



## Binalarda Güneş Kontrol Yöntemlerinin Optimizasyon Temelli Performans Değerlendirilmesi

İpek GÜRSEL DİNO<sup>1,\*</sup><sup>1</sup>Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Mimarlık Bölümü, Üniversiteler Mahallesi, 06800 Çankaya/Ankara

### Öz

Bu çalışmada, binalarda farklı güneş kontrol yöntemlerinin karşılaştırmalı analizini, bir genetik optimizasyon algoritması ile destekleyen bir tasarım aracı ve yöntem, önerilmektedir. Çalışmada ilk olarak farklı cam alternatifleri ve sıklıkla kullanılan bazı standart gölgeleme yöntemlerinin oluşturduğu sekiz senaryo geliştirilmiştir. Ardından bu senaryolar, örnek bir bina tasarımı üstünde uygulanarak genetik optimizasyon algoritması uygulanmıştır. Algoritma, pencere büyüklüklerini ve gölgelik boyut parametrelerini değişken olarak alarak, enerji tüketimini ve günışığı aydınlatmasını optimize etmektedir. Bu algoritma kullanılarak, her senaryo için binanın Pareto çözümleri hesaplanmıştır. Bu Pareto çözümleri kullanılarak, farklı güneş kontrol senaryolarının birbirleriyle olan karşılaştırmalı analizi yapılmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlara göre optimal güneş kontrol yöntemleri ile, bir binanın günışığı aydınlatma performansını azaltmadan %25'e kadar enerji tasarrufu sağlanabilmekte, pencere büyüklükleri ise 123% oranında artırılabilir. Daha genel bir açıdan bakıldığında ise, önerilen optimizasyon temelli analiz yöntemi, tasarım süreçlerinde farklı güneş kontrol alternatiflerinin sayısal karşılaştırmalı değerlendirilmesini destekleyebilmektedir.

### Makale Bilgisi

Başvuru: 14/11/2016

Düzeltilme: 15/02/2017

Kabul: 15/02/2017

### Anahtar Kelimeler

Bina güneş kontrolü  
Bina enerji tüketimi,  
Bina günışığı aydınlatması  
Çok-objektifli genetik optimizasyon  
Pareto-temelli tasarım analizi

### Keywords

Building solar control  
Building energy use  
Building daylighting,  
Multi-objective genetic optimization  
Pareto-based design analysis

### The Performance Evaluation of Solar Control Methods in Buildings: A Multi-Objective Approach

### Abstract

In this study, a tool and method that support the analysis of different solar control methods in buildings through a genetic optimization algorithm are proposed. First, eight scenarios of different glazing alternatives and standard shading methods were developed. These scenarios were implemented on a sample building design and the genetic optimization algorithm was run. The algorithm optimizes energy consumption and daylight illumination using an existing energy simulation tool, taking window sizes and shading parameters as variables. Using this algorithm, the building's Pareto solutions are calculated for each scenario. Using these Pareto solutions, a comparative analysis of the different solar control scenarios was made. According to the results obtained in the study, it is possible to achieve energy savings up to 25% and to increase the window size by 123% with optimal solar control methods, without decreasing the daylighting performance of a building. The proposed optimization-based analysis method can support numerical comparative evaluation of different solar control alternatives in the design process.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Bina kabuğu, bina performansını etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Yüksek performanslı bir kabuk sisteminden, güneş enerjisi kazanımı, hava sızıntısı, nem, ısı iletimi gibi olayları kontrol etmesi beklenir. Bunu yaparken de tasarımı etkileyen bazı değişkenler (bina biçimi, kabuk malzemeleri, duvar-pencere oranı, cam teknik özellikleri, gölgeleme yöntemleri vb.) vasıtası ile bir takım performans objektiflerinin karşılanması gereklidir. Bu objektiflerin en önemlilerinden biri, kabuğun ısıtma / soğutma / aydınlatma yükü ve buna bağlı enerji tüketimini azaltmasıdır. Bina pencerelerinin boyutları ve teknik özellikleri, ayrıca iç ortam kalitesi, doğal aydınlatma, görsel açıklık ve iç mekân kalitesi gibi faktörleri de etkiler. Bunun

\*İletişim yazarı, e-mail: [ipek@metu.edu.tr](mailto:ipek@metu.edu.tr)

yanında, gün ışığını kontrol etmek için gölgeleme elemanları ile önlem alınması gereklidir. Gölgeleme elemanları, özellikle bina soğutma sistemleri aktifken, aşırı güneş ışınımını önlemede etkilidir. İç mekân kalitesinin ve kullanıcıların konforunun sağlanması, gölgeleme elemanlarının diğer bir amacıdır. Birincil aydınlatma kaynağı olarak günışığı, enerji kullanımının azaltılması, kullanıcının sağlık ve üretkenliğinin sağlanması ve iç mekân kalitesinin iyileştirilmesine katkıda bulunur. Ayrıca pencere ve gölgeleme elemanlarının, kamaşmanın azaltılması ve görsel konfor ölçütlerinin sağlanmasında önemlidir.

Isıl performans ve aydınlatma performansının sağlanması için, bu ölçütlerin sayısallaştırılarak aynı anda optimize edildiği bütüncül tasarım yaklaşımlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Çok-objektifli genetik optimizasyon algoritmaları (ÇGOA), birden fazla tasarım objektifinin optimize edilmesinin gerektiği tasarım probleminde kullanılan üst-sezgisel arama yöntemlerinin bütününe verilen isimdir. Genel olarak genetik algoritmaların (GA) temel prensibi, tasarım alternatiflerinin oluşturduğu bir neslin (population) uygunluk değerlerinin (fitness) gittikçe iyileştirilerek optimal sonuçlara ulaşılmasıdır. GA, yeni alternatiflerin üretilmesi için seçim, çaprazlama ve mutasyon gibi bazı genetik operasyonlar kullanılarak çözüm uzayını sadece kısmen tarayarak optimal sonuçlara daha kısa sürede ulaşabilirler. ÇGOA uygulamalarında, genetik algoritmalar tek bir alternatif değil, birbirlerini domine etmeyen birden çok alternatifi bulmaya odaklanırlar. Bu alternatifler, verilen objektiflerin minimize ya da maksimize edildiği bir Pareto-önün sınırlarını oluşturur, ve kullanıcıların bu optimal set içinden seçim yapmasına izin verir.

ÇGOA yaklaşımları, bina kabuk tasarımını desteklemek için sıklıkla kullanılmaktadır. Bunlara örnek olarak, Tuhus-Dubrow ve Krarti, yeşil binaların biçimi, kabuk konstrüksiyonu, pencere tip ve büyüklük kararlarını vermeye yardımcı bir model geliştirmişlerdir [1]. Granadeiro vd. biçim gramerlerini enerji performans değerlendirmesine entegre eden bir mimari tasarım sistemi geliştirmiştir [2]. Lin ve Gerber, çok-amaçlı genetik algoritmalar ve tasarım parametrizasyonu yöntemlerini birleştiren bir karar-destek aracı önermiştir [3]. Caldas, tek ve çok-objektifli optimizasyon algoritmalarını birlikte kullanarak enerji tüketimi, maliyet ve aydınlatma davranışlarını optimize etmiştir [4]. Kämpf ve Robinson, bina ve kentsel biçimleri, güneş ışınımını optimize edecek şekilde tasarlamaya yarayan çok-objektifli bir tasarım aracı önermiştir [5]. Echenagucia vd. bina pencere özellikleri ve duvar kalınlığını değişken olarak alan bir genetik algoritma geliştirerek farklı iklim bölgeleri için deneysel çalışmalar yapmışlardır [6]. Lin vd. tabu arama algoritmasını kullanarak farklı kabuk konfigürasyonlarını optimize etmiş ve maliyeti 41% oranında düşürebilmiştir [7]. Gölgeleme elemanlarının bina performansına etkisi konusunda da çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Huang v.d., soğutma enerjisi yoğun olan binalarda cam özellikleri ve gölgeleme tiplerinin performansı araştırılmış, ama optimal alternatiflerin bulunması ile çalışma yapılmamıştır [8]. Manzan, tek ısıl bölge bir binanın güney cephesindeki tente gölgeleme parametrelerini değişken alan bir genetik algoritma ile enerji tüketimini optimize etmiştir [9]. Khoroshiltseva v.d., ısıl ve günışığı performansını maksimize etmek için güney ve batı gölgeleme elemanlarının optimal parametrelerini araştırmış, ama farklı ısıl bölgeleri ve gerektirdikleri pencere boyutlarını dikkate almamıştır [10]. Lau v.d., sıcak ve nemli iklimlerde dikey, yatay ve grid şeklindeki gölgeleme elemanlarının bina performansına etkisini karşılaştırmalı olarak araştırmış, ama sayısal optimizasyon algoritmaları kullanmamıştır [11].

Bina kabuk tasarım desteği sağlamayı amaçlayan çok sayıda araştırma olmasına rağmen, pencere açıklığı ve güneş kontrol stratejilerinin çok-objektifli algoritmalarla bir arada optimize edilmesi konusunda bir boşluk olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmada, çok-amaçlı bir genetik optimizasyon algoritması kullanılarak, bina kabuğunda pencere büyüklükleri ve farklı gölgeleme araçlarının aynı anda optimizasyonunu sağlayan evrimsel bir yöntem sunulmaktadır. Optimizasyon sırasında oluşturulan bina alternatiflerinin enerji kullanımı en aza indirilirken ve günışığı ile aydınlatmadan en fazla faydalanılması amaçlanmıştır. Bu iki objektif değer, EnergyPlus enerji simülasyon aracı ile gerçek-zamanlı olarak hesaplanmıştır. Önceden kararlaştırılmış bazı gölgeleme elemanları kullanılarak farklı Pareto-önleri hesaplanmış ve karşılaştırmalı analizleri yapılmıştır.

## 2. MEVCUT YÖNTEMLER (EXISTING METHODS)

### 2.1. Çok-objektifli Tasarım Problemleri ve Genetik Optimizasyon (Multi-Objective Design Problems and Genetic Optimization)

Belli bir karmaşıklık derecesindeki çoğu tasarım ve mühendislik problemi, doğaları gereği çok-amaçlı karar mekanizmalarına ihtiyaç duyar. Çok-amaçlı tasarım problemleri, birbirlerini bastırmayan (domine etmeyen) birden fazla tasarım alternatifinin aynı anda değerlendirildiği problem çözümlerini gerektirir. Bu çözüm kümesi, her biri tasarım objektiflerini farklı derecede sağlayan bir Pareto-ön üzerinden formüle edilir. Bir çok-amaçlı genetik optimizasyon algoritması, n-boyutlu bir değişken vektörü  $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ , K sayıda objektif fonksiyonu ( $f_1(x), \dots, f_n(x)$ ), ve bu objektifleri kabul edilebilir oranda karşılayan bir sonuç kümesi X ile temsil edilir. Tüm fonksiyonların minimize edildiği bir durumda, olası bir çözüm  $x$ 'in, diğer bir  $y$  çözümünü aşağıdaki şartlarda bastırması ( $x > y$ ) gerekir.

$$\begin{aligned} f_m(x) &\leq f_m(y) & m = 1, \dots, K \text{ için} \\ f_k(x) &\leq f_k(y) & \text{en az bir objektif fonksiyonu için} \end{aligned} \quad (1)$$

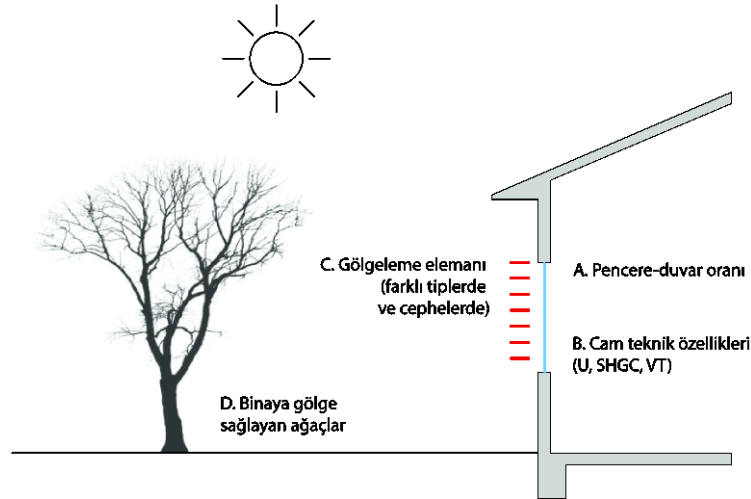
Bir çözüm kümesi X içindeki bastırılmayan çözümler *Pareto-optimal set* olarak, bir *Pareto-optimal set* içinde objektif fonksiyonlarının değerlerinin oluşturduğu küme ise *Pareto-ön* (Pareto-front) olarak adlandırılır. Çözüm kümesinin büyüklüğü sebebi ile tüm alternatif çözümleri üretmek ve objektif değerini hesaplamak, mantıklı süreler içinde mümkün olmayabilir. Bu durumda, çözüm kümesinde hızlı ve etkili arama yapabilecek algoritmalara ihtiyaç duyulur. Genetik algoritmalar (GA), doğal evrim süreçlerini taklit eden bazı operasyonlar ile kısa zamanda optimal çözümlere ulaşmayı hedefler. Bir GA'da her çözüm (ya da birey), onu tanımlayan değişkenleri içeren bir kromozom ile temsil edilir. Çok sayıda kromozomların içerildiği kümeye bir nesil denir; GA bir nesli genetik operasyonlar ile zamanla gittikçe iyileştirerek Pareto-öne ulaşmaya çalışır. Bu operasyonlar, çaprazlama (crossover) ve mutasyon yöntemleri ile kromozom değerlerini değiştirerek yeni bireyler üretir. Bir bireyin bir sonraki nesle genlerini aktarabilmesi için, seçim (selection) yöntemi kullanılır. Objektif değeri diğerlerinden daha iyi olan bireyler, genetik operasyonlar için seçilir ve bir sonraki nesilde genlerini temsil etmeye hak kazanır. Böylelikle gittikçe objektif değeri iyileşen çok sayıda ardışık nesil, Pareto-önü oluşturur. Bu süreçte, bireylerin genetik varyasyonunu ve bireylerin iyiliğini aynı anda sağlamak, GA'nın en temel amacıdır.

Çok objektifli genetik optimizasyon, Vector Evaluated Genetic Algorithm (VEGA) [12], ed Pareto Genetic Algorithm (NPGA) [13], Pareto Envelope-Based selection Algorithm (PESA) [14], Nondominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA) [15], Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA) [16], Strength Pareto Evolutionary Algorithm II (SPEA-II) [17] ve Nondominated Sorting Genetic Algorithm-II (NSGA-II) [18] gibi algoritmalar ile gerçekleştirilmiştir. Bunlardan NSGA-II (Bastırılmamış Sıralamalı Genetik Algoritma-II), Pareto-önünde geniş ve homojen bir dağılım göstermesi ve kısa hesaplama süresi açısından tercih edilmektedir. NSGA-II'de bir nesil, bireylerin bastırılmamışlık (non-domination) derecesine ve kalabalık uzaklığı (crowding distance) değerine göre sıralanır ve her bireye bir seçilme olasılık oranı atanır. Seçilen bireylere çaprazlama ve mutasyon operasyonları uygulanarak yeni bir nesil elde edilir ve bir önceki nesil ile birleştirilerek sıralanır. Böylelikle NSGA-II, tüm bastırılmamış bireyleri sonraki nesle geçirerek seçkinci (elitist) bir yaklaşım da izler. Bu süreç, önceden belirlenmiş bir nesil sayısı tamamlanıncaya kadar devam eder. Son elde edilen neslin bastırılmamış bireyleri, Pareto-önü oluşturur ve tasarımcı bu bireylerden birini seçer. NSGA-II algoritması, neslin objektif değerini kademeli olarak iyileştirmesi ve genetik çeşitliliği sağlaması açısından tasarım problemlerinde yaygınlıkla kullanılmaktadır.

### 2.2. Bina Cephesi ve Bina Performansına Etki Eden Parametreler (Building Envelope and Parameters Influencing Building Performance)

Binalarda güneş kontrolünün, binanın ısı ve aydınlatma performansına büyük etkisi vardır. Bu çalışma, binalarda güneş kontrolünü farklı açılardan inceler (Şekil 1).

**A. Pencere açıklık boyutları:** Bina pencere açıklıklarının boyutları, bina performansını etkileyen parametrelerin başında gelir. Binanın ısıtma, soğutma ve aydınlatma yükünün yanında günışığı, doğal havalandırma ve görsel açıklık açısından önemlidir. Açıklık boyutu, bina cephesinin toplam açıklık alanının toplam duvar alanına bölümü ile sayısallaştırılır ve buna pencere-duvar-orantısı (*pdo*) denir. Yüksek *pdo*'nun suni aydınlatma ihtiyacını azaltıp dış ortamla görsel ilişkiyi arttırmak gibi olumlu etkilerine rağmen, aynı zamanda kamaşma veya soğutma / ısıtma enerji kullanımını artırma gibi dezavantajları da vardır. Örneğin güneş kontrolü zor olduğu için doğu ve batı açıklıklarının en aza indirilmesi kuralı, dış ortam ile görsel ilişkiyi koparmak çoğu zaman mümkün olmadığı için gerçekleştirilmesi mümkün olamamaktadır. Bu sebeple *pdo*'ya, enerji ve aydınlatma performansı aynı anda gözetilerek karar verilmelidir.



**Şekil 1.** Binalarda farklı güneş kontrol yöntemleri (Solar control methods in buildings)

**B. Cam teknik özellikleri:** *pdo* ile birlikte bina performansını etkileyen diğer bir faktör de seçilen camın teknik özellikleridir. Genel olarak bakıldığında camların ısı geçirgenliği (U-değeri), güneş ısı kazancı katsayısı (solar heat gain coefficient veya SHGC) ve görünür ışık geçirgenliği (visible transmittance veya VT), performansa etki eden özelliklerdir.

**U-değeri,** ısının cam katmanları boyunca ne kadar iyi iletildiğinin göstergesidir. Son yıllarda çok katmanlı camların ısı değerleri yalıtılmamış tuğla duvarinkine yaklaşmıştır. Özellikle soğuk iklimlerde düşük U-değerli cam kullanımı, her yöndeki camlar için önem kazanmaktadır. Bununla birlikte, ılıman iklimlerdeki ve iç ısı kazanımının (kullanıcılar, aydınlatma ve elektrikli aletler vb. vasıtası ile) yüksek olduğu binalarda, düşük U değerli camlar ısının içeride hapsolmesine, soğutma yükünün artmasına ve performans düşüşüne de sebep olabilir. Bu sebeple U değeri kararı, binanın içinde bulunduğu iklim ve bina ısı dengesi gözetilerek verilmelidir.

**SHGC,** güneşin ısı enerjisinin camdan geçiş miktarının ölçüsü olarak kullanılır. SHGC değeri 0 ve 1 değerleri arasında değişmektedir ve düşük SHGC değeri daha fazla güneş kontrolü sağlamaktadır. SHGC seçimi, binaya giren güneş ısısını kışın maksimize etmek, yazın ise minimize etmek amaçlı olmalıdır. Yüksek SHGC değerli cam, kışın güneşten ısı kazancını artırır; düşük SHGC değerli cam ise yazın güneş ışınlarının içeri girmesini engelleyerek soğutma yükünü azaltır. Ayrıca Kuzey yarımkürede düşük SHGC değerli cam güney, doğu ve batı cephelerinde tercih edilirken, kuzey cephesinde neredeyse hiç güneş ışığı düşmemesi sebebi ile gerek duyulmamaktadır.

**VT,** görünür spektrumdaki günışığının (380 – 720 nm) camdan geçen miktarını belirtir. SHGC ısıtma ve soğutma yükünü etkilerken VT, binanın aydınlatma ile ilgili performansında rol oynar. Çalışma mekânları gibi yüksek aydınlatma seviyelerinin gerektiği durumlarda yüksek VT değeri kullanılabilmesine rağmen, bu şekilde içeri alınan günışığının kamaşma gibi sorunlar yaratması da mümkündür.

**C. Gölgeleme elemanları:** Bina cephesinde iç veya dış yüzeylerde kullanılan ve ısıtma/soğutma, aydınlatma, görsellik ve estetik açılarından kontrolünü sağlayan mimari elemanlardır. Gölgelekler, bina

açıklıklarından geçen güneş ışığı miktarını belirlemek için üstte belirtilen tasarım stratejilerini tamamlarlar. Temel prensip olarak kuzey yarımkürede güney, batı ve doğu cepheler gölgeliklere ihtiyaç duyarlar. Güneşin hareket rotası göz önünde bulundurulduğunda, güney cephesinde daha çok yere dik açığa yakın düşen güneş ışığı, açıklıkların üstünde yatay gölgelikler gerektirir. Doğu ve batı cephelerinde ise açıklığa dik ışın beklendiği için, açıklığa dik veya açılı yerleşen düşey gölgelikler tercih edilmelidir.

**D. Ağaçlar:** Bina etrafına dikilecek ağaçlar, bina üzerine gölge düşürerek, özellikle doğu ve batı cephelerinde gölgeleme elemanlarına benzer bir etkiyi yaratabilirler. Özellikle mevsimsel olarak yaprak döken ağaçlar, ışık geçirgenlikleri kışın arttığı, yazın azaldığı için, güneş ışınlarını ihtiyaç duyulduğu zaman içeri alıp ihtiyaç duyulmadığı zaman engellerler. Böylelikle efektif gölgeleme yaparak bina performansına pozitif etki ederler. Aynı zamanda ağaçların pozitif çevresel ve görsel etkisi de göz önünde bulundurulduğunda ağaçlandırma, alternatif bir güneş kontrol yöntemi olarak belirmektedir.

### 3. ÖNERİLEN YÖNTEM VE ALGORİTMA (THE PROPOSED METHOD AND ALGORITHM)

Geliştirilen çok-objektifli optimizasyon algoritması, farklı ısı bölgelere (thermal zone) sahip bir binanın pencere açıklıklarının ve gölgeleme elemanlarının optimal parametrelerinin bulunması görevini destekler. Algoritmanın göz önünde bulundurduğu objektifler binanın enerji tüketimi (ET) ve güneş ışığı aydınlatma (GIO) miktarıdır. Geliştirilen algoritma, bu objektif değerlerini hesaplamak için EnergyPlus enerji simülasyon programı ve OpenStudio SDK ile entegre çalışır. OpenStudio SDK, enerji modeli nesnelere erişimi sağlayarak üçüncü-parti yazılım geliştirilmesini destekleyen açık-kaynak bir kütüphanedir [19].

#### 3.1. Bina enerji modellemesi (Building Energy Modeling)

Binanın enerji modelinin oluşturulması için binaya dair bilgilerin (bina formu, kabuk malzemeleri, ısı bölgeleri ve ısı yükleri, açma-kapama programları, termostat ayarları vb.) ve simülasyonun gerektirdiği bilgilerin (simülasyon süresi, iklim verileri vb.) tanımlanması gereklidir. Bu bilgilerin detay seviyesi, kullanıcının tercihinine göre belirlenir. Diğer taraftan, deneyleri yapılacak farklı cephe tasarım konfigürasyonları, bu bina modellerinin bir parçası olmalıdır. Önceki bölümde belirtildiği gibi, bina enerji ve güneş ışığı performansına etki eden faktörler pencere boyutları (*pdo*), cam teknik özellikleri ve gölgeleme elemanlarıdır. Bunlardan *pdo* ve gölgeleme elemanlarının boyutları, algoritmada tasarım değişkeni olarak kullanılmaktadır ve genetik operatörler ile değişkenlikleri sağlanmaktadır (Bölüm 3.4).

#### 3.2. Güneş Kontrol Stratejileri (Solar Control Strategies)

Çalışmada ilk olarak üç cam tipi ve dört gölgeleme yöntemi belirlenmiştir. Belirlenen bu yöntemler kullanılarak, sonraki aşamalarda (Bölüm 4.2) güneş kontrol senaryoları oluşturulmuş, ve önerilen algoritma ile optimizasyon sonuçları değerlendirilmiştir.

Cam alternatifleri olarak, 16 mm hava boşluklu çift camdan oluşan, U değeri 3,0 W/m<sup>2</sup>K olan üç farklı cam tipi (M1, M2 ve M3) kullanılmıştır (Tablo 1). Bu tiplerden M1, SHGC ve VT açısından düşük performanslı, M2 ise yüksek performanslıdır. M3 cam tipi, M2'ye elektrokromik özellik eklenerek oluşturulmuştur. Elektrokromik cam, yüzey opaklığını voltaj ile değiştirerek ışığın geçiş miktarını kontrol eder; böylelikle güneşe bağlı ışık ve ısı kontrolü sağlar. Ayrıca elektrokromik camlar en opak durumunda bile dış ortamla görsel ilişkiyi kesmediği için tercih edilirler. Bu çalışmadaki elektrokromik camlar, iç ortam aydınlık derecesi hedeflenen değerin üstüne çıktığı zaman ( $EM_z > ET_z$ ) aktive olmaktadır. Aktive olmuş bir elektrokromik camın SHGC ve VT değerleri de dinamik olarak düşecektir.

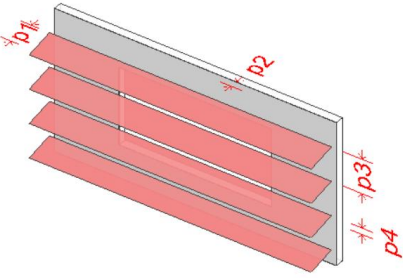

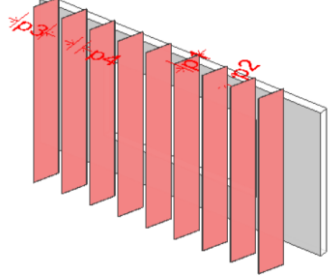
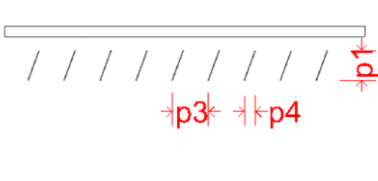
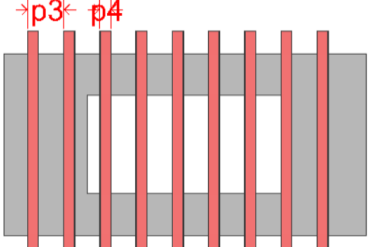
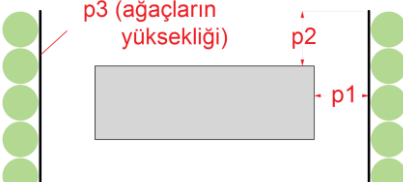
**Tablo 1.** Senaryolarda kullanılan cam tipleri (The glazing types to be used in the scenarios)

Cam tipi	Teknik özellikler	Açıklama	SHGC	VT	U (W/m <sup>2</sup> K)
M1	Çift cam, e = 0.20, 16 mm hava boşluğu	Düşük SHGC ve VT performanslı cam	0.86	0.90	3.0
M2	Çift cam, e = 0.20, 16 mm hava boşluğu	Yüksek SHGC ve VT performanslı cam	0.35	0.45	3.0
M3	Çift cam, e = 0.20, 16 mm hava boşluğu, elektrokromik özellikli	Elektrokromik cam ile ışık ve ısı kontrolü sağlanır	0.35	0.45	3.0

Binada kullanılacak gölgeleme yöntemleri (Tablo 2), binaya bitişik gölgeleme elemanları (G1, G2 ve G3) ve ağaçlardır (G4). Tabloda belirtilen  $p1$ ,  $p2$ ,  $p3$  ve  $p4$  parametreleri, gölgelik elemanlarının boyutlarını belirler, ve geliştirilmiş GA tarafından değişken olarak alınır. Gölgeleme elemanlarının seçiminde, Bellia vd.'nin sınıflandırılması kullanılmıştır ve sadece dış ortamda ve sabit gölgelik elemanları seçilmiştir [20]. Güney cephede güneş ışığı daha çok yere dikey açılarda beklediği için pencere üstü tente (G1) ve yatay şerit gölgelik (jaluzi) (G2) olmak üzere iki farklı alternatif oluşturulmuştur. Doğu ve batı cephelerde ise güneş ışığı açısı pencere yüzeyine dik olacağı için dikey şerit gölgelik (G3) elemanları oluşturulmuştur. Enerji modelinde gölgeleme elemanları %100 opak malzeme ile modellenmiştir ve ısı ve yansıtıcı özellikleri göz önünde bulundurulmamıştır. G4'te ise, yapraklarını döken ağaçlar binanın dışında gölgelik olarak ele alınmıştır. Düşey bir yüzey gibi gölgeleme yaptıkları için ağaçlar, sadece doğu ve batı cephelerinde kullanılmıştır. Ağaçlar, binaya uzaklık, yükseklik ve genişlik değerleri değişken yüzeyler olarak modellenmiştir. Yıl boyunca değişen yaprak yoğunlukları, ağaçların oluşturduğu yüzeyin geçirgenlik katsayısını mevsimlik olarak değiştirerek ( $\tau_{kış} = 0.64$  ve  $\tau_{yaz} = 0.23$ ) modele yansıtılmıştır (geçirgenlik değerlerinin kaynağı için [21]). Ayrıca ağaçların yansıtıcı özelliği olmadığı varsayılmıştır.

**Tablo 2.** Senaryolarda kullanılan gölgeleme elemanları (kırmızı ile gösterilmiştir) (The shading devices to be used, shown in red)

	Perspektif	Plan ve görünüş
<b>G1 - Tente gölgelik</b>		 Plan
<p>Gölgeliğin eni (<math>p1</math>)</p> <p>Gölgeliğin binaya uzaklığı (<math>p2</math>)</p> <p>Gölgeliğin yerden yüksekliği (<math>p3</math>)</p> <p>Gölgeliğin aşağı eğimi (<math>p4</math>)</p>		 Görünüş
<b>G2 - Yatay şerit gölgelik</b>		 Plan

<p>Gölgeliğin binaya uzaklığı (<b>p2</b>)</p> <p>Gölgelik elemanlarının sıklığı (<b>p3</b>)</p> <p>Gölgeliğin aşağı eğimi (<b>p4</b>)</p>		 <p>Görünüş</p>
<p><b>G3 –Dikey şerit gölgelik</b></p> <p>Gölgeliğin eni (<b>p1</b>)</p> <p>Gölgeliğin binaya uzaklığı (<b>p2</b>)</p> <p>Gölgelik elemanlarının sıklığı (<b>p3</b>)</p> <p>Gölgeliğin güneşe eğimi (<b>p4</b>)</p>		 <p>Plan</p>  <p>Görünüş</p>
<p><b>G4 – Ağaç</b></p> <p>Ağaçların binaya uzaklığı (<b>p1</b>)</p> <p>Ağaçların bina hizasından taşma miktarı (<b>p2</b>)</p> <p>Ağaçların yüksekliği (<b>p3</b>)</p>		 <p>Plan</p>

### 3.3. Uygunluk hesaplanması (Fitness Calculation)

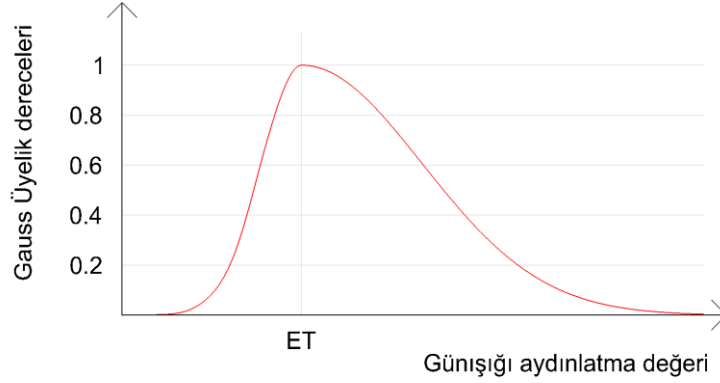
Algoritmanın ET ile ilgili objektif değeri, binanın toplam ısıtma, soğutma ve aydınlatma tüketimini göz önünde bulundurur (Eşitlik 2). Günışığı aydınlatma performansı, binanın her ısıl bölgesi  $Z$ 'nin günışığı otonomisini (GIO veya daylight autonomy), yani simülasyon süresince aydınlatma yükünün ne kadarının sadece güneş ışığından karşılandığını hesaplar (Eşitlik 3). Bunun için bir bulanık Gauss üyelik fonksiyonu kullanılır (Bulanık üyelik fonksiyonları, bir objektifin ne kadar kabul edilebilir olduğunun göstergesi olarak ona 0 ve 1 aralığında (kötüden iyiye doğru) bir değer atar). Fonksiyon,  $Z$ 'nin verilen saatte aldığı günışığı değerinin ( $EM_z$ ) hedeflenen değere ( $ET_z$ ) ne kadar yaklaştığını hesaplar (Eşitlik 4, Şekil 2).

$$\text{Minimize } ET = Q_{ısıtma} + Q_{soğutma} + Q_{aydınlatma} \quad (2)$$

$$\text{maksimize } GIA = \sum_{z=1}^t \sum_{h=0}^k GO_z^h a_z \quad (3)$$

$$GO_z = e^{\frac{-(EM_z - ET_z)^2}{2\sigma^2}}$$

$$\sigma = \begin{cases} a, & EM_z < ET_z \\ b, & EM_z \geq ET_z \end{cases} \quad (4)$$



**Şekil 2.** Asimetrik Gauss üyelik fonksiyonu ( $a = 30$ ,  $b = 120$ ) (The Asymmetrical Gaussian membership function)

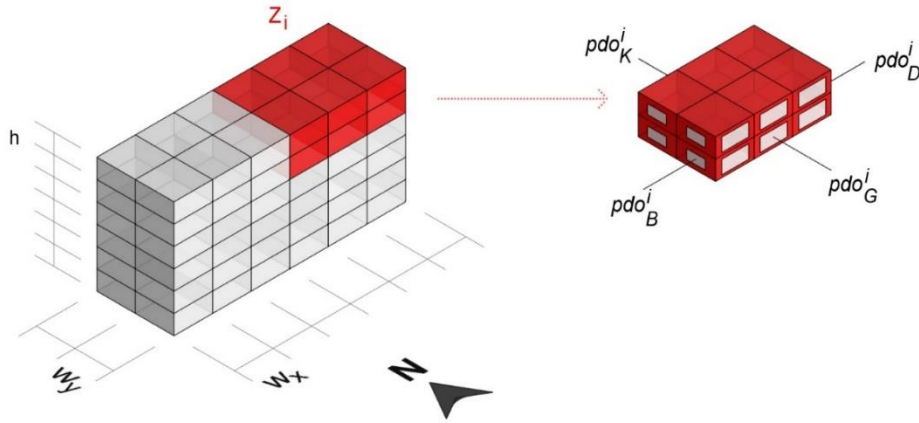
Eşitlik 4'teki  $\sigma$  değişkeni, fonksiyonun sapma derecesini belirlemektedir.  $\sigma$ ,  $ET_z$ 'nin pozitif ve negatif yönünde farklı değer alabildiği için eşitliğin asimetrik olarak iki yönde farklı dağılım göstermesini sağlayabilir (Şekil 2'de örneklendirildiği gibi). Örneğin  $ET_z$  değerinin altındayken üyelik değeri çok daha hızlı azalırken  $ET_z$  değerinin pozitif doğrultusunda üyelik değeri çok daha yavaş azalabilir.

### 3.4. Kromozom yapısı (Chromosome Representation)

Geliştirilen GA'nın kromozomlarında, pencere açıklık miktarı ( $pdo$ ) ve gölgelik değişkenleri saklanır. Her ısıl bölge farklı sıcaklık ve aydınlatma gereksinimine sahip olduğu için algoritma, bu ısıl bölgelerin dört farklı cephesinde farklı  $pdo$  değeri gözetir. Örneğin düşük aydınlatma ihtiyacı olan bir mekânın  $pdo$  değeri de düşük tutularak gereksiz ısı kaybı/kazancı ve dolayısıyla enerji tüketimi azaltılabilir. Algoritmada bireylere ait kromozomlar, bu sistematığe uygun bir şekilde, binanın tüm ısıl bölgelerine ait dört  $pdo$  değerini saklar. Bunun için ilk olarak, pencerelerin cephede yerleşeceği noktanın belirlenmesi için aşağıdaki adımlar izlenir (Şekil 3):

1. Binayı  $x$  ve  $y$  doğrultusunda eşit uzunlukta parçalara ( $w_x$  ve  $w_y$ ) bölecek akslar oluşturulur. Binanın termal bölgelerinin bu aksların içine tam oturması gereklidir.
2. Bu akslar ve  $h$  ile tanımlanan kat yüksekliğinin bina cephesinde tanımladığı grid, bina pencerelerinin yerleşeceği altyapı olarak çalışır. Gridin her hücresinin merkezine yerleşecek pencerelerin büyüklüğü, ( $pdo : pdo \in \mathbb{R}, 0 < pdo < 1$ ) ile tanımlanır.
3. Her ısıl bölgeye ( $Z_i$ ) ait pencerelerin  $pdo$  değerleri, birbirlerinden bağımsız değişkenlerdir; ancak  $Z_i$ 'nin aynı cephedeki kuzey, güney, doğu ve batı  $pdo$  değerleri ( $pdo_K^i, pdo_G^i, pdo_D^i, pdo_B^i$ ) aynı olmak zorundadır.





**Şekil 3.** Bina ısı bölgelerinin pdo değerleri için kurallar (The rules regarding the pdo values of zones)

GA'nın kromozomları, ayrıca Tablo 2'de belirlenmiş stratejilerde kullanılan gölgeleme elemanlarının değişkenlerini ( $p1$ ,  $p2$ ,  $p3$  ve  $p4$ ) saklar. Bu değişkenler, kromozomda pdo değerlerinin sonuna eklenir. Birden fazla stratejinin kullanıldığı senaryolarda, gölgelik parametreleri de kromozomda art arda dizilerek kromozom yapısı genişletilir. Bu sebeple değişken uzunluklu bir kromozom yapısı kullanılır. Sonuçta kromozomlar, [ $pdo_{kuzey}^{z_i}$ ,  $pdo_{güney}^{z_i}$ ,  $pdo_{doğu}^{z_i}$ ,  $pdo_{batı}^{z_i}$ ,  $pdo_{kuzey}^{z_j}$ ,  $pdo_{güney}^{z_j}$ , ...,  $p1, p2, p3, p4, \dots$ ] şeklinde temsil edilir.

### 3.4. Genetik seçim (Genetic Selection)

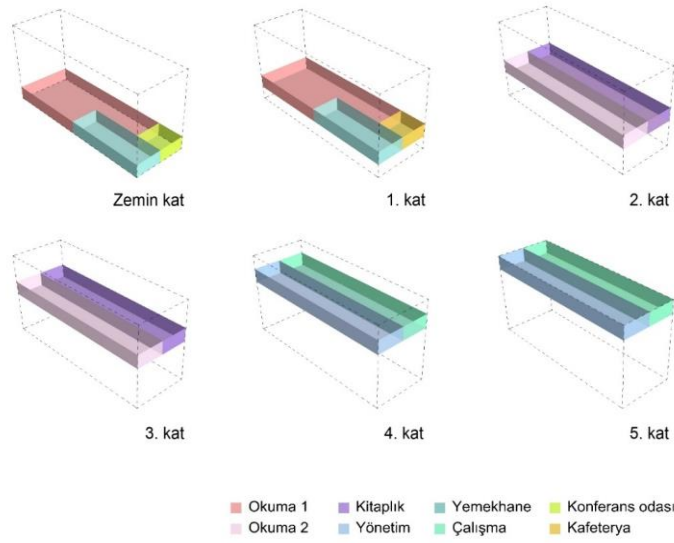
Geliştirilen optimizasyon algoritması, yukarıda açıklaması yapılmış olan NSGA-II'yi kullanır. İlk jenerasyon, tüm pdo değerlerine rastgele değerler verilerek başlatılır. Sonraki jenerasyonları oluşturmak için ikili turnuva (binary tournament selection) mantığı ile seçim yapılır. Seçim sürecinde bireylerin bastırılmamışlık dereceleri (non-domination rank) ve kalabalık uzaklığı (crowding distance) değerleri göz önünde bulundurulur. İki kromozom birbirleriyle rekabet ederken, bastırılmamışlık derecelerine bakılır ve yüksek değeri olan seçilir. Eğer bastırılmamışlık dereceleri aynıysa kalabalık uzaklığı değeri yüksek olan birey seçilir. Seçilen bireyler  $P_c$  ve  $P_m$  olasılıklarıyla çaprazlama ve mutasyon işlemlerinden geçirilirler. Bunun sonucunda oluşturulan yeni bireyler, önce mevcut popülasyona eklenir. Bu popülasyon, bireylerin bastırılmamışlık derecesi ve kalabalık uzaklığı değerlerine göre sıralandıktan sonra popülasyonun ilk yarısı, yeni popülasyonu oluşturur. Bu süreç, yeterli sayıda popülasyona ulaşıldığı zaman son bulur. Son olarak, son popülasyonun bastırılmamış bireyleri arasından tasarımcının bir seçim yapması sağlanır.

## 4. DENEYLER VE BULGULAR (EXPERIMENTS AND RESULTS)

### 4.1. Bina özellikleri

Yukarıda anlatılan yöntem ve algoritma, Ankara için tasarlanmış teorik bir kütüphane binası için test edilmiştir. Bu binanın şekli, kuzey-güney yönünde uzayan ve 1:3 oranında olan bir dikdörtgen prizma olarak seçilmiştir. Binanın etrafında güneşi engelleyen veya enerji simülasyonunu etkileyen yüzeylerin olmadığı varsayılmıştır. Binanın mekânsal tasarımı ise, binaların 3-boyutlu mekânsal yerleşimini destekleyen, önceden geliştirilmiş bir tasarım aracı ile yapılmıştır (Şekil 4) [22]. Binanın büyük bir kısmı, yüksek aydınlatma ve ısı konfor gerektiren okuma ve çalışma fonksiyonuna ayrılmıştır. Bunun yanında ısı ve aydınlatma ihtiyacı daha düşük olan bir kitaplık mekânı ve yeme / içme ihtiyacını karşılayan yemekhane ve kafeterya mekânları bulunmaktadır. Bu mekânların her biri, enerji simülasyonlarında ısı bölgeleri olarak modellenmiştir. Bu sekiz farklı ısı bölgesinin farklı büyüklükleri, kullanım amaçları, ısı ve aydınlatma ihtiyaçları Tablo 3'te görülen şekilde enerji modelinde yer alır. Son olarak bina OpenStudio

kullanılarak kodlanır ve bir EnergyPlus enerji modeli olarak gerçekleştirilir. NSGA-II optimizasyon algoritmasının parametreleri ise Tablo 4'te görülebilir.



**Şekil 4.** Test binası ve ısı bölgeleri (The test building and its thermal zones)

**Tablo 3.** Binanın ısı bölgelerinin mekânsal ve teknik özellikleri. Isı kazanımları, günün saatlerine göre şu katsayılarla çarpılacaktır: 00:00-7:00=0; 7:00-8:00=0.25; 8:00-18:00=1; 18:00-20:00=0.25; 20:00-00:00=0. (The spatial and technical metrics of the thermal zones. thermal gains will be multiplied by the factors according to the time of the day).

Fonksiyon	Alan (m <sup>2</sup> )	Isı kazanımları (faktörler aşağıdaki tabloda görülebilir)*				Termostat ayarları (C°)		
		İnsan (kişi/m <sup>2</sup> )	Işıklar (W/m <sup>2</sup> )	Elektrikli aletler (W/m <sup>2</sup> )	Aydınlanma gereksinimi (ET <sub>z</sub> ) (lux)	Isıtma	Soğutma	
Z <sub>1</sub>	Okuma 1	1600	0.056511	10	10.76	500	22	25
Z <sub>2</sub>	Okuma 2	1100	0.11	10	10.76	500	22	25
Z <sub>3</sub>	Kitaplık	1100	0.005	10	0.58	150	20	26
Z <sub>4</sub>	Yönetim	800	0.056511	10	10.76	400	22	25
Z <sub>5</sub>	Yemekhane	600	0.29	10	6.4	250	23	26
Z <sub>6</sub>	Çalışma	1800	0.056511	10	10.76	500	22	25
Z <sub>7</sub>	Konferans odası	100	0.056511	10	10.76	150	22	25
Z <sub>8</sub>	Kafeterya	100	0.29	10	6.4	250	23	26

**Tablo 4.** Algoritma parametreleri (Algorithm parameters )

NSGA-II ve Gauss fonksiyon parametreleri		Değer
$P_c$	Çaprazlama oranı	0.8
$P_m$	Mutasyon oranı	0.1
$N_p$	Popülasyon	40 birey
$N_t$	Tekrar sayısı	60 nesil
$\sigma$	Aydınlatma Gauss fonksiyonu dağılımı	$\sigma = \begin{cases} 30, & EM_z < ET_z \\ 350, & EM_z \geq ET_z \end{cases}$

#### 4.2. Senaryolar (Scenarios)

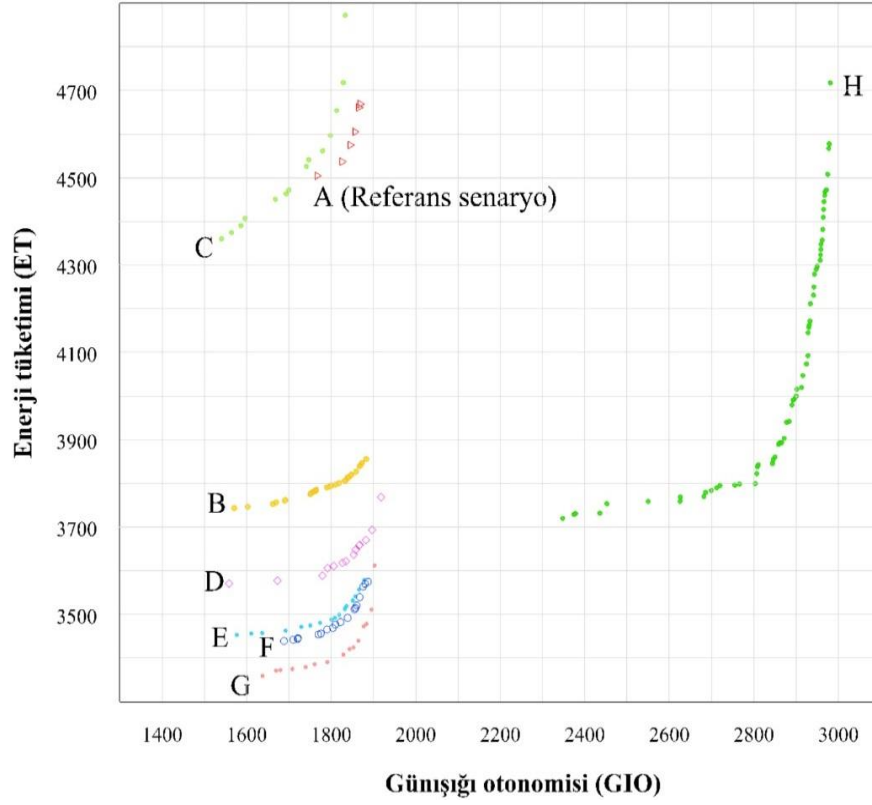
Bina güneş kontrol yöntemlerinin belirlenmesinden sonra, bu farklı yöntemlerin binaya entegrasyonu açısından farklı senaryolar oluşturulmuştur (Tablo 5). Senaryolar, Tablo 1 ve 2’de belirlenen kontrol stratejilerinin birlikte veya birbirlerinin yerine kullanıldığı farklı bina alternatifleridir. Senaryo A; camları düşük performanslı ve gölgeleme elemanı olmayan bir binadır. Bu sebeple referans binası olarak seçilmiştir. Senaryo B; düşük performanslı cam ile güney, doğu ve batı cephelerinde gölgelik kullanır. Senaryo C; güney, doğu ve batı cephelerinde yüksek performanslı cam içerir. Senaryo D ve E; yüksek performanslı cam üstüne, güney cephede G1 ve G2 tipi gölgeleme elemanını yerleştirir. Bu iki gölgelik elemanı birbirlerine alternatif oldukları için daha iyi performans gösterenin seçilmesi gereklidir. Senaryo F’de ise, daha iyi performanslı güney gölgelik elemanının yanı sıra batı ve doğuda G3 tipi gölgeleme elemanını içerir. Senaryo G; doğu ve batıda gölgelik elemanı yerine ağaçları kullanarak güneş kontrolü sağlar. Senaryo H ise, sadece mevcut camlara elektrokromik özellik ekleyerek güneş kontrolü yapar.

**Tablo 5.** Bina gölgeleme strateji senaryoları (The scenarios of shading strategies)

Senaryo	Cam tipi (Tablo 1)				Gölgeleme elemanı (Tablo 2)			
	Kuzey	Güney	Doğu	Batı	Kuzey	Güney	Doğu	Batı
A	M1	M1	M1	M1	-	-	-	-
B	M1	M1	M1	M1	-	G1 veya G2	G3	G3
C	M1	M2	M2	M2	-	-	-	-
D	M1	M2	M2	M2	-	G1	-	-
E	M1	M2	M2	M2	-	G2	-	-
F	M1	M2	M2	M2	-	G1 veya G2	G3	G3
G	M1	M2	M2	M2	-	G1 veya G2	G4	G4
H	M3	M3	M3	M3	-	-	-	-

#### 4.4. Optimizasyon sonuçları

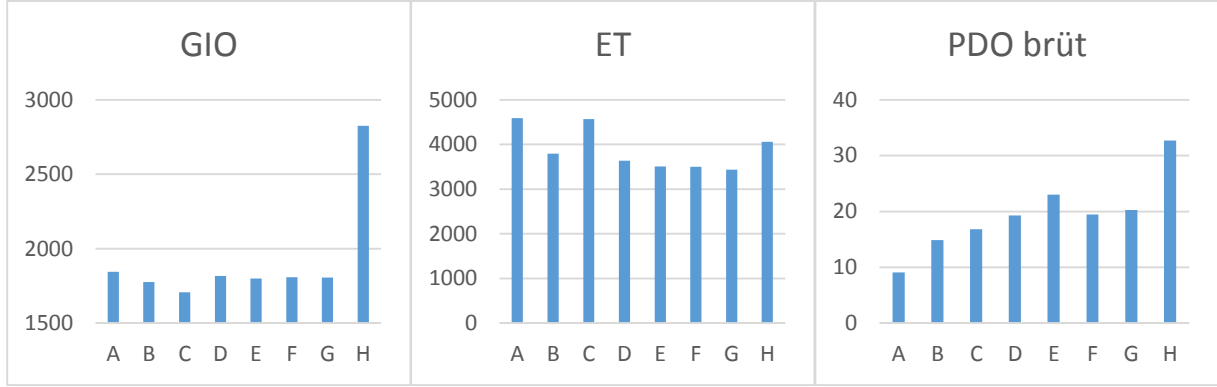
Her bir senaryo için optimizasyon algoritması çalıştırılmış ve her senaryo için hesaplanan Pareto-önler Şekil 5’te gösterilmiştir. Algoritma günışığı otonomisini maksimize, enerji tüketimini ise minimize etmeye çalıştığı için, optimal çözümler pozitif x, negatif y köşesine doğru ulaşmaya çalışır. Pareto-önlerin uç iki kısmı, objektiflerin birini iyileştirirken diğerini kötüleştirdiği durumu temsil ettiği için, eğrinin kavislendiği ve hatta köşe yaptığı kısımdaki bireylerin seçimi tercih edilir. Böylelikle bir objektifi de belli oranda karşılayan ve herhangi birinde feragat etmeyen bireyler bulunabilir. Sonuçlara göre, elektrokromik camlı Senaryo H’nin GIO değerinin, diğer senaryolara kıyasla gözle görülür miktarda yüksek performans gösterdiği, ayrıca Senaryo A ve C’nin birbirlerine benzer performans sergiledikleri, diğer senaryoların ise GIO değerlerinin benzer ama ET değerlerinin farklılık gösterdiği görülmektedir. Daha detaylı sayısal değerlendirme için her senaryonun ortalama pdo, ET ve GO değerleri Tablo 6 ve Şekil 6’da gösterilmiştir. Senaryoların ET değerlerinin soğutma, ısıtma ve elektrik tüketim değerleri ise Şekil 7’de gösterilmiştir. Bu sonuçlar ışığında, ET, GIO ve pdo değerlendirmeleri aşağıda verilmiştir.



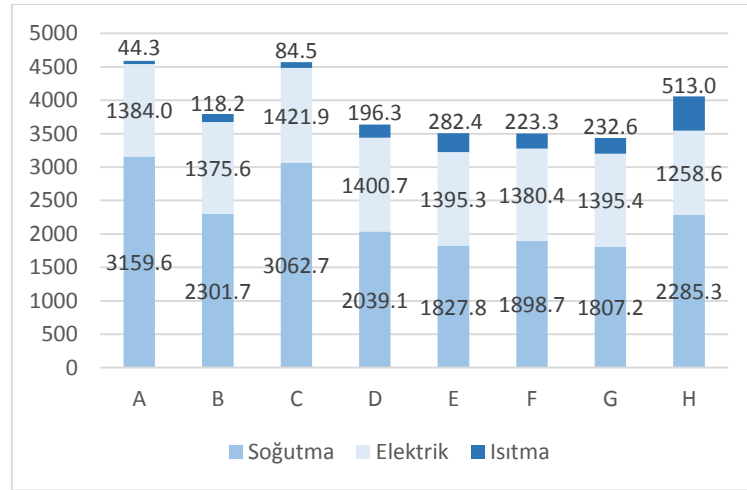
Şekil 5. Belirlenen senaryolara ait Pareto-önler, (The Pareto-fronts of the scenarios)

Tablo 6. Senaryolara ait Pareto-önlerdeki bireylerin ortalama pdo, ET ve GO değerleri (The pdo, ET and GO values of the scenarios' individuals on their Pareto-curves)

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Senaryo	$pdo_{brüt}$	$pdo_k$	$pdo_d$	$pdo_g$	$pdo_b$	Ortalama GIO	Ortalama ET
A	9.10	11.07	11.28	5.23	12.59	1844.20	4587.94
B	14.89	9.77	17.61	13.94	30.38	1776.66	3795.43
C	16.83	11.65	15.29	21.63	19.55	1706.39	4569.15
D	19.31	9.72	16.80	25.99	30.59	1816.82	3636.10
E	23.02	10.48	21.70	34.76	26.77	1800.22	3505.56
F	19.45	11.84	18.27	27.34	19.77	1807.62	3502.34
G	20.29	10.46	17.31	30.93	20.85	1805.23	3435.23
H	32.73	46.02	18.90	26.87	24.32	2826.48	4056.95



**Şekil 6.** Senaryolara ait Pareto-önlerdeki bireylerin ortalama  $pdo_{brüt}$ , ET ve GIO değerlerinin görsel karşılaştırılması (veriler Tablo 6, kolon 1,6 ve 7'den alınmıştır) (The average pdo, ET and GO values of all the individuals of the scenarios' Pareto-curves; the data is derived from Table 6, columns 1,6 and 7)



**Şekil 7.** Senaryolara ait Pareto-önlerdeki bireylerin enerji tüketiminin soğutma, ısıtma ve elektrik dağılımı (The distribution of the cooling, heating and electricity use of the individuals of the scenarios' Pareto-curves)

#### 4.3. Günışığı Performansı Değerlendirmesi (Daylighting Performance Evaluation)

Senaryoların ortalama GIO değerlerine bakıldığında (Tablo 6, kolon 6), bu objektifi maksimize eden bina alternatifinin, elektrokromik camlı bina (Senaryo H) olduğu görülür. Senaryo H'de elektrokromik cam, opaklığını değiştirerek farklı günışığı seviyelerini iç ortama kontrollü bir biçimde verebilir ve iç aydınlatma seviyesini hedeflenen değere kadar düşürülebilir. Bu sayede Referans Senaryo A'ya göre GIO performansı 53.26%,  $pdo_{brüt}$  değeri ise 259,92% oranında daha fazladır (Tablo 7). Günışığından maksimum performans aldığı için Senaryo H, 1258,6 kWh ile diğer senaryolara kıyasla en düşük aydınlatma elektrik tüketimine de sahiptir (Şekil 7).

Diğer senaryoların GIO değeri ise, referans senaryoyla kıyaslandığında 1,49% (Senaryo D) ve 7.47% (Senaryo C) aralığında daha düşük performans göstermekte, birbirlerinden büyük farklılık göstermemektedir. Bunun sebebi, çok-objektifli genetik algoritmanın GIO değerini bina alternatiflerinin  $pdo$  değerlerini değiştirerek optimize etmesi ve sonunda benzer  $pdo$  sonuçlarına varmasıdır.

#### 4.4. Enerji Performansı Değerlendirmesi (Energy Performance Evaluation)

Senaryoların ET performanslarına göre karşılaştırmalı analizi için Pareto-önerilerinin ortalama ET değerlerine değerine bakılmıştır (Tablo 6, kolon 7). Bu sıralama, iyiye kötüden doğru Senaryo G, F, E, D, B, H, C ve A şeklindedir. Buna göre güneş kontrolü sağlamayan Senaryo A en kötü performansı göstermiştir. Sadece cam performansının iyileştirilmesi (Senaryo C), ET veya GIO performansında gözle görünür değişiklik yaratmamıştır. Oysa camları düşük performanslı ama gölgelik elemanı içerek Senaryo B, referans senaryoya göre 17,27% daha az enerji tüketmiştir. Güney cephesinde birbirlerine alternatif olarak değerlendirilen tente (Senaryo D) ve yatay şerit (Senaryo E) gölgelik sistemleri arasında ikincisi daha iyi enerji performansı sergilemiştir. Diğer taraftan Senaryo F ve G, hem yüksek SHGC ve VT performanslı cam, hem de fiziksel gölgeleme yöntemlerini kullanarak en iyi ET performansını göstermiştir. Mevsimlik yaprak sıklığı değiştiği için yazın az, kışın ise çok güneş ışığı geçiren ağaçlar sayesinde Senaryo G, fiziksel gölgelik elemanlarına göre 1.92% daha iyi enerji performansı göstermiştir. Ayrıca yüksek performans cam ve gölgelik elemanı kullanan senaryolarda (D, E, F ve G), iç ortama alınan günışığı azaldığı için ısıtma enerji tüketimi artmış, aydınlatma enerji tüketimi değişmemiş, bunlara karşılık soğutma için kullanılan enerji miktarı azalmıştır (Şekil 7).

Elektrokromik camlı Senaryo H ise, ET gözetildiğinde diğer tüm gölgelikli senaryoların gerisinde kalmıştır. Detaylı enerji tüketim değerlerine bakıldığında, bunun sebebinin gölgelikli senaryolardan çok daha yüksek olan ısıtma enerji tüketimi (513,0 kWh), ve soğutma enerji tüketimi olduğu görülür. Böylelikle, günışığı kullanımı ve enerji tüketimi performanslarının birbirleriyle çeliştiği durumlarda elektrokromik camların kullanımının dezavantaj sağladığı sonucu çıkarılabilir.

**Tablo 7.** Referans senaryoya (Senaryo A) oranla değişim yüzdeleri (The percentage change from the reference scenario (Scenario A))

Senaryo:	% değişim		
	ET	GIO	<i>pdo</i> <sub>brüt</sub>
<b>A (referans senaryo)</b>	-	-	-
<b>B</b>	-17.27%	-3.66%	+63.71%
<b>C</b>	-0.41%	-7.47%	+85.09%
<b>D</b>	-20.75%	-1.49%	+112.36%
<b>E</b>	-23.59%	-2.38%	+153.14%
<b>F</b>	-23.66%	-1.98%	+113.81%
<b>G</b>	-25.12%	-2.11%	+123.09%
<b>H</b>	-11.57%	+53.26%	+259.92%

#### 4.5. PDO ve Performans Korelasyonları (Window-Wall Ratio and Performance Correlations )

Değerlendirilen senaryoların optimizasyon sonuçlarının korelasyonları, Pearson korelasyon katsayısı ile sayısallaştırılmıştır (Tablo 8). Pearson korelasyon katsayısı  $\rho(X, Y)$ , normal dağılıma sahip iki değişken seti ( $X$  ve  $Y$ ) arasındaki lineer matematiksel ilişkinin şiddetini belirlemek için kullanılır. Pearson katsayısı, -1 ve 1 arasında bir değer alır; -1'e yakın değerler yüksek negatif korelasyon, 1'e yakın değerler yüksek pozitif korelasyon, 0'a yakın değerler ise korelasyonun olmadığı anlamına gelir. Çalışmada, ET ve GIO korelasyonları ( $\rho(ET, GO)$ ), algoritmanın ürettiği tüm bireyler ve sadece optimal bireyler için ayrı ayrı hesaplanmıştır (Tablo 8, kolon i ve ii). Ayrıca ET ve GIO'nun *pdo* değerleri ile korelasyonları da aynı tabloda, (iii) ve (iv) kolonlarında gösterilmiştir.

Çalışmada elde edilen sonuçlara göre, optimal sonuçların ET ve GIO değerleri arasında (Tablo 8, kolon i) güçlü pozitif korelasyon bulunmaktadır ( $0.72 < \rho(ET, GO) < 0.96$ ). Yani, erişilen optimal tasarımlarda günışığı aydınlatma performansı arttıkça enerji tüketimi artmakta, enerji performansı azalmaktadır.

Optimal olmayan tüm bireyler değerlendirildiğinde ise (Tablo 8, kolon ii), bu korelasyonun tersine döndüğü, yani negatif bir korelasyon olduğu görülmektedir. Buna tek istisna, güneş ışığını dinamik olarak bloke edebilen elektrokromik camlı Senaryo H'dir ( $\rho(ET, GO) = 0,54$ ).

ET ve  $pdo$  ilişkisine bakıldığında (Tablo 8, kolon iii), gölgeleme elemanlarının kullanıldığı senaryolarda (D, E, F ve G) bu korelasyon, diğer senaryolara göre daha düşüktür. Bu sonuçlar, büyük pencere açıklıklarının, gölgeleme elemanları ile kullanıldığında yüksek enerji performansı elde edilebileceğine işaret etmektedir. Diğer senaryolarda ise  $pdo$  büyüdükçe enerji tüketimi de artmakta ve performansa olumsuz etkiye bulunmaktadır. ET ve binanın brüt  $pdo$  değeri ( $pdo_{brüt}$ ) arasında yine pozitif korelasyon olmakla birlikte (kolon ii), özellikle güneş kontrolü olmayan (Senaryo A ve H) ve güneş kontrolünü elektrokromik cam ile sağlayan (Senaryo F) senaryolarda bu korelasyon çok daha güçlüdür. Diğer taraftan, GIO ve  $pdo_{brüt}$  değerleri arasında güçlü bir korelasyon söz konusu değildir. Bunun sebebi, GIO hesaplamaları için asimetrik bir Gauss fonksiyonu kullanılmış olması ve bu fonksiyonun GIO ve  $pdo$  değerlerin arasında lineer bir ilişki tariflememesidir.

**Tablo 8.** Senaryoların Pareto-eğrisindeki bireylerin ET, GO ve  $pdo_{brüt}$  değerlerinin arasındaki Pearson korelasyonları (The Pearson correlations between the  $pdo$ , ET and GO values of the individuals of the scenarios' Pareto-curve)

	(i)	(ii)	(iii)	(iv)
Senaryo	$\rho(ET, GO)$ (Pareto-ön için)	$\rho(ET, GO)$ (Tüm bireyler için)	$\rho(ET, pdo_{brüt})$	$\rho(GIO, pdo_{brüt})$
A	0.72	-0.85	0.71	0.65
B	0.96	-0.76	0.80	-0.12
C	0.79	-0.44	0.77	0.79
D	0.76	-0.76	0.24	0.22
E	0.79	-0.78	0.38	-0.21
F	0.90	-0.79	0.39	0.75
G	0.72	-0.74	0.46	0.82
H	0.77	0.54	0.98	0.86

## 5. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu çalışmada, farklı güneş kontrol yöntemlerinin, çok-amaçlı bir genetik optimizasyon algoritması ve EnergyPlus enerji simülasyon aracı kullanılarak değerlendirilmesi yapılmıştır. Algoritma, binanın  $pdo$  değerleri ve gölgelik parametrelerini değişken olarak alırken, enerji tüketimini minimize ve günışığı aydınlatma miktarını maksimize eder. Araştırılan sekiz farklı güneş kontrol senaryosunun her birinin Pareto çözümleri hesaplanmış ve birbirleriyle karşılaştırmalı analizi yapılmıştır. Sonuçlar göstermektedir ki binada kullanılan cam teknik özellikleri ve fiziksel gölgeleme elemanlarının bina enerji performansına etkisi büyüktür. Düşük cam teknik özellikli ve yetersiz gölgelikli binalar,  $pdo$  değerlerini düşürerek GIO performanslarını aynı tutabilmelerine rağmen, enerji tüketimleri belirgin düşüş göstermektedir. Fiziksel gölgeleme elemanı olan binalar arasında yapılan karşılaştırmalarda ise, gölgelik elemanların ve ağaçların ET performansını büyük oranda iyileştirdiği görülmüştür. Örneğin gölgeleme elemanı ve ağaçların birlikte kullanıldığı senaryoda ET, %25'e kadar azaltılabilmektedir. Araştırılan senaryoların  $pdo$  değerlerine bakıldığında ise, doğru gölgeleme yapılan binaların  $pdo$  değerlerinin, diğerlerine oranla yüksek olduğu ortaya çıkmaktadır. Elektrokromik cam ile güneş kontrolü sağlayan senaryoda brüt  $pdo$  değeri 123% oranında yükselmiştir. Yüksek  $pdo$  değerinin, pencerelerin aynı zamanda iç mekânın dış ortam ile görsel bağlantısını kurması ve mekân kalitesini yükseltmesi açısından tercih edilebilirliği sonucu çıkmaktadır.

Bu çalışmada kullanılan algoritma, sadece enerji ve aydınlatma olarak iki objektif değerini ele alır. İleriki çalışmalarda, bina performansına etki eden diğer etkenler (örneğin kontrol stratejilerinin yaşam döngüsü

analizi veya maliyeti gibi) de algoritmaya entegre edilebilir. Çalışmada sunulan kontrol stratejilerinin dışında stratejiler veya gölgeleme elemanlarının tipleri ve boyutları de değişken olarak alınarak yeni karşılaştırılmalı analizler yapılması mümkündür. Ayrıca ileriki çalışmalarda elde edilen verilerin hassasiyetinin değerlendirilmesi için hassasiyet analizi gibi yöntemler ile algoritma geliştirilebilir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Tuhus-Dubrow, D. and M. Krarti, Genetic-algorithm based approach to optimize building envelope design for residential buildings. *Building and environment*, 2010. 45(7): p. 1574-1581.
- [2] Granadeiro, V., et al., Building envelope shape design in early stages of the design process: Integrating architectural design systems and energy simulation. *Automation in construction*, 2013. 32: p. 196-209.
- [3] Lin, S.-H.E. and D.J. Gerber, Designing-in performance: A framework for evolutionary energy performance feedback in early stage design. *Automation in Construction*, 2014. 38: p. 59-73.
- [4] Caldas, L., Generation of energy-efficient architecture solutions applying GENE\_ARCH: An evolution-based generative design system. *Advanced Engineering Informatics*, 2008. 22(1): p. 59-70.
- [5] Kämpf, J.H. and D. Robinson, Optimisation of building form for solar energy utilisation using constrained evolutionary algorithms. *Energy and Buildings*, 2010. 42(6): p. 807-814.
- [6] Echenagucia, T.M., et al., The early design stage of a building envelope: Multi-objective search through heating, cooling and lighting energy performance analysis. *Applied Energy*, 2015. 154: p. 577-591.
- [7] Lin, Y.-H., et al., Design optimization of office building envelope configurations for energy conservation. *Applied Energy*, 2016. 171: p. 336-346.
- [8] Huang, Y., J.-l. Niu, and T.-m. Chung, Comprehensive analysis on thermal and daylighting performance of glazing and shading designs on office building envelope in cooling-dominant climates. *Applied energy*, 2014. 134: p. 215-228.
- [9] Manzan, M., Genetic optimization of external fixed shading devices. *Energy and Buildings*, 2014. 72: p. 431-440.
- [10] Khoroshiltseva, M., D. Slanzi, and I. Poli, A Pareto-based multi-objective optimization algorithm to design energy-efficient shading devices. *Applied Energy*, 2016. 184: p. 1400-1410.
- [11] Lau, A.K.K., et al., Potential of shading devices and glazing configurations on cooling energy savings for high-rise office buildings in hot-humid climates: The case of Malaysia. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 2016. 5(2): p. 387-399.
- [12] Schaffer, J.D. Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms. in *Proceedings of the 1st international Conference on Genetic Algorithms*. 1985. L. Erlbaum Associates Inc.
- [13] Horn, J., N. Nafpliotis, and D.E. Goldberg. A niched Pareto genetic algorithm for multiobjective optimization. in *Evolutionary Computation*, 1994. IEEE World Congress on Computational Intelligence., *Proceedings of the First IEEE Conference on*. 1994. Ieee.



- [14] Corne, D.W., J.D. Knowles, and M.J. Oates. The Pareto envelope-based selection algorithm for multiobjective optimization. in *International Conference on Parallel Problem Solving from Nature*. 2000. Springer.
- [15] Srinivas, N. and K. Deb, Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms. *Evolutionary computation*, 1994. 2(3): p. 221-248.
- [16] Zitzler, E. and L. Thiele, Multiobjective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength Pareto approach. *IEEE transactions on Evolutionary Computation*, 1999. 3(4): p. 257-271.
- [17] Zitzler, E., M. Laumanns, and L. Thiele, Spea2: Improving the strength Pareto evolutionary algorithm for multiobjective optimization. *Evolutionary Methods for Design, Optimization, and Control*, 2002: p. 95-100.
- [18] Deb, K., et al. A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II. in *International Conference on Parallel Problem Solving From Nature*. 2000. Springer.
- [19] Weaver, E., et al., Rapid Application Development with OpenStudio. 2012 ACEEE Summer Study, 2012.
- [20] Bellia, L., et al., An overview on solar shading systems for buildings. *Energy Procedia*, 2014. 62: p. 309-317.
- [21] Sonnenenergie, D.G.F., *Planning and installing photovoltaic systems: a guide for installers, architects and engineers*. 2007: Earthscan.
- [22] Dino, I.G., An evolutionary approach for 3D architectural space layout design exploration. *Automation in Construction*, 2016. 69: p. 131-150.