

Generating Optimal High-rise Building Suggestions According to Solar Radiation and Shade Using Genetic Algorithms

Erenalp Saltık¹

ORCID NO: 0000-0002-3109-8894 ¹

¹ Istanbul Medipol University, School of Fine Arts, Design and Architecture, Department of Architecture, Istanbul, Turkey.

Heating and cooling costs and energy consumption in buildings constitute a great burden. In addition, because high-rise buildings create long and large shadows, they limit and sometimes completely prevent the hours of direct sunlight for the surrounding buildings. Due to these two features, high-rise buildings increase the energy consumption of the city and reduce the comfort of life. High-rise buildings also try to create as much area as possible, as they have a specific purpose of maximum rentable area. Can we reduce energy consumption in the building itself and its surroundings, and increase the quality of life by using evolutionary approaches in the concept design phase of high-rise buildings? The aim of this study is to achieve these goals at the optimum level without reducing the targeted total building area excessively. It is an important feature that the designer can see and intervene in the concept phase of different solution proposals that meet these conditions by using genetic algorithms. Numerous studies have been conducted on form and mass in architectural design using evolutionary approaches and genetic algorithms. With developments in computation, the number and level of detail of these studies have increased and the computation time has shortened. In this study, Wallacei plugin, which is an evolutionary approach plugin using NSGA-II / Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II, was used. In addition to the studies focusing on the urban texture and features with genetic algorithms, there are also studies focusing on the building design and the building envelope. This study focuses on the mass of the building and its effect on the urban fabric and can be a method for early-stage mass analysis and design. In order to test these suggestions, a sample existing high-rise building and its different alternatives produced by evolutionary algorithms were compared by fitness values. The Willis Tower (formerly Sears Tower) in Chicago was chosen as an example building. The simple but effective mass form of the structure provides advantages and diversity in analysis and calculations. The case building is located in a climatic region like Chicago where all four seasons are experienced, and its effects on its surroundings can be easily observed. In the methodology, we calculate the total floor area of the current design of Sears Tower, the solar radiation it receives in a certain period, the shadow it casts on the nearby buildings and the sky view from different parts of the building as first step. The second step is to make choices among the alternatives produced according to these four eligibility criteria. As a result of the study, forms that provide good fitness values from the original building in different criteria were produced, and results that were better than the original design in all other values were obtained by meeting the building area criterion. Rhinoceros 3D program and sub-plugins of Grasshopper plugin were used to make these analyzes. The Elk plugin was used for city data of Chicago. The Ladybug plugin was used for sun and shadow analysis. The Wallacei plugin was used for simulation and analysis with genetic algorithms. At this stage of the study, materials and structural elements are out of scope, analyzes are made over mass studies.

Keywords: Genetic Algorithms, High-rise Buildings, Optimization, Solar Radiation, Shade.

25

Received: 19.08.2021

Accepted: 15.09.2021

Corresponding Author:
erenalpsaltik@gmail.com

Saltık, E. (2021). Generating optimal high-rise building suggestions according to solar radiation and shade using genetic algorithms. JCoDe: Journal of Computational Design, 2(2), 25-50.
<https://doi.org/10.53710/jcode.984567>

Genetik Algoritmalar Kullanılarak Güneş Işınımı ve Gölgeye Göre Optimal Yüksek Yapı Form Önerileri Üretilmesi

Erenalp Saltık¹

ORCID NO: 0000-0002-3109-8894¹

¹ İstanbul Medipol Üniversitesi, Güzel Sanatlar Tasarım ve Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, İstanbul, Türkiye

Yüksek yapılarda ağırlıklı olarak yapay iklimlendirmeden dolayı ısıtma ve soğutma giderleri ve enerji tüketimi büyük bir yük oluşturmaktadır. Bunun yanında yüksek yapılar uzun ve büyük gölgeler yarattığı için çevrelerindeki yapıların da doğrudan gün ışığı aldığı saatleri kısıtlamakta ve bazen tamamen engellemektedirler. Yüksek yapılar bu iki özellik ile şehrin enerji tüketimini arttırmakta ve yaşam konforunu azaltmaktadır. Bu çalışmanın amacı yüksek yapıların konsept tasarım aşamasında evrimsel yaklaşımlar kullanılarak, hedeflenen toplam yapı alanını çok fazla azaltmadan belirli kriterleri optimum düzeyde sağlamak, binanın kendisi ile çevresinde enerji tüketimini azaltmak ve yaşam kalitesini arttırmaktır. Tasarımcının genetik algoritmaları kullanarak bu koşulları sağlayan farklı çözüm önerilerini konsept aşamasında görebilmesi ve müdahale edebilmesi önemli bir özelliktir. Genetik algoritmalar ile kentsel doku ve özelliklerine odaklanan çalışmalar yanında yapının kendisine ve yapı kabuğuna odaklanan çalışmalar da bulunmaktadır. Bu çalışma yapının kütlesine ve kentsel dokuya etkisine odaklanmakta olup, ileride kütle tasarımı ve analizinde kullanılacak bir yöntem olabilir. Bu önerileri test edebilmek için örnek bir mevcut yüksek yapı ve onun evrimsel algoritmalarla üretilmiş farklı alternatifleri karşılaştırılmıştır. Örnek yapı olarak Chicago'daki Willis Tower (eski ve bilinen adı Sears Tower) seçilmiştir. Çalışmanın yönteminde ilk aşamada Sears Tower'ın mevcut tasarımının toplam kat alanı, 21 Haziran tarihinde gündüz saatlerinde aldığı güneş ışınımı, yakın çevredeki binalara yaptığı gölge ve binanın farklı bölgelerinden gökyüzü görünümü hesaplanmıştır. İkinci aşamada ise bu dört uygunluk kriterine göre üretilen alternatifler arasından seçimler yapılmıştır. Çalışma sonucunda farklı kriterlerde orijinal yapıdan iyi değerler sağlayan formlar üretilmiş, yapı alanı kriterini karşılayarak diğer bütün değerlerde orijinal tasarımdan iyi olan sonuçlara da ulaşılmıştır. Bu analizleri yapabilmek için Rhinoceros 3B programı ve Grasshopper eklentisinin alt eklentileri kullanılmıştır. Elk eklentisi Chicago ile ilgili şehir verileri ve modelleme için, Ladybug eklentisi güneş ve gölge analizleri için, Wallacei eklentisi de genetik algoritmalar ile simülasyon ve analizler yapmak için kullanılmıştır. Çalışmanın bu aşamasında malzemeler ve yapı elemanları kapsam dışıdır, analizler kütle çalışmaları üzerinden yapılmaktadır.

Teslim Tarihi: 19.08.2021

Kabul Tarihi: 15.09.2021

Sorumlu Yazar:

erenalpsaltik@gmail.com

Saltık, E. (2021). Genetik algoritmalar kullanılarak güneş ışınımı ve gölgeye göre optimal yüksek yapı form önerileri üretilmesi. JCoDe: Journal of Computational Design, 2(2), 25-50. <https://doi.org/10.53710/jcode.984567>

Anahtar Kelimeler: Genetik Algoritmalar, Yüksek Yapılar, Optimizasyon, Güneş Işınımı, Gölge.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

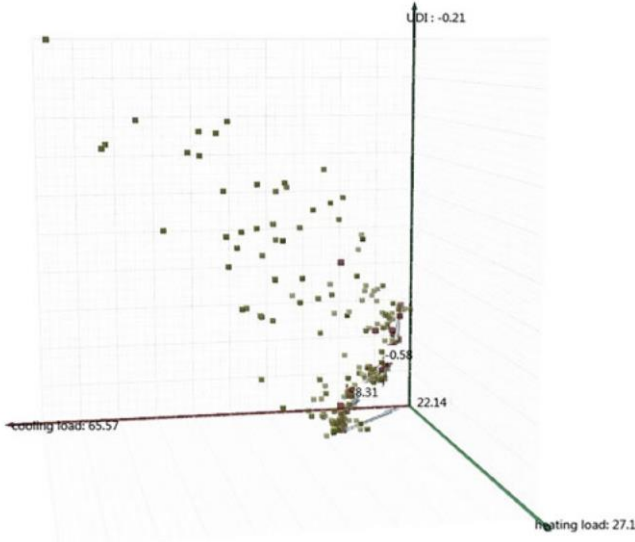
Yapılarda ısıtma ve soğutma giderleri ve enerji tüketimi büyük bir yük oluşturmaktadır (Lima ve diğ., 2019). Özellikle yazın soğutma için harcanan enerji kışın ısıtma için harcanan enerjiden de fazladır (Prieto ve diğ., 2017). Yüksek yapılarda ise ısı konforuna ulaşmak için bu harcamalar iyice artmaktadır. Çünkü yüksek yapılarda mecburen yapay iklimlendirme sistemleri kullanılmaktadır. Yapılar yüksek olduğu için iklim koşullarına da daha sert olarak maruz kalmaktadır. Bunun yanında yüksek yapılar uzun ve büyük gölgeler yarattığı için çevrelerindeki yapıların da doğrudan gün ışığı aldığı saatleri kısıtlamakta ve bazen tamamen engellemektedirler. Yüksek yapılar bu iki özellik ile şehrin enerji tüketimini arttırmakta ve yaşam konforunu azaltmaktadır. Yüksek yapılar bir yandan da belirli bir maliyeti ve amacı olduğu için mümkün olduğu kadar fazla alan yaratmaya çalışır.

Bu çalışmanın amacı yüksek yapıların konsept tasarım aşamasında evrimsel yaklaşımlar kullanılarak, hedeflenen toplam yapı alanını çok fazla azaltmadan belirli kriterleri optimum düzeyde sağlamak, binanın kendisi ile çevresinde enerji tüketimini azaltmak ve yaşam kalitesini arttırmaktır. Tasarımcının genetik algoritmaları kullanarak bu koşulları sağlayan farklı çözüm önerilerini konsept aşamasında görebilmesi ve müdahale edebilmesi önemli bir özelliktir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI (LITERATURE REVIEW)

Holland'ın (1975) temellerini attığı genetik algoritmalar doğadaki evrimsel süreçlerden yola çıkarak yeni jenerasyonlarla en iyi çözüme ulaşmayı amaçlayan bir optimizasyon yöntemidir. Bäck (1996) evrimsel algoritmaları detaylı olarak incelemiş ve genetik algoritmalar ile diğer evrimsel algoritmaların farklarını ortaya koymuştur. Mitchell (1998) ise genetik algoritmaların detaylarına girerek farklı disiplinlerdeki uygulamalarını örneklendirmiştir. Bilgisayarların ve dolayısıyla hesaplama olanaklarının gelişmesi ile bu çalışmaların sayıları ve detay düzeyleri artmış, hesaplama süreleri kısalmıştır. Önceleri bilgisayar bilimleri ağırlıklı olan çalışmalar mimari tasarımda hesaplamalı tasarımın yaygınlaşması ile mimarların da ilgisini çekmeye başlamıştır. Genetik algoritmalar mimarlıkta farklı tasarım aşamaları ve ölçeklerde kullanılmaya başlanmıştır. İlk yıllarda bu çalışmalar iki boyutlu düzlem olan kat planlarında yoğunlaşmıştır. Rebaodengo ve Reorda (1996) gibi

araştırmacılar kat planlarındaki odaların boyutlarını ve birbirleri ile ilişkilerini dikkate alan genetik algoritmaya dayalı basit programlar geliştirmeye başlamışlardır. Miles ve diğ. (2001) gibi tasarımcılar da bu yöntemleri ticari binalar gibi farklı kullanım amaçlarına yönelik uygulamışlardır. Ouarghi ve Krarti (2006) ofis binalarının iki boyutlu düzlemde plan Őekillerini belirlemek üzere çalışmıştır. Tuhus-Dubrow ve Krarti (2010) konutların kabuk Őekilleri üzerine çalışmalar yapmışlardır. Jalali ve diğ. (2019) çözümlerinde ofis binalarının cephelerinde uygun açıklıkları seçmeye odaklanmışlardır (**Şekil 1**).



Şekil 1: Çözüm uzayındaki Pareto optimum çözümler (Pareto front solutions at solution space) (Jalali et al., 2019).

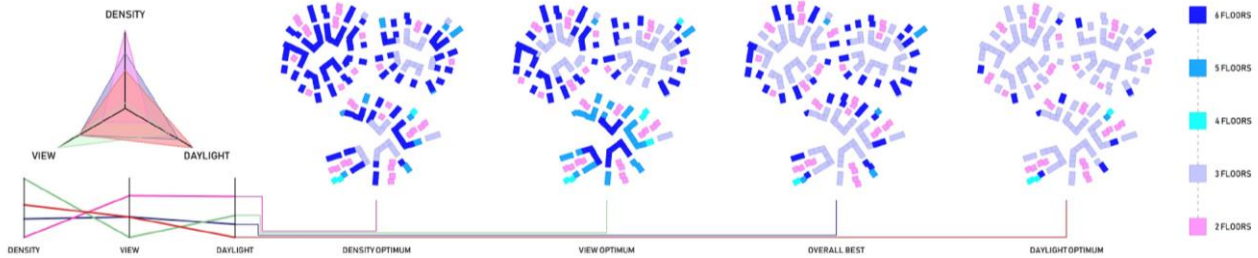
Genetik algoritmalar bir yandan da mimarlığın farklı alanlarında kullanılmaya başlanmış, Caldas ve Norford'un (2002) çalışmaları binalarda toplam enerji tüketimini optimize etmeye odaklanmıştır. Wright ve diğ. (2002) binanın enerji tüketimi ve ısıl konforun çelişen özelliklerini optimize etmek için genetik algoritmaları kullanmışlardır. Jin ve Jeong (2014) manuel olarak topladıkları ısıl verileri serbest formlu yapıların tasarımında ele almışlardır. İlbeği ve diğ. (2020) yapay zekâ ve genetik algoritmalar ile ofis binalarında enerji tüketimini optimize etmişlerdir. Genetik algoritmalar strüktürel tasarım ve yapı elemanları tasarımında da kullanılmaya başlanmış, Aldwaik ve Adeli (2014) farklı yüksek yapıların taşıyıcı elemanlarını incelemiş ve genetik algoritmalar kullanılarak boyutlarını idealize etmeye yoğunlaşmışlardır. Orhan ve Taşkın (2021) yüksek yapıların taşıyıcı sistemlerinde minimum malzemeyi kullanmak için uğraşmışlardır. Yapı bilgi modellemesi

sürecinin gelişmesi ile uygulama projesi aşamasına da genetik algoritmaları dahil etmek üzere Lim ve diğ. (2018) gibi tasarımcıların araştırmaları derinleşmiştir. Yüksek yapıların optimizasyonu tasarım eğitiminde de güncel bir konu olmuştur ve Pasternak ve Kwiecinski'nin (2015) çalışmalarında olduğu gibi mimari tasarım stüdyolarında dönem projesi olarak da çalışılmaktadır.

Bu çalışma kapsamında Deb ve diğ. (2002) tarafından geliştirilen NSGA-II / Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II (Baskılanamayan Sıralı Genetik Algoritma) algoritmasını kullanan bir evrimsel yaklaşım eklentisi olan Wallacei eklentisi kullanılmıştır. Ladybug gibi güneş ve enerji analizi ile ilgili eklentiler geliştikçe bu tür veriler de çalışmalara daha çok dahil edilmeye başlamıştır.

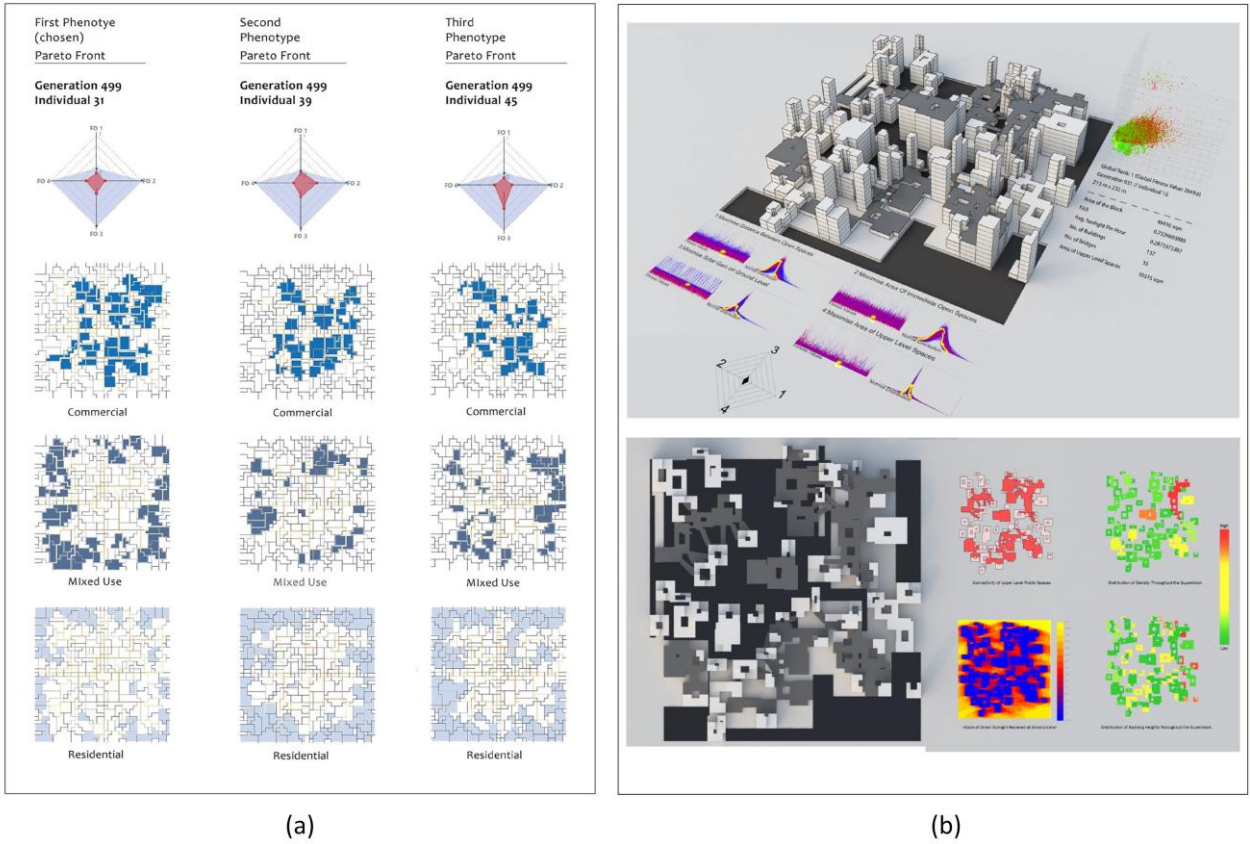
NSGA-II yöntemi ve çevre analizi kullanılarak yapılan literatürdeki örnek çalışma sayısı oldukça fazladır ve genetik algoritmalar mimari ve kentsel tasarım alanında güncel bir konudur. Navarro ve diğ. (2018) genetik algoritmaları kullanarak Barcelona şehrindeki mevcut yapı adalarının kentle ve birbirleri ile ilişkilerini bozmadan yoğunluğunu arttırmaya yönelik çalışmışlardır. Koenig ve diğ. (2020) kentsel tasarımda birbirinden kopuk çalışma alanlarını entegre etmeye yönelik bir model önermişlerdir. Petrov ve Walker (2020) kentsel tasarım yarışmalarında farklı uygunluk kriterlerini önceleyerek ulaştıkları sonuç önerilerini incelemişlerdir (Şekil 2).

Şekil 2: Farklı uygunluk kriterlerine göre en iyi çözümler (Best solutions for different fitness objectives) (Petrov & Walker, 2020).



Miao ve diğ. (2020) kentsel tasarımdaki genetik algoritma kullanımının tarihsel gelişimini incelemiştir. Randall ve diğ. (2020) Hong Kong'daki mevcut bir yapı bloğunun iyileştirilmesine yönelik çalışmışlardır. Makki ve Showkatbakhsh (2018) çalışmalarında nüfus öncelikli bir yapı adası tasarlamışlardır. Choi ve diğ. (2020) sosyal ve kültürel girdilere göre Kyoto şehrindeki büyümeye yönelik yeni yapı adaları önermişlerdir. Makki ve diğ. (2018) kentsel dokuda çevresel analizleri de kullanan

entegre bir sistem önermişlerdir (Şekil 3). Showkatbakhsh ve diğ. (2021) güneş ışınımına göre değişen bir yapı kabuğu geliştirmişlerdir.



Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde genel eksikliğin entegre bir yöntem olduğu gözlemlenmiştir. Mimari çalışmalar iki boyutlu çalışmaların alan büyüklüğü gibi değerlerine odaklanmıştır. Üç boyutlu çalışmalarda da çevresel veriler manuel olarak veya başka programlardan aktarılarak kullanılmaya çalışılmıştır. Yapı tasarım aşamalarına baktığımızda da uygulama aşamasındaki çalışmaların cephelerinin güneş ışınımı gibi çevresel verilere odaklandığı görülmektedir. Kentsel tasarım alanında erken tasarım aşamasında yapı adalarının tasarımında çevresel analizler kullanılan entegre yöntemler görülmeye başlanmıştır. Mimari tasarımın erken aşamalarında da yapı form önerileri geliştirebilmek için bu tür çalışmalar yapılmalıdır. Hesaplamalı tasarım ve eklentilerin gelişmesi ile buna ulaşmak kolaylaşmıştır. Bu çalışma kapsamında yüksek yapıların erken tasarım aşamasında çevresel veriler ve genetik algoritmalar kullanılarak entegre ve eş zamanlı biçimde, herhangi bir yapı formuna uygulanabilecek bir

Şekil 3: Yapı adaları için çözüm önerileri
(Solutions for building blocks)
(Choi et al., 2020; Makki et al., 2018).

yöntem ile akış önerilmiş ve mevcut bir yapı üzerinde denenerek örneklendirilmiştir.

2. YÖNTEM VE KAPSAM (METHODOLOGY AND SCOPE)

Bu çalışma kapsamında yüksek yapıların erken tasarım aşamasında iklim verileri ve çevredeki yapılar kullanılarak form önerileri üretecek bir yöntem önerilmiştir. Yöntemde uygun form önerilerinin seçilebilmesi için genetik algoritmalar kullanılmıştır. Yöntemin son aşamasında ise orijinal öneri ile belirlenen kriterlere göre üretilen formlar karşılaştırılmaktadır.

Genetik algoritmaların uygulanabilmesi için genler (girdiler) ve uygunluk kriterleri (çıktılar) belirlenmeli ve tanımlanmalıdır. Genler simülasyonun çalışmak için kullanacağı değişkenlerdir. Bu yöntem kapsamında erken tasarım aşamasında kullanılacak iki gen grubu önerilmiştir. Birinci gen grubu 3 boyutlu yapı kütle modelinden elde edilen toplam kat sayısıdır. Tek bir kütlede oluşan yapı formunun kat sayısı kullanılabileceği gibi, n sayıda parçadan oluşan yapı formunun her bir parçasının kat sayısı da kullanılabilir. Simülasyon sürecinde algoritma tarafından farklı kat sayıları denenerek belirlenen hedeflere ulaşılmaya çalışılmaktadır. İkinci gen grubu ise Elk eklentisinden elde edilen açık kaynaklı parsel ve yol verilerine göre yapının parsel sınırları içinde yapının X ve Y düzleminde hareket mesafesini belirleyen değişkenlerdir. Elk eklentisi verileri açık kaynaklı haritalardan elde etmektedir (OpenStreetMap, 2021). Simülasyon sürecinde algoritma tarafından yapı hedeflere ulaşmak için X ve Y düzleminde hareket ettirilmektedir. İki gen grubu birlikte çalışır ve simülasyon iki grubun değerlerini de aynı anda kullanır. Genleri belirlerken simülasyonda sıfır değerli sonuçlar yaratacak veya hata verdirecek sayılardan kaçınılmalıdır. Örneğin sıfır katlı bir yapıda hesaplamalar yapılamaz. Tasarımcının belirlediği herhangi bir yapı formu ve herhangi bir konum genler için kullanılabilir. Yöntemde diğer önemli bileşen ise uygunluk kriterleridir (çıktılar). Uygunluk kriterleri belirlenirken birbirleri ile paralel veya tamamen zıt sonuçlar verecek kriterlerden kaçınılmalıdır. Fakat seçilen kriterlerin simülasyonu farklı sonuçlara ulaştırmaya veya zıt yönlerde çekmeye çalışan kriterler olması önemlidir. Çünkü bu yöntemde genetik algoritmaların kullanılmasındaki amaç tasarımcının erken tasarım aşamasında birbirleri ile çatışan tasarım hedefleri arasından koşullara göre en optimum çözümü seçmesini sağlamaktır. Az sayıda uygunluk

kriteri çözüm uzayını daraltmakta, çok fazla sayıda uygunluk kriteri de optimum bir çözüm bulmayı oldukça zorlaştırmaktadır. Bu yüzden bu yöntem kapsamında 4 uygunluk kriteri belirlenmiştir ve bunlar F01, F02, F03 ve F04 olarak adlandırılmıştır.

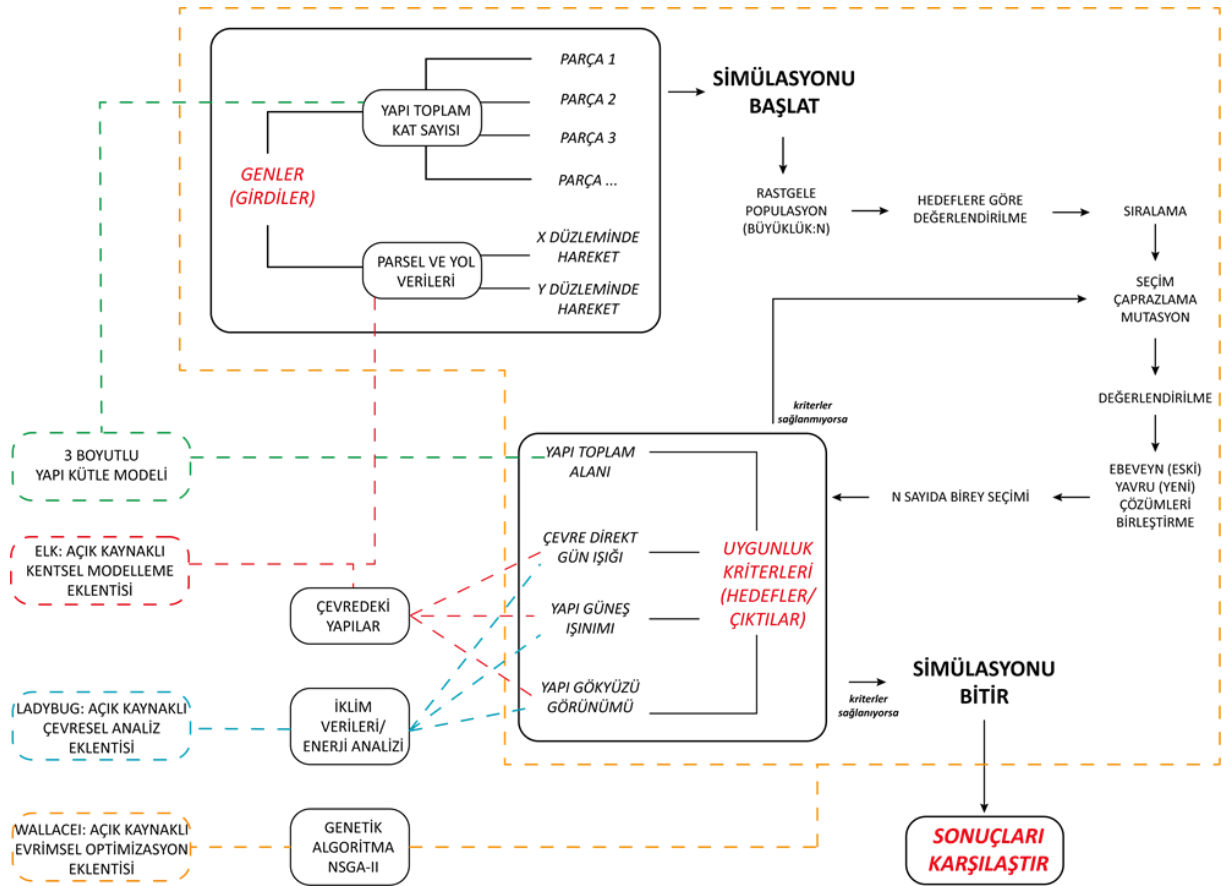
F01 yapı toplam alanını belirtmektedir ve 3 boyutlu yapı form modelinden hesaplanmaktadır. Yöntemde yapı toplam alanının en az ne kadarına inilebileceği seçilebilmektedir. Yapı toplam alanı yüksek yapılar genelde ofis veya konut yapıları olduğu için diğer kriterler uğruna çok fazla azalmaması istenen bir kriterdir. Kamusal yapılarda bu oran diğer yapı türlerine göre daha düşük alınabilir. F02 ise çevredeki seçilen yapılara veya yollara gelen doğrudan gün ışığı saatini görsel konfor amacıyla yükseltmeyi amaçlar. Özellikle kent merkezlerindeki yüksek yapılar yolların dar ve parsellerin sık olması sebebi ile çevrelerindeki yapılara uzun gölgeler oluşturur ve görsel konforlarını olumsuz etkiler. Bu çalışma kapsamında gün ışığı verileri Ladybug eklentisinden, çevredeki yapılar da Elk eklentisinden elde edilmektedir. Ladybug eklentisi iklim verilerini çeşitli ölçüm istasyonlarından elde etmektedir (EnergyPlus, 2021). Önerilen yöntemde tasarımcı analiz için çevredeki etkilenen binaları ve herhangi bir tarih aralığını seçebilmektedir. F03 kriteri de yapıya gelen güneş ışımasını kWh/m² olarak belirtmektedir. Bunun hesaplanabilmesi için ışıma verileri Ladybug eklentisinden, ışıma engel teşkil eden çevre binalar ise Elk eklentisinden gelmektedir. Tasarımcı istenilen tarih aralığını seçebilir ve yapının bulunduğu iklim bölgesine göre bu değeri azaltmaya veya arttırmaya yönelik çalışmalar yapabilir. Bu kriter yapının kendisindeki ısı konfor ile ilgilidir ve yapının bulunduğu konuma göre ısıtma veya soğutma yüklerini azaltmak için kullanılabilir. Son kriter olan F04 gökyüzü görünümüdür ve manzara ile değil ısı konfor ile ilişkilidir. Özellikle kentsel alanlarda yapılarda gökyüzü görünümü düşük yüzeyler geceleri gün boyunca biriktirdikleri ısıları verememekte ve ısı adaları oluşmasına neden olmaktadır (Dirksen ve diğ., 2019). Bu kriter için de çevredeki engel oluşturan yapılar Elk eklentisinden elde edilmekte, hesaplamalar Ladybug eklentisi ile yapılmaktadır. Bu kriter tarihten ve güneşten bağımsızdır.

Önerilen yöntemde genler ve uygunluk kriterleri belirlendikten sonra Wallacei eklentisinde evrimsel simülasyon başlatılır. Tasarımcı istenilen çözüm uzayına ulaşabilmek için jenerasyon ve her bir jenerasyondaki birey sayısını seçebilmektedir. Bunun yanında çözümleri çeşitlendirmek için çaprazlama ve mutasyon olasılıklarını da belirleyebilmektedir.

Simülasyon seçilen büyüklükte rastgele bir popülasyon ile başlar ve genleri değiştirerek her jenerasyonda hedeflenen kriterlere ulaşmaya çalışır. Uygunluk kriterlerine ulaşına kadar seçim, çaprazlama ve mutasyonlarla popülasyonda değişiklikler yaparak yeni jenerasyonlar üretir. İstenilen sonuçlar sağlanmıyorsa popülasyon büyütülebilir veya olasılıklar değiştirilebilir. İstenilen sonuçlar sağlandıysa simülasyon bitirilir ve seçilen form önerileri hem uygunluk kriterlerinin sayısal değerleri hem de yapı formu (fenotip) olarak orijinal yapı formu ve değerleri ile karşılaştırılır.

Tasarımcı tasarım problemlerinin gerekliliklerine bağlı olarak çözümler arasından belirli kriterleri sağlayan çözümleri seçebilir veya bütün kriterlerde optimum değerleri sağlayan bir seçim yapabilir. Bu sayede tasarımcı erken tasarım aşamasında seçtiği çözüm üzerinden ilerleyerek uygulama aşamasında enerji tasarrufu amacı ile yapılacak kesin hesaplar için fikir edinebilir veya ön kabuller yapabilir. Yöntem erken tasarım aşamasındaki herhangi bir konumdaki herhangi bir yapı formuna uygulanabilir (Şekil 4).

Şekil 4: Yöntem akış diyagramı
(Workflow of proposed method).



3. VAKA ANALİZİ (CASE STUDY)

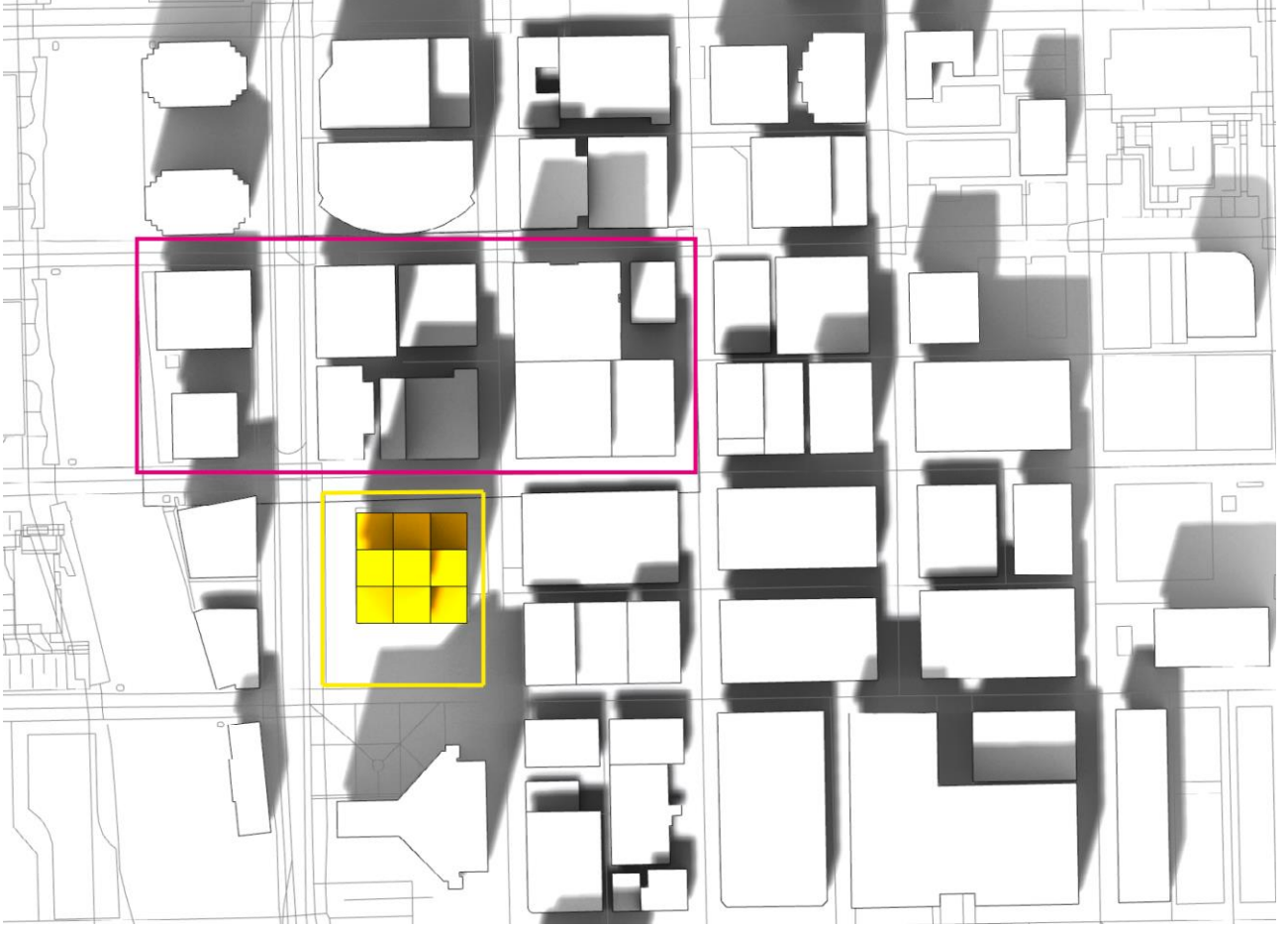
Önerilen yöntemi test edebilmek için örnek bir mevcut yüksek yapı ve onun evrimsel algoritmalarla üretilmiş farklı alternatifleri karşılaştırılmıştır. Örnek yapı olarak Chicago'daki Willis Tower (eski ve bilinen adı Sears Tower) seçilmiştir. Yapı yaklaşık 25 yıl boyunca dünyanın en yüksek binası ünvanını korumuştur. Yapının basit ama etkili formu analiz ve hesaplamaların yapılmasında avantaj ve çeşitlilik sağlamaktadır. Chicago gibi dört mevsimin birden yaşandığı bir iklim bölgesinde bulunmakta ve şehrin merkez bölgesinde olup çevresine etkileri kolayca gözlemlenebilmektedir. Ayrıca Chicago'nun kentsel ve iklimsel verilerine çoğu şehire göre daha kolay ulaşılabilir. Chicago, Köppen iklim sınıfına göre sıcak-nemli karasal iklim olan Dfa sınıfında, kışları soğuk, yazları sıcak, her mevsim yağışlı ve nemlidir ve özellikle şehir merkezinde ısı adaları mevcuttur (Hartz ve diğ., 2012).

Çalışmanın yöntemi ilk aşamada Sears Tower'ın mevcut tasarımının toplam kat alanını, güneş ışınlarının dik geldiği ve Kuzey Yarım Küre'de en uzun gündüzün yaşandığı 21 Haziran tarihindeki gündüz saatleri olan 05.00-21.00 saatlerinde aldığı güneş ışınımını, yakın çevredeki binalara yaptığı gölgeyi ve binanın farklı bölgelerinden gökyüzü görünümünü hesaplamaktır. İkinci aşamada ise bu dört uygunluk kriterine göre üretilen alternatifler arasından seçimler yapmaktır. Çalışmanın bu aşamasında malzemeler ve yapı elemanları kapsam dışıdır, analizler kütle çalışmaları üzerinden yapılmaktadır.

Çalışma kapsamında incelenen Sears Tower 23x23 metre ölçülerinde 3x3 toplam 9 kareden oluşan bir grid üzerine oturtulmuştur. Grid üzerinde toplam 9 tane dikdörtgenler prizması tüp bulunmakta ve gökdeleni oluşturmaktadır. Bu tüplerden iki tanesi 50 kat yüksekliğinde, iki tanesi 66 kat yüksekliğinde, üç tanesi 90 kat yüksekliğinde ve iki tanesi 108 kat yüksekliğindedir. Tüplerden ortada bulunanı çekirdek olarak kullanılmakta ve en yüksek tüpün yüksekliğine eşit olmaktadır. Çalışma kapsamında dört tane uygunluk kriteri belirlenmiştir. Bunlardan bir tanesi (F01) orijinal gökdelen alanının yüzde sekseninin (%80) altına inmemesi istenen alan fonksiyonudur. İkinci kriter (F02) binanın kuzeyinde kalan yapı adası ve bu adada bulunan on tane binaya 21 Haziran tarihinde gelen doğrudan gün ışığı saatini en yüksek değere çıkarmaktır. Bunu sağlamak için 21 Haziran tarihinde 5 saatten az doğrudan gün ışığı alan alanın toplam alana oranı en düşük değere

Şekil 5: Sears Tower ve çevresindeki seçilen binalar (Sears tower and selected nearby buildings).

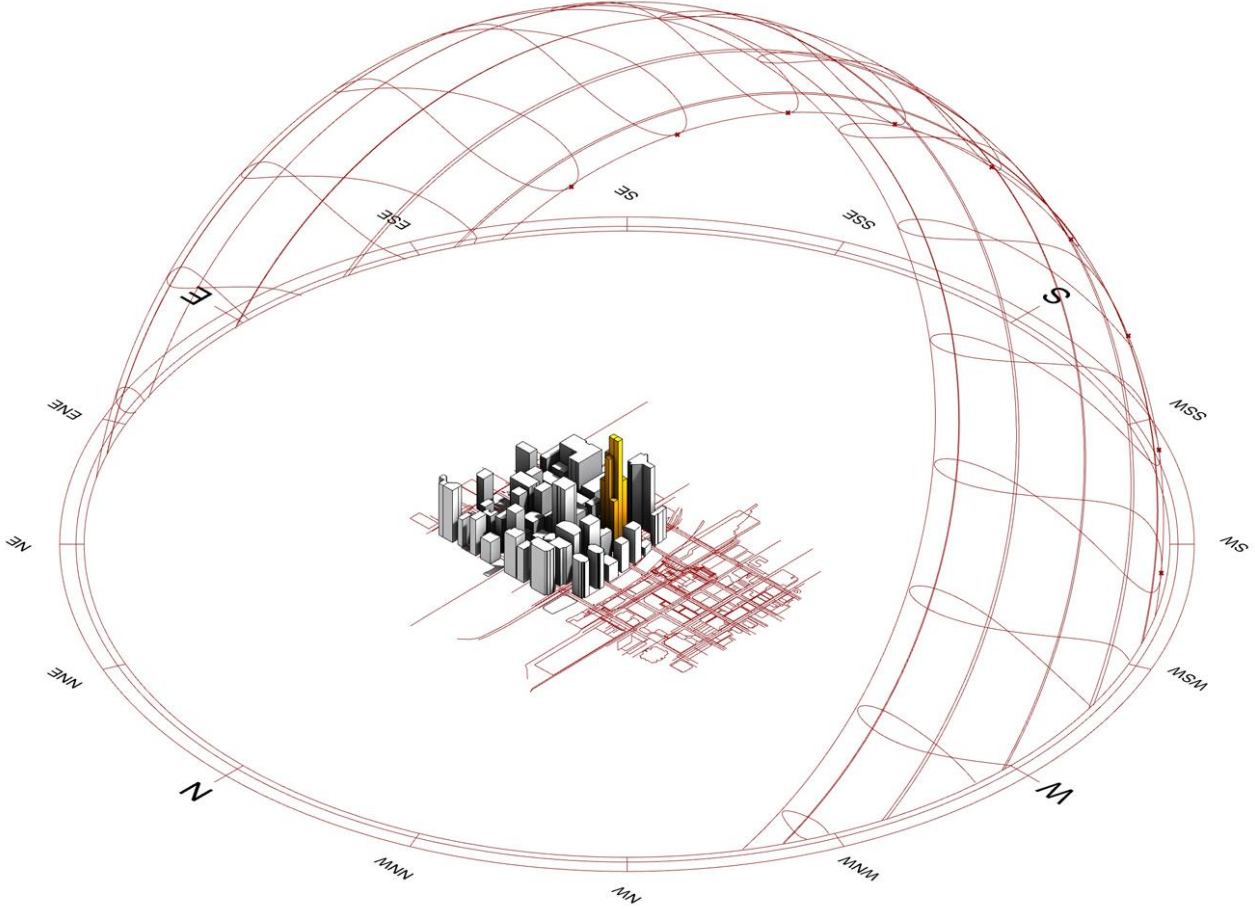
ulaştırmaya uğraşmıştır. Yapının yüksekliğinden dolayı gün içinde ön taraftaki yapılarda 4 saat tam gölge oluşmaktadır, anlamlı sonuçlar elde edebilmek ve farklılıkları görebilmek için 5 saat kabulü yapılmıştır (Şekil 5).



Üçüncü uygunluk kriteri (F03) binanın kendisine 21 Haziran tarihinde gelen güneş ışınımını minimize etmektir. Bunu sağlamak için 21 Haziran tarihinde Chicago şehrinin ortalama değeri olan 1.5 kWh/m² değerinden fazla ışınım alan alanların toplam alana oranı minimum düzeyde tutulmaya çalışılmıştır (Global Solar Atlas, 2021). Son uygunluk kriteri (F04) ise binada gökyüzü görünümünü maksimize etmektir. Bunu sağlamak için bina yüzeyinde yüzde otuzdan (%30) az gökyüzü görünümü olan alanların toplam alana oranı minimize edilmeye çalışılmıştır.

Çevredeki binalardan dolayı gökyüzü görünümü sınırlı olup anlamlı sonuçlara ve farklılıklara yüzde otuzdan (%30) sonra ulaşılabilmektedir. Çevredeki binalar, parseller ve yollar Elk eklentisi üzerinden Open Street Map'teki gerçek veriler kullanılarak oluşturulmuştur (Şekil 6).

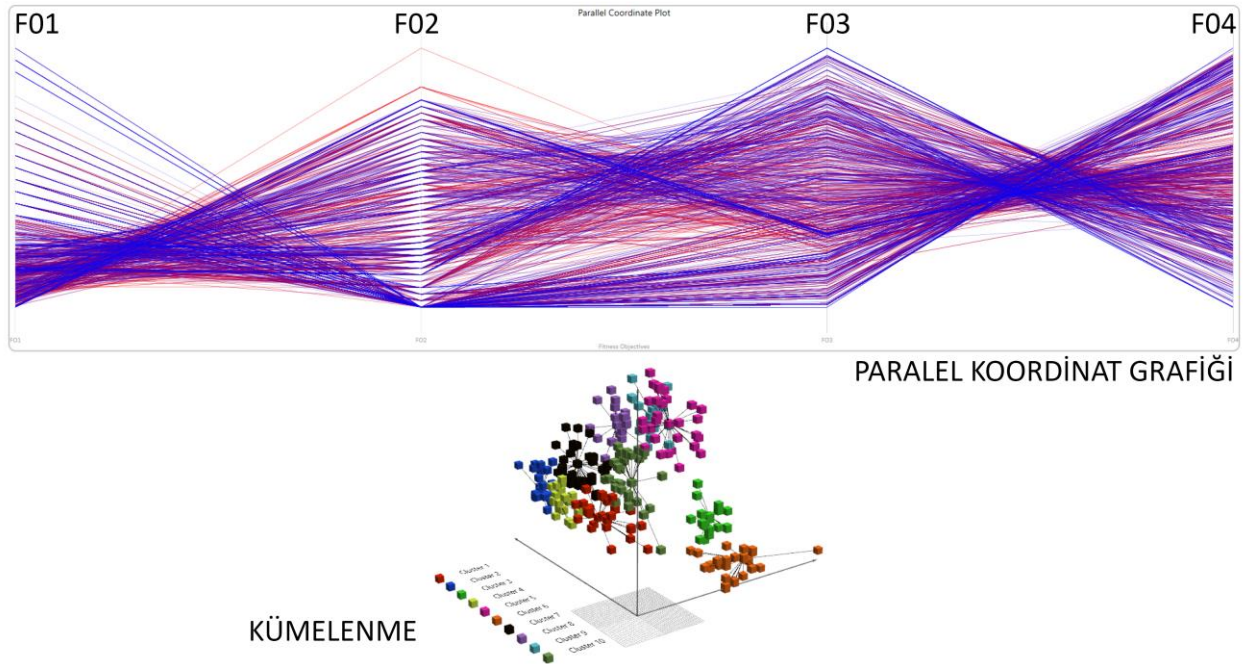
Şekil 6: Sears Tower, çevresindeki binalar ve güneş yolu (Sears tower, nearby buildings, and sunpath).



Orijinal tasarımda toplam alan 379822 m²'dir. Ladybug eklentisi üzerinden yapılan analizlere göre doğrudan gün ışığı alan bölgelerin oranı %68,12'dir, güneş ışınımı 1.5 kWh/m² değerinden yüksek alanların oranı %8,92'dir, gökyüzü görünümü yüzde otuzdan (%30) düşük alanların oranı %71,84'tür. Alternatif tasarımları bulmak için planlanan sistemde toplam genler on tane, bunlar sekiz tane tütün kat yüksekliği ve en yüksek tüple aynı yükseklikte olacak dokuzuncu tül (çekirdek) ve gökdelenin parsel üzerinde hareket etmesini sağlayacak X ve Y koordinatlarıdır. Wallacei eklentisi kullanılarak genetik algoritma ile yapılacak analiz için 100 jenerasyon ve jenerasyon başına 20 bireyden oluşan toplam 2000 çözümden oluşan bir popülasyon planlanmıştır.

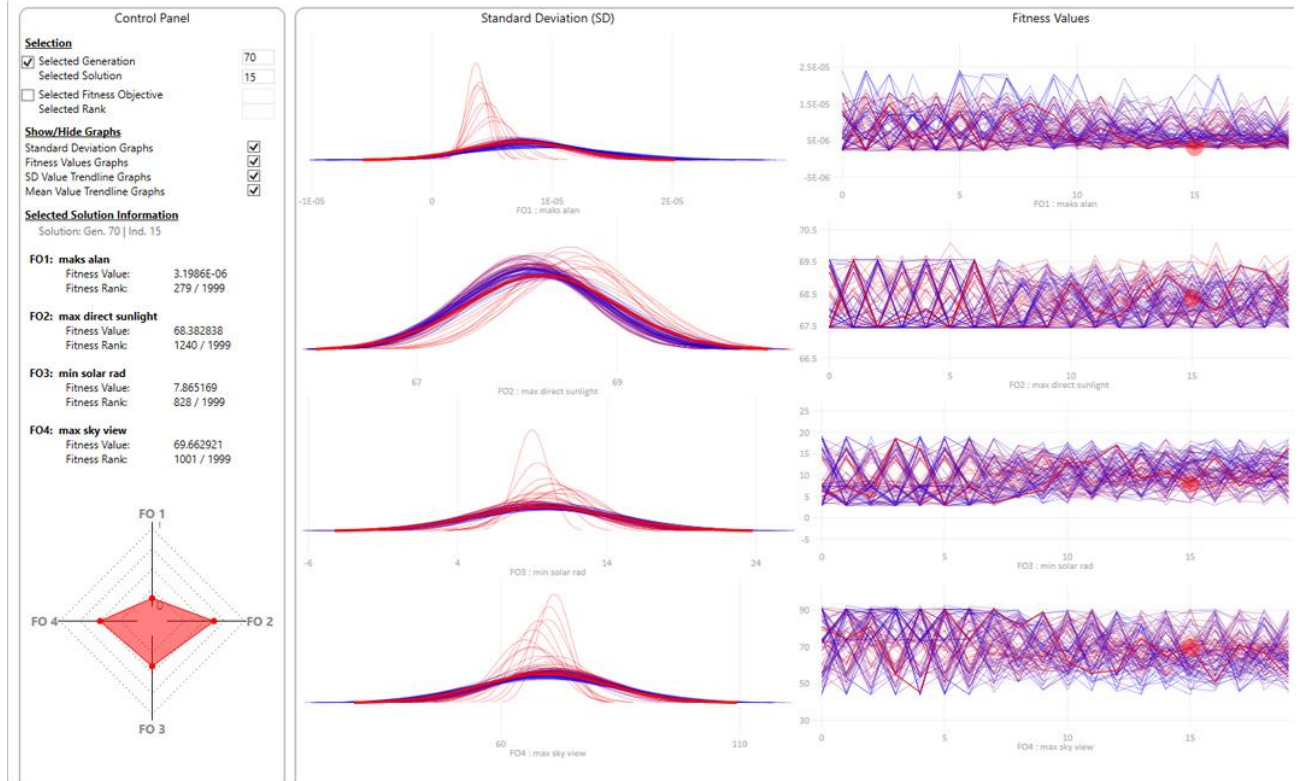
Çaprazlama olasılığı 0,9, mutasyon olasılığı $1/n$, çaprazlama ve mutasyon dağılım endeksleri 20, rastgelelik ise 1 seçilmiştir. Simülasyon çalıştırdıktan sonra çözüm uzayında sonuçlar incelenmeye başlanmıştır. Hedeflenen en önemli kriter yapı alanı olduğu için alanda çok büyük kayıplar verilmeyen çözümlere odaklanılmıştır. Zor olan kısım 2000 çözüm arasından en uygun çözümleri seçebilmektir. Bu seçimi yapabilmek için öncelikle eklentideki gözetimsiz makine öğrenmesi kullanılarak Pareto optimum çözümler arasında bir kümelendirme yapılmıştır. Gözetimsiz makine öğrenmesi sınıflandırılmamış verileri benzer özelliklerine göre gruplandırmayı ve kümelendirmeyi sağlayan bir makine öğrenmesi algoritmasıdır (Bonnaccorso, 2017). Pareto optimum ise çok hedefli optimizasyon problemlerinde birbirleri ile çelişen hedefler arasında bir denge optimumu bulmayı sağlayan algoritmadır (Chang, 2015). Bu özellikler kullanılarak çözümler iyi değerler sağladıkları uygunluk kriterlerine göre kümelendirilmiş ve bu kümelerdeki bireylerden tasarımcı tarafından diğer uygunluk kriterleri değerleri göz önüne alınarak seçimler yapılmıştır. Paralel koordinat grafiği ise bütün çözümleri ve sağladıkları değerleri çizgisel bir şekilde görmemizi sağlayan grafiklerdir (Edsall, 2003). İlk jenerasyondan son jenerasyona doğru kırmızıdan maviye geçiş yapar. Bu grafikten de tasarımcı farklı sonuçları bir arada görebilir ve simülasyonun sorunsuz çalıştığını gözlemleyebilir (Şekil 7).

Şekil 7: Kümelenme ve paralel koordinat grafiği (Clustering and parallel coordinate plot).



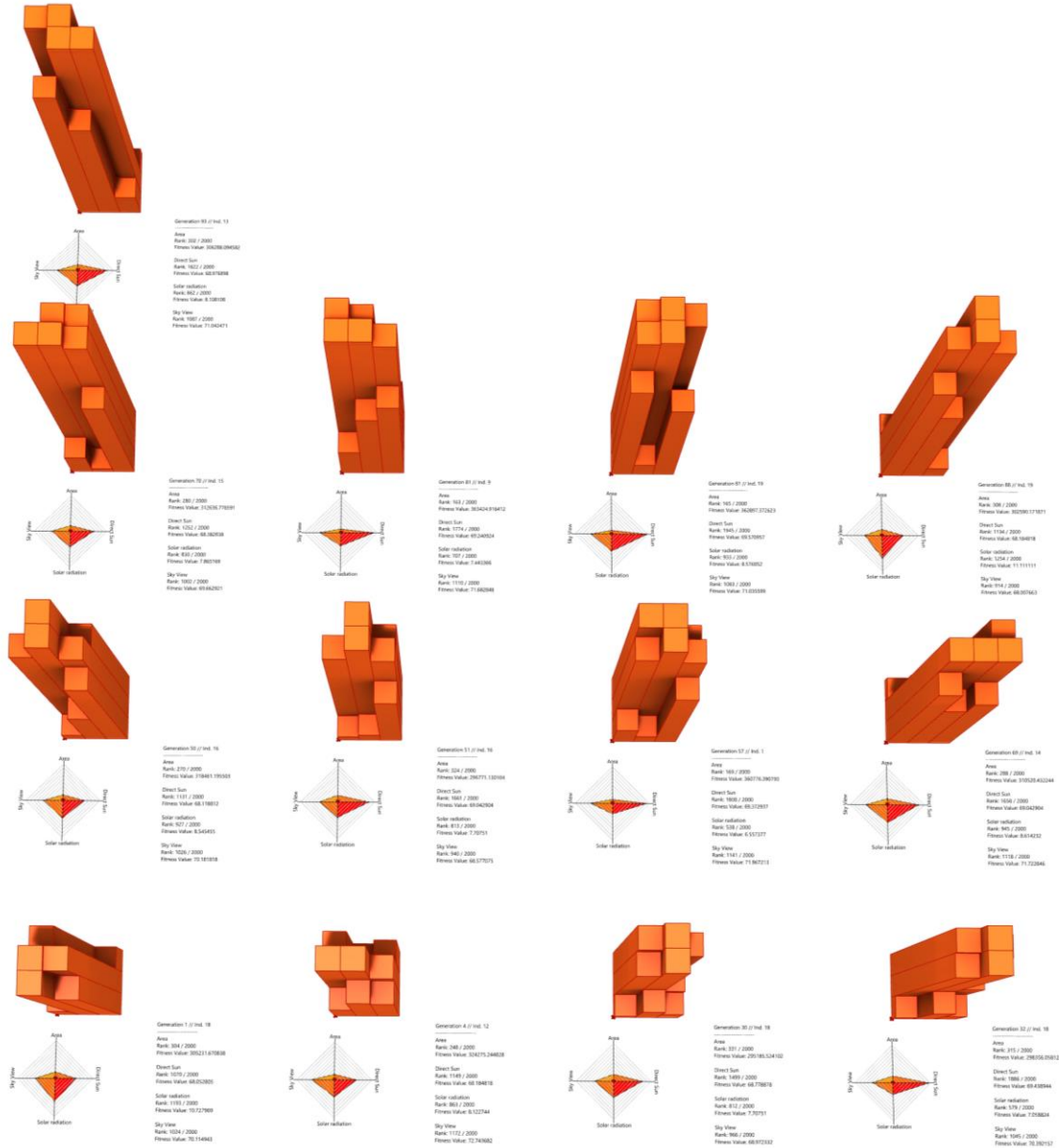
Buna ek olarak elmas grafiği ve standart sapma gibi grafikler üzerinde analizler yapılarak toplam 20 çözüm seçilmiştir. Tasarımcı arayüzden istenilen jenerasyon ve bireyi seçip sayısal değerlerini ve grafiklerini görebilmektedir. Bunun yanında istenilen uygunluk kriterindeki sıralanmış bütün çözümler arasından sırasına göre seçim yapabilmektedir. Seçimi yaptıktan sonra her bir kriterin sayısal değerini ve çözümler arasında sırasını görebilir. Elmas grafiği ise dört uygunluk kriterinin değerlerinin seçilen çözüm için aynı anda görülebildiği dikdörtgen bir grafiklerdir. Merkez noktasına yaklaştıkça o kriterlerin değerini daha iyi sağlamaktadır. Dengeli bir çözüm için grafikteki dört noktanın da merkeze mümkün olduğunca yakın olması beklenir. Tek bir kriterde iyi olan çözümlerde bir nokta merkeze yakınken diğer noktalar merkezden uzaklaşır ve dengesiz bir dörtgen şekli gözlemlenir. Standart sapma eğrilerinde ise her jenerasyonda her bir kriter için çözüm değerlerinin hangi değerde yoğunlaştığı görülebilir. İlk jenerasyondan son jenerasyona doğru kırmızıdan maviye bir geçiş vardır. Kalın kırmızı eğri ise seçilen bireyin standart sapma eğrisini vurgular. Örnek olarak 70-15 F01 uygunluk kriterinde merkeze çok yakındır ve diğer kriterlerde de merkeze yakın değerler almaktadır (Şekil 8).

Şekil 8: 70-15 Elmas grafiği ve standart sapma eğrileri (Diamond chart and standard deviation graphs of 70-15).



Bu 20 çözüm üç boyutlu fenotipler olarak oluşturulmuş ve çekirdeğin yüksekliği az olan gibi çözümler görsel olarak incelenmiş ve elenerek toplam 13 çözüme düşürülmüştür. Çözümlerin sayısal değerleri Tablo 1’de verilmiştir. Bu 13 çözümün grafikleri incelendiğinde dengeli elmas grafiği olan çözümler kolayca gözlemlenebilmektedir. Bazı çözümlerin ise belirli uygunluk kriterlerinde merkeze çok yakın iken diğer kriterlerde merkezden uzaklaştıkları görülmektedir. Bu çözümler dengesiz bir dörtgen şeklinde elmas grafiği oluşturur (Şekil 9).

Şekil 9: Seçilen 13 fenotip
(Selected 13 phenotypes).



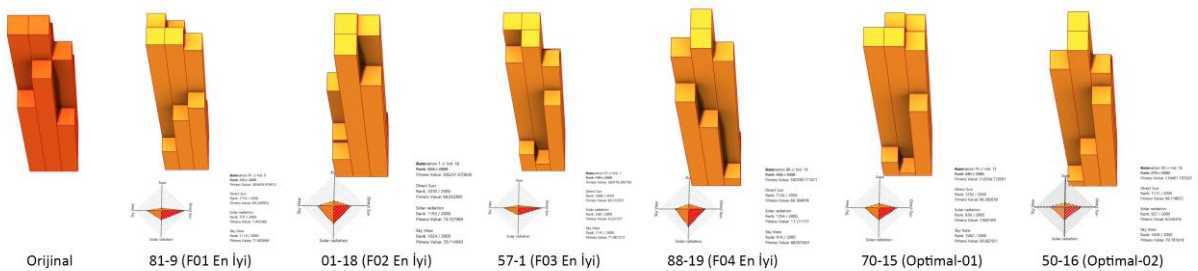
Son seçimi yapabilmek için bu çözümlerin değerlerini orijinal değerler ile karşılaştıran bir tablo oluşturulmuştur (Tablo 1). Tablodaki her bir bireyin farklı uygunluk kriterleri ve Pareto optimum çözümler olup olmadıkları görülmektedir. Yeşil renkteki değerler orijinal tasarımdan daha iyi olan değerlerdir. Bu tablodaki değerlere göre farklı uygunluk kriterleri açısından uygun olan 6 çözüm son öneriler olarak seçilmiştir.

Tablo 1: Karşılaştırma tablosu
(Comparison chart).

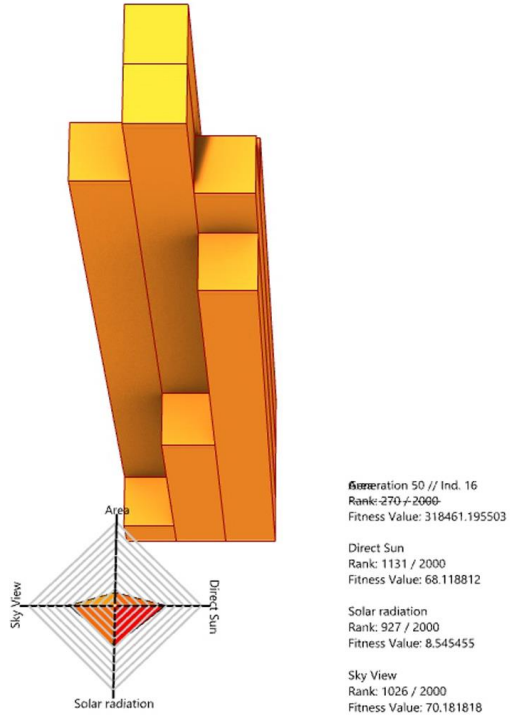
ID	JENERASYON	BİREY	F01 (ALAN)	F02 (DOĞRUDAN)	F03 (IŞINIM)	F04 (GÖKYÜZÜ)	
1	1	18	305231	68,05	10,73	70,12	Pareto
2	4	12	324275	68,18	8,12	72,74	Pareto
3	30	18	295185	68,77	7,71	68,97	Pareto
4	32	18	298356	69,43	7,06	70,39	
5	50	16	318461	68,11	8,54	70,18	Pareto
6	51	16	296771	69,04	7,71	68,58	Pareto
7	57	1	360776	69,37	6,55	71,96	
8	69	14	310520	69,04	8,61	71,72	
9	70	15	312636	68,38	7,86	69,66	Pareto
10	81	9	363424	69,24	7,44	71,68	Pareto
11	81	19	362897	69,57	8,57	71,03	
12	88	19	302590	68,18	11,11	68,01	Pareto
13	93	13	306288	68,97	8,11	71,04	
Orijinal			379822	68,12	8,92	71,84	

81. Jenerasyon 9. Birey (81-9) alan (F01) yönünden en uygun çözüm, 1. Jenerasyon 18. Birey (01-18) doğrudan gün ışığı (F02) yönünden en iyi çözüm, 57. Jenerasyon 1. Birey (57-01) güneş ışınımı (F03) yönünden en iyi çözüm, 88. Jenerasyon 19. Birey (88-19) ise gökyüzü görünümü (F04) yönünden en iyi çözüm olarak gözlemlenmiştir. 70. Jenerasyon 15. Birey (70-15) ile 50. Jenerasyon 16. Birey (50-16) ise birkaç farklı kriterde orijinal tasarımdan iyi değerler sağlayan optimal çözümler olarak gözlemlenmiştir (Şekil 10).

Şekil 10: Seçilen en iyi 6 çözüm
(Selected top 6 solutions).



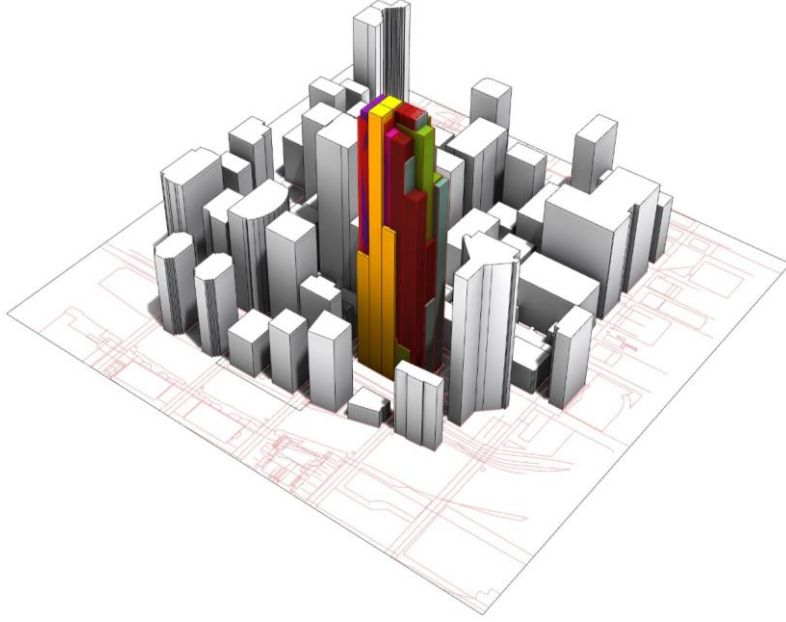
Özellikle 50. Jenerasyon 16. Birey alandan minimum feragat ederek (alanı orijinal tasarımın %85'i) diğer üç uygunluk kriterinde orijinal tasarımdan iyi değerler sağlamıştır. Farklı amaçlar kapsamında tasarımcılar bu yöntemi kullanarak farklı tasarımlar seçebilecektir ve görsel olarak da bu durum gösterilmiş ve tasarımlar karşılaştırılmıştır. Bu çalışma kapsamında son olarak seçilen ve önerilen tasarım 50. Jenerasyon 16. Bireydir (50-16) (Şekil 11).



Şekil 11: 50-16 fenotip ve değerleri
(Phenotypes of 50-16 and values).

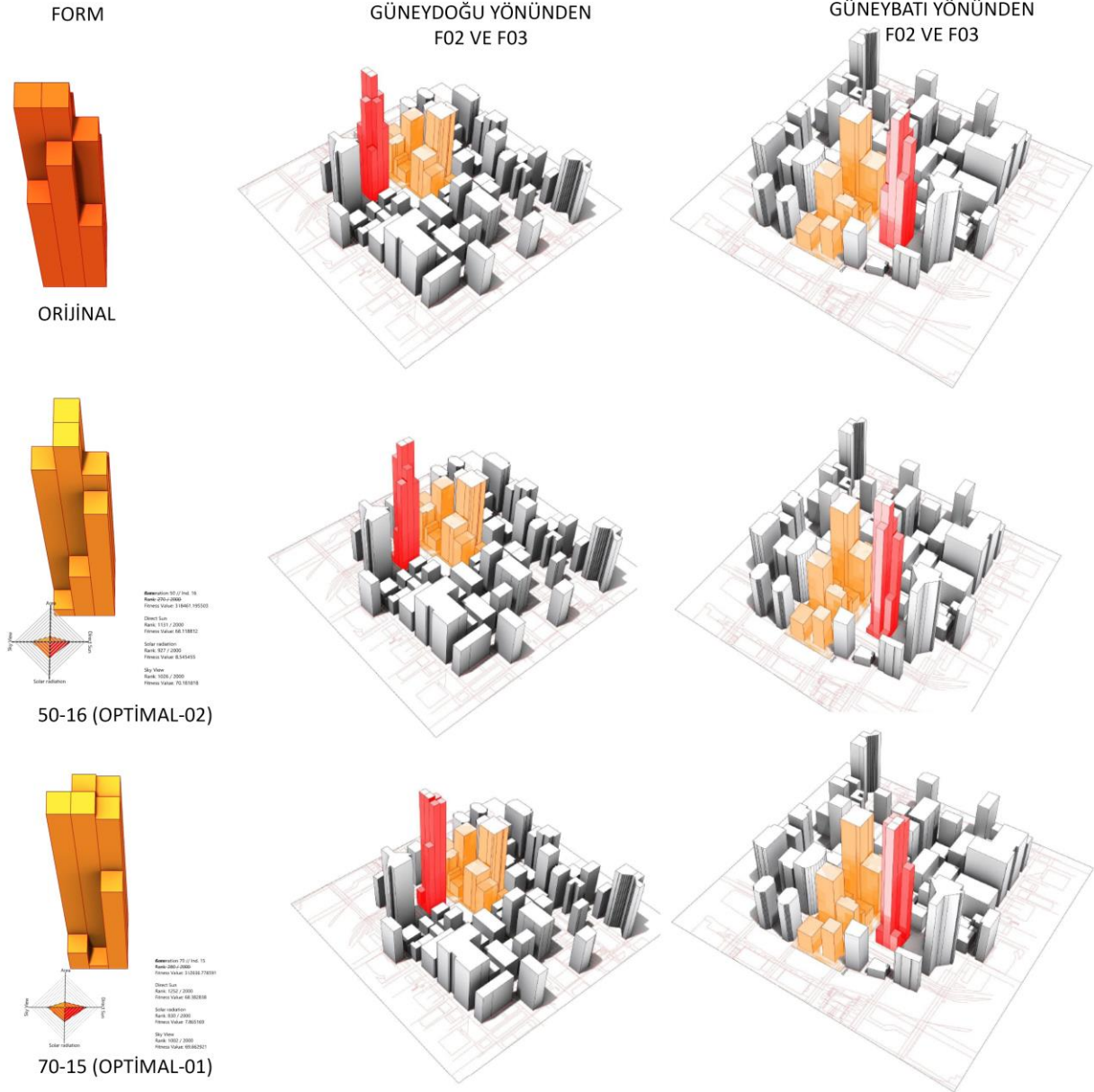
4. BULGULAR VE TARTIŞMA (FINDINGS AND DISCUSSION)

Orijinal tasarım ve seçilen 6 çözümü süperpoze olarak koyduğumuzda birbirinden farklı kütlelerin tasarım problemini benzer şekilde çözebildiğini ve mimarın seçim yapabileceği varyasyonlar oluşturduğu gözlemlenebilir (Şekil 12). Süperpozedeki amaç tasarımcının farklı çözümleri sayısal değerler dışında görsel olarak da bir arada görebilmesidir. İstenilen sayıda çözüm süperpoze edilebilir ve çözümler arasındaki görsel benzerlik ve farklılıklar tasarımcı tarafından daha iyi kavranabilir.



Şekil 12: Süperpoze (Superposition).

Bu süreçte önemli kısımlar çözüm uzayını belirleyecek olan genleri ve hedefleri iyi belirlemek ve sonuçta oluşacak grafikleri iyi okuyabilmektir. Genlerin yani değişkenlerin belirlenmesi önemlidir çünkü genler hem çözüm sayısını etkilemekte hem de simülasyonun doğru noktaya evrilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Genler doğru belirlenmez ise simülasyonun süresi çok uzayabilir, sonuca etki etmeyen girdiler olabilir veya istenmeyen sonuçlara ulaşılabilir. Hedeflerin belirlenmesi ise diğer bir kritik süreçtir. Wallacei eklentisi hedefleri minimize etmeye, diğer bazı genetik algoritmalar ise maksimize etmeye odaklanmıştır, sistem buna göre kurgulanmalıdır. Genler ve hedeflerin ilişkisi doğru kurgulanmaz ise sıfır sonuçlar oluşabilmekte, bu sonuçlar eleneceğinden simülasyon tek bir bölgede sıkışabilmektedir. Ayrıca optimal çözümlerin belirlenebilmesi için hedeflerin birbirleri ile tamamen paralel veya imkânsız zıtlıkta olmaması gerekmektedir. Tasarımcının sonuçları sayısal değerler dışında görsel olarak görebilmesi de önemli bir özelliktir. Bunun için farklı uygunluk kriterlerinde üç boyutlu model üzerinde renklendirmeler yapılmış ve farklı çözümler aynı görüş açılarından karşılaştırılmıştır. Her bir uygunluk kriteri için farklı renk seçilmiştir. F02 kriteri için turuncu, F03 kriteri için kırmızı, F04 kriteri için de yeşil renk seçilmiştir. Renkler değerler arttıkça koyulaşmaktadır. Seçilen optimal tasarımların koyu kırmızı olan fazla güneş ışınımı olan bölgeleri azalttığı gözlemlenebilir (**Şekil 13**).



Şekil 13: Orijinal tasarım, 50-16 ve 70-15 fenotiplerinin karşılaştırması (F02 ve F03)
(Comparison of original design, 50-16 and 70-15 phenotypes (F02 and F03)).

Çevredeki seçilen yapıların doğrudan gün ışığı aldığı noktalar artmıştır. Açık turuncu alanlardan bu noktalar saptanabilmektedir. Koyu turuncu, yani az gün ışığı alan noktalar azalmıştır. Gökyüzü görünümü (F04) kriterinde de seçilen çözümler orijinal çözümle görsel olarak karşılaştırıldığında iyileşmeler olduğu gözlemlenebilmektedir. Gökyüzü görünümünün az olduğu koyu yeşil alanlar azalmıştır (Şekil 14).

FORM

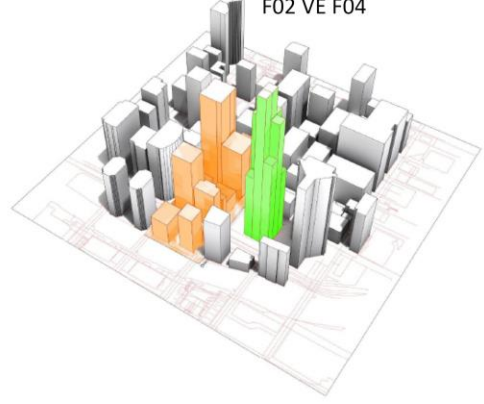


ORIJINAL

GÜNEYDOĞU YÖNÜNDEN
F02 VE F04

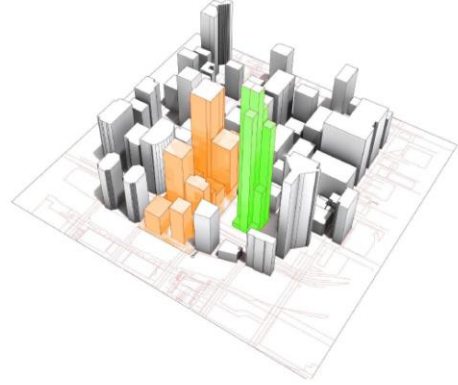


GÜNEYBATI YÖNÜNDEN
F02 VE F04



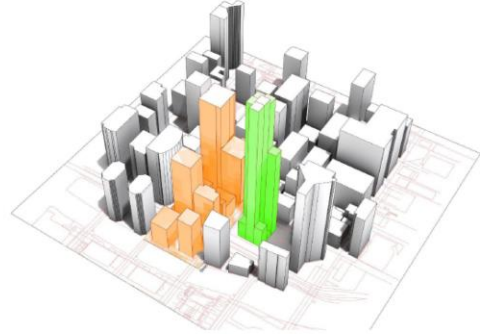
50-16 (OPTİMAL-02)

Alan: 100 / 100
Kare: 2700 / 2000
Fenotip Değeri: 318601 / 199310
Çizim Sun
Kare: 1131 / 2000
Fenotip Değeri: 68118812
Solar radianstion
Kare: 1077 / 2000
Fenotip Değeri: 0.544455
Sky View
Kare: 1020 / 2000
Fenotip Değeri: 70.181878



70-15 (OPTİMAL-01)

Alan: 100 / 100
Kare: 2700 / 2000
Fenotip Değeri: 318601 / 199310
Çizim Sun
Kare: 1020 / 2000
Fenotip Değeri: 68118812
Solar radianstion
Kare: 1020 / 2000
Fenotip Değeri: 0.544455
Sky View
Kare: 1020 / 2000
Fenotip Değeri: 70.181878



Çalışma kapsamında belirlenen hedefler yani uygunluk fonksiyonları incelendiğinde birbirleri ile doğrudan ilişkileri gözlemlenememiştir. F01, yani alan, çok küçük iken doğrudan gün ışığına (F02) pozitif etki etmektedir fakat çalışma kapsamında istenilen boyutlara gelindiğinde alandan çok tüplerin bulunduğu konum ve yükseklikleri etki etmektedir. Güneş ışınımı da (F03) bu değerler ile doğrudan ilişki halinde değildir. Güneş ışınımını güney, doğu ve batı cephelerine gelen doğrudan ışınım ve bu cephelerdeki çevredeki binaların yüksekliği etkilemektedir.

Şekil 14: Orijinal tasarım, 50-16 ve 70-15 fenotiplerinin karşılaştırması (F02 ve F04)
(Comparison of original design, 50-16 and 70-15 phenotypes (F02 and F04)).

Gökyüzü görünümü (F04) ise bu değerlerin hepsinden ve güneşten bağımsız olup tamamen çevredeki yollar ve binalar ile ilişkiden etkilenmektedir. Sonuç öneriler incelendiğinde farklı tasarımlardaki bu uygunluk kriterleri arasında bir korelasyon olmadığı rahatlıkla gözlemlenebilmektedir. Bu durum yöntemin tasarımcının gözden kaçırabileceği veya çözüm olasılıkları arasında düşünmeyeceği çözümleri görebilmek açısından başarılı olduğunu gösterir.

Sayısal değerler incelendiğinde de seçilen optimal çözümlerin birden fazla uygunluk kriterinde orijinal yapıdan daha iyi çözümler geliştirdiği gözlemlenmektedir (**Tablo 2**). 70-15 orijinal tasarımın alanından çok fazla feragat etmeden güneş ışınımında %12, gökyüzü manzarasında da %4 daha iyi sonuçlar elde etmiştir. Doğrudan gün ışığında da orijinal tasarıma yakın bir değere ulaşmıştır. En son seçilen çözüm olan 50-16 ise alandan en az feragat ederek bütün kriterlerde orijinal tasarımdan daha iyi sonuçlar elde etmiştir. Işınımında %5, gökyüzü görünümünde ise %3 iyileşme sağlamıştır. Doğrudan gün ışığında da küçük bir farkla olsa da orijinal tasarımdan daha iyi sonuçlar elde etmiştir. Bu çalışma kapsamında dengeli bir çözüm istendiği için bütün kriterlerde iyi olan 50-16 seçilmiştir, fakat tasarım problemine göre farklı uygunluk kriterlerini öncelik alan seçimler yapılabilir.

Tablo 2: Orijinal tasarım, 50-16 ve 70-15 fenotiplerinin sayısal değerlerinin karşılaştırması (Comparison of original design, 50-16 and 70-15 according to numerical values).

ID	JENERASYON	BİREY	F01 (ALAN)	%	F02 (DOĞRUDAN)	%	F03 (IŞINIM)	%	F04 (GÖKYÜZÜ)	%	
5	50	16	318461	85	68,11	0,01	8,54	5	70,18	3	Pareto
9	70	15	312636	82	68,38	-0,2	7,86	12	69,66	4	Pareto
Orijinal			379822		68,12		8,92		71,84		

Mevcut bir yapı incelendiği için alan kriteri oldukça sınırlayıcı olmuş fakat yeni tasarım yapılan boş bir alanda tasarımcının çözüm uzayında daha fazla serbestliğe sahip olacağı gözlemlenmiştir. Çalışma kapsamında karşılaşılan zorluklar simülasyon süresinin uzun olması, uygunluk kriterleri arasında bir hiyerarşi ve aralık belirlenememesidir. Simülasyonu kısaltmak için popülasyon sınırlı tutulmuş, sadece kütle modeli ile çalışılmış ve güneş analizi için tek bir gün seçilmiştir. Her değişiklikte simülasyon baştan çalıştırılmıştır. Gelecek çalışmalarda daha fazla çözüme ulaşabilmek için popülasyon arttırılabilir. Uygunluk kriterleri arasındaki hiyerarşi ve aralık için eklentiye güncelleme yapılması planlanmaktadır fakat yapılmaz ise de yazılacak bir kod ile bu sorunun üstesinden gelinebilir. Alan aralığını, orijinal alanın yüzde sekseni (%80) ve üstü, tutturmak için minimum kat sayısı arttırılabilir. Kütle modelinin bir ileri aşaması olarak cephe elemanları ile çalışılabilir.

Ayrıca güneş analizi için tek bir gün yerine bir dönemi veya bir yılı kapsayacak aralıklar seçilebilir. Simülasyon en doğru sonuçları yüksek bir popülasyon ve tüm yıla yayılmış bir güneş analizi ile verecektir.

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar ilk başta hedeflenen çıktılar ile paralellik göstermektedir. Önerilen yöntem ile yüksek yapıların erken tasarım aşamasındaki seçimler ile binanın kendisi ile çevresinde enerji tüketimi azaltılabilir ve yaşam konforu artırılabilir. Tasarımcının önüne seçenekler sunulabilmesi ve müdahale imkânı olması önemli bir avantajdır. Genetik algoritmalar ile ilgili çalışmalar mimaride uzun yıllar önce yapılmaya başlanmış fakat genelde alan odaklı plan çözümlerinde yoğunlaşmıştır. Tasarımcıların verileri manuel olarak toplamaları ve algoritmayı çalıştıracak programları da tasarlamak zorunda olmaları süreci uzun ve yorucu bir hale getirmiştir. Bilgisayarların gelişmesi ile hem hesaplama süreleri kısalmış hem de yeni yazılımlar geliştirilmiştir. Tasarımcılar da bu sayede farklı tasarım girdilerini erken tasarım sürecine eklemeye başlamışlardır. Bu çalışma da kentsel ve çevresel verileri tasarım girdilerine ekleyen ve çatışma halinde olan tasarım hedefleri arasında denge noktaları bulmak amacıyla doğadaki evrim sürecinden etkilenen genetik algoritmaları kullanan entegre bir yöntem önermektedir. Sonuçlar hem sayısal biçimde hem de fenotiplerin görselleştirilmesi ile üç boyutlu olarak tasarımcının önüne gelmekte ve orijinal tasarımla karşılaştırma imkânı sunmaktadır. Bu çalışmada yöntemi denemek için örnek bir bina seçilmiştir, yöntem herhangi bir mevcut binanın analizinde veya yeni bir binanın konsept tasarım aşamasında kullanılabilir.

Teşekkür (Acknowledgement)

İstanbul Teknik Üniversitesi Bilişim Bölümü Doktora Programı kapsamında yürütülen MBL 601-Mimari Tasarımda Evrimsel Yaklaşımlar dersinde üretilen bu çalışma için Prof. Dr. Gülen Çağdaş ve Dr. Öğr. Üyesi Ethem Gürer'e yorumlarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Referanslar (References)

Aldwaik, M. and Adeli, H. (2014). Advances in optimization of highrise building structures. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 50(6), 899-919. <https://doi.org/10.1007/s00158-014-1148-1>

- Bäck, T. (1996). *Evolutionary algorithms in theory and practice*. Oxford University Press.
- Bonnaccorso, G. (2017). *Machine learning algorithms*, Packt Publishing.
- Caldas, L. G. And Norford, L. K. (2002). A design optimization tool based on a genetic algorithm. *Automation in Construction*, 11(2), 173–184. [https://doi.org/10.1016/S0926-5805\(00\)00096-0](https://doi.org/10.1016/S0926-5805(00)00096-0)
- Chang, K. H. (2015). Multiobjective optimization and advanced topics. *Design theory and methods using CAD/CAE*, (1st ed., pp. 325-406).
- Choi, J., Nguyen, P. C. T. and Makki, M. (2020). The design of social and cultural orientated urban tissues through evolutionary processes. *International Journal of Architectural Computing* (pp. 1–29), SAGE Publications.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. and Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 182-197. <https://ieeexplore.ieee.org/document/996017/>
- Dirksen, M., Ronda, R. J., Theeuwes, N. E. and Pagani, G. A. (2019). Sky view factor calculations and its application in urban heat island studies. *Urban Climate*, 30 (100498). <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100498>
- Edsall, R. M. (2003). The parallel coordinate plot in action: design and use for geographic visualization, *Computational Statistics and Data Analysis*, 43(4), 605-619. [https://doi.org/10.1016/S0167-9473\(02\)00295-5](https://doi.org/10.1016/S0167-9473(02)00295-5)
- EnergyPlus. (2021). Retrieved September, 15, 2021, from <https://energyplus.net/weather>
- Global Solar Atlas. (2021). Retrieved September, 15, 2021, from <https://globalsolaratlas.info/map?c=41.389173,81.123047,7&s=41.836828,-87.703857&m=site>
- Hartz, D. A., Golden, J. S., Sister, C., Chuang, W. and Brazel A. J. (2012). Climate and heat-related emergencies in Chicago, Illinois (2003–2006). *International Journal of Biometeorology*, 56(1), 71-83. <https://doi.org/10.1007/s00484-010-0398-x>
- Holland, J. H. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. U Michigan Press.
- Ilbeigi, M., Ghomeishi, M. and Dehghanbanadaki, A. (2020). Prediction and optimization of energy consumption in an office building using artificial neural network and a genetic algorithm. *Sustainable Cities and Society*, 61(102325). <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102325>
- Jalali, Z., Noorzai, E. and Heidari, S. (2019). Design and optimization of form and facade of an office building using the genetic algorithm. *Science*

and Technology for the Built Environment, 26(2), 128-140.
<https://doi.org/10.1080/23744731.2019.1624095>

- Jin, J. T. and Jeong, J. W. (2014). Optimization of a free-form building shape to minimize external thermal load using genetic algorithm. *Energy and Buildings*, 85, 473-482.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.080>
- Koenig, R., Yufan, M., Knecht, K., Aichinger, A., & Konieva, K. (2020). Integrating urban analysis, generative design, and evolutionary optimization for solving urban design problems. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 47(6), 997–1013.
<https://doi.org/10.1177/2399808319894986>
- Lim, Y. W., Majid, H.A., Samah, A. A., Ahmad, M. H., Ossen, D. R., Harun, M. F. and Shahsavari, F. (2018). BIM and genetic algorithm optimisation for sustainable building envelope design. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 13(1), 151-159.
<https://doi.org/10.2495/SDP-V13-N1-151-159>
- Lima, I., Scalco, V. and Lamberts R. (2019). Estimating the impact of urban densification on high-rise office building cooling loads in a hot and humid climate. *Energy and Buildings*, 182, 30-44.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.10.019>
- Makki, M. and Showkatbakhsh, M. (2018). *Control of morphological variation through population based fitness criteria* [Paper presentation]. 23rd CAADRIA Conference Learning, Adapting and Prototyping, Beijing, China.
- Makki, M., Showkatbakhsh, M., Tabony, A. and Weinstock, M. (2018). Evolutionary algorithms for generating urban morphology: variations and multiple objectives. *International Journal of Architectural Computing*, 17(1), 5–35.
<https://doi.org/10.1177/1478077118777236>
- Miao, Y., Koenig, R., & Knecht, K. (2020). The development of optimization methods in generative urban design: A review. *SimAUD: Symposium on Simulation for Architecture & Urban Design*, 247–254.
- Miles, J. C., Sisk, G. M. and Moore, C. J. (2001). The conceptual design of commercial buildings using a genetic algorithm. *Computers and Structures*, 79(17), 1583-1592.
[https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(01\)00040-2](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(01)00040-2)
- Mitchell, M. (1998). *An introduction to genetic algorithms*. MIT Press.
- Navarro, D., Makki, M. and Bermejo, A. (2018). Urban-tissue optimization through evolutionary computation. *Mathematics*, 6(10), 1–16.
<https://doi.org/10.3390/math6100189>
- OpenStreetMap. (2021). Retrieved September, 15, 2021, from <https://www.openstreetmap.org/#map=19/41.39688/27.35515>

- Orhan, T. and Taşkın, K. (2021). Automated topology design of high-rise diagrid buildings by genetic algorithm optimization. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 30(9). <https://doi.org/10.1002/tal.1853>
- Ouarghi, R. and Krarti, M. (2006). Building shape optimization using neural network and genetic algorithm approach. *ASHRAE Transactions*, 112(1), 484-491.
- Pasternak, A. and Kwiecinski, K. (2015). High-rise building optimization- A design studio curriculum. *Proceedings of the 33th eCAADe Conference (Vol. 1)*, 305-314. http://papers.cumincad.org/data/works/att/ecaade2015_268.content.pdf
- Petrov, M. and Walker, J. (2020). Optioneering methods for optimization- Methods of exploring primary and secondary performance criteria in urban design. *Proceedings of the 38th eCAADe Conference (Vol. 1)*, 29-36. http://papers.cumincad.org/data/works/att/ecaade2020_243.pdf
- Prieto, A., Knaack, U., Klein, T. and Auer, T. (2017). 25 Years of cooling research in office buildings: review for the integration of cooling strategies into the building façade (1990-2014). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 89-102. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.012>
- Randall, M., Kordrostami, T., Makki, M. (2020). The Taikoo Shing Superblock: Addressing urban stresses through sequential evolutionary simulations. In D. Holzer, W. Nakapan, A. Globa, I. Koh (eds.), *Proceedings of the 25th CAADRIA Conference (Vol.1)*,. 415-424. http://papers.cumincad.org/data/works/att/caadria2020_270.pdf
- Rebuadengo, M. and Reorda, M. S. (1996). GALLO: A genetic algorithm for floorplan area optimization. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 15(8), 943-951. <https://doi.org/10.1109/43.511573>
- Showkatbakhsh, M., Kaviani, S. and Weinstock, M. (2021). Evolutionary design processes with embedded homeostatic principles-Adaptation of architectural form and skin to excessive solar radiation. *Computer Aided Design and Applications*, 18(5), 914-953. <https://doi.org/10.14733/cadaps.2021.914-953>
- Tuhus-Dubrow, D. And Krarti, M. (2010). Genetic algorithm based approach to optimize building envelope design for residential buildings. *Building and Environment*, 45(7), 1574-1581. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.01.005>
- Wright, J. A., Loosemore, H. A. and Farmani, R. (2002). Optimization of building thermal design and control by multi-criterion genetic algorithm. *Energy and Buildings*, 34(9), 959-972. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00071-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00071-3)

