlevine ek olarak hava koşullarına karşı koruma, ısı yalıtımı, gürültü yalıtımı, güneş gölgeleme ve güvenlik gibi işlevleri yerine getirir (The German Energy Society (DGS), 2008). Sürdürülebilir enerji üretimi için yapıların cephe yüzeylerinin kullanımı aynı zamanda peyzaj alanlarının korunmasını da sağlaması açısından büyük bir potansiyeli barındırmaktadır (Corti, Bonomo, Frontini, Macé, & Bosch, 2020). Çatılarda, çatı malzemesi olarak kullanımı ile çatı kaplama malzemesinden tasarrufla ilgili potansiyel maliyet azaltma avantajının yanı sıra işçilik/inşaat potansiyel verimlilik ve zaman tasarrufu sunmaktadır. Ayrıca, BBFV mevcut binaların yenilenme ve tadilat maliyetlerini azaltabilir ve verimli stratejiler için kullanılabilirler. Klasik çatı kaplama malzemeleri ile karşılaştırıldığında fotovoltaik kaplamalar biraz daha pahalıdır ancak, üretilen elektrikten de elde edilen tasarruf dikkate alındığında, bu yüksek maliyet dengelenmektedir (Solar Power Europe, 2019). Fotovoltaik sistemler için maliyetlerin azaltılmasına yönelik çalışmaların devam etmektedir. Birleşik Devletler Solar Enerji Departmanından alınan verilere göre 2010 yılında konut yapılarında kullanılan FV sistemlerin kilowatt saat başına maliyetleri 50 cent iken, 2020 yılında bu maliyet 12.8 cent'e düşmüştür. Kurumun amacı 2030 yılına kadar bu rakamı 5 cent bandına çekecek teknoloji çalışmalarına destek olmaktır (U.S. Solar Energy Technologies Office, 2022a).

2.4 Binalarda Sürdürülebilirlik

Geleneksel mimari tasarım metodolojileri mekân ve biçim üzerine odaklanır. Son yıllarda değişen enerji yönetmelikleri ve çevre standartları ile, daha az enerji kullanan enerji etkin bina tasarımlarındaki sayınının artış gerçekleşmiştir. Çoğu ülke iklim krizi

nedeniyle, binalardan kaynaklı sera gazı emisyonlarını büyük ölçüde azaltma yolunda yeni stratejiler geliştirmiştir ve karbonsuz bir gelecek için yol haritaları oluşturmuşlardır. Bu çalışmalarda dikkati çeken önemli başlıklardan birisi yeni yapılacak binaların sürdürülebilir olarak tasarlanması gerekliliği ve mevcut yapıların da enerji etkinlik açısından iyileştirmelere gidilmesi yönündedir.

'Sürdürülebilirlik' terimi, 1987 yılında 'Birleşmiş Milletler' Brundtland Komisyonu tarafından Ortak Geleceğimiz adlı raporun yayınlanmasının ardından, nispeten yakın bir tarihte yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Komisyon sürdürülebilirliği ve özellikle de sürdürülebilir kalkınmayı, 'gelecek nesillerin kendi ihtiyaçlarını karşılama olanaklarını tehlikeye atmadan bugünün ihtiyaçlarını karşılayan kalkınma' olarak tanımlamıştır (UN, Our Common Future, 1987). 1960'lı yıllarda başlayan çevre hareketlerinin etkisini 1970 yılında Dünya Günü'nün belirlenmesi, 1972 yılında Stockholm kentinde düzenlenen BM Beşerî Çevre Konferansı ve 1977 yılında Tiflis'te düzenlenen UNESCO Birinci Hükümetler arası Çevre Eğitimi Konferansı gibi etkinlikler ile uluslararası düzeyde etkilerini göstermiştir. Genel olarak sürdürülebilirlik, toplum, ekonomi ve çevre ilişkisi ile tanımlanmaktadır (Williams, 2007). Bu üç başlık birbiri ile ilişkilidir, iklim değişikliği konusunda etkilenen çevrenin, ekonomi ve toplumu da etkilediği gibi birinde meydana gelen değişiklik diğerlerini de doğrudan etkilemektedir. Sürdürülebilirlik bu üç başlık için beraber düşünülmesi gereken bir konudur. Çevresel sürdürülebilirlik gerçekleşmeden, ekonomik ya da sosyal sürdürülebilirlikten bahsetmek gerçekçi bir yaklaşımı temsil etmemektedir.

İklimin bina tasarımına yönelik yaklaşımları şekillendirmesi gerektiği fikri yeni değildir ve mimari söylemin kabul görmüş bir parçasıdır. MS birinci yüzyıla kadar uzanan bir geçmişte Vitruvius, Roma İmparatorluğu'nun uzak bölgelerindeki evlerin tasarımı konusunda tavsiyelerde bulunurken, iklimin evin tarzını belirlemesi gerektiğini söyler (Williamson, Radford, & Bennetts, 2004). Sürdürülebilir mimarlık çevresel kaygılardan ve insanoğlu ile doğa arasındaki karşılıklı ilişkilerin teşvik edilmesinden kaynaklanmaktadır (Chansomsak & Vale, 2008). İlk olarak enerji etkin teriminin binalarda sıklıkla kullanılmaya başlamasının nedeni 1970'lerde meydana gelen petrol kriziydi (Chansomsak & Vale, 2008). 1970'lerin ortalarına gelindiğinde, iklim ve bina tasarımı arasındaki bağlantı, çalışma ve yaşam için yeterli termal koşulların sağlanması konusundan, enerji verimliliğini teşvik etme ve belirlenen

konfor koşullarını karşılamak için gereken yakıt enerjisini azaltma işlevine dönüşmüştür. Bu dönemde birçok ülkede binaların (özellikle konutların) termal performansına ilişkin düzenlemeler getirilmiştir. İklim ve bina tasarımı söyleminin günümüzdeki odağı yine değişmiştir ve artık, en azından siyasi düzeyde, sera gazı (GHG) emisyonlarını azaltarak olası iklim değişikliklerini önleme konusuyla merkezi olarak ilgilenmektedir (Williamson, Radford, & Bennetts, 2004).

İklim krizinin etkilerini azaltmak için binalarda kullanılan enerji çeşidinin yenilenebilir enerji kaynaklarına dönüşümünün hedeflenmesi ile binalarda sürdürülebilirlik kavramı da son zamanlarda inşaat sektöründe ele alınan başlıca konulardan biri haline gelmiştir. Fosil yakıtların kullanımı ve buna bağlı olarak sera gazlarındaki ekstrem artış, sıfır enerji, sıfır emisyon ve karbon-nötr tasarımın yanı sıra yenilenebilir ve onarıcı tasarımın iyileştirici ilkelerini destekleyen artı-enerji ve karbon tutucu yaklaşımlara yönelik araştırmaların giderek daha fazla odaklanmasına yol açmıştır. Sıfıra ulaşmak ve ötesine geçmek için tasarımcılar, güneş ve rüzgârın bol ve yenilenebilir kaynaklarına yenilenen bir ilgi ve bağlılıkla bakmaya başlamışlardır. Yaklaşık 40 yıl önce, R. Buckminster Fuller, tasarımcıları ekolojik tasarım zorluklarımıza cevap bulmak için doğaya ve özellikle de güneşe bakmaya teşvik etmiştir (Guzowski, 2010). Binalar, inşaları, kullanımları ve kullanım dışı bırakılmaları ile doğal çevre ve toplumumuzun sosyal dokusu üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Sürdürülebilir mimari, sürdürülebilir bir yaşam biçiminin hayata geçirilmesine yardımcı olabilir ve hatta bunu teşvik edebilir. Sürdürülebilir binalar, inşaatları, kullanım ömürleri ve kullanım ömürlerinin sonunda ortaya çıkan çevresel etkileri en aza indirerek mecazi anlamda 'Dünya'ya hafifçe basmalıdır' (Sassi & Paola, 2006).

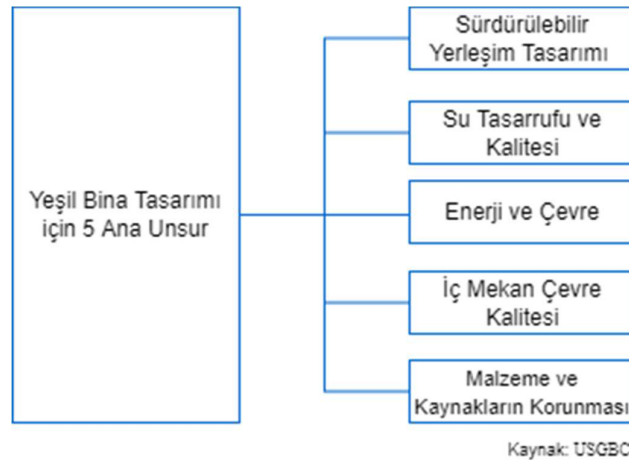
Sürdürülebilir bina, enerji ve su verimliliğini optimize etmek, sistemleri entegre ederek tasarrufu en üst düzeye çıkarmak, inşaat sırasında üretilen atıkları en aza indirmek, iç mekan hava kalitesini iyileştirmek, çevresel olarak tercih edilen ürünleri kullanmak ve alternatif enerji tedarik uygulamalarını teşvik etmek amacıyla konut, ticari, endüstriyel veya kurumsal bir binanın tasarımına, inşasına ve işletilmesine entegre bir yaklaşım kullanan bina ve geliştirme uygulamaları olarak tanımlanmaktadır (CanadianUrbanInstitute, 2008).

Sürdürülebilir olmak için planlama ve mimarlık birlikte çalışmalıdır. Sürdürülebilir tasarım, tasarımcıyı alanla ve alanın yerleşik enerjisiyle bağlantılar tasarlamaya zorlar

-bütünsel ve bağlantılı olarak tasarlamak, binanın ve parçası olduğu çevrenin ve toplumun ihtiyaçlarını ele almak. Sürdürülebilir tasarım ve planlama, bölgesel iklimden ve yerel kaynaklardan yararlanır. Sürdürülebilir tasarım yapmak, tasarımı yerin ekolojisine -toplulukta bulunan malzeme ve enerji akışına entegre etmektir. Çevresel açıdan sürdürülebilir mimari, kirliliğin azaltılmasına, doğal kaynakların korunmasına ve çevresel bozulmanın önlenmesine yardımcı olur. Ekonomik olarak, bina işletmecilerinin su ve enerji için harcamak zorunda oldukları para miktarını azaltır ve tesisin verimliliğini artırır. Sosyal açıdan da yeşil binaların estetik olması ve yerel dokuya en az düzeyde müdahale etmesi gerekir (Ragheb, El-Shimy, & Ragheb, 2015).

2.4.1 Yeşil Bina

Yeşil tasarım, sürdürülebilir tasarımın bir unsurudur. Yerel iklimi ve bina kaynaklarını entegre eden, doğal ışıkla sağlıklı iç mekanlar yaratan ve malzemelerin geri dönüşümünü ve yeniden kullanımını tamamlayan yeşil binalar ve topluluklar, sürdürülebilir bir geleceğin geliştirilmesi için kritik öneme sahiptir. Şebekeye dayalı (yenilenemeyen) enerjiyi verimli bir şekilde kullanan yeşil binalar enerji ve kirlilik krizini yavaşlatır, ancak bu binalara güç veren enerji kaynakları sürdürülebilir değilse, tasarım sürdürülebilir değildir. Yeşil tasarım, ekolojik açıdan hassas malzemeler kullanır ve üretim, inşaat ve yıkım öncesinde, sırasında veya sonrasında çevreyi olumsuz etkilemeyen sağlıklı binalar ve süreçler yaratır (Williams, 2007). Şekil 2.6'da Yeşil Bina tasarımının ana unsurları gösterilmiştir.



Şekil 2.6 : Yeşil Bina Tasarımı Ana Unsurları (USGBC, 2002).

Çalışma kapsamında Yeşil Bina ana unsurlarından olan Enerji ve Çevre ilişkisine odaklanılmıştır. Binanın kendi enerjisini üretmesine olanak sağlayacak tadilat

projelerine gidilip, salınan karbon miktarının azaltılması ve buna bağı olarak binaların çevreye verdikleri zararlı etkilerin azaltılması amaçlanmıştır.

Sera gazı emisyonlarını azaltmak için enerji tüketimini azaltma ve yenilenebilir kaynaklardan enerji üretme zorluklarını ele almak ve karşılamak için net sıfır enerjili binalar ve sıfır emisyonlu binalar (ZEB) kavramları hayata geçirilmiştir. Net sıfır enerjili bina, yüksek enerji verimliliğine ve yıllık bazda enerji tüketimini karşılamaya yetecek kadar yerinde yenilenebilir enerji üretimine sahip bir bina olarak tanımlanmaktadır (Lobaccaroa, ve diğerleri, 2018). Tasarımcılar, binaların işletim sırasında ısıtma, soğutma, aydınlatma ve havalandırma için minimum miktarda enerji tüketmelerini sağlamak için çeşitli strateji, teknik, araç ve malzeme tasarlar ve inşa ederler. Bu stratejiler arasında pasif tasarım ilkeleri de önemli rol oynamaktadır. Doğal güneş ve hava sirkülasyonundan faydalanmak için geleneksel yolları kullanırken, daha fazla enerji etkin olmak için modern teknolojilerden de yararlanırlar. Yüksek performanslı binalarda kullanıcıların yaşam kalitesine büyük önem verilmektedir. Ancak yüksek performanslı bina kullanıcılarının da binalarının enerji etkinliğini sürdürülebilir kılmak için binanın sistemleri hakkında bilgilendirilmeleri ve bilinçlendirilmeleri gerekmektedir.

Birleşmiş Milletler Avrupa Ekonomik Komisyonu'nun Yüksek Performanslı Binalar Girişimi (HPBI), binaların nasıl tasarlandığı, inşa edildiği, işletildiği, bakımının yapıldığı ve nihayetinde söküldüğü ve yapı çevrenin yaşam kalitesini nasıl sağladığı açısından yapı çevreyi dönüştürmeyi amaçlamaktadır. Paris İklim Anlaşması ve 2030 Sürdürülebilir Kalkınma Gündemi hedeflerine ulaşmak için, binaların yaşam kalitesi ve enerji performansının yanı sıra somutlaştırılmış enerjileri ve karbonları da acilen ele alınmasının gerekliliği bu girişimde ele alınmıştır (UNECE, 2022). Somutlaşmış karbon konusunda mevcut yapılarda sadece yıkım aşamasında alınabilecek önlemler varken, bu konu yeni yapılacak yüksek performanslı binaların tasarımları için büyük bir önem arz etmektedir.

2.4.2 Yeşil Bina Sertifikasyonları

Sürdürülebilir mimari sayesinde, yapıların çevreye verdikleri zarar azaltılabilir. Bu nedenle sürdürülebilir mimarinin desteklenmesi için birçok bina değerlendirme sertifikasyon sistemi geliştirilmiş olması son derece önemlidir. Son yıllarda birçok tasarımcı ve işveren binalarının sürdürülebilirlik açısından bir sertifikasyon almasını

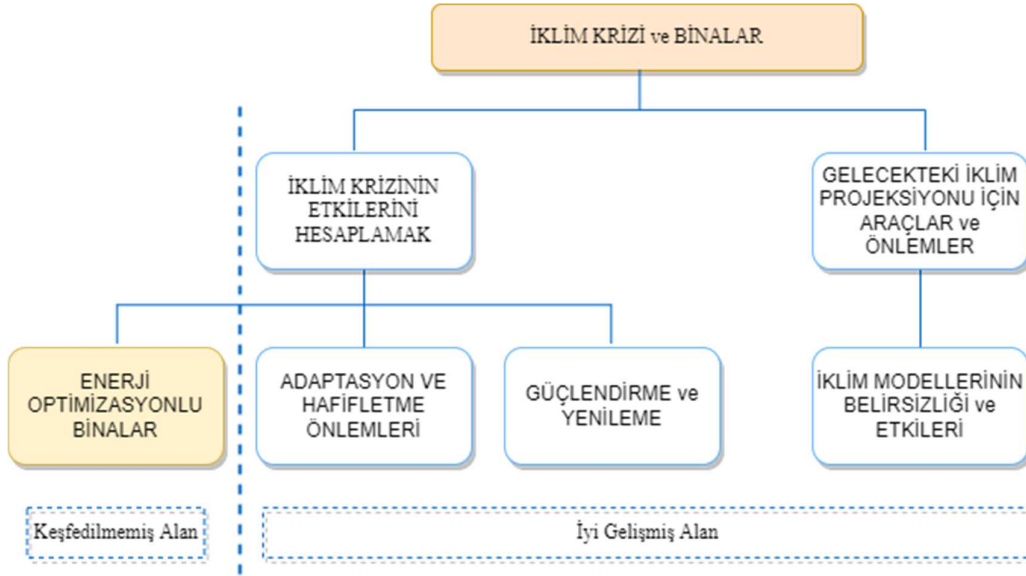
prestij olarak görmüşlerdir. Son yıllarda enerji verimliliği ile ilgili devlet politikaları, sertifikasyon sistemlerine uyumlu binaları bir zorunluluk haline getirmiştir. İlk olarak 1990 yılında İngiltere'de uygulamaya konulan BREEAM (Bina Araştırma Kuruluşu Çevresel Değerlendirme Yöntemi) programı bu yaklaşıma bir örnektir. BREEAM, bina sahiplerini ve işletmecilerini yeşil uygulamaları benimsemeye teşvik etmeyi amaçlayan gönüllü bir çevresel değerlendirme programıdır ve İngiltere'deki yeni ofis binalarının tahminen yüzde 30'unda kullanılmaktadır. Bir binanın çevresel etkilerinin nicel olarak değerlendirilmesi için bir araç ve yetkili değerlendirme prosedürleri sağlar. Değerlendirme, sağlık ve konfor, enerji, ulaşım, su tüketimi, malzemeler, arazi kullanımı, saha ekolojisi ve kirlilik dahil olmak üzere dokuz geniş konuyu kapsamaktadır. Kredi puanları çeşitli performans gerekliliklerine göre biriktirilir ve son olarak bir ağırlık yöntemiyle birleştirilerek nihai bir derecelendirmeye dönüştürülür. Sonuç, Geçer, İyi, Çok İyi ve Mükemmel performansı tanımlamak için bir ölçekte sunulur (Williamson, Radford, & Bennetts, 2004). Benzer bir sertifikasyon sistemi olan LEED Amerika'da kullanılmaktadır. Bu sertifikasyon sistemine mevcut yapılar da başvuruda bulunabilmektedir. LEED sertifika programı, binaların kaynaklarını daha verimli kullanmasını ve binanın yaşam döngüsü boyunca tüm sakinleri için güvenli bir ortam yaratmasını amaçlamaktadır. LEED de BREEAM gibi dokuz ana başlığa odaklanmaktadır. Alman Sürdürülebilir Bina Konseyi tarafından geliştirilen DGNB sertifikasyon sistemi tüm Avrupa'da kullanılmaktadır. DGNB, performansa vurgu yapan bütünsel bir yaklaşım kullanmaktadır. Bu sertifika programı için binalar ekolojik kalite, sosyo-kültürel ve işlev kalitesi, teknik kalite ve süreç kalitesi açısından değerlendirilmektedir. Uzak Doğu bölgesine baktığımızda ise Hong Kong'ta kullanılan sistem BEAM PLUS olarak karşımıza çıkmaktadır ve bu program, toplumu sürdürülebilirlik ve sürdürülebilir uygulamalar konusunda eğitmeyi amaçlamaktadır. Japonya'da 14 ilde yapılacak olan yeni binaların CASBEE sertifikasyon sisteminden geçer not alması zorunlu hale getirilmiştir. Bu program enerji ve kaynak verimliliğine odaklanmaktadır. Orta Doğu ve Kuzey Afrika'daki ilk sertifikasyon sistemi ise GORD'dur (Dunne, 2022). Bu sertifikasyon sistemlerine benzer başka uygulamalar da dünya genelinde bulunmaktadır. Tüm bu sertifikasyon sistemleri enerji simülasyon çalışmalarına dayanmaktadır. Bu nedenle inşaat sektöründe simülasyon programları son yıllarda hızla gelişme göstermiştir. İç mekân kalitesi, enerji etkinlik, gün ışığı analizi, rüzgâr vb. birçok alanda başarılı yazılımlar mevcuttur.

2.5 Bina Tasarımı ve İklim Değişikliği

IPCC iklim değerlendirmeleri, sera gazı emisyonlarının iklimi etkiliyor olduğunu ve bu süreç tersine çevrilmediği takdirde önemli iklim değişikliklerinin meydana geleceğini ileri sürmektedir. İklim değişikliğiyle başa çıkmak, binanın tasarımı sırasında açık ya da örtülü olarak ele alınmasını bekleyebileceğimiz bazı özel konuları içermektedir. Bunlar şunları içerir (Williamson, Radford, & Bennetts, 2004):

- İnşaat malzemelerinin üretimi, taşınması ve montajı sırasında ortaya çıkan sera gazı emisyonlarının azaltılması,
- Binanın işletilmesinden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının azaltılması ve
- Küresel ısınma, daha yüksek yağış yoğunluğu veya artan nem gibi iklim değişikliğinin öngörülebilir veya hayal edilen etkilerine karşı önlem almak.

Nguyen ve diğerleri, iklim değişikliğinin binalar üzerindeki etkisini değerlendiren ve tasarım çözümlerini, sistem iyileştirme çözümlerini ve yeni enerji sistemlerinin kullanımını araştıran birçok çalışmayı incelemişlerdir. İncelemelerinin sonucunda, iklim değişikliği ve binalar üzerindeki etkisine ilişkin çalışmaların hedefleri genel olarak Şekil 2.7'deki gibi 5 ana başlık altında sınıflandırılmıştır. Nyugen ve arkadaşları tarafından eklenen başlık ise enerji optimizasyonlu binalardır ve bu alan çok fazla bir araştırmaya konu olmamıştır.



Şekil 2.7 : İyi geliştirilmiş (sağda) ve keşfedilmemiş (solda) alanları gösteren binalar ve iklim değişikliği araştırmalarındaki başlıca konular (Nguyen, David, Doan, & Le, 2021).

Nyugen ve diğerleri, mevcut koşullar altında enerji optimizasyonu yapılmış binaların gelecekteki iklim değişikliğine etkili bir şekilde cevap verip veremeyeceğinin değerlendirilmesinin hala açık bir konu olduğunu ve daha fazla araştırma çabasına ihtiyaç duyduğunu belirtmektedirler. Bu nedenle yaptıkları çalışmayla gelecek projeksiyonunda şehirlerin ısınma oranları hesaplanmıştır ve Bangkok ve Kuala Lumpur'da %7 ila %12 oranında bir sıcaklık artışının olabileceği, buna bağlı olarak binalarda mevcut kapasiteyle çalışan soğutma sistemlerinin yeterli olmayacağı yönünde görüş bildirmişlerdir.

Tez çalışmasında, binaların işletim sırasında oluşan sera gazı emisyonlarının azaltılması adına mevcut yapıların çatı tadilatlarıyla fotovoltaiik sistemlere uygun hale getirilmesi için optimum çatı tasarımının tasarlanma sürecinin optimizasyonu üzerine çalışılmıştır. Ancak çalışma Nyugen ve diğ.'de değindiği üzere gelecek perspektifinden değil, günümüz koşullarına göre bir simülasyon ve optimizasyon çalışmasını içermektedir.

3. BIM DESTEKLİ ÜRETKEN TASARIM

Bilgisayar bilimlerindeki son gelişmeler ve daha yeşil binaların tasarımına ilişkin gereklilikler, bina sektöründe simülasyon tabanlı optimizasyon yöntemlerinin araştırılmasını ve uygulanmasını ön plana çıkarmaktadır. Son yıllarda, karmaşık mühendislik sistemlerini ele almak için bilgisayar simülasyonu uygulamaları umut verici bir yöntem olarak ortaya çıkmıştır. Bina biliminde, tasarımcılar genellikle bir binanın termal ve enerji davranışlarını analiz etmek ve enerji tüketimini, çevresel etkileri azaltmak veya iç mekân termal ortamını iyileştirmek gibi belirli hedeflere ulaşmak için dinamik termal simülasyon programları kullanırlar. Bir probleme daha az zaman ve emek harcayarak optimal bir çözüm (veya optimuma yakın bir çözüm) elde etmek için, bilgisayar yapı modeli genellikle bir çözüme, yani arama uzayında bir optimalite koşulunu karşılayan bir noktaya giderek daha iyi yaklaşan sonsuz diziler oluşturan tekrarlamalı yöntemlerle çözülür. İşlemlerin yinelenmeli doğası nedeniyle, bu yöntemler genellikle bilgisayar programlama ile otomatikleştirilir. Bu tür yöntemler 'sayısal optimizasyon' veya 'simülasyon tabanlı optimizasyon' olarak bilinir. Günümüzde simülasyon tabanlı optimizasyon, yüksek performanslı binaların (örneğin düşük enerjili binalar, pasif evler, yeşil binalar, net sıfır enerjili binalar, sıfır karbonlu binalar gibi) çeşitli zorlu gereksinimlerini karşılamak için etkili bir önlem haline gelmiştir (Nguyen, Reiter, & Rigo, 2014). BIM tarafından desteklenen performansa dayalı tasarım, bina tasarım disiplinlerinde giderek daha fazla kullanılmakta ve uygulayıcıların bina modellerini verimli bir şekilde oluşturmalarına ve değiştirmesine olanak sağlamaktadır. Bilgisayarların doğruluğu ve hızı, onları bina tasarım sürecinin mühendislik yönlerine önemli bir katkıda bulunur hale getirmektedir. Eskiden elle yapılan hesaplamaların çoğunu çok daha doğru ve hızlı bir şekilde yapabilmeleri, bina tasarımında yeni yaklaşımların ortaya konmasına katkıda bulunmaktadır. Bu nedenle bilgisayar modelleri binaların tasarımında ve işletilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca parametrik modeller bina simülasyon araçları ile eşleştirilmekte ve çalışılan her bir alternatif için hızlı bir şekilde simülasyonların gerçekleştirilmesi sağlanmaktadır. Üretken tasarım süreci ise simülasyon tabanlı optimizasyonların tasarımcılar tarafından kolaylıkla geliştirilmesini sağlamaktadır. Üretken tasarım araçlarında bulunan optimizasyon algoritmaları ile, parametrik olarak tasarlanan modellerin simülasyon sonuçları değerlendirilerek, bir sonraki tasarım alternatifi daha optimum bir çözüm olacak şekilde üretilir. Üretken Tasarım,

parametrik tasarım ve yapay zekayı tasarımcı tarafından dahil edilen kısıtlamalar ve verilerle bir araya getirir. Üretken tasarım yazılımı aynı anda birçok çözüm oluşturulmasını ve hatta bazen geleneksel yöntemlerle keşfedilmesi zor olan benzersiz ve öngörülemeyen çözümlerin bulunmasına yardımcı olmaktadır. Üretken tasarım ile bilgisayar sadece projenin geometrik olarak çizildiği ve bilgilerinin depolandığı yer olarak kalmak yerine, tasarımcının belirlediği ön koşullar ve kısıtlayıcılara göre çok sayıda tasarım alternatifi sunarak projenin eş yaratıcısı olma özelliğine kavuşur. Ancak karar verme sürecinde bir rol oynamazlar ve bu görev tasarımcıya aittir.

Geleneksel yöntemlerle çatıların fotovoltaik panellerle kaplanarak maksimum miktarda elektrik enerjisi üretmesini sağlayacak alternatifi bulunması uzun bir çalışma süresi gerektirmektedir ve projelerin sıkı teslim tarihleri ve bütçeleri olduğu düşünüldüğünde geleneksel metodlar kullanılarak bu tür bir dönüşüm projesinin yapılmasının etkin bir çözüm olmadığı görülmektedir. Yapılan bu çalışmada BIM destekli üretken tasarım metodu kullanılarak, kısa sürede birçok tasarım alternatifi değerlendirilip, optimum çözüme ulaşmak ya da mümkün olduğunca yaklaşmak amaçlanmıştır.

3.1 Parametrik Tasarım

Oxford Sözlüğü parametreyi “bir şeyin nasıl yapılabileceğini belirleyen veya sınırlayan şey” olarak tanımlamaktadır. Parametrik tasarım ise parametrik düşünceye dayalı bir süreçtir ve 2013 yılında W. Jabi Parametrik Tasarımı "Tasarım hedefi ile tasarım çıktısı arasındaki ilişkiyi birlikte tanımlayan, kodlayan ve netleştiren parametrelerin ve kuralların ifade edilmesini sağlayan algoritmik düşünceye dayalı bir süreç" olarak tanımlamıştır (Jabi, 2013). Parametrik modelleme, analiz, optimizasyon ve otomasyon araçlarıyla birleştirilebilen esnek ve uyarlanabilir modellerin oluşturulmasını sağlayarak bina tasarımının genel verimliliğini artırır (Sanhudo & Martins, 2018). Tasarımcıların önerilen herhangi bir tasarımın sonucunu çeşitli açılardan görselleştirmelerine ve aralarından seçim yapabilecekleri çeşitli tasarım seçeneklerine sahip olmalarına imkân tanır, bu da herhangi bir eksikliğin öngörülmesine ve tasarımın geliştirilmesine yardımcı olur (International Energy Agency Photovoltaic Power System Programme, 2019).

Tüm parametrik tasarım sistemleri çeşitli özellikleri paylaşır ve benzer yapılara sahiptir: nesne yönelimi, sınıflar veya aileler, yöntemler ve parametreler.

▪ *Nesne Yönelimi*

Modern parametrik yazılım genellikle tasarımlarında nesne yönelimli yaklaşımı kullanılırlar. Bu nesne yönelimli programlama (OOP) olarak adlandırılır. Kullanıcı, daireler, küreler, kapılar ve duvarlar gibi nesneler yaratarak ve değiştirerek, iç algoritmik yapısını yansıtacak şekilde parametrik bir sistemle etkileşime girer. Parametrik bir sistem genellikle bu nesneleri erişilebilen, aranabilen ve değiştirilebilen nesne yönelimli bir veritabanında saklar. Her nesne, özniteliklerini belirleyen değerlere sahiptir, örneğin, bir daire neredeyse her zaman merkez veya konum adı verilen bir öznitelik ve yarıçap adı verilen başka bir öznitelik içerecektir. Ayrıca muhtemelen daireyi tanımlayan isim adlı bir öznitelik de içerecektir. Bir nesnenin belirli bir değerinin, ilişkili olduğu nesne ve özniteliğe referansla temsil edilmesi olağandır. Popüler bir gösterim, bir niteliği ana nesnesinden ayırmak için nokta kullanmaktır: `object.attribute`. Böylece, eğer biri `daireA` adlı bir dairenin yarıçap değerine referans vermek isterse, şu terimle karşılaşabilir: `daireA.radius`. Benzer şekilde, aynı dairenin X eksen konumu, `daireA.Position.X`'te olacaktır. Parametrik tasarımda, nesneler, öznitelikler ve değerler birbirleriyle ilişki içindelerdir. Bu nedenle bir nesnenin değerinde yapılacak değişiklik tüm tasarımın etkilenebileceği bir dalga etkisi yaratabilir (Jabi, 2013).

▪ *Aileler ve Kalıtlar*

Belirli özellikleri paylaşan nesneler 'bir sınıfın veya nesne ailesinin üyeleri olarak' düzenlenebilir. Örneğin bir kapı sınıfı veya ailesi, birçok bireysel aile üyesini (menteşeli kapılar, sürgülü kapılar, katlanır kapılar, vb.) içerebilir. Birkaç nesneyi bir aile içinde gruplamanın avantajı, daha sonra belirli nitelikleri diğer aile üyeleriyle paylaşabilmeleri ve belirli nitelikleri ebeveynlerinden miras alabilmeleridir. Bu paylaşılan nitelikleri yalnızca bir kez, bir ebeveyn nesnesinde düzenlemek, her alt nesne için tüm nitelikleri ve değerleri özelleştirmek zorunda kalmaktan çok daha verimlidir (Jabi, 2013).

▪ *Yöntemler*

Nesne yönelimli bir sistemde yöntemler, bir nesnenin niteliklerini değiştirerek nesne üzerinde işlem yapan işlevler ve algoritmalarıdır. Dairelerin, karelerin ve

üçgenlerin nasıl çizileceğini belirten büyük bir merkezi talimatlar kümesine sahip olmak yerine, nesne yönelimli bir sistem bu talimatları her nesnenin sınıfına veya ailesine kapsülleyerek temsilci atar. Böylece bir nesnenin nasıl oluşturulacağı veya değiştirileceği, nesnenin kendisinde bir yöntem olarak kodlanır. Bir daire söz konusu olduğunda, böyle bir yöntem, merkezinin konumunu ve yarıçap özelliğinin değerini belirterek daireyi oluşturmak olabilir. Başka bir yöntem de daireyi çevreleyen üç nokta belirlemek olabilir. Sistem basitçe bir daireye kendini çizmesini söyleyebilir veya bir kapıdan açılmasını tersine çevirmesini isteyebilir. Modern bir parametrik sistemde, küre gibi basit bir nesne bile çok sayıda parametre ve yöntemle sahip olabilir (Jabi, 2013).

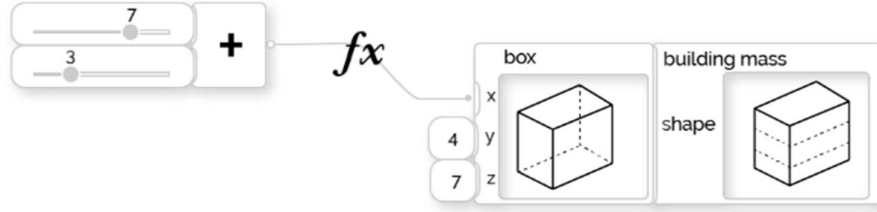
- *Parametreler*

Parametrik CAD yazılımında parametre terimi genellikle diğer değerleri belirleyen denklemlerdeki değişken bir terimi ifade eder. Bir parametre, bir sabitin aksine, bir dizi olası değere sahip olmasıyla karakterize edilir. Parametrik bir sistemin en etkileyici özelliklerinden biri, birkaç kontrol parametresinin değerini değiştirerek birçok tasarım varyasyonunu keşfetme yeteneğidir (Jabi, 2013).

Parametrik tasarım, sezgisel bir çözüm arayışına dayanmak yerine, genellikle kurallara ve girdilere göre bir sonuç veren hassas, adım adım teknikler içerir. Tasarım sürecini kurallara dayalı titiz bir sistem olarak düşünmenin bu yolu algoritmik düşünme olarak adlandırılır. Her yazılım parçasının arkasında, kullanıcıyla etkileşime giren, olaylara yanıt veren ve verileri okuyan, işleyen ve görüntüleyen bir dizi kesin komut ve yöntem vardır. Bu yönerge ve teknikler toplu olarak algoritma olarak adlandırılır (Jabi, 2013).

Temel olarak parametrik terimi matematik kökenlidir ve denklem sonuçlarıyla oynamak için değiştirilebilen belirli parametrelerin veya değişkenlerin kullanılmasını ifade eder. Buna göre, parametrik tasarım ilkesi, tasarım öğeleri arasındaki ilişkinin karmaşık geometriler oluşturmak için yeniden formüle edilebilen parametreler olarak gösterildiği, bu geometrilerin öğelerin parametrelerine dayandığı ve bu parametrelerin değiştirilmesiyle eş zamanlı olarak yeni şekillerin oluşturulduğu matematiksel tasarım olarak tanımlanabilir (Eltaweel & Su, 2017). Bu tanımın görsel olarak ifadesi Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Sonuç ürün ile parametreler arasındaki bağlantı algoritmalar ile

sağlanmaktadır. Modeller, kullanıcı tanımlı algoritmalara göre otomatik olarak oluşturulur ve algoritma içindeki parametreler değiştirilerek tasarımlar kolayca kontrol edilebilir.



Şekil 3.1 : Parametrik Tasarım Çalışma Prensibi (Autodesk, 2022).

Parametrik tasarım yaratıcı çözümler üretebilir, karmaşık ilişkilerle ilgilenebilir ve bunları parametrik olarak kontrol edebilir ve bir dizi biçimsel alternatifi tanımlamak amacıyla tasarım öğeleri arasındaki ilişkileri ayarlamak için parametreleri kullanır. Dahası, parametrik tasarım, algoritmik yöntemler kullanarak mimari tasarım sorunlarına çoklu çözümlerin geniş bir şekilde keşfedilmesini sağlar (Eltaweel & Su, 2017). İranlı matematikçi Muhammad ibn Musa Al Kwarizmi'nin 9.yy'da yazdığı *Hisab el-cebir ve el-mukabala* kitabı algoritmik ifadelerin ilk yazılı kaynağıdır (O'Connor & Robertson, 2022). Bir algoritma genellikle girdi alır (boş veya tanımsız olabilir), bir dizi birbiri arkasından gelen aşamalardan geçer ve bir son durum ve bir dizi çıktı ile sona erer. Algoritmik düşünme, tasarımcıların tanımlanmış bir çözüm alanı içinde alternatifleri rasyonel hale getirmesine, kontrol etmesine, yinelemesine, analiz etmesine ve aramasına olanak tanır (Jabi, 2013). Algoritmik tasarım, model üretmek için algoritmaları kullanan bir tasarım modelidir, bu nedenle de üretkendir. Bununla birlikte, algoritmik tasarımda, algoritma ile üretilen model arasında bir ilişki vardır, böylece kullanıcı, modelin bir bölümünü üreten algoritmanın parçalarını tanımlayıp takip edebilir. Bu açıdan algoritmik tasarımda, algoritma modele özdeştir ve daha sınırlı sayıda şaşırtıcı sonuç ürettiği için üretken tasarımın alt kümesi olarak görülebilir (Caetano, Santos, & Leita, 2020).

Parametrik modelleme, binaların estetik ve performans ölçütleri temelinde üretken biçimlendirme ve form bulmaya olanak tanır. Daha sonraki bir tasarım aşamasında bağlamlar değiştiğinde, parametrik modelleme nesnelerin otomatik olarak güncellenmesini sağlar. Tasarımcılar parametrik modellemeyi, enerji simülasyonu, yapısal analiz ve akustik simülasyon dahil ancak bunlarla sınırlı olmamak üzere bina

tasarımının farklı alanlarında performans analizi sürecine entegre edebilirler. Parametrik çalışmalar, bina enerji performansının optimize edilmesinde önemli bir potansiyel katkı sağlamaktadır. Bununla birlikte, tasarımcılar, enerji modellerinin hazırlanmasındaki zorluk ve uzun simülasyon çalışma süresi nedeniyle parametrik bina enerji performansı analizlerini nadiren kullanmaktadır. Bu sorunu çözmek için iki yaygın yaklaşım vardır, bunlardan ilki çalışma sayısını azaltan hesaplama algoritmaları geliştirmek, bir diğeri ise bulut tabanlı simülasyon yoluyla hesaplama gücünü artırmaktır (Asl, Bergin, Menter, & Yan, 2014). * Parametrik modelleme inşaat endüstrisinde Bina Bilgi Modellemesi (BIM) araçları kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Revit ve Rhino gibi 3D CAD yazılımlarına dayanan parametrik modelleme araçları, parametrik modellerin oluşturulmasına olanak tanıyan görsel programlama (Dynamo ve Grasshopper gibi) arayüzleri sunarak bu nitelikleri genişletmektedir. Ayrıca, bu araçlar kendi ana işlevlerini genişleten eklentiler aracılığıyla kapsamlı özelleştirmelere de olanak sağlamaktadır. Genellikle üçüncü taraflarca oluşturulan bu eklentiler, performans simülasyonlarının BIM ortamına dahil edilmesine izin verir, optimizasyon tekniklerini kullanarak problem çözmeyi kolaylaştırır ve prosedürleri büyük ölçüde otomatikleştirebilir. Bu da bu araçlara AEC'deki projelerin büyük çoğunluğunda uygulanabilecek büyük bir esneklik kazandırmaktadır (Sanhudo & Martins, 2018).

3.2 BIM

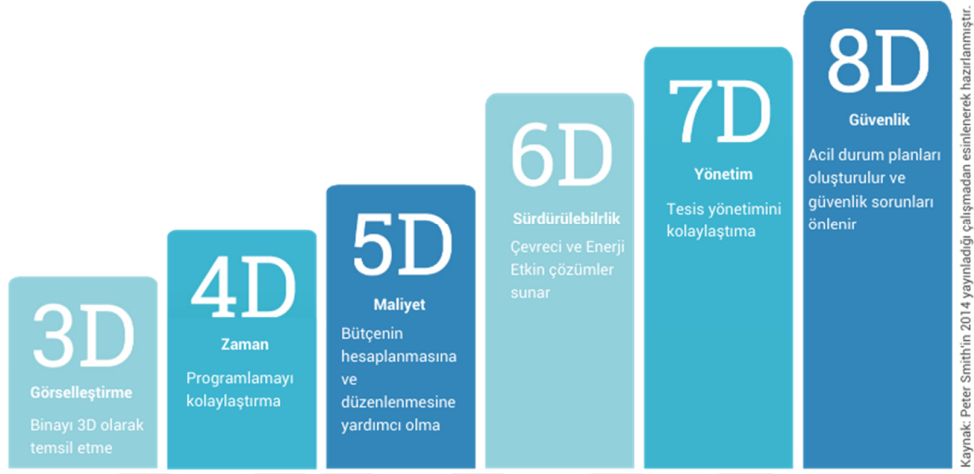
Bina Bilgi Modellemesi (BIM) mimarlık, mühendislik ve inşaat (AEC) endüstrilerindeki en umut verici gelişmelerden biridir. BIM teknolojisi ile bir binanın sanal bir modeli dijital olarak inşa edilir. Bilgisayar tarafından oluşturulan model tamamlandığında, inşaat, imalat ve tedarik için gerekli hassas geometri ve ilişkili verileri içeren bir 3D model sağlar. BIM ayrıca bir binanın yaşam döngüsünü modellemek için gereken işlevlerin çoğunu barındırır, yeni inşaat yetenekleri ve bir proje ekibi arasındaki roller ve ilişkilerdeki değişiklikler için temel sağlar. Uygun şekilde uygulandığında BIM, daha düşük maliyetle daha nitelikli binalar elde edilmesini ve proje süresinin kısılmasını sağlayan daha bütünleşik bir tasarım ve inşaat sürecini mümkün kılar. (Eastman, Teicholz, Sacks, & Liston, 2008). BIM (Yapı Bilgi Modellemesi), CAD'in (Bilgisayar Destekli Tasarım) gelişmiş bir formu olarak değerlendirilebilir ve BIM teknolojisinin uygulanması, farklı proje katılımcıları

arasında artan iş birliği ve daha az çakışmalar sayesinde düzeltmeler ve iyileştirmeler için daha az zaman harcanmasına yol açarak inşaat sektörünün daha verimli olmasına katkıda bulunmaktadır (Ford, ve diğerleri, 1995). Bina Bilgi Modellemesi (BIM), planlama, tasarım, inşaat, işletme, bakım ve yıkım aşamaları da dahil olmak üzere tüm bina projesi yaşam döngüsü boyunca çok disiplinli bilgi depolama, paylaşma, değiş tokuş etme ve yönetme için işbirlikçi bir yoldur (Eastman, Teicholz, Sacks, & Liston, 2008). Bir yazılımdan çok daha fazlası olan BIM, farklı disiplinleri destekleyen ve potansiyel birlikte çalışabilirliklerine dayalı olarak çok boyutlu bir yapıyı çevre yaratan çoklu veri kaynakları ve yazılım araçlarından oluşur. Bu araçlar, Mimarlık, Mühendislik ve İnşaat (AEC) endüstrisi için bina projelerinin planlama, tasarım, inşaat, işletme ve bakım (O&M) süreçlerini optimize etmek amacıyla yazılım sağlayıcıları tarafından geliştirilmektedir. Büyük bir teknolojik araç olarak değerlendirebileceğimiz BIM, bir binanın konsept, tasarım, inşaat ve işletme paradigmasını hızla değiştirmiştir. 1970'lerde, BIM'in ilk araştırması parametrik modelleme araştırması olarak başlamış ancak BIM'in inşaat endüstrisinde pratik uygulaması 2000'lerin ortalarından itibaren yaygın olarak kullanılmıştır. O zamandan itibaren BIM hızla AEC teknolojisinin merkezi haline gelmiştir (Ma, Wang, Jun, Xiang, & Sun, 2021). Akademi ve endüstrideki kapsamlı araştırma ve geliştirme çalışmaları, analiz, tasarım ve detaylandırma için birçok güçlü ve pratik yapı bilgi modelleme aracını beraberinde getirmiştir (Sacks & Charles M. Eastman, 2004). Son birkaç yılda, BIM'in artan önem ve hızla gelişmesi, gelecekte AEC sektörü için en umut verici teknoloji olacağını kanıtlar niteliktedir. Son yıllarda, birçok ülke AEC sektöründe BIM uygulamalarını teşvik etmeye başlamıştır. Birçok farklı devlet politikaları ve örnek uygulamalar BIM'in küresel gelişimini destekler niteliktedir. Örneğin Birleşik Krallık İnşaat Strateji (GCS) kurumu Nisan 2016 yılından sonra yapılan tüm inşaat projeleri için BIM'in elektronik ortamda kullanımını zorunlu hale getirmiştir (Tang, Chen, Tang, Wu, & Trofimova, 2017).

3.2.1 BIM Boyutları

Yapı Bilgi Modellemesi (BIM), projeyi tüm aşamaları boyunca etkili bir şekilde yönetmek için bir araç veya süreç olarak herhangi bir inşaat projesine uygulanabilir. BIM, her bir proje görevi veya operasyonuna özgü aşamalı ve bütünsel bir uygulamaya izin vermek için farklı boyutlarda (3D, 4D, 5D, 6D ve 7D) geliştirilmiştir. Şekil 3.2, bu boyutları göstermektedir. Bu evrensel referanslar, farklı proje ihtiyaçlarına göre

oluşturulmuştur ve görev odaklıdır. Böylece, BIM tasarım, inşaat veya işletme aşamasında kullanılabilir (Dijmarescu, 2020).



Şekil 3.2 : BIM boyutları (Smith, 2014).

3 Boyutlu BIM, BIM'in en basit, en kolay ve en çok kullanılan boyutudur. 3D BIM ile, çakışma tespiti, prefabrikasyon ve yalın tekniklerin en kolay şekilde uygulanması, iki boyutlu (2D) CAD otomatik çizimi, birden fazla tasarım disiplininin daha erken iş birliği ve çalışılan binanın 3D görselleştirilmesi mümkündür (Sanhudo, 2016). 3D BIM ile, sorunlu unsurların revizyonu otomatik olarak yüklenebilir ve 3D model aracılığıyla multidisipliner inşaat ekiplerinin kullanımına sunulur tüm bilgilerin merkezleştirilmesi ve çizimlerin eş zamanlı olarak güncellenmesi sağlanabilir (Dijmarescu, 2020). 3D modelleme 1960'lardan bu yana önemli bir çalışma konusu olmuştur. Görüntüleme için çok yüzlü form kompozisyonlarını resmetme kapasitesi ilk olarak 1960'ların sonlarında inşaat, film yapımcılığı, bilgisayar oyunları gibi endüstrilere dahil etme potansiyeli ile geliştirilmiştir (Sanhudo, 2016).

4D BIM, inşaat iş akışlarını modellemek için zamanlama bilgilerinin eklenmesi ile oluşan BIM modelini tanımlamaktadır. Zaman boyutunun eklenmesi, proje ekibinin inşaatın nasıl ilerleyeceğini daha iyi görselleştirmesini sağlar. Yüklenici açısından bu oldukça önemlidir. 4D BIM, yeni modelleme araçlarının kullanımıyla ilk kez mümkün olduğunda sektör için ileriye doğru atılmış büyük bir adım niteliğini taşıyordu. 3D modellerin koordinasyonu ve paylaşımı yoluyla tasarım ve inşaat ekibi arasındaki iş birliğini ortaya koymaktadır (Hamil, 2022). Zaman verisinin modele bağlanması, Kamat ve Martinez'in 2011'de belirttiği gibi, PERT ve Gantt şemaları gibi standart proje yönetim araçları vasıtasıyla elde edilen bilgilerin mobilizasyon ve saha

temizliğinden bitirme işlerine kadar her faaliyetin görüntülenmesine olanak sağlamaktadır (Sanhudo, 2016). Program ve şantiye arasındaki bu görsel bağlantı, planlama ve inşaat sırasında en uygun kararın alınmasını, uygun faaliyet bağlantısının, çalışma alanı lojistiğinin ve işgücü, malzeme, ekipman ve şantiye alanının kullanımını içeren uygulanabilir kaynak tahsisinin sağlanmasını mümkün kılmaktadır (Chau, Anson, & Zhang, 2004; McKinney, Kunz, & Fischer, 1998).

5D modelinin özünde, 4D BIM'e eklenen maliyet unsuru yer almaktadır. Bu, paydaşlara projenin fizibilitesi hakkında bir fikir veren tahmini bir maliyetle birlikte tüm faaliyetlerin görselleştirilmesini ve ilerlemesini mümkün kılar. Metraj listeleri tedarikçi verileriyle (örneğin ürün katalogları) ilişkilendirilerek ihale süreci için daha doğru bir kapsam elde edilebilir. Maliyet hesaplamalarının doğruluğu elbette farklı ekipler tarafından sağlanan ve Ortak Veri Ortamında (CDE) paylaşılan bilgilere bağlıdır. Ancak maliyetin bir modele bağlanması, paydaşların tahmini 3 boyutlu olarak görmelerini, değişiklik bildirimlerini almalarını ve proje maliyetini takip ve tahmin etmelerini sağlar. Dahası, 5. boyut, proje aşamaları boyunca gerçek zamanlı bir maliyet görünümünü kolaylaştırarak, verilerin yazılımda düzenli olarak güncellendiği varsayıldığında, maliyet yöneticilerinin proje maliyetini izlemesini sağlar. 5D BIM, tüm ekiplerle otomatik olarak paylaşılacak ve proje sırasında herhangi bir zamanda maliyet raporları üretebilecek büyük miktarda veriyi tutma kapasitesine sahiptir (Dijmarescu, 2020).

6D BIM'in ortaya çıkışı, küresel bağlamda sürdürülebilirlik bilincinin yükselmesiyle büyük ölçüde bağlantılıdır ve bu nedenle, AEC Endüstrisinin ekonomik, sosyal ve çevresel yönleri arasındaki tüm sürdürülebilirlik ilişkilerini kapsar. Ardışık olarak, 6D'nin sadece geniş etki alanı nedeniyle değil, aynı zamanda sürdürülebilirlik özelliklerinin zaman içinde değişime tabi olması nedeniyle de BIM'in diğer boyutlarını etkileyebileceği ileri sürülmüştür (Kapogiannis, Gaterell, & Oulasoglou, 2015). Bu nedenle, bir binanın tüm yaşam döngüsü aşamalarını, yani malzeme üretimi, inşaat, işletme, bakım, yıkım ve bertarafı ele alan bir sürdürülebilirlik değerlendirmesine ihtiyaç duyulmaktadır (Yung & Wang, 2014). Sürdürülebilirliğin BIM modeline dahil edilmesi, tasarımcıların yaşam döngüsü analizi yoluyla projenin belirli unsurları için karbon hedeflerini karşılamasına, üçlü alt çizgi etkilerini belirlemesine ve enerji analizini gerçekleştirmesine olanak tanır. Ayrıca gün ışığı, doğal ve mekanik havalandırma, su verimliliği, ısı etkisi ve yenilenebilir enerjilerin bina projesinin erken

aşamalarında daha kolay dahil edilmesini sağlar. Son olarak, tasarım kararlarının uygun şekilde doğrulanmasına veya farklı proje seçeneklerinin test edilmesine ve karşılaştırılmasına olanak tanır (Hardin, 2009).

Tesis Yönetimi, finansal yönetimden mekanik, elektrik, sıhhi tesisat ve yangından korunma gibi bina sistemlerinin temizlik ve bakımına kadar her şeyi kapsayan geniş bir kavramdır (Atkin & Brooks, 2009; Becerik-Gerber, Jazizadeh, Li, & Calis, 2012). Tesis Yönetimi ile enerji tasarrufu, binaların ömrünün uzatılması, gelecekteki kullanıcıların memnuniyetinin artırılması ve işletme maliyetlerinin azaltılması amaçlanmaktadır (Wang, Bulbul, & Lucas, 2015). Bu süreç 7D BIM olarak adlandırılan süreçle kolaylaştırılabilse de işletme ve bakım aşamasında mal sahiplerinin BIM konusunda deneyim eksikliği nedeniyle "inşaat sonrası kullanımı hala gecikmektedir" (Giel & Raja, 2015). Ancak son yıllarda yapılan çalışmalar, yaşam döngüsü maliyetinin ilk yatırım maliyetinden beş ila yedi kat, inşaat maliyetinden ise üç kat daha yüksek olduğunu ortaya koyarak ciddi bir yaklaşım değişikliğine yol açmıştır (Lee, An, & Yu, 2012). Bu durum, BIM'in tasarım ve inşaat aşamasının ötesinde de faydalı olmaya devam edecek şekilde kullanılması gerektiğine dair farkındalığı artırmıştır (Tereno, Anumba, Gannon, & Dubler, 2015). 7D BIM, bina işletim performansının tüm yönleriyle ilgili bir FM veritabanı için ortak bir arayüz oluşturur. Sonuç olarak, bilgi yönetimi, ekipmanların değiştirilmesi veya onarılması, konfor koşullarının iyileştirilmesi, acil durum yönetimi, enerji izleme ve kontrolü ve hatta personel eğitimi gibi görevler hem daha hızlı hem de daha ucuz hale getirilebilir (Sanhudo, 2016).

8D BIM, tasarım ve şantiye güvenliği arasındaki bağlantıyı yöneterek bina bilgi setinin sağlık ve güvenliğine katkıda bulunur. Bu teknik, inşaat sektöründeki tehlikelerin önlenmesinde etkili bir yöntemdir. Bu modelleme aracını kullanan inşaat uzmanları, riskleri inşaat öncesi veya tasarım-inşaat aşamasında tespit ederler (Singh, 2022).

Tez çalışması kapsamında 6D BIM boyutu ele alınacaktır. Enerji etkin binalara yönelik artan talep, AEC sektörünü BIM'in sunduğu potansiyeli kullanmaya teşvik etmiştir. İnşaat sektörünün tasarım, yapı inşası ve tesisin yönetimi sırasında BIM destekli projelerin sağladığı otomasyonu ve buna bağlı olarak kazanılan süre ve maliyet kazançlarını gördükçe bu konuya olan ilgileri artmıştır. Simülasyon ve performans analizi, matematiksel optimizasyon ve süreç optimizasyonu gibi özellikler, inşaat sektöründe yenilikler getirmeye başladı ve farklı model alternatiflerinin dijital ortamda

oluşturmanın yeni bir yoluna yönelim sağlamıştır (Eastman, Teicholz, Sacks, & Liston, 2008; Azhar, 2011). Şu anda sektör, üç boyutlu modellemeyi sadece bir temsil olarak değil, aynı zamanda gerçek koşulları test etmek ve paydaşların ihtiyaç duyduğu önemli bilgileri elde etmek için sanal bir prototip olarak algılayarak dijital bir modelin arkasındaki anlayışı teşvik etmektedir. Bu simülasyonlar tasarımın ilk aşamalarında ne kadar verimli ve doğru olursa, projenin genel başarı potansiyeli de o kadar artmaktadır. Bu amaca ulaşmak ve daha iyi simülasyon sonuçları elde etmek için parametrik modellemenin etkili bir araç olduğu kanıtlanmıştır (Sanhudo & Martins, 2018).

3.2.2 Yeşil BIM

Enerji krizi, hızlı kentleşme ve iklim değişikliği nedeniyle yapıli çevrede sürdürülebilirlik kaygısı artmıştır. Enerji kaynakları üzerindeki ekonomik ve çevresel kısıtlamalar göz önüne alındığında, enerji konusu binaların tasarımında ve işletilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bina sektörü, enerji tüketimine ve çevresel etkilere en büyük ölçüde sebep olan sektörlerden biridir. Birçok çalışma, çeşitli pasif ve aktif çözümler yoluyla sürdürülebilir bina tasarımına ulaşmanın yollarını araştırmıştır (Lim, ve diğerleri, 2015; Nielsen, Jensen, Larsen, & Nissen, 2016). Ancak, sürdürülebilir bina tasarımında karar verme süreci karmaşık bir süreçtir. Bu nedenle, hesaplama yöntemlerinin uygulanması yoluyla sürdürülebilir bina tasarımında daha yüksek bir otomatikleştirmenin sağlanması için daha fazla çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır (Lim, ve diğerleri, 2018).

"Yeşil BIM" terimi, "binanın enerji verimliliği performansını artıran ve belirlenen sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşılmasını kolaylaştıran proje yaşam döngüsü boyunca koordineli ve tutarlı bina verilerinin üretilmesi ve yönetilmesine yönelik model tabanlı bir süreç" olarak tanımlanan son literatürde giderek daha popüler hale gelmiştir (Wong & Zhou, 2015). Yeşil BIM araçları, bina sürdürülebilirlik analizi için termal, gün ışığı, enerji ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonları gibi farklı süreçleri entegre etmiştir. BIM verileri, hesaplamalı algoritma kullanarak çeşitli sürdürülebilirlik analizleri için kullanılmaktadır. Bu nedenle BIM kullanımı sürdürülebilir bina tasarımlarını optimize etmek için karar verme sürecini destekleme potansiyeline sahiptir. Tasarım optimizasyonu, sürdürülebilir tasarımda BIM'in en önemli katkılarından biridir. Sürdürülebilirlik amaçlı BIM iş akışı ve BIM yazılımı bugün piyasada iki adımda mevcuttur. İlk adım uygun olan BIM yazılımı kullanılarak temel

modelin oluşturulması, ikinci adımsa, bu modelin uygun BIM tabanlı analiz araçlarına aktarılmasıdır (Lim, ve diğerleri, 2018). Parametrik modelleme ve BIM'in entegrasyonu, sürdürülebilir bina tasarımına büyük fayda sağlayabilecek yeni bina modelleme trendidir. Parametrik modelleme, parametreleri ve aralarındaki ilişkileri değiştirerek bir tasarım alanının yaratıcı bir şekilde keşfedilmesini sağlar (Azhar, Brown, & Farooqui, 2009). BIM, bina projelerinin daha hızlı ve daha ekonomik bir şekilde oluşturulması ve yönetilmesi için yöntemler ve araçlar sağlayan model tabanlı bir süreçtir (Eastman, Teicholz, Sacks, & Liston, 2008). BIM, bina enerji performansı analizi için gereken verilerin çoğunu içerebilir ve uygun şekilde kullanılırsa, hataları azaltırken bina enerji simülasyonu için girdi verilerinin hazırlanmasında önemli miktarda zaman ve çaba tasarrufu sağlayabilir (Asl, Bergin, Menter, & Yan, 2014).

3.2.3 Bina Performans Analizleri

Sürdürülebilir kalkınmanın sağlanması için günümüzde, binaların performansını ve kaynak kullanımını optimize ederek enerji tüketiminin ve karbon ayak izinin azaltılmasına büyük önem verilmektedir. Bina enerji modellemesi, bina performans analizi için uygulanabilecek stratejilerden biridir. Binaları daha sürdürülebilir hale getirmek için ulusal bina yönetmelikleri, AB Binalarda Enerji Performansı Direktifi (EPBD), BREEAM ve LEED değerlendirmeleri ve yerel planlama politikaları dahil olmak üzere birçok düzenleyici ve sertifikasyon teşviki bulunmaktadır. Hesaplamalı simülasyon programları, önerilen bina tasarımları tarafından kullanılan enerjinin hesaplanmasını sağlamaktadır. Bu, termal, güneş ve hava akışı modellemesini içerir ve binanın geometrisi, malzemeleri, kontrolü ve sistemleri ile ilgilidir (Evins, 2013). Bina Bilgi Modelinin Performans Analizi araçlarıyla entegrasyonu, genellikle zahmetli ve zor olan analizleri büyük ölçüde basitleştirir. Bu yaklaşım, mimarlara tasarım sürecinin başlarında tasarım alternatifleri hakkında anında geri bildirim sağlayan araçlarla hızlı bir şekilde analiz yapmalarını sağlar (Azhar, Brown, & Farooqui, 2009). Hesaplamalı simülasyon, önerilen bina tasarımları tarafından kullanılan enerjinin ölçülmesini sağlar. Enerji analiz programlarının temel alanları, gün ışığı, güneş radyasyonu, hava akışı, akustik, iç mekân hava kalitesi şeklinde tanımlanabilir. Bu ölçümler, binanın geometrisi, malzemesi, işletim sırasındaki kontrolü ve kullanılan sistemler ile ilgilidir. Bu simülasyonlar için kullanılan başlıca programlar, Ecoteck, TRNSYS, Energyplus, Doe-2, OpenStudio, Daysim, Radiance olarak sıralanabilir. Bu yazılımlar bina tasarım sürecinde doğru bir şekilde

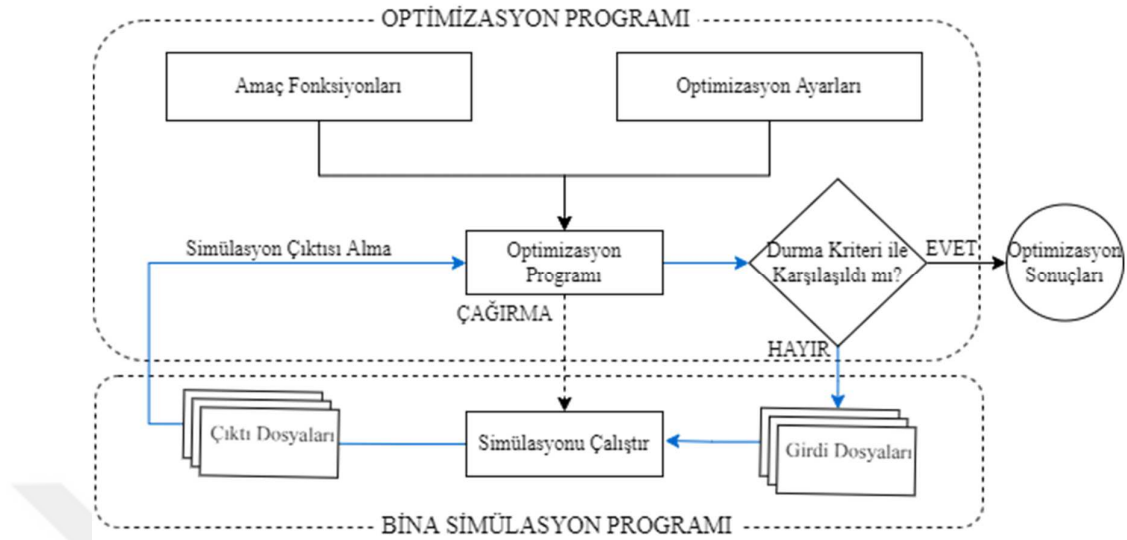
kullanıldıklarında, tasarım daha iyi enerji performansı sağlayabilecektir. Ancak bu tür yazılımlar genellikle mekanik mühendisleri için tasarlanmışlardır ve tasarım aşamasında kullanmayı planlayan mimarlar için mevcut bilgilerin ve girdi/çıkış parametrelerinin tanımlanması zorlu bir süreç olarak görülmektedir. Ayrıca, bina enerji simülasyonları genellikle senaryo bazında kullanılır; tasarımcı bir çözüm üretir ve daha sonra bilgisayar bunu değerlendirir. Ancak bu yavaş ve uğraştırıcı bir süreçtir ve genellikle çok çeşitli olası senaryolar arasından sadece birkaç vaka değerlendirilir. Oysaki olası çözümlerin tasarım uzayı çok geniştir. Bu zorluklar, tasarım optimizasyonu için hesaplamalı yöntemlerin uygulanmasını avantajlı hale getirmiştir. Düşük enerjili bina tasarımının gerekliliklerini yerine getirmek için yenilikçi bir tasarım metodolojisine ve entegre tasarım sürecine ihtiyaç vardır. Bina tasarımı optimizasyonunda tasarımcılara yardımcı olmak için birçok araştırma yapılmıştır. Çok sayıda çalışma, performansa dayalı bina tasarımı araştırmalarını kolaylaştırmak için optimizasyon algoritmalarının potansiyellerini yaptıkları çalışmalarda göstermişlerdir. Bu çalışmalara örnek olarak, Park ve diğerleri entegre güneş kırıcılı çift cephe sistemlerini ele almış ve çeşitli görsel konfor ölçütleri için en uygun güneş kırıcı açılarını bulmuşlardır. Shea ve diğerleri 2006 yılında yaptıkları çalışmada, çatı panellerinin cam tipinin aydınlatma performansı ve maliyet üzerindeki etkisini optimize etmiştir. Gagne ve Anderson'ın önerdiği yaklaşım ise, 3 boyutlu modellemenin ötesinde beceriler gerektirmeden tasarımcının özel ihtiyaçlarına uyacak şekilde özelleştirilebilen Genetik Algoritma tabanlı bir yöntem sunarak performansa dayalı gün ışığı tasarımı keşif ve optimizasyonunu, tasarım sürecine dahil etmeyi amaçlamışlardır (Gagne & Andersen, 2012).

3.3 Optimizasyon

Optimizasyon, belirli bir problem için en iyi çözümü belirlemeye çalışan bir süreçtir. Herhangi bir optimizasyon problemi, karar verme sürecinden amaca doğru bir eşleme problemi olarak düşünülebilir (Al-Hooud, 1997; Shi, 2014). Bir optimizasyon probleminin çözümleri, problem tarafından tanımlanan tüm gereklilikleri karşıladığında uygulanabilir olurken, optimum çözüm sürecin maliyetini en aza indirebilir veya çözümün probleme etkisini en üst düzeye çıkarabilir. Tipik olarak, optimizasyon problemleri çeşitli algoritmaları çözmek için kullanılır. Matematik, istatistik ve diğer birçok bilimde matematiksel optimizasyon, bir dizi mevcut alternatif

arasından bir probleme en iyi çözümü bulma sürecidir. Bina performans simülasyonunda ise optimizasyon terimi, bir problemin küresel olarak en uygun çözümünü/çözümlerini bulmak anlamına gelmez, çünkü problemin doğası ya da simülasyon programının kendisi nedeniyle bu mümkün olmayabilir (Nguyen, Reiter, & Rigo, 2014). Bina inşaatı alanı, çok boyutlu tasarım becerileri gerektirdiğinden disiplinlerarası bir alan olarak kabul edilmektedir. Bu uzmanlık ekosisteminin bir ayağı, binaların enerji tüketimine yönelik tasarım yöntemlerinin iyileştirilmesine katkıda bulunabilecek hesaplamalı mühendisliktir. 2000 yılında Hien, Poh ve Feriadi'nin mimarların zaman ve ekonomik baskı nedeniyle bina optimizasyonu için özel algoritmalar ve yazılımlar kullanamayacağını öne sürdüğü 2000 yılından bu yana işler önemli ölçüde değişmiştir. İlgili literatür zenginleşmiştir ve binaların enerji performansını optimize edecek algoritmaların formüle edilmesini amaçlayan araştırmaların önemli bir kısmı devam etmektedir. Örneğin, enerji tüketiminin önemli bir parçası aydınlatmadır. 2004 yılında Glaser ve diğerleri bina aydınlatma optimizasyonu için bir algoritma geliştirmeye çalışmış ve bunun uygulamasını aydınlatma tasarımına özel bir yazılım olan "LightSketch"e sunmuştur. (Tsala & Koronaki, 2021).

Geleneksel bir bina optimizasyon çalışmasında, süreç genellikle bir bina simülasyon programı ile bir veya birkaç optimizasyon algoritması veya stratejisinden oluşabilen bir optimizasyon aracı arasındaki bağlantı ile otomatikleştirilir. Simülasyon tabanlı optimizasyonun en tipik stratejisi Şekil 3.3'te özetlenmiştir (Nguyen, Reiter, & Rigo, 2014).



Şekil 3.3 : Bina performans çalışmalarında simülasyon tabanlı optimizasyona uygulanan döngü (Nguyen, Reiter, & Rigo, 2014).

Simülasyon tabanlı optimizasyonlar iki önemli bölümden oluşmaktadır. Birincisi aday çözümlerin üretilmesi, ikincisi ise bu çözümlerin amaç fonksiyonuna göre değerlendirilmesidir. Günümüzde simülasyon tabanlı optimizasyon, yüksek performanslı binaların çeşitli zorlu gereksinimlerini karşılamak için etkili bir araç olarak kullanılmaktadır. Bina performansı optimizasyonunda, optimizasyon ile global bir optimuma ulaşıp ulaşılmadığını belirlemek genellikle imkansızdır. Bununla birlikte, optimizasyon optimum olmayan bir çözümle sonuçlansa bile, herhangi bir optimizasyon yapılmamasına kıyasla daha iyi bir bina performansı elde edilmiş olabilir (Nguyen, Reiter, & Rigo, 2014). Tez çalışması, görsel bir programlama arayüzü kullanılarak çatı tasarım alternatiflerinin keşfedilmesini sağlarken, bir yılda fotovoltaik panellerle üretilebilecek maksimum elektrik enerjisini üretebilecek çatı tasarım modellerini bulmak için m² başına düşen güneş radyasyonu değerlerini ve çatı yüzey alanlarını optimizasyon algoritması kullanarak değerlendirmektedir.

3.3.1 Tek ve Çok Amaçlı Optimizasyon Problemleri

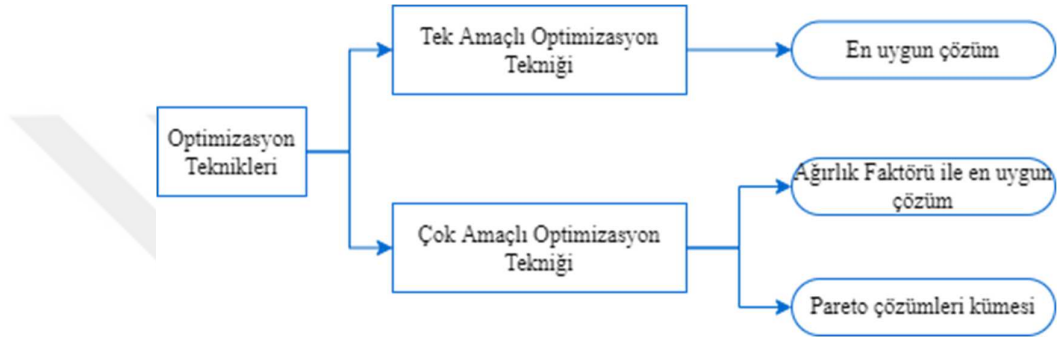
Karmaşık optimizasyon problemleri, hedeflere ulaşmak için sınırlı kaynakların verimli bir şekilde kullanılmasıyla ilgilidir. Bir planlama veya optimizasyon sürecinin olası hedefleri ya problemin optimal çözümünü bulmak ya da önceden tanımlanmış bazı eşik değerlerden (mevcut durum) daha iyi bir çözüm bulmaktır. Hem optimizasyon problemlerinin hem de optimizasyon algoritmalarının sınıflandırılması, yeni

optimizasyon stratejilerinin geliştirilmesi ve belirli bir problem için uygun bir algoritmanın seçilmesi için önemli bir temel oluşturmaktadır. Birçok farklı optimizasyon problemi sınıflandırması vardır. Bunlar arasında, tasarım değişkenlerinin sayısına bağlı olarak tek boyutlu ya da çok boyutlu optimizasyon, tasarım değişkenlerinin türüne göre sürekli ya da ayrık, amaç fonksiyonlarının sayısına göre tek ve çok amaçlı, daha geniş bir arama uzayı içinde uygulanabilir çözümler kümesini tanımlayan kısıtlamaların varlığına bağlı olarak kısıtlı veya kısıtlamasız problemler olarak sınıflandırılabilir (Nguyen, Reiter, & Rigo, 2014). Simülasyon bazı optimizasyon çalışmaları ağırlıklı olarak tek ve çok amaçlı optimizasyon problemleri olarak ele alınırlar. Evins tarafından belirtildiği üzere, bina optimizasyonu üzerine yapılan çalışmaların %50'sinden fazlası tek amaçlı problemlerle ilgilenirken, çalışmaların yaklaşık %40'ı çok amaçlı problemleri ele almış, birkaç çalışma ise birden fazla amacı tek amaçlı bir probleme dönüştürmek için ağırlıklı toplam yaklaşımını uygulamıştır (Lu, Wang, Zhao, & Yan, 2015).

Tek amaçlı optimizasyon (TAO) probleminde, bir kısıt veya kısıtlanmamış bir problem verilen tek bir değişkene dayalı olarak amaç fonksiyonunun maksimum düzeye çıkarılması veya minimum düzeye indirilmesi ile ilgilenir (Punia & Kaur, 2013). Tek amaçlı bir optimizasyon probleminin amacı, belirli bir kriter veya ölçüt için en iyi çözümü bulmaktır (Cardoso, Coutinho, & Diniz, 2017).

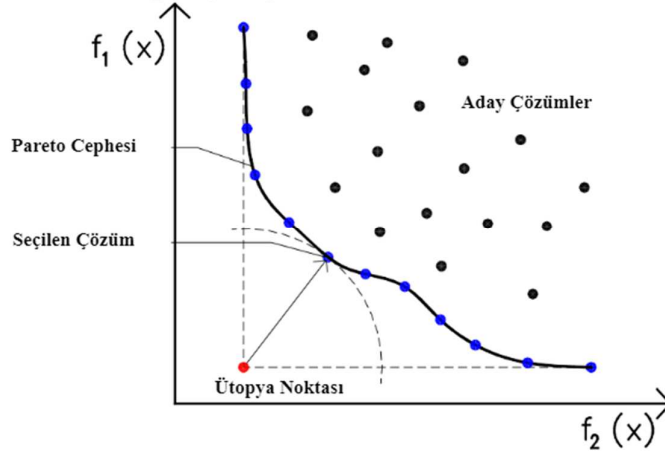
Optimizasyon için birden fazla amaç fonksiyonu olduğunda, çok kriterli veya çok amaçlı bir optimizasyon problemi ortaya çıkar. Bu, bina optimizasyon problemlerinde yaygın olarak görülür ve bu fonksiyonlar genellikle çelişkilidir (Machairas, Tsangrassoulis, & Axarli, 2014). Çok amaçlı (veya çok kriterli veya çok özellikli) optimizasyonda (ÇAO), iki veya daha fazla çelişkili hedef, belirli bir kısıtlama kümesine göre aynı anda optimize edilir. Bununla birlikte, gerçek dünya problemlerinde çoğu zaman bir amaçtaki iyileştirme diğerinin bozulmasına neden olabilmektedir (Bandyopadhyay & Saha, 2013). Tipik olarak çok amaçlı optimizasyon problemleri için iki yaygın yaklaşım bulunmaktadır. Birincisi, hedeflerin her birinin normalleştirildiği ve tek bir hedef elde etmek için ilgili ağırlık faktörleriyle toplandığı ağırlıklı bir toplam işlevi kullanır. Burada çok amaçlı optimizasyon problemi, tek amaçlı optimizasyon problemine dönüştürülür. Tipik optimizasyon algoritmaları bunu çözmek için kullanılabilir, ancak farklı alt hedeflerin birbirleriyle nasıl etkileşime girdiğine dair bilgi çıkarılamaz. Farklı ağırlık faktörlerinin test edilmesi optimizasyon

problemlerinin sayısında artışa neden olur ve bu da daha uzun işlem süreleri gerektirir. Şekil 3.4'te tek ve çok amaçlı optimizasyon problemlerinin amaçlanan hedef çıktıları gösterilmektedir. Tek amaçlı optimizasyon problemleri tek bir hedef çıktısına ulaşmaya çalışırken, çok amaçlı optimizasyonlarda iki farklı yaklaşım bulunmaktadır. Bunlardan birincisi yukarıda anlatıldığı üzere ağırlık faktörlerini kullanarak optimum tek bir çözümün bulunması, diğeri ise bir çözümler kümesinin elde edilmesidir. Bu yaklaşım Pareto olarak adlandırılır.



Şekil 3.4 : Optimizasyon tekniklerinin türleri ve hedeflenen çözümler (Chen, 2016).

Çok amaçlı optimizasyon için diğeri popüler yaklaşım Pareto tarafından önerilmiştir. Bir çözüm, en azından bir diğeri kötüleştirmeden bir amacı iyileştiren başka bir uygulanabilir çözüm olmadığında Pareto optimumdur veya baskın değildir. Çok amaçlı algoritmalar, Pareto sınırı olarak adlandırılan bir dizi baskın olmayan çözümle sonuçlanır (Machairas, Tsangrassoulis, & Axarli, 2014). Pareto kümesinden en iyi çözümün nasıl seçileceği sorunu, bir dizi hususa bağlı olduğundan (örneğin, amaç fonksiyonlarının önemi, bina yatırımcılarının talebi...) kolay değildir. Bu süreç çok kriterli karar verme olarak bilinir. "Artılar ve eksiler", "basit önceliklendirme", "tatmin etme", "fırsat maliyeti", "bürokratik" gibi birçok karar verme tekniği geliştirilmiştir. Şekil 3.5, iki amaç fonksiyonunun eşit derecede önemli olması durumunda Pareto kümesi arasından en iyi çözümü seçmek için mühendislik uygulamalarında yaygın bir strateji sunmaktadır. Bu yaklaşım ütopya noktasına en yakın olan çözümü seçmektir (Nguyen, Reiter, & Rigo, 2014).



Şekil 3.5 : Pareto kümesinden en iyi çözümün seçilmesi (ütopya noktasına en yakın) (Nguyen, Reiter, & Rigo, 2014).

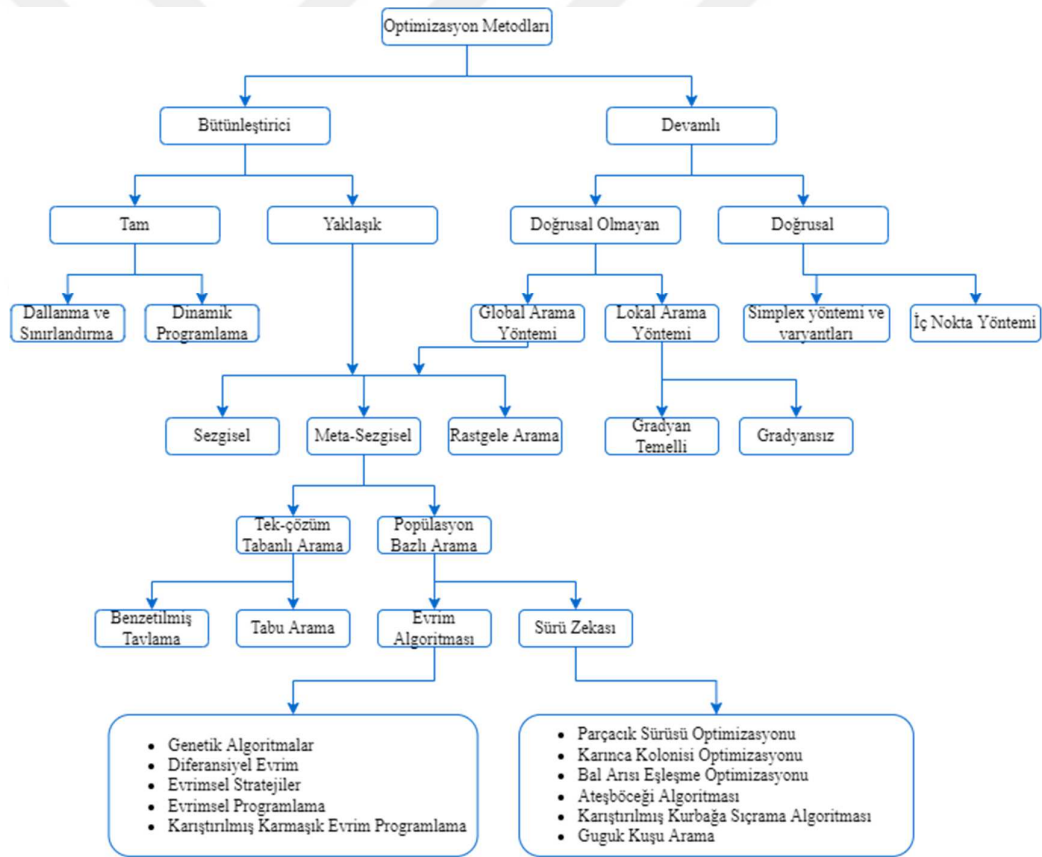
Sürdürülebilir bina optimizasyonu için kullanılan yaygın algoritmaların hepsi sezgisel yöntemdir. Sezgisel yöntemler gerçek optimuma ulaşmayı garanti etmezler, ancak ulaşma veya ona yaklaşma olasılığı yüksek olan verimli bir yöntem sunarlar (Evins, 2013). Evrimsel algoritmalar yaygın bir meta-sezgisel optimizasyon algoritması olarak kabul edilir ve farklı alanlardaki optimizasyonlar için yaygın olarak kullanılır. Evrimsel algoritmaların bir türü olan GA (Genetik Algoritma), nesnel optimizasyon problemlerini çözmek için yaygın olarak uygulanmaktadır. Çok amaçlı problemler için uygulanan en yaygın optimizasyon yöntemi, baskın olmayan sıralama Genetik Algoritması-II'dir (NSGA-II) (Lu, Wang, Zhao, & Yan, 2015).

Lu ve diğerleri 2015 yılında, düşük/sıfır enerjili binalarda yenilenebilir sistemlerinin tasarım optimizasyonu üzerine yaptıkları bir çalışmayı yayınlamışlardır. Simülasyon tabanlı optimizasyon, binaların yenilenebilir enerji sistemi boyutlarını optimize etmek için sırasıyla tek amaçlı optimizasyon ve çok amaçlı optimizasyon için Genetik Algoritma yöntemi ve baskın olmayan sıralama Genetik Algoritma-II yaklaşımı kullanılarak uygulanmıştır. İki yöntemin çıktıları karşılaştırıldığında, tek amaçlı optimizasyon probleminin üç amacı bir araya getirerek doğrudan en iyi çözümü verebileceğini ancak tasarımcılara parametrelerin farklı tasarım alternatifleri üzerindeki etkileri hakkında bilgi vermediği, çok amaçlı optimizasyonun ise karar vericilere bu etkiler hakkında zengin ve değerli bilgiler sağladığını ve elde edilen pareto-çözüm kümelerinden bir veya daha fazla uygun uzlaşmış çözüm bulmalarına olanak tanıdığını keşfetmişlerdir.

Tez çalışması, çatılarda kullanılacak binaya bütünleşik fotovoltaik panellerle yıllık üretilebilecek elektrik enerjisinin maksimum düzeye çıkartılmasını sağlayacak çatı yüzeyi optimizasyonu gibi tek bir hedefi amaçladığı için tek amaçlı optimizasyon çalışmasıdır.

3.3.2 Optimizasyon Yöntemleri

Optimizasyon yöntemleri, birçok farklı şekilde sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırmalar; Bütünleştirici-Devamlı, Belirsizlik-Deterministik, Sürekli-Ayrık-Karışık gibi farklı sınıflandırma yöntemlerini içerir. Yapılan tez çalışmasında Bütünleştirici-Devamlı sınıflandırma yöntemi ele alınmıştır. Şekil 3.6'da bu sınıflandırma yöntemi gösterilmiştir.

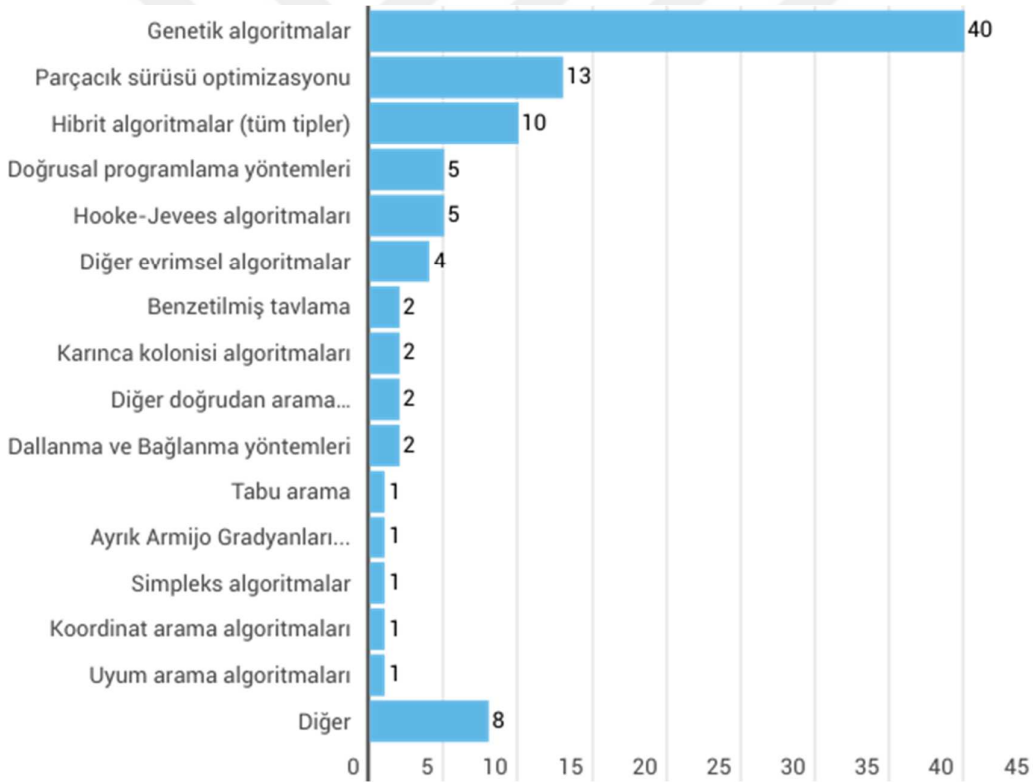


Şekil 3.6 : Optimizasyon Yöntemlerinin Sınıflandırılması (Reddy & Kumar, 2020).

Sürdürülebilir bina optimizasyonu için kullanılan yaygın optimizasyon algoritmalarının hepsi meta-sezgisel yöntemlerdir, gerçek optimuma ulaşmayı garanti etmezler, ancak optimuma ulaşma veya ona yaklaşma olasılığı yüksek olan verimli bir yöntem sunarlar (Evins, 2013).

3.3.3 Optimizasyon Algoritmaları

Bina Optimizasyon Problemlerinin karmaşıklığı ve çeşitliliği nedeniyle algoritma seçimi için genel bir kural sağlamak genellikle mümkün değildir. Bununla birlikte, bina optimizasyonu ile ilgili literatürden elde edilen veriler kullanılarak optimizasyon algoritmalarının kullanım eğilimi tahmin edilebilir. Şekil 3.7, literatürde yapılan çalışmalardaki optimizasyon algoritmalarının kullanım sıklığını göstermektedir. Popülasyon tabanlı algoritmaların (Genetik Algoritmalar, Parçacık Sürüsü Algoritması, Evrimsel Algoritmalar) bina performans optimizasyonunda en sık kullanılan yöntemler olduğu görülebilir. Popülasyon tabanlı algoritmalar, sınırlı sayıda iterasyondan sonra en iyi çözüme ulaşılacağını garanti edemez, ancak makul bir süre içinde iyi çözümler elde etmek için kullanılırlar (Nguyen, Reiter, & Rigo, 2014).



Şekil 3.7 : Farklı optimizasyon algoritmalarının kullanım sıklığı, Elsevier'in SciVerse Scopus tarafından verilen 200'den fazla bina optimizasyon çalışmasından elde edilmiştir (Nguyen, Reiter, & Rigo, 2014).

Şekil 3.7'de görüldüğü üzere bina optimizasyon çalışmalarında en çok kullanılan algoritma Genetik Algoritmadır. Genetik Algoritma (GA) için anahtar kelime, daha yüksek bir uygunluk değerine sahip bir aday üretmek için veriler değişime uğradıktan sonra daha iyi bir çözümün seçildiği bir evrimdir. Karınca Kolonisi Algoritması ve

Guguk Kuşu Optimizasyon Algoritması gibi diğer optimizasyon algoritmaları ile karşılaştırıldığında GA daha basittir; ancak, büyük bir girdi verisi popülasyonu varsa çalışması biraz zaman alabilir (Lim, ve diğerleri, 2018). Genetik Algoritmalar Evrimsel Algoritmanın kullanıldığı bir optimizasyon algoritmasıdır.

3.3.3.1 Evrimsel Algoritma

Evrimsel algoritmalar yaygın bir meta-sezgisel optimizasyon algoritmasıdır. Her nesilde en zayıflarının elendiği bir çözüm popülasyonunu koruyarak Darwinci en uygun olanın hayatta kalması ilkesini uygularlar. Yeni çözümler üretmek için uygulanan yaygın 'operatörler' arasında mutasyon (rastgele değişiklikler getirme), kalıtım, doğal seçim ve çaprazlama (farklı çözümlerden öğeleri değiştirme) yer alır. Evrimsel Algoritmalar, evrimsel biyolojide karşılaşılan sistem ve teknikleri taklit ederek Çok ve Tek Amaçlı Optimizasyon problemlerinin çözümüne yardımcı olmak için kullanılır. İlk Çok Amaçlı Evrimsel Algoritmaların seksenli yılların ortalarında tanıtılmasından bu yana, hem mühendisler hem de mimarlar tarafından önemli bir literatür geliştirilmiş ve çeşitli Evrimsek Algoritma (EA) türleri (Genetik Algoritmalar, Evrimsel Programlama ve Genetik Programlama, Kovaryans Matrisi Uyarlama Evrimsel Stratejisi, Diferansiyel Evrim, Uyum Arama, Parçacık Sürüsü Optimizasyonu, Karınca Kolonisi Optimizasyonu ve Benzetilmiş Tavlama) tanımlanmıştır (Touloupaki & Theodosiou, 2017; Evins, 2013). Evrimsel Algoritmada yer alan adımlar şunlardır (Reddya & Kumar, 2020);

- Rastgele üretim kullanarak popülasyonu tohumlama
- Popülasyondaki her bir bireyin uygunluğunu değerlendirme
- Durdurma kriteri karşılanana kadar evrim adımlarını tekrarlama:
 - Üreme için bireyleri seçme
 - Yavruları oluşturmak için genetik işlemler gerçekleştirme
 - Yavruların bireysel uygunluğunu değerlendirme
 - En az uygun olan bireyleri yeni en uygun bireylerle değiştirme
- En uygun bireyin en iyi çözümünü bildirme.

Evrimsel algoritma türleri şunları içerir; Genetik Algoritma, Evrimsel Programlama ve Genetik Programlama, Kovaryans Matrisi Adaptasyonu Evrimsel Stratejisi ve Diferansiyel Evrim (Evins, 2013).

- Evrimsel Programlama (EP) ve Genetik Programlama (GP): hiyerarşik değişkenlere veya fonksiyonların ve programların temsillerine izin veren ağaç yapıları. EP'de sadece değişken değerleri değişir; GP'de yapı da değişir.
- Kovaryans Matrisi Adaptasyonu Evrimsel Strateji: yeni değişken değerleri, bağımlılıkların her nesilde güncellenen bir kovaryans matrisi ile temsil edildiği olasılık dağılımlarından örneklenir.
- Diferansiyel Evrim: değişken değerler, diğer iyi çözümlerin bileşenleri eklenerek şaşırtılır.

Genetik algoritma tasarım optimizasyonları için en fazla kullanılan evrimsel algoritma türüdür ve ayrı bir başlık altında ayrıntılı olarak tanımlaması yapılmıştır.

Diğer doğa olaylarını taklit eden meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları ise Uyum Arama, Parçacık Sürüsü Optimizasyonu, Karınca Kolonisi Optimizasyonu ve Benzetilmiş Tavlama algoritmasıdır (Evins, 2013).

- Uyum Araması: Değişken değerler, komşu değerlere bir miktar müdahale ile daha iyi kombinasyonlar bulmak için yeniden birleştirilir. En iyi çözümlerden oluşan bir popülasyon oluşturulur.
- Parçacık Sürüsü Optimizasyonu: çözümler tasarım uzayında kendi konumlarına ve sürüdeki en iyi konuma göre hareket eder.
- Karınca Kolonisi Optimizasyonu: karıncaların diğer karıncaları takip etmeye teşvik etmek için yollara feromon bırakma sürecini taklit ederek, çok kullanılan değişken değerler, gelecekteki tercihlerde seçimlerini yönlendiren 'feromonlar' biriktirir.
- Benzetilmiş Tavlama: çözümler mevcut konumlarından uzaklaştırılır ve daha iyi çözümü tutma olasılığı zamanla kademeli olarak artırılır.

3.3.3.2 Genetik Algoritma

Bir genetik algoritma, belirli bir optimizasyon problemine yönelik bir dizi tasarım veya aday çözümle başlar ve doğadaki evrim ilkesini taklit ederek, yani en uygun olanın

hayatta kalması mekanizmasını uygulayarak optimum çözüme doğru ilerler. Aday çözümler kümesine popülasyon adı verilir. Popülasyondaki bir aday çözüme birey, varlık veya fenotip denir. Her aday çözüm, kromozomlarında (veya genotipinde) temsil edilen ve mutasyona uğrayıp değiştirilebilen bir dizi özelliğe sahiptir. Evrim genellikle rastgele üretilen bireylerden oluşan bir popülasyondan başlar. Çözüm süreci tekrarlamalı olup her bir tekrarlama popülasyon bir nesil olarak adlandırılır. Her nesildeki popülasyonun boyutu değişmez. Her nesilde, popülasyondaki her bireyin uygunluğu değerlendirilir; uygunluk genellikle çözülmekte olan optimizasyon problemindeki amaç (veya kısıtlı bir problemde elde edilen varsayılan amaç) fonksiyonunun değeridir. Daha uygun bireyler mevcut popülasyondan rastlantısal olarak seçilir ve her bireyin genomu yeni bir nesil oluşturmak için değiştirilir (yeniden birleştirilir ve muhtemelen rastgele mutasyona uğratılır). Kümenin daha uygun üyeleri yeni tasarımlar oluşturmak için kullanıldığından, birbirini takip eden nesillerin daha iyi uygunluk değerlerine sahip tasarımlara sahip olma olasılığı daha yüksektir. Yeni nesil aday çözümler daha sonra algoritmanın bir sonraki yinelenmesinde kullanılır. Genellikle algoritma, maksimum nesil sayısına ulaşıldığında ya da popülasyon için yeterli bir uygunluk seviyesine ulaşıldığında sonlandırılır (Chang, 2015). Bahsi edilen süreç ile ilgili kod yazılımı Şekil 3.8’de özetlenmiştir. Temel Genetik Algoritma ilk olarak 1975 yılında John H. Holland tarafından tanıtılmıştır ve daha sonra farklı genetik işlemcilerle sahip Genetik Algoritma çeşitleri geliştirilmiştir.

Genetik Algoritma

```

1: begin
2: problem boyutunu tanımlayın (D), NP büyüklüğünde başlangıç popülasyonu  $P_0$  oluşturun
3:  $P_0$ ’daki NP bireylerinin uygunluğunu değerlendir
4: nesil sayacını başlat  $t \leftarrow 0$ 
5: while sonlandırma kriteri ile karşılaşılmamış ise do
6:   ebeveynlerin uygunluklarına göre seçilmesi
7:   çaprazlama işlemi kullanılarak ebeveynlerden yeni  $P_{t+1}$  nesli için yavruların
8:   oluşturulması
9:   yeni nesil  $P_{t+1}$  üzerinde mutasyon gerçekleştir
10:   $P_{t+1}$  popülasyonunun uygunluğunu değerlendir
11:   $t \leftarrow t+1$ 
12: end

```

Şekil 3.8 : Genetik Algoritmaların varsayılan kodları (Reddy & Kumar, 2020).

Genetik algoritmaların diğer optimizasyon tekniklerine göre bazı avantajları vardır. Çoğu optimizasyon yöntemi tek tek noktaları değerlendirir ve ardından bir sonraki

hamle için en iyi yönü değerlendirmeye çalışır. David Goldberg'ın Arama, Optimizasyon ve Makine Öğrenmesinde Genetik Algoritma adlı kitabında belirttiği gibi, bir seferde yalnızca tek bir konumu dikkate almak, bu tür algoritmaları yerel minimumlara (veya maksimumlara) yakalanmaya açık hale getirir (Goldberg, 1989). Genetik algoritmalar, yalnızca bir amaç fonksiyonu (uygunluk ölçüsü) kullanarak bu sorunun bir kısmından kaçınır. Aramada yön kavramı olmadığından, genetik algoritmalar bir sonraki en iyi hamleyi hesaplamak için karmaşık yöntemlerden herhangi birine veya türev bilgisine ihtiyaç duymaz (Rooker, 1991). Evrimsel algoritmaların bir türü olan GA (Genetik Algoritma), bina kabuğu, form, HVAC ve yenilenebilir enerji sistemleri açısından bina optimizasyon alanında yaygın olarak uygulanmaktadır (Touloupaki & Theodosiou, 2017). GA'yı bina performansı simülasyon toplulukları arasında popüler kılan bir dizi neden vardır (Nguyen, Reiter, & Rigo, 2014):

- Hem sürekli hem de ayırık değişkenleri veya her iki türü de ele alma yeteneği vardır;
- Bir popülasyondaki n bireyin eş zamanlı değerlendirilmesi, çok işlemcili bilgisayarlarda paralel simülasyonlara izin verir;
- Bir çözüm popülasyonu ile çalışmak GA'yı çok amaçlı optimizasyon problemlerini çözmek için doğal olarak uygun hale getirir;
- Süreksizlik, çok modlu ve yüksek kısıtlı problemleri yerel bir minimumda sıkışmadan ele almada güvenilirdir;
- Büyük simülasyon hata oranlarına karşı dayanıklıdır.

Araştırmacılar, Evrimsel Algoritmanın güçlü yönlerini, hızlı yakınsamalarını ve tek amaçlı optimizasyon için verimli çözümler üretmelerini kullanarak, Pareto optimallik ilkelerini tek amaçlı genetik algoritmalara entegre ederek çok amaçlı algoritmalar geliştirmişlerdir. Hücresel GA (Manderick & Speissens 1989), Baskın Olmayan Sıralama Genetik Algoritması (NSGA) (Srinivas & Deb 1994), Kuantumdan ilham alan GA (Narayanan & Moore 1996), NSGA-II (Deb vd. 2002), Etkileşimli GA (Takagi 2001), Atlama gen GA (Man vd. 2004), NSGAIII (Deb & Jain 2014), Kabile rekabeti tabanlı GA (Ma & Xia 2017) ve benzeri algoritmalar örnek olarak sıralanabilir (Reddya & Kumar, 2020). Çok amaçlı problemler için uygulanan en yaygın

optimizasyon yöntemi ise, baskın olmayan sıralama Genetik Algoritması-II'dir (NSGA-II) (Deb, Pratap, Agarwal, & Meyarivan, 2002).

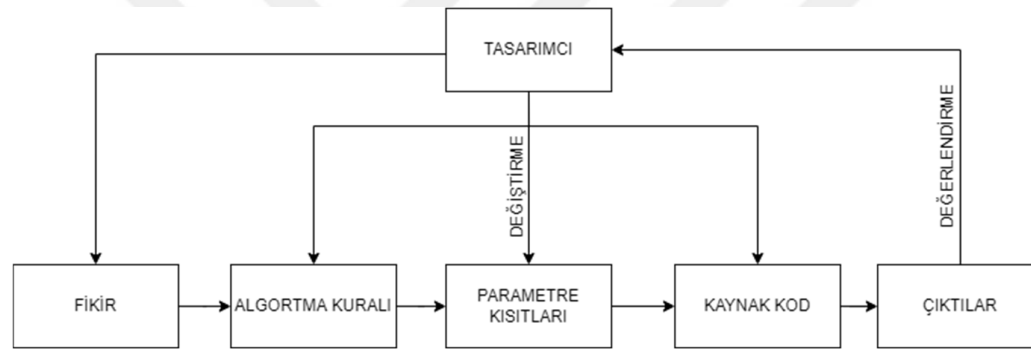
3.3.3.3 Baskın Olmayan Sıralama Genetik Algoritması II (NSGA-II)

NSGA II, Genetik Algoritma'ya dayanmaktadır; ancak daha üstün bir uygunluk ölçümüne sahiptir ve bu nedenle klasik GA'dan daha hızlı ve daha etkilidir. GA ile benzer şekilde, NSGA II de genler üzerinde çalışır. Başlangıçta, bir çözüm havuzu rastgele oluşturulur. Her iterasyonda, çözümler baskın olmama seviyesine göre ölçülür. Daha yüksek baskın olmama seviyesine sahip çözümler ebeveyn olarak seçilir. Daha sonra ebeveynlere GA ile aynı olan çaprazlama ve mutasyon uygulanır. Bu süreç bir durdurma kriteri karşılanana kadar tekrarlanır. Bai ve diğerlerine (2012) göre, NSGA II optimizasyon problemlerini etkili bir şekilde çözebilir ve karar vermede hedeflerin değiş tokuşuna yardımcı olabilir. GA'da olduğu gibi, NSGA II'nin de üç parametresi vardır: bir parametre (popülasyon büyüklüğü) ebeveyn sayısını ve diğer iki parametre (çaprazlama oranı R_c ve mutasyon oranı R_m) ebeveynlerden çocuklara kalıtımı belirlemektedir (Chen, 2016).

3.4 Üretken Tasarım

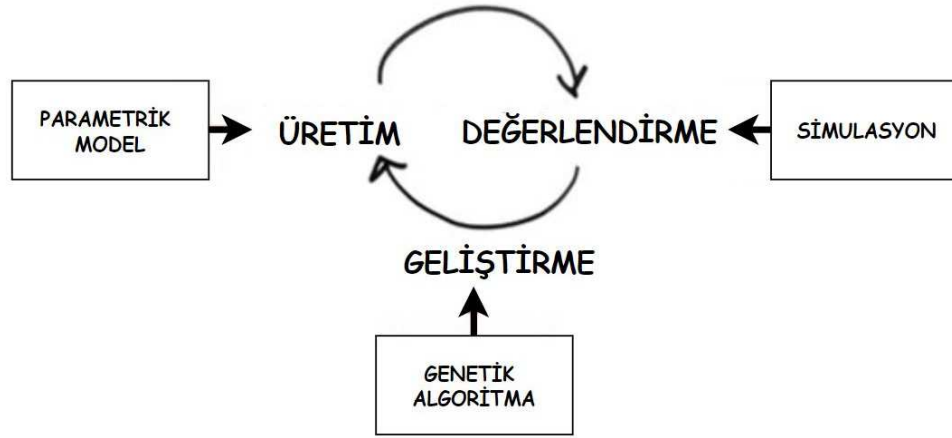
Üretken tasarım 1975 yılında Mitchell tarafından belirli bir probleme potansiyel çözümler üretebilen araçlar olarak tanımlanmıştır (Mitchell, 1975). Caetano ve diğ. Üretken tasarımı, parametrik tasarımdan daha özerk algoritmik tanımlamalar kullanan bir tasarım paradigması olarak tanımlamaktadırlar. Andre Chaszar ve Sam Conrad Joyce için Üretken Tasarım, "hesaplama gücünden yararlanarak ve karmaşıklığın yanı sıra hız ve doğruluk konularını ele alarak" geleneksel manuel tasarım yöntemlerinin eksikliklerinin üstesinden gelir ve "tasarım varyasyonlarının sayısını" ve "mutlu kazaları", yani tasarım sürecini olumlu yönde etkileyen beklenmedik sonuçları içeren "varyasyon aralığını" artırdığı için yaratıcılığı artırır (Chaszar & Joyce, 2016). Fakhri Bukhari Üretken Tasarımın kapsamını "belirli bir tasarım hedefleri ve kısıtlamaları kümesinden bir dizi farklı çözüm üretmek için algoritmaların" kullanımıyla sınırlandırmıştır (Bukhari, 2011). Özet olarak Üretken Tasarım, kural odaklı yinelemeli bir tasarım sürecidir. Üst düzey kısıtlamaları ve hedefleri tanımlayarak tasarım olanaklarını otomatik olarak keşfetmek, yinelemek ve optimize etmek için algoritmik ve parametrik modellemeye dayanmaktadır. Genel olarak, bir Üretken

Tasarım oluşturmak birkaç adımdan oluşur, bunlar: tasarım hedeflerini tanımlamak, tasarım kısıtlarını formüle etmek, algoritmaları belirlemek, Üretken Tasarımı programlamak, Üretken Tasarımı çalıştırmak ve üretilen parametrik modelleri tatmin olana kadar hedeflere ve kısıtlamalara göre değiştirmektir (Ma, Wang, Jun, Xiang, & Sun, 2021). Bu süreçlerde bilgisayar ve tasarımcı ilişkisi Şekil 3.9'da gösterilmiştir. İlk olarak tasarımcı, tasarım fikrini ortaya koyarak tasarım hedefine uygun algoritmalar ve iyi tanımlanmış tasarım kısıtlamaları ile bilgisayardaki Üretken Tasarım programına girdileri sağlar. Kaynak kod durma kriteri ile karşılaşıncaya kadar alternatifler üretmeye devam eder. Üretilen tasarım alternatifleri değerlendirme için tasarımcıya iletilir ve tasarımcı tasarım hedefine ulaşıldığını düşünmüyorsa süreç tekrar ettirilerek yeni alternatiflerin üretilmesi sağlanır.



Şekil 3.9 : Üretken Tasarım- Tasarımcı ilişkisi

Genel olarak Üretken Tasarım çalışma prensibi Üretim, Değerlendirme ve Geliştirme aşamalarından meydana gelmektedir. Üretim aşamasında parametrik modelleme aracılığı ile farklı çözümlerden oluşan bir popülasyon oluşturulur. Simülasyon programı ile üretilen her bir alternatif için çıktı hedefine göre hesaplama yapılır ve her bir çözümün uygunluğu kontrol edilir. Geliştirme aşamasında ise kullanılan algoritma ile -simülasyon tabanlı optimizasyon çalışmalarında genellikle Genetik Algoritmadır- en iyi performans gösteren çözümler yeni bir popülasyon oluşturmak için çaprazlanır. Şekil 3.10, bu süreçlerin görsel bir temsilini sunmaktadır.



Şekil 3.10 : Üretken Tasarım çalışma prensibi.

Parametrik olarak tanımlanmış modellerin oluşturulması, üretken tasarım olarak da bilinen üretken süreç modellemesinin uygulanmasına olanak tanır. Bu uygulama, CAD için tipik olan sabit model fikrinin dinamik modellerle değiştirilmesini sağlar. Yani, tasarımcı tarafından tanımlanan kısıtlayıcı fonksiyonlardaki geometrik değişikliklere göre değişen, çoklu tasarım alternatifleri yaratan ve değerlendiren modeller oluşur. Böylece, üretken süreçler tasarımcıların bilgilerini parametrik kod aracılığıyla daha verimli bir şekilde uygulamalarına olanak tanır. Bu süreç esnekliği, tasarımcıların yeni fikirleri teşvik etmelerini ve tasarım sahibi olarak yaratıcılıklarını ortaya çıkarmalarını sağlar (Sanhudo, 2016).

Üretken tasarım yaklaşımlarında, üretim süreci başladıktan sonra, sistem durma kriteri karşılanana kadar kodlanmış talimatları yürütür. Sonuç olarak, üretken tasarım tabanlı yöntemler basit algoritmik tanımlamalardan bile karmaşık çıktılar üretebilir. Çoğu durumda, algoritmanın üretilen çıktı ile ilişkilendirilmesi zordur, bu nedenle sonucun yalnızca algoritmik tanımlamayı okuyarak önceden tahmin edilmesini zorlaştırır. Bu nedenle Parametrik Tasarımdan daha özgün algoritmik tanımlamalar kullanan bir tasarım modeli olarak düşünülebilir.

Üretken Tasarım, başka türlü görülmesi veya düşünülmesi mümkün olmayan sonuçlara ulaşmak için hesaplamalı bilişim ve insan yaratıcılığını birleştiren bir tasarım çerçevesini temsil etmektedir. Geometrik bir sistemin, bir dizi ölçülebilir hedefin ve çok sayıda tasarım seçeneğini otomatik olarak üretecek, değerlendirecek ve geliştirecek bir sistemin entegre edilmesini içerir. Bu yaklaşım, karmaşıklığı yönetmek ve belirli kriterler için optimizasyon yapmak gibi tasarım avantajları sunabilir; bu karmaşıklık kavramı, deneyim, mevcut talepler ve özel ihtiyaçlardan çok sayıda girdi

içerir. Böylece, gerçek verilere dayalı çözümleri birleştirme, paydaşlar arasında tasarım özellikleri ve proje hedefleri üzerine tartışmayı yapılandırma, tasarım varsayımları konusunda şeffaflık sağlama ve eksiksiz bir tasarım oluşturmak için bir ön " dinamik model" sunma imkânı vardır. Üretken Tasarım bu nedenle farklı ölçeklerde kullanılabilen ve değişken bir çerçevedir (Filippo, Lombardi, Marongiu, Lorusso, & Santaniello, 2021).

Performansa dayalı üretken tasarım sistemleri, üretken tasarım yöntemlerinin uygulanmasına iyi bir örnektir (Caetano, Santos, & Leita, 2020). Simülasyon ve hesaplamalı analiz araçlarının optimizasyon teknikleriyle birlikte kullanılması, birden fazla performans kriterinin aynı anda analiz edilmesine olanak tanır. Bu nedenle, önceden tanımlanmış hedefleri karşılayan bir çözüm dizisi elde etmek mümkündür. Bu bilgilerle tasarım ekibi birden fazla çözümü değerlendirip karşılaştırabilir ve proje hedeflerine en uygun çözümü seçebilir (Fischer, 2006). Bu nedenlerden dolayı tezin konusu olan, çatılarda yapılacak tadilat projeleri için hızlı bir şekilde optimum çatı tasarımının oluşturulması amacıyla Üretken Tasarım metodu kullanılmıştır.

3.4.1 Üretken Tasarım Çalışma Kriterleri

Üretken Tasarım metodunun iş akışı şu şekildedir (Autodesk, Anatomy of a Good Generative Design Process, 2022):

- **Problemin Tespiti:**

İlk aşama olarak tasarlamak istenilen nedir, bunun net bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Sonrasında bu tasarım için gerekli tasarım parametreleri belirlenmeli, parametreler için aralık değerlerine karar verilmeli, tasarımın hangi koşulları sağlaması gerektiği belirtilmelidir. Ayrıca hangi koşulların son tasarımda bulunmaması gerektiği ve hangi etkilerin minimum ya da maksimum istendiğine karar verilmelidir.

- **Taslak Oluşturma:**

Üretim aşaması, değerlendirme aşaması, keşif ve evrim aşaması olarak üç bölümden oluşur.

Üretim aşamasında, kısıtlayıcıların ve tasarımı etkileyebilecek diğer herhangi bir faktörün tanımlanması, kullanılacak geometrinin ve geometriyi etkileyecek

parametrelerin oluşturulması, diğer model elemanları ile dikkate alınması gereken ilişki ya da bağıllık olup olmadığının tespiti gerekmektedir.

Değerlendirme aşamasında ise ölçmek ya da analiz edilmesi istenilen tasarım unsurları belirlenmeli, bu unsurların nasıl ölçülebileceği kararlaştırılmalıdır.

Keşif ve evrim aşaması için istenilen sonuç nedir, nasıl bir karar alınmaya çalışılıyor, bu kararı etkileyen etkenlerin neler olduğu tanımlanmalıdır.

- **Girdi ve Hedeflerin Tanımlanması:**

Hangi aşamada hangi girdilerin değişeceğini belirlemek ve değer aralıklarının ne anlama geldiğini belirlemek gereklidir. Üretken tasarım süreci boyunca ve üretilen sonuçlarda da aynı kalacak girdiler tanımlanmalıdır.

- **Değerlendirme Kriterlerinin Belirlenmesi;**

Değerlendirme için net kurallara sahip olmak, üretken bir tasarım sürecinin başarılı olması için kritik bir öneme sahiptir. Bu nedenle değerlendirme kriterlerinin iyi bir şekilde tanımlanması ve gerekli görülen her bir kriterin eklenmesi gerekmektedir.

- **Sonuçların Nasıl Kullanılacağına Karar Verme;**

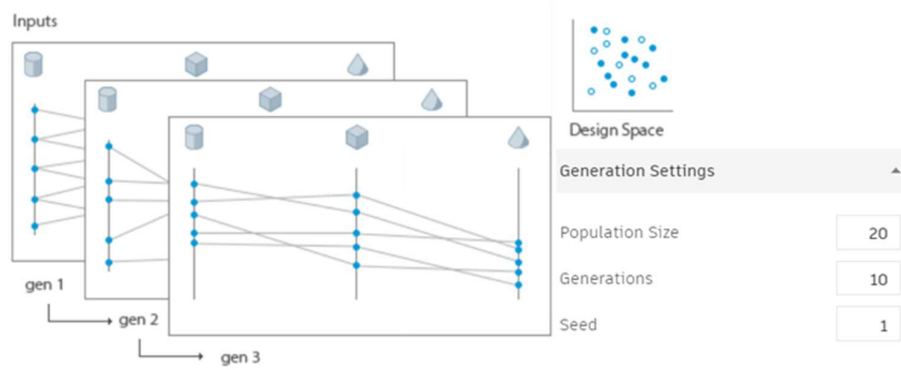
Öncelikle hedef kitlesinin belirlenmesi ve onların hangi kararı vermelerine yardımcı olmak istendiği tanımlanmalıdır. Elde edilen sonuçlar ile ne yapılacağı ve bir sonraki adımın ne olacağı belirlenmelidir. Ayrıca kaç farklı tasarım alternatifinin elde edilmek istendiğine de üretken tasarım çalışmasına başlanmadan önce karar verilmesi gereklidir.

3.4.2 Üretken Tasarım Metodları

Tüm Üretken Tasarım sürecinin temelinde çok amaçlı bir genetik algoritma yatmaktadır. Bu genetik algoritma aracılığıyla, çok amaçlı optimizasyon için bir metasezgisel algoritma olan NSGA-II optimizasyonu kullanılır (Filippo, Lombardi, Marongiu, Lorusso, & Santaniello, 2021). Çalışma kapsamında kullanılacak olan Revit programının Üretken Tasarım Aracı'nın kullandığı metodlar aşağıda sıralanmıştır (Autodesk, About Generation Methods, 2022).

- **Optimize Etme:**

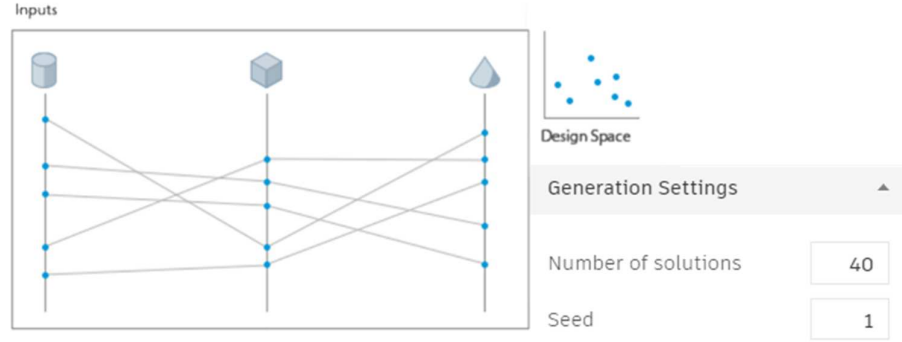
Bu yöntem ile, hedefler için optimize edilmiş tasarımlar oluşturulur. Üretken tasarım, bir tasarımın birden fazla neslini çalıştırır. Sonraki her nesil, önceki sonuçlara göre gelişir ve iyileşir. Şekil 3.11’de Optimize Etme metodunun kullanılması ile elde edilebilecek olası tasarım alternatiflerinin grafik anlatımı ile optimizasyon çalıştırılmadan önce yapılması gerekli üretim ayarlarına ait ekran görüntüsüne yer verilmiştir. Üretim ayarlarında yer alan popülasyon büyüklüğü her nesil için kaç adet tasarım alternatifinin çalışacağını temsil etmektedir. Nesil seçeneği ise çalışmanın kaç kez tekrarlanacağına karar verilen alandır. Tohum bölümü, algoritma için bir başlangıç noktası sağlar. Farklı tohum değerleri, ilk neslin girdileri için farklı değerler üretir.



Şekil 3.11 : Optimize Etme Metodu Çalışma Prensibi (Autodesk, About Generation Methods, 2022).

- Rastgele Metodu:

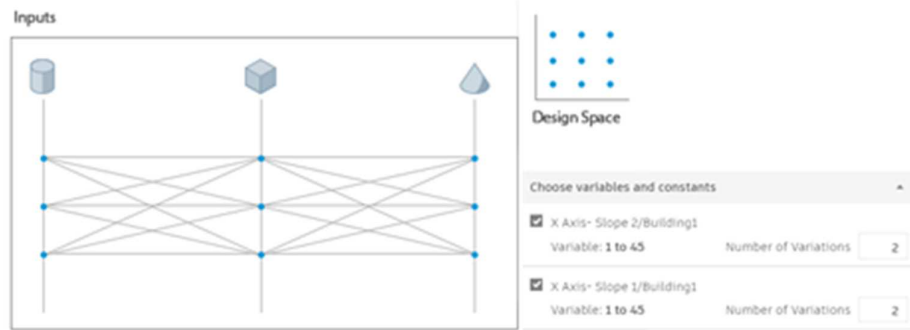
Üretken Tasarım, tanımlanan aralıklar dahilinde belirtilen değişiklikler için rastgele değerler kullanarak sonuçlar üretir. Sonuç, değişken değerlerinin rastgele bir örneklemesini temsil eden geniş bir olası çözümler dizisidir. Bu yöntem, hangi kriterler için optimizasyon yapılmak istendiğinin henüz karar verilmediği durumlarda tasarım alternatiflerini hızlı bir şekilde keşfetmek için kullanılabilir. Şekil 3.12’de Rastgele metodunun kullanılması ile elde edilebilecek olası tasarım alternatiflerinin grafik anlatımı ile optimizasyon çalıştırılmadan önce yapılması gerekli üretim ayarlarına ait ekran görüntüsüne yer verilmiştir.



Şekil 3.12 : Rastgale Metodu Çalışma Prensibi (Autodesk, About Generation Methods, 2022).

▪ **Çapraz Çarpım Metodu:**

Belirli sayıda sonuç üretmek için eşit aralıklı değerler kullanarak farklı değişken kombinasyonları ile tasarım alternatiflerinin oluşturulmasını sağlar. Şekil 3.13'te Çapraz Çarpım metodunun kullanılması ile elde edilebilecek olası tasarım alternatiflerinin grafik anlatımı ile optimizasyon çalıştırılmadan önce yapılması gerekli üretim ayarlarına ait ekran görüntüsüne yer verilmiştir.

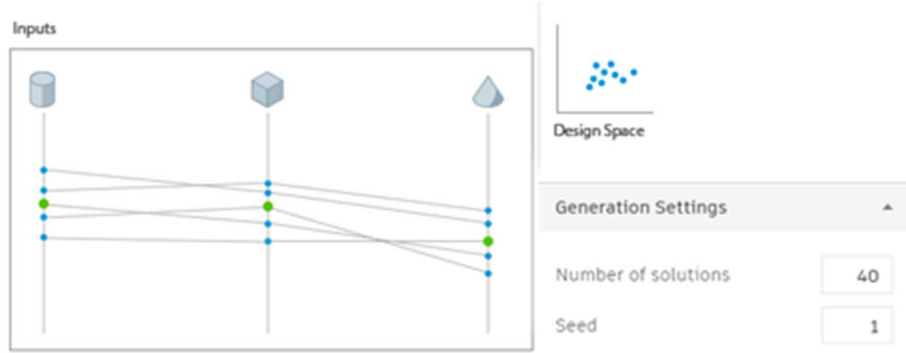


Şekil 3.13 : Çapraz Çarpım Metodu Çalışma Prensibi (Autodesk, About Generation Methods, 2022).

▪ **Bunun Gibi Metodu:**

Tercih edilen bir sonucun farklı varyasyonlarını elde etmek için bu yöntem kullanılabilir. Bunun Gibi yöntemi için değiştirilecek değişkenler seçilir ve her biri için bir başlangıç değeri belirlenir. Sonuçlar oluşturulurken, Üretken Tasarım Aracı değişken için belirtilen minimum veya maksimum değeri aşmamak kaydıyla başlangıç değerinin %20'si (artı veya eksi) dahilindeki değerleri kullanır. Şekil 3.14'te Bunun Gibi metodunun kullanılması ile elde edilebilecek olası tasarım alternatiflerinin grafik anlatımı ile optimizasyon

çalıştırılmadan önce yapılması gerekli üretim ayarlarına ait ekran görüntüsüne yer verilmiştir.



Şekil 3.14 : Bunun Gibi Metodu Çalışma Prensibi (Autodesk, About Generation Methods, 2022).

3.5 Üretken Tasarım ve BIM Entegrasyonu

Parametrik, Üretken ya da Algoritmik tasarım, genel olarak, karar değişkenlerinin geometriye bağlandığı bir yol olan komut dosyası aracılığıyla geometriyi esnek bir şekilde tanımlamanın ve yaratmanın etkili bir yoludur. Üretken tasarımın inşaat sektöründe kullanılabilirliğini sağlamak açısından BIM programları önemli bir yer tutmaktadır. Bir bilgisayar destekli tasarım (CAD) yöntemi olarak Üretken Tasarım, tasarımı hızlı bir şekilde keşfetmek için çoğunlukla geometrik modellemeye odaklanır. Ancak, "bilgi" niteliği genellikle üretilemez. Farklı olarak BIM, inşa edilebilirliği kolaylaştırmak için hem geometri hem de bilgi özelliklerine sahip bileşenler üretir. Bu nedenle, BIM'in entegre edilmesi Üretken Tasarım tarafından üretilen tasarım çözümlerinin inşa edilebilirliğini artırabilir. BIM yazılımları (örneğin, Revit, ArchiCAD, vb.), bir binanın veri ve bilgilerine erişim, çıkarma, seçme ve değiştirmeye izin veren bir Uygulama Programlama Arayüzü (API) sağlar. Ayrıca API, kullanıcılara uygulamanın yeteneklerini genişletmek için bir program veya komut dosyası yazarak eklentiler geliştirebilecekleri bir platform sağlar. Örneğin, Revit API, Revit'in kapasitesini artırmak ve iş akışlarını iyileştirmek için yetkin Revit kullanıcılarının kendi araçlarını programlayarak özelleştirmelerini sağlamaktadır (Ma, Wang, Jun, Xiang, & Sun, 2021). BIM ve Üretken Tasarım entegrasyonu uygulamak için BIM programlarında kullanılan API'ler, imkân ve platform desteği sunmaktadır. Örneğin Revit'te kullanılan Dynamo programı ile Rhino'yla kullanılan Grasshopper Üretken Tasarım için parametrik modellerin oluşturulmasını ve simülasyon araçlarının

kullanılmasını sağlarken, Revit için Generative Design aracı, Rhino için Galapagos programı algoritmaların çalıştırıldığı programlar olarak kullanılmaktadır. Dynamo ve Grasshopper araçları ilk çıktıkları yıllarda görsel programlama araçları olarak kullanılmaktaydılar, son yıllarda ise geliştirilen yeni arayüz programları ile metin tabanlı programlama araçları ile etkileşime geçerek, modellerin ya da verilen oluşturulmasını, değiştirilmesini, analiz edilmesini sağlamaktadırlar.

3.6 Metin Tabanlı Programlama

Parametrik, üretken ya da algoritmik tasarım, temel olarak, karar değişkenlerinin geometriye bağlandığı bir yol olan kodlama yoluyla geometriyi esnek bir şekilde tanımlamanın -ve yaratmanın- etkili bir yoludur (Touloupaki & Theodosiou, 2017). Geleneksel bir komut dosyası ortamı genellikle metin tabanlıdır. Çeşitli işlemleri gerçekleştirmek için algoritmalar (adımlar) yazmak üzere boş bir dosya sağlar. Algoritmalar çok hassas sözdizimi kullanılarak yazılır. Herhangi bir eksiklik, parantez veya noktalı virgül kadar küçük bir ayrıntı bile hatalara neden olabilir (Jabi, 2013). Metin tabanlı programlama dillerine örnek olarak Python, C++, Java örnek olarak verilebilir. Bir komut dosyası genellikle standart parçalardan oluşur: komut dosyasının ne olduğu ve ne yaptığına dair bir açıklama, değişkenler (değişkenleri bilgi depolamak için kullanılan depolama birimleri), fonksiyonlar (girdiyi kabul eden, üzerinde işlem yapan ve çıktı üreten özel ve bağımsız algoritmalar) ve arayüzler (hangi düğmelerin, kaydırıcıların ve onay kutularının görüntüleneceğine ve bunlara nasıl tepki verileceğine dair açıklamalar).

3.7 Görsel Programlama

Daha modern komut dosyası ortamlarında nesne yönelimli programlama (OOP) olarak adlandırılan yönetime geçilmiştir. OOP sistemlerinde, değişkenler ve fonksiyonlar yerine, kendi değişkenlerini ve fonksiyonlarını (metot olarak adlandırılır) kendi içlerinde saklayan tam nesneler tanımlarsınız (Jabi, 2013). Tasarımcılara parametrik modeller üretmek amacıyla komut dosyası yazma sürecinde yardımcı olmak için Görsel Programlama (GP) sistemleri geliştirilmiştir (Touloupaki & Theodosiou, 2017). 1990 yılında B. A. Myers bir GP sistemini "kullanıcının bir programı iki (veya daha fazla) boyutlu bir şekilde belirtmesine izin veren herhangi bir sistem" olarak tanımlamıştır (Myers, 1990). 1984 yılında ise D. Halbert GP sistemlerini, programcı

olmayanların az bir eğitim yoluyla, oldukça kompleks programlar oluşturmaları için değerli bir araç olarak tanımlamıştı (Halbert, 1984). O zamandan bu yana, GP sistemlerinin büyük ölçüde geliştiği ve Grasshopper, Dynamo, ve GenerativeComponents gibi yazılımlar aracılığıyla parametrik modellemeyi tasarım pratiği için giderek daha erişilebilir hale getirmiştir (Touloupaki & Theodosiou, 2017).

3.8 Hibrit Programlama

Hibrit tabanlı programlamaya olanak sağlayan uygulamalar, metin tabanlı ve görsel tabanlı programların eksik kaldığı noktalarda birbirlerini destekleyebildikleri bir ara yüz oluşturmuşlardır. Görsel programlamanın birçok avantajı vardır. Sezgisel bir görsel ara yüzde, programlama dili öğrenmeden programlar oluşturmanıza olanak tanır. Bununla birlikte, görsel bir program karmaşık hale gelebilir ve zaman zaman işlevsellik açısından yetersiz kalabilir. Örneğin, metin tabanlı programlama dilleri koşullu ifadeler (if/then) ve döngü yazmak için çok daha ulaşılabilir yöntemler sunar. Metin tabanlı programlama dilleri, görsel tabanlı programların yeteneklerini genişletebilen ve birçok düğümü birkaç kısa kod satırıyla değiştirmenize olanak tanıyan güçlü bir araçtır (Autodesk, Python, 2022). Dynamo, kullanıcılarına Python'un ilişkisel programlama dili DesignScript'i kullanarak minyatür metin komut dosyası ara yüzlerinde kodlama imkânı sağlar (Castelo-Branco & Leitão, 2020). DesignScript, hem küçük kod parçalarına anında geri bildirim sunan hem de büyük ve karmaşık etkileşimlere ölçeklenebilen okunabilir ve özlü bir dildir (Autodesk, What's a Code Block?, 2022).

4. ÜRETKEN TASARIM İLE ÇATI YÜZEYİ OPTİMİZASYONU ÖNERİSİ

İklim değişikliği, yenilenemeyen kaynakların tükenmesi ve arazi kullanımındaki sınırlamalarla ilgili artan endişeler nedeniyle, mevcut binaların güçlendirilmesine büyük önem verilmektedir. Buna bağlı olarak, hükümetler ve uluslararası topluluklar mevcut binalarda enerji performansını teşvik etmek için önemli girişimlerde bulunmakta, teşvik paketleri ya da zorunluluklar getirmektedir. Mevcut bina koşullarının sınırlayıcı olması nedeniyle, mümkün olan en iyi önlemlerin seçilmesi, verimli sonuçlar ve yatırım geri dönüşleri sağlamak için önemlidir.

İklim krizine neden olan sera gazı salınımlarına önemli ölçüde katkısı bulunan binaların işletim sırasında kullandıkları enerji miktarını düşürmek ve kullanılan enerji çeşidini fosil yakıtlardan, yenilenebilir enerjiye dönüştürmek yapı sektöründe alınması gerekli önemli adımlardan birisidir. Binalardaki enerji etkinliği artırmanın en kolay ve bilinen yollarının başında binaların yalıtılması gelmektedir. Kabakçı'nın 2019'da hazırladığı sunumda belirttiği üzere, mevcut binalarda yapılacak yalıtım iyileştirmeleri ile binaların enerji ihtiyaçları %35 ile %40 oranında azaltılabilir. Bu iyileştirmeye ek olarak binalarda kullanılan enerji çeşidinin değiştirilip, karbonsuz enerji kaynaklarına geçilmesi önemlidir. Binalarda kullanılan enerji çeşidini değiştirmenin ülkemiz için en hızlı ve kolay yolu ise bunu güneş enerjisi ile yapmaktır. Ancak bu dönüşümün yalnızca yeni yapılacak binalarda ele alınmaması gereklidir. Yapılan araştırmalar günümüzde yapılı çevrede yerini almış binaların büyük bir bölümünün 2050 yılında da varlıklarını devam ettireceğini göstermektedir. Bu nedenle mevcut yapılı çevrenin enerji etkin binalara dönüştürülmesi iklim krizinin boyutlarını büyük ölçüde azaltacak karbonsuzlaşma yol haritaları için büyük bir önem taşımaktadır. Türkiye'de 2019 yılı itibarı ile toplam bina sayısının 9,3 milyonun üzerinde olduğu belirtilmektedir (Kabakçı, 2019). Bunların 6,5 milyonu konut yapılarıdır (SHURA, 2020). Mevcut yapılı çevrede güneş enerjisi üretimi için kullanılabilecek yollardan birisi çatılarda uygulanacak fotovoltaik sistemler olabilir. Türkiye'deki konut sayısı göz önüne alındığında, konut yapılarında kullanılacak fotovoltaik sistemler ile üretilebilecek elektrik enerjisi miktarının önemli ölçüde karbon emisyonunu azaltacağı öngörülebilir. Bina çatılarında yapılacak olan FV sistemlerin verimliliği, çatıların komşu binalar ya da çevresindeki ağaçlardan gelen gölgeleme değerleri, çatılarda kullanılan ekipmanların çatı üzerine yaptığı gölgeler, çatıların güneşe göre konumu ve çatı

çeşitleri gibi faktörlerden dolayı düşmektedir. Bu düşüş mesken binaları için %68 olarak hesaplanmıştır (WorldBank, 2018). Bu çalışmada mevcut binalarda meydana gelen bu verimlilik düşüşünün azaltılması amaçlanmıştır.

Mevcut çatı yüzeylerine binayla bütünleşik olmayan fotovoltaik panellerin uygulanması, mimari estetik kaygılardan dolayı doğru bulunmamaktadır. Bu nedenle bu çalışmada önerilen çözüm, binayla bütünleşik fotovoltaik sistemlerin uygulanmasıdır. Binayla bütünleşik fotovoltaik sistemler iki farklı yolla binaya entegre edilebilir. Bunlardan birincisi bina cephesine bir kaplama malzemesi olarak uygulanması ya da güneş kırıcı olarak işlevlendirilmesi, ikinci olarak da çatılarda kaplama malzemesinin üzerine çatı ile aynı açıyla monte edilmesi ya da direk olarak çatı kaplama malzemesi olarak kullanılmasıdır. Mevcut yapılarda silüetin değiştirilmek istenmemesi ve konut yapılarında cephelerde pencere oranlarının fazlalığı nedeniyle binaya entegre fotovoltaiklerin çatı yüzeyinde uygulanmasının daha verimli olacağı görülmektedir. Ancak mevcut binaların çatı tasarımları çoğunlukla güneş enerjisinden maksimum düzeyde faydalanmak üzere tasarlanmamıştır. Mevcut binaların çatılarına uygulanacak fotovoltaik panellerden maksimum oranda faydalanabilmek için çatılarda tadilata gidilmesi ve yeni yapılacak çatı tasarımlarında, binaların bulunduğu konum, çevre binaların birbiri üzerindeki etkisi, hava durumu verisi gibi etkenlerin hesaba katılarak, tadilat projelerinin oluşturulması gereklidir. Şekil 4.1’de araştırmanın problemi, hedefi, kısıtlayıcıları ve girdileri belirtilmiştir.

PROBLEM	Mevcut bina çatılarının güneş enerjisinden maksimum düzeyde faydalanmak üzere tasarlanmamış olması
HEDEF	Mevcut Çatıları tadilat ederek güneş enerjisinden maksimum düzeyde faydalanma, buna bağlı olarak CO2 emisyonunu azaltma.
KISITLAYICILAR	İmar yönetmeliğinden gelen kurallar
GİRDİLER	Mevcut çatıların taban yüzeyi kenarları, çalışılacak alan lokasyon ve hava verisi, bina yükseklik, bina konumu

Şekil 4.1 : Çalışmanın ana kıstasları.

İyi yönetilemeyen çok sayıda basılı belge ve çizim nedeniyle farklı taraflar arasındaki bilgi alışverişindeki hatalar, güçlendirme projelerindeki zorluklardan birisidir (Roberts, 2008). Bu nedenle, güçlendirme projelerindeki tüm tarafların doğru ve ihtiyaç duyulan bilgileri alabilmesi için bilgilerin düzgün bir şekilde yönetilmesi gerekmektedir. Ayrıca, yeşil güçlendirme uygulamasında zaman kısıtlamaları, bina sahiplerini yatırım için ödeme yapmaya ikna etmede zorluklar, binaların inşa edildiği haliyle ilgili belgelerin eksikliği, güncel olmayan bilgiler ve mevcut bina koşullarının belirsizliği gibi sorunlarla karşılaşmaktadır (Ma, Cooper, Daly, & Ledo, 2012; Volk, Stengel, & Schultmann, 2014). Geleneksel tasarım metotları kullanılarak çatı iyileştirmeleri için tasarım alternatiflerinin değerlendirilmesi, kısıtlı sayıda alternatifin oluşturulup değerlendirmeye alınabilmesi ve solar radyasyon hesaplarının bu kısıtlı sayıda alternatif üzerinden gerçekleştirilecek olması nedeniyle optimum çözüme ulaşmakta oldukça zorlanılacağı, binaların birbiri üzerindeki gölge etkilerinin hesaplanabilmesi için komşu binalarla birlikte bir optimizasyon çalışmasının gerekliliği nedeniyle bu çalışmanın uzun proje süresi gerektiriyor olması ancak tasarım aşamalarındaki genellikle kısıtlı teslim süreleri nedeniyle geleneksel yöntemle yapılacak bir çalışmanın bu konuda yetersiz olacağı öngörülmektedir.

Yeşil güçlendirme tasarımı sırasında mümkün olan en iyi çözümü seçme süreci, birbiriyle çelişen hedefler sorunuyla karşı karşıyadır. Bunun nedeni, optimum çözümün enerji, ekonomi, teknoloji, çevre, yönetmelikler ve sosyal yönler gibi çeşitli faktörler arasında bir denge gerektirmesidir (Yu, Li, Jia, Zhang, & Wang, 2015). Bu denge hesaplamalı tasarım araçları kullanılarak hızlı bir şekilde kurulabilir. 6D BIM olarak adlandırılan süreçle, mevcut binalar modellenabilir ve tasarım alternatifinin oluşturulması istenilen bina elemanları parametrik olarak modellenabilir. Bu sayede değişen kriterlere göre tasarım alternatifi seçenekleri sunulur ve oluşturulan seçeneklerin, simülasyon programlarında analizleri gerçekleştirilerek hızlı bir şekilde istenilen hedefe ne kadar yaklaşıldığı test edilebilir. Ancak bu süreçte, geleneksel yöntemlerde olduğu kadar zaman alması da yine de kısıtlı alternatifler üzerinden ilerlediğinden optimum bir çözümün bulunması oldukça zordur. Tasarım problemlerinde hedeflenen amaca ulaşmak için simülasyon bazlı optimizasyonların ortaya çıkışı bu hedeflere ulaşma isteğinden ortaya çıkmıştır. Yeşil güçlendirme tasarımı desteklemek üzere optimizasyon için bilgisayar algoritmalarının kullanılması, optimum çözümün belirlenmesine yardımcı olabilecek potansiyele

sahiptir. Kullanılan optimizasyon algoritmalarıyla, çalışma başında belirlenen popülasyon büyüklüğünde alternatifler her bir jenerasyon için üretilir ve diğer bir jenerasyona, simülasyon hesaplamasında hedef çıktıya en yakın tasarım iletilerek bu alternatif üzerinden yeni bir popülasyon üretilir ve bu işlemler durma kriteri ile karşılaşıncaya kadar tekrar eder. Bu sayede geleneksel yöntemlerle ya da parametrik modelleme ile oluşturulup simülasyona girmesi mümkün olmayan sayılarda tasarım alternatifleri oluşturulup, değerlendirilmiş olur ve optimum ya da optimuma en yakın sonuçlar elde edilir. Bina enerji simülasyonları için algoritma kullanmak isteyen tasarımcıların, birbirinden farklı ve kullanışlı sonuçlar elde etmek için optimizasyonun ardındaki matematiği derinlemesine anlamaları, Revit ve Rhino vb. modelleme yazılımlarında eklenti olarak kullanılabilen Dynamo ve Grasshopper gibi açık kaynaklı görsel programlama araçları sayesinde gerekmemektedir. Bu görsel programlama araçları, kodlamaya daha az aşina olan tasarımcıların genetik algoritmalar ile optimizasyon çalışmalarının gerçekleştirmesine olanak sağlamaktadır. Çalışmada kullanılan programlar Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



OPEN STREET MAP

Binaların mevcut durum verisi buradan alınmıştır.



DYNAMO

Parametrik modelleme ve simülasyon için kullanılmıştır.



REVİT

Modelleme aracı olarak kullanılmıştır.



GENERATIVE DESIGN

Genetik algoritmanın çalıştırılması ve tasarım jenerasyonlarının üretilmesi için kullanılmıştır.

Şekil 4.2 : Çalışmada kullanılan programlar.

4.1 Çalışma Alanı ve Kullanılan Veri

Bu tez çalışması kapsamında, İstanbul ilinde yer alan bir konut yapı adası seçilmiştir. Çalışma alanının belirlenmesinde, ada içerisinde bitişik ve ayırık nizama sahip birbirlerinden farklı kat yüksekliklerinde binalar olması belirleyici kriter olmuştur. Bu sayede binaların birbirleri üzerine düşürdükleri gölge alanları analiz çalışmasını etkileyen bir faktör olacaktır. Şekil 4.3’te çalışma alanı gösterilmiştir. Çalışma alanının mesken yapılarının bulunduğu bir ada üzerinden gerçekleştirilmesinin nedeni, çatı üstü

Pv sistemlerinin toplam potansiyel kapasitesinin yaklaşık %70'i (SHURA, 2020) konut yapılarından sağlanabilir olmasıdır.



Şekil 4.3 : Çalışma alanı.

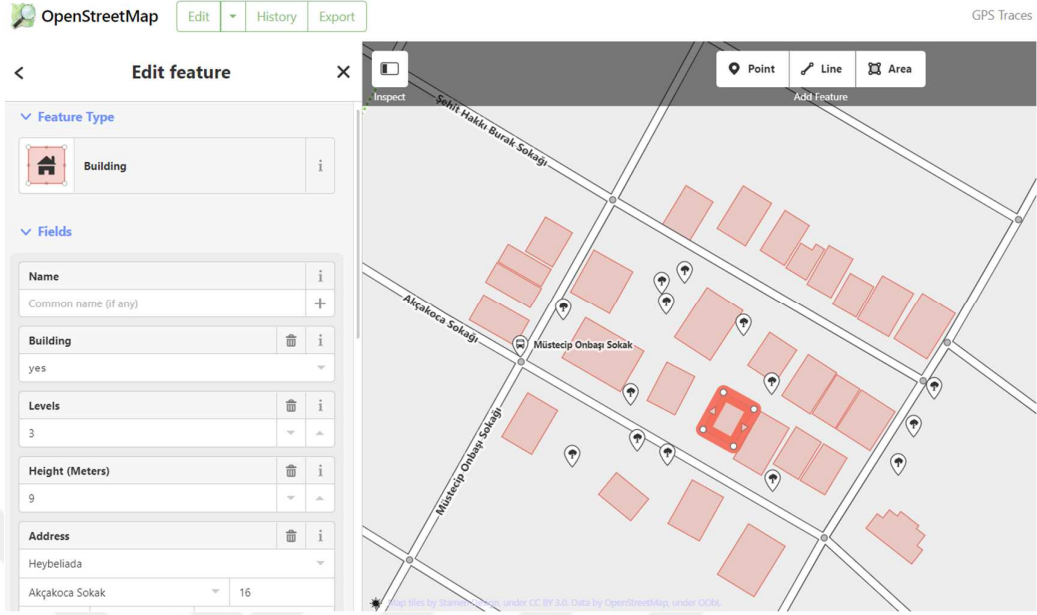
Seçilen alanın mevcut çatı tasarımı ile elde ettiği güneş radyasyon miktarı Dynamo içinde çalıştırılan Güneş Radyasyonu Analiz aracı ile tespit edilmiştir. Çalışma alanı yaklaşık 3540 m² dir ve 12 adet mesken yapısı yer almaktadır. Meskenler 2-4 aralığında farklı kat sayılarına sahiptir. Yapılar ile ilgili ayrıntılı bilgi aşağıda yer alan Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 : Çalışma Alanı Bina Bilgileri

Bina Adı	Bina Yüksekliği (m)	Çatı Alanı (m ²)	Hane Sayısı
Bina 1	13	111	8
Bina 2	11	85	3
Bina 3	9	92	3
Bina 4	7	197	8
Bina 5	9	76	3
Bina 6	8	80	3
Bina 7	11	134	6
Bina 8	12	159	12
Bina 9	9	80	3
Bina 10	8	103	2
Bina 11	9	116	6
Bina 12	7	79	2
Toplam		1312	61

Enerji Dönüşüm Merkezi'nin (SHURA, 2020) paydaş görüşmelerinden elde edilen verilere göre, her bina tipi için PV sistemlerinin kurulmasına uygun ortalama çatı alanı, kat başına iki daire varsayıldığında, çok aileli binalar için 150-250 m²; tek aileli evler için 80-120 m²'dir. Çalışma alanında tek ve çok aileli evler bulunmaktadır. Yapılar bina yükseklikleri baz alınarak numaralandırılmıştır. Bina 1, bulunduğu yükselti kotu da dikkate alındığında en yüksek yapıyı temsil etmektedir. Binaların toplam çatı alanı 1312 m²'dir.

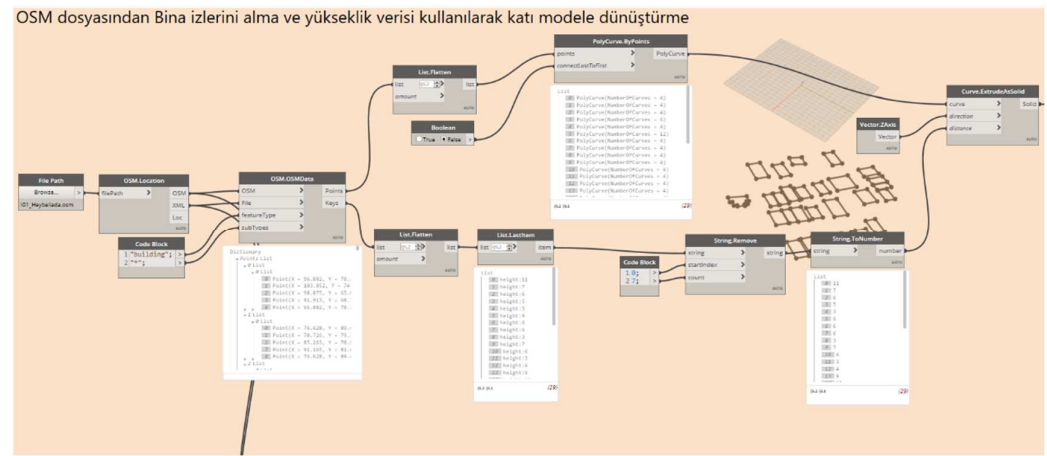
Tez çalışmasında yapı adası ile ilgili mevcut veriler, OpenStreetMap web sitesinden alınmıştır. OpenStreetMap web sitesi açık kaynaklı bir harita oluşturma projesidir. OSM verilerinin doğruluğu, GPS cihazları, uydu görüntüleri, düşük teknoloji alan haritalar tarafından teyit edilir (OpenStreetMap, 2022). Daha önce verisi girilmiş alanlar ile ilgili veri osm dosya formatı ile dışarı aktarılabilir. Ayrıca çalışma yapmak istediğiniz yer ile ilgili veri girişinize izin veren bir web tabanlı uygulamadır. Mevcut harita öğeleri için hazırlanmış öznitelik alanlarını ilgili veriler ile doldurarak daha sonra bu veri dışarı aktarılabilir. Örneğin binalar için kat adedi, kat yüksekliği, bina numarası, çatı malzemesi rengi, müellif mimarın ismi, engelli erişiminin olup olmadığı gibi alanlar yer almaktadır. Eksik veriler bu alanlar kullanılarak girilebilir, sorgulanabilir ve daha sonra çalışma kapsamında kullanılabilir. Çalışma kapsamında OSM web sitesinde bulunan çalışma alanı içinde yer alan binalarla çevre binaların obje verisi kullanılmıştır. Öznitelik alanlarına uydu ve sokak görüntülerinden elde edilen bilgiler eklenmiştir. Kat adedi ve kat yüksekliği girilen bilgiler arasındadır. Ayrıca mevcut durumda yükseklikleri, bina yüksekliğinden fazla olan ağaçlar da gölgelemeye neden olacakları için nokta verisi olarak OSM'ye işlenmiş ve yükseklikleri girilmiştir. Şekil 4.4'te OSM web sayfası düzenleme alanı gösterilmiştir.



Şekil 4.4 : OSM web sayfası, veri girişi.

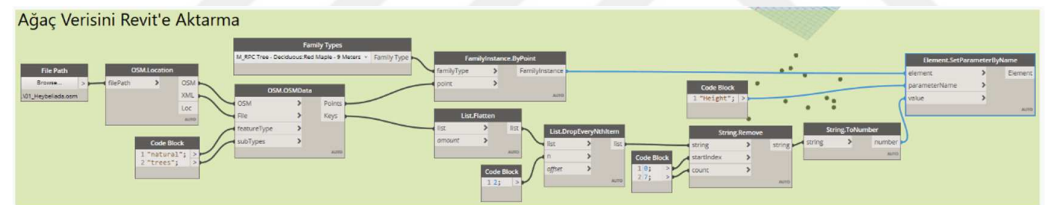
4.2 Mevcut Durumun Modellenmesi ve Analizinin Gerçekleştirilmesi

Tüm BBFV tasarım süreci, konum, arazi, yönelim, çevredeki binalar ve bina yüzeylerinde potansiyel gölgelenmeye neden olabilecek çevredeki bitki örtüsünün mevsimsel değişikliğini dikkate alan çevresel koşulların değerlendirilmesi ile başlar. BBFV, cephe ve yardımcı yapı elemanlarında çok farklı şekillerde kurulup entegre edilebileceğinden, bu yüzeylerin detaylıca çalışılması gerekmektedir. Bu detaylı çalışma, tüm yüzeylere düşen toplam güneş potansiyelinin hesaplanması ile başlayabilir, sonrasında en etkili yüzeylerin tanımlanması ile devam edebilir. BBFV yüzeylerin erken tasarım aşamasında belirlenmesi, başarılı entegrasyon ve optimum BBFV enerji performansı açısından oldukça önemlidir (International Energy Agency Photovoltaic Power System Programme, 2019). Bu bağlamda, mevcut durum için OSM dosya uzantısı ile alınan veriler Revit programında kullanılmak üzere Dynamo görsel programlama aracı ile Revit modeli olarak oluşturulmuştur. Revit modeli oluşturulmadan önce ilk olarak Revit dosyasında çalışma alanının lokasyon bilgisi girilmiş ve ölçü birimi olarak metre ayarlanmıştır. Dynamo standart düğümleri içerisinde bu veriyi okumak için gerekli düğüm olmadığı için ELK paketi yüklenmiştir. OSM verisinden Dynamo kodları ile bina izi bilgisi ile kat yükseklikleri ve kat adedi verileri çekilerek Revit modeli oluşturmak için OSM.OSMData düğümü



Şekil 4.5 : OSM bina verisinin Dynamo ile okunması.

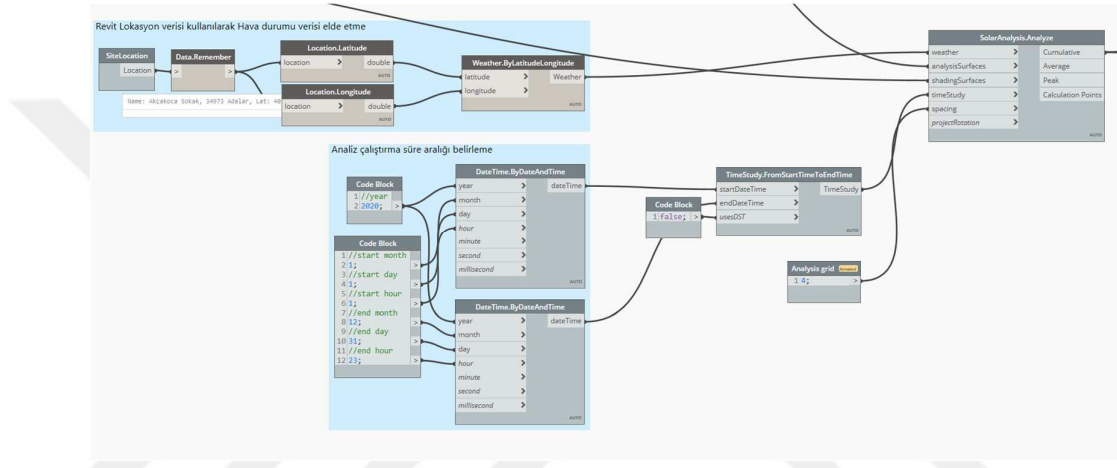
Ağaç bilgileri de aynı şekilde elde edilmiş ve Revit aile oluşturma düğümü ile gerçek Revit ağaçları olarak modele aktarılmıştır. İlgili düğümler Şekil 4.6’da gösterilmiştir.



Şekil 4.6 : OSM ağaç verisinin Dynamo ile Revit modeline dönüştürülmesi.

Topografya ile ilgili veriler ise OSM’de şu an için sadece ABD’nin topografya verisi olduğu için Sketchup programından elde edilmiştir. 3d olarak dışarı aktarılan model daha sonra Revit programında açılıp programın kendi topografya modeline dönüştürülmüştür. Mevcut durum çatı tasarımları ise uydu fotoğraflarından yararlanılarak Revit Çatı komutu kullanılarak modellenmiştir. Mevcut çatı tasarımları ile elde edilen güneş radyasyonu miktarı Dynamo ekibi tarafından oluşturulan ancak paket olarak indirilmesi gerekli Güneş Radyasyon Analiz düğümü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analiz düğümünü kullanmak için gerekli girdi verileri, hava durum verisi, analiz süre aralığı, gölgeleme yapan yüzeyler, analizi yapılacak yüzeyler, analiz yapılacak noktalar arasındaki uzaklık değeri ile doğru kuzeyi ayarlamak için proje rotasyonu verisidir. Hava durumu verisi, Revit’te lokasyon belirlerken seçilen

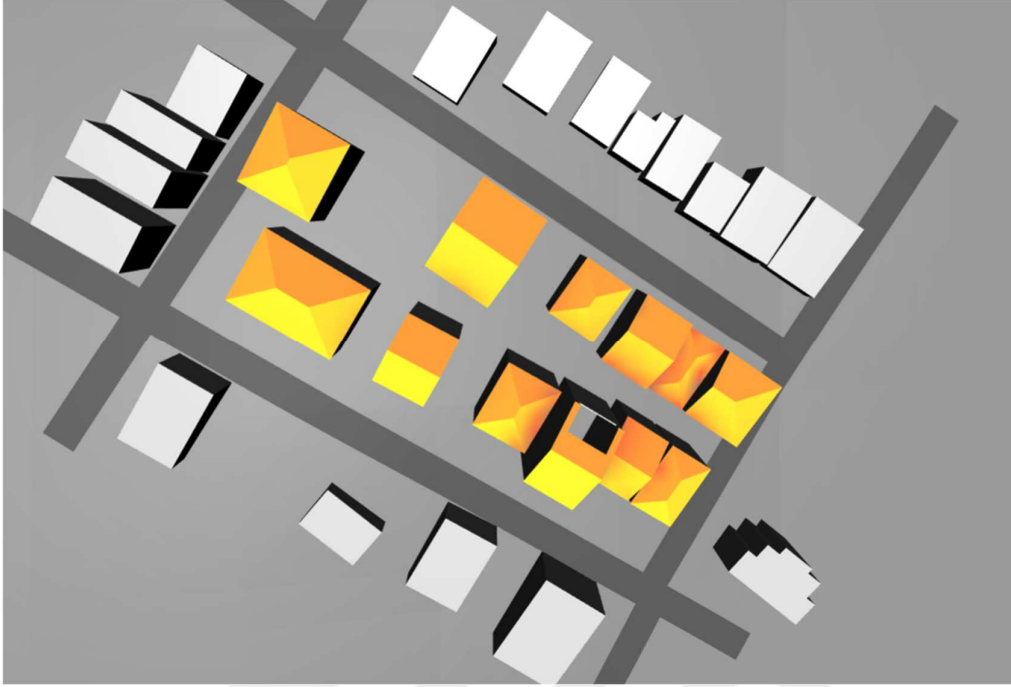
Çalışma süresi olarak yıllık güneş radyasyonu hesaplanmak istendiği için bir senelik aralık belirlenmiş ve 2020 senesi verilerinin kullanılması için tarihler girilmiştir. Bu sayede 2020 senesinde mevcut lokasyonda olan tüm hava durumları saatlik olarak analiz edilerek 2020 senesi yıllık güneş radyasyon değerlerine ulaşılmıştır. Şekil 4.7’de kullanılan Dynamo düğümleri gösterilmiştir.



Şekil 4.7 : Dynamo içinde hava durumu verisi oluşturma.

Analizi yapılacak çatı yüzeyleri, yüzey seçme düğümü kullanılarak Dynamo'ya aktarılmıştır. Aynı işlem gölgeleme yapılacak yüzeyler için de gerçekleştirilmiştir.

Oluşturulan Dynamo kodu çalıştırıldığında yıllık güneş radyasyonu için elde edilen sonuç yıllık 858 kWh/m²'dir. Şekil 4.8'de sarı görülen alanlar maksimum güneş radyasyonuna maruz kalırken, kırmızı alanlar gölgelenme ve yönelim nedeni ile daha az güneş radyasyonuna maruz kalan alanları temsil etmektedir.

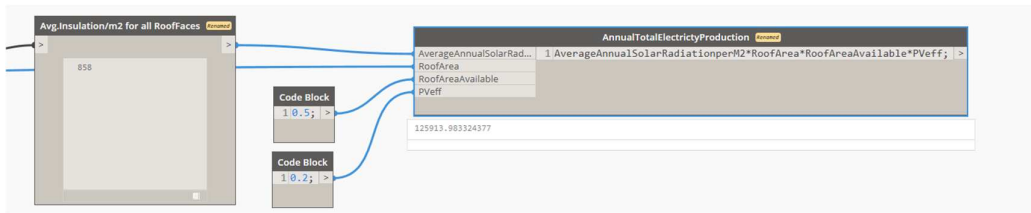


Şekil 4.8 : Mevcut çatı tasarımları ile yapılan Güneş Radyasyonu sonuçları.

Günümüzde üretilen elektriğin ortalama karbon yoğunluğu 475 gCO₂/kWh'dir (Agency, 2022). Ticari amaç ile kullanılmayan çatı üstü fotovoltaik panellerin verimliliği %20'dir. Çatı alanlarının FV sistem bakım yürüme yolları, çatı kapak için bırakılan alan, gölge düşen alanları ile kırma çatı kullanımından dolayı oluşan üçgen alanların FV paneller ile kaplanmayacağı varsayılarak %50'lik kısımda güneş enerjisi için uygulama yapılacağı baz alınmıştır. Bu bilgiler ile mevcut çatı tasarımlarıyla yıllık üretililecek enerji miktarı şu şekilde bulunabilir.

$$\text{Yıllık Ortalama Radyasyon} \times \text{Kullanılabilir Çatı Alanı} \times \text{Panel Verimliliği}$$

Yıllık elektrik enerjisi miktarını bulan bu formül, Dynamo içerisinde yazılmıştır. Şekil 4.9, bu düğümünü göstermektedir.



Şekil 4.9 : Yıllık Elektrik Enerjisi Üretimini hesaplanması.

Çalışılan alan çatıları için FV panel sistemi ile yıllık üretilebilecek elektrik enerjisi miktarı 125.914 kWh'dir. Üretilen bu değer ile yıllık CO₂ emisyonunu ortalama olarak 59809 kg azaltmak mümkün görülmektedir.

Türkiye'de hane başına yıllık tüketilen elektrik enerjisi ortalama olarak 2760 kWh'dır (EMO, 2022). Çalışılan alanda bulunan 61 hanede toplam yıllık tüketilen elektrik enerjisi miktarı 168.360 kWh olarak bulunur. Fotovoltaik panellerle elde edilen elektrik enerjisi çalışılan alanın elektrik ihtiyacını yaklaşık olarak %75'ini karşılama potansiyeline sahiptir.

Bu değer in üretken tasarım kullanılarak maksimum düzeye çıkarılması hedeflenmiştir. Bu nedenle belirlenen yapı adasındaki çatılarda kullanılmak üzere güneş enerji panelleri için iyileştirme yapılacağı varsayılmıştır. Amaç çıktımız sadece bir tane olduğu için problem tek amaçlı optimizasyon problemidir. Bu çalışmada kullanılan araçlar ise şu şekildedir; çatıların parametrik modelleri için Dynamo programı, m2 başına düşen yıllık ortalama güneş radyasyonu analizi için Dynamo içerisinde çalışan Güneş Analizi düğümü, üretken tasarım algoritmasını çalıştıracak olan Üretken Tasarım aracı. Çalışma için aşağıda yer alan süreçler izlenmiştir.

4.3 Üretken Tasarım Çalışma Prensipleri

Yapı optimizasyonu prosedürleri tipik olarak yinelenmeli bir şekilde tekrarlanabilen altı farklı adımdan oluşur (Østergård, Jensen, & Maagaard, 2016). Bunlar;

- Tasarım değişkenlerinin ve kısıtlamalarının belirlenmesi.
- Simülasyon aracının seçilmesi ve bir temel modelin oluşturulması.
- Amaç işlevlerin seçimi.
- Optimizasyon algoritmasının seçimi.
- Optimizasyon yakınsaması elde edilene kadar simülasyon çalıştırma.
- Verilerin yorumlanması ve sunulmasıdır.

Çalışmada bu adımlar üzerinden ilerleme sağlanmıştır.

4.3.1 Tasarım Değişkenlerinin ve Kısıtlamalarının Belirlenmesi

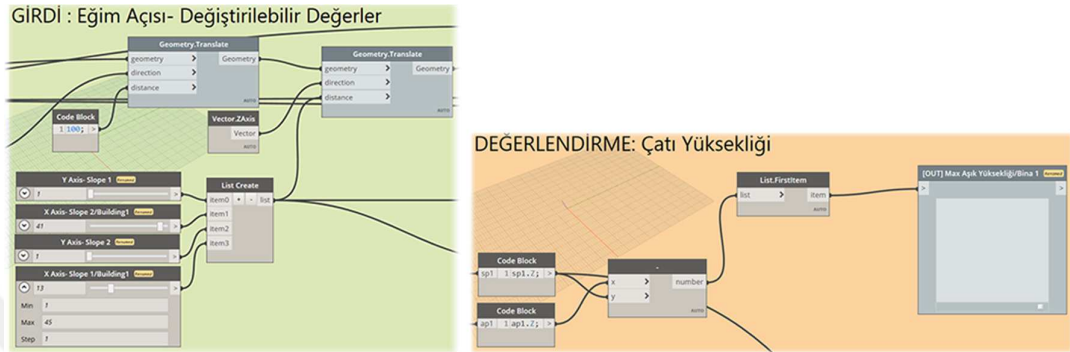
Bir tasarım optimizasyon problemini çözmeden önce, tasarım problemi matematiksel olarak formüle edilmeli, burada amaç ve kısıt fonksiyonlarının yanı sıra tasarım

değişkenleri de tanımlanmalıdır (Chang, 2015). Mevcut çatı tasarımları ile yapılan analiz çalışması için belirlenen lokasyon ve ona bağlı olarak hava durumu verisi, gölgelemeye neden olacak çevre binaların seçimi, analize tabi olan tarih aralığı seçimi yeni yapılacak çalışma için de aynı şekilde kullanılmıştır. Üretken tasarım metodunun kullanılacağı çatı modelleri ise parametrik olarak yeniden oluşturulmuştur. Çalışma alanı İstanbul'da yer aldığından, İstanbul İmar Yönetmeliği incelenmiş ve yönetmelikte çatılar ile ilgili bulunan kurallar irdelenmiştir. Yönetmelikte yer alan “Çatı şekli; çatı eğimi %45’i ve ulaşılabilecek azami mahya yüksekliği 5.00 metreyi geçmemek kaydıyla; ... belirlenir” (İBB, 2018) ifadesinden yola çıkılarak, parametrik çatı yüzeyleri için eğimler %45 maksimum değerine kadar kısıtlandırılmış, maksimum aşık yüksekliği ise 0-5 metre aralığında değerler alabilecek şekilde çatı yüzeyleri için parametrik model oluşturulmuştur. Çatılar, teras çatı, tek eğimli çatı, kırma çatı, beşik çatı ve amorf çatı yüzeyleri olarak bina tiplerine, çevresel koşullara, mimari üsluba ve yönetmeliklere göre farklı şekillerde tasarlanmaktadır. Literatürde güneş enerjisinden maksimum yararlanma oranına sahip çatı şekilleri ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde, tek eğimli çatı yüzeylerinin ulaştığını ortaya koymuş olsa da mevcut yapı stoğunda tek eğimli çatı çözümlerine gitmek estetik olarak uygun bulunmadığı için çalışma bu perspektiften yapılmamıştır. Ayrıca kırma çatılardaki üçgen alanların fotovoltaik paneller için kullanılabilir alanları daraltması nedeni ile bu çözüm de çatı alternatiflerinin oluşturulması aşamasında tercih edilmemiştir, teras çatılar ise genellikle yalıtım sorunları nedeniyle konut yapılarında tercih edilmeyen bir seçenektir. Bu nedenlerden dolayı, çatıların parametrik modelleri fotovoltaik kurulum alanının daha fazla olması, yalıtım, kar yükü vb. sorunlarla karşılaşma oranının daha az olması, tek eğimli çatılar gibi silüete değişikliğe neden olmamasından dolayı, beşik çatı oluşturulacak şekilde çözümlenmiştir.

4.3.2 Simülasyon Aracının Seçilmesi ve Bir Temel Modelin Oluşturulması

Bina simülasyon araçları, tasarımcıların farklı performans kriterlerine göre tasarımlarını analiz etmelerine olanak tanımaktadır. İlgili güneş radyasyon analiz düğümü bölüm 4.2’de detaylıca anlatılmıştır. Analiz aracında kullanılmak üzere temel modelin oluşturulabilmesi için öncelikle Revit’te bulunan binaların çatı yüzey kenarlarını seçmek için Dynamo içerisinde bir seçim düğümü kullanılmıştır. Seçilen kenarlar üzerinden eğimli yüzeylerin oluşturulabilmesi için gerekli düğümler kullanılmıştır bunlar; taşıma, yüzey oluşturma, kesişen yüzeylerin birleştirilmesi gibi

parametrik çatı modelini oluşturan düğümlerdir. Çatı modeli için eğim değerleri İstanbul İmar Yönetmeliğinde belirtilen kısıtlayıcı değer aralığına bağlanmıştır. Şekil 4.10'da çatı eğimi ve maksimum aşık yüksekliği kısıtlayıcıları için kullanılan düğümler gösterilmiştir.

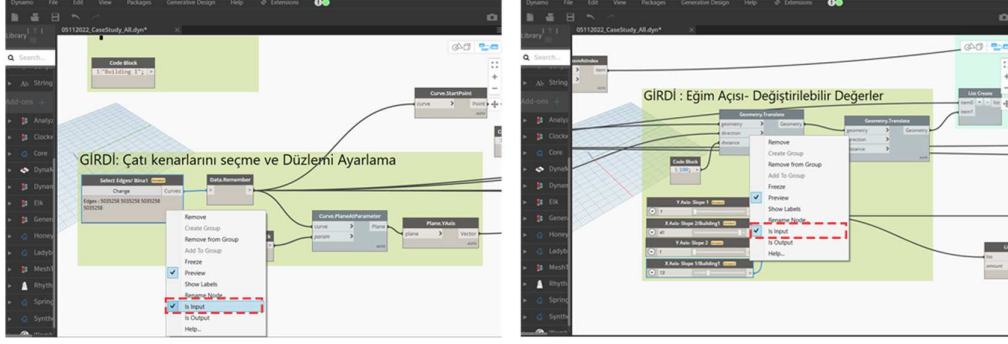


Şekil 4.10 : Çatı yüzeyleri için eğim aralıklarının belirlenmesi.

4.3.3 Amaç İşlevlerin Seçimi

Dynamo programında oluşturulan komut dosyasının Üretken Tasarım aracında kullanılabilmesi için düzenlemeler yapılması gerekmektedir. Üretken Tasarım, optimize edilmiş çıktıların bir dizi tanımlanmış talimat ve ilişkiden oluşturulduğu anlamına gelen geniş bir terimdir. Revit'teki Üretken Tasarım Aracı, kullanıcı tarafından belirtilen girdilere, kısıtlamalara ve hedeflere dayalı olarak bir dizi tasarım çıktısı oluşturacak özelliştir. Üretken Tasarım aracı, belirlenen hedeflere göre ideal çıktılar üretmek için girdi değerlerinin farklı yinlemelerini çalıştırmak üzere Dynamo'yu kullanır. Dynamo içinde, Üretken Tasarım sürecinde kullanılan parametreleri karakterize etmek için kullanılan ve oluşturulan tasarım çıktıları değiştirilecek belirli düğümler vardır (EvolveLAB, 2022). Bunlar girdi, kısıtlayıcı ve çıktı olarak adlandırılırlar.

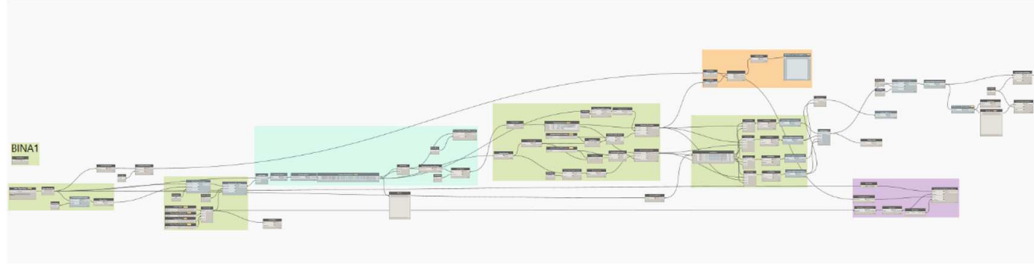
Mevcut çatı yüzeylerinin maksimum şekilde güneş ışınlamalarından yararlanması için yeniden tasarlanması sürecinde üretken tasarımın kullanıldığı bu çalışmada mevcut yapıların çatı taban sınırları girdi olarak seçilmiştir. Bir diğer belirlenen girdi parametresi ise yüzeylerin eğim açılarıdır. Bu düğümlerin Dynamo içerisinde girdi olarak işaretlenmesi gerekmektedir. İlgili düğümler Şekil 4.11'de gösterilmiştir.



Şekil 4.11 : Girdilerin tanımlanması.

Analiz çalışmasında kullanılacak olan çatı yüzeyleri için m2 başına düşen ortalama yıllık radyasyon değerleri, daha önce mevcut çatı tasarımları için yıllık üretilen elektrik enerjisini hesaplamamıza yarayan formül düğümüne bağlanmış ve düğümün sonucunda hesaplanan değer hedef çıktı olarak belirtilmiştir. Tadilatı yapılacak çatıların beşik çatı olarak kurgulanmış olması, güneş enerjisi için kullanılacak panel yerleşimlerine daha fazla alan sağlamaktadır. Daha önce mevcut durum için üretilen elektrik enerjisi hesapları yapılırken %50 olarak alınan kullanılabilir çatı yüzeyi, tadilat sonrası tasarlanan çatılar için %80 olarak belirlenmiştir. Bu değer Dynamo içerisinde bulunan formüle 0.8 olarak yazılmıştır. Çatı aşık yükseklikleri değerleri de hedeflenen çıktı olarak işaretlenmiştir. Ancak çatı aşık yükseklikleri Üretken Tasarım aracı içerisinde Kısıtlayıcı olarak işaretlenecektir. Üretken tasarım aşamasında yıllık radyasyon değerinin maksimum olduğu tasarım alternatifi belirlenirken çatı aşık yükseklikleri kısıtlayıcı olarak kullanılacaktır.

Çalışılan adada yer alan tüm binaların aynı analize girerek farklı çatı tasarımları arasında maksimum Güneş radyasyon değerlerini sağlayan tasarımın bulunması için parametrik model kodu her bir bina için teker teker kullanılmıştır. Bir çatı modeli için oluşturulan parametrik Dynamo modeline ait kodlar Şekil 4.12’de gösterilmiştir. Sonrasında ise analiz edilecek yüzeylerin hepsi bir düğüm aracılığı ile tek bir liste haline getirilip analiz aracına bu şekilde bağlanmıştır.



Şekil 4.12 : Bina 1 çatı modeli için yapılan parametrik kodlama düğümleri.

Parametrelere bağlanan çatı modelleri kırma çatı oluşturacak şekilde parametrelere bağlanmıştır. Ancak kırma çatılarda oluşacak üçgen alanların üst kısımlarında daralan alan nedeni ile fotovoltaik panellerin uygulanamaması nedeni ile beşik çatı çözümlerinin üretilebileceği şekilde parametreler düzenlenmiştir.

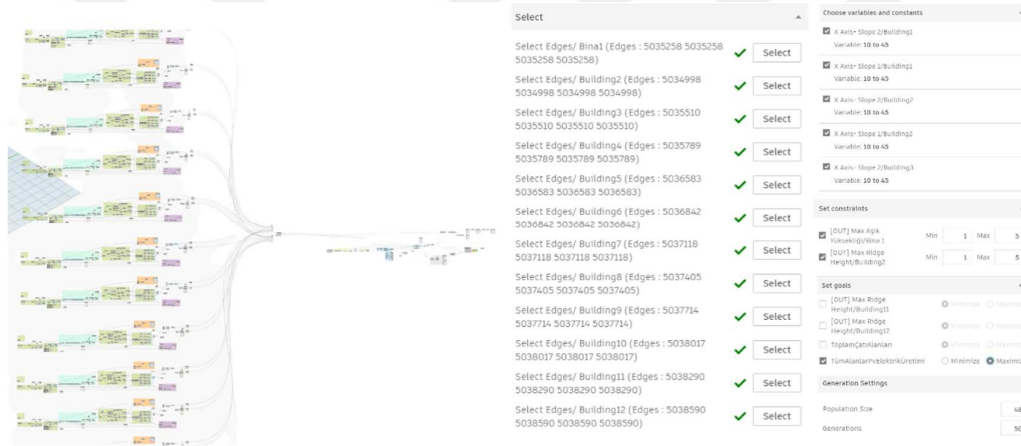
4.3.4 Optimizasyon Algoritmasının Seçimi

Problemin çözümünde tek bir amaç çıktısı olduğu için çalışma bir tek amaçlı optimizasyon problemidir. Bu optimizasyonun üretken tasarım ile çözümlenmesi için Dynamo’da tamamlanan komut dosyasının Üretken Tasarım Aracına aktarılması sürecinde yapılması gerekli ayarlar şu şekildedir;

- Girdi, kısıtlayıcı ve hedef çıktının tanımlanmış olması,
- Girdi düğümleri için Data.Remember düğümünün eklenmiş olması (Bu düğüm sayesinde, Üretken Tasarım Aracı’nın alternatifleri üretirken Dynamo’dan verileri yinelemeli olarak okumaması aracın daha hızlı çalışmasını sağlamaktadır.)
- Revit’te üretilen bir modelin Üretken Tasarım işlevine sokulmamış olması. Üretken Tasarım Aracı Revit modelleri ile değil, Dynamo geometrileri üzerinden çalışmaktadır. Bu nedenle, Üretken Tasarım sonrası seçilen modelin Revit elementine çevrilmesi isteniyor ise bu düğümlere öncesinde Data.Gate düğümünün ilişkilendirilmesi ve kapalı olarak tutulması gerekmektedir
- Komut dosyası son kez Dynamo içerisinde çalıştırılmalı ve dosya kaydedilmelidir.

Üretken Tasarım Aracına direk olarak Dynamo içerisinden ulaşılacağı gibi - öncesinde Üretken Tasarım paketinin indirilmiş olması gerekmektedir- Revit programı içerisinden de ulaşım sağlanabilir. Üretken Tasarım çalıştırıldığında, karşımıza Şekil

4.13'te gösterilen uygulama arayüzü çıkmaktadır. Sol tarafta Dynamo arayüzü, sağ tarafta ise Üretken Tasarım arayüzü görülmektedir. Dynamo içerisinde belirlediğimiz girdi, kısıtlayıcı ve hedef çıktıları burada görülebilir ve kısıtlayıcılar için değer aralıkları seçilebilir ya da girdi olarak kullanılacak yüzey kenarları buradan da direk Revit modelinde seçilebilir. Yapı adasında komşu bina çatılarının birbiri üzerinde yapacakları gölgelemelerin de hesaplanabilmesi için tüm binalar aynı analize sokulmuştur. 3. Bölümde anlatılan Üretken Tasarım metodlarından en iyi radyasyon değerini sağlayacak çatı tasarımlarına ulaşmak istendiği için Optimize Etme metodu seçilmiştir. Böylece, önerilen metodoloji ile makul bir hesaplama süresi içerisinde optimizasyon mümkün hale gelmektedir.

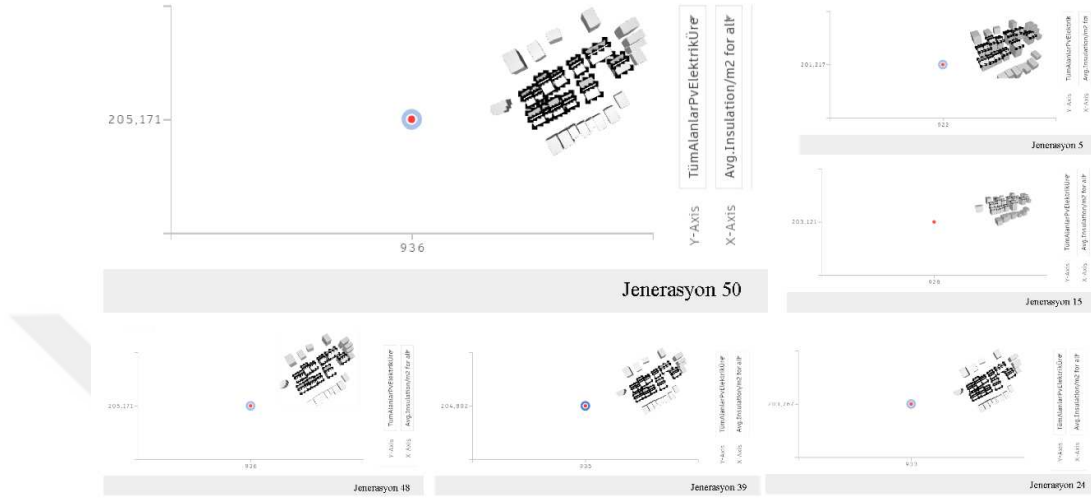


Şekil 4.13 : Dynamo kodu ve Üretken Tasarım ara yüzü.

4.3.5 Optimizasyon Yakınsaması Elde Edilene Kadar Simülasyon Çalıştırma

Simülasyon çalıştırılmadan önce çatı eğimleri %10-45 aralığında değişecek şekilde kısıtlanmış, maksimum aşık yüksekliği için 5 metre değeri kullanılmış ve hedef çıktısı olarak güneş radyasyon analizinin sonuç değeri maksimum olarak seçilmiştir. Simülasyon 50 jenerasyon üretmesi için çalıştırılmıştır ve her bir jenerasyonda üretilecek popülasyon sayısı 40 olarak belirlenmiştir. Bu optimize etme süresi 50 jenerasyon için yaklaşık 10 saat sürmüştür. Yapılan çalışma sonrası optimize edilen çatı tasarımlarıyla yıllık üretilebilecek maksimum elektrik enerjisi miktarı 205.171 kWh olarak bulunmuştur. Üretken Tasarım ile üretilen modeller ve maksimum değere sahip tasarıma ulaşmadan önce jenerasyon üretimi sonuçlarında elde edilen tasarımlar ve değerleri Şekil 4.14'te gösterilmiştir. Bu şekilde yer alan değerler, yapılan çalışma kapsamında, her jenerasyon sonucu elde edilen değerin bir sonraki jenerasyonda da daha da iyileştirilerek aktarıldığını gösterir. Simülasyon çalışmaları daha fazla sayıda

jenerasyon üretmesi için ayarlandığında maksimum değerin yükselmesi ihtimali vardır.



Şekil 4.14 : Üretken Tasarım optimizasyonu sırasında oluşan tasarımlar.

Jenerasyon 5'te m2 başına düşen yıllık güneş radyasyonu değeri 922 kWh iken bu değer 50. Jenerasyon sonucunda 936 kWh'ye çıkmıştır ve yıl boyunca fotovoltaik paneller ile üretilebilecek elektrik enerjisi miktarı 205.171 kWh olarak elde edilmiştir.

4.3.6 Verilerin Yorumlanması ve Sunulması

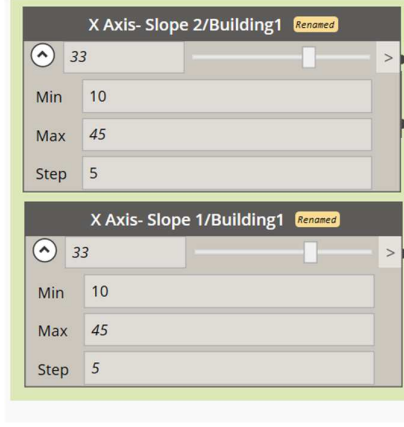
Üretken Tasarım ile oluşturulan ve en yüksek güneş radyasyon değerini veren alternatif ile yıllık üretilebilecek elektrik enerjisi miktarı, mevcut çatı tasarımı ile üretilebilecek elektrik enerjisinin hesaplanması için kullandığımız aynı formül ile hesaplanmıştır. Sadece daha önce bahsedildiği üzere, çatı alanlarında FV kurulumu için uygun alan katsayıları mevcut durum için 0.5, optimize edilmiş çatılar içinse %80 olarak alınmıştır. Optimizasyon sonucu bulunan yıllık elektrik üretim kapasitesi 205.171 kWh'dir. Alınan sonuçlara göre çatı eğimleri %16 ile %43 arasında değişiklik göstermektedir. Yapılan çalışma kapsamında bulunan m2 başına düşen yıllık güneş radyasyon değeri olan 936 kWh'dir. Bulunan fotovoltaik paneller ile yıllık üretilebilecek elektrik enerjisi miktarı ile kWh başına üretilen CO₂ miktarı çarpıldığında, yıllık CO₂ emisyonu azalımına katkısı ise 97456 kg olarak hesaplanmıştır. Bu değer mevcut durum için ise 59809 kg olarak bulunmuştu. Bu durumda çatılarda yapılmış olan iyileştirme ile CO₂ emisyonu azalımındaki artış %63

olarak hesaplanmıştır. Çalışılan alan için yıllık tüketilen elektrik miktarı ortalama 168.360 kWh olarak hesaplanmıştır. Bu durumda çatılarda yapılacak iyileştirme sonrası kullanılacak fotovoltaik paneller ile üretilecek elektrik, çalışma alanının tüm elektrik ihtiyacını karşılarken, fazlasını şebekeye satma potansiyeline sahiptir.

Optimizasyon algoritmasının 50 jenerasyon boyunca çalıştırılması ve her bir jenerasyon için 40 alternatifin oluşturulması, 10 saatlik bir hesaplama sonucunda 2000 farklı alternatifin oluşturulup değerlendirmeye alındığını göstermektedir. Bu sayıdaki bir tasarım alternatifinin bu süre içinde geleneksel tasarım yöntemleri ya da sadece parametrik tasarım yöntemleri ile gerçekleştirilmesinin mümkün olmaması, Üretken Tasarımın önemini ortaya koymaktadır. Ayrıca bu hesaplama süresi boyunca tasarımcının herhangi bir katılımda bulunmasına gerek olmadığı için tasarımcı bu süreyi proje için farklı gerekliliklerin çözümünde kullanabilir.

4.4 Üretken Tasarım Kısıtlayıcılarının Değiştirilmesi ile Optimizasyonların Tekrarı

Yapılan ilk üretken tasarım çalışması sonrasında, algoritmanın çalışma hızını etkileyen faktörleri bulmak için optimizasyonlar tekrarlanmıştır. Tekrarlanan çalışmada ilk olarak çatıların eğim kısıtlayıcıları %10-%45 aralığında sabit tutularak, eğim değişiklik artış miktarı 1 olarak belirlenmiştir. Bu çalışma 50 jenerasyon boyunca gerçekleştirilmiş, her bir jenerasyon için üretilcek tasarım sayısı 20 olarak sınırlandırılmıştır. Popülasyon boyutunun daha önceki çalışmada olduğu gibi 40 yerine 20 olarak belirlenmesinin nedeni, hesaplama süresinin azaltılmak istenmesidir. Yukarıda belirtildiği üzere popülasyonun 40 olarak belirlendiği bir önceki optimizasyon çalışmasında sonuç ürünün hesaplanması 10 saatin sonunda gerçekleşmiştir. Diğer tüm kısıtlayıcılar ve üretken tasarım girdileri sabit tutulmuştur. Daha sonra bu çalışma eğim değişiklik artış miktarları sırasıyla 2-3-4 ve 5 olarak değiştirilip optimizasyon çalışmaları tekrar ettirilmiştir. Dynamo’da değiştirilen eğim artış miktarı Şekil 4.15’te gösterilmiştir.



Şekil 4.15 : Çatı Yüzey Eğimlerinin Farklı Aralıklar ile Değiştirilmesini Sağlayan Dynamo Modülü.

Beş farklı optimizasyon çalışmasının sonucunda elde edilen değerler Çizelge 4.2’de gösterilmiştir. Önceki çalışmada olduğu gibi yapı adasında bulunan tüm çatılar için aynı anda simülasyon bazlı optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle buluna toplam elektrik üretim miktarı ile çatı alanları 12 binanın toplam değerini ifade etmektedir. Yapılan çalışmaya göre Eğim Artış Miktarlarındaki farklılık algoritmanın hesaplama süresini değiştirmemektedir. Ayrıca elde edilen değerler birbirine oldukça yakındır. Değerlerin bu kadar birbirine yakın olmasının nedeni genetik algoritmanın çalıştırıldığında optimum çözüme en yakın çözümlere odaklanması olarak gösterilebilir. Üretken tasarım aracı çalıştırılmadan önce Bunun Gibi, Çapraz Çarpım ya da Rastgele metotları seçilmiş olsaydı birbirinden oldukça farklı değerler bulunabilir ancak bu değerler optimum değeri yansıtmazdı.

Çizelge 4.2 : Eğim Parametresi Artış Miktarının Değiştirilerek Optimizasyon Gerçekleştirilmesi (Eğim aralıkları %10-45).

Eğim Değişiklik Artış Miktarı	Algoritma Çalışma Süresi (dakika)	Yıllık Üretililecek Elektrik Enerjisi Miktarı	Güneş Radyasyon Değeri (kWh/m2)	Çatı Alanları (m2)
1	250	204.633	933	1371
2	250	204.075	931	1370
3	250	204.444	932	1371
4	250	204.503	935	1367
5	250	205.487	932	1378

Daha sonra aynı çalışma, Türkiye’de çatılar için çoğunlukla kullanılan eğim değerleri kullanılarak tekrar edilmiştir. Bu bağlamda çatı eğim açıları %33 ile %45 aralığında değer alabilecek şekilde sınırlandırılmış ve oluşturulacak çatı alternatifleri sırasında

çatı eğimlerinin farklılaştırılması sırasındaki artış miktarı farklılıkları bu optimizasyon çalışmaları için de 1 ile 5 aralığında değiştirilerek Üretken Tasarım gerçekleştirilmiştir. Bu hesaplama için de 50 jenerasyon boyunca, her bir jenerasyonda 20 farklı alternatifin oluşturulması için değerler Üretken Tasarım aracına girilmiştir. Optimizasyon çalışması sonucu elde edilen değerler Çizelge 4.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.3 : Eğim Parametresi Artış Miktarının Değiştirilerek Optimizasyon Gerçekleştirilmesi (Eğim Aralıkları %33-45).

Eğim Değişiklik Artış Miktarı	Algoritma Çalışma Süresi (dakika)	Yıllık Üretilebilecek Elektrik Enerjisi Miktarı	Güneş Radyasyon Değeri (kWh/m2)	Çatı Alanları (m2)
1	170	205.135	908	1412
2	170	205.442	910	1411
3	170	205.667	911	1411
4	170	205.760	914	1407
5	170	205.455	912	1408

Çatı eğim aralıklarının değiştirilmesi algoritmanın hesaplama süresini azaltmıştır. Bir önceki çalışmada 250 dakika olan süre 170 dakikaya düşmüştür. Yıllık üretilebilecek elektrik enerjisi miktarı ise daha önceki çalışmalara benzer bir sonuç vermiştir. Ancak çatı eğimlerinin sınırlandırılması ile m2 başına düşen güneş radyasyon değerleri azalırken, çatı yüzeylerinin alanları arttığı için üretilecek elektrik enerji miktarı yaklaşık olarak aynı değerlere sahip olduğu görülmüştür.

Bu iki farklı çalışma incelendiğinde, parametreler için daha tanımlı kısıtlayıcılar belirlendiğinde algoritma çalışma süresinin kısaltılıp yine de optimum değere yakın çözümler üretilebildiği görülmektedir.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

İnsanlık tarihi boyunca enerji önemli bir yere sahip olmuş, toplumların gelişmesinde önemli bir rol oynamıştır. Günümüzde yemek pişirmek, mekanların ısıtılıp-soğutulması, aydınlatma ihtiyacının karşılanması, malzemelerin üretimi, ulaşım ve birçok diğer alanda enerjiye gereksinim vardır. Günümüzde enerji ihtiyacının çoğu fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Fosil yakıt kullanımına başlanması Sanayi Devrimi dönemine dayanmaktadır. Sanayi Devrimi ile, insanlığın refah düzeyinde benzersiz artışlar gerçekleşmiş, teknoloji her alanda büyük ilerleme kaydetmiştir. Fosil yakıtların kullanılmaya başlandığı ilk dönemlerde, insanoğlu kullanılan yakıtların tükenebilir olmasıyla ilgilenmemiştir ancak 1970'lerde meydana gelen petrol kriziyle, enerji ihtiyacının sürdürülebilir ve dışa bağımlı olmayacak bir şekilde değiştirilmesi gerektiğinin farkına varılmıştır. Bu tarihten sonra ülkelerin enerji bakanlıkları sürdürülebilir enerji departmanları kurmuş ve bu konuda çalışan bilim insanlarının projelerini destekleme yoluna gitmişlerdir. Son birkaç on yılda ise fosil yakıtların sadece tükenebilir oldukları için değil aynı zamanda çevreye verdikleri zararların farkına varılması ile terk edilmesi gerekliliği ön plana çıkmıştır. Dünya'daki ekosistemin işleyişini büyük ölçüde tehdit eden küresel ısınmanın başlıca nedeni olan sera gazlarının atmosferdeki oranı fosil yakıtların kullanımı ile son yüzyılda hızlı bir oranda artmıştır. Birleşmiş Milletler öncülüğünde, iklim değişikliğiyle mücadele için taraf ülkeler tarafından imzalanan Kyoto Protokolü ve bu protokolün geçerlilik tarihinin bitmesi nedeniyle hazırlanan Paris Antlaşmasının hedefleri olan dünyanın sıcaklık artışını 2050 yılı için 1.5 °C ile sınırlandırmayı amaçlayan devletler, enerji kaynaklarını değiştirmek için çalışmalara başlamış, yenilenebilir enerji kullanımının teşviki için yeni projeler açıklanmış ve birçok alanda enerji kullanımı ve üretimi ile ilgili yönetmeliklerde değişikliğe gidilmiş ya da yeni yönetmelikler hazırlanmıştır.

İklim krizi, sürdürülebilirliğin ana hatlarını oluşturan üç temel konu olan çevre, toplum ve ekonomiyi etkilemektedir. Dünyanın ısınması ile ekosistemde meydana gelen değişimlerin bazılarının geri dönülmez sonuçlara neden olacağı bilinmektedir. Sıcaklık artışının etkisiyle, buzulların erimesine bağlı olarak birçok deniz seviyesinde yer alan şehrin sular altında kalması, kuraklık, orman yangınları, hayvan ve bitki biyoçeşitliliğinde azalma meydana gelmesi öngörülmektedir. Bu değişimler toplum dinamiklerini önemli derecede etkileyecek ve çevresel etkiler ekonomik krizlere de

neden olacaktır. Dünya'nın ısınmasının yakın zamanda durdurulamayacağı bilim insanları tarafından kabul görmüş bir gerçektir ancak etkileri sınırlandırılabilir. Sera gazı emisyonuna neden olan en büyük etken kullanılan fosil tabanlı yakıtlardır ve yapılı çevre enerji tüketiminde önemli bir paya sahiptir. Bu nedenle yapılı çevrede sürdürülebilirlik kaygısı artmıştır. Dünyada kullanılan son enerjinin tüketilmesinde önemli bir paya sahip olan binaların, işletim sırasında kullandıkları enerji çeşidinin sürdürülebilir enerji kaynakları ile değiştirilmesi ve enerji ihtiyacının azaltılması için enerji etkin yapılara dönüştürülmesinin gerekliliği yapılan çalışmalar ile anlaşılmaktadır. Günümüzde var olan binaların %80'inin 2050 yılında da varlıklarını sürdürecekleri göz önüne alındığında, mevcut yapı iyileştirmelerinin önemi ortaya çıkmaktadır. Birçok ülkenin binaların yenilenmesi ve enerji etkin duruma getirilmesi için başlattıkları projeler ve verdikleri hibeler bu sürecin hızlanmasına katkı sağlamaktadır. Binaların kendi enerji ihtiyacının tamamını ya da bir kısmını karşılayabilmesi için sürdürülebilir ve temiz enerji kaynaklarından olan güneş enerjisinin rolü büyüktür. Güneş enerjisinin, diğer yenilenebilir ve temiz enerji kaynaklarına göre daha ulaşılabilir olması sayesinde bireysel kullanıcılar tarafından üretilip kullanılması kolaylaşmaktadır. Güneş enerjisi çeşitlerinden olan güneş panelleri uygun güneşlenme sürelerine sahip olan coğrafyalarda kolay kuruluma sahip olması, çok fazla bakım gerektirmemesi ve enerji kaynağına ulaşmak için herhangi bir çaba gerektirmemesi nedeni ile tercih edilen bir sistemdir. Güneş paneli teknolojisi kullanılmaya başlandığı ilk yıllarda hem verimlilik açısından istenilen düzeyi sağlayamaması hem de kurulum maliyetinin yüksekliği nedeniyle genellikle şebeke elektriğine ulaşımın olmadığı yerlerde tercih edilmiştir. Ancak son yıllarda devletlerin yenilenebilir enerji kaynaklarını destekleyen girişimleri sayesinde panellerin verimliliğini artıran teknolojiler geliştirilmiş ve birim maliyetinde önemli düşüşler gerçekleşmiştir.

Binaların çatılarında kullanılacak güneş panelleri, binaların işletim sırasında tüketilen fosil yakıt kaynaklı elektrik ihtiyacını büyük ölçüde azaltabilir ya da tamamen ortadan kaldırabilir. Mevcut yapı stokundaki konut sayılarındaki oran dikkate alındığında, bireysel bina sahiplerinin binalarında alacakları enerji türünü değiştirme kararı sera gazı salınımı oranını büyük ölçüde azaltacak potansiyele sahiptir. Ancak mevcut binaların çatı tasarımları güneş enerjisinden maksimum düzeyde faydalanmak üzere tasarlanmamıştır. Türkiye'nin Niyet Edilen Ulusal Katkı Beyanı'nda yer alan 2030 yılı

itibari ile CO₂ emisyon azaltımı hedeflerine ulaşabilmesi için, mevcut binaların çatılarında maksimum düzeyde güneş enerjisinden faydalanabilmek adına tadilatlarla gidilmesi gerekli görünmektedir. Mevcut çatılarda direk olarak fotovoltaik panellerin kullanılmasının istenmemesi, mimari estetik kaygılardan kaynaklanmaktadır. Mevcut çatı yüzeylerine konuma göre varsayılan optimum açıda panellerin yerleştirilmesi ile çatılarda estetik açıdan kabul edilmek istenmeyen sonuçlar çıkabileceği gibi, çatı yüzeylerinden yüksek oranda faydalanmak da zorlaşacak ve maksimum miktarda elektrik enerjisi üretimi gerçekleştirilemeyecektir. Bu nedenle binayla bütünleşik fotovoltaik panellerin uygulanması daha uygun görünmektedir ve maksimum düzeyde güneş enerjisinden yararlanılabilmesi için çatıların yeniden tasarlanması gerekliliği görülmektedir. Tez çalışmasında, bu tadilatların Üretken Tasarım metodu ile gerçekleştirilmesinin avantajlarından bahsedilmiştir ve bir yapı adasında bu dönüşüm test edilmiştir.

Tasarımcılar tarafından yapılacak yeni bina projelerinin ya da tadilat projelerinin güneş enerjisinden elektrik üretme potansiyellerinin hesaplanması için analiz programlarının kullanılması, geleneksel metotla yapılacak olan hesaplamalara göre daha doğru sonuçlar vermesi ve analizler için harcanacak sürenin kısaltılması açısından oldukça önemlidir. Burada hesaplamalı tasarım olarak adlandırılan BIM tabanlı programların önemli bir yeri vardır. Mimarlar, yapmış oldukları tasarım alternatifleri için enerji analizlerini simülasyon araçları ile gerçekleştirip, her bir alternatif için sonuçlara bakarak yapılan tasarımlar arasından en etkin alternatifi seçebilirler. Ancak bu kısıtlı alternatifler arasından yapılan simülasyon çalışması sonucunda optimum değeri sağlayan tasarımın bulunmuş olma olasılığı bir hayli düşüktür. Bu tez çalışmasında optimum tasarımın bulunması için Üretken Tasarım metodunun kullanılması önerilmiştir. Üretken Tasarım, başka türlü görülmesi veya düşünülmesi mümkün olmayan sonuçlara ulaşmak için hesaplamalı bilişim ve insan yaratıcılığını birleştiren bir tasarım çerçevesini temsil eder. Hesaplamalı tasarım, tasarımcının bir proje tasarımının son ürünü olarak istediği geometriye ya da veriye ulaşmak için gerekli adımları tanımladığı, kural ve ilişkilere dayalı bir yaklaşımdır. Bir tasarıma hesaplamalı olarak yaklaşırken, tasarımcı tasarımın kendisine değil, tasarımı oluşturacak yol ve yöntemleri geliştirmeye odaklanır. Seçenekler ve veriler arasında yineleme yapma işi ise bilgisayara aittir. Üretken tasarım, insan ve bilgisayar arasındaki bu iş birliğine dayanan bir tasarım sürecini ifade etmektedir. Bu süreçte,

tasarımcı, tasarım parametrelerini tanımlar ve bilgisayar tasarım alternatifleri üretir, bunları tasarımcı tarafından belirlenen ölçülebilir hedeflere göre değerlendirir, önceki çalışmaların sonuçlarını ve tasarımcıdan gelen geri bildirimleri kullanarak çalışmaları geliştirir ve çoklu tasarım alternatif sonuçlarını tasarımcının hedeflerine ne kadar iyi ulaştıklarına göre sıralar. Üretken Tasarım aracılığı ile oluşturulan tasarımlar çoğu zaman tasarımcıların daha önce düşünmedikleri tasarım alternatiflerini keşfetmelerini ve yaratıcılıklarını geliştirmelerine katkıda bulunur.

Mevcut bina stokunun enerji etkin binaya dönüşümünde çatıların güneş enerjisiyle elde edecekleri elektrik enerjisi miktarını optimize etmeyi amaçlayan bu çalışmada, öncelikle çatıların, herhangi bir tadilat işlemi yapılmadan, mevcut durumdaki halleriyle binayla bütünleşik fotovoltaik sistemler ile kaplanması durumunda elde edilecek elektrik enerjisi miktarı ve CO₂ emisyonunu azaltmadaki katkısı hesaplanmıştır. Bu hesaplama için, İstanbul'da seçilmiş olan yapı adasındaki binaların, öncelikle mevcut durumları, açık kaynaklı harita işleme web sitesi olan OpenStreetMap'den OSM verisi olarak alınarak Dynamo'ya aktarılmıştır. Dynamo, bir görsel programlama uygulamasıdır ve mimarlar ve mühendisler bu uygulamayı genellikle BIM tabanlı çizim programı olan Revit ile modelleme süreçlerini verimli hale getirmek için kullanırlar. Bina taban geometrileri ile yükseklik bilgisinin OSM verisinden alındığı yapılar Dynamo düğümleri kullanılarak Revit programına kütle olarak aktarılmıştır. Mevcut binaların çatıları ise uydu fotoğraflarından yararlanılarak Revit programında modellenmiştir. Dynamo içerisine güneş radyasyonu analiz düğümü eklenerek binaların yıllık m² başına düşen radyasyon miktarı hesaplanması sağlanmış ve bu sonuçlar Dynamo'da oluşturulan formüle aktararak, yıllık güneş radyasyon verisi, fotovoltaik panel verimlilik katsayısı ile çatı alanlarının kullanılabilir alanı ile çarpılarak çatılarda yıllık üretilebilecek elektrik enerjisi miktarı bulunmuştur. Binaların birbirleri ile olan gölgeleme ilişkisi nedeni ile adada yer alan tüm binalar aynı anda simülasyonda çalıştırılmıştır. Yıllık üretilebilecek elektrik enerjisi miktarı mevcut çatı tasarımları için 125.914 kWh olarak hesaplanmış, güneş panelleri yerine, kömür ya da doğalgaz kaynaklı elektrik enerjisi kullanımına göre, yıllık salınan karbon miktarındaki azalışın ise 59809 kg olduğu sonucu çıkarılmıştır. Bu değerler çalışmanın ikinci kısmında bulunan değerleri karşılaştırmak için baz senaryo olarak kullanılmıştır.

Çalışmanın bir sonraki aşaması, çalışma alanında yer alan binaların çatılarında tadilata gidilerek, kurulacak fotovoltaik sistemlerle maksimum miktarda elektrik enerjisi

retmek için çatı yüzeylerinin optimizasyonudur. Yapılan çalışmadaki amaç, tek bir parametreyi maksimize etmek olduğu için problem tek amaçlı optimizasyon problemidir. Bu çalışmada kullanılan araçlar ise şu şekildedir; çatıların parametrik modelleri için Dynamo programı, m2 başına düşen yıllık ortalama güneş radyasyonu analizi için Dynamo içerisinde alışan Güneş Analizi düğümü, üretken tasarım algoritmasını çalıştıracak olan retken Tasarım aracı.

retken tasarım çalışmasına başlanmadan önce probleminin tespiti yapılmış, hedef olarak belirlenen çıktı tanımlanmış ve bu hedefe ulaşırken tasarım seçeneklerini kısıtlayan kısıtlayıcılar belirlenmiştir.

Problem; mevcut bina çatılarının maksimum güneş enerjisinden yararlanmak için tasarlanmamış olması,

Hedef; oluşturulacak yeni çatı tasarımlarında kullanılacak FV paneller ile üretilcek elektrik enerjisi miktarını maksimize etmek,

Kısıtlayıcılar; İstanbul İmar Yönetmeliğinde yer alan maksimum çatı eğimi oranı ve maksimum çatı aşık yüksekliği,

Girdiler, mevcut çatıların kenar çizgileri.

Öncelikli olarak çatı yüzeyleri Dynamo içerisinde parametrik olarak modellenmiştir. Parametreler daha öncesinde belirlenmiş olan kısıtlayıcılardır. Dynamo düğümleri ile elde edilen parametrik çatı yüzeyleri tek bir liste haline getirilip Güneş Radyasyon Analizi düğümüne bağlanmıştır. Bu analiz ile elde edilen m2 başına düşen yıllık ortalama güneş radyasyon değeri ile yeni tasarlanan çatıların m2 alanları, fotovoltatik panel verimlilik oranı ve fotovoltatik panellerin montajı için uygun olan çatı yüzeyi oranı Dynamo içerisinde matematik formülü kullanılarak, yıllık retilbilecek elektrik enerjisi miktarı bulunmuştur. Bu değer üretken tasarım çıktılarında maksimum olması hedeflenen çıktı olarak belirlenmiştir. retken Tasarım için gerekli girdi, kısıtlayıcı ve hedef parametreleri gözden geçirildikten sonra tasarım alternatiflerinin üretilmesi için Dynamo kodu retken Tasarım aracı içerisinde Optimize etme metodu ile 50 jenerasyon boyunca çalıştırılmıştır. 50 jenerasyon sonucunda elde edilen tasarım, bu çalışma için optimum çözüm kabul edilmiştir. Tasarımın elde ettiği yıllık ortalama elektrik enerjisi miktarı 205.171 kWh'dir ve bu üretim 97456 kg daha az CO₂'in atmosfere salınımını sağlayacaktır.

Optimize edilmiş yeni çatı tasarımıyla, yapı adasında bir yılda elde edilebilecek elektrik enerjisi miktarı ve CO₂ emisyonunu azaltımındaki kazanç, mevcut durumdaki baz senaryoya göre %63 oranındadır. Yapılan çalışma ile her bir binanın bulunduğu yer ve çevre binaların etkisi ile farklı çatı eğimlerinde maksimum güneş radyasyon değerine ulaştığı görülmüştür. Bu nedenle fotovoltaiik sistemlerinin uygulanması sırasında bir bölge için kabul edilen standart eğim açıları yerine, her bir bina için, içinde bulunduğu koşullar tespit edilip üretken tasarım metodu ile çalışılmalı, bulunan eğim açıları ve çatı şekilleri yapılacak tadilat projelerine yön vermeleri gerektiği görülmektedir.

Çalışmanın ikinci kısmında, çatı eğimleri için oluşturulan aralık değerleri, İstanbul'da çoğunlukla uygulanan çatı eğim aralıkları ile sınırlandırılarak (%10-%45 aralığından, %33-%45 aralığına çekilmiştir) optimizasyon çalışması tekrarlanmıştır. Yapılan bu çalışmada görülen, daha tanımlı kısıtlayıcılar sayesinde optimum çıktı hedefine kısa sürede ulaşılabilmiştir. Bu nedenle çalışmanın başında tüm kısıtlayıcıların ve hedeflerin iyi bir şekilde tanımlanması son derece önemlidir.

Türkiye'deki konut yapılarının tüm diğer yapılara oranı düşünüldüğünde, konut yapılarında yapılacak iyileştirmenin, karbonsuz bir gelecek için önemi anlaşılmaktadır. Konut yapılarında yapılacak iyileştirme için de öncelikle mülk sahiplerinin bu konuda bilinçlendirilmelidir. Bu çalışmada önerilen üretken tasarım metoduyla, mevcut binalarda yapılması planlanan tadilat projelerinde, optimum çözüme hızlı bir şekilde ulaşılabilir. Bu sayede genellikle ilk yatırım maliyetinden sakınan bina sahiplerine gerçekçi sonuçlar ile elde edecekleri tasarruf aktarılıp, binaların enerji etkin duruma getirilmeleri sağlanabilir.

Konut yapıları dışında kamusal, ticari ve sanayi yapılarının çatılarında ya da bina cephelerinde kullanılacak binayla bütünleşik fotovoltaiik paneller, daha fazla enerji güvenliği sağlama, yeni iş olanakları yaratma ve iklim değişikliği etkilerini azaltma gibi potansiyellere sahiptir. Ancak teknik bir standardın olmaması, çatı üzeri güneş sistemleri ile ilgili bilgi eksikliği ve kaliteli tedarikçi ve nitelikli montaj elemanı eksikliği Türkiye'de güneş enerjisi konusunda aşılması gereken engellerdir.

Binalar tarafından atmosfere aktarılan CO₂ miktarını azaltmak için yalnızca bina çatılarında yapılacak bir iyileştirme yeterli olmayacaktır. Binaların yalıtımları yapılarak ısıtma ve soğutma için ihtiyaç duyulan enerji miktarı azaltılabilir. Ayrıca

evlerde kullanılan teknolojik ekipmanların da enerji tasarruflu olanlar ile değiştirilmesi alınabilecek bir diğer önlemdir. Ancak çalışmanın kapsamı içerisinde yer almasa da yapılması önerilen değişiklikler sırasında atmosfere salınacak CO₂ emisyonu değerlerinin de hesaplanması önemli görölmektedir. Bu alışma kullanılarak geliştirilebilecek yeni araştırmalar için bir öneri olarak sunulabilir.



KAYNAKLAR

- 4ShoreSolar. (2022, Mayıs 30). *Gold-Coast-Solar-Advice/The-components-of-any-gridconnected-solar-power-system-/*. 4ShoreSolar: <https://www.4shoresolarelectrical.com.au/blogs/Gold-Coast-Solar-Advice/The-components-of-any-gridconnected-solar-power-system/> adresinden alındı
- Achtnicht, M., & Madlener, R. (2014). Factors influencing German house owners' preferences on energy retrofits. *Energy Policy*, 254-263.
- Agency, I. E. (2022, Haziran 9). *Global Energy & CO2 Status Report 2019*. International Energy Agency: <https://www.iea.org/reports/global-energy-co2-status-report-2019/emissions> adresinden alındı
- Akande, O. K., & Olagunju, R. E. (2016). Retrofitting and Greening Existing Buildings: Strategies for Energy Conservation, Resource Management and Sustainability of the Built Environment in Nigeria. *Sustainable Architecture and Civil Engineering*, 5-12.
- Aksangör, N. N. (2019). *Ankara Şartlarında bir Fotovoltaik Sistemin PVSYST Programı Yardımı ile Performans Analizi*. Ankara: Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Al-Hooud, M. S. (1997). Optimum thermal design of office buildings. *International Journal of Energy Research*, 941-957.
- Andrews, R. (2022, Mayıs 13). *Solar PV Capacity Factors in the US – the EIA Data*. Energy Matters: <http://euanmearns.com/solar-pv-capacity-factors-in-the-us-the-eia-data/> adresinden alındı
- Architecture2030. (2014). *Road Map to Zero Emissions, The Built Environment in a Global Transformation to Zero Emissions*. New Mexico: Architecture 2030.
- Asl, M. R., Bergin, M., Menter, A., & Yan, W. (2014). *Proceedings of the Conference of Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe (eCAADe)*. eCAADe.
- Atkin, B., & Brooks, A. (2009). *Total Facilities Management*. Singapore: John Wiley & Sons.
- Autodesk. (2022, Mayıs 10). *About Generation Methods*. Knowledge Autodesk: <https://knowledge.autodesk.com/support/revit/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2021/ENU/Revit-Model/files/GUID-887BCC49-06E9-4C52-AECD-BE92646DF2F5-htm.html> adresinden alındı
- Autodesk. (2022, Mayıs 10). *Anatomy of a Good Generative Design Process*. Generative Design Primer: https://www.generativedesign.org/01-introduction/01-02_generative-design/01-02-05_anatomy-of-a-good-generative-design-process#step-4-determine-evaluation-criteria adresinden alındı
- Autodesk. (2022, Mayıs 7). *Python*. Primer Dynamobim: https://primer.dynamobim.org/10_Custom-Nodes/10-4_Python.html adresinden alındı
- Autodesk. (2022, Mayıs 7). *What's a Code Block?* Primer Dynamobim: https://primer.dynamobim.org/07_Code-Block/7-1_what-is-a-code-block.html adresinden alındı

- Azhar, S. (2011). Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry. *Leadership and Management in Engineering*, 241-252.
- Azhar, S., Brown, J., & Farooqui, R. (2009). BIM-based Sustainability Analysis: An Evaluation of Building Performance Analysis Software.
- Bakırcı, K. (2012). General models for optimum tilt angles of solar panels: Turkey case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6149-6159.
- Bandyopadhyay, S., & Saha, S. (2013). Some Single- and Multiobjective Optimization Techniques. S. Bandyopadhyay, & S. Saha içinde, *Unsupervised Classification* (s. 17). Berlin: Springer.
- Becerik-Gerber, B., Jazizadeh, F., Li, N., & Calis, a. G. (2012). Application Areas and Data Requirements for BIM-Enabled Facilities Management. *Journal of Construction Engineering and Management* 138, 431-442.
- Becqué, R., Weyl, D., Stewart, E., Mackres, E., Jin, L., & Shen, X. (2019). *ACCELERATING BUILDING DECARBONIZATION: EIGHT ATTAINABLE POLICY PATHWAYS TO NET ZERO CARBON BUILDINGS FOR ALL*. Washington: World Resources Institute.
- Benemann, J., Chehab, O., & Schaar-Gabriel, E. (2001). Building-integrated PV modules. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 67, 345-354.
- Benemann, J., Fitzgerald, M., & McCabe, J. (1999). Advanced Solar Energy. *Advance Solar Energy* 13(13), 317.
- BEreel. (2019). *LIFE PLATFORM MEETING ON CLIMATE ACTION AND THE BUILDING SECTOR*. Brussels: Belgium Renovates for Energy Efficient Living.
- Boyle, G., Everett, B., & Ramage, J. (2003). *Energy Systems and Sustainability Power for a Sustainable Future*. Glasgow: The Open University.
- Bukhari, F. (2011). *A Hierarchical Evolutionary Algorithmic Design (HEAD) System for Generating and Evolving Building Design Models, Doktora Tezi*. Brisbane: Queensland University of Technology.
- Caetano, I., Santos, L., & Leitao, A. (2020). Computational design in architecture: Defining parametric, generative, and algorithmic design. *Frontiers of Architectural Research* , 287-300.
- Canadian Urban Institute. (2008). *Sustainable Building Canada on the Move*. Toronto: Canadian Urban Institute.
- Cardoso, J. M., Coutinho, J. G., & Diniz, P. C. (2017). Additional topics. J. M. Cardoso, J. G. Coutinho, & P. C. Diniz içinde, *Embedded Computing for High Performance* (s. 256). Amsterdam: Elsevier Inc.
- Castelo-Branco, R., & Leitão, A. M. (2020). Visual Meets Textual - A Hybrid Programming Environment for Algorithmic Design. *Anthropocene, Proceedings of the 25th International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA) 2020* (s. 375-384). Bangkok: Chulalongkorn University.
- Chang, K.-H. (2015). Design Optimization. K.-H. Chang içinde, *Design Theory and Methods Using CAD-CAE* (s. 161,168). London: Elsevier Inc.
- Chansomsak, S., & Vale, P. B. (2008). SUSTAINABLE ARCHITECTURE: ARCHITECTURE AS SUSTAINABILITY. *2008 World Sustainable Building Conference* . Melbourne: SB08.
- Chaszar, A., & Joyce, S. C. (2016). Generating freedom: Questions of flexibility in digital design and architectural computation. *International Journal of Architectural Computing*, 167-181.

- Chau, K., Anson, M., & Zhang, J. (2004). Four-dimensional visualization of construction scheduling and site utilization. *Journal of construction engineering and management* 130, 598-606.
- Chen, L. (2016). *Development of a Multi-Objective Optimisation Technique for Long-Term and Network-Level Decision Making in Infrastructure Asset Management, Doktora Tezi*. Auckland: The University of Auckland.
- Cook, M. G. (2011). *The Zero-Carbon House*. Wiltshire: The Crowood Press.
- Corti, P., Bonomo, P., Frontini, F., Macé, P., & Bosch, E. (2020). *Building Integrated Photovoltaics: A practical handbook for solar buildings' stakeholders. Status Report 2020*. Lugano: SUPSI, University of Applied Sciences and Arts of Southern Switzerland.
- CSB. (2022, Haziran 15). *Kişi Başına Enerji Tüketimi*. Çevresel Göstergeler: <https://cevreselegostergeler.csb.gov.tr/kisi-basina-enerji-tuketimi-i-85805> adresinden alındı
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 182-197.
- Demirbaş, A. (2009). Global Renewable Energy Projections. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 212-224.
- Dijmarescu, E. R. (2020). *Benefits and Challenges of BIM in FM within Healthcare Sector, Yüksek Lisans Tezi*. Salford: The University of Salford.
- Dunne, L. (2022, Mayıs 27). *Top 12 Green Building Rating Systems*. SIG Earth: <https://sigearth.com/top-12-green-building-rating-systems/> adresinden alındı
- Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2008). *BIM Handbook; A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers, and Contractors*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Eiffert, P., & Kiss, G. J. (2000). *Building-Integrated Photovoltaic Designs for Commercial and Institutional Structures; A Sourcebook for Architects*. Washington: U.S. Department of Energy Office of Scientific and Technical Information.
- EİGM. (2022, Mayıs 18). *Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası (GEPA)*. Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası: <https://gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator/> adresinden alındı
- Eltaweel, A., & Su, Y. (2017). Parametric design and daylighting: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1086-1103.
- EMO. (2022, Haziran 15). *EMO HESAPLADI - 4 KİŞİLİK BİR AİLENİN AYLIK ELEKTRİK FATURASI*. EMO: https://www.emo.org.tr/genel/bizden_detay.php?kod=135116&tipi=2&sube= adresinden alındı
- Esfahani, S. K., Karrech, A., Cameron, R., Elchalakani, M., Tenorio, R., & Jerez, F. (2021). Optimizing the solar energy capture of residential roof design in the southern hemisphere through Evolutionary Algorithm. *Energy and Built Environment*, 406-424.
- European Commission. (2018). *The roadmap for transforming the EU into a*. Brussels: EU Climate Action.
- Evins, R. (2013). A review of computational optimisation methods applied to sustainable building design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 230-245.
- EvolveLAB. (2022, Haziran 6). *How to Use Dynamo in the Revit 2021 Generative Design Tool*. EvolveLab: <https://www.evovelab.io/post/use-dynamo-in-revit->

2021-generative-design-

tool#:~:text=Generative%20Design%20is%20a%20broad,are%20specified%20by%20the%20user. adresinden alındı

- Filippo, A. D., Lombardi, M., Marongiu, F., Lorusso, A., & Santaniello, D. (2021). Generative Design for project optimization. *The 27th International Conference on Distributed Multimedia Systems*, (s. 110-115).
- Fischer, M. A. (2006). Formalizing Construction Knowledge for Concurrent Performance-Based Design. *Intelligent Computing in Engineering and Architecture, 13th EG-ICE Workshop 2006* (s. 186–205). Ascona: Springer.
- Ford, S., G.Aouad, J.Kirkham, P.Brandon, F.Brown, T.Child, . . . B.Young. (1995). An information engineering approach to modelling building design. *Automation in Construction*, 5-15.
- Gabr, M. A., & Mekawy, M. (2017). BIM-based analysis and evaluation of the integration of transparent solarpanels in existing buildings facades: Case of Educational buildings. *Sustainable development and the built environment*. London.
- Gabr, M., & Mekawy, M. (2017). BIM-based analysis and evaluation of the integration of transparent solar panels in existing buildings facades: Case of Educational buildings. *Sustainable Development and The Built Environment*. London.
- Gagne, J., & Andersen, M. (2012). A generative facade design method based on daylighting performance goals. *Journal of Building Performance Simulation*, 141–154.
- Gan, V. J., Lo, I. M., Tse, K. T., Wong, C. L., Cheng, J. C., & Chan, C. M. (2019). BIM-Based Integrated Design Approach for Low Carbon Green Building Optimization. *Computing in Civil Engineering*, 417-424.
- Giel, B., & Raja, I. (2015). Framework for Evaluating the BIM Competencies of Facility Owners. *Journal of Management in Engineering* 32, 552-559.
- Goldberg, D. E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Boston: Addison Wesley Longman Publishing Co., Inc.
- Grozdev, M. (2010). *Alternatif Enerji Kaynakları: Güneş Enerjisi ve Güneş Pilleri. Yüksek Lisans Tezi*. İstanbul: İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Guzowski, M. (2010). *Towards Zero Energy Architecture, New Solar Design*. London: Laurence King Publishing.
- Halbert, D. (1984). *Programming by Example. Doktora Tezi*. . Berkeley: University of California.
- Hamil, S. (2022, Haziran 11). *BIM dimensions – 3D, 4D, 5D, 6D BIM explained*. NBS: <https://www.thenbs.com/knowledge/bim-dimensions-3d-4d-5d-6d-bim-explained> adresinden alındı
- Hardin, B. (2009). *BIM and Construction Management: Proven Tools, Methods, and Workflows by Brad Hardin*. Berkeley: Sybex.
- İBB. (2018). *İstanbul İmar Yönetmeliği*. İstanbul: İstanbul Büyükşehir Belediyesi.
- International Energy Agency Photovoltaic Power System Programme. (2019). *BIPVDesign and Performance Modelling:Tools and Methods*. Paris: International Energy Agency.
- IPCC. (2018). : *Global Warming of 1.5°C.An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and*. Cambridge & NewYork: Cambridge University Press.
- IRENA. (2019a). *Global energy transformation: A roadmap to 2050*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.

- IRENA. (2019b). *Future of Solar Photovoltaic: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.
- Jabi, W. (2013). *Parametric Design for Architecture*. London: Laurence King Publishing.
- Jafari, A., & Valentin, V. (2017). An optimization framework for building energy retrofits decision-making. *Building and Environment*, 118-129.
- Kabakçı, O. K. (2019). *Binalarda Enerji Verimliliği*. Ankara: T.C. Enerji ve Tabi Kaynaklar Bakanlığı.
- Kapogiannis, G., Gaterell, M., & Oulasoglou, E. (2015). Identifying Uncertainties Toward Sustainable Projects. *Procedia Engineering* 118, 1077-1085.
- Kim, E., Jeon, H., Jun, H., & Lee, S. (2019). The Development of Architectural Design Environment for BIPV using BIM. *eCAADe + SIGraDi 2019 Conference*, (s. 223-232). Porto.
- Korkmaz, S., Messner, J. I., Riley, D. R., & Magent, C. (2010). High-Performance Green Building Design Process Modeling and Integrated Use of Visualization Tools. *Journal of Architectural Engineering*, 37-45.
- Lee, S.-K., An, H.-K., & Yu, J.-H. (2012). An Extension of the Technology Acceptance Model for BIM-Based FM. *Construction Research Congress 2012* (s. 602-611). West Lafayette: ASCE.
- Letcher, T. M., & M., F. V. (2018). *A Comprehensive Guide to Energy Systems with Special Focus on Photovoltaic Systems*. London: Academic Press, Elsevier Inc.
- Lim, Y.-W., Majid, H. A., Samah, A. A., Ahmad, M. H., Ossen, D. R., Harun, M. F., & Shahsavari, F. (2018). BIM and Genetic Algorithm optimisation for sustainable building envelope design. *2nd International Conference on Building Information Modelling (BIM) in Design, Construction and Operations* (s. 151-159). Alicante: International Journal of Sustainable Development and Planning, Volume 13, Issue 1.
- Lim, Y.-W., Seghier, T. E., Harun, M. F., Ahmad, M. H., Samah, A. A., & Majid, H. A. (2019). Computational Bim For Green Retrofitting Of The Existing Building Envelope. *Building Information Modelling (BIM) in Design, Construction and Operations III*, 33-44.
- Lim, Y.-W., Shahsavari, F., Fazlenawati, N., Azli, M. N., Ossen, D. R., & Ahmad, M. H. (2015). Developing a BIM-based process-driven decision-making framework for sustainable building envelope design in the tropics. *Building Information Modelling (BIM) in Design, Construction and Operations* (s. 531-542). Bristol: WIT Transaction on the Built Environment.
- Liu, B., & Jordan, R. (1961). Daily insolation on surfaces tilted towards equator. *ASHRAE Journal*, 526-541.
- Lobaccaro, G., Wiberg, A. H., Ceci, G., Manni, M., Lolli, N., & Berardi, U. (2018). Parametric design to minimize the embodied GHG emissions in a ZEB. *Energy & Buildings*.
- LondonPlan. (2011). *Spatial Development Strategy for Greater London*. London: Greater London Authority.
- Lu, Y., Wang, S., Zhao, Y., & Yan, C. (2015). Renewable energy system optimization of low/zero energy buildings using single-objective and multi-objective optimization methods. *Energy and Buildings* 89, 61-75.

- Ma, W., Wang, X., J. W., Xiang, X., & Sun, J. (2021). Generative Design in Building Information Modelling (BIM): Approaches and Requirements. *Sensors* , 1-26.
- Ma, Z., Cooper, P., Daly, D., & Ledo, L. (2012). Existing building retrofits: Methodology and state-of-the-art. *Energy and Buildings*, 889-902.
- Machairas, V., Tsangrassoulis, A., & Axarli, K. (2014). Algorithms for optimization of building design: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101-112.
- McKinney, K., Kunz, J., & Fischer, M. (1998). Visualization of construction planning information. *Proceedings of the 3rd international conference on Intelligent user interfaces*, (s. 135-138). San Francisco.
- Migilinskas, D., Popov, V., Juocevicius, V., & Ustinovichius, L. (2013). The Benefits, Obstacles and Problems of Practical Bim Implementation. *11th International Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques* (s. 767-774). Vilnius: by Elsevier Ltd.
- Mitchell, W. J. (1975). The theoretical foundation of computer-aided . *Environment and Planning B*, 127-150.
- Mutlu, A. (2010). *Fotovoltaik Çatı Sistemlerinin Tasarımı için Bir Model Önerisi. Yüksek Lisans Tezi*. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Myers, B. A. (1990). Taxonomies of Visual Programming and Program Visualization. *Journal of Visual Languages & Computing*, 97-123.
- Nguyen, A. T., D. R., Doan, M. K., & Le, T. K. (2021). Performance assessment of contemporary energy-optimized office buildings under the impact of climate change. *Journal of Building Engineering*, Vol. 35.
- Nguyen, A.-T., Reiter, S., & Rigo, P. (2014). A review on simulation-based optimization methods applied to building . *Applied Energy*, 1043–1058.
- Nielsen, A. N., Jensen, R. L., Larsen, T. S., & Nissen, S. B. (2016). Early Stage Decision Support for Sustainable Building Renovation. *Building and Environment*, 165-181.
- Nieuwlaar, E., & Alsema, E. (1997). *Environmental Aspects of PV Power Systems*. Utrecht: Utrecht University.
- Now, R. (2021). *RENEWABLES 2021 GLOBAL STATUS REPORT*. Paris: REN21 Secretariat.
- O'Connor, J. J., & Robertson, E. F. (2022, Haziran 3). *Abu Ja'far Muhammad ibn Musa Al-Khwarizmi*. mathshistory.st-andrews: <https://mathshistory.st-andrews.ac.uk/Biographies/Al-Khwarizmi/> adresinden alındı
- OpenStreetMap. (2022, Mayıs 9). *Hakkında*. openstreetmap: <https://www.openstreetmap.org/about> adresinden alındı
- Østergård, T., Jensen, R. L., & Maagaard, S. E. (2016). Building simulations supporting decision making in early design – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 187-201.
- Özçelik, Ö. (2018). *Güneş Enerji Sistemleri ve Güneş Yatırımları için Doğru ve Güvenilir Bir Yol Haritası Oluşturulması. Yüksek Lisans Tezi*. Ankara: Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- PublicLaw109–58. (2005). *ENERGY POLICY ACT OF 2005*. Washington D.C.: USGovernment.
- Punia, P., & Kaur, M. (2013). Various Genetic Approaches for Solving Single and. *International Journal of Advanced Research in*, 1014-1020.

- PVSITES. (2022, Mayıs 29). *Demo Sites*. PVSITES: <https://www.pvsites.eu/demo-sites/> adresinden alındı
- PVSITES. (2022, Mayıs 29). *Expected impacts*. PVSITES: <https://www.pvsites.eu/project/expected-impacts/> adresinden alındı
- Ragheb, A., El-Shimy, H., & Ragheb, G. (2015). GREEN ARCHITECTURE: A CONCEPT OF SUSTAINABILITY . *Procedia - Social and Behavioral Sciences* , 778-787.
- Rahman, M., & Rana, J. (2020). Building energy performance optimization towards net zero Energy Building Using Passive Solution Technologies and Building Information Modeling at Design Phase. *Journal of Construction Engineering, Management & Innovation*, 29-51.
- Ray, C. (2011). *The Impact of Building Information Modelling*. London: Routledge.
- Reddy, M. J., & Kumar, D. N. (2020). Evolutionary algorithms, swarm intelligence methods, and their applications in water resources engineering: a state-of-the-art review. *H2Open Journal* , 135-188.
- ResmiGazete. (2019). *ELEKTRİK PİYASASINDA LİSANSSIZ ELEKTRİK ÜRETİM YÖNETMELİĞİ*. Ankara: Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu.
- Riley, D., Magent, C., & Horman, M. j. (2004). Sustainable metrics: A design process model for high performance buildings. *Proc., CIBWorld Building Congress*. Toronto.
- Roberts, S. (2008). Altering existing buildings in the UK. *Energy Policy*, 4482-4486.
- Rode, P., Burdett, R., & Gonçalves, J. C. (2011). Buildings: investing in energy and resource efficiency. U. N. Environment içinde, *Towards a green economy: pathways to sustainable development and poverty eradication* (s. 331-373). Nairobi: United Nations Environment Programme.
- Rogner, H. H. (2000). *Energy and The Challenge of Sustainability*. World Energy Assessment, Energy Resources. New York: United Nations Development Programme.
- Rohrmann, J. (2019). *Design Optimization in Early Project Stages A Generative Design Approach to Project Development*, Yüksek Lisans Tezi. Munich: Technical University of Munich.
- Rooker, T. (1991). Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning; Book Reviews. *AI Magazine Volume*, 102-103.
- Sacks, R., & Charles M. Eastman, G. L. (2004). Parametric 3D modeling in building construction with examples from precast concrete. *Automation in Construction*, 291-312.
- Sanhudo, L. (2016). *BIM for Building Sustainability Assessment -Development of a software tool for Rainwater Runoff mitigation*. Yüksek Lisans Tezi. Porto: Department of Civil Engineering, University of Porto.
- Sanhudo, L., & Martins, J. P. (2018). Building information modelling for an automated building sustainability assessment. *Civil Engineering and Environmental Systems*, 99-116.
- Sassi, & Paola. (2006). *Strategies for Sustainable Architecture*. Oxon: Taylor & Francis.
- Shi, Y. (2014). Developmental Swarm Intelligence: Developmental Learning Perspective of Swarm Intelligence Algorithms. *International Journal of Swarm Intelligence Research*, 36-54.
- SHURA. (2020). *Rooftop solar energy potential in buildings – financing models and policies for the deployment of rooftop solar energy systems in Turkey*. İstanbul: Sabancı Üniversitesi.

- Singh, S. (2022, Haziran 12). *3D to 8D BIM Fueling the Growth of International Construction*. newswires: https://www.einnews.com/pr_news/558782554/3d-to-8d-bim-fueling-the-growth-of-international-construction adresinden alındı
- Solar One. (2021). *Solar Photovoltaic Systems: A Guide for Long-Term Ownership and Maintenance*. New York: Solar1.org.
- Solar Power Europe. (2019). *Solar Skins: An opportunity for greener cities*. Brussels: Solar Power Europe.
- Tang, L., Chen, C., Tang, S., Wu, Z., & Trofimova, P. (2017). Building Information Modeling and Building Performance Optimization. M. A. Abraham içinde, *Encyclopedia of Sustainable Technologies* (s. 311-320). Amsterdam: Elsevier Inc.
- TEDAŞ. (2020). *Türkiye Elektrik Dağıtım ve Tüketim İstatistikleri 2019*. Ankara: STRATEJİ GELİŞTİRME DAİRE BAŞKANLIĞI.
- TEİAŞ. (2021). *2020 Yılı Türkiye Elektrik Enerjisi Üretiminin Kanaklara Göre Dağılımı*. Ankara: Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi.
- TEİAŞ. (2022). *Şubat 2022 Kurulu Güç Raporu*. Ankara: Türkiye Elektrik İletim A.Ş.
- Tereno, S., Anumba, C. J., Gannon, E., & Dubler, C. R. (2015). The Benefits of BIM Integration with Facilities Management: A Preliminary Case Study. *Computing in Civil Engineering*, 675-683.
- The German Energy Society (DGS). (2008). *Planning and Installing Photovoltaic Systems; A Guide for Installers, Architects and Engineers*. London: Earthscan.
- Touloupaki, E., & Theodosiou, T. (2017). Energy performance optimization as a generative design tool for nearly zero energy buildings. *International High-Performance Built Environment Conference – A Sustainable Built Environment Conference 2016 Series* (s. 1178 – 1185). Amsterdam: Procedia Engineering by Elsevier BV.
- Tsala, S., & Koronaki, I. P. (2021). Optimization Algorithms for Energy Building Applications. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering* (s. 1-18). IOP Publishing.
- Tsuo, Y., J.M. Gee, P. M., Strebkov, D., Pinov, A., & Zadde, V. (1998). Environmentally Benign Silicon Solar Cell Manufacturing. *2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion*. Vienna: National Renewable Energy Laboratory.
- Turkenburg, W. C. (2000). *Energy and The Challenge of Sustainability*. World Energy Assessment, Renewable Energy Technologies. New York: United Nations Development Programme.
- U.S. Solar Energy Technologies Office. (2022a, Mayıs 23). *Photovoltaics*. U.S. Office of Energy Efficiency & Renewable Energy Web Sitesi: <https://www.energy.gov/eere/solar/photovoltaics> adresinden alındı
- U.S. Solar Energy Technologies Office. (2022b, Mayıs 23). *Solar Photovoltaic Technology Basics*. U.S. Office of Energy Efficiency & Renewable Energy Web Sitesi: <https://www.energy.gov/eere/solar/solar-photovoltaic-technology-basics> adresinden alındı
- Udom, K. (2022, Haziran 1). *BIM: mapping out the legal issues*. NBS: <https://www.thenbs.com/knowledge/bim-mapping-out-the-legal-issues> adresinden alındı
- UN. (1987). *Our Common Future*. Oslo: United Nations.

- UN. (2021, Ekim 04). *Time Series - Annex I*. UNFCCC: https://di.unfccc.int/time_series adresinden alındı
- UNECE. (2022, Haziran 13). *Energy Efficiency in Buildings*. UNECE: <https://unece.org/sustainable-energy/energy-efficiency/energy-efficiency-buildings> adresinden alındı
- Urfan, S. (2018). *Sürdürülebilirlik İlkesi Doğrultusunda Güneş Enerjisi Potansiyelinin Fotovoltaik Sistemler İle Değerlendirilmesi; Kadıköy-Fikirtepe Kentsel Dönüşüm Alanı Test Uygulaması. Yüksek Lisans Tezi*. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi, Bilişim Enstitüsü.
- USGBC. (2002). *National Trends and Prospects for High-Performance Green Buildings*. the U.S. Senate Subcommittee on Environmental and Public Works.
- Volk, R., Stengel, J., & Schultmann, F. (2014). Building Information Modeling (BIM) for existing buildings — Literature review and future needs. *Automation in Construction*, 109-127.
- Wachberger, M., & Wachberger, H. (1988). *Etüd ve proje : konut : güneş ile inşa etmek, pasif güneş enerjisi kullanımı*. (L. Gerçek, & A. Selahaddin, Çev.) Ankara: Yaprak.
- Wang, Z., Bulbul, T., & Lucas, J. (2015). A Case Study of BIM-Based Model Adaptation for Heatlhcare Facility Management - Information Needs Analysis. *2015 ASCE International Workshop of Computing in Civil Engineering* (s. 395-402). Austin: ASCE.
- WCED. (1987). *Our Common Future- Brundtland Raporu*. Oxford: Oxford ; New York : Oxford University Press.
- Williams, D. E. (2007). *Sustainable Design: Ecology, Architecture, and Planning*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Williamson, T., Radford, A., & Bennetts, H. (2004). *Understanding Sustainable Architecture*. Oxfordshire: Taylor & Francis e-Library.
- Wong, J. K., & Zhou, J. (2015). Enhancing environmental sustainability over building life cycles through green BIM: A review. *Automation in Construction*, 156-165.
- World Energy Council. (1994). *New Renewable Energy Resources: A Guide to the Future*. London: Kogan Page.
- World Energy Council. (2014). *2014 World Energy Issues Monitor - What keeps energy leaders awake at night?* London: World Energy Council.
- World Energy Council. (2022). *Turkey Energy Issues Monitor 2022*. London: World Energy Council.
- WorldBank. (2018). *Turkey - Rooftop solar PV market assessment : final repor*. Delhi: Tetra Tech.
- YPK. (2012). *Enerji Verimliliği Strateji Belgesi 2012-2023*. Ankara: Resmi Gazete.
- Yu, W., Li, B., Jia, H., Zhang, M., & Wang, D. (2015). Application of multi-objective genetic algorithm to optimize energyefficiency and thermal comfort in building design. *Energy and Buildings*, 135-143.
- Yung, P., & Wang, X. (2014). A 6D CAD model for the automatic assessment of building Sustainability. *International Journal of Advanced Robotic Systems* 11.

