



## Development of a web-based decision support tool for sustainable residential building design and retrofit

Suzi Dilara Mangan<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Architecture, Yildiz Technical University, 34349, Istanbul, Turkey

<sup>2</sup>Department of the Built Environment, Eindhoven University of Technology (TU/e), 5600 MB, Eindhoven, The Netherlands

### Highlights:

- A prototype web-based decision support tool
- An integrated workflow for sustainable residential building design and retrofit
- Interactive data visualisation for facilitating informed decision-making

### Keywords:

- Performance-based design
- Decision support tool
- Building performance simulation
- Data visualisation
- Residential buildings

### Article Info:

Research Article

Received: 23.10.2020

Accepted: 10.03.2021

### DOI:

10.17341/gazimmfd.815489

### Acknowledgement:

The author would like to thank TUBITAK for financial support and the members of the Building Performance Chair of TU/e, led by Prof. Jan L.M. Hensen, and Burak Bölükbaşı, MSc (Eng) and Emrullah Saku, MSc (Eng) for their valuable contributions on the development of the tool.

### Correspondence:

Author: Suzi Dilara Mangan  
e-mail: sdmangan@yildiz.edu.tr  
phone: +90 212 583 2463

### Graphical/Tabular Abstract

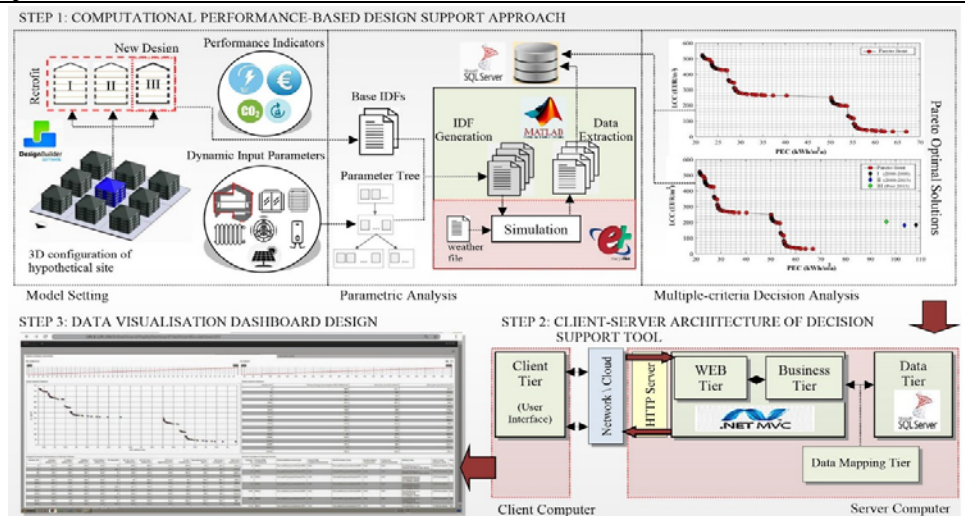


Figure A. Framework of the integrated workflow for the web-based decision support tool

**Purpose:** To develop an energy- and cost-oriented web-based decision support tool that can apply a positive feedback loop to the current low levels of awareness in the residential building sector, thereby supporting the development and adoption of sustainable residential buildings.

### Theory and Methods:

The integrated workflow framework used as the basis for developing the web-based decision support tool was structured around the following three main principles: i) a computational performance-based design support approach, ii) a client-server architecture of the decision support tool, and iii) a data visualisation dashboard design. We have presented the decision-making process support potential of this tool for the Istanbul Province, a representative city located in a region of Turkey with a temperate-humid climate and where urban growth is experienced at a significant rate.

### Results:

A broad design space, including 589,826 alternatives, was obtained through parametric analysis. The trade-off design alternatives that best met the conflicting objectives (primary energy consumption, life cycle cost) were determined through multiple-criteria decision analysis. The aim within this context was to provide simple and easy-to-understand visualisation of the broad design space obtained in a way that would enable rapid feedback. An additional goal was to increase the informative capacity of the tool and therefore decrease the level of ambiguity currently experienced in the decision-making process while promoting informed decision-making.

### Conclusion:

The web-based decision support tool that was developed is a good starting point to provide effective guidance to targeted decision-makers (residence owners and architects) regarding sustainable residential building design and retrofit in the early stages of the decision-making process. The strengths of this dashboard prototype, which is still being developed, are as follows: i) the elimination of decision conflicts and a decreased need for the tedious and calculation-intensive design iteration process to determine alternatives that meet energy, economic and even environmental performance targets, and ii) enabling the informed use of a decision-making process thanks to an easy-to-use, simple interface.



## Sürdürülebilir konut tasarımı ve yenilemesine ilişkin internet tabanlı karar destek aracının geliştirilmesi

Suzi Dilara Mangan<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Yıldız Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, 34349, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup>Eindhoven Teknoloji Üniversitesi, Yapılı Çevre Fakültesi, 5600 MB, Eindhoven, Hollanda

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- Prototip internet tabanlı bir karar destek aracı
- Sürdürülebilir konut tasarımı ve yenilemesine ilişkin entegre bir iş akışı
- Bilinçli karar vermeyi kolaylaştırmak için etkileşimli veri görselleştirme

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi  
Geliş: 23.10.2020  
Kabul: 10.03.2021

### DOI:

10.17341/gazimmfd.815489

### Anahtar Kelimeler:

Performans tabanlı tasarım,  
karar destek aracı,  
bina performans  
simülasyonu,  
veri görselleştirme,  
konut binaları

### ÖZ

Konut binalarının sürdürülebilir olarak tasarlanması/yenilenmesinde karar vericilere bilgilendirici destek sağlayan araçların geliştirilmesi, bina sektöründeki mevcut verimlilik açığının indirgenmesine odaklı bilinçlendirme yol haritalarının önemli bir unsurudur. Bu bağlamda, sürdürülebilir konut üretimine ilişkin pek çok tasarım alternatifi önerilmekte ve geliştirilmektedir. Ancak, çoğu zaman bu tasarım alternatiflerinin bilinçli tasarım hamlelerine dönüştürülmesinde yaşanan kavrama eksikliği, karar verme süreçlerini olumsuz etkilemektedir. Dolayısıyla, bu çalışmada sürdürülebilir konut üretimine, erken tasarım keşif ve yineleme esaslı ile örtüşen bir geri besleme döngüsünün entegrasyonu ile çok amaçlı tasarım çözümlerine ulaşımı bir adım ileriye taşıyacak internet tabanlı karar destek aracının geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç çerçevesinde, i) tasarım alanının sistematik ve kapsamlı olarak araştırılması, irdelenmesi ve optimal çözümlerin belirlenmesi için hesaplamalı performans tabanlı tasarım destek yaklaşımı ile ii) bu yaklaşım kapsamında elde edilen geniş tasarım alanının kullanımı kolay bir arayüz aracılığıyla karar vericilere hızlı ve yapıcı geri bildirimlerin sağlanabilmesi için etkileşimli görselleştirme yöntemini esas alan entegre bir iş akışı çerçevesi önerilmiştir. Önerilen bu çerçeveye dayalı olarak gerek Türkiye bağlamına uyum sağlayan gerekse sürdürülebilir konutların tasarımı/yenilenmesine ilişkin karar verme süreçlerini kolaylaştıran bilgilendirme kapasitesi yüksek, enerji ve maliyet odaklı bir karar destek araç prototipi geliştirilmiştir. Geliştirilen bu aracın karar verme sürecini destekleme potansiyeli, kentsel büyümenin üst düzeyde yaşandığı İstanbul ili için sunulmuştur.

## Development of a web-based decision support tool for sustainable residential building design and retrofit

### H I G H L I G H T S

- A prototype web-based decision support tool
- An integrated workflow for sustainable residential building design and retrofit
- Interactive data visualisation for facilitating informed decision-making

### Article Info

Research Article  
Received: 23.10.2020  
Accepted: 10.03.2021

### DOI:

10.17341/gazimmfd.815489

### Keywords:

Performance-based design,  
decision support tool,  
building performance  
simulation,  
data visualisation,  
residential buildings

### ABSTRACT

The development of tools that provide support to decision-makers for the sustainable design and retrofit of residential buildings is an important element of awareness-raising roadmaps focussed on reducing the current efficiency gap in the building sector. Many alternative designs that pertain to sustainable residential building production within this context have been proposed and are currently being developed. However, difficulty converting these design alternatives into informed design interventions can compromise the decision-making process. Therefore, we aimed to develop a web-based decision support tool that would take access to multi-objective design solutions one step further. Our tool integrates a feedback loop that overlaps with the principle of early design exploration and iteration into sustainable residential building production. In line with this aim, we propose an integrated workflow framework based on: i) a computational performance-based design support approach to enable the systematic and comprehensive evaluation and analysis of the design space and to determine optimal solutions, and ii) an interactive visualisation method to provide rapid and constructive feedback to decision-makers on the broad design space obtained with this approach through an easy-to-use interface. We developed an energy- and cost-oriented decision support tool prototype with a highly informative capacity that facilitates decision-making processes regarding the design and retrofit of sustainable residential buildings based on this proposed framework. The decision-making process support potential of this tool can be adapted to the Turkish context. It has been presented to the Istanbul province, where significant urban growth is ongoing.

## 1. GIRIŞ (INTRODUCTION)

Sürdürülebilir yapma çevrelerin üretimi, iklim değişikliği ile mücadele, enerji güvenliğinin artırılması gibi önemli sorunların odak noktasında yer alan bina sektörü, bu sorunların çözümünde de ciddi bir potansiyele sahiptir. Bu açıdan, küresel nihai enerji tüketiminin %36'sından ve enerji ile ilgili CO<sub>2</sub> salımlarının %39'undan sorumlu olan bina sektörü [1], pek çok ülke tarafından maliyet etkin enerji ve iklim değişikliği politikalarının geliştirilmesi ve belirlenen hedeflere ulaşılmasında temel bileşen olarak görülmektedir. Ancak, bina sektöründeki enerji yoğunluğu azaltım hızı, son yıllarda düşmekte olup bu düşüş 2017'den 2018'e kadar olan süredeki bina taban alanında belirlenen %2,5'lik artışa kıyasla oldukça azdır [2]. Bu bulgular, mevcut politikalar değişmedikçe binalar için öngörülen enerji verimliliği potansiyelinin büyük çoğunluğundan yararlanılamayacağını ortaya koymaktadır [3]. Bu noktada, enerji verimliliğine gerçekte yapılan yatırım seviyesi ile teknik ve ekonomik olarak uygulanması mümkün daha yüksek seviye arasındaki farkı tanımlayan verimlilik açığı sorununu gündeme getirmektedir. Verimlilik açığına neden olan engeller, önem bakımından ülkeden ülkeye ve şehirden şehire farklılık gösterse [4] bile en temel engelin bilgi açığı olduğu vurgulanmaktadır [5, 6].

Bu bilgi açığının indirgenmesinde kilit öneme sahip olan bilinçlendirme ve bilgilendirme çalışmaları pek çok politika kapsamında ele alınarak bina sektöründe nitelikli bir arz-talep dengesinin kurulmasına çabalanmaktadır. Bu çaba, binaların uzun yaşam ömürleri ve yüksek enerji tüketim düzeyleri göz önünde bulundurulduğunda gelecek yıllarda yüksek maliyetlerle sonuçlanabilecek düşük uyum kapasitesine sahip, verimsiz bina stoklarının biriktiği kentsel alanların önüne geçilebilmesi için çok önemlidir. Özellikle enerji arzı ile enerji talebi arasındaki uyumsuzluğun mevcut olduğu, hızlı kentleşme ve yüksek nüfus artışının yaşandığı Türkiye için arz (mimar, mühendis, müteahhit, yatırımcı ve diğer paydaşlar) ve talep (bina sahibi, kiracı) taraflarındaki mevcut sınırlı bilgi, uzmanlık ve farkındalık eksikliği bu verimlilik açığını derinleştirmektedir. Bu durumun ülke enerji faturası üzerindeki negatif etkisinin ortadan kaldırılabilmesi için yasal düzenlemelere tam anlamıyla uyumun sağlanabilmesine ve daha da ötesinde sürdürülebilir yerleşmelerin üretilmesine yönelik gündemde yoğun bir ajanda bulunmaktadır. Bu bağlamda, bina sektörü içerisinde enerji tüketimi açısından en yüksek paya sahip olan ve öte yandan enerji tasarrufu ve yenileme potansiyeli en yüksek olan konut binalarına yoğunlaşılması, özellikle mevcut bina stoğunun büyük bir kısmının değişimini öngören kentsel dönüşüm çalışmalarının hız kazandığı bu süreçte büyük fırsatlar sunmaktadır.

Ancak, bu fırsatların faydaya dönüştürülmesinde mevcut parçalanmış konut sektörü içerisinde arz ve talep kısmında yer alan karar vericilerin enerji tasarrufu sağlayacak uygun maliyetli uygulama ve teknolojilerden haberdar olmaması ya da bu uygulama ve teknolojilerin konut enerji, ekonomik ve çevresel performansı üzerindeki olası pozitif etki düzeylerini

inandırıcı bulmamaları durumu önemli bir engeldir [7, 8]. Bu engelin aşılmasında birincil çözüm olarak görülen performans tabanlı konut üretimi [9, 10], mevzuatta belirtilen minimum gereksinimlerin sadece düşük ilk yatırım maliyetlerine odaklı olarak sağlandığı ve zayıf yenilikçi döngünün hakim olduğu konservatif yaklaşımlara dayalı konut üretimi piyasasında köklü değişimleri zorunlu kılmaktadır. Bu değişimin gerçekleştirilmesi için de, konut tasarımı/yenilemesi ile performans arasındaki engelin azaltılması ve konut performansı üzerinde en yüksek etki alanına sahip olan erken tasarım sürecinde karar vericilere en iyi rehberliğin sağlanması gerekmektedir. Bu açıdan, Türkiye bağlamında gerçekleştirilen vaka çalışmaları irdelendiğinde; konut performansının geliştirilmesine yönelik alternatif tasarım çözümlerinin irdelenmesi ve farklı tasarım parametrelerinin bu çözümler üzerindeki etkinliklerinin enerji performansı [11-13], ekonomik performans [14-16] ve çevresel performans [11-13] düzeyleri açısından belirlenmesini ve bu alternatif çözümler içerisinde belirli bir amaca yönelik olarak en uygun çözümlerin tanımlanmasını [17-19] sağlayan çalışmalar erken tasarım aşamasında tasarımı bilgilendirici destek açısından büyük fırsatlar sunmaktadır. Ancak, bu çalışmaların sahip olduğu önemli karar destek potansiyeline rağmen, konut üretim pratiğine entegrasyonunun sınırlı düzeyde olduğu belirlenmiştir [20, 21]. Bu sınırlı düzeyin en önemli nedenlerinden biri olarak üretilen tasarım çözümlerinin yüksek karmaşıklık düzeyi ve geniş boyuta sahip olması ve dolayısıyla bu çözümlerin karar vericiler tarafından kolay ve hızlı algılanamaması gösterilmektedir [22, 23].

Bu nedenle, bu çalışmada mevcut konut üretimi ve yenilemesi süreçlerinde konservatif yaklaşımdan performans tabanlı yaklaşıma geçişte ihtiyaç duyulan bilgi ve bu bilgiye ulaşma arasındaki uyumsuzluğun azaltılması amaçlanmıştır. Bu amaç çerçevesinde, konut sektöründeki bu değişim sürecine pozitif katkı sağlayabilmek için gerek normatif çerçevelere ve performans derecelendirme sistemlerine uyumu gerekse konut performansını üzerinde önemli etki düzeyine sahip erken tasarım aşaması kararlarına hızlı ve yinelenmeli geri bildirim olanaklı kılan bir karar destek aracı geliştirilmiştir. Bu karar destek aracının geliştirilmesinde hedef karar vericiler, konut sektöründe arz ve talep tarafını temsil eden mimar ve konut sahipleridir. Dolayısıyla, mimar ve konut sahiplerinin pratikte karar verme süreçlerinde sürekli olarak karşı karşıya kaldıkları "... (örn. low- e kaplamalı cam) olursa ne olur?", "enerji ve maliyet optimal tasarım seçeneği ya da seçenekleri nedir?", "yüksek enerji performanslı konut tasarımı/yenilemesinde (örn. pasif bina) hangi tasarım parametrelerini önceliklendirmeliyim?" gibi sorular çalışmanın metodolojik çerçevesinin geliştirilmesinde dikkate alınmıştır. Bu bağlamda, karmaşık konut tasarımı/yenileme sürecini daha verimli ve etkili hale getirmek için mimar ve konut sahiplerinin mevcut sınırlayıcı unsurların üstesinden gelmelerine yardımcı olmayı amaçlayan bir metodolojik çerçeve önerilmiş ve basit, kullanımı kolay bir arayüz aracılığıyla karar verme sürecinin bilinçli bir şekilde yapılabilmesine yönelik yararlı bir ek araç geliştirilmiştir.

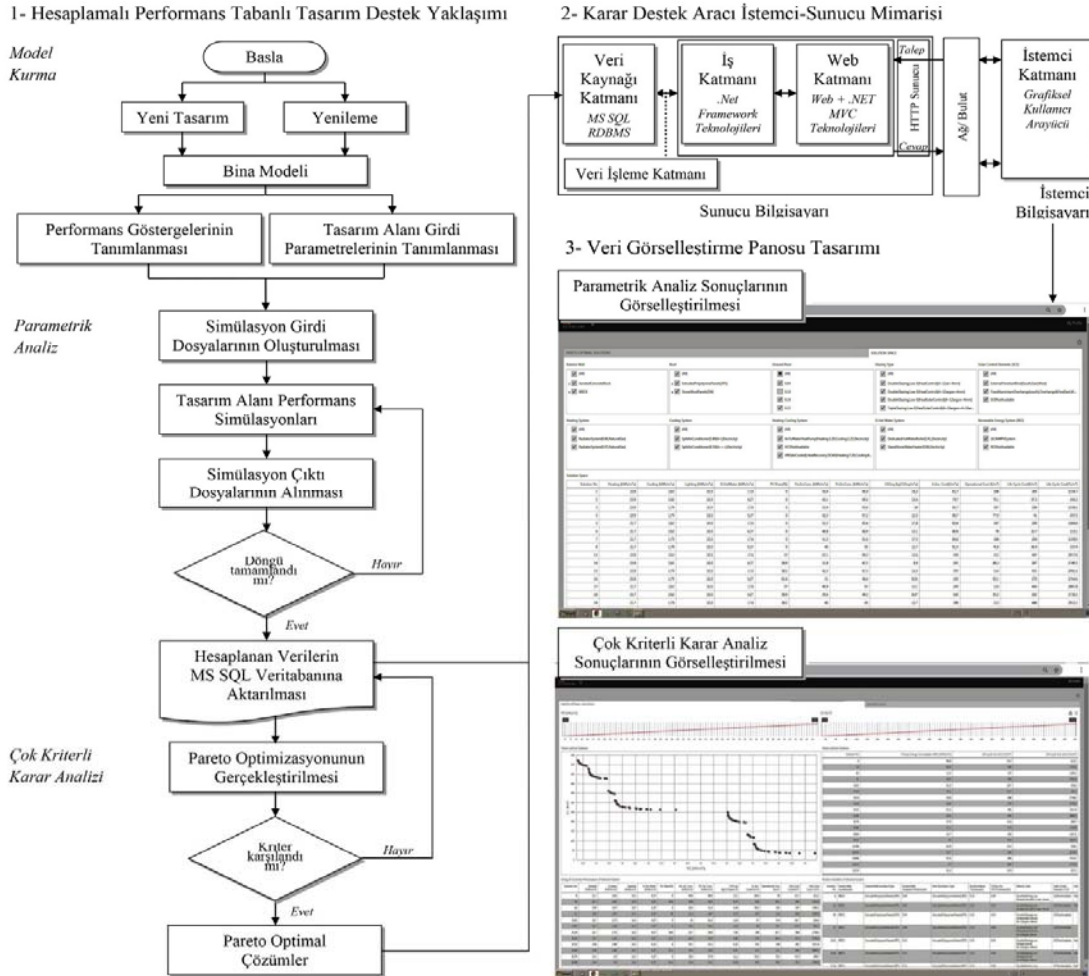
## 2. YÖNTEM (METHODOLOGY)

Bu çalışmada, konut sektöründeki düşük farkındalık düzeyine olumlu bir besleme döngüsü sağlamak ve böylelikle sürdürülebilir, enerji etkin konut binalarının geliştirilmesini ve benimsenmesini desteklemek için internet tabanlı bir karar destek aracının geliştirilmesi esas alınmıştır. Bu esas çerçevesinde, iş akışı üç ana adıma dayalı olarak yapılandırılmış olup Şekil 1’de verilmiştir.

Birinci adım kapsamında, yapma çevrede enerji etkin konut üretimine doğru bir geçişin gerçekleştirilebilmesi için konut tasarımı/yenilemesi ve konut performansı arasındaki engelin azaltılmasına ve teori ve uygulama arasındaki boşluğun kapatılmasına katkı sağlayacak bağlamsallaştırılmış bir hesaplamalı performans tabanlı tasarım destek yaklaşımına odaklanılmıştır. Tasarım sorgularının yerel piyasada yaygın kullanılan malzeme ve inşaat teknikleri göz önünde bulundurularak gerek ulusal mevzuata gerekse pasif bina standartına uygun tasarım eylemlerine dönüştürülmesine imkan sağlayan bu araç ile karar vericiye çok geniş bir yelpazede bilgi aktarımı sunulabilmektedir.

Bu bağlamda, parametrik bina enerji simülasyonu ile çok kriterli karar analizinin entegrasyonuna dayalı kapsamlı bir tasarım alanı araştırma yaklaşımı esas alınmıştır. Bu adım kapsamında, bina modellemesi EnergyPlus [24] programının kapsamlı arayüzü DesignBuilder [25] kullanılarak gerçekleştirilmiştir. EnergyPlus ve MATLAB® [26] arasındaki bağlantıya dayalı olarak gerçekleştirilen parametrik analiz ile kapsamlı bir araştırma yapılmıştır. Bina enerji performansı simülasyon aracı olarak kullanılan EnergyPlus, matematiksel araçlarla etkileşimi kolaylaştıran metin tabanlı format girdileri (.idf) ve çıktıları (.csv) ile çalışmaktadır. MATLAB, otomatik olarak EnergyPlus simülasyonlarını başlatıp, EnergyPlus girdi dosyalarını değiştirebilmeye ve EnergyPlus çıktı dosyalarını okuyarak sonradan işleyebilmeye olanak sağlayan bir araçtır. Çok kriterli karar analizinde, EnergyPlus simülasyon çıktılarına dayalı amaç fonksiyonlarının değerlendirilerek pareto optimal sonuçların elde edilmesi için de MATLAB aracı kullanılmıştır. Her iki programda uygulama alanlarındaki en güvenilir programlardan biri olarak kabul edilmektedir [27].

İkinci adımda, karar destek aracı istemci-sunucu mimarisi, Önder ve Balci [28] tarafından önerilen çok katmanlı bulut



Şekil 1. İnternet tabanlı karar destek aracının geliştirilmesine ilişkin entegre iş akışının çerçevesi (Framework of the integrated workflow for the development of the web-based decision support tool)

tabanlı görsel ortam mimarisi esas alınarak geliştirilmiştir. Beş katmandan oluşan istemci-sunucu mimarisinin oluşturulmasında .Net Framework araçları ve teknolojileri kullanılmıştır. Yaygın olarak kullanılan model-görünüm-denetleyici mimarisi ise, bu beş katmana gömülüdür. Kurulan mimaride, görünüm istemci katmanına, denetleyici web katmanına, model ise iş katmanı, veri eşleme katmanı ve veri (kaynağı) katmanına karşılık gelmektedir.

Son adımda ise, kapsamlı bir tasarım alanı araştırma yaklaşımı kapsamında üretilen büyük miktarda verinin analizine yardımcı olabilecek görselleştirme aracı için bir prototip geliştirilmiştir. Geliştirilen prototip için “Yeni Konut Tasarımı” ve “Konut Yenilemesi” olarak iki ayrı gösterge panosu (dashboard) oluşturulmuştur. Bu iki ayrı gösterge panosunun tasarımında etkin veri analizinin sağlanması amacıyla iki ayrı sekme düzenlenmiştir. İlk sekmede, tasarım alternatifleri ve amaçlar arasındaki ilişkinin irdelenmesini mümkün kılacak şekilde pareto optimal çözümler görselleştirilirken ikinci sekmede ise, tüm tasarım alanının incelenmesine izin veren bir yaklaşım esas alınmıştır. Böylelikle, ilgili tüm performans göstergelerine genel bir bakış sağlayan ve aynı zamanda bina performansı özetlenirken, istenildiğinde ayrıntılı bilgiyi de kullanıcıya sunan bir arayüz tasarlanmıştır. Tanımlanan farklı işlevleri yerine getiren bu arayüz ile uzman olmayan mimar ve konut sahiplerinin karmaşık simülasyon sonuçlarını yorumlaması ve bunları tasarım hamlelerine dönüştürmesi için gereken süre kısaltılarak karar verme sürecinin bilinçli bir şekilde yapılabilmesine rehberlik edilebilmektedir.

### 3. VAKA ÇALIŞMASI (CASE STUDY)

Önceki bölümde sunulan internet tabanlı karar destek aracının geliştirilmesine ilişkin iş akışı çerçevesi, vaka çalışması kapsamında ayrıntılı açıklanmıştır. Vaka çalışması için son derece dinamik ve hızla gelişen bir şehir olan İstanbul test alanı olarak seçilmiştir. Tahmini 16 milyon insanı barındıran İstanbul’da kilometrekareye düşen kişi sayısı 2987 kişidir (Türkiye genelinde nüfus yoğunluğu ise, 108 kişidir) [29]. Kentsel-metropolitan büyümenin üst düzeyde yaşandığı İstanbul şehri genelinde 5,4 milyon üzerinde konut bulunduğu belirtilmektedir [30]. Öte yandan, 1999 Marmara depreminden sonra mevcut konut stoğunun yenilenmesi amaçlı başlatılan kentsel dönüşüm sürecinden en çok etkilenen şehir de İstanbul’dur. 2000 yılından sonra kentsel dönüşümün odak noktası, mevcut konut stoğunun yıkılması ve yeniden inşa edilmesi esasına dayanmaktadır [31]. Ancak, konut piyasası için ana uygulama alanı haline gelen bu kentsel dönüşüm projelerinde sürdürülebilir, enerji etkin konut üretimi yaklaşımı göz ardı edilmektedir [32]. Dolayısıyla, üstel olarak gelişimine devam eden İstanbul için enerji etkin konut binalarına ilişkin düşük farkındalık düzeyi ile düşük piyasa talebi sorununun çözümlenmesi ve böylelikle nitelikli bir arz-talep dengesinin kurulabilmesine yönelik baskı giderek artmaktadır. Bu açıdan mevcut bilgi açığının kapatılması için erken tasarım aşamasında sürdürülebilir konut üretimine ilişkin bilinçli kararların alınmasını sağlayacak enerji ve maliyet odaklı karar destek araçlarının geliştirilmesi son derece faydalıdır.

### 3.1. Hesaplama Performans Tabanlı Tasarım Destek Yaklaşımı

(Computational Performance-Based Design Support Approach)

Bu çalışmada esas alınan hesaplama performans tabanlı tasarım destek yaklaşımı, gerek yeni konut tasarımı gerekse konut yenilemesi için uygulanabilecek düzeyde bağlamsallaştırılmıştır. Bu açıdan geliştirilen prototipin etkin bilgilendirici destek sağlayabilmesi için kurulacak modelin İstanbul’daki konut binalarının büyük bölümünü temsil edebilmesi önceliklendirilmiştir.

#### 3.1.1. Model Kurma (Model Setting)

Yaklaşım çerçevesinde gerçekleştirilen analizlerde, toplam konut alanının çoğunluğunu oluşturan çok aileli konutlara (apartman) odaklanılmıştır. Apartman bloklara dayalı konut üretiminin ve kentsel dönüşümün önemli aktörlerinden olan Toplu Konut İdaresi Başkanlığı’nın gerçekleştirdiği uygulamalarda bu kapsamda irdelenmiştir. Bu bağlamda, model geometrisinin tanımlanması için bina ölçeğinde tasarım parametreleri (plan tipi, bina yüksekliği, çatı tipi ve saydamlık oranı (toplam pencere alanı/toplam cephe alanı)) ve yerleşme ölçeğinde tasarım parametreleri (yerleşme formu, bina yüksekliğinin sokak genişliğine oranı (H/W), yönelme) dikkate alınmıştır. Biçim faktörü (plandaki bina uzunluğu/bina derinliği) 1,00 olan kare taban alanlı tipik bir apartman bloğunun tanımlanması için 100 m<sup>2</sup> kare taban alanına sahip 4 adet konut modülü kullanılmıştır. Bina yüksekliği, döşeme üstünden döşeme üstüne yükseklik 3 m olacak şekilde 15 m’dir. Çatı tipi kırma çatı, saydamlık oranı ise tüm cepheler için %30 olarak tanımlanmıştır. Yerleşme formu, farazi alan üzerinde aynı özelliklere sahip 9 nokta bloğun uniform konfigürasyona uygun olarak 3’e 3 matris oluşturması esasına dayalıdır. Matris düzeninin merkezinde yer alan blok, ilgili analizlerin gerçekleştirileceği bina modelidir. H/W oranı ve yönelme için Mangan ve diğ. [33] tarafından gerçekleştirilen kapsamlı parametrik analiz sonuçları esas alınmış olup sırasıyla 1,00 (uniform kanyon) ve 90° değerleri alınmıştır (Şekil 2).

Bina kabuğu optik ve termofiziksel özellikleri açısından opak ve saydam bileşenlere ilişkin katmanlaşma detayları, Binalarda Isı Yalıtım Kuralları Standardı-TS 825’te [34] İstanbul için belirtilen limit U (W/m<sup>2</sup>K) değerler esas alınarak belirlenmiştir (Tablo 1). Bina kabuğu hava sızdırmazlık değeri “yüksek” ve doğal havalandırma için hava değişim sayısı ise 0,5 h<sup>-1</sup> olarak dikkate alınmıştır [35]. Bina sistemleri kapsamında, ısıtma enerjisi talebinin merkezi sıcak su kazanı ile karşılandığı ve konut modüllerinde radyatör sisteminin mevcut olduğu kabul edilmiştir. Kullanılan enerji tipi doğalgazdır. Soğutma enerjisi için split klima cihazları tanımlanmıştır. Sıcak su sistemi için bireysel elektrikli su ısıtıcılarının kullanıldığı varsayılmıştır. Herbir konut modülü için aydınlık düzeyi 150 lux olarak tanımlanmıştır. Binanın kullanımı kapsamında Türk aile yapısına ilişkin gerçekleştirilen resmi araştırma çalışması esas alınarak bina kullanım çizelgesi oluşturulmuş olup kullanıcı yoğunluğu 0.04 m<sup>2</sup>/kişi olarak alınmıştır [36, 37].

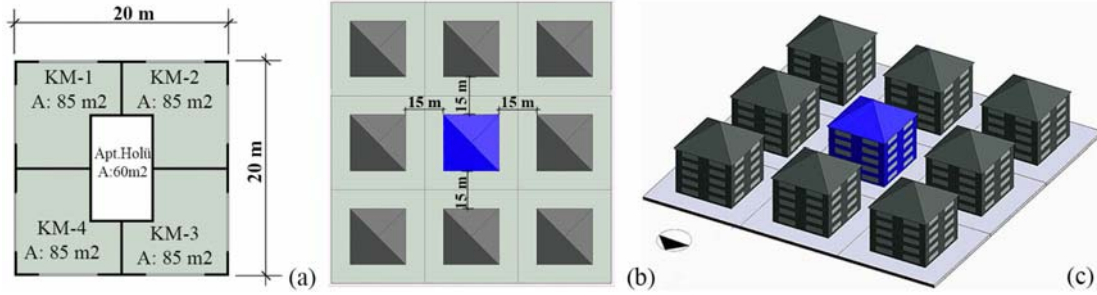
Kullanıcı aktivite düzeyi ise, 110 W/kişi olarak tanımlanmıştır [38]. Kullanım çizelgesine dayalı enerji sistemlerinin çalışma saatleri ısıtma istenen dönemde iç hava sıcaklığının 07:00-23:00 saatleri için 20°C, diğer saatler için ise 13°C değerini sağladığı, soğutma istenen dönemde ise, iç hava sıcaklığının 07:00-23:00 saatleri için 26°C, diğer saatler için ise 32°C değerini sağladığı varsayılmıştır. Soğutma istenen dönemde ayrıca, doğal havalandırmanın aktif konumda olacağı kabul edilmiştir. İstanbul ili iklim koşulları açısından Türkiye'nin ılımlı-nemli iklim bölgesi temsili ili (TS 825 standartına [34] göre ikinci iklim bölgesi, Köppen sınıflandırmasına [39] göre Csa) olarak ele alınmıştır [40].

Model binasının konut yenilemesi açısından farklı yapı yıllarına ilişkin uygun model konfigürasyonlarının tanımlanmasında, TS 825 standartına ilişkin revizyon tarihleri ve İstanbul için yapı izin istatistikleri dikkate alınmıştır. Ayrıca, 2000 yılı öncesi konut stoğunun yıkılıp yeniden yapılmasına dayalı kentsel dönüşüm çalışmalarının devam etmesinden dolayı 2000 yılı öncesi yapı konfigürasyonları bu çalışmada ihmal edilmiştir. Bu bağlamda, 2000-2008 yılları I. dönem, 2008-2013 yılları II. dönem ve 2013 sonrası III. dönem olmak üzere üç farklı bina sınıfı tanımlanmıştır. Bina sınıflarına ilişkin üç farklı bina modelinin oluşturulmasında bina kabuğu bileşenlerinin limit

U değerleri (W/m<sup>2</sup>K) [34, 41, 42] ve enerji sistemlerinin verimlilik değerleri [43-45] değişkenlik göstermekte olup Tablo 2'de verilmiştir.

### 3.1.1.1. Performans göstergelerinin tanımlanması (Defining performance indicators)

Yeni konut tasarımı ya da konut yenilemesi sürecinin başarılı olabilmesinde dikkate alınan performans göstergeleri büyük rol oynamaktadır. Dolayısıyla, bu çalışmada i) geliştirilen karar destek aracının öncelikli hedef kitlesini oluşturan mimar ve konut sahipleri arasındaki iletişimi kolaylaştıracak, ii) bu iki önemli karar vericinin yeni konut tasarımı ya da konut yenilemesinde önemli tasarım parametrelerine odaklanmasını ve farklı tasarım alternatiflerini karşılaştırmasını olanaklı kılacak, iii) Türkiye'de 5627 sayılı Enerji Verimliliği Kanunu [46] ile Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği [44] kapsamında her binanın alması gereken enerji kimlik belgesinde sunulan verilere ilişkin farkındalık düzeyini artıracak şekilde performans göstergelerinin tanımlanmasına odaklanılmıştır. Bu bağlamda, anahtar performans göstergeleri olarak yeni konut tasarımı için birincil enerji tüketimi (BET) ve yaşam döngüsü maliyeti (YDM), konut yenilemesi için ise birincil enerji tasarrufu (BEt) ve YDM tasarrufu (YDMt) esas alınmıştır. Ayrıca, geliştirilen bu araç ile hedef kullanıcıya



**Şekil 2.** Model binasına ilişkin kat planı (a) ve yerleşme formuna ilişkin plan (b) ve aksonometrik görünüm (c) (Floor plan of model building (a), and plan (b) and axonometric (c) views of settlement form)

**Tablo 1.** Bina modeli bileşenlerinin özellikleri (Characteristics of the building model components)

Bileşen	Katmanlaşma (dıştan içe)	U Değeri (W/m <sup>2</sup> K)
Dış duvar	0,006 m anorganik esaslı dış sıva + 0,04 m ısı yalıtımı (taş yünü) + 0,03 m çimento harçlı sıva + 0,19 m yatay delikli tuğla + 0,02 m alçı sıva	$U_D = 0,57$
Toprağa temas eden döşeme	1,00 m temel betonu + 0,03 m tesviye tabakası + 0,04 m ısı yalıtımı (ekstrüde polistren) + 0,03 m koruma betonu + 0,05 m katkılı şap + 0,01 m laminat parke	$U_t = 0,53$
Kırma çatı	Çatı örtüsü + su yalıtımı + polimer bitümlü örtü + 0,10 m ısı yalıtımı (taş yünü) + 0,14 m betonarme döşeme + 0,02 m alçı sıva	$U_T = 0,36$
Pencere	0,06 m PVC çerçeve, 0,004 m Low-e kaplamalı cam + 0,012 m hava + 0,004 m düz cam	$U_p = 1,80$

**Tablo 2.** Bina modeli konfigürasyonlarının özellikleri (Characteristics of the building model's configurations)

Bina Sınıfı	U değeri (W/m <sup>2</sup> K)				Verimlilik değeri		
	$U_D$	$U_T$	$U_t$	$U_p$	Isıtma	Soğutma	Sıcak Su
I (2000-2008)	0,60	0,40	0,60	2,60	80%	4,20 (C)	80%
II (2008-2013)	0,60	0,40	0,60	2,40	80%	4,20 (C)	80%
III (2013 sonrası)	0,57	0,38	0,57	1,80	86%	5,80 (A+)	86%

kapsamlı bir bilgilendirici desteğin sağlanabilmesi için, yeni konut tasarımında alternatiflerin i) enerji performansına ilişkin yıllık BET ile birlikte ısıtma, soğutma, aydınlatma ve sıcak su amaçlı yıllık enerji tüketimleri, yenilenebilir enerji kullanımı oranı, nihai yıllık enerji tüketimi, ii) ekonomik performansına ilişkin YDM ile birlikte ilk yatırım maliyeti ve yıllık işletme maliyeti (enerji maliyeti + bakım & onarım maliyeti), iii) çevresel performansına ilişkin olarak ise yıllık seragazi (SG) salım değeri sunulmuştur. Konut yenilemesi kapsamında ise, BET ve YDM'te ek olarak SG tasarruf değeri (SGt) ve iskonto edilmiş geri ödeme süresi (İGS) her bir alternatif için belirlenmiştir.

### 3.1.1.2. Tasarım alanı girdi parametrelerinin tanımlanması (Defining design space input parameters)

Tasarım alanının karar vericilerin gereksinimleri ile birlikte mevcut ve gelecekteki bina yönetmeliklerinin kriterlerini karşılayacak şekilde tanımlanması, geliştirilen karar destek aracının etkinlik düzeyinin yüksek olmasında önemlidir [47]. Bu açıdan, tasarım alanı girdi parametreleri, sabit parametreler (geometri (yerleşme ve bina ölçeğinde)) ve değişken parametreler (bina kabuğu, enerji sistemleri ve yenilenebilir enerji sistemleri) olarak iki grupta sınıflandırılmıştır. Mevcut yaklaşım, ayrık yerleşme dokusu (sabit H/W ve yönlenme) içerisinde yer alan kare tabanlı beş katlı konut yapıları ile sınırlıdır. Bu sınırlama, kare tabanlı konut yerleşme alanlarının yüksek oranda üretimine dayalı olarak yaygın kullanılan bina ve yerleşme geometrisini karşılamakla birlikte yaklaşım kapsamında esas alınan parametrik analiz sürecini de kolaylaştırmaktadır. Öte yandan, güvenilir bir araç geliştirmek için değişken parametre aralıklarının ve dağılımlarının tespitinde ulusal ve uluslararası standartlar, güncel konut piyasası analiz çalışmaları [48, 49] dikkate alınmış olup enerji performansı üzerinde önemsiz etki düzeyine sahip parametreler ihmal edilmiştir. Bu bağlamda, Tablo 3'te görüldüğü üzere, bina kabuğu, enerji ve yenilenebilir enerji sistemleri açısından 13 farklı parametre tanımlanmış ve bu parametrelere dayalı geliştirilen tasarım seçenekleri ile tasarım alanı çeşitlendirilmiştir.

### 3.1.2. Parametrik analiz (Parametric analysis)

Parametrik analiz ile erken tasarım aşamasında yinelemeli esasa dayalı olarak bina performansının iyileştirilmesine yönelik birçok tasarım alternatifinin aynı anda irdelenmesi ve karşılaştırılabilmesi mümkün olmaktadır. Böylelikle, tasarım sürecine bilinçli ve bilgili bir şekilde başlayabilme amacına rehberlik eden geniş bir tasarım alanı oluşturulabilmektedir [50-52]. Bu bağlamda, karar vericilerin farklı tasarım parametrelerinin bina performansı üzerindeki etkisini ölçmesine yardımcı olmak amacıyla EnergyPlus ve MATLAB'in birlikte çalışmasına dayalı bir parametrik simülasyon yöntemi esas alınmıştır. MATLAB ortamında gerçekleştirilen analiz sürecine ilişkin iş akışı aşağıdaki alt başlıklarda açıklanmıştır.

#### 3.1.2.1. Simülasyon girdi dosyalarının oluşturulması (Generating simulation input files)

Parametrik simülasyon sürecinin ön işleme adımında, EnergyPlus simülasyon programının ihtiyaç duyduğu ve IDF dosyası olarak adlandırılan girdi dosyalarının oluşturulması gerekmektedir. Gerek yeni konut tasarımı gerekse konut yenilemesi için analizi gerçekleştirilecek binayı ve içerisinde bulunduğu yerleşme dokusunu tanımlayan girdi dosyaları, Bölüm 3.1.1'de detaylı olarak açıklanan modele dayalı olarak EnergyPlus programının kapsamlı arayüzü DesignBuilder kullanılarak oluşturulmuştur. Ön işleme sürecinde oluşturulan ana IDF dosyaları, Tablo 3-4'te tasarım parametrelerine ilişkin verilen farklı değişken aralıklarına göre yeniden düzenlenerek her bir tasarım alternatifini tanımlayan yeni IDF dosyaları türetilmiştir. Türetilen bu dosyalar için esas alınan ilke, performans göstergeleri üzerinde tasarım parametresinin etki düzeyinin belirlenebilmesi için ilgili girdi parametresi, diğer tüm parametreler sabit tutulurken değiştirilmiştir. Bu prosedür, esas alınan parametre ağacına göre yinelemeli olarak tekrarlanmıştır. Bu tekrarlı prosedürün gerçekleştirilmesi ve her bir alternatif için EnergyPlus bina modelinin diğer bir deyişle IDF dosyasının oluşturulmasında, EnergyPlus ve MATLAB arasındaki iletişimi sağlamak için yazılan bağlantı fonksiyonu anahtar rol oynamıştır.

#### 3.1.2.2. Tasarım alanı performans simülasyonları (Simulations of the performance of the design space)

İkinci adımda metin tabanlı IDF dosyalarında parametrelendirilen tasarım alanı, MATLAB ortamında geliştirilen bağlantı fonksiyonu aracılığıyla değiştirilmiş ve ilgili EnergyPlus simülasyonları İstanbul iline ait iklim verileri [53] kullanılarak başlatılmıştır. Böylelikle, yazılan MATLAB kodu ile tasarım alanında tanımlanan her bir alternatif kodlayan  $x$  vektörü oluşturulmuş ve otomatik olarak her bir tasarım alternatifinin EnergyPlus hesaplamalarına dayalı dinamik enerji simülasyonu gerçekleştirilmiştir.

#### 3.1.2.3. Simülasyon çıktı dosyalarının alınması (Getting simulation output files)

Son işleme adımında, bir önceki adımda gerçekleştirilen parametrik enerji simülasyonlarına ait EnergyPlus çıktı dosyaları (.csv), MATLAB ortamında işlenerek her bir tasarım alternatifi için Bölüm 3.1.1'de açıklanan performans göstergeleri hesaplanmıştır. Yeni konut tasarımı için BET [54] ve YDM [55], konut yenilemesi için ise BET ve YDMt olarak belirlenen anahtar performans göstergeleri, sırasıyla Eş. 1, Eş. 2, Eş. 3 ve Eş. 4 kullanılarak hesaplanmıştır:

$$BET = \sum (E_{T,yakit} \times f_{p,yakit}) - \sum (E_{PV} \times f_{p,PV}) \quad (1)$$

$E_{T,yakit}$  ile yakıt cinsine göre yıllık enerji tüketimi (kWh/m<sup>2</sup>-yıl),  $E_{PV}$  ile PV sistemden üretilen yıllık enerji miktarı (kWh/m<sup>2</sup>-yıl),  $f_{p,yakit}$  ile ise yakıt cinsine göre birincil enerji dönüşüm katsayısı ve  $f_{p,PV}$  ile ise PV sistemden üretilen

**Tablo 3.** Tasarım alanı girdi parametrelerinin özellikleri (Characteristics of the design space input parameters)

Parametre	Bina Sınıfı			Parametre aralığı	İlk yatırım maliyeti aralığı				
	I	II	III						
Geometri	Yerleşme ölçeğinde	Yerleşme formu	A	A	A	Sabit	-		
		H / W oranı	1,00	1,00	1,00				
		Yönlenme	90°	90°	90°				
	Bina ölçeğinde	Plan tipi	Kare	Kare	Kare				
		Bina yüksekliği	15 m	15 m	15 m				
		Çatı tipi	Kırma	Kırma	Kırma				
Saydımlık oranı	% 30	% 30	% 30						
Bina kabuğu	p1. Dış duvar	p1.1 Gövde malzemesi	YDT	YDT	YDT	YDT / GB	44,60 – 156,60 TL/m <sup>2</sup> (6,84 – 23,99 €/m <sup>2</sup> )		
		p1.2 Isı yalıtım tipi	XPS	XPS	TY	XPS / TY			
		p1.3 Isı yalıtım kalınlığı	0,04	0,04	0,04	0,04, 0,10, 0,16, 0,22 m			
	p2. Çatı	p2.1 Isı yalıtım tipi	XPS	XPS	TY	XPS /TY	138,80 – 247,94 TL/m <sup>2</sup> (21,27 – 38,00 €/m <sup>2</sup> )		
		p2.2 Isı yalıtım kalınlığı	0,08	0,08	0,10	0,10, 0,16, 0,22, 0,28 m			
	p3. Zemine oturan döşeme	p3.1 Isı yalıtım kalınlığı	0,04	0,04	0,04	0,04, 0,10, 0,16, 0,22 m	18,88 – 119,62 TL/m <sup>2</sup> (2,89 – 18,33 €/m <sup>2</sup> )		
	p4. Pencere	p4.1 Cam tipi	C0	C1	C1	C1, C2, C3, C4. (Ayrıntılar için bkz. Tablo 4)	90,00 – 220,00 TL/m <sup>2</sup> (13,79 – 33,72 €/m <sup>2</sup> )		
		p5. Güneş kontrol elemanı	p5.1 Güneş kontrol tipi	md	md	md		SGKE (güney cephesi: yatay; doğu-batı cephesi: düşey) / DJS (güney, doğu ve batı cephelerinde sadece soğutma istenen dönem için aktif konumda)	
	Enerji sistemleri	p6. Isıtma sistemi	p6.1 Verimlilik değeri (η)	0,80	0,80	0,86	0,86, 0,95 (yakıt tipi: doğalgaz)	75,29 – 60,68 TL/m <sup>2</sup> (11,54 – 9,30 €/m <sup>2</sup> )	
			p7. Soğutma sistemi	p7.1 Verimlilik değeri (SEER)	4,20	4,20	5,80		5,80, 8,50 (yakıt tipi: elektrik)
			p8. Isıtma-soğutma sistemleri	p8.1 Sistem tipi	md	md	md		HKIP (Isıtma <sub>SCOP</sub> : 3,29; soğutma <sub>SCOP</sub> : 2,25) / VRF sistemi (Isıtma <sub>SCOP</sub> : 7,20; soğutma <sub>SCOP</sub> : 4,20) (yakıt tipi: elektrik)
		p9. Sıcak su sistemi	p9.1 Verimlilik değeri (η)	0,80	0,80	0,86	0,86 (bireysel su ısıtıcı) / 2,41 (sıcak su boyler)	94,82 – 114,63 TL/m <sup>2</sup> (14,53 – 17,57 €/m <sup>2</sup> )	
							(yakıt tipi: elektrik)		
	Yenilenebilir enerji sistemi	p.10. Fotovoltaik sistem	P10.1 Çatıya entegre PV sistem	md	md	md	m (250Wp tek kristal silikon güneş paneli, η <sub>modül</sub> : %15, η <sub>inverter</sub> : %95) /md	726,38 TL/m <sup>2</sup> (111,32 €/m <sup>2</sup> )	

\*\*A – Aynı yerleşme formu; YDT – Yatay delikli tuğla; GB – Gazbeton; XPS – Ekstrüde polistren; TY – Taş yünü; m – mevcut; md – mevcut değil; SGKE – Sabit güneş kontrol elemanı; DJS – Dış jaluzi sistemi; HKIP – Hava kaynaklı ısı pompası; VRF – Değişken soğutuculu akışkan debili; PV – Fotovoltaik.

\*\* Bina yenilemesi kapsamında tanımlı III. dönem bina sınıfı için referans alınan parametre değerleri, yeni bina tasarımı için referans alınan parametre değerleri ile aynıdır.

elektrik enerjisine ilişkin birincil enerji dönüşüm katsayısı tanımlanmıştır. Eşitlik kapsamında Türkiye için tüketilen yakıt cinsine ilişkin birincil enerji dönüşüm katsayıları, doğalgaz enerjisi için 1,00, elektrik enerjisi için ise 2,36 alınmıştır [56]. PV sistem ile üretilen elektrik enerjisi için birincil enerji dönüşüm katsayısı, Türkiye için tanımlı elektrik enerjisi birincil enerji dönüşüm katsayısı ile aynı alınmıştır. Ayrıca, PV modüllerin güç çıkışlarında yıllık

azalma (degradasyon) oranı her yıl için % 0,5 olarak kabul edilmiştir [57].

$$YDM = IM + YM - KD + EM + B\&OM \quad (2)$$

YDM ile yaşam döngüsü maliyeti (TL/m<sup>2</sup>), İM ile ilk yatırım maliyeti (TL/m<sup>2</sup>), YM ile yenileme maliyetinin bugünkü değeri (TL/m<sup>2</sup>), KD ile bugünkü kalıntı (hurda) değeri



**Tablo 4.** Tanımlanan cam tiplerinin özellikleri (Characteristics of the defined glazing types)

Cam Tipi	Açıklama	SHGC	U <sub>gl</sub> Değeri (W/m <sup>2</sup> K)	U <sub>F</sub> Değeri (W/m <sup>2</sup> K)
C0 (I)	Düz cam (4 +12 hava + 4 mm)	0,74	2,725	2,60 (U <sub>P_lim</sub> = 2,80 [42])
C1 (II, III)	Low-E (ısı kontrol) (4 +12 hava + 4 mm)	0,436	1,628	1,80 (U <sub>P_lim</sub> = 2,40-1,80 [41,34])
C2	Low-E (ısı kontrol) (4 +12 argon + 4 mm)	0,430	1,260	1,50
C3	Low-E (ısı + güneş kontrol) (4 + 12 argon + 4 mm)	0,296	1,204	1,40
C4	Low-E (ısı + güneş kontrol) (4 +16 argon +4 + 16 argon + 4 mm)	0,253	0,55	0,80

(TL/m<sup>2</sup>), EM ile enerji maliyetinin bugünkü değeri (TL/m<sup>2</sup>) ve B&OM ile bakım onarım maliyetinin bugünkü değeri (TL/m<sup>2</sup>) tanımlanmıştır.

$$BEt = \left(1 - \frac{BET_{alt}}{BET_{bina\_sınıft}}\right) \times 100 \quad (3)$$

$BET_{alt}$  ile tasarım alternatifine ilişkin yıllık birincil enerji tüketimi (kWh/m<sup>2</sup>-yıl) ve  $BET_{bina\_sınıft}$  ile bina sınıfına göre yenileme yapılacak bina modelinin yıllık birincil enerji tüketimi (kWh/m<sup>2</sup>-yıl) tanımlanmıştır.

$$YDMt = \left(1 - \frac{YDM_{alt}}{YDM_{bina\_sınıft}}\right) \times 100 \quad (4)$$

$YDM_{alt}$  ile tasarım alternatifine ilişkin yaşam döngüsü maliyeti (TL/m<sup>2</sup>) ve  $YDM_{bina\_sınıft}$  ile bina sınıfına göre yenileme yapılacak bina modelinin yaşam döngüsü maliyeti (TL/m<sup>2</sup>) tanımlanmıştır.

YDM hesaplamalarında önemli iki unsur, hesaplama süresi ve maliyetlerdir. Bu çalışmada hesaplama süresi 30 yıl olarak alınmıştır. Maliyet hesaplamalarında, bina enerji performansı üzerinde herhangi bir etkisi olmayan bina bileşenlerinin maliyetleri ve alternatifler kapsamında aynı olan maliyetler dikkate alınmamıştır [58]. Tasarım alanındaki alternatiflerin ilk yatırım maliyetlerinin belirlenebilmesi için tedarikçilerden alınan fiyat tekliflerine dayalı güncel piyasa birim maliyetleri kullanılmış olup bu maliyetler, Türk Lirası (TL) ve Euro (€) olarak Tablo 3'te verilmiştir. Birim maliyetler, sadece malzeme fiyatlarını içermektedir. Bina sistemlerinin yenilenmesine ilişkin zamanlama ve yenileme sayısı, sistemin tahmini ömrü ile birlikte hesaplama süresinin uzunluğuna bağlı olarak değişmektedir. Bu bağlamda, dikkate alınan hesaplama süresi, bina kabuğuna ilişkin değişkenlerin ömürlerini [59] kapsamakta olup herhangi bir yenileme öngörülmemiştir. Enerji sistemleri bileşenlerinin ömrü ise, EN 15459 standardı [60] EK A'dan alınmış olup bu sistemlerin yıllık bakım-onarım maliyetleri de bu ek esas alınarak hesaplanmıştır. Yenilenebilir enerji sistemleri kapsamında ele alınan PV sistem bileşenlerine (PV modül + Sistem dengeleyici) ilişkin yenileme ve bakım-onarım maliyetleri de hesaplamalarda dikkate alınmıştır [57, 61]. Enerji maliyetleri, hesaplanan yakıt türlerine göre enerji tüketimleri ve PV sistemlerden üretilen enerji üretimi ile birlikte yerel enerji fiyatları [62, 63] esas alınarak hesaplanmıştır. Yaşam döngüsü perspektifi açısından, belirlenen hesaplama süresinden sonra yaşam

ömürüne sahip bileşenler için hurda değerleri hesaplanmıştır. İlk yatırım maliyetleri hariç diğer tüm dikkate alınan maliyetler, hesaplama başlangıç yılı 2019'a göre iskonto oranı %3 [58] esas alınarak indirgenmiş ve böylelikle güncel değerleri elde edilmiştir. YDM hesaplamalarına ek olarak aynı veri ve kabuller çerçevesinde İGS değerleri, Eş. 5 kullanılarak hesaplanmıştır [55].

$$\sum_{n=1}^t \frac{\Delta KM}{(1+i)^n} \geq IM \quad (5)$$

$\Delta KM$  ile kullanım maliyeti (EM + B&OM) tasarrufu (TL/m<sup>2</sup>),  $IM$  ile ilk yatırım maliyeti (TL/m<sup>2</sup>),  $i$  ile iskonto oranı, ve  $t$  ile hesaplama süresi tanımlanmıştır.

Tasarım alternatiflerinin çevresel performansına ilişkin olarak SG ve SGt değerleri, sırasıyla Eş. 6 ve Eş. 7 kullanılarak hesaplanmıştır [64]:

$$SG = \sum (E_{T,yakıt} \times f_{CO_2,yakıt}) - \sum (E_{PV} \times f_{CO_2,PV}) \quad (6)$$

$f_{CO_2,yakıt}$  ile ise yakıt cinsine göre sera gazı dönüşüm katsayısı (kg eşd.CO<sub>2</sub>/kWh) ve  $f_{CO_2,PV}$  ile ise PV sistemden üretilen elektrik enerjisine dayalı önlenilen sera gazı salımına ilişkin dönüşüm katsayısı (kg eşd.CO<sub>2</sub>/kWh) tanımlanmıştır. Eşitlik kapsamında Türkiye için tüketilen yakıt cinsine ilişkin sera gazı dönüşüm katsayıları, doğalgaz enerjisi için 0,234, elektrik enerjisi için ise 0,418 alınmıştır [65].

$$SGt = \left(1 - \frac{SG_{alt}}{SG_{bina\_sınıft}}\right) \times 100 \quad (7)$$

$SG_{alt}$  ile tasarım alternatifine ilişkin yıllık sera gazı salımı (kg eşd.CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>-yıl) ve  $SG_{bina\_sınıft}$  ile bina sınıfına göre yenileme yapılacak bina modelinin yıllık sera gazı salımı (kg eşd.CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>-yıl) tanımlanmıştır.

#### 3.1.2.4. Hesaplanan verilerin MS SQL veritabanına aktarılması

(Importing calculated data into MS SQL database)

Gerçekleştirilen parametrik analiz kapsamında, yeni konut tasarımı ve konut yenilemesi amaçlı toplam 589.826 alternatifi içeren geniş bir tasarım alanı elde edilmiştir. Tüm bu tasarım alternatiflerine ilişkin MATLAB ortamında gerçekleştirilen simülasyonlar ve son işleme için gereksinim duyulan uzun sürelerin kısaltılmasına yönelik olarak eşzamanlı paralel hesaplamalar yürütülmüştür. Bu

hesaplamalar kapsamında Intel® Core™ i7 9750H CPU 2,60 GHz özelliklerine sahip işlemci kullanılmıştır. Hesaplanan veriler, çalışmanın bir sonraki adımını oluşturan çok kriterli karar analizinde kullanılmak üzere MS SQL veritabanına aktarılmıştır.

### 3.1.3. Çok kriterli karar analizi (Multiple-criteria decision analysis)

Üretilen geniş tasarım alanında optimal performans sağlayan tasarım alternatiflerinin belirlenmesi dikkate alınan anahtar performans göstergelerinin çatışan yapısı nedeniyle kolay değildir. Bu bağlamda, çatışan amaçları en iyi şekilde karşılayan tasarım alternatiflerinin araştırılması diğer bir deyişle çok amaçlı optimizasyon probleminin çözümü için çok kriterli karar analiz yöntemi esas alınmıştır. MATLAB ortamında gerçekleştirilen analiz sürecine ilişkin iş akışı, aşağıdaki alt başlıklarda açıklanmıştır.

#### 3.1.3.1. Pareto optimizasyonunun gerçekleştirilmesi (Performing pareto optimisation)

Pareto optimizasyonu, tüm tasarım alanı üzerinde gerçekleştirilen kapsamlı bir araştırmaya dayanmaktadır. Bu araştırma ile karar vericilerin tercihlerine uyan pareto çözümler (uzlaşık (trade-off) çözümler) belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu açıdan, mimarlar için enerji performansı yüksek olan tasarım alternatifleri tercih nedeni iken konut sahipleri için ise, yaşam döngüsü maliyeti düşük olan tasarım alternatifleri önceliklidir. Dolayısıyla, gerçekleştirilen pareto optimizasyonunda amaç fonksiyonları, anahtar performans göstergesi olarak tanımlanan BET ve YDM'nin en aza indirgenmesidir. Bu iki amaç fonksiyonuna dayalı pareto çözümler belirlenmesi amacıyla MATLAB ortamında gerek yeni konut tasarımı gerekse konut yenilemesi için pareto optimizasyonları gerçekleştirilmiştir.

#### 3.1.3.2. Pareto optimal çözümler (Pareto-optimal solutions)

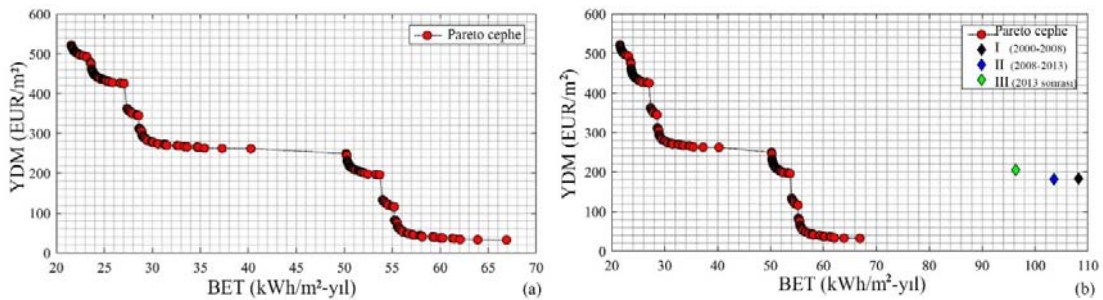
Çok amaçlı optimizasyon problemlerinde, hiçbir çözüm bütün amaç fonksiyonlarını aynı anda optimize edememektedir. Dolayısıyla, tek amaçlı optimizasyon problemlerinin çözümünde olduğu gibi tek bir optimal çözüm elde edilmez. Bu nedenle, gerçekleştirilen pareto optimizasyonu ile tasarım alanında yer alan diğer çözümler tarafından baskılanmamış yani baskın çözümleri kapsayan pareto cephe belirlenmiştir. Böylelikle, tek bir çözüm yerine

mümkün olduğu kadar çeşitli çözümler elde edilmiş olup pareto çözüm alanından karar vericilerin kendi tercihlerine göre tasarım çözümlerini seçebilmesi kolaylaşmıştır. Belirlenen pareto optimal çözümler, Şekil 3'te verilmiştir.

Şekil 3'te görüldüğü üzere, birbiri ile çatışan BET (yatay eksen) ve YDM'ye (düşey eksen) dayalı çok amaçlı optimizasyon probleminin çözümü, hedef karar vericilerin ilgilendiği tüm amaçları karşılayan pareto optimal çözüm kümesi ile karakterize edilmiştir. Bu açıdan, etkin, uzlaşık ve baskın olarak tanımlanan pareto optimal çözümler içerisindeki tasarım alternatifleri irdelendiğinde; a) yeni konut tasarımı açısından i) BET'i en aza indiren enerji optimal çözüm (pareto cephenin sol ucunda) için BET değeri 21,55 kWh/m<sup>2</sup>-yıl, YDM değeri ise 521,99 EUR/m<sup>2</sup>, ii) YDM'yi en aza indiren maliyet optimal çözüm (pareto cephenin sağ ucunda) için ise BET değeri 66,91kWh/m<sup>2</sup>-yıl, YDM değeri ise 32,65 EUR/m<sup>2</sup> olarak hesaplanmış olup b) konut yenilemesi açısından ise üç farklı bina sınıfına göre i) enerji optimal çözüm ile %80 civarlarında BET değeri ii) maliyet optimal çözüm ile %84 oranlarında YDMt değerinin elde edildiği belirlenmiştir. İrdelenen bu iki alternatifte ilişkin girdi parametrelerinin özellikleri ve bina kabuğu bileşenlerinin U değerleri (W/m<sup>2</sup>K), Tablo 5'te verilmiştir. Belirlenen pareto optimal çözümler ise, geliştirilen prototip görselleştirme aracında kullanılmak üzere MS SQL veritabanına aktarılmıştır.

### 3.2. Karar Destek Aracı İstemci-Sunucu Mimarisi (Client-Server Architecture of Decision Support Tool)

Karar destek aracı istemci-sunucu mimarisi, istemci katmanı, web katmanı, iş katmanı, veri eşleme katmanı ve veri kaynağı katmanı olmak üzere beş katmandan oluşmaktadır. İstemci katmanı, karar destek aracının kullanıcı arayüzünü Google Chrome, Safari, Fireworks veya Microsoft Edge gibi bir web tarayıcısı ile sağlamaktadır. Web katmanı, .NET MVC framework, anlatım dili, bağlamlar ve bağımlılık enjeksiyonu gibi .NET MVC teknolojilerini kullanarak istemci katmanındaki kullanıcı ile iş katmanındaki model arasındaki etkileşimi kontrol etmektedir. Karar destek aracının sunucu tarafı bileşenleri iş katmanında yürütülmektedir. .NET framework teknolojilerinin kullanımına dayalı olarak tasarım alanının tümüne ilişkin görsel geri bildirimler etkileşimli görselleştirme teknikleri kullanılarak oluşturulmuştur. Veri



Şekil 3. Konut tasarımı (a) ve yenilemesine (b) ilişkin pareto optimal çözümler (Pareto-optimal solutions for residential building design (a) and retrofit (b))

**Tablo 5.** Enerji optimal ve maliyet optimal çözümlere ilişkin girdi parametrelerinin özellikleri ve bina kabuğu bileşenlerinin U değerleri

(Characteristics of input parameters and U values of building envelope components for energy-optimal and cost-optimal solutions)

Parametre (bkz. Tablo3)	Enerji optimal çözüm		Maliyet optimal çözüm	
p1.1	GB	U <sub>D</sub> : 0,13 W/m <sup>2</sup> K	YDT	U <sub>D</sub> : 0,55 W/m <sup>2</sup> K
p1.2	XPS		XPS	
p1.3	0,22 m		0,04 m	
p2.1	XPS	U <sub>T</sub> : 0,12 W/m <sup>2</sup> K	XPS	U <sub>T</sub> : 0,32 W/m <sup>2</sup> K
p2.2	0,28 m		0,10 m	
p3.1	0,04 m	U <sub>i</sub> : 0,53 W/m <sup>2</sup> K	0,04 m	U <sub>i</sub> : 0,53 W/m <sup>2</sup> K
p4.1	C2	U <sub>p</sub> : 1,50 W/m <sup>2</sup> K	C1	U <sub>p</sub> : 1,80 W/m <sup>2</sup> K
p5.1	DJS		md	
p6.1	-		0,95	
p7.1	-		5,80	
p8.1	VRF sistemi		-	
p9.1	2,41		2,41	
P10.1	m		md	

eşleme katmanı, iş katmanı ve veri katmanı arasındaki bağlantıyı .NET framework teknolojilerini kullanarak sağlamıştır. İş katmanında verilere ilişkin sorgulamalar, ilişkisel veritabanı yönetim sistemleri (RDBMS) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İlişkisel veritabanı paradigması altında, veriler etkileşimli tablo ve grafikler aracılığıyla temsil edilmiş ve yapısal sorgulama dili (SQL) kullanılarak işlenmiştir. Veri kaynağı katmanı, geliştirilen tasarım alanına ilişkin verilerin depolanması ve kullanıcı sorgularına dayalı verilere erişilebilmesi için MS SQL ve RDBMS'den oluşmuştur.

### 3.3. Veri Görselleştirme Panosu Tasarımı (Data Visualisation Dashboard Design)

Parametrik analiz ve çok kriterli karar analizleri sonucunda elde edilen büyük veri kümelerinin, hedef karar vericiler tarafından araştırılması, doğru anlaşılması ve bilinçli tasarım/yenileme kararlarına dönüştürülmesi çok önemli bir problemdir. Bu problemin çözümünde, etkin görselleştirme yöntemleri büyük bir potansiyele sahiptir [66, 67]. Dolayısıyla, MS SQL veritabanına aktarılan ve tek seferde gösterilemeyecek kadar fazla ve karmaşık yapıya sahip olan bu veri kümelerinin kolaylıkla anlaşılması ve erken tasarım aşamasında gereksinim duyulan hızlı geri bildirimlerin karar vericilere sağlanabilmesi için etkileşimli görselleştirme yöntemi esas alınmıştır. Bu yöntem, veri kümelerinin basit, etkin ve anlaşılır bilgilere dönüştürülerek karar vericilere sunulmasında görselleştirme ve etkileşim döngülerini esas alan yinelemeli bir sorgu sürecine dayanmaktadır [68]. Bu esas çerçevesinde tasarlanan gösterge panolarına ilişkin iş akışı, aşağıdaki alt başlıklarda açıklanmış olup <http://185.8.129.154/> IP adresi aracılığıyla geliştirilen karar destek aracına çevrimiçi olarak erişilmesi de mümkündür.

#### 3.3.1. Parametrik analiz sonuçlarının görselleştirilmesi (Visualisation of parametric analysis results)

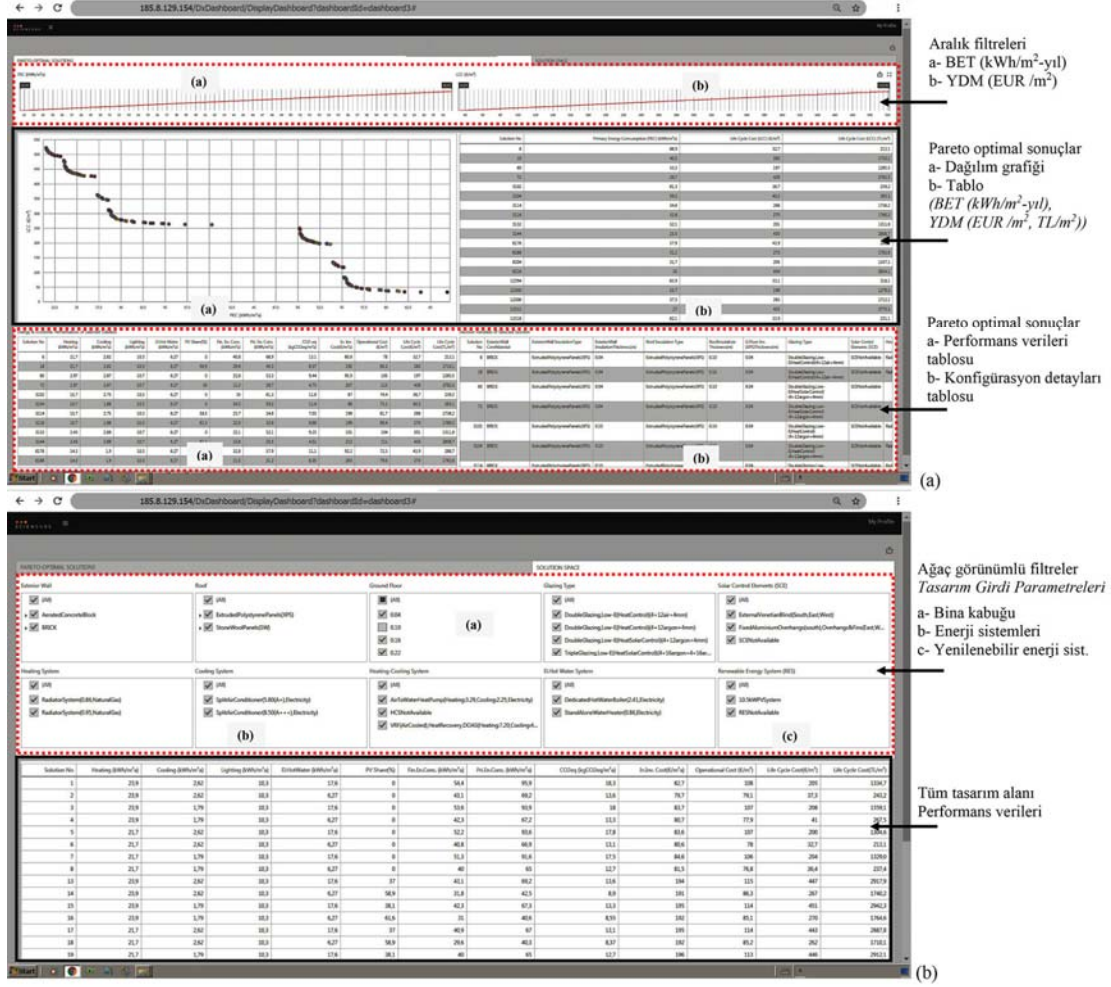
Parametrik analiz sonucunda elde edilen geniş tasarım alanının karar vericiler tarafından etkin olarak irdelenip keşfedilebilmesinde performans verilerinin görselleştirilmesi önemlidir. Dolayısıyla, girdi parametreleri

ile performans göstergeleri arasındaki ilişkilerin kolayca değiştirilebileceği (tanımlı parametre aralıklarına uygun), görüntülenebileceği, anlaşılabilirliği, bilgi çıkarımının yapılabileceği ve keşfedebileceği bir gösterge panosunun geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç çerçevesinde, gösterge panosunun gerek işlevselliğini gerekse kullanılabilirliğini üst düzeye taşıyabilecek, tekrarlamalı yapıya sahip kullanıcı etkileşimli bir görselleştirme konsepti, tasarımda önceliklendirilmiştir. Veri kümelerinin azaltılması için hızlı filtrelemenin, arama parametrelerinin aşamalı olarak iyileştirilmesinin, hedeflerin sürekli yeniden formüle edilmesinin ve ilgili sonuçların analiz edilmesinin mümkün olduğu bu konsept ile yaygın sorgu türleri ve bilgi erişiminden ayrılan bir veritabanı keşfi desteklenmiştir. Bu keşif süreci, tasarım girdi parametrelerinde gerçekleştirilen filtreleme sorgusu ve bu sorguya dayalı değişen tasarım alternatiflerinin listelendiği tablo arasındaki etkileşimin görselleştirildiği bir döngüyü içermektedir. Bu yinelemeli süreç, karar vericilerin önceden tanımlı güncel bina mevzuatlarına uygun tasarım alternatifleri ile birlikte pasif bina standartlarına uygun tasarım alternatiflerini de kapsayan geniş bir tasarım alanı içerisinde hızlı görsel geri bildirimler alabilmesini sağlamıştır. Bu geri bildirimlerin, isteğe bağlı olarak farklı formatlarda (.pdf, .jpg ve .xls) dışa aktarımı da mümkündür. Konut tasarımı/yenilemesi için aynı tasarım formatı esas alınarak iki ayrı gösterge panosu hazırlanmış olup Şekil 4'te gösterge panosunun ekran görüntüsü verilmiştir.

#### 3.3.2. Çok kriterli karar analiz sonuçlarının görselleştirilmesi

(Visualisation of multiple-criteria decision analysis results)

Çok kriterli karar analiz sonuçlarının görselleştirilmesinde, karar vericilerin problemin çözümü için aynı anda çatışan birden fazla amacı dikkate alarak tasarım alternatiflerini karşılaştırabilmesi ve böylelikle problemi daha iyi anlayarak tasarım alternatiflerinin seçiminde yeni bir bakış açısı ve bilinç kazanabilmesi temel amaçtır. Dolayısıyla, tasarım parametreleri ve amaçlar arasındaki ilişkinin irdelenmesini, uzlaşık çözüm alanından karar vericilerin kendi tercihlerine



**Şekil 4.** Çok kriterli karar analiz (a) ve parametrik analiz (b) sonuçlarının görselleştirildiği gösterge panolarına ilişkin ekran görüntüleri

(Screenshots of the dashboards where multiple-criteria decision analysis (a) and parametric analysis (b) results are visualised)

göre tasarım alternatiflerini seçebilmesi, karşılaştırabilmesi ve analiz edebilmesini sağlayan bir gösterge panosunun geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç çerçevesinde, gösterge panosunun tasarım konsepti olarak genel bir bakış ve ayrıntılar arasında gezinmeyi sağlarken karar vericinin çok fazla bilgi arasında kaybolmasına izin vermeyen, büyük miktarda veriyi analiz etmesi için gereken süreyi kısaltarak karar sürecine etkin destek sağlayan bir yapı esas alınmıştır. Tüm pareto optimal çözümlerin görselleştirilmesinde, dağılım grafiği ile çatışan amaçlara bağlı olarak tasarım alternatifleri irdelenebilirken, dağılım grafiğinin yanında yer alan tablo ile de anahtar performans göstergelerine ilişkin verilere ulaşılabilir. Tüm pareto optimal çözümlere ilişkin genel bir bakış, bu iki etkileşimli görselleştirme elemanı ile sağlanırken dağılım grafiği üzerinde herhangi bir noktanın seçilmesi ile belirlenen tasarım alternatifine ilişkin detaylı veriler (performans verileri ve tasarım konfigürasyonuna ilişkin veriler) panonun alt kısmında yer alan iki tablo aracılığıyla kullanıcıya sunulabilmektedir. Ayrıca, pareto optimum çözüm kümesindeki verilerin anahtar performans göstergeleri BET ve YDM için istenilen

aralık değerlerine göre indirgenmesi, panonun üst kısmına yerleştirilen aralık filtreleri ile mümkündür. Bu iki aralık filtresi üzerindeki tanımlı değerlere bağlı sorgulama ile dağılım grafiği ve tüm tablolardaki veriler etkileşimli olarak yeniden düzenlenebilmektedir. Böylelikle, farklı görselleştirme elemanlarının entegre kullanımı ile hızlı, net ve kolay anlaşılır görsel geri bildirimlerin kullanıcıya sunulması ve karar verme sürecinin etkin bir şekilde desteklenmesi sağlanmıştır (Şekil 4). Ayrıca, tüm gösterge elemanları için ayrı ayrı ya da gösterge panosunun tamamını içerecek şekilde sunulan görsel geri bildirimlerin farklı formatlarda (.pdf, .jpg ve .xls) dışa aktarımı mümkündür.

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Yinelemeli deneme-yanılma yönteminin esas alındığı bina tasarım sürecinde, sürdürülebilir binalara ilişkin performans hedeflerinin daha iddialı bir düzeye gelmesi ile birlikte olası çözümlerin sayısının ve karmaşıklık düzeyinin arttığı ve dolayısıyla farklı tasarım seçeneklerinin değerlendirilmesinin de daha zorlu bir hale geldiği açıktır.

Öte yandan, gelişmekte olan bir ülke olarak Türkiye her ne kadar bina enerji verimliliğine ilişkin temel politik araçların oluşturulması için uzun bir yol kat etmiş olsa da mevcut konut üretimi ve yenilemesi süreçlerindeki bilgi ihtiyacı ve bilgiye ulaşma arasındaki uyumsuzluğu gidermedikçe, konut sektöründe nitelikli bir arz-talep dengesinin kurulabilmesi mümkün gözükmemektedir. Bu durum, erken tasarım aşamasında etkin rol oynayan ancak sınırlı düzeyde farkındalık ya da bilgi düzeyine sahip olan konut sahibi ve mimarlara yeterli ve yapıcı bir bilgi akışının sağlanması gerekliliğini vurgulamaktadır. Dolayısıyla, bu çalışma kapsamında geliştirilen internet tabanlı karar destek aracı, sürdürülebilir konut tasarımı ve yenilemesine ilişkin erken aşama karar verme sürecinde hedef karar vericilere etkin bir rehberlik sağlanması açısından iyi bir başlangıç noktasıdır.

Aracın geliştirilmesinde esas alınan çerçeve ile gerek Türkiye bağlamında zorunlu mevzuata uygun gerekse yüksek performanslı konut üretimine ilişkin gereksinimleri karşılayan, teknik olarak uygulanabilir ve ulaşılabilir tasarım alternatiflerinin sistematik ve kapsamlı olarak araştırılması, irdelenmesi ve optimal çözümlerin belirlenmesi mümkündür. Bu bağlamda elde edilen geniş tasarım alanının basit, kolay anlaşılır ve hızlı geri bildirim olanaklı kılacak şekilde görselleştirilmesi ile aracın bilgilendirme kapasitesinin artırılması ve böylelikle karar verme sürecinde yaşanan belirsizlik düzeyinin azaltılarak bilinçli karar vermeyi teşvik etmesi sağlanmıştır. Geliştirme süreci devam eden bu gösterge panosu prototipinin güçlü yanı, karar çatışmasının indirgenmesi ve enerji, ekonomik ve hatta çevresel performans hedeflerini karşılayan alternatiflerin belirlenmesi için yorucu ve hesaplama açısından yoğun bir tasarım yineleme sürecine olan ihtiyacı azaltmasıdır. Tasarlanan grafiksel arayüz ile erken tasarım aşaması döngüsel keşifler ve yinelemelere uygun alternatifleri içeren tasarım alanı görselleştirilebilmiştir. Bununla birlikte, arayüz kullanılabilirlik testine göre mevcut prototipin, karar vericilerin ihtiyaçlarını karşılayabilen etkin bir kullanılabilirlik seviyesine ulaşamadığı da tespit edilmiştir. Bu açıdan, en önemli kısıtlama olarak aracın kullanımına ilişkin öğretici dökümanın eksikliği vurgulanmıştır. Dolayısıyla, aracın kullanım düzeyinin artırılmasına yönelik olarak devam eden geliştirme çalışmalarının kapsamını, tamamen görsel bir öğretici yardım arayüzünün hazırlanması, ılımlı nemli iklim bölgesi kapsamında ele alınan mevcut vaka çalışmasına ek olarak farklı konut şablonlarının ve farklı iklim bölgelerinin eklenmesi ile tasarım alanının daha da zenginleştirilmesi oluşturmaktadır.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu, yurt dışı doktora sonrası araştırma burs programı (TUBITAK 2219) kapsamında desteklenmiştir. Prototip aracın geliştirilmesinde sundukları değerli katkılardan dolayı Prof. Jan L.M. Hensen liderliğindeki Eindhoven Teknoloji Üniversitesi Bina Performansı Kürsüsü üyelerine, Yük. Müh. Burak Bölükbaşı ve Yük. Müh. Emrullah Saku'ya teşekkür ederim.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Global Alliance for Buildings and Construction, International Energy Agency and the United Nations Environment Programme. 2019 global status report for buildings and construction: Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector. <https://www.iea.org/reports/global-status-report-for-buildings-and-construction-2019>. Yayın tarihi Aralık, 2019. Erişim tarihi Aralık, 2019.
2. International Energy Agency. Tracking buildings. <https://www.iea.org/reports/tracking-buildings>. Yayın tarihi Mayıs, 2019. Erişim tarihi Eylül 12, 2019.
3. International Energy Agency. Capturing the multiple benefits of energy efficiency. <https://webstore.iea.org/capturing-the-multiple-benefits-of-energy-efficiency>. Yayın tarihi Kasım 10, 2015. Erişim tarihi Şubat 09, 2019.
4. Becqué, R., Mackres, E., Layke, J., Aden, N., Liu, S., Managan, K., Nesler, C., Mazur-Stommen, S., Petrichenko, K., Graham, P., Accelerating building efficiency: Eight actions for urban leaders. <http://publications.wri.org/buildingefficiency/>. Erişim tarihi Şubat 09, 2019.
5. Brown, M.A., Market failures and barriers as a basis for clean energy policies, *Energy Policy*, 29 (14), 1197-1207, 2001.
6. Häkkinen, T., Belloni, K., Barriers and drivers for sustainable building, *Building Research & Information*, 39 (3), 239-255, 2011.
7. Thwaites, J., "If sustainability is so good, why aren't all businesses doing it?". <https://www.slideshare.net/ncsustainability/john-thwaites>. Yayın Tarihi Ağustos 10, 2010. Erişim tarihi Şubat 10, 2019.
8. Marquez, L., McGregor, J., Syme, M., Barriers to the adoption of energy efficiency measures for existing commercial buildings, *CSIRO Energy Transformed Flagship*. [https://www.researchgate.net/publication/275036077\\_Barriers\\_to\\_the\\_Adoption\\_of\\_Energy\\_Efficiency\\_Measures\\_for\\_Existing\\_Commercial\\_Buildings](https://www.researchgate.net/publication/275036077_Barriers_to_the_Adoption_of_Energy_Efficiency_Measures_for_Existing_Commercial_Buildings). Yayın Tarihi Mayıs, 2012. Erişim tarihi Şubat 10, 2019.
9. Spekkink, D., Performance based design: bringing Vitruvius up to date, *PeBBu Domain 3 Report*. <https://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB22233.pdf>. Yayın tarihi Kasım, 2005. Erişim tarihi Şubat 09, 2019.
10. Shi, X., Yang, W., Performance-driven architectural design and optimization technique from a perspective of architects, *Automation in Construction*, 32, 125-135, 2013.
11. Mangan, S.D., Oral, G.K., Life cycle assessment of energy retrofit strategies for an existing residential building in Turkey, *A/Z ITU Journal of the Faculty of Architecture*, 13 (2), 143-156, 2016.
12. Gerçek, M., Arsan, Z.D., Energy and environmental performance-based decision support process for early design stages of residential buildings under climate

- change, *Sustainable Cities and Society*, 48, 101580, 2019.
13. Altun M., Akgul C.M., Akcamete A., Effect of envelope insulation on building heating energy requirement, cost and carbon footprint from a life-cycle perspective, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35 (1), 147-163, 2020.
  14. Yıldız, Y., Özbalta, T.G., Eltez, A., Energy-saving retrofitting of houses in cold climates, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 34 (1), 53-61, 2014.
  15. Mangan, S.D., Oral, G.K., Assessment of residential building performances for the different climate zones of Turkey in terms of life cycle energy and cost efficiency, *Energy and Buildings*, 110, 362-376, 2016.
  16. Ashrafian, T., Yılmaz, Z., Moazzen, N., A long-term strategy for energy and cost performance improvement of existing residential buildings: step-by-step renovation in Turkey, *E3S Web of Conferences, CLIMA 2019*, 111, 03040, 2019.
  17. Solmaz, A.Ş., Bina enerji performansını geliştirmede optimum çözümleri belirlemeye yönelik simülasyon ve çok amaçlı optimizasyon tabanlı bir karar destek modeli, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2015.
  18. Emekçi, Ş., A life cycle costing based decision support tool for cost-optimal energy efficient design and/or refurbishments, Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2018.
  19. Beyaztaş, H., Oral, G.K., Optimizing urban texture and building typology for the goal of achieving near-zero mid-rise residential building, *Gazi University Journal of Science*, 33, 592-611, 2020.
  20. Yıldız, Y., Binalarda enerji etkin önlemlerin uygulanmasındaki engeller: Balıkesir için bir alan çalışması, *Megaron*, 14 (2), 230-238, 2019.
  21. CESD. Türkiye toplumunun enerji tercihleri araştırması, KHAS CESD Enerji Haber Bülteni, 13, 2020, <https://cesd.khas.edu.tr/sites/cesd.khas.edu.tr/files/inline-files/KHAS%20CESD%20HB%2013%20.pdf>. Yayın Tarihi Mayıs-Haziran 2020. Erişim Tarihi 10 Haziran 2020.
  22. Attia, S., Hamdy, M., O'Brien, W., Carlucci, S., Assessing gaps and needs for integrating building performance optimization tools in net zero energy buildings design, *Energy and Buildings*, 60, 110-124, 2013.
  23. Gadelhak, M., Lang, W., Petzold, F., A visualization dashboard and decision support tool for building integrated performance optimization, 35th International Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe (eCAADe 2017), 719-728, Rome-Italy, September 20-22, 2017.
  24. EnergyPlus Software. EnergyPlus 8.5.0, <https://energyplus.net/downloads> Erişim tarihi Mart 12, 2019.
  25. DesignBuilder Software. DesignBuilder 5.0.3.007, Gloucestershire, UK. <https://designbuilder.co.uk> Erişim tarihi Eylül 12, 2017.
  26. MATLAB-MATrixLABoratory. MATLAB R2019a, [https://www.mathworks.com/products/new\\_products/release2019a.html](https://www.mathworks.com/products/new_products/release2019a.html) Erişim Tarihi: Mart 12, 2019.
  27. Nguyen, A.T., Reiter, S., Rigo, P., A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis, *Applied Energy*, 113, 1043-1058, 2014.
  28. Önder, S.T., Balci, O. Architecture and design of a cloud-based visual simulation environment, *Winter Simulation Conference 2019, Maryland-USA*, 2737-2748, December 8-11, 2019.
  29. Türkiye İstatistik Kurumu. Adrese dayalı nüfus kayıt sonuçları, 2019. <http://www.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=33705>. Yayın Tarihi 4 Şubat 2020. Erişim Tarihi 10 Haziran 2020.
  30. EVA Gayrimenkul Değerleme Danışmanlık. İstanbul'da rakamlarla konut sektörü. <http://www.evagyd.com/haberler/istanbulda-rakamlarla-konut-sektoru/571/>. Yayın Tarihi 2018. Erişim Tarihi 10 Haziran 2020.
  31. Kuyucu, T., Ünsal, Ö., 'Urban Transformation' as State-led Property Transfer: An Analysis of Two Cases of Urban Renewal in Istanbul, *Urban Studies*, 47(7), 1479-1499, 2010.
  32. Keskin, T., Binalar sektörü mevcut durum değerlendirmesi raporu. <http://iklim.cob.gov.tr/iklim/Files/Binalar%20Sektoru%20Mevcut%20Durum%20Degerlendirmesi%20Raporu.pdf>. Yayın tarihi Ağustos, 2010. Erişim tarihi Eylül 12, 2019.
  33. Mangan, S.D., Oral, G.K., Kocagil, I.E., Sozen, I., The impact of urban form on building energy and cost efficiency in temperate-humid zones, *Journal of Building Engineering*, 33, 101626, 2021.
  34. Türk Standartları Enstitüsü. Binalarda ısı yalıtım kuralları (TS825), Ankara, 2013.
  35. BEP-TR. Bina Enerji Performansı-Isıtma ve Soğutma için Net Enerji İhtiyacının Hesaplanması. Bina enerji performansı hesaplama yöntemi, 2010.
  36. Türkiye İstatistik Kurumu. Nüfus ve Konut Araştırması, 2011. [http://www.tuik.gov.tr/Kitap.do?metod=KitapDetay&KT\\_ID=11&KITAP\\_ID=276](http://www.tuik.gov.tr/Kitap.do?metod=KitapDetay&KT_ID=11&KITAP_ID=276). Yayın Tarihi Temmuz 2013. Erişim Tarihi 10 Mart 2019.
  37. T.C. Aile, Çalışma ve Sosyal Hizmetler Bakanlığı. Research on Family Structure in Türkiye TAYA 2011. <https://ailevecalisma.gov.tr/uploads/athgm/uploads/pages/indirilebilir-yayinlar/research-on-family-structure-in-turkiye-2011.pdf>. Yayın Tarihi 2014. Erişim Tarihi 10 Mart 2019.
  38. ANSI/ASHRAE STANDARD 55-2010. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, ISSN 1041-2336. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. <http://arcohvac.ir/wp-content/uploads/2015/11/ASHRAE-55-2010.pdf>. Yayın Tarihi 2010. Erişim Tarihi 10 Mart 2019.
  39. W. Köppen, Die wärmezonen der erde, nach der dauer der heissen, gemäs-sigten und kalten zeit und nach der wirkung der wärme auf die organischewelt betrachtet, 1884.

40. Z. Yılmaz, et al, Sustainable strategies in the energy efficient design and construction of building for Turkey and Ireland, Project No:30657, Research Center of Istanbul Technical University, Istanbul, 2006.
41. Türk Standartları Enstitüsü. Binalarda ısı yalıtım kuralları (TS825), Ankara, 2008.
42. Türk Standartları Enstitüsü. Binalarda ısı yalıtım kuralları (TS825), Ankara, 1999.
43. T.C. Resmi Gazete. Sıvı ve gaz yakıtlı yeni sıcak su kazanlarının verimlilik gereklerine dair yönetmelik, Ankara, 2008.
44. T.C. Resmi Gazete. Binalarda enerji performansı yönetmeliği, Ankara, 2008.
45. T.C. Resmi Gazete. Klimaların enerji etiketlemesine dair tebliğ (SGM/2013-11), Ankara, 2013.
46. T.C. Resmi Gazete. Enerji verimliliği kanunu. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2007/05/20070502-2.htm>.Yayın tarihi Mayıs 2, 2007. Erişim tarihi Şubat 09, 2019.
47. Kotireddy, R., Hoes, P.-J., Hensen, J.L.M., A methodology for performance robustness assessment of low-energy buildings using scenario analysis, *Appl. Energy*, 212, 428-442, 2018.
48. Passive House Institute. Passive house requirements. [https://passiv.de/en/02\\_informations/02\\_passive-house-requirements/02\\_passive-house-requirements.htm](https://passiv.de/en/02_informations/02_passive-house-requirements/02_passive-house-requirements.htm). Erişim tarihi Şubat 09, 2019.
49. Ecofys, Istanbul Aydın University, IZODER. Türkiye bina sektörü enerji verimliliği teknoloji atlası, Ankara: GIZ - Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. [https://www.giz.de/de/downloads/giz\\_2019-en-turkish-building-sector.pdf](https://www.giz.de/de/downloads/giz_2019-en-turkish-building-sector.pdf). Erişim tarihi Şubat 09, 2019.
50. Naboni, E., Zhang, Y., MacCarini, A., Hirsch, E., Lezzi, D., Extending the use of parametric simulation in practice through a cloud based online service, *Buiding Simulation Applications*, BSA2013-1th IBPSA Italy Conference, Bozen-Bozano-Italy, 105-112, 30 January-1 February, 2013.
51. Pratt, K.B., Bosworth, D.E., A method for the design and analysis of parametric building energy models, 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, Sydney-Australia, 2499-2506, 14-16 November, 2011.
52. Samuelson, H., Claussnitzer, S., Goyal, A., Chen, Y., Romo-Castillo, A., Parametric energy simulation in early design: high-rise residential buildings in urban contexts, *Building and Environment*, 101, 19-31, 2016.
53. Climate.One Building.Org. [http://climate.onebuilding.org/WMO\\_Region\\_6\\_Europe/TUR\\_Turkey/index.html](http://climate.onebuilding.org/WMO_Region_6_Europe/TUR_Turkey/index.html). Erişim Tarihi Haziran 10, 2019.
54. CEN/BT/WG 173. Energy performance of buildings–overall energy use, CO2 emissions and definitions of energy ratings. [http://www.cres.gr/greenbuilding/PDF/prend/set1/WI\\_02+04\\_TC-approval\\_version\\_prEN\\_15203+15315.pdf](http://www.cres.gr/greenbuilding/PDF/prend/set1/WI_02+04_TC-approval_version_prEN_15203+15315.pdf). Erişim Tarihi 10 Haziran 2019.
55. Fuller, S.K., Petersen, S.R., Life-cycle costing manual for the federal energy management program, *Natl. Inst. Stand. Technol. Handb.* 135. [https://tsapps.nist.gov/publication/get\\_pdf.cfm?pub\\_id=907459](https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=907459). Yayın tarihi Şubat, 1995. Erişim tarihi Haziran 11, 2019.
56. BEP-TR. Bina Enerji Performansı Hesaplama Yöntemi. <http://www.bep.gov.tr/BEPTRWEB/#.VLEkQyuUfE0>. Erişim tarihi Haziran 11, 2019.
57. R. Frischknecht, Heath, G., Raugei, M., Sinha, P., de Wild-Scholten, M., Fthenakis, V., Kim, H.C., Alsema, E., Held, M., Methodology guidelines on life cycle assessment of photovoltaic electricity, 3rd edition, IEA PVPS Task 12, International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme. Report IEA-PVPS T12-06:2016, 2016.
58. European Commission. European Commission Commission Delegated Regulation, NO:244/2012; supplementing Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings by establishing a comparative methodology framework for calculating cost-optimal levels of minimum energy performance requirements for buildings and building elements, 2012.
59. FannieMae. Instructions for performing a multifamily property condition assessment (version 2.0), Appendix F estimated useful life tables. <https://multifamily.fanniemae.com/media/6701/display>. Yayın tarihi Ağustos, 2019. Erişim tarihi Ağustos 15, 2019.
60. CEN. European Committee for Standardization, Energy performance of buildings –Economic evaluation procedure for energy systems in buildings. Standard EN 15459:2017, Brussels: CEN; 2017.
61. Walker, A., Lockhart, E., Desai, J., Ardani, K., Klise, G., Lavrova, O., Tansy, T., Deot, J., Fox, B., Pochiraju, A., Model of operation-and maintenance costs for photovoltaic systems. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. <https://www.nrel.gov/docs/fy20osti/74840.pdf>. Yayın tarihi Haziran, 2020. Erişim tarihi Haziran, 2020.
62. EPDK. T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu. <http://enerjiensitüsü.de/elektrik-fiyatlari/> Erişim tarihi Kasım, 2019.
63. IGDAS. <https://www.igdas.istanbul/serbest-tuketici-satis/>. Erişim tarihi Kasım, 2019.
64. IPCC. 2006 IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories, Vol.2 Energy, Chapter 2 Stationary combustion. Intergovernmental Panel on Climate Change. [https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2\\_Volume2/V2\\_2\\_Ch2\\_Stationary\\_Combustion.pdf](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_2_Ch2_Stationary_Combustion.pdf). Erişim tarihi Ağustos 15, 2019.
65. ETKB. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Ankara, 2019.
66. Keim, A.D., Information visualization and visual data mining, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 7 (1), 100-107, 2002.

67. Liu, S., Maljovec, D., Wang, B., Bremer, P.-T., Pascucci, V., Visualizing high-dimensional data: Advances in the past decade, Eurographics Conference on Visualization, Cagliari-Italy, 127-147, 25-29 Mayıs, 2015.
68. Hauser, H., Basics of Interactive Visual Analysis. [http://www.vismd.de/lib/exe/fetch.php?media=teaching\\_tutorials:iva\\_basics\\_hauser.pdf](http://www.vismd.de/lib/exe/fetch.php?media=teaching_tutorials:iva_basics_hauser.pdf). Erişim tarihi Ekim 15, 2019.