İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MİMARLIKTA MALZEME TABANLI BÜTÜNLEŞİK HESAPLAMALI TASARIM MODELİ

DOKTORA TEZİ

Sevil YAZICI

Mimarlık Anabilim Dalı

Yapı Bilimleri Programı

ŞUBAT 2013

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MİMARLIKTA MALZEME TABANLI BÜTÜNLEŞİK HESAPLAMALI TASARIM MODELİ

DOKTORA TEZİ

Sevil YAZICI
(502092012)

Mimarlık Anabilim Dalı

Yapı Bilimleri Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Leyla TANAÇAN

ŞUBAT 2013

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün **502092012** numaralı Doktora Öğrencisi **Sevil YAZICI,** ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **"MİMARLIKTA MALZEME TABANLI BÜTÜNLEŞİK HESAPLAMALI TASARIM MODELİ"** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Leyla TANAÇAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi .....

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Leyla TANAÇAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi .....

Doç. Dr. Hakan YAMAN
İstanbul Teknik Üniversitesi .....

Prof. Dr. Halit Yaşa ERSOY
Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi .....

Prof. Dr. Nihal ARIOĞLU
İstanbul Teknik Üniversitesi .....

Prof. Dr. Kemal ÇORAPÇIOĞLU
Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi .....

Teslim Tarihi : **31 Aralık 2012**
Savunma Tarihi : **13 Şubat 2013**

ÖNSÖZ

Doktora araştırmamın temel fikrini oluşturan, malzemenin tasarım sürecinin başına getirilmesine yönelik olan ilgim, ilk olarak 2004 yılında malzeme zekâsı üzerine araştırma yaptığım yüksek lisans çalışmasıyla beraber oluşmaya başladı. Mezuniyetim sonrasında, mimarlık pratiğinde uygulamalı olarak çalıştığım süreçte ise bunun çözülmesi gereken bir sorun olduğunu fark ettim. İTÜ'de doktora çalışmalarına başlamamın en önemli sebebi, bu sorunun çözümüne ilişkin olan merakımdı.

Öncelikle en başından itibaren bana her anlamda destek veren, bilgisi ve deneyimini cömertçe paylaşan, önümü açan kişi, tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Leyla Tanaçan'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Kuşkusuz, sizin katkınız olmadan bu noktaya gelmem mümkün olamazdı. Sizin sayenizde, doktora sürecini en verimli ve üretken biçimde kullanmayı başardığıma inanıyorum.

Doktora tez jürimde bulunan, Sayın Prof. Dr. Halit Yaşa Ersoy'a tezimdeki fikirleri oluşturmama ve değerlendirmeme yönelik olan yapıcı eleştirileri için çok teşekkür ederim. Araştırmama çok yönlü olarak bakarak, farklı düşünmemi sağladınız.

Ayrıca doktora tez jürimde bulunan Sayın Doç. Dr. Hakan Yaman'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Özellikle, doktora çalışmamda bulunan bütünleşik hesaplamalı tasarım modelini oluştururken, bilginiz ve değerli yorumlarınız tezime yön verdi.

Buna ek olarak, doktora sürecinde dersine katıldığım ve tezimin gelişmesine katkı sağlayan, Yapı Bilimleri ve Mimari Tasarımda Bilişim Programı kapsamında görevli tüm değerli öğretim üyelerine ve fikir alışverişinde bulunduğum meslektaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak bu zorlu süreçte, koşulsuz olarak hep yanımda olan sevgili aileme teşekkür ederim. İyi ki varsınız.

Aralık 2012

Sevil Yazıcı
(Yüksek Mimar)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **v**
İÇİNDEKİLER ..... **vii**
KISALTMALAR ..... **ix**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xi**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xiii**
ÖZET ..... **xix**
SUMMARY ..... **xxi**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Problemin Belirlenmesi 3
1.2 Konu İle İlgili Çalışmalar 5
1.2.1 Malzeme, biçim ve başarım ilişkisi 5
1.2.2 Hesaplamalı yöntemlerle farklı alanda yapılmış çalışmalar 11
1.3 Tezin Amacı 11
1.4 Tezin Kapsamı 14
1.5 Tezin Yöntemi 16
2. MALZEME VE BİÇİM **19**
2.1 Doğada Malzeme 19
2.2 Doğal Sistemlerde Optimizasyon 22
2.3 Malzeme Tarafından Yönetilen Tasarım Süreci 24
2.4 Malzemenin Tanınması 27
2.4.1 Malzeme yapısı 30
2.4.1.1 Malzemede mikrostrüktür 31
2.4.1.2 Malzemede makrostrüktür 33
2.4.2 Malzeme üzerindeki etkiler bağlamında mekanik özellikler 35
2.4.2.1 İzotrop, ortotrop ve anizotrop malzemeler 37
2.4.2.2 Lineer ve nonlineer davranış 37
2.4.2.3 Malzemede gerilme ve şekil değiştirmeler 39
2.4.3 Hesaplamalı malzeme tasarımı 41
2.5 Mimarlık ve Strüktür İlişkisi 45
2.5.1 Strüktür ve malzeme ilişkisi 45
2.5.2 Strüktürde biçim-etkinlik incelemesi 47
2.5.3 Strüktürel biçim ve verimlilik arasındaki ilişki 48
2.6 Mimari Geometri 50
2.6.1 Serbest biçimlerin rasyonelleştirilmesi 52
2.6.2 NURBS yüzeyler 54
2.6.3 Mimari geometri ve bileşenler arasındaki ilişki 63
3. MALZEME VE BAŞARIM **69**
3.1 Bina Başarımı 70
3.2 Bütünleşik Başarım Yaklaşımı 70
3.3 Başarım Değerlendirmesi 71
3.4 Strüktürel Başarım 73

3.4.1 Sonlu elemanlar yöntemi (SEY) 73
3.4.1.1 SEY' in kullanım alanları 75
3.4.1.2 SEY' in işleyişi 76
3.4.1.3 SEY işlem adımları 81
3.4.1.4 SEY ile hesaplamanın mantığı 82
3.4.1.5 SEY' de malzeme 85
3.4.1.6 SEY kapsamındaki uygulamalar 89
3.4.2 Strüktürel optimizasyon 95
3.4.2.1 Optimizasyon kavramları 98
3.4.2.2 Strüktürel optimizasyon türleri 100
3.4.2.3 Optimizasyon yöntemleri 104
4. MİMARLIKTA KULLANILAN SAYISAL ARAÇLAR VE YÖNTEMLER 111
4.1 Hesaplamalı Tasarım (HT) 112
4.2 Mimarlıkta Bilgisayar Programlama 120
4.3 Mimarlıkta Enformasyon Sistemleri 126
4.4 Yapı Enformasyonu Modellemesi (YEM) 127
4.5 Bilgisayar Destekli Üretim (BDÜ) 129
5. MALZEME TABANLI BÜTÜNLEŞİK HESAPLAMALI TASARIM MODELİ (MBHT-m) 133
5.1 Yöntem 135
5.1.1 Malzeme seçimi 144
5.1.2 Kullanıcı kısıtlamaları ve konum 145
5.1.3 Mimari geometri 146
5.1.4 Strüktür-üretim teknolojisi ve montaj mantığı 148
5.1.5 Strüktürel başarım benzetimi 150
5.1.6 Strüktürel optimizasyon ve raporlama 152
5.2 Modelin Değerlendirilmesi 160
6. SONUÇLAR 165
KAYNAKLAR 171
EKLER 183
ÖZGEÇMİŞ 203

KISALTMALAR

AKY	**:** Ağırlıklı Kalıntılar Yöntemi
BBAY	**:** Biçim Bulmaya yönelik Araç ve Yöntemler
BDT	**:** Bilgisayar Destekli Tasarım
BDÜ	**:** Bilgisayar Destekli Üretim
BESO	**:** Bi-directional Evolutionary Structural Optimization
CFD	**:** Computational Fluid Dynamics
CNC	**:** Computer Numerical Control
ESO	**:** Evolutionary Structural Optimization
ETO	**:** Eğim Tabanlı Optimizasyon
GA	**:** Genetik Algoritmalar
HT	**:** Hesaplamalı Tasarım
HVAC	**:** Heating, Ventilating, Air Conditioning
ICD / ITKE	**:** Institute for Computational Design / Institute of Building Structures & Structural Design
MBHT-m	**:** Malzeme tabanlı Bütünleşik Hesaplamalı Tasarım Modeli
MGR	**:** Mimari Geometrinin Rasyonelleştirilmesi
NURBS	**:** Non-Uniform Rational B-Spline
RP	**:** Rapid Prototyping
SEY	**:** Sonlu Elemanlar Yöntemi
UML	**:** Unified Modelling Language
YEM	**:** Yapı Enformasyonu Modellemesi
YSGY	**:** Yığma Strüktürler için Geliştirilmiş Yöntem
2D	**:** Two Dimensional
3D	**:** Three Dimensional

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1: Bazı malzemelerde basınç, çekme, kayma emniyet gerilmeleri ve elastiklik modülü değerleri -N/mm^2 (Eriç, 2001). 40
Çizelge 3.1 : Farklı mühendislik disiplinleri için SEY' de serbestlik derecesi ve kuvvet vektörleri (Madenci ve Güven, 2006). 75
Çizelge 3.2 : SEY ile farklı durumlardaki davranışlar (de Weck ve Kim, 2004). 79
Çizelge 3.3 : Strüktürel, termal ve akışkan disiplinler için SEY hesaplamasında kullanılan lineer malzeme özellikleri (Madenci ve Güven, 2006). 87-88
Çizelge 5.1 : Veri tabanında kullanılan malzeme özellikleri tablosu. 158
Çizelge 5.2 : Literatür araştırmasında incelenen çalışmalarla MBHT-m'nin karşılaştırılması. 163
Çizelge B.1 : MBHT-m kullanıcı seçimleri tablosu. 186-188
Çizelge C.1 : MBHT-m kısıtlamalar tablosu. 189
Çizelge D.1 : Beton malzeme için yazılım tarafından üretilen benzetim raporu. 191-192
Çizelge D.2 : Çelik malzeme için yazılım tarafından üretilen benzetim raporu. 194-195
Çizelge D.3 : Alüminyum malzeme için yazılım tarafından üretilen benzetim raporu. 197-198

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Sanat Evi, Cook ve Fournier, Graz, 2003. 4
Şekil 1.2 : Nordpark Tren İstasyonu, Zaha Hadid Mimarlık, Innsbruck, 2007. 4
Şekil 1.3 : İki Kararlı Yapılar (Chima ve diğ, 2006). 6
Şekil 1.4 : Asılı zincir modeli benzetimi (Kilian, 2006). 7
Şekil 1.5 : ESO yöntemi (a) ilk tasarım (b) ESO çözümü (c) Gaudi'nin çözümünün fotoğrafı (Xie ve diğerleri, 2005). 8
Şekil 1.6 : EifForm (Shea, 2005). 8
Şekil 1.7 : V-FEM (Oxman, 2009). 9
Şekil 1.8 : Malzeme sistemleri (Menges, 2008). 10
Şekil 1.9 : Stuttgart Üniversitesi 2010 Araştırma Pavyonu (ICD/ITKE, 2010). 10
Şekil 1.10 : MBHT-m'nin mimari tasarım sürecindeki yeri. 13
Şekil 1.11 : MBHT-m'nin kapsamı. 15
Şekil 1.12 : Yöntemin ortaya konması. 17
Şekil 2.1 : Doğal biçimlemeler ve örüntüler. 21
Şekil 2.2 : Colònia Güell Kilisesi'nin kemer biçimleri (Sweeney ve Sert, 1960). 25
Şekil 2.3 : Fuller'in geliştirdiği prototipler (Gorman, 2005). 25
Şekil 2.4 : Fuller radiolaria gibi doğal biçimlemeleri incelemiştir. 26
Şekil 2.5 : Kemik dokusu ve köpük gibi biçimlemeleri (Roland, 1970). 26
Şekil 2.6 : Michael Ashby malzeme seçim çizelgeleri (Granta Design, 2006). 28
Şekil 2.7 : Karbon fiber bank (Donders, 2010). 30
Şekil 2.8 : Nefes alan koltuk (Yu-Ying, 2010). 30
Şekil 2.9 : Ahşabın ve reçineli ahşap parçacığının içyapısı (Zhao ve diğ, 2010). 31
Şekil 2.10 : Lineer, tabakalı ve uzay ağı yapılarında moleküler yapı oluşumu. 32
Şekil 2.11 : Malzemenin kristal ve amorf ağ yapısı. 32
Şekil 2.12 : Kristal yapı içindeki kenar dislokasyonu (van Vlack, 1990). 33
Şekil 2.13 : Malzemenin içyapısı düzeyinde elastik ve plastik yer değiştirmeler. 36
Şekil 2.14 : İzotrop, ortotrop ve anizotrop malzemelerde davranışlar (Ersoy, 2001). 37
Şekil 2.15 : Nonlineer malzeme davranışı (Madenci ve Güven, 2006). 38
Şekil 2.16 : Mevcut sistem tasarımında malzeme seçimi için düşey çizginin sağındaki seviyelere odaklanılır (McDowell ve diğ, 2010). 42
Şekil 2.17 : Doğal cam liflerden bir çeşit sünger strüktürü (Wyss Enstitüsü, 2012, a). 44
Şekil 2.18 : Doğal cam liflerden oluşan katmanlar, mekanik ve optik işlev göstererek dayanım sağlar ve ışığı iletir (Wyss Enstitüsü, 2012, b). 44
Şekil 2.19 : Saydam kemiklere sahip bir çeşit deniz yıldızı (Wyss Enstitüsü, 2012, c). 44
Şekil 2.20 : CNIT Sergi Salonu, Nicolas Esquillan, Paris, Fransa. 46
Şekil 2.21 : Modern Sanat Deposu, Foster ve Ortakları, Thames mead, UK. 46

Şekil 2.22 : Boylamasına eksenel kuvvet etkisi altındaki biçim-etkin model. 48
Şekil 2.23 : Mimari yapının matrislerle ifade edilmesi (Prousalidou ve Hanna, 2007). 51
Şekil 2.24 : Yazar tarafından yürütülen çalışmada, eğri fonksiyonlarıyla matematiksel yüzeyler oluşturulmuştur (2012). 52
Şekil 2.25 : Serbest biçimli yüzey, algoritma aracılığı ile düzlemsel dörtgen bileşenlere bölünmüştür (Pottmann ve diğ, 2008). 53
Şekil 2.26 : Algoritma aracılığı ile paneller oluşturulurken maliyet hesabı gerçekleştirebilmektedir (Eigensatz ve diğ, 2010). 54
Şekil 2.27 : Rhino arayüzünde oluşturulan bir NURBS eğrisi ve buna ilişkin oluşturulan nesne tanımlamaları. 55
Şekil 2.28 : Paskal polinom üçgeni. 56
Şekil 2.29 : Spline eğrisinin gösterimi. 56
Şekil 2.30 : Ara değerlendirme ve yaklaşım spline türleri 57
Şekil 2.31 : Birinci, ikinci ve üçüncü derecelerde spline eğrilerin davranışları. 57
Şekil 2.32 : Kontrol noktası ağırlığının değiştirilmesi. 57
Şekil 2.33 : Düğüm noktasının tanımlanması. 58
Şekil 2.34 : Düz çizgi: taban eğrisi derecesi 1, parabolik yay: taban eğrisi derecesi 2. 59
Şekil 2.35 : Üçüncü dereceden B'ezier eğrisi. 60
Şekil 2.36 : Rasyonel B'ezier eğrisi. 60
Şekil 2.37 : Parçalı polinom fonksiyonu. 61
Şekil 2.38 : Üniform düğüm vektörü ve üniform olmayan düğüm vektörü. 62
Şekil 2.39 : Serbest biçimli bir NURBS yüzeyi. 63
Şekil 2.40 : Yazar tarafından farklı örüntülerin NURBS yüzeylere atanması (2012). 64
Şekil 2.41 : Yazar tarafından yüzeylerde panel ve boşlukların incelenmesi (2012). 64
Şekil 2.42 : Yazar tarafından çift eğrilikli yüzeye farklı paneller atanması (2010). 64
Şekil 2.43 : Yazar tarafından yüzeyin panellere bölünerek analiz edilmesi (2011). 65
Şekil 2.44 : Malzeme Biçimlemeleri Çalıştayı, İTÜ (2010). 66
Şekil 2.45 : Malzeme Biçimlemeleri Çalıştayı, İTÜ (2010). 66
Şekil 2.46 : Malzeme Biçimlemeleri Çalıştayı, İTÜ (2010). 67
Şekil 2.47 : Malzeme Biçimlemeleri Çalıştayı, İTÜ (2010). 67
Şekil 2.48 : Malzeme Biçimlemeleri Çalıştayı, İTÜ (2010). 68
Şekil 3.1 : Öncü nitelikteki SEY kullanım örneklerinden Potzdamer Platz, Berlin. 74
Şekil 3.2 : Düğüm ve sonlu elemanların gösterimi. 76
Şekil 3.3 : Sonlu eleman ağını oluşturan eleman tipleri (Sadd, 2005). 77
Şekil 3.4 : Sonlu elemanlar ağı yoğunluğu (Sadd, 2005). 77
Şekil 3.5 : SEY cebirsel denklemi (de Weck ve Kim, 2004). 78
Şekil 3.6 : URI dinamik fotomekanik laboratuvarı (Sadd, 2012, a). 80
Şekil 3.7 : Gerilmelerin teorik, deneysel, SEY gösterimleri (Sadd, 2012, b). 80
Şekil 3.8 : SEY ile yüzey gerilmelerinin renk kodlarıyla ifadesi (Sadd, 2012, b). 81
Şekil 3.9 : SEY' in temel işleyiş şeması. 81
Şekil 3.10 : Skalar değerli iki boyutlu alan problemi (Sadd, 2005). 83
Şekil 3.11 : Vektör-tensör değerli iki boyutlu alan problemi (Sadd, 2005). 84

Şekil 3.12 : Kirişe etkiyen sınır koşulları ve kuvvetler (Sadd, 2012, b). 85
Şekil 3.13 : ANSYS yazılımında malzeme özelliklerinin girilebildiği arayüz. 86
Şekil 3.14 : Scan & Solve yönteminde hesaplama sonlu eleman ağı oluşturulmadan uygulanır (Scan & Solve, 2011). 89
Şekil 3.15 : Başarım tabanlı mimari geometride malzeme / matematiksel eğri fonksiyonları (Yazıcı ve Tanaçan, 2012). 90
Şekil 3.16 : Başarım tabanlı mimari geometride malzeme / analiz (Yazıcı ve Tanaçan, 2012). 90
Şekil 3.17 : Başarım tabanlı mimari geometride malzeme / Panellerin düzlemsellik analizi (Yazıcı ve Tanaçan, 2012). 91
Şekil 3.18 : Başarım tabanlı mimari geometride malzeme / Sınır koşulları ve yüklemelerin oluşturulması (Yazıcı ve Tanaçan, 2012). 91
Şekil 3.19 : Başarım tabanlı mimari geometride malzeme / Strüktürel başarım benzetimi ve farklı malzemelerle karşılaştırma (a) çelik; (b) beton; (c) alüminyum (Yazıcı ve Tanaçan, 2012). 92
Şekil 3.20 : Yazar tarafından yürütülen malzeme ile mimari geometride verimlilik çalışması, sınır koşulları ve yüklemelerin belirlenmesi (2012). 93
Şekil 3.21 : Yazar tarafından yürütülen çalışmada malzeme ile mimari geometride ve strüktürel başarım benzetimi arasındaki ilişkinin sorgulanması (2012). 93
Şekil 3.22 : Yazar tarafından yürütülen panellerin strüktürel başarım üzerindeki etkisinin incelenmesi (2012). 94
Şekil 3.23 : Yazar tarafından yürütülen mimari geometri ve rüzgâr yükleri arasındaki ilişkinin CFD ile analizi (2012). 94
Şekil 3.24 : Yazar tarafından yürütülen SEY aracılığı ile klein yüzeyine uygulanan titreşim analizi ve strüktürel başarım incelemesi (2011). 95
Şekil 3.25 : Optimizasyon modeli ve diğer modellerin ilişkisi (Kato, 2010). 97
Şekil 3.26 : Strüktürel optimizasyon türleri (Kato, 2010). 100
Şekil 3.27 : " Çok fazlı malzeme optimizasyonu", "malzeme şekil optimizasyonu" ve "çok fazlı düzenleme optimizasyonu" (Kato, 2010). 101
Şekil 3.28 : ESO çözümüyle, asılı bir geometrinin, biçiminin kendi ağırlığı ile oluşturulması (Xie ve diğ, 2011). 102
Şekil 3.29 : ESO'nun asılı zincir modeliyle tasarlanan strüktürler için geliştirdiği çözümler; (a) asıl durumu ifade ederken, (b-d) ESO ile oluşturulan çözümlerdir (Xie ve diğ, 2011). 102
Şekil 3.30 : 50% ve 20% malzeme kullanımı ile verilen geometri, sınır koşulları ve yükler için en uygun ESO çözümleri (Xie ve diğ, 2011). 103
Şekil 3.31 : Serbest yüzeye atanan örüntünün geometri optimizasyonu en uygun hale getirilmesi (Dimcic, 2011). 103
Şekil 3.32 : Yapısal elemanların kalınlıklarının değiştirildiği en-kesit optimizasyonu (Guest ve Igusa, 2008). 104
Şekil 3.33 : Kromozom ve gen dizilimi örneği (Dimcic, 2011). 107
Şekil 3.34 : Düzgün çaprazlama örneği. Ebevynlerin genleri 50% oranında çaprazlanarak yavruları oluşturur (Dimcic, 2011). 107
Şekil 3.35 : Genetik algoritma akış diyagramı (Springer Images, 2012). 108
Şekil 3.36 : Taşıyıcı kesikli strüktürlerin tasarımında GA kullanımı (Kawamura ve Ohmori, 2002) 109

Şekil 4.1 : HT araçlarından, Rhino Grasshopper ile ilişkilere dayalı hesaplamalı geometri oluşturma (Yazıcı ve Tanaçan, 2010). 113
Şekil 4.2 : Yazar tarafından geliştirilen çalışmada, çift eğrilikli yüzeye kod aracılığı ile bileşen atanması (2010).....114
Şekil 4.3 : Yazar tarafından geliştirilen çalışmada, çift eğrilikli yüzeye kod aracılığı ile bileşen atanması (2010).....115
Şekil 4.4 : Yazar tarafından geliştirilen çalışmada, çift eğrilikli yüzeye bileşen atanmasını sağlayan kodun yapısı (2010). 116
Şekil 4.5 : Yazar tarafından gerçekleştirilen çalışmada, çift eğrilikli bir yüzeyin eğrisellik analizi gerçekleştirilmiştir (2010). 117
Şekil 4.6 : Yazar tarafından gerçekleştirilen çalışmada, çift eğrilikli bir yüzeyin pürüzsüzlük analizi gerçekleştirilmiştir (2010). 117
Şekil 4.7 : Yazar tarafından gerçekleştirilen malzeme ile mimari geometride verimlilik / biçim bulma konularının incelenmesi (2012). 118
Şekil 4.8 : Yazar tarafından gerçekleştirilen malzeme ile mimari geometride verimlilik / biçim bulma konularının incelenmesi (2012) (a) Yüzeyin eğrilik analizi (b) Yüzeyin geometrik yapısı. 119
Şekil 4.9 : "Çift Eğrilikli Yüzeyin Malzemeleşme Süreci ile Optimizasyonu " çalışması kapsamında hesaplamalı yüzey oluşturma (Yazıcı ve Tanaçan, 2010).....119
Şekil 4.11 : "Çift Eğrilikli Yüzeyin Malzemeleşme Süreci ile Optimizasyonu" çalışmasına malzeme ve panel boyutları arasındaki ilişkinin sorgulanması (Yazıcı ve Tanaçan, 2010). 129
Şekil 4.12 : UML sınıf diyagramlarındaki gösterimlerin anlamları. 124
Şekil 4.13 : MBHT-m için geliştirilmiş, UML sınıf diyagramlarında kullanılan, C^{++} gösterim dilindeki veri tiplerinin anlamları. 126
Şekil 4.14 : Blob Duvarı duvar bileşenlerinin oluşturulması (Lynn, 2009).....130
Şekil 4.15 : Eklemeli üretim yöntemiyle oluşturulan Radiolaria Pavyonu (D-Shape, 2010). 130
Şekil 4.16 : Betonun RP uygulamalarında kullanımı (Lim ve diğ, 2012). 131
Şekil 4.17 : Stuttgart Üniversitesi 2010 Araştırma Pavyonu (ICD/ITKE, 2010). ...131
Şekil 4.18 : Uçuş montajlı mimarlık (Gramazio & Kohler, 2011). 132
Şekil 5.1 : MBHT-m için geliştirilmiş UML diyagramlarının, kendileri arasında ve kullanıcı arayüzü, veri tabanı tablosu ve kullanıcıya sunulan raporla ilişkilendirilmesi. 134
Şekil 5.2 : MBHT-m için geliştirilmiş, aralarında bağımlılık ilişkisi bulunan beş modülü temsil eden UML paket diyagramı. 135
Şekil 5.3 : MBHT-m için geliştirilmiş, beş modül ve düşey eksende etkinliklerinin zamanlamalarını gösteren UML sıralama diyagramı. 136
Şekil 5.4 : MBHT-m için geliştirilmiş, iş akışını kullanıcının adımlarıyla gösteren UML etkinlik diyagramı. 137
Şekil 5.5 : MBHT-m için geliştirilmiş, kullanıcı modülünü gösteren, C^{++} gösterim diliyle oluşturulmuş UML sınıf diyagramı.....138
Şekil 5.6 : MBHT-m için geliştirilmiş, veri tabanı modülünü gösteren, C^{++} gösterim diliyle oluşturulmuş UML sınıf diyagramı. Veri tabanında malzeme konusu, modelin ileride ek görevler yerine getirmesi olasılığı düşülerek detaylı olarak ele alınmıştır.....139-140
Şekil 5.7 : MBHT-m için geliştirilmiş, benzetim modülünü gösteren, C^{++} gösterim diliyle oluşturulmuş UML sınıf diyagramı.....142

Şekil 5.8 : MBHT-m için geliştirilmiş, optimizasyon modülünü gösteren, C^{++} gösterim diliyle oluşturulmuş UML sınıf diyagramı. 143
Şekil 5.9 : MBHT-m için geliştirilmiş, raporlama modülünü gösteren, C^{++} gösterim diliyle oluşturulmuş UML sınıf diyagramı. 144
Şekil 5.10 : MBHT-m için geliştirilmiş, "Malzeme Seçimleri" ile ilgili kararların alındığı kullanıcı arayüzü. 145
Şekil 5.11 : MBHT-m için geliştirilmiş, "Kullanıcı Kısıtlamaları ve Konum" ile ilgili kararların alındığı kullanıcı arayüzü. 146
Şekil 5.12 : MBHT-m için geliştirilmiş, "Mimari Geometri" ile ilgili kararların alındığı kullanıcı arayüzü. 148
Şekil 5.13 : MBHT-m için geliştirilmiş, "strüktür, üretim teknolojisi ve montaj mantığı" ile ilgili kararların alındığı kullanıcı arayüzü. 150
Şekil 5.14 : MBHT-m için geliştirilmiş, "Strüktürel Başarım Benzetimi" ile ilgili kararların alındığı kullanıcı arayüzü. 152
Şekil 5.15 : MBHT-m için geliştirilmiş, eğrisel ve düzlemsel yüzeylere göre geometri optimizasyonundaki aşamalar. 153
Şekil 5.16 : MBHT-m için geliştirilmiş, "Strüktürel Optimizasyon ve Raporlama" ile ilgili kararların alındığı kullanıcı arayüzü. 154
Şekil 5.17 : MBHT-m için geliştirilmiş, veri tabanı tablolarının Microsoft Visual Studio yazılımında hazırlanması. 155
Şekil 5.18 : MBHT-m için Microsoft Visual Studio yazılımında tanımlanan malzeme veri tabanı. 156-157
Şekil 5.19 : MBHT-m kullanıcı işlemleri sonucu oluşturulan rapor (sayfa 1/ 2). 159
Şekil 5.20 : MBHT-m kullanıcı işlemleri sonucu oluşturulan rapor (sayfa 2/ 2). 160
Şekil 6.1 : Gelecekte farklı başarım değerlendirmelerinin yeni modüllerle MBHT-m'ye eklenmesi mümkündür. 169
Şekil D.1 : Yüzeye uygulanan vektör kuvvetinin temsili. 190
Şekil D.2 : Beton malzeme için toplam yer değiştirmelerin temsili. 190
Şekil D.3 : Beton malzeme için geometrideki tehlike derecelerinin temsili. 190
Şekil D.4 : Yüzeye uygulanan vektör kuvvetinin temsili. 193
Şekil D.5 : Beton malzeme için toplam yer değiştirmelerin temsili. 193
Şekil D.7 : Yüzeye uygulanan vektör kuvvetinin temsili. 196
Şekil D.8 : Alüminyum malzeme için toplam yer değiştirmelerin temsili. 196
Şekil D.9 : Alüminyum malzeme için geometrideki tehlike derecelerinin temsili. 196
Şekil E.1 : Geometrinin verilen sınır koşulları ve yüklemeler karşısında toplam yer değiştirmelerinin gösterimi. 199

MİMARLIKTA MALZEME TABANLI BÜTÜNLEŞİK HESAPLAMALI TASARIM MODELİ

ÖZET

Günümüzdeki profesyonel mimarlık uygulamalarında, biçimin mimari ölçekte üretilmesine yönelik olarak mühendislik çözümlerine ihtiyaç duyulur. Ancak, uygulanan mühendislik çözümleri, çoğunlukla tasarım sürecinin ilerleyen aşamalarında tasarımla bütünleştirilmektedir. Bu durumda, geri bildirimlerle sürecin başına dönülmesi ve tekrarlarla verimliliğinin düşmesi kaçınılmazdır. Buna ek olarak, bilişim teknolojilerindeki gelişmeler sonucu, Bilgisayar Destekli Tasarım (BDT) araçları mimari biçimi özgürleştirmiş, tasarımcı serbest biçimleri oluşturma yetisi kazanmıştır. Ancak bu biçimler, malzemenin getirdiği ölçütlerden bağımsız olarak, bilgisayar arayüzünde oluşturulmuş sanal bir durumu ifade etmektedir. Sayısal modele ait biçimin, hassas olarak ürüne dönüştürülmesini sağlayan Bilgisayar Destekli Üretim (BDÜ) tekniklerinin kullanımları, bazı kısıtlamalara sahip olmakla beraber günümüz mimarlık pratiğinde hızla yaygınlaşmaktadır. Ayrıca, Hesaplamalı Tasarım (HT) araçları ve yöntemleriyle doğadan ilham alınarak oluşturulan, *parametre, kural ve ilişkilerin* açıkça tanımlandığı sistemlerin yapımı, mimarlık pratiğini yeniden şekillendirecektir. Bununla beraber mimar, tasarımın temel sürücüsü olan *malzemenin* yanı sıra, *biçim* ve *başarım* (performans) kavramlarıyla eş zamanlı olarak etkileşimde bulunma olanağı bulacaktır. Bu doğrultuda, mimari tasarım sürecinin erken aşamasında kullanılmak üzere, "Malzeme tabanlı Bütünleşik Hesaplamalı Tasarım Modeli" (MBHT-m) geliştirilmiştir. Malzeme, biçim ve başarıma ilişkin tüm parametre, kural ve ilişkilerin ortaya konduğu bu modelin kullanılmasıyla, mimari tasarım sürecinde verimliliğin arttırılması amaçlanmaktadır. Yaygın olarak kullanılan bir BDT aracı Rhino uyumlu ek yazılım olarak geliştirilen model; kullanıcı, veri tabanı, benzetim (simülasyon), optimizasyon ve raporlama olmak üzere toplam beş modülden oluşmaktadır. Model mevcut durumda biçim türetme, strüktürel başarım benzetimi ve strüktürel optimizasyon için kullanılabilir. MBHT-m kapsamında, yapının ayakta durabilmesinin öncelikli olarak incelenmesi amacıyla, Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ile statik strüktürel analiz uygulanır. Bununla bağlantılı olarak, optimizasyon modülü ile strüktürel optimizasyon türlerinden olan malzeme ya da geometri optimizasyonu uygulamaları gerçekleştirilir. Malzeme, kullanıcı kısıtlamaları, konum, mimari geometri, strüktür, üretim teknolojisi, montaj mantığı, strüktürel başarım ve strüktürel optimizasyona ilişkin veriler bütünleşik bir biçimde ele alınır. Model, UML (Unified Modeling Language : Bütünleştirilmiş Modelleme Dili) kullanılarak oluşturulmuş farklı türlerde bir dizi diyagram ile sunulmuştur. Rhino uyumlu ek yazılımlarının geliştirilmesinde C^{++} programlama dilinin kullanılması sebebiyle, UML sınıf diyagramlarında C^{++} gösterim dili kullanılmıştır. Kullanıcı arayüzü, veri tabanı tabloları ve raporlar, MBHT-m için Microsoft Visual Studio yazılımı ile özel olarak tasarlanmıştır. MBHT-m, malzemeyi tasarımın sürecinin başına getirerek, tasarımın bütünleşik olarak değerlendirilmesine olanak tanır.

A MATERIAL-BASED INTEGRATED COMPUTATIONAL DESIGN MODEL IN ARCHITECTURE

SUMMARY

In parallel to the advancements in Computer Aided Design (CAD) tools, three-dimensional (3D) modeling techniques have expanded, thus the formal repertoire of architects for the built environment. Non-Euclidian geometries, such as freeform surfaces, can be implemented in various designs, varied from product to architectural design scales. For manufacturing a complex form, digital data of the 3D model can be precisely translated into a physical prototype or an actual building component via Computer Aided Manufacturing (CAM) techniques. Although CAM techniques are not fully translated into the architecture and construction industry, it is an emerging field of research to undermine related issues and accommodate various performance criteria by aiming to expand its availability in practices, such as supersizing printing technology.

Architectural design process consists of various phases. Different classifications were introduced which are mainly differing in the level of information that they include. According to the definition of Goel (1991), architectural design process runs from conceptualization to construction phases, including structuring of the problem, preliminary design, refinement, and detailing. Although preliminary design is a creative and ill-defined problem-solving process providing several alternatives, refinement and detailing phases obtain well-defined problems (Goel, 1991). In traditional architectural workflow, computational tools associated with performance simulation are utilized during a later stage of the design process following form generation in the preliminary design. These operations need expert knowledge by undertaking the tasks in general and usually run by engineering professionals.

In today's common architectural practices, form is dictated to the overall design process without considering the relationship between *material, form and performance*. The solution towards the buildability of a project is investigated usually as an engineering problem in a later stage of the process. Today, realization of complex architectural forms is mainly considered as a rationalization and manufacturing problem of architectural geometry. Norman Foster and Associates used an algorithm to tessellate the freeform shaped glazed canopy of the Great Court at the British Museum completed in 2000. Similarly, the well-known Kunsthaus project by Peter Cook and Colin Fournier was one of the early attempts completed in 2003, in which the global form is achieved via the subdivision of the surface into smaller components, so called panels. Following the pioneering works, today there are many projects uses panelization techniques as a solution for construction and this field is widely researched. CAM techniques emphasize wider attraction for implementation among architectural practices and academic environments, for mainly relatively small-scale designs, such as products or pavilions. The Nordpark Railway Station by Zaha Hadid Architects finished in 2007 was one of the initial examples obtaining an architectural function, in which whole design process is

computationally controlled from design to manufacturing. Computer Numerical Control (CNC) machine cut panels are used for manufacturing of double-curved surfaces, without a need for rationalization of the geometry a priori.

Computational design, in which problems are treated in a holistic manner, is an ongoing interest for several decades among architects and researchers. Nature is perceived as a wise operator to generate forms. Antoni Gaudi's church of Colònia Güell was based on a 1:10 hanging chain model. Gaudi showed in his experiments that neither walls nor columns are naturally vertical; they are instead complex resolutions of forces expressed such as 3D vectors (Sweeney and Sert, 1960; Burry, 2006). Later on, Frei Otto and Buckminster Fuller also used physical models to establish systems, which can be potentially translated into structurally efficient forms.

Various architectural issues can be resolved simultaneously by incorporating different *parameters, rules and relationships* of system elements in the early stage of the design process. This approach reveals the limitations on the manufacturing of architectural design in contrast to the conventional hierarchy and subsequent rationalization of the building (Menges, 2009). Parameters related to the material, structure, performance, manufacturing constraints and assembly logics are able to inform overall design process from the beginning of the process. Extending the concept of material systems by embedding their material characteristics, geometric behavior, manufacturing constraints, and assembly logics within an integral computational model promotes an understanding of form, material, structure, and performance not as separate elements, but rather as complex interrelations (Hensel and Menges, 2008).

Although various tools and methods are developed to undertake different tasks towards integration of design issues in the early stage, they obtain limitations (Chima et al, 2006; Schiftner and Balzer, 2010; Kilian, 2006; Xie et. al, 2005; Shea et. al, 2005; Whiting et. al, 2009; Oxman, 2009; ICD/ITKE, 2010; Dimcic, 2011; Cavieres et al, 2011). A holistic assessment is necessary, in which all parameters, rules and relationships related to the material, form and performance are identified, which may inform architects, designer and engineers about critical design issues in the early stage of the architectural design process.

A Material-based Integrated Computational Design Model (Malzeme tabanlı Bütünleşik Hesaplamalı Tasarım Modeli : MBHT-m) is developed for the use of early stage of architectural design. The model can be used for form generation, structural performance simulation and structural optimization purposes. MBHT-m provides static structural analysis driven by Finite Element Method (FEM), because it is crucial that a building can stand by its own. In order to generate the optimum solution, structural optimization is undertaken. Material and geometry optimization are the types of structural optimization in the model. Materials are the main drivers of the model, because the design parameters related to the user defined constraints, context (geographical location), architectural geometry, structure, manufacturing technology, assembly logics, structural performance simulation and structural optimization are interlinked to the materials. The model integrates critical design parameters in a holistic manner and increases efficiency of architectural design process.

The model can work as a plug-in for commonly used 3D CAD software, Rhino. However, MBHT-m is not limited to the Rhino and can be implemented into other

software. Rhino is chosen as a commonly used 3D modeling platform of today, however it obtains limitations. For computation of complex tasks such as structural performance simulation and optimization, mathematical methods are introduced in the model, in order to prevent calling another software to undertake the tasks.

The technique of the model is presented via series of Unified Modeling Language (UML) diagrams. UML is a general purpose modeling language in object-oriented programming, which uses data structures to design application and computer programs (McLaughlin, et. al. 2009). Package, sequence, activity and class diagrams are used to explain the model. These diagrams differ in terms of their content and function. Five modules; user, database, simulation, optimization and reporting, are developed to describe the fundamental structure of the model. Each module have a class diagram, which can be converted into code skeletons by using different notation languages, such as C^{++}, a general purpose programming language used also for writing standard Rhino plug-ins. The database module of MBHT-m contain all necessary attributes, related to the materials, user defined constraints, context, architectural geometry, structure, manufacturing technology, assembly logic, simulation and optimization, as well as their relationships to each other.

The user interface, database tables and reports are custom designed by Microsoft Visual Studio for MBHT-m. Different operations in the model, as implemented to the user interface, are material selection, user defined constraints & context, architectural geometry, structure-manufacturing technology & assembly logic, structural performance simulation and structural optimization & reporting. The user interacts with the database, simulation, optimization and reporting modules through the user interface, by identifying the inputs. Six windows are created. In the first window, the user can make the material selection from the list linked to the database or select the custom option by writing the physical and mechanical properties of a material manually. Following the material selection, user defined constraints and context of the project are specified. The form needs to be described from geometrical point of view by the user. If the form is relatively regular, it can be described as mathematical functions by assigning the variables. Alternatively, the user can select a surface, such as a free-form surface, from the screen. Identifying their variables or selecting them from the screen introduces the components. A custom script may be also assigned to undertake the form generation task. The structure, manufacturing technology and assembly logic are integrated to the model, by using the default or custom settings. Structural performance simulation, based on static structural analysis is operated by set of user decisions. In the final stage, structural optimization is operated and the reports are presented as text, graphics and screen shots to the user.

There are various possibilities for the future expansion of the research. Because the database includes comprehensive attributes related to the material and form, the model can be extended to integrate additional modules, including other performance assessments including energy, fire, acoustical, cost, ecological performances etc. Based on additional modules, the optimization and reporting modules would be redesigned associated with the assigned module. Additionally, the model can be developed further towards material design.

1. GİRİŞ

Bilişim teknolojilerindeki gelişmelerle birlikte mimari tasarım sürecinde uygulanan teknikler çeşitlenmiş, bu teknikler geçtiğimiz yüzyılın sonundan itibaren mimarlığı etkisi altına almaya başlamıştır. Bilgisayar Destekli Tasarım (BDT) araçları, mimari biçimi (form) özgürleştirerek tasarımcıya prizma, küp ve küre gibi birincil geometrilerin sınırlamaları dışında türetilmiş olan, serbest biçimleri (free-form) oluşturma yetisi kazandırmıştır. Ancak, çeşitli yüzey eğrisellik özelliklerinde ve karmaşık yapıda olabilen serbest biçimler, *malzemenin* getirdiği kısıtlamalardan bağımsız olarak bilgisayar arayüzünde oluşturulmuş, sanal bir gerçekliği ifade etmektedir. Öte yandan, son yıllarda yaygınlaşan, Bilgisayar Destekli Üretim (BDÜ) tekniklerinin mimaride kullanımı ile karmaşık sayılabilecek biçimler fiziksel çıktılara dönüşebilmektedir. Bu teknikler, barındırdıkları kısıtlamalara karşın, bilgisayar arayüzünde oluşturulan biçimin, üretimi gerçekleştirilecek yapıya hassas olarak dönüştürülmesine olanak tanır.

Kendi başına geniş bir araştırma konusu olan *mimari tasarım süreci*, sürecin yaratıcılığı nasıl etkilediği, mimari ürünün nasıl ve hangi araçlarla oluştuğu, bilginin aşamalar arasında nasıl iletildiği gibi soruların cevaplarını arar (Pak, 2009). Birçok farklı tasarım süreci tanımlaması ve türü olsa da geleneksel mimari tasarım sürecinde, sırasıyla uygulanan aşamalardan oluşan, doğrusal (lineer) bir akıştan bahsetmek doğru olur. Bu aşamalar kullanılan bilgi tipi ve detaylandırma düzeyi ile birbirlerinden farklılaşmaktadır. Türk Mühendis ve Mimarlar Odası Birliği tarafından tanımlanan mimari çizim ve sunuş standartlarına göre tasarım süreci, fikir projesi, ön proje, kesin proje ve uygulama projesi olarak dört aşamadan oluşur. Amerikan Mimarlar Enstitüsü'nün yayını olan Profesyonel Uygulamada Mimarın El Kitabı, tasarım sürecini kavramsal proje, tasarım geliştirme ve inşaat belgeleri olmak üzere üç aşamada inceler (Cryer, 1994). Bilişsel bilim alanında öncü çalışmalarını sürdüren Vinod Goel ise tasarım sürecini, problemin yapılandırılması, kavramsal tasarım, geliştirme ve detaylandırma olarak dört bölümde inceler. Goel' in tanımlandığı süreçte, mimar tasarlama işlemine kavramsal tasarım aşaması ile birlikte başlar.

Kavramsal tasarım ‘yaratıcı’ bir süreç olup, bu aşamada istenilen biçim elde edilene dek, hasta yapılandırılmış (ill-structured) tasarım seçenekleri üretilir. Bu aşamadaki eskiz gibi tasarım seçenekleri, bilgiyi *soyut* biçimde ifade ettikleri için iyi tanımlı değildir. Tasarımın geliştirme ve detaylandırma aşamalarında ise bilginin *somut* biçimde ifade edilmesi söz konusudur. Bu sebeple, iyi yapılandırılmış (well-structured) çözümler sunulur. Kavramsal tasarım ile geliştirme ve detay aşamaları, sürecin işleyişi açısından karşıtlıklar oluşturmaktadır (Goel, 1992). İlerleyen aşamalarda, tasarıma ilişkin *parametreler, kurallar ve ilişkiler* netleşir.

Günümüzde sayısal (dijital) teknolojilerin etkisi altındaki uygulamalı mimarlık, hiyerarşik bir düzende bulunmaktadır. Bilgi akışı aşamalı olarak gerçekleşir. Mimar tarafından yönlendirilen kavramsal tasarım aşamasını takip eden aşamalarda, çeşitli uzmanlık alanlarından olan kişiler projeyi farklı açılardan ele alır. Farklı meslek gruplarından olan bu kişilerin görevleri çok belirgin olarak tanımlanmıştır. Tasarım mimarların; strüktürel başarım, bina fiziği, akustik başarım ve yangın başarımı gibi uzman bilgisi gerektiren değerlendirmeler ise çoğunlukla ilgili alandaki mühendislerin yükümlülüğündedir. Mühendisler, çeşitli analiz teknikleri kullanarak mimarın tasarladığı biçimin uygunluğunu inceler ve kendi önerilerini sunar. Mevcut mimarlık pratiğinde, malzeme, strüktür ve üretim teknolojileri gibi tasarıma yön veren kısıtlamalar tasarımın ilerleyen aşamalarında, ‘yukardan aşağı’ (top down) mühendislik çözümleri olarak tasarımla bütünleştirilir. Bundan dolayı, mimari proje, tasarım sürecine dâhil olan kişilerle birlikte, süreç içindeki geri bildirimlerle, her defasında başa dönülerek, dönüşüm geçirerek farklılaşır.

Sayısal tasarım araçlarının yaygın olarak kullanıldığı günümüzde, eskiz yapma ile 3D modelleme iç içe geçmiş süreçlerdir. 3D model aracılığı ile eskiz niteliğinde birçok biçimsel deneme yapılabilir. Ancak bu biçimler, malzemeden bağımsız olarak oluşturulur. Öte yandan, Hesaplamalı Tasarım (HT) yaklaşımı, bilişim teknolojilerindeki gelişmeye paralel olarak yaygınlaşmakta ve mimarlıktaki geleneksel tasarım süreçlerine ait anlayışı tümüyle değiştirmektedir. HT yöntemlerinin mimarlıkta kullanımı, sorunları sistem bütünlüğü içerisinde çözmeyi gerektirir. Oluşturulacak sistemde parametre, kural ve ilişkiler matematiksel olarak ifade edilir. Oysaki modelleme ile oluşturulan biçimler matematiksel çözümleme yapılmaksızın, çoğunlukla sezgisel olarak ya da kullanıcının deneyimi doğrultusunda oluşturulmaktadır. HT, tasarım sürecini rasyonelleştirilerek, iyi tanımlı problemler

için çözüm sunar. Tasarıma yön veren, her türlü kısıtlama, HT ile kurgulanan, 'aşağıdan yukarı' (bottom up) olarak tanımlanan yaklaşımda, 'yukardan aşağı' yaklaşımın tersine, tasarımın en başından itibaren süreci yönlendiren aktörlere dönüştürülürler.

Neil Leach' in tanımlamasına göre, mimarlığın işleyişini inceleyen günümüz mimarlık teorisinde, genel ilgi felsefe tabanlı bir ilgiden, daha pragmatik, ancak kavramsallaştırılabilir bir malzeme ve teknoloji söylevi haline gelmiştir. Baskın hale gelen sorunlar, çevresel sürdürülebilirlik ve strüktürel başarım, genel olarak işlersellik (performativity) başlığı altında karşımıza çıkmaktadır. Günümüz mimarlığındaki değişmelerin temeli, estetik ya da stilistik değil, daha derin ve etik sorunlara dayalıdır. Örneğin, çevresel veya strüktürel bakış açısıyla binalarımızı daha az kaynak kullanarak üretmek, şüphesiz ki mimarlığın etik yapısı içine girecektir. Bu şekilde, biçim odaklı post-modernizm akımında önemsenmeyen birçok olumsuzluk ele alınmış olacaktır. Yenilikçi mimarların, tasarım sürecinde işbirliği yaptığı ve tasarıma yön veren yetenekli mühendisler, Manuel De Landa tarafından malzeme filozofları olarak tanımlanır (Wahlroos-Ritter, 2009).

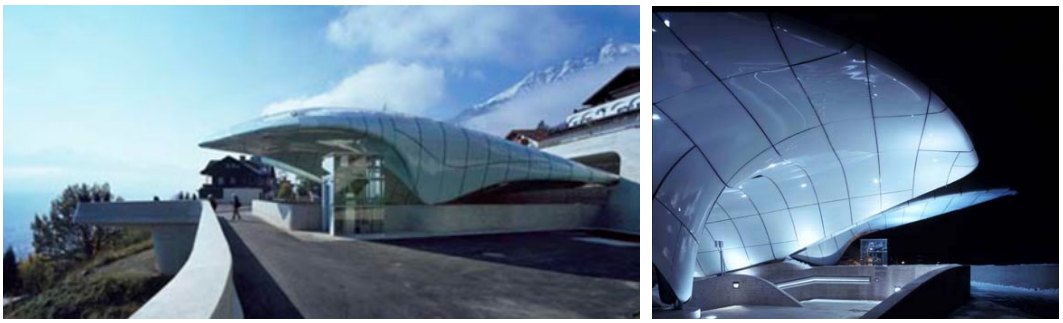
1.1 Problemin Belirlenmesi

Günümüzde sayısal tekniklerle oluşturulan her türlü mimari biçim, üretim teknolojilerindeki gelişmelere paralel olarak uygulanabilir hale gelmiştir. Ancak geleneksel tasarım sürecinde biçim; *malzeme*, dolayısıyla strüktür ile üretim teknolojilerine ilişkin kısıtlamalar gözetilmeksizin tasarımın ön evresinde oluşturulur. Projenin *nesneleştirilmesine* (materialization) ilişkin çözümler, yaygın olarak 'yukarıdan aşağı' mühendislik yöntemlerinin uygulanması ile sunulur. Serbest biçimlerin, mimari ölçekte üretiminin gerçekleştirileceği durumlarda, kullanılan malzemeye ve üretim teknolojisine bağlı olarak geometri rasyonelleştirilmesi işlemi uygulanabilir. Foster ve Ortakları tarafından tasarlanan İngiliz Müzesi avlusu ya da Peter Cook ve Colin Fournier tarafından geliştirilen Sanat Evi projelerinde, serbest biçimlerin, alt parçalara bölünerek, mimari ölçekte üretimi sağlanmıştır (Şekil 1.1). Benzer şekilde, birçok projede serbest biçimler, geometrinin panellerle alt birimlere (bileşen) bölünmesi ile oluşturulmaktadır. Öte yandan, tasarımı Zaha Hadid Mimarlık tarafından gerçekleştirilen Nordpark Tren İstasyonu projesinde, BDÜ tekniklerinden Bilgisayar sayımlı idare (Computer Numerical Control : CNC)

kullanımı, geometri rasyonelleştirilmesine ihtiyaç duyulmaksızın, üç boyutlu modelin hassas olarak mimari ürüne aktarılmasını sağlamıştır (Şekil 1.2).



Şekil 1.1 : Sanat Evi, Cook ve Fournier, Graz, 2003.



Şekil 1.2 : Nordpark Tren İstasyonu, Zaha Hadid Mimarlık, Innsbruck, 2007.

Mimari ölçekteki, serbest biçimleri parçalara bölen algoritmalar aracılığıyla, panel boyutları ve eğrilik dereceleri hesaplanabilmektedir. Panellerin düz, tek ve çift olmak üzere eğrilik dereceleri, tekrar sayısı, ölçüleri ve şekilleri bu yolla belirlenir. Geometri bileşenlerinin oluşturulması ile ilgili kararların alınmasında, mevcut biçimi korumak ve üretim teknolojisine ilişkin kısıtlamalar, malzeme özellikleri ile ilişkilidir.

Çeşitli kurumlar, geometriyi bileşenlere ayırma gerekliliğini ortadan kaldıracak hızlı prototipleme tekniklerini kullanarak, üç boyutlu yazıcılarla (3D printer), bina üretimine yönelik çalışmalar yürütmektedir. Örneğin, Behrokh Khoshnevis yönetimindeki Güney Kaliforniya Üniversitesi Hızlı Otomatik İmalat Teknolojileri Merkezi (University of Southern Californa: Center for Rapid Automated Fabrication Technologies, USC: CRAFT), hızlı prototipleme ile farklı malzemeler kullanarak bina duvarı üretmeyi başarmıştır. Bu teknikle, duvarı oluşturan metal donatı, tesisat sistemleri, elektrik sistemleri, fayans ve tuğla döşemeleri otomatik olarak üretilebilir. Hızlı prototipleme ilgili çalışmalar henüz deneysel nitelikte olup, geliştirilmesi yönünde araştırmalar devam etmektedir.

Günümüz mimarisinde BDÜ teknikleri, çoğunlukla küçük ölçekli mekânlar, ürün ve mobilya tasarımı, iç mekân bölmeleri, sergi üniteleri gibi uygulamalarla karşımıza çıkmaktadır. BDÜ tekniklerinde kullanılan malzemelerin sınırlı oluşu, makina düzeneklerinin getirdiği ölçek kısıtlamaları, maliyet ve ülkemiz de dâhil olmak üzere, şu an itibariyle pek çok ülkede fazla yaygın ve ulaşılabilir olmayışları, bu tekniklerin mimari ölçekte yaygın olarak kullanılmasına engeldir. Ancak bu durum hızla değişmektedir.

Mimari tasarım, bina gibi karmaşık problemlere çözüm üretmek için çalışmaktadır. Mimar, tasarım sürecinin farklı aşamalarında, çok sayıda parametreyi değerlendirmekle yükümlüdür. Mimari projede değişiklikler ve geri dönüşlerin kaçınılmaz olduğu geleneksel tasarım süreci, tasarımda verimliliği düşürmektedir. Acaba *malzeme, biçim ve başarıma* ilişkin *parametre, kısıtlama ve ilişkiler* tasarım sürecinin başında nasıl ortaya konabilir? Mimarın, tasarım sürecindeki etkinliğini ve farkındalığını arttırarak, süreci verimli hale getirebilecek bir yöntem uygulanabilir mi?

1.2 Konu İle İlgili Çalışmalar

Tasarım sürecinde *malzemenin* öncü olarak değerlendirilmesi, ilk olarak mimarlar ve mühendisler tarafından "en uygun" biçimi bulma, yani bir *optimizasyon* aracı olarak, fiziksel modellerde kullanılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Tasarım sürecinde malzemenin, önemli bir aktör olarak karşımıza çıktığı diğer alan ise, bir mühendislik paradigması olan başarım (performans) benzetimleridir (simülasyon). Günümüzde, HT' nin her geçen gün daha yaygın olarak tasarım sürecinde kullanılmasıyla *malzeme, biçim ve başarım* ilişkileri, *optimizasyon* süreçleriyle beraber ele alınmaktadır. Bu konuda yapılan çalışmalar bu bölümde detaylı olarak incelenmiştir.

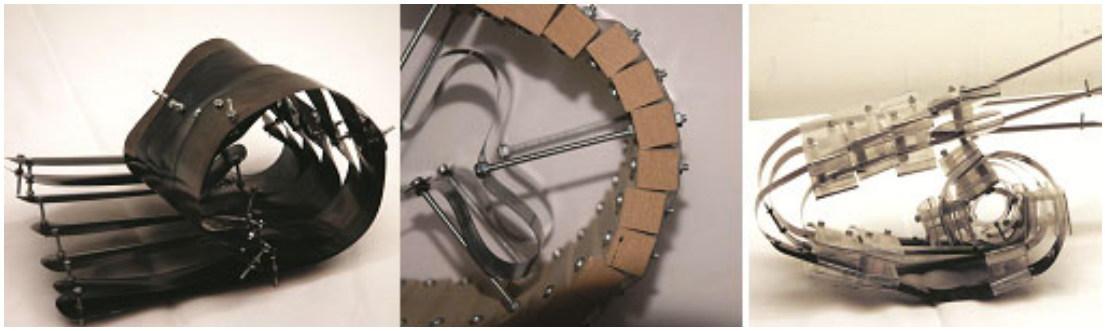
1.2.1 Malzeme, biçim ve başarım ilişkisi

Malzeme, biçim ve başarım birbirleriyle yakından ilişkilidir. Malzeme özellikleri, yapının strüktürel başarımını, hangi kuvvetleri taşıyabileceğini ve hangi elemanların tasarımı için uygun olduklarını belirler. Örneğin, taş, tuğla gibi kolay bulunan ve yaygın kullanılan malzemeler, bilindiği gibi basınç dayanımı yüksek olan yığma yapıların tasarlanmasına imkân verir. Bu sebeple, kemer ve kubbe morfolojileri, eski yıllardan günümüze tercih edilen uygulamalar olarak karşımıza çıkar. Yaygın diğer

bir örnek ise, betonun kalıplanması sonucu kolayca biçimlendirilebilmesiyle, ince taşıyıcı kabuklar oluşturabilmesidir.

Malzeme özellikleri üzerinden mimari biçim bulma, fiziksel model tabanlı olabildiği gibi sayısal model tabanlı da olabilmektedir. Sayısal araçlar ile tanımlanan malzeme biçimlemeleri, fiziksel model özelliklerinin gözlemlenmesi ile oluşturulur. Buna ek olarak malzeme ile ilişkili olarak, üretim teknolojisinin getirdiği kısıtlamalar da tasarım sürecine katılabilir. Örneğin, fiziksel model davranışları, HT araçlarıyla sayısal olarak tanımlanabilmektedir. Diğer yandan, yenileşimci mimarlık uygulamalarında 3D modelin mimari ölçekte üretilmesine ilişkin çalışmalar yapılmaktadır. Konu ile ilgili öncü nitelikteki çalışmalar şöyledir:

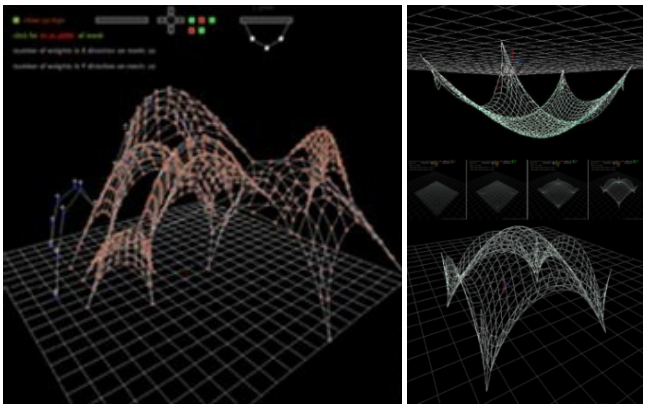
"Zero.1" araştırma grubunun geliştirdiği İki Kararlı Yapılar çalışması malzeme aracılığı ile biçim bulmaya örnektir. Çalışmanın ilk aşamasında, iki kararlı yapıda kullanılan özel çelik türünün incelenmesi, çelik şeritlerin farklı dizilimlerle, bağlantılarla ve farklı malzemelerle bir araya getirilmesi fiziksel modeller aracılığıyla gerçekleştirilir. Sonraki aşamada ise, malzeme özellikleri, hesaplamalı modele aktarılarak, benzetimler aracılığıyla malzeme sistemi yeniden oluşturulur. Bu şekilde, tanıtılan özel çelik türü için başarımı etkileyen malzeme özellikleri ve ortam koşulları sayısal olarak yönetilebilir hale gelir (Chima ve diğ, 2006) (Şekil 1.3).



Şekil 1.3 : İki Kararlı Yapılar (Chima ve diğ, 2006).

"Mimari Geometrinin Rasyonelleştirilmesi (MGR)" konusu bazı araştırma grupları tarafından kapsamlı olarak ele alınmaktadır (Pottman ve diğ, 2008) (Eigensatz ve diğ, 2010; Schiftner ve Balzer, 2010; Bobenko ve diğ, 2006). MGR bileşenlere bölme problemi olarak karşımıza çıkmaktadır. Değişik projeler için çeşitli algoritmalar geliştirilmektedir. Farklı malzemelerin, başarım ve üretim teknolojisine ait kısıtlamaların, mimari geometriyi bileşenlere bölen hesaplamaya dâhil olması gerekmektedir (Pottman ve diğ, 2008).

"Biçim Bulmaya yönelik Araç ve Yöntemler (BBAY)" alanında kapsamlı çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Kilian (2006) tarafından geliştirilen model, Gaudi' nin asılı zincir modelinin, sayısal ortamda yeniden oluşturulmasına dayalıdır. Malzeme ve biçim arasındaki ilişki, asılı zincir model benzetimi ile sınanır. Kilian modeli, aynı zamanda BDÜ teknikleri kullanılarak oluşturulacak olan, yeni fiziksel prototipin (ilk örnek) üretim planını da benzetim sürecine dâhil etmektedir. Bu şekilde, fiziksel ve sayısal modelin bütünleştirilmesi sağlanmış olur (Şekil 1.4).



Şekil 1.4 : Asılı zincir modeli benzetimi (Kilian, 2006).

Mimarlıkta biçim; görsel, programsal, işlevsel, teknik ve çevresel gibi birçok gereklilikleri karşılama yükümlüdür. Malzeme seçimleri ve biçimsel örgütlenme, strüktürel başarım benzetimlerinde önemli rol oynar. Serbest biçimler de dâhil olmak üzere her türlü biçimin strüktürel başarımı Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) kullanılarak değerlendirilebilir. SEY, mühendislik problemlerine yaklaşık sonuçlar getiren hesaplamalı bir tekniktir. Evrimsel Strüktürel Optimizasyon (Evolutionary Structural Optimization : ESO) tekniği karmaşık yapıların kavramsal biçimlerini oluşturmak için kullanılır. ESO ile SEY kullanılarak biçimin küçük parçalara bölünmesi ve fazlalıkların çıkartılması ile optimal (en uygun) çözüme ulaşılması sağlanır (Xie ve diğ, 2005) (Şekil 1.5). Benzer şekilde, Çift Yönlü Evrimsel Strüktürel Optimizasyon (Bi-directional Evolutionary Structural Optimization : BESO) ile biçimde gerekli görülen yerlere hem ekleme ve hem de çıkarma yapmak mümkündür (Xie ve diğ, 2005) (Xie ve diğ, 2011). ESO ve BESO, topoloji optimizasyonu gerçekleştirerek verimli strüktürler oluşturmak üzere kullanılmaktadır.



Şekil 1.5 : ESO yöntemi (a) ilk tasarım (b) ESO çözümü (c) Gaudi'nin çözümünün fotoğrafı (Xie ve diğerleri, 2005).

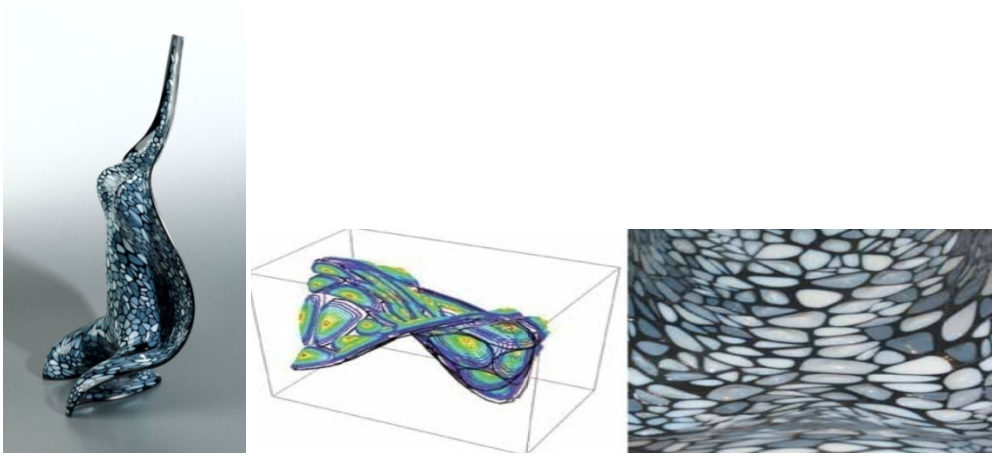
Bir hesaplamalı tasarım ve optimizasyon aracı olan EifForm, bütünleşik geometri ile başarım tabanlı üretken tasarım arasındaki ilişkiyi ortaya çıkarma olanağı sunar. Makas sisteme (truss system) dayalı strüktürel organizasyon, farklı tasarım koşullarına uyum sağlayabilmektedir (Shea ve diğ, 2005) (Şekil 1.6).



Şekil 1.6 : EifForm (Shea, 2005).

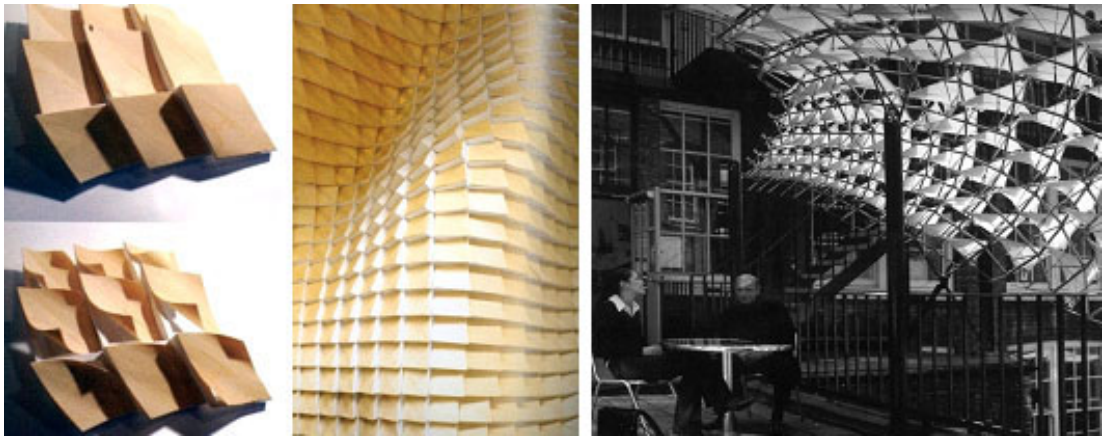
Yığma Strüktürler için Geliştirilmiş Yöntem (YSGY), fiziksel kısıtlamaların belirlenmesiyle yığma yapılarda optimal biçimin bulunmasına dayalıdır. Kullanıcı YSGY'yi kullanarak, mimari stil kurallarını belirleyip, az sayıdaki bağımsız parametreyi tanımlar (Whiting ve diğ, 2009).

"Voronoy Sonlu Elemanlar Yöntemi (Voronoi Finite Element Method : V-FEM)" geometrinin bütününü oluşturan parçaları malzeme başarımına bağlı olarak meydana getirir. Malzeme, biçim ve başarıma eşit derecede önem verilir. Malzeme özelliklerinin ortaya konmasına ilişkin olarak SEY tabanlı bir analiz yöntemi tanıtılmıştır. Bu yöntem malzemenin mekanik özellikleri ile diğer özelliklerinin biçim oluşturma sürecine dâhil edilmesine olanak tanır (Şekil 1.7). Bu çalışma kapsamında, ürün ölçeğine yönelik olarak geliştirilmiş olan, özel bir 3D eklemeli (additive) üretim tekniği sunulmuştur (Oxman, 2009).



Şekil 1.7 : V-FEM (Oxman, 2009).

Menges' in (2008) altını çizdiği, mimarlıkta malzeme bütünlüğü (material gestalt) tasarım parametrelerini bütünleşik bir sistem olarak ele alır. Malzeme özellikleri, biçim, geometrik davranış, üretim kısıtlamaları, montaj mantığı ve strüktür ayrı olarak incelenmez. Tüm parametreler karmaşık ilişkilere sahip bir sistemin parçalarıdır. Malzeme sistemleri, bütünlüğünü kaybetmeden çevresel etkenlerle etkileşir. Termodinamik, ışık, akustik gibi çevresel etkenler ile strüktürel özellikler, sistemin verimliliğini arttırmak üzere şekillendirilir. Bu yöntem, doğayı, aynı zamanda tasarım sürecindeki hiyerarşiyi zorlarken, tamamıyla sayısal olarak kontrol edilen HT yöntemleriyle uygulanır. Buna göre malzeme sistemleri, standart bina sistemlerinin ve elemanlarının türevleri değil, tasarım sürecine yön veren üretken sürücülerdir (Hensel ve Menges, 2008). Bu yöntem, farklı malzeme sistemlerinin denendiği çalışmalarda uygulanmıştır (Şekil 1.8). Malzeme, biçim ve başarım arasındaki ilişkiyi ortaya çıkaran uygulanmış projeler; malzeme tabanlı hesaplamalı tasarım, benzetim ve üretim süreçlerindeki gelişmeleri yansıtmaktadır. Menges ve Knippers yürütücülüğünde Stuttgart Üniversitesi'nde geliştirilen "ICD/ITKE" (Institute for Computational Design / Institute of Building Structures & Structural Design) 2010 Araştırma Pavyonu, yenileşimci (inovatif) tasarım ve üretim teknolojilerinin bütünleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Tasarım modeli, SEY analizi ve CNC makinası arasında kapalı bir sayısal bilgi döngü oluşturulmuştur (Şekil 1.9). Projenin yapım sürecinde farklı uzmanlık alanlarından kişiler sürece katılmıştır.



Şekil 1.8 : Malzeme sistemleri (Menges, 2008).



Şekil 1.9 : Stuttgart Üniversitesi 2010 Araştırma Pavyonu (ICD/ITKE, 2010).

"Dimcic" (2011) tarafından sunulan Rhino uyumlu ek yazılımda, birçok tasarım parametresi bütünleşik olarak ele alınmış, SEY aracılığı ile serbest biçimlerin geometri optimizasyonu gerçekleştirilmiştir (Dimcic, 2011). Bu çalışma, serbest biçimlerin panellere bölünmesinde çeşitlilik sağlayıp, katkı sağlarken; üretim teknolojileri ve montaj mantığı ile farklı malzeme ve strüktür türleri için çözüm üretmede yetersiz kalmaktadır.

"Yapı Enformasyon Modellemesi (YEM)" araçlarının, tasarım sürecindeki yararlarının belirlenmesi önemlidir (Schlueter ve Thesseling, 2009). Geleneksel tasarım ve yapım yöntemlerinin tersine, YEM tasarım sürecinde oluşturulan tek bir veri tabanı aracılığı ile farklı disiplinlerden projeye dâhil olan ve özelleşmiş konularda çalışan uzman kişiler arasında bilgi akışı sağlar (Cheung, 2012). Ancak YEM araçlarının erken tasarım aşamasında uyumluluk ve bütünleşmeyi fazla sağlayamadıkları incelenmiştir (Cavieres ve diğ, 2011). Mevcut benzetim araçları

uzman bilgisi gerektirmektedir. Bundan dolayı bu işlem çoğunlukla tasarımın ilerleyen aşamasında uygulanmakta ve tasarımın karar verme sürecine dâhil olamamaktadır (Schlueter ve Thesseling, 2009). Başarım değerlendirme geribildirimleri arasında oluşan zaman kaybını önlemek için, tasarım görevinin birden çok kritere göre şekillendiği bütünsel bir değerlendirmeye ihtiyaç duyulmaktadır (Cheung ve diğ, 2012).

1.2.2 Hesaplamalı yöntemlerle farklı alanda yapılmış çalışmalar

HT yöntem ve araçlarının kullanımının ülkemiz de dâhil olmak üzere yaygınlaşmasıyla, mimarlık pratiğinde ve akademik çevrelerde, sorunları sistem bütünlüğü içerisinde çözmeyi gerektiren bir tasarım anlayışı doğmuştur. Buna ek olarak, tasarım sürecin besleyen farklı alanlarda da hesaplamalı yöntemler kullanılmaktadır. Hesaplamalı yöntemler kullanılarak, iklimsel başarım ve optimizasyon ile binalarda acil durum davranışıyla hareketine dayalı modeller oluşturulmasına yönelik olarak tez araştırmaları gerçekleştirilmiştir (Yaşa, 2010; Alp, 2011). Ayrıca yüksek binaların kent siluetine etkisinin değerlendirilmesi için coğrafi bilgi sistemi tabanlı bir yöntem geliştirilmiştir (Akdağ, 2011). Bu çalışmalar, farklı kapsamdaki sorunlara çözüm üretmek için sunulmuşlardır.

Mevcut çalışmaların, biçim türetme ve çözüm sunma açısından kısıtlamaları bulunmaktadır. Henüz, mimarlıkta *malzeme, biçim ve başarımın* bütünleşik olarak ele alındığı bir model mevcut değildir. Bu tez, mevcut açığın kapatılmasını öngörmektedir.

1.3 Tezin Amacı

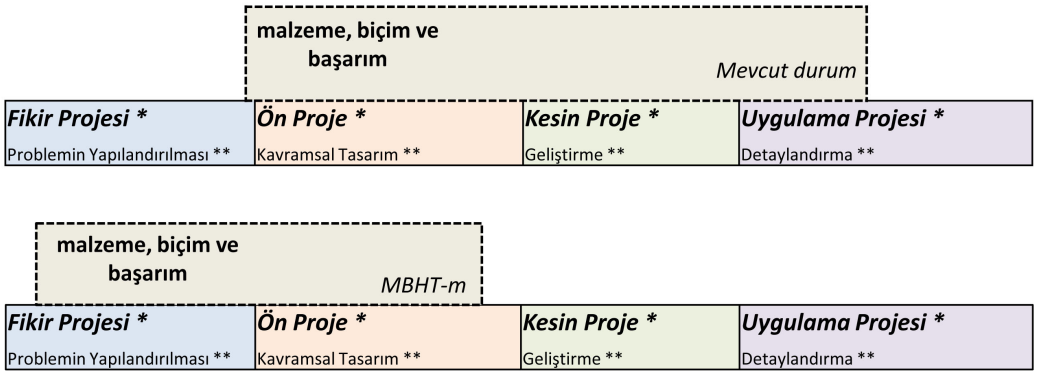
Tasarımın gerçekleştirilmesini takiben, nesneleştirilmesi, mimarlar ve mühendisler tarafından geleneksel mimarlık tasarım sürecinin farklı aşamalarında ele alınır. Günümüzde, mimar tarafından tasarımın tamamlanmasıyla ortaya çıkan biçim, mühendislik mesleği uzmanlarınca analiz edilerek en uygun duruma (optimizasyon) getirildikten sonra nesneleştirilmektedir. Bu durumun bazı sakıncaları vardır:

- Analiz sonuçlarına göre yenilenen verilerle, mimari biçimin sürekli olarak güncellenmesi gerekliliği doğar. Bu da iş gücünün verimli kullanılmamasına ve zaman kaybına neden olur.

- Mimar ve mühendislerin farklı tasarım eğilimleri bulunmaktadır. Bu, tasarımı etkileyen kararların alınmasında tatminsizlik doğurabilir. Tasarımın bütünsel bir sistem olduğu düşünülürse, yapıda verilen kararların tümü mimarın kontrolünde olmalıdır.
- Tasarımın ilerleyen evrelerinde mühendislerin sürece dâhil olması ve bu alandan gelen yeni parametrelerin tasarıma katılmasıyla tasarım bütünsellikten uzaklaşır.

Bu çalışmada amaçlanan, tasarımın nesneleştirilmesine ilişkin sorunları, tasarım sürecinin başına getirerek, mimar, tasarımcı ve mühendislerin, biçim türetme (form generation) ve biçimin üretimine (form manufacturing) ilişkin süreçlerle eş zamanlı olarak etkileşimde bulunmasına olanak tanımaktır. Bu şekilde, *malzeme, biçim* ve *başarım* arasındaki ilişkinin açıkça ortaya konması olanaklı olacaktır.

Mevcut durumda malzeme, biçim ve başarıma ilişkin kararlar tasarımın ileri aşamalarında Fikir Projesi'ni takiben Uygulama Projesi' ne dek olan süreçte alınır. Önerilen modelde ise bu kararların tasarımın erken aşamaları olan Fikir Projesi ve Ön Proje' de belirlenmesi öngörülmektedir. “Mimarlıkta Malzeme Tabanlı Bütünleşik Hesaplamalı Tasarım Modeli’nin” (MBHT-m) tasarımın erken aşamalarında kullanılmasıyla, iyi tanımlı *parametre, kural ve ilişkilerin* belirlenerek, başarım değerlendirmesi ve optimizasyon uygulamalarının tasarım sürecinin başına getirilmesi amaçlanmaktadır (Şekil 1.10). Bir binanın değerlendirilmesinde farklı başarım ölçütleri rol oynayabilir. Bu tezde, öncelikli olarak binanın ayakta durmasını sağlayan *statik strüktürel* başarım ele alınmıştır. *Malzemenin* temel sürücü olduğu, *parametrelerle* oluşturulmuş, *kuralların* ve *ilişkilerin* açıkça olarak ortaya konduğu bir modelde, mimari geometri, strüktür, üretim teknolojileri ve montaj mantığı gibi malzemeyle bağlantılı tüm veriler bütünleşik olarak değerlendirilebilir. Modelin, biçim türetme, strüktürel başarım benzetimi ve strüktürel optimizasyon için kullanılması öngörülmekte ve mimarlık alanında yaygın olarak kullanılabilecek bir yazılıma dönüşmesi hedeflenmektedir.



* Türk Mühendisler ve Mimarlar Odası Birliği tarafından tanımlanan mimari çizim ve sunuş standartlarına göre düzenlenmiştir.
** Vinod Goel (1992) tarafından tanımlanan mimari tasarım süreci

MBHT-m: **M**alzeme tabanlı **B**ütünleşik **H**esaplamalı **T**asarım **m**odeli

Şekil 1.10 : MBHT-m'nin mimari tasarım sürecindeki yeri.

MBHT-m ile biçim türetme, başarım değerlendirmesi ve optimizasyon uygulamaları gerçekleştirilebilir. Modelin öncelikli olarak mimar ve tasarımcılar tarafından kullanılması öngörülmektedir. Gerekli görüldüğü durumlarda yapı mühendisleri tarafından da kullanılabilir. Biçim türetme konusunda uzman olan mimar ve tasarımcılar, çoğunlukla mühendisler tarafından yürütülen başarım değerlendirmesi ve optimizasyon konularında yeterli bilgi birikime sahip olmayabilir. Bu sebeple, model kapsamındaki başarım değerlendirmesi ve optimizasyon uygulamalarının sadeleştirilerek, sadece kritik verilere çalışacak biçimde kullanıcıya sunulması amaçlanmaktadır.

Malzeme, biçim ve başarım arasındaki ilişkinin ortaya konması ve ilgili verilerin problem çözümüne yönelik olarak modele dâhil edilmesi ile:

- Tasarım sürecinde, iş gücü verimliliği arttırılarak, zaman tasarrufu sağlanacaktır. Model, tasarıma ilişkin problemlerin çözümüne yönelik olarak, tasarımın erken aşamasında bütünleşme sağlamaya yönelik olarak geliştirilmiştir.
- Disiplinler arası alanlara ait biçim türetme, başarım değerlendirmesi ve optimizasyon gibi uygulamaların tek bir modelde toplanması, kuşkusuz ekip çalışmasına da önemli katkı sağlayacaktır. Tasarımı etkileyen parametre, kural ve ilişkiler tasarım sürecinin en başında ortaya konduğu için, ekipler arası koordinasyon erken aşamada, doğru şekilde sağlanacaktır.

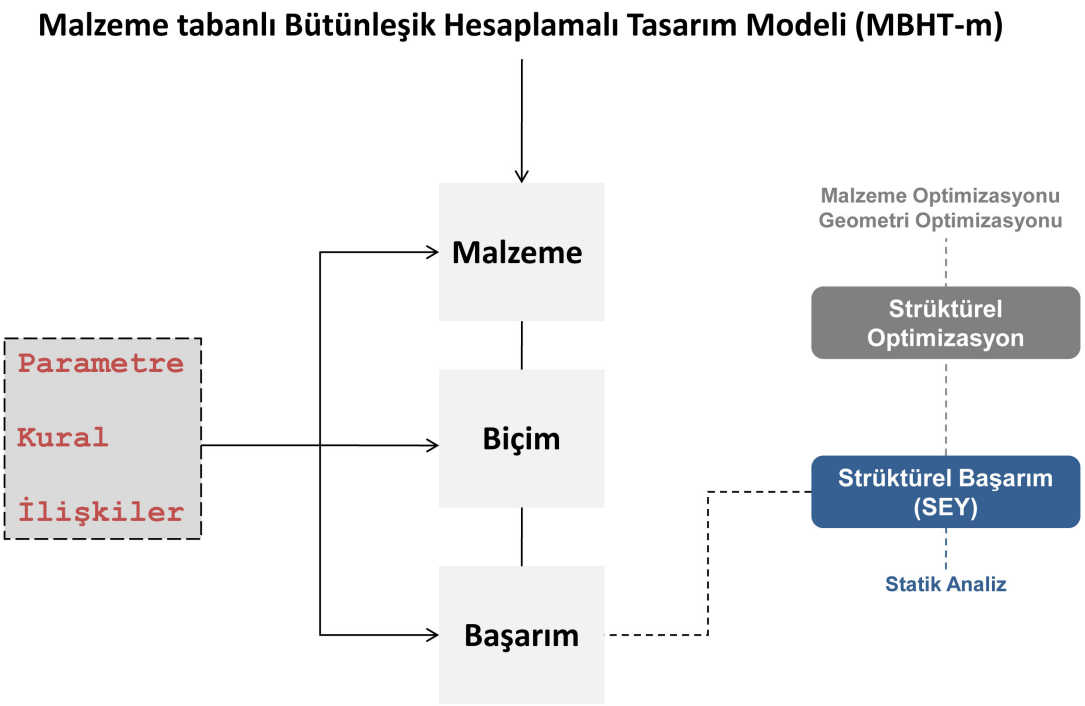
- Mimarın farkındalığı artarak, yapıyı oluşturan her eleman, mimarın yaklaşımını yansıtacaktır.
- Malzeme, biçim ve başarım arasındaki ilişki mimar tarafından yeniden yorumlanacaktır.
- Tasarım sürecinin başında tüm gerekli parametreler ortaya konarak, en uygun seçenekler üretilecektir.

Erken aşamada iyi tanımlanmış parametre, kural ve ilişkilerle oluşturulmuş tasarım, sorunların bütünleştirilmesine olanak tanırken, tercih edilmeyeceği durumlar da olabilir. Örneğin tasarımın erken aşamada dondurulmasıyla, mimar ya da tasarımcının farklı tasarım seçeneklerini değerlendirmesine engel olunduğu savunulabilir. Özellikle kavramsal tasarımda malzemeden ve başarımdan bağımsız olarak, özgürce biçime ait seçenekler oluşturulması tasarımcı tarafından tercih edilebilir. Tez kapsamında öne sürülen MBHT-m, tasarımın yaratıcı bir süreç olduğu göz önüne alınarak oluşturulmuştur. Kullanıcıya tasarımda esneklik sağlayan seçenekler sunulması hedeflenmiş, gerekli görüldüğünde başarım değerlendirmesi ve optimizasyon gibi adımların atlanabilmesi mümkün hale getirilmiştir.

1.4 Tezin Kapsamı

Tezde önerilen MBHT-m, *malzeme, biçim* ve *başarım* arasındaki ilişkiyi sistemsel bir yaklaşımla ele alır. Bu kapsamda, modeldeki girdi, süreç ve çıktılar tanımlanır.

Yaygın olarak kullanılan BDT aracı "Rhino" için, uyumlu ek yazılım (plug-in) olarak uygulanması öngörülen model; kullanıcı, veri tabanı, benzetim, optimizasyon ve raporlama olmak üzere beş modülden oluşmaktadır. Kullanıcı, özel tasarlanan arayüz aracılığı ile veri tabanına bağlı listeler ya da ekrandan kendi belirledikleri üzerinden seçimler yapar. Tüm parametrelerin ve ilişkilerin açıkça ortaya konduğu veri tabanı modülünde, araştırmanın ilerleyen aşamalarında modele eklenebilecek farklı görevler düşünülerek, özellikle malzemeye yönelik olarak oldukça kapsamlı ele alınmıştır. Tezin kapsamının sınırlandırılması adına; benzetim modülü, SEY kullanımı ile yalnızca *statik strüktürel analiz* ve optimizasyon modülü ise strüktürel optimizasyon türlerinden olan, *malzeme ve geometri optimizasyonu* uygulamalarında kullanılmak üzere tasarlanmıştır (Şekil 1.11).



Şekil 1.11 : MBHT-m'nin kapsamı.

Model kapsamındaki strüktürel başarım ve strüktürel optimizasyon modüllerinin, başka bir yazılıma ihtiyaç duyulmadan modelle bütünleştirilmesi öngörülmektedir. MBHT-m'nin yazılıma dönüşme sürecinde; mimarlık, mekanik mühendisliği ve yazılım mühendisliği alanlarını içine alacak şekilde disiplinler arası alanda bir çalışma yürütülmesi uygundur. Mevcut çalışmalar incelenerek, başarım ve optimizasyon işlemlerinin çözümünde seçilen yöntemlerin modelle bütünleştirilmesinin uygun olacağı kabulü yapılmıştır. Bunlar, SEY ile Statik Analiz çözümünde Ağırlıklı Kalıntılar Yöntemi (Weighted Residuals Method) ile Malzeme ve Geometri Optimizasyonu için sırasıyla Eğim Tabanlı Optimizasyon (ETO) ve Genetik Algoritmalardır (GA). Mevcut çalışmalar ışığında, başarım ve optimizasyon işlemlerinin çözümünde önerilen bu yöntemlerin en iyi şekilde işleyeceği varsayımı yapılmaktadır (Madenci ve Güven, 2006; Kato, 2010; Dimcic, 2011).

Araştırmanın ilerleyen aşamalarında statik strüktürel başarımın yanında, farklı türde başarım analizleri gerçekleştirebilecek modüllerin modele eklenmesi düşünülmektedir. Bu kapsamdaki ek modüller için; örneğin ısıl bölgelerin oluşturulması, ısı kazanç ve kayıplarının, soğutma ve ısıtma enerjilerinin hesaplanması için "EnergyPlus" ve "Autodesk Vasari", akustik başarım için "Adem" ve "Aurora", yangın başarımı için "PyroSim" , maliyet başarımı için "Nemetschek

Allplan", rüzgar gibi her türlü sıvı akışının malzeme ve biçime etkisini ölçmekte kullanılan Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (Computational Fluid Dynamics : CFD) aracı "Fluent" gibi farklı yazılımların ekrana çağırılması mümkündür. Modelin yeni görevler üstlenmesiyle, optimizasyon ve raporlama modülleri de farklılaşacaktır.

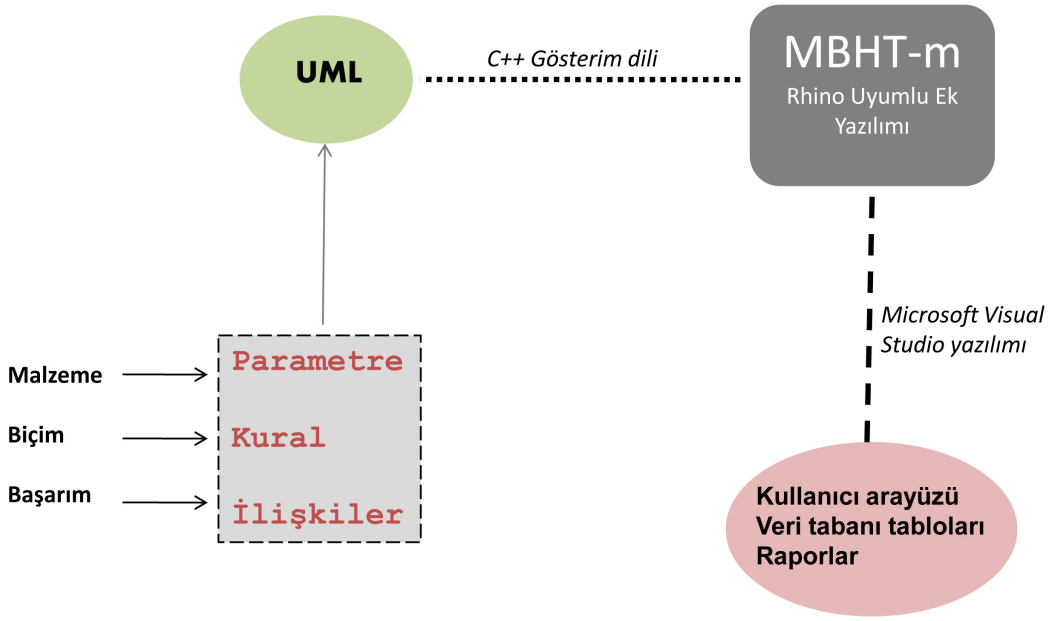
MBHT-m'yi oluştururken belirlenen parametre, kural ve ilişkiler modele özgüdür ve modelin kısıtlamalarını oluşturmaktadır. Malzeme, biçim ve başarım üçlüsünü bütünleşik olarak değerlendirmede ortaya konan bu parametre, kural ve ilişkiler, konu alanında yapılan örnek çalışmalar ışığında oluşturulmuştur.

1.5 Tezin Yöntemi

Tezin yöntemini, literatür çalışması ile modele ilişkin kavramsal ve sayısal çalışmalar oluşturmaktadır.

Teze ilişkin öncelikli olarak literatür çalışması gerçekleştirilmiştir. Bununla beraber tezin kavramsal altyapısı oluşturulmuştur. Yazar tarafından yürütülen sayısal çalışmalarda, konunun derinlemesine incelenmesi ve anlaşılması hedeflenmiştir. MBHT-m' nin geliştirilmesi için HT yöntem ve araçlarının yanında, doğadan ilham alan yöntemlerden yararlanılmıştır. Aynı süreçte, İTÜ Mimarlık Fakültesi bünyesinde, Çağdaş Yapı Malzemeleri Dersi kapsamında, yazar tarafından yürütülen Malzeme Biçimlemeleri Çalıştayı, malzemenin tasarım sürecinin başına getirilerek ve sorunların sistem bütünlüğü içinde ele alındığı bir yöntem olarak uygulanmıştır. Bir mimar olan yazarın, günümüzde daha çok yenileşimci mühendislik uygulamalarının analiz yöntemi olarak kullanılan, SEY'in genel işleyiş prensiplerinin kavranıp, uygulamaya koyması araştırmanın önemli bir ayağını oluşturmaktadır. Strüktür konusunun derinlemesine işlenmesi, malzeme, biçim ve başarım ilişkisinin ortaya konmasını sağlamıştır. Bunlar arasındaki ilişkinin ortaya konduğu bütünleşik modeli oluşturmak için, malzeme, mimari geometri strüktür, üretim teknolojisi, montaj mantığı, strüktürel başarım benzetimi ve strüktürel optimizasyon kavramları değerlendirilmiştir. Yaygın BDT aracı Rhino uyumlu ek yazılım olarak geliştirilen modelde, Bütünleştirilmiş Modelleme Dili (Unified Modelling Language : UML) kullanılmıştır. Statik ve dinamik diyagramlar aracılığı ile modeldeki farklı tür durumlar tanıtılmış olur. Rhino uyumlu ek yazılımı geliştirilmesinde, C^{++} programlama dili kullanılması sebebiyle, UML diyagramlarında C^{++} ile uyumlu

gösterim dili kullanılmıştır. Kullanıcı arayüzü, veri tabanı ve raporlar Microsoft Visual Studio yazılımı ile özel olarak tasarlanmıştır (Şekil 1.12).



Şekil 1.12 : Yöntemin ortaya konması.

2. MALZEME VE BİÇİM

Mimarlık, bir malzeme pratiğidir. Malzeme, tasarımın nesneleştirilmesi sürecinin öncü parametresidir. Kavramsal sanatın önemli isimlerinden Lewitt (1967), sanat eserinin ancak gerçekleştirildikten sonra algılanır olduğunu belirtmiştir. Mimari ürün de, tıpkı sanat eserlerinde olduğu gibi, fiziksel gerçekliğe dönüştüğünde somut anlamını bulur. Aksi halde gerçekliğin bir temsili olarak kalır.

Bu bölümde, doğadaki malzeme kavramı ve optimizasyon süreçlerinin incelenerek, malzeme tarafından yönetilen tasarım sürecinin daha iyi algılanması amaçlanmaktır. Malzemenin tanınması adına malzeme sınıfları ve malzemenin biçimsel durumunu etkileyen mekanik özellikleri ele alınacaktır. Tezin amacı olan *malzeme, biçim ve başarım* arasındaki ilişkinin ortaya konması adına, malzeme ve strüktür birlikte değerlendirilmiştir. Bu aynı zamanda, 3. Bölüm kapsamında incelenen 'Malzeme ve Başarım' başlığı altındaki, strüktürel başarım değerlendirmesi ve mühendislik uygulamaları olarak karşımıza çıkan optimizasyon süreçleri için de uygun bir altyapı oluşturacaktır. Mimarlıkta biçimin, sayısal olarak ifade edilmesi MBHT-m (5. Bölüm) için zorunludur. Bu sebeple, mimari geometri konusu da bu bölüm kapsamında incelenmiştir. 3D modelleme araçları arasında kullanım faydaları açısından genel kabul gören, NURBS eğri ve yüzeyleri açıklanmıştır. Malzeme ve biçime ilişkin kritik *parametre, kural ve ilişkiler*, UML (4. Bölüm) ile oluşturulan MBHT-m'ye dâhil edilmiştir.

2.1 Doğada Malzeme

Doğa biçimi işleve uygun hale getirir.
Doğa sadece ihtiyacı olan enerjiyi kullanır.
Doğa çeşitliliğe güvenir.
Doğa yerel uzmanlık talep eder.
Doğa dönüştürür.
Doğa fazlalıkları önler.

(Benyus, 1997)

Barınma ihtiyacının doğmasıyla beraber, doğadaki mevcut biçimlemeler incelenmeye başlanmıştır. Doğadan elde edilen malzemelerle ilk bina yapım teknikleri oluşturulmuştur. İnsanoğlu çağlar boyunca, dayanıklı, ihtiyaçlara cevap veren ve güzel kabul edilen biçimler tasarlamayı hedeflemiştir. Bu durum, günümüzde modern bir anlama bürünmüştür. Tasarım, tektonik bir bütüne dönüşme çabası taşımaktadır (Kolarevich ve Klinger, 2008).

Teknolojideki gelişmelere paralel olarak, doğa bilimleri ve biyolojinin; tasarım, mühendislik ve tıp gibi farklı birçok alanda etkileri olmaktadır. Doğada bulunan ve karmaşık olabilen pek çok fenomen, matematiksel modellerle ifade edilebilir. Ortaya çıkma (emergence); kendini düzenleme (self organization); ağlar (networks); örüntü biçimlemeleri (pattern formation) ve sürü (swarm) zekâsı gibi örneklerin, farklı disiplinlerde olduğu gibi mimari tasarım sürecinde de etkileri görülmekte ve tasarımcıya biçim türetme konusunda ilham kaynağı olmaktadır. Geçtiğimiz yıllarda çeşitli uygulama projelerinde ve akademik çalışmalarda, doğada rastlanan voronoi örüntüleri, bitkilerin gelişim sürecini tanımlayan Lindenmayer sistemleri ile fraktal ve kaos teorisi gibi matematiksel olarak tanımlanabilen birçok biçimleme ve fenomen, tasarımcılar tarafından kullanılmıştır. Ancak, mimari tasarım sürecinde, bu gibi yöntemlerin, çoğunlukla *yalnızca* biçim türetme amaçlı kullanıldığı bilinmektedir. Bu durum doğayı yüzeysel olarak taklit etmekten öteye gitmeyerek, malzeme ve başarım koşullarıyla çelişen tasarımların üretilmesine sebep olur. Oysaki doğa verimlilikten yanadır.

Doğada, *malzeme, biçim ve başarım* her zaman bir arada ve sistem bütünlüğü içinde değerlendirilir (Yazıcı, 2011). Doğanın en dengeli oranlara sahip; aynı zamanda verimli biçimler yarattığı bilinmektedir (Şekil 2.1). Biomimesis, doğada bulunan fotosentez; doğal seçim; sürdürülebilir ekosistemler; canlı ve cansız varlıklar gibi karmaşık yapıda, ancak yüksek verimlikteki oluşumları kendine konu eden bir araştırma alanıdır. Tasarım ve üretim süreçlerinde problem çözmede kullanılır. Bu durum, doğadan öğrenilmesi ve doğanın yolunun kullanılması anlamına gelmektedir. Biomimesis malzeme sektöründen, gıda ve ilaç sektörüne dek birçok alanda uygulama alanı bulmaktadır. Biomimesis alanındaki araştırmaları besleyen biyoloji bilimi ve daha geniş kapsamda ekoloji, organizmalar ve çevre arasındaki ilişkiyi ortaya koyar (Benyus, 1997).



Şekil 2.1 : Doğal biçimlemeler ve örüntüler.

Malzeme, biçim ve başarım ilişkisinin sorgulanması açısından, doğada bulunan örnekler incelenmeye değerdir. Örneğin, karıncanın kendi vücudunun onlarca katını taşıyabilmesi ya da hafiflik ve dayanım açısından üstün özelliklere sahip bitki gövdelerinin en verimli strüktürler olmaları önemlidir. Binalarda kullanılan, merkezi ısıtma ve havalandırma sistemleri, termit kulelerinde en uygun biçimde zaten kullanılmaktadır (Benyus, 1997). Bunun gibi örnekleri değerlendirerek, malzeme, biçim ve başarımın aynı derecede önemli olduğu ve birbirini etkilediği doğal tasarımlar, yeni bir tasarım paradigması oluşturmaktadır (Oxman, 2010).

Doğada gözlemlenen biçimlemeler; ölçek, işlev ve oluşum süreçleriyle insan yapımı olanlardan farklıdır. Ancak doğada kullanılan malzemeler, hafiflik, dayanım ve enerji korunumu sağlar. Bu sebeple, mimar ve mühendisler tarafından kapsamlı olarak incelenmektedir. 18. yüzyılda, bir ağaç morfolojisiyle, yüklerin dağılımı arasındaki ilişkinin sorgulanması ve öğrenilen bu bilginin bir fener kulesinde uygulanması öncü nitelik taşımaktadır. Benzer şekilde, 20. yüzyıl yapı teknolojisinin ürünü olarak kabul edilen kabuk tasarımlarında, doğal biçimlemelerden esinlenilmiştir. İlk kabuk örneklerinden birini, betonarme malzeme kullanarak

tasarlayan Dischinger ve Bauersfeld, bir kubbe ile yumurta kabuğunu karşılaştırmıştır (Arslan ve Gönenç, 2007).

2.2 Doğal Sistemlerde Optimizasyon

Doğadaki sistemler, hücre; doku; organ; organizma ve popülasyon hiyerarşilerine göre sınıflandırılır. Kolonilerdeki organizmalar, toplu olarak zeki davranışa ulaşabilir. Kuş, arı ve balık sürüleri karmaşık, dinamik ve mekânsal örüntüler oluşturma becerisine sahiptir. Bu, her canlının basit kuralları takip etmesiyle sağlanır. Örneğin, her organizma grubun merkezine hareket etmeye çalışırken, yanındakiyle çarpışmamaya, grupla aynı yönde hareket etmeye çalışır. Bu örneklerde *kontrol* söz konusudur.

Biyomimesis, biyolojik sistemlerden fikir alarak teknoloji üretir. Biyolojiden esinlenme (bio-inspired) kavramı ile yeni fikir, teknik ve perspektiflerle karmaşık mühendislik sitemlerinin yorumlanması sağlanır. Günümüzde bilgisayar programları ile biyolojik sistemlerin benzetiminin yapılması mümkündür. Bununla, yüksek teknoloji sistemleriyle çalışabilen, kontrol ve karar verme algoritmaları üretilebilir. Birçok biyolojik süreç, optimizasyon süreçleri ile temsil edilir. Bunların temel amaçları kontrol, karar verme ya da otomasyondur. Örneğin araba kullanan bir insan ele alınabilir. Süreç, araba kullanmak iken; sürücü yolda kalma isteği ile hedefe bağlıdır. Sürücü, bu süreçte *optimal*, yani en uygun seçimleri yapar. Bu *karar verme* sürecine örnektir. Kontrol ve otomasyon sağlayan biyolojik optimizasyon süreçleri için belirgin örnekler bulunur. Örneğin, homeostaz (homeostasis) süreçlerinde, vücut ısısı insan vücudu tarafından ayarlanır. Diğer bir örnek ise, denge sağlayan motor kontrol için nöral ağdır (neural network). Kontrol sistemi içeren bitkilerde ise güneşe ve besin kaynağına yönelim ile yerçekimine karşı gelişim gözlemlenmektedir. Pankreasta kan şekerinin düzenlenmesi ve hayvanlardaki bağışıklık sistemleri de kontrol sistemlerine örnektir. Evrim (evolution) ve öğrenme (learning), uzun ve kısa süre ölçeklerinde, adaptasyon sağlayan optimizasyon süreçleridir. Öğrenme, karmaşık bir ortamdaki en yararlı bilginin toplanması ya da karar vermede kullanılacak en iyi temsilin yapılandırılması süreci olarak görülebilir. Evrim ise, Darwin'in en iyinin hayatta kalması ilkesine bağlı olarak, optimal ve dayanıklı organizmaların tasarlandığı stokastik (olasılıklı) bir süreçtir. Evrim sürecinde biyolojik sistemler çevresine en uyumlu hale gelecek biçimde yeniden tasarlanır.

Örneğin, kutup ayıları, çevreye uyum sağlamak için beyazdır. Evrim, çevre için en uygun tasarımı yaratmıştır (Passino, 2005).

Mühendislikte kullanılan optimizasyon yöntemleri çoğunlukla doğal fenomenlerden elde edilmiştir. Örneğin, Genetik Algoritmalar (GA) çok sık olarak başvurulan bir optimizasyon yöntemidir. Optimal tasarım; örneğin, malzeme, biçim ve strüktürü kontrol eden tasarım parametrelerinin belirlenmesini gerektirir. Bu gerçekleştirilirken kısıtlamalar dikkate alınarak, optimal tasarım hedeflenir. Optimal mekân, doğa kanunlarıyla yönetilen evrensel bir matematiksel nesnedir (Passino, 2005).

Ağaç ve bitki gibi doğal strüktürlerin verimliliği kabul edilmektedir. Ancak, modern teknolojinin kapasitesini alarak, karmaşık ilkelerle oluşturulmuşlardır. Örneğin bir engelle karşılaşan bitki gelişim örüntüsünü değiştirerek, yerçekimi ve kuvvet alanı ile beraber, engelle uyumlu biçimde büyümeye devam edebilir. Ayrıca, bitki biçimleri ve geometrileriyle, optimal biçimlerin matematiksel denklemleri arasında çok güçlü bir bağ bulunur. Dalları olan bir ağaç strüktürünün, optimal yük taşıyıcı strüktür olduğu, matematiksel programlama yöntemleriyle kanıtlanmıştır. Doğal fenomenlerin gözlemlenmesiyle, mühendislik strüktürlerinde optimal biçim tanımlanabilir. Örneğin, ince köpük tabakaları bunlardandır. İnce tabakalar minimal yüzeyleri oluşturur. Sınır çevresine ve kısıtlamalara göre karmaşık yapıda olabilen bu biçimler, en az yüzey alanına olan optimal yüzeylerdir (Vasiliev ve Gürdal, 1999).

Evrimsel gelişim ve büyümede, organizmanın kendi biçimini oluşturma süreci olarak tanımlanan morfonegez (morphogenesis), karmaşık düzenlemeler içeren çok biçimli sistemler türetir. Bu sistemler, malzeme olanaklarının, dış çevre koşulları ve kuvvetlerle etkileşimiyle oluşturulur. Doğal morfonegez kapsamında biçimleme (formation) ve nesneleştirilme (materialization) süreçleri birbirinden ayrılmayacak şekilde ilişkilidir (Menges, 2007). Hesaplamalı morfogenez ise, doğal morfogenezin temel ilkelerini uygulayarak, sayısal modeller üzerinden malzeme, biçim ve başarıma ilişkin problemlerin çözümünde kullanılmaktadır (Teuffel ve diğ, 2009; Ohmori, 2008; Ohmori ve diğ, 2009; Menges, 2007). Bu süreçte biçimin ortaya çıkışı ve nesneleştirme süreçleri, başarım koşulları düşünülerek oluşturulur. Malzeme sistemleri, bütünlüğünü kaybetmeden çevresel güçlerle etkileşir (Menges, 2008).

Strüktürel biçim bulma alanında sıklıkla kullanılan hesaplamalı morfogenez kavramı, biçim, kalınlık ve topoloji gibi strüktürün mekanik özelliklerini etkileyen etmenlerin

optimizasyon süreci ile belirlenmesine dayanır (Ohmori ve diğ, 2009). Strüktür sistemlerinin bilgisayar kullanımı ile oluşturulmasını sağlayan teknik ve yöntemleri temsil etmekte kullanılan hesaplamalı morfogenez, temeli hem sayısal analiz olarak SEY ve hem de strüktürel optimizasyon için geliştirilen özel algoritmalara bağlıdır (Ohmori, 2008).

2.3 Malzeme Tarafından Yönetilen Tasarım Süreci

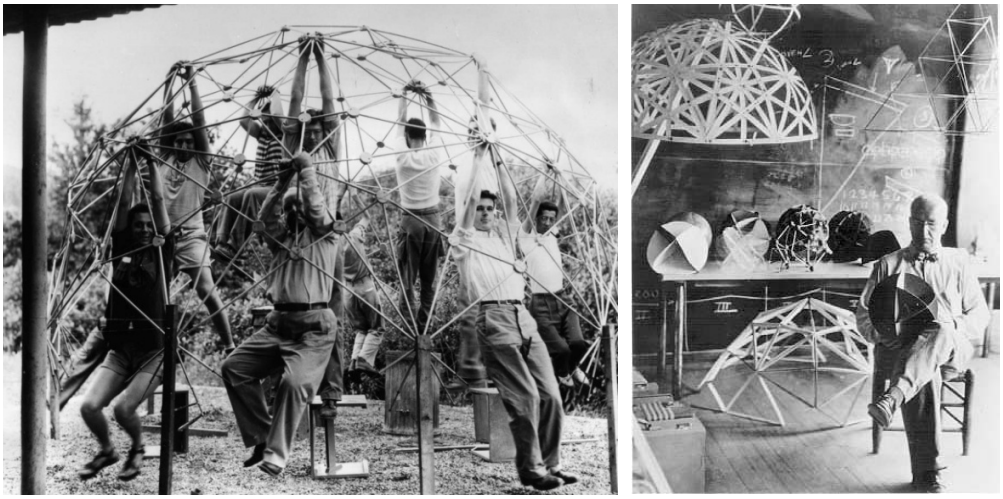
Mimari tasarımda, prototip (ilk örnek) oluşturma, mimari objeyi gerçekliğe yaklaştırır. Bu şekilde tasarım; malzeme özellikleri ve biçim üzerinde etkin olan kuvvetler gibi somut parametrelerle değerlendirilebilir (Yazıcı, 2009). Tasarım sürecini anlamaya yönelik bu anlayışın öncüleri olan Gaudi, Fuller ve Otto; doğadan bilinçli öğrenmeyi gerçekleştirmiş ve tasarımlarında uygulamışlardır (Arslan ve Gönenç, 2007).

Antoni Gaudi, 19. yüzyıldan 20.yüzyıla geçiş sürecinde, doğanın en verimli biçimleri oluşturduğunu vurgulayarak, Gotik mimarinin yüksek taş katedrallerindeki strüktür anlayışını geliştirmiştir. Yüzlerce ağırlıkla oluşturulmuş, 1/10 ölçekteki asılı zincir modelinin ayna yoluyla yansıtılmasıyla, Colònia Güell Kilisesi'nin kemer biçimlerini sınamıştır (Şekil 2.2). Zincir modeli ters durumdayken meydana gelen parabolik kemer, yüklerin verimli dağılımını sağlamaktadır. Gaudi, dengede bulunan strüktürel biçimlerle yaptığı denemeler sonucunda; duvar ve kolonların doğal olarak düşey olamayacağını belirterek, bunu vektörel kuvvet dağılımlarıyla açıklamıştır (Burry, 2006).

20. yüzyıla gelindiğinde Buckminster Fuller, doğayı inceleyerek verimli biçimlerle ilgili arayışı sürdürmüştür. Fuller' a göre doğal yapılaşmalar, hafif ve en uygun olmakla birlikte, insan yapımı strüktürler için önemli bir bilgisel altyapı oluşturmaktaydı. Fuller, doğadaki oluşumları yalnızca biçimsel olarak değil, aynı zamanda oluşum süreçlerini de inceleyerek değerlendirmiştir. 1943 - 1954 yılları arasında jeodezik kubbeyle ilgili çalışmalarını sürdürürken, ABD'deki Black Mountain Koleji'nde öğrencileriyle beraber değişik ölçeklerde onlarca prototip oluşturmuş, farklı malzemelerle strüktürel denemeler gerçekleştirmiştir (Şekil 2.3). Mimarlıkta bir mekânı en az malzeme ile örtmeyi sağlayan jeodezik kubbe bu süreçte keşfedilmiştir.

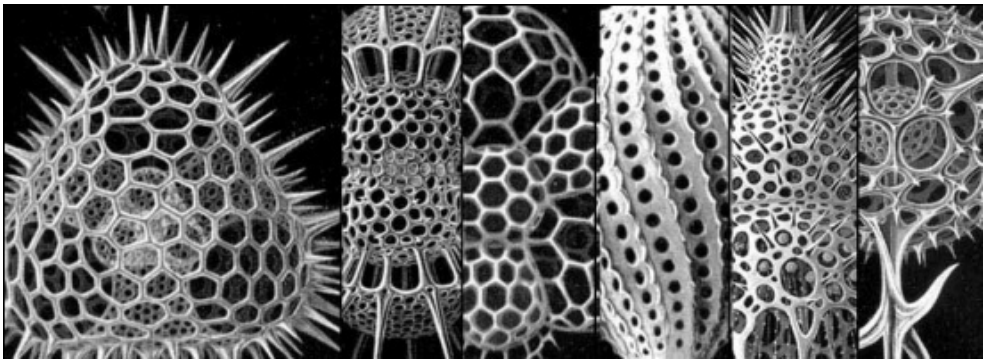


Şekil 2.2 : Colònia Güell Kilisesi'nin kemer biçimleri (Sweeney ve Sert, 1960).



Şekil 2.3 : Fuller'in geliştirdiği prototipler (Gorman, 2005).

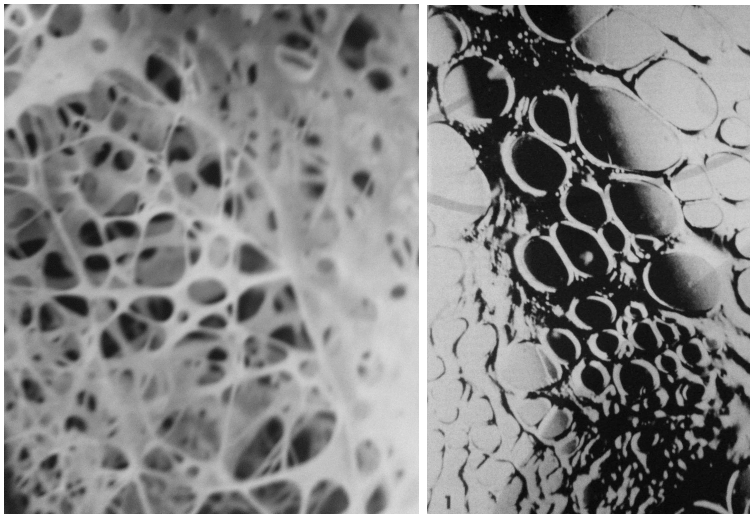
Jeodezik kubbenin, Haekel ve D'Arcy Thompson tarafından resmedilmiş, doğada bulunan ve bilinen biçimlerden esinlendiği belirtilmektedir. Ancak radiolaria ve sinek gözü gibi bu biçimlere, jeodezik kubbenin yalnızca yüzeysel olarak bir benzerlik gösterdiği ifade edilir (Şekil 2.4). Örneğin doğadaki haliyle radiolaria, sudan çıkınca sönerken; sinek gözü taşıyıcı özellik barındırmamaktadır. Buna karşın, jeodezik kubbe insanın kullanabileceği strüktürel bir sistemdir. Fuller tarafından ortaya atılan sinerjetik kavramı ise istiflenmiş kürelerin enerji alışverişi sırasında düzenli ve kararlı biçimler almasına dayalıdır. Bu buluş, virüslerin ve atom çekirdeğinin yapısını anlatmak için de kullanılmıştır (Gorman, 2005).



Şekil 2.4 : Fuller radiolaria gibi doğal biçimlemeleri incelemiştir.

Fuller' in takipçisi olan Frei Otto, en az malzeme ile en büyük açıklıkları geçme ve hafif yapılar üretme kaygısı taşımaktadır. Araştırmalarını, doğadan esinlenerek oluşturduğu sistemlerle, strüktürel biçimlerin verimliliğini arttırma üzerine yoğunlaştırmıştır. Otto liderliğinde 1964 yılında kurulan, Stuttgart Üniversitesi Hafif Strüktürler Enstitüsü'nde (Institute for Lightweight Structures), doğal biçimlemeler ve oluşumlar üzerine öncü nitelikte araştırmalar yürütülmüştür (Şekil 2.5). Bu araştırmalar, hafif yapıların üretilmesi ve strüktürel biçimlerin optimizasyonunda yol gösterici olmuştur (Otto, 1995).

Benzer şekilde, Eduardo Torroja, Heinz Isler, Felix Candela gibi öncüler, analitik çözümler aracılığıyla, biçimsel çeşitliliğe sahip ince beton kabuklar tasarlamış ve malzemenin tüm olanaklarını ortaya koymuşlardır.



Şekil 2.5 : Kemik dokusu ve köpük gibi biçimlemeleri (Roland, 1970).

2.4 Malzemenin Tanınması

Malzeme, tasarımın bünyesine girip, tasarımın biçimlenişini, kullanıcının sağlık ve konforunu sağlayan her tür madde olarak tanımlanabilir. Malzeme bilimi, malzeme çeşitlerini, üretim yöntemlerini, kullanım olanaklarını ve kullanım süreci içindeki yapı fiziği sorunlarını inceler (Eriç, 2002). Malzemeye ait temel kavram ve ilkeleri inceleyen malzeme bilimi, fizik, kimya ve matematik bilimlerine dayanmaktadır (Onaran, 1995). Uygulamada kullanılan malzemelerin sayısı binlerle ifade edilmekte ve yeni üretilen malzemelerle bu sayı gün geçtikçe daha da artmaktadır. Malzeme biliminin amacı, malzemeleri tekil olarak incelemenin ötesinde, malzeme konusunun çok boyutlu olarak tanınmasını sağlamaktır. Malzeme konusu, malzeme özellikleri; malzemenin üretim teknolojilerindeki kullanımı; yaşam süresi boyunca malzemede etkili olabilecek, korozyon, aşınma gibi bozulmalar oluşturan çevresel şartlar; ekolojik verimlilik; durabilite ve maliyet gibi birçok unsurun çok yönlü olarak değerlendirilmesini gerektirir.

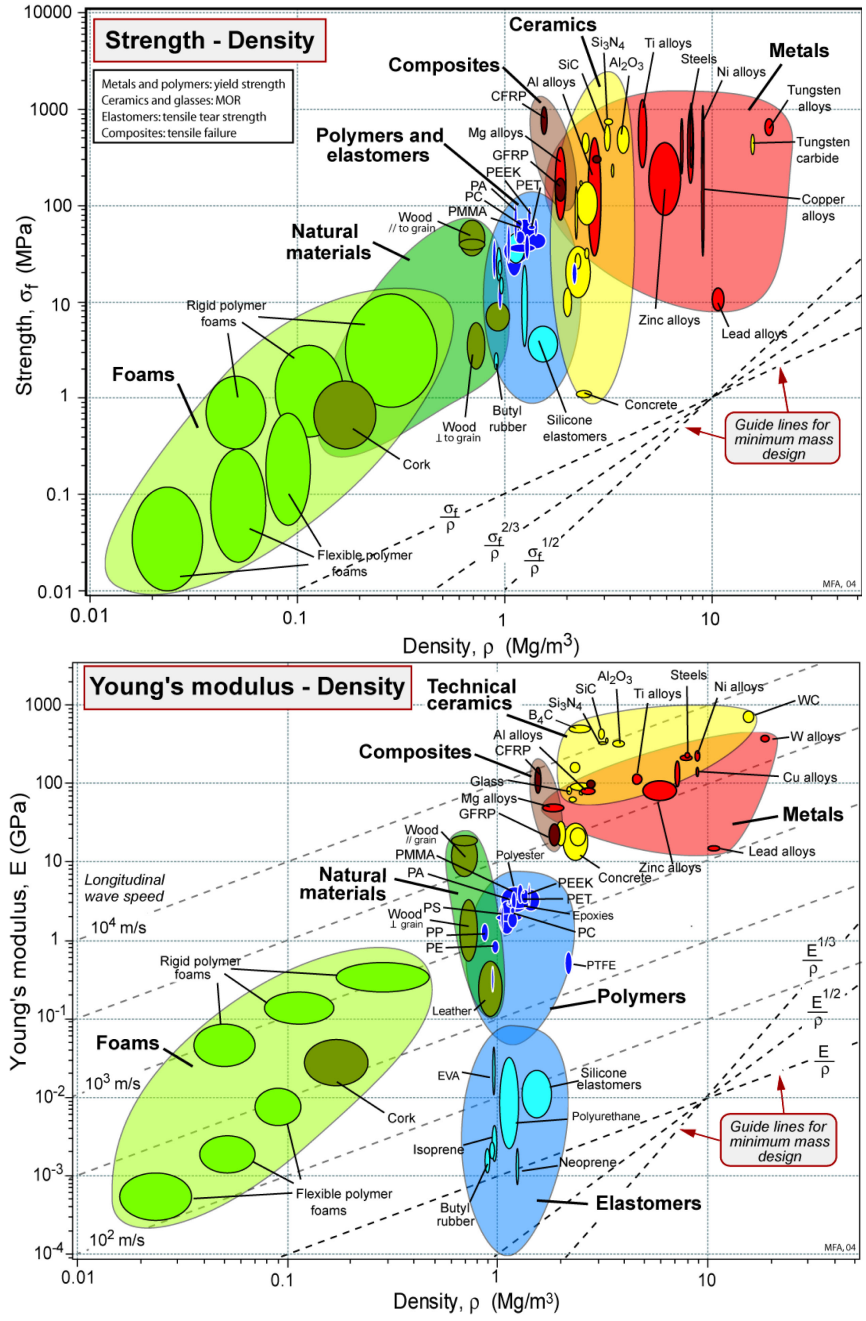
Binlerce yıldır, toplumların teknolojik olanakları mevcut malzemelerle ilişkili olmuştur. Örneğin, bronz ve demir, en ileri mühendislik malzemeleriyken, bulundukları çağa isimlerini vermişlerdir. Bilgi teknolojilerindeki devrimle adlandırılan modern Bilgi Çağı' nda dahi, buluşlar malzeme alanındaki ilerlemelerle sağlanmıştır (McDowell ve diğ, 2010).

İnsanlar, ilk olarak mağara ve ağaç kovuklarında olduğu gibi, malzemeyi şekillendirmeden, doğal halleriyle kullanmışlardır. Daha sonraki dönemde, malzeme şekillendirilerek mimari strüktür ve biçimler yaratılmıştır. 19. yüzyıldan itibaren günümüze dek halen devam eden süreçte ise, malzemenin yalnızca mevcut olanlar içinden seçilmesi yerine, amaca göre planlanması, bazı durumlarda ise içyapısının yeniden düzenlenmesi yoluna gidilmiştir (Eriç, 2002).

Yapıda kullanılan malzeme, biçim üzerinde çok büyük bir öneme sahiptir. Örneğin klasik tapınak mimarisinde, taş malzemenin açıklık geçmedeki olanaklarına bağlı olarak, kolon dizileri; yine aynı malzemenin uygun dizilimleriyle kubbe ve tonoz gibi eğrisel biçimler oluşturulmuştur. Benzer şekilde, betonun şekil alabilme özelliğiyle, heykelsi uygulamalar yapılmaktadır. Modern mimarlığın öncüsü sayılan Le Corbusier' in, bant pencereleri betonarme strüktür sisteminin sunduğu olanaklarla

yapılabilmiştir. Çelik malzemenin mimarlıkta kullanılmaya başlanması ile de düşeyde gelişim gösteren, çok katlı yapıların önü açılmıştır.

Ayrı malzeme sınıfları farklı özellikler gösterir. Michael Ashby ve grubu tarafından geliştirilen yazılım Granta Design, malzeme özelliklerinin malzeme sınıflarına göre karşılaştırılmasını sağlar. Kullanıcıya, kurulan ilişkileri gösteren grafikler sunulur (Şekil 2.6).



Şekil 2.6 : Michael Ashby malzeme seçim çizelgeleri (Granta Design, 2006).

Malzemeler ile ilgili çeşitli sınıflandırmalar yapılabilir. Bunlardan ilki malzemeyi, atomlar arası bağ yapılarına göre; metaller, seramikler ve plastikler olmak üzere üç temel sınıfta inceler (Onaran, 1995). Metallerde, atomlar düzenlidir. Elektriksel ve ısıl olarak iletkenlikleri kuvvetli olup, ışığı yansıtır. Metaller, yüksek değerde elastiklik modülü ve dayanıma sahiptir. Ayrıca çoğunlukla sünek olup, plastik şekil vermeye elverişlidir. Çelik, titanyum ve alüminyum gibi birçok metal, yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Seramikler, metal ve metal olmayan elemanlardan meydana gelen, iyonsal bileşiklerdir. Plastik olarak şekil değiştiremezken, sert ve gevreklerdir. Bu malzemelerin, metallerin tersine elektriksel ve ısısal iletkenlikleri kuvvetli değildir. Çekme dayanımları düşük, ancak basınç dayanımları yüksektir. Bu gruba dâhil olan beton, tuğla, taş, kiremit gibi, yapıda yaygın olarak kullanılan birçok yapı malzemesi bulunur. Polimer olarak da adlandırılan plastikler, genellikle metal olmayan elemanlardan oluşan, içindeki atomların birbirine kovalan bağlarıyla bağlı olduğu malzemelerdir. Temel eleman olarak karbon kullanılır. Polimerlerin üretim aşamasında yumuşak kıvamda oluşu ve plastik kıvam almasından ötürü bu şekilde adlandırılırlar. Plastik malzeme; kovalan bağların sürekliliği ve atomların dizilişine göre iki türde bulunur. Bunlar, termoplastik malzeme gibi lineer polimerler ile bakalit, epoksi ve poliyester malzeme gibi uzay ağı polimerleridir. Lineer polimerler kolayca şekil değiştirebilirken; uzay ağı polimerler gevrek olup, plastik şekil değiştiremez. Elektriksel ve ısıl iletkenlikleri çok düşük olan polimerler, yalıtım amaçlı kullanılabilir. Benzer şekilde, elastiklik modülleri ve dayanımları da çok düşük değerlere sahiptir (Onaran, 1995).

Malzeme sınıflandırmasıyla ilgili diğer tanımlamaya göre ise malzeme, içyapılarına ve kullanım yerlerine göre sınıflandırılabilir. Malzemeler içyapı oluşumlarına göre, doğal taş, kalsiyum esaslı bağlayıcılar, yapay taş, pişmiş toprak, cam ve metaller gibi inorganik malzemeler ile ahşap, bitüm-katran ve plastik gibi organik malzemeler olmak üzere iki sınıfta değerlendirilir. Malzemeler kullanım yerlerine göre ise taşıyıcı, koruyucu ve dekoratif malzemeler olmak üzere üç gruba ayrılabilir. Ancak, ahşap gibi bazı malzemeler üç şekilde de kullanım alanı bulabileceği için, bu sınıfa ait gruplar arasında ayırım çok net olarak yapılamaz (Eriç, 2002).

Bu sebeple, malzemenin tanıması söz konusu olduğunda, öncelikli olarak malzemenin içyapısından kaynaklanan özelliklerin bilinmesi önemlidir. Bu özellikler *malzeme, biçim ve başarım* ilişkisini önemli ölçüde etkileyerek, aralarındaki

etkileşimin iyi anlaşılması ile tasarım alanında yaratıcı ve verimli çözümler üretilebilir (Şekil 2.7-2.8).



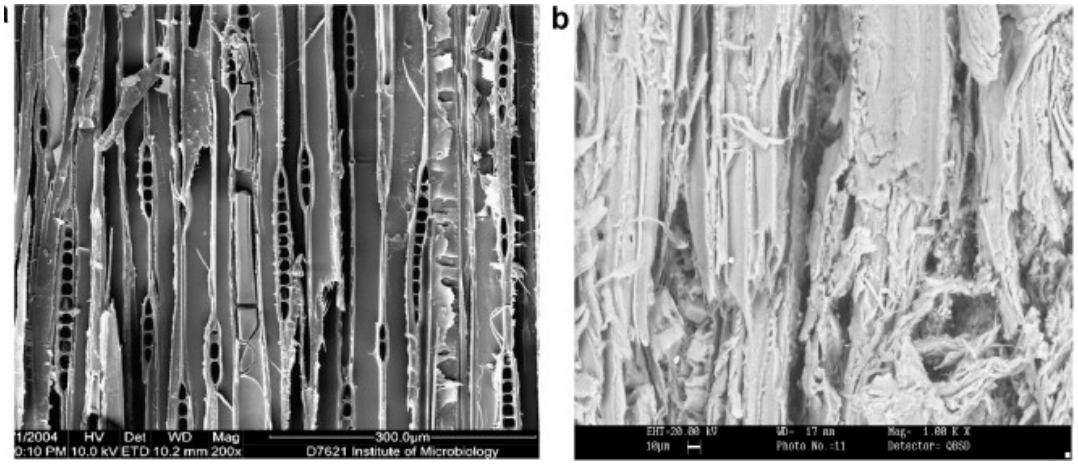
Şekil 2.7 : Karbon fiber bank (Donders, 2010).



Şekil 2.8 : Nefes alan koltuk (Yu-Ying, 2010).

2.4.1 Malzeme yapısı

Yapı sağlığını etkileyen tüm etkenler Yapı Fiziği kapsamında değerlendirilir. Bu etkenler arasında mekanik deformasyonlar, aşınma, ısısal etkiler, akustik sorunlar, su ve nem etkileri, güneş ve atmosfer etkileri, deprem ve yangın sayılabilir. Sorunların çözümünde, malzeme içyapısının etkenler karşısında nasıl davranışta bulunacağı değerlendirilir. Bu sebeple malzemenin içyapısı iyi bilinmelidir. Malzemenin içyapısı, malzeme özelliklerini etkilerken, malzemede gözlemlenen değişikliklerin temelinde bulunur (Şekil 2.9). Malzemenin içyapısı kapsamında, malzemenin atom ve molekül yapısı mikrostrüktür; birim ve özgül ağırlıkları ile gözle görünür yapısı da makrostrüktür başlığı altında incelenir (Eriç, 2002).



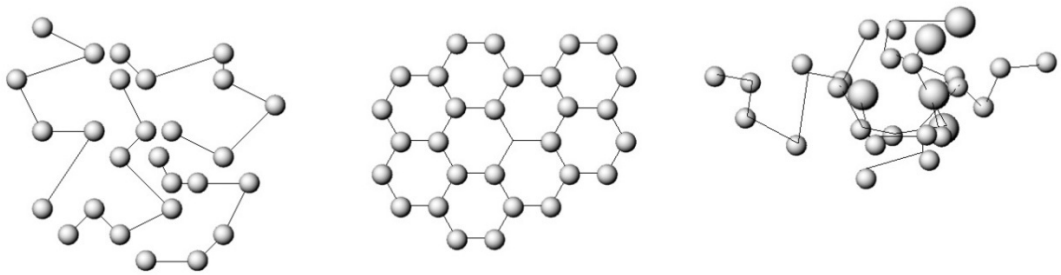
Şekil 2.9 : Ahşabın ve reçineli ahşap parçacığının içyapısı (Zhao ve diğ, 2010).

2.4.1.1 Malzemede mikrostrüktür

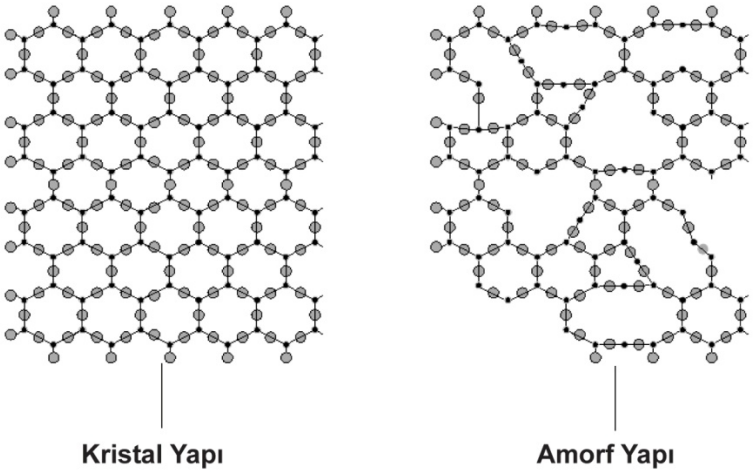
Mikrostrüktür ölçeğinde, malzemenin mikroskobik olarak atom yapısı ve bu yapının farklı yerleşme düzeylerindeki konumları incelenir. Taş, ahşap ve plastik gibi bazı maddeler moleküllü yapılarıyla karşımıza çıkarken, metallerde görülen tek tip atomun kendine özgü bağlarla bağlanarak düzenli yapılar oluşturduğu bilinmektedir. Moleküllü yapıya sahip malzemelerden ahşap, bitüm, doğal reçine ve plastikler sayılabilir. Örneğin, yapı malzemesi olarak kullanılan ahşap, hücresel yapılarından dolayı moleküllü, heterojen, anizotrop, iletkenlikleri ve özgül ağırlıkları düşük, boşluklu malzemelerdir. Polimerler grubunda yer alan termoplastik ve termoset plastik malzemeler istenen özellikte ve şekilde elde edilebilir (Eriç, 2002).

Atomlar arası bağ kuvvetleri atomların bir arada tutulmasını sağlar. Malzemenin dayanımı, ısıl ve elektriksel özelliklerin şekillenmesini sağlayan bağ kuvvetleridir. Bağ kuvvetleri, zayıf ve kuvvetli olmak üzere iki başlıkta incelenmekle birlikte, kendi içinde de bağ türlerine göre farklılaşmaktadır. Sistemlerde her zaman en az enerjili olanın kararlı olarak varlığını sürdürdüğü bilinir. Bir elektron iki atom arasında titreşim halinde bulunuyorsa kovalan, yalnızca bir yöne doğru çekilirse iyonsal, tamamen serbest hale gelmesi durumunda ise metala ait özelliğe sahip olur. Atomlar, çoğunlukla komşularıyla bağ kurmak ve kararlı hale geçmek eğilimi gösterirler. Bağlarla bağlı atom gruplarından moleküller meydana gelir. Basit moleküller H_2 ve O_2 gibi aynı tür atomlardan ya da H_2O ve CO_2 gibi birden fazla tür atomlardan oluşur. Moleküllerin içindeki atom sayısının artışı ile gazdan sıvı, sıvıdan ise katı hale geçebilirler. Kovalan bağların bir doğrultuda uzanmasıyla lineer polimer gibi zincir şeklinde yapılar, iki boyutta uzanmasıyla grafit gibi tabakalı yapılar ve üç

boyutta bakalit (suni reçine) gibi uzay ağı türü moleküller oluşur (Onaran, 1995) (Şekil 2.10). Atom ve moleküller sıcaklığa bağlı olarak gaz, sıvı ve katı olarak üç fazda bulunur. Katı maddeler, içyapısı kristalli ve amorf yapılı olmak üzere iki grupta değerlendirilir (Şekil 2.11).



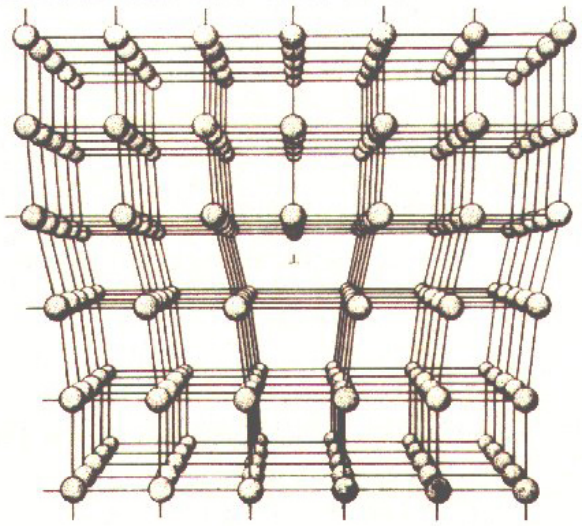
Şekil 2.10 : Lineer, tabakalı ve uzay ağı yapılarında moleküler yapı oluşumu.



Şekil 2.11 : Malzemenin kristal ve amorf ağ yapısı.

İçyapıların oluşma sebebi, bağ kuvvetlerinin etkisiyle atomların uzayda dizilmeleridir. Atomlar, bilindiği gibi bir çekirdek ve onu çevreleyen elektronlardan meydana gelir. Atomlar arası bağların oluşmasında temel etken elektronlardır. En dış yörüngede bulunun valans elektronları malzemenin mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliklerini belirler. Bir malzemenin, kimyasal bileşimi aynı kalıp, atomsal diziliş biçimi değişirse, bundan malzeme özellikleri etkilenir. Atomsal diziliş, iki atom arasındaki ilişkiler; bir atom ve komşuları arasındaki ilişkiler ve üç boyutlu uzak mesafeli dizilişler olarak üç aşamada incelenir. Bu diziliş düzenli ise kristal yapı, düzensiz ise amorf yapı oluşur (Onaran, 1995).

Tüm metaller, seramiklerin çoğunluğu ve bazı polimerler, çok düzgün ve simetrik atom dizilişlerine sahip olup kristal yapıdadır. Kuvvet etkisi altında, kenar dislokasyonunda olduğu gibi hatalar da oluşabilir (van Vlack, 1990) (Şekil 2.12). Kristal, atomların denge konumları uzaklığında yer almaları ile üç boyutlu bir kafes sistem oluşturarak, düzgün sıralarla dizilmesinden meydana gelir. Metaller, kristalli yapı için en bilinen örneklerdendir. Metallerin, kristal yapıları düzgündür. Bu sebeple, homojen, yüksek dayanımlı ve özgül ağırlıkları yüksektir. Aynı zamanda serbest elektronlara sahip olmalarından ötürü ısı, elektrik ve ses iletkenliğinde başarılıdır. Isısal işlemler veya dövme gibi çeşitli müdahalelerle metalin, kristal yapısının sıkıştırılarak, dayanımlarını arttırmak mümkündür. Öte yandan gazlar, sıvılar, polimerler, camlar ve aşırı soğutulmuş metaller düzensiz atom dizilişine sahip oldukları için amorflardır. Bazı doğal taşlar, beton pişmiş toprak ve cam gibi bazı malzemelerin içyapılarındaki atomlar düzensiz olarak dizilmiştir. Bu yapılar, büyük moleküller içinde, atomlar arasında iyon bağlarının kurulmasıyla oluşur. Serbest elektronlarının olmayışı, onları ısı ve elektriğe karşı geçirimsiz kılar. Yapıları düzensiz olduğu için gevrektir. Boşluklu yapılarından dolayı, basınç dayanımına oranla çekme dayanımları düşüktür. Isısal gerilmelere karşı, dayanıksız oluşları ise her noktada aynı ısınmamalarından kaynaklanır (Eriç, 2002).



Şekil 2.12 : Kristal yapı içindeki kenar dislokasyonu (van Vlack, 1990).

2.4.1.2 Malzemede makrostrüktür

Makrostrüktür, malzemenin gözle görülür yapısı, doluluğu ve boşluğunu ifade etmekte kullanılır. Malzeme moleküllerinin gruplaşmaları ile bazı boşluklar ortaya

çıkar. Bunların, belirlenmesi o malzemelerin özgül ve birim ağırlığı; dayanımı; ısı, su ve ses geçirimliliği hakkında bilgi verir.

Malzemenin doluluğu (k), o malzemenin boşluklu birim hacminin ağırlığı (Δ) ile boşluksuz birim hacim ağırlığı (γ) arasındaki oran belirlenerek bulunur. Malzemenin dolu kısmının dışında kalan değerin yüzde olarak ifadesi ise boşluk (p) ile gösterilir. Malzemenin boşluklu hacminin (V) ve boşluksuz hacminin (v) eşit olduğu durumlarda, o malzeme, metallerde olduğu gibi boşluksuzdur. Boşluk oranının artmasıyla, malzeme dayanımında azalma gözlemlenir. Buna karşın, ısı yutuculuk değerinde ve boşlukların devamlılığı durumunda ise su ve buhar geçirimlilik değerlerinde artma görülür. Bu sebeple, moleküllü ve karma içyapıya sahip ahşap, plastik, doğal veya yapay taş, seramik gibi boşluklu malzemelerin donmaya karşı dayanıksız olduğu söylenebilir. Malzemeler yapay olarak üretildiklerinde boşluk oranı eksiltebilir ya da arttırılabilir. Örneğin, tane ölçümü (granülometri) hesapları yardımıyla, yapay taşlar ve beton gibi malzemelerde boşluk oranının azaltılması için çalışmalar yapılır. Bu yolla, dayanım ve su geçirimsizlik gibi malzeme özellikleri iyileştirilir. Isı geçirimsizliği (yalıtım) amaçlı ise, plastik, cam yünü, yapay ahşap, boşluklu tuğla, köpük gibi malzemelerde boşluk oranı arttırılmaya çalışılır.

Doğada bulunmayan, gereksinimler doğrultusunda iki ya da daha fazla sayıda malzemenin bir araya getirilmesiyle oluşturulan malzemeler, kompozit malzemeler başlığı altında toplanır. Bunlar, farklı özelliklere sahip, birkaç malzemenin kullanım amacına göre bir araya getirilmesiyle üretilen bileşik malzemelerdir. Amaçlanan, elde edilen malzeme özelliğinin bileşenlerde ayrı olarak bulunmaması ve bileşenlerin daha üstün özelliklere sahip olmasıdır. Mikroskopik açıdan heterojen bir malzeme olan kompozit malzeme, makroskopik açıdan homojen bir malzeme gibi davranmaktadır. Örneğin, beton böyle bir malzemedir. Kompozit malzemelerin üretiminde, belirlenen amaçlar doğrultusunda, basınç, çarpma, çekme, eğilme gibi mekanik dayanımların arttırılması; yorulma, aşınma ve korozyon karşısındaki dayanımlarının iyileştirilmesi; ısıl ve elektriksel iletkenlik veya direncin değiştirilmesi; akustik açıdan malzemenin kontrolü; rijitlik ve ağırlık gibi özelliklerin geliştirilmesi söz konusudur. Üretimlerinde nitelikli yapıların elde edilmesine yönelik olarak tanelerle ve liflerle donatılandırma, taneciklerle güçlendirme ve tabakalandırma gibi farklı yöntemlerden yararlanılmaktadır (Eriç, 2002).

2.4.2 Malzeme üzerindeki etkiler bağlamında mekanik özellikler

Yapıda kullanılan malzemeler yaşam döngüleri boyunca çeşitli etkilerle karşılaşır. Bunlar mekanik etkiler, ısısal etkiler, su ve nem etkisi, ses etkisi ve fiziko-kimyasal etkilerdir (Eriç, 2002). *Malzeme, biçim ve başarım* ilişkisinin ortaya konduğu bu tez kapsamında, malzeme üzerindeki mekanik etkiler ve özellikler incelenmelidir. Öncelikli olarak, malzeme üzerinde etkili olabilecek tüm unsurların kısaca değinilmesinde yarar görülmüştür.

Isısal etkilerle, insan konforunu düşürecek ve yapıyı olumsuz olarak etkileyecek deformasyonlar meydana gelebilir. İç hava sıcaklığının ve yapı kabuğunun iç yüzey sıcaklığının belli değerlerde tutulması gereklidir. Malzeme bileşimlerinde ortaya çıkan, yüzeysel terleme ve iç yoğuşma (kondansyon) ve donma gibi sorunların çözümünde malzeme önemli bir role sahiptir.

Su ve nem, malzemede bozulmalara yol açabilir. Bu durum, malzemede su emme ve geçirimlilik ile malzemede nem geçirimlilik olmak üzere iki başlıkta incelenir. Su emmede, malzemenin boşluk oranı önemlidir. Malzemede meydana gelen yoğuşma, yani buharın su haline dönüşmesi, malzeme üzerinde terlemeye ya da malzeme içinde yoğuşmaya neden olur. Malzeme kapsamında su ve nem; su emme, basınçlı veya kapiler su geçirimlilik ve buhar geçirimlilik kavramlarıyla birlikte karşımıza çıkar.

Yapı içinde ses, belirli kontrol düzeyinde kontrol altına alınabilmelidir. Bunun için uygun malzemeler kullanılmalıdır. Yapı fiziği açısından ses konforu için, ses şiddeti, seviyesi ve frekanslarının saptanması ile buna uygun ses tutuculuk değerine sahip malzemelerin seçimi önemlidir.

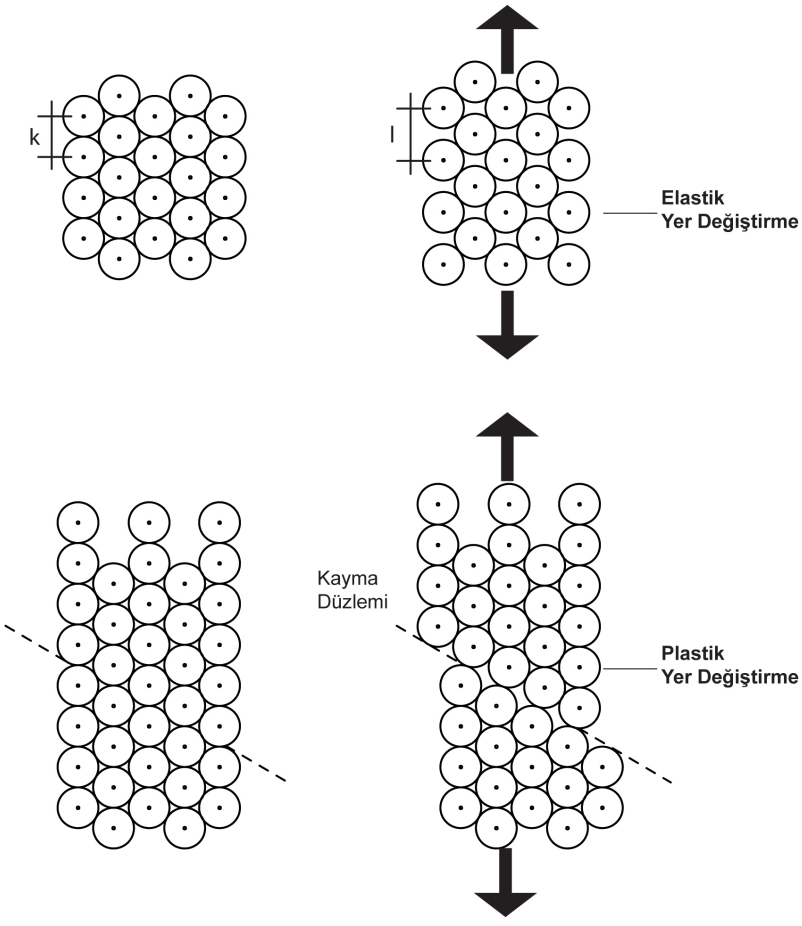
Fiziko-kimyasal etkiler, malzemeyi genellikle kimyasal bir değişime uğratırlar. Yangın etkisi, korozyon etkisi, kimyasal etkiler, güneş ve radyasyon gibi farklı etkiler bu başlıkta incelendiği için sorunların nitelikleri birbirinden oldukça farklıdır.

Mekanik etkiler ise, katı bir cismin hareket halinin ya da şeklinin kuvvet uygulanarak değiştirilmesi sonucunda meydana gelir. Yeryüzünde kuvvet etkisi altında olmayan cisim yoktur. Dolayısı ile yapı tasarımında, yapının ayakta durması sağlayan unsurdur. Malzeme ve biçim arasındaki ilişki mekanik etkilerin tanınmasıyla kurulur.

Mekanik özellikler, malzemenin sınır koşulları ve yüklemelere, yani dış ortam koşullarına verdiği tepkidir. Bir malzemenin kuvvet etkilerine karşı gösterdiği

davranış, mekanik davranış olarak belirlenmiştir. Mekanik davranış, gerilme ve şekil değiştirmelerin incelenmesiyle tanımlanır. Cisimler artan dış kuvvetler ile önce şekil değiştirirler. Dayanımlarını yitirdikleri sınır değerde ise kırılırlar. Gerilme değerinin düşük olduğu durumlarda elastik yer değiştirmeler gözlemlenir. Yani yükleme kalktığında cisim eski haline döner. Gerilmenin elastik sınırı aşması durumunda, plastik şekil değiştirme meydana gelir (Şekil 2.13). Elastiklik modülü tarafından, malzemenin elastik şekil değiştirmeye karşı direnci ya da rijitliği belirlenir. Malzemenin içyapısında kalıcı değişim ya da kırılma oluşturan gerilme sınırı dayanımdır. Elastiklik modülü, atomlar arası bağlar tarafından belirlenir. Malzemenin plastik şekil değiştirme becerisini ve dayanımını temsil eden süneklik, dayanım ve sertlik gibi sınır değerlerle ilgili özellikler içyapıya ve deney koşullarına bağlıdır (Onaran, 2006).

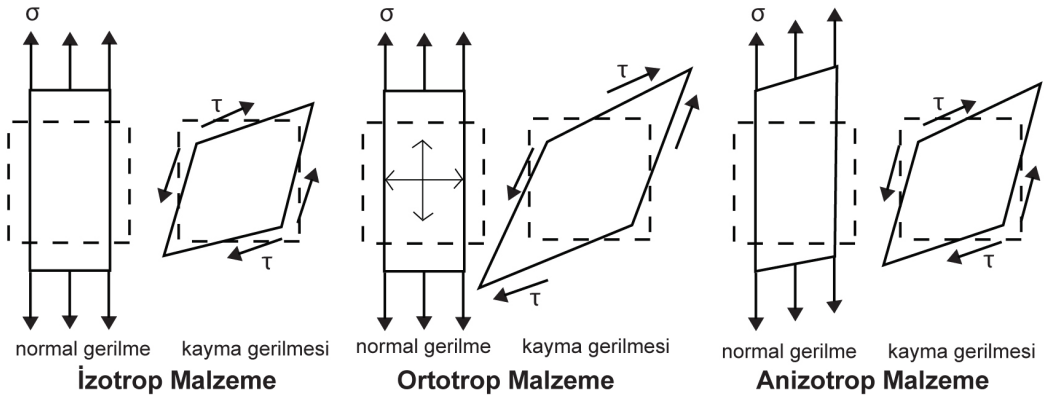
Gerilme, şekil değiştirme, elastiklik modülü, akma, süneklik, sertlik, kırılma, yorulma, sünme, gevşeme ve viskoelastik davranış gibi unsurlar malzemenin mekanik özellikleri kapsamında incelenmektedir.



Şekil 2.13 : Malzemenin içyapısı düzeyinde elastik ve plastik yer değiştirmeler.

2.4.2.1 İzotrop, ortotrop ve anizotrop malzemeler

Malzemenin mekanik davranışı; izotrop, ortotrop ya da anizotrop oluşuna göre farklılaşır. İzotrop malzemelerin özellikleri her yönde aynıyken, anizotrop malzemelerin mekanik davranışı, farklı yönlere göre değişiklik gösterir. Ortotrop malzemelerde ise, birbirine dik doğrultuda malzeme özellikleri farklılaşır (Ersoy, 2001) (Şekil 2.14).



Şekil 2.14 : İzotrop, ortotrop ve anizotrop malzemelerde davranışlar (Ersoy, 2001).

2.4.2.2 Lineer ve nonlineer davranış

Malzeme, biçim ve başarım üçlemesinde, başarımın strüktürel açıdan değerlendirilebilmesi için, lineer ya da nonlineer davranış kavramları incelenmelidir. Malzemenin bazı özellikleri lineer olarak adlandırılır. Bu özellikler, zamana ve ısıya bağlı olarak değişmeyip, sabit kalırlar. Ancak, gerçek hayatta birçok fiziksel oluşum nonlineer davranış gösterir. Strüktürel açıdan nonlineer davranış, geometrik ya da malzeme tabanlı durumlardan, sınır koşullarından ve bütünsel strüktürün getirdiği sorunlardan kaynaklanıyor olabilir (Madenci ve Güven, 2006).

Geometrik nonlineerlik

Geometrik nonlineerlik durumunun iki temel türü bulunmaktadır. Bunlar büyük sapma (large deflection**)** ve dönme (rotation) ile gerilme sertleşmesidir (stress stiffening).Yüklemeler karşısında, en küçük birimle karşılaştırılarak, belirlenen büyük sapma ve dönmeler, geometrinin nonlineer özellik göstermesine neden olur. Örneğin, bir olta yatay yönde çok düşük rijitliğe sahiptir. Yatay yüklerin uygulanması ile büyük sapma ve dönmeler gözlemlenir. Öte yandan**,** eğer bir yöndeki gerilme, diğer yöndeki rijitliği etkiliyorsa gerilme sertleşmesi meydana gelir.

Çekmede önemli oranda rijitlik gösteren ve basınca çok az ya da hiç rijitlik göstermeyen kablo ya da membran strüktürler, gerilme sertleşmesi özelliğini gösterir.

Malzemede nonlineerlik

Gerilme-uzama arasındaki ilişkiyi gösteren grafik malzemede nonlineer durumu ifade eder (Şekil 2.15). Eğer bir malzeme yaklaşık olarak lineer bir gerilme- uzama eğrisi veriyorsa ve yüklemeler cisimde akma gerilmesinden fazla gerilmeler ortaya çıkarmıyorsa, lineer bir malzeme davranışı söz konusudur. Aksi durumlarda ise nonlineer davranış söz konusudur. Değişken malzeme özelliklerini tanımlarken, bu göz önünde bulundurulmalıdır. Plastiklik ve sünme gibi malzeme özellikleri nonlineer durumun tanımlanmasını gerektirir. Malzemeye ilişkin nonlineer özellikler şöyledir (Madenci ve Güven, 2006):

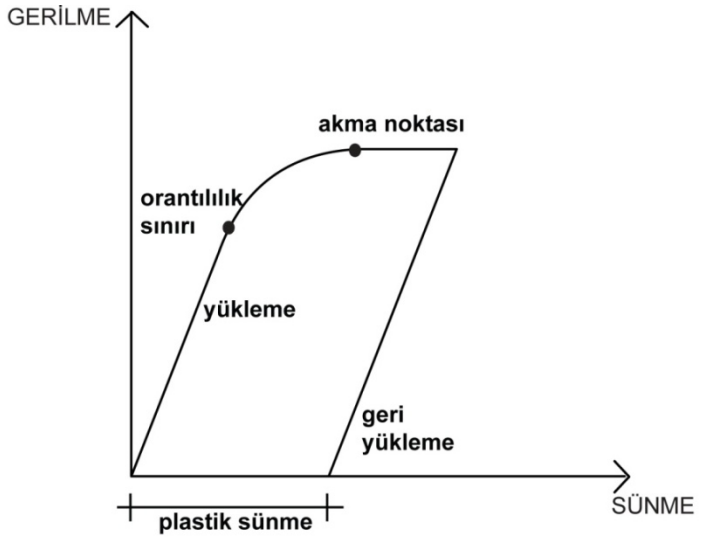
Plastiklik: Kalıcı ve zamana bağlı deformasyon vardır.

Sünme: Kalıcı ve zamana bağlı deformasyon vardır.

Nonlineer elastik: Kalıcı deformasyon yoktur, ancak nonlineer gerilme-uzama eğrisi bulunur. Yükleme kalktığında ise strüktür ilk baştaki durumuna döner.

Visko-elastiklik: Sabit yükleme ile zamana bağlı deformasyon meydana gelir. Yükleme kalktığında ise strüktür ilk baştaki durumuna döner.

Hyperelastiklik: Kalıcı deformasyon yoktur. Lastik gibi malzemeler bu özelliktedir.



Şekil 2.15 : Nonlineer malzeme davranışı (Madenci ve Güven, 2006).

2.4.2.3 Malzemede gerilme ve şekil değiştirmeler

Gerilme birim alana etkiyen kuvvet, şekil değiştirme oranı ise birim boydaki değişmedir. Mekanik davranış incelenirken, kuvvetin etkilediği alana bölünmesiyle çekme, basınç ve kayma gerilmeleri bulunur. Lineer elastik malzemelerde küçük gerilmeler altında yanal şekil değiştirme εy, eksenel şekil değiştirme εa ile orantılıdır:

$$v = -\varepsilon y / \varepsilon a \qquad \textbf{(2.1)}$$

Bu denklenmedeki orantı katsayısına v *Poisson Oranı* denir. Lineer elastik davranışta gerilmeler şekil değiştirmeler ile orantılıdır. Yükleme koşullarının kalkması durumunda ilk biçime dönüş olur. Bu durum, *Hook Kuralı* ile elde edilir.

$$\sigma = E * \varepsilon \qquad \textbf{(2.2)}$$

Bu denklemde *E elastiklik modülü*, σ ise gerilmedir. Elastiklik modülünün artması, o malzemenin eksenel yükleme koşullarında, daha düşük elastiklik modülüne sahip bir malzemeye göre daha az uzaması anlamında gelir. Buna göre aynı boyutta alüminyum ve çelik örneği ele alınırsa, çeliğin elastiklik modülü alüminyumun üç katı olmakla beraber, eşit yükleme koşullarında, alüminyum çelikten üç kat daha fazla uzarken, kiriş halindeyken üç kat daha fazla çöker (Onaran, 2006). Lineer elastik malzemelerde τ kayma gerilmesi ile γ kayma şekil değiştirmesi orantılıdır.

$$\tau = G * \gamma \qquad \textbf{(2.3)}$$

G ise orantı katsayısına *Kayma Modülü* denir. Gerilme ve şekil değiştirme bağıntılarının saptanmasında, çekme deneyi uygulaması yapılır. Deney sonuçlarının değerlendirilmesine göre, farklı malzeme davranışları detaylı olarak incelenmiş olur. Bir malzemenin biçim ve boyutlarına bağlı olarak, yükleme koşulları altındaki emniyetle dayanabileceği en üst gerilme sınır olan *emniyet gerilmesi* belirlenir (Çizelge 2.1). Deney sonuçlarına göre malzemeler arasında gevrek ve sünek malzemeler kendi içinde gruplara ayrılır.

Çizelge 2.1: Bazı malzemelerde basınç, çekme, kayma emniyet gerilmeleri ve elastiklik modülü değerleri -N/mm^2 (Eriç, 2001).

	σ max		τ max	σ em		τem	E
Malzeme	*basınç*	*çekme*	*kayma*	*basınç*	*çekme*	*kayma*	10^{+4}
Doğal taş	300-100	30-10	-	0.5	0	0.1	1
Yapay taş	16-30	2-3	3	6	0	0.6	2.1
Pişmiş toprak (tuğla)	3-30	-	0.4	0.5	0	0.1	0.5
Cam	500-900	30-90	-	-	-	-	7
Metal (çelik)	350	350	230	140	140	80	21
Doğal ahşap (çam)	30	80	4	8	10	1	1
Plastik (PVC) yumuşak – sert	70-90	10-60	-	-	-	-	0.3
Plastik (polietilen)	28-64	8-28	-	-	-	-	0.1-0.25

2.4.3 Hesaplamalı malzeme tasarımı

Hesaplamalı yöntemlerin hızla gelişmesiyle birlikte, malzeme alanında da önemli ilerlemeler sağlanmaktadır. Malzemede mikrostrüktürün değiştirilmesine yönelik bilgi, geleneksel olarak mevcuttur. Örneğin, tarihi samuray kılıçlarının yapımında, metal alaşımlarının özellikleri deneysel yöntemlerle iyileştirilir. Günümüzde ise, bilgiler hesaplamalı modelleme ve benzetimler aracılığı ile sentezlenir. Yaygın kullanımdaki "malzeme seçimi" yöntemleri, birçok başarım gerekliliğini karşılayan benzetim tabanlı "malzeme tasarımı" yöntemleriyle yer değiştirmektedir.

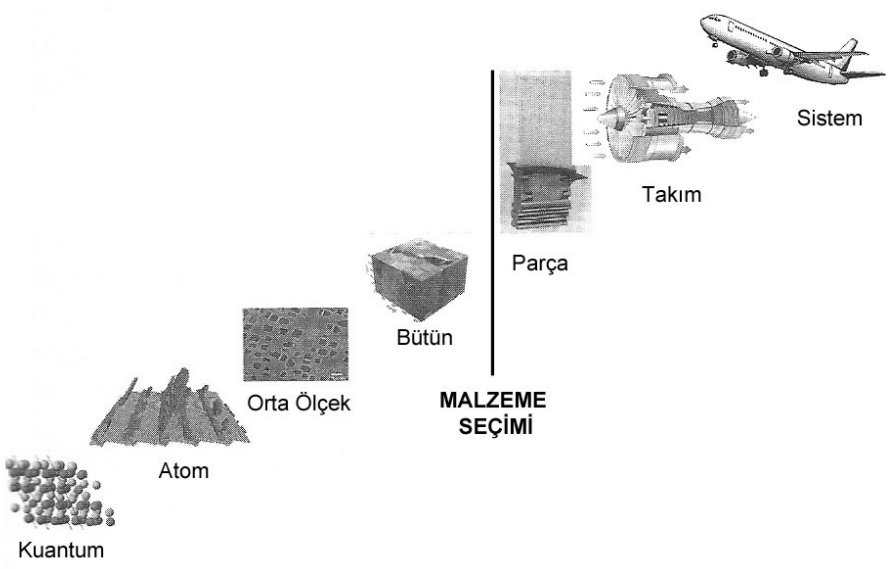
Malzemelerin mikrostrüktürü onların işleme, üretim ve servis içi başarımlarını etkiler. Benzetim tabanlı malzeme tasarımında malzeme seçimi, malzemenin mikrostrüktür ve/veya mezostrüktür (orta ölçek) tasarımı ile birçok başarım şartı sağlanabilir. Bazen birden çok başarım koşulunun gerekliliği, malzeme mikrostrüktürü için çelişki yaratabilir. Ancak çok amaca hizmet eden hesaplamalı yöntemlerle tatmin edici sonuçlar sağlanabilir. Bütünleşik Hesaplamalı Malzeme Mühendisliği, malzeme strüktürünü ve özelliklerini, özel ürün ve uygulamalara ilişkin problemleri model ve veri tabanlarıyla inceler. Geçtiğimiz elli yılda, dislokasyon teorisi; faz dönüşümleri; heterejon malzemelerin mikromekaniği; metalik sistemler ve belirli kompozitler mikrostrüktürün rolünü açıkça ortaya çıkarmıştır (McDowell ve diğ, 2010).

Amerika Birleşik Devletleri Ulusal Bilim Kurumu'na (US National Science Foundation-NSF) göre tasarım; ürün, süreç ve sistemlerin, istenilen fonksiyonları belirli teknik özelliklerle sağlayabilmesini sağlayan bir süreçtir. Toplumda süregelen teknolojik gelişmeler, yeni ürünlerdeki üstün özellikleri sağlayan malzemelerle mümkündür. Malzeme tasarımını destekleyen başarım değerlendirmesinde, hesaplamalı malzeme bilimi ve çok ölçekli mekanik modelleme kilit rol oynar. Malzeme tasarımında öncü nitelikte, tümevarım (bottom-up) ve tümdengelim (top-down) modelleri geliştirilmiştir (Olson, 1997). Buna ek olarak Ashby ve araştırma grubunun başarım gereklilikleri ve malzeme seçim problemi arasında geliştirdiği, sistematik tanım ve uygulaması bu alandaki en önemli çalışmalardandır (Ashby, 1999). Bir yandan MatWeb gibi malzeme veri tabanları, internetten yaygın olarak malzeme özellikleri bilgilerinin ulaşımına olanak tanırken; diğer yandan karmaşık yapıda olabilen yeni malzemeler tasarlanmaktadır (McDowell ve diğ, 2010).

Malzem tasarımı, atom ölçeğinden üst ölçeklere, malzeme modellemesi ve benzetimi ile mümkündür. Malzeme tasarımı için temel öğeler şöyle sıralanmıştır (McDowell ve diğ, 2010):

- Nicel malzeme tasarımı için ilke ve yaklaşımlar.
- Geliştirilmiş modelleme ve başarım teknikleri.
- Onaylanmış, güvenilir ve kapsamlı veri tabanları.
- Yerinde tanımlama ve sınama için yöntemler.

Mevcut malzeme ve ürünler arasındaki seviyeler hiyerarşik olarak *kuantum, atom, orta ölçek, bütün, parça, takım ve sistem* olarak gruplandırılabilir (Şekil 2.16). Örneğin, uçak gibi karmaşık sistemlerde, sistemi oluşturan alt sistemler, bileşen ve parçalar ayrı olarak tasarlanır. Yaygın tasarım süreci genelde malzeme seviyesinde değil, parça seviyesinde sonlandırılır. Bu durumda, malzemeler tasarlanmadan, uygun seçeneklerin olduğu veri tabanlarından seçilir (Ashby, 1999; McDowell ve diğ, 2010). Malzeme seçimi ile ilgili mimarlık alanında da benzer bir yaklaşım bulunmaktadır. Yapı malzemelerinin, hiyerarşik olarak işlevsel özelliklerle tanımlandığı düzeyler; *yapı, mekân, eleman, bileşen, parça* ve *gereçtir* (Arıoğlu, 1993).



Şekil 2.16 : Mevcut sistem tasarımında malzeme seçimi için düşey çizginin sağındaki seviyelere odaklanılır (McDowell ve diğ, 2010).

Malzeme tasarım problemleri, ölçeğe ve işleve göre farklılık göstererek üç ölçekte incelenir. Nano- ölçek tasarımı, atom ölçeğinde benzetimlerle desteklenip, moleküler

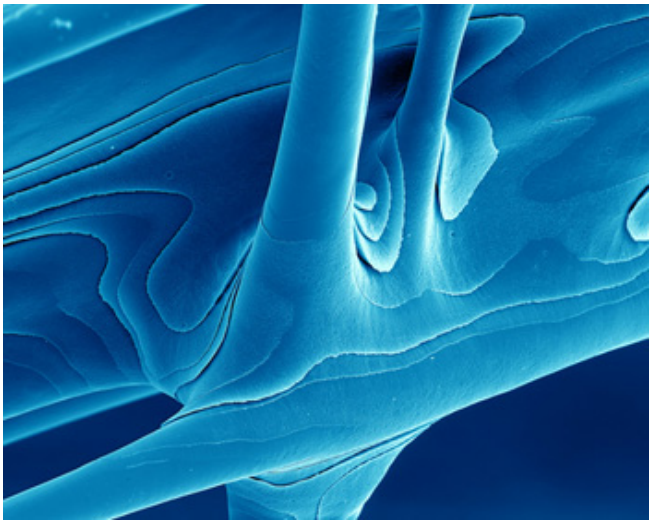
modelleme ile gerçekleştirilir. Mikro-ölçek tasarımında, nanostrüktür yapı blokları topluluğunun oluşturulması söz konusudur. Mezo-ölçek tasarımı ise, tane ve faz gibi, daha büyük ölçekli hatların bütün (continuum) modellemesiyle ilgilenir (McDowell ve diğ, 2010).

Günümüzde malzeme bilimi, farklı özellikteki malzemelerin, belirli problem ve uygulamalara yönelik olarak geliştirilmesine odaklanmıştır. Bu araştırma alanı, nanoteknoloji, nanomalzeme üretimi ve tanımlaması gibi, ileri bilimsel uygulama ve teknolojilerin gelişmesindeki önemli aktörlerden biridir. Maddeyi atomik ve moleküler seviyede kontrol etme bilimi olan nanoteknoloji; elektronikten, tıp alanına dek çok geniş bir kapsamda uygulama alanı bulmaktadır. Örneğin, karbon nanotüpler, gelişmiş mekanik ve elektriksel özelliklerinden dolayı tercih edilmektedir. Yapı malzemeleri alanında da nanoteknoloji araştırma ve uygulamaları yapılmaktadır. Örneğin akıllı malzemeler (smart materials); yükleme koşulları, ısı ve nem gibi çevresel etkilere cevap verme niteliği taşımaktadır.

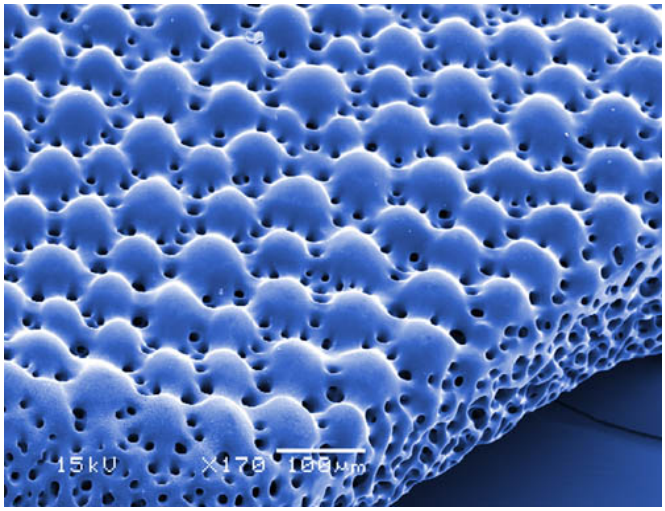
Yeni malzemelerin birçoğu doğadaki yapıların gözlemlenmesi ile geliştirilmektedir. Yaşayan malzemeler (living materials); büyüme, hareket etme, öğrenme, kendini düzenleme, tepki verme ve uyum sağlama gibi özelliklere sahiptir. Harvard Üniversitesi'ne bağlı Wyss Enstitüsü, doğanın yaşayan organizmalar oluştururken kullandığı tasarım ilkeleri üzerine araştırmalarını yoğunlaştırmıştır. Örneğin, bir deniz süngeri türü, şu anda teknolojisi geliştirilmiş en ileri fiber optikten daha güçlü optik özelliklere sahiptir. Öte yandan, yaşayan bazı hücrelerin biçim ve işlevlerini korumak için, hücre iskeletlerinde (cytoskeleton) oluşan çekme ve gerilmeleri, moleküler düzeyde kontrol edebildikleri bulunmuştur. Enstitü kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda, binalar için yarı saydam bir duvar malzemesi geliştirmiştir. Bu malzeme, sıcak havalarda temiz havanın içeri girmesini sağlarken, soğuk havalarda ısı korunumu sağlayarak yalıtım yapabilir. Mimarlıkta, yapının dayanımı en iyi duruma getirme sorununa yönelik çözüm, malzemeye bağlı olarak yaşayan organizmaların her türlü biçiminde karşımıza çıkar (Wyss Enstitüsü, 2012, a,b,c) (Şekil 2.17-2.19)



Şekil 2.17 : Doğal cam liflerden bir çeşit sünger strüktürü (Wyss Enstitüsü, 2012, a).



Şekil 2.18 : Doğal cam liflerden oluşan katmanlar, mekanik ve optik işlev göstererek dayanım sağlar ve ışığı iletir (Wyss Enstitüsü, 2012, b).



Şekil 2.19 : Saydam kemiklere sahip bir çeşit deniz yıldızı (Wyss Enstitüsü, 2012, c).

2.5 Mimarlık ve Strüktür İlişkisi

Mimarlık ve strüktür ilişkisinin daha iyi anlaşılması için bu bölümde temel kavramların açıklanmasına yer verilmiştir.

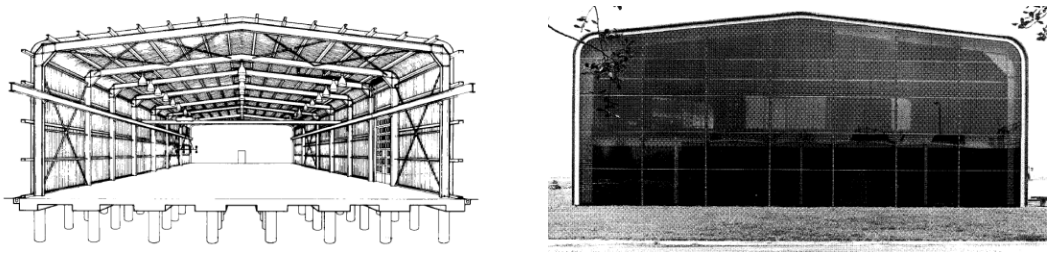
2.5.1 Strüktür ve malzeme ilişkisi

Strüktür binanın yüklere dayanım gösteren bölümleridir. Binayı oluşturan strüktür elemanları ile duvar, döşeme ve çatı gibi elemanlar çeşitli yüklere maruz kalır. Binayı etkileyen yükler hareketli, sabit ve dinamik yükler olarak sınıflandırılabilir. Dış yüzeyler kar, rüzgâr ve yağmur gibi iklimsel durumlardan oluşan yükleri; döşemeler kullanıcıların yerçekiminden kaynaklanan yüklerini ve bunlara ek olarak kendi yüklerini taşımak durumundadır. Bina kabuğunun (duvar, pencere ve çatı) bozulmadan ayakta kalabilmesi için dayanım ve rijitlik sağlayan strüktür gereklidir. Döşeme gibi yatay elemanlar eğilme tipi iç kuvvetlere çalışırken, duvar, kolon gibi düşey elemanlar ise yerçekimi doğrultusunda, eksenel tipte iç kuvvetlere çalışır (MacDonald, 2002). Sayısal araçların, mimari tasarım sürecinde kullanılmaya başlanmasıyla, gemi inşaatı, uçak-uzay ve araba endüstrilerinden, mimariye *monokok kabuk* aktarılmıştır. Monokok kabuk, yapı kabuğunun strüktürel taşıyıcılığı ve dış çeper olma özelliğini tek bünyede toplamasıdır. Literatürde çok çeşitli strüktürel sınıflandırmalar yapılmış olup, Oğultekin'in tez çalışmasında bu sınıflar ayrıntılı olarak incelenmiştir (Oğultekin, 2007).

Yapıda elemanlar, strüktürel ve strüktürel olmayan şekilde değerlendirilir. Basit bir örnek olarak iglo tipolojisinde mekânı örten ve strüktürel elemanlar aynıdır. İgloda basınca çalışan kabuk aynı zamanda kendini taşıyabilmektedir. Ancak bazı durumlarda strüktürel elemanlar, mekânı örten elemanlardan farklıdır. Yine basit bir örnek olan, kızılderili kulubesi tipolojisinde taşıyıcı iskelet ahşap çubuklardan oluşur. Bu iskelet, taşıyıcı olmayan bir membran ile örtülmektedir. Çadır örneğinde strüktür ve kabuk arasındaki ayırım belirgindir. Paris'te bulunan CNIT Sergi Salonunun betonarme kabuk strüktürü, iglonun günümüzdeki incelikli yorumu olarak kabul edilmektedir (Şekil 2.20). Çelik kafes sistemle oluşturulmuş birçok endüstri yapısı ise çadır tipolojisinin modern yansımalarıdır (Şekil 2.21) (MacDonald, 2002).



Şekil 2.20 : CNIT Sergi Salonu, Nicolas Esquillan, Paris, Fransa.



Şekil 2.21 : Modern Sanat Deposu, Foster ve Ortakları, Thames mead, UK.

Yapısal elemanların şekilleri, yapıldıkları malzemeden büyük oranda etkilenir. Malzeme özellikleri, malzemenin hangi tip kuvvetleri taşıyabileceğini ve hangi elemanlar için uygun olduklarını belirler. Malzeme özelliklerinin, biçime yansımaları dört temel yapısal malzeme olan yığma sistem, ahşap, çelik ve betonarme ile incelenecek olursa bu durum belirginleşir.

Taş, tuğla gibi birim boyuttaki malzemeler kullanılarak uygulanan yığma tekniği ile çevreye duyarlı, büyük yapılar inşa etmek mümkündür. Yığma yapılar, düşük çekme dayanımı ile basınç iç kuvvetinin etkin olduğu ayak ve duvar gibi düşey elemanlarda kullanılmaktadır. Buna ek olarak bu tür malzemeler, kemer, tonoz ve kubbe gibi basınç dayanımı gösteren biçim-etkin türlerin oluşturulmasında da rol oynar. Rüzgâr yüklerinin etkisi altında kalan dış duvarların eğilme momentine maruz kalması, yığma yapılardaki duvarın kalınlığını arttıran bir etmendir.

Yapılarda kullanılan ahşap, çekme ve basınç dayanımına sahiptir. Ahşap canlı bir organizma olduğu için hücresel içyapıya sahiptir. Bu sebeple nispeten hafif bir malzemedir. Anizotropik yapıdaki ahşap malzemenin özellikleri, bünyesindeki

liflerin yönlerine göre farklılık gösterir. Malzemede bulunan lifler kolaylıkla ezilip ayrılabildiği için, liflerine dik doğrultuda daha az dayanımlıdır. Yaygın olarak kullanılan lamine edilmiş ahşap, ahşap tabakalarının yapıştırılması ile oluşturulur. Lamine edilme işlemi konik ya da kubbe gibi eğrisel biçimlere sahip yapıların yanı sıra geniş açıklıklı yapıların inşa edilmesine olanak verir. Lamine olmayan ahşap yapıların göreceli olarak düşük dayanımı, bileşenlerinin göreceli olarak küçük oluşu ve yapısal olarak iyi bir mafsal oluşturulmasına ilişkin zorluklar, bu yapıların boyutlarını kısıtlar. Genellikle açıklıkların büyük olmadığı, az katlı küçük binalarda ya da yığma yapıların yatay elemanlarının oluşturulmasında kullanılır.

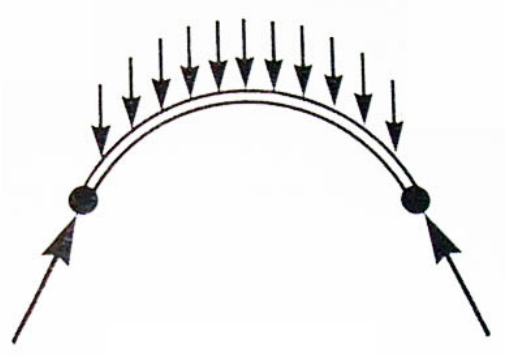
Çelik, yüksek dayanımı ve yoğunluğu ile iskelet çerçeve yapılarda tercih edilir. Bu yapılarda strüktürün hacmi, binanın hacmine göre oldukça düşüktür. Çelik ile çok büyük açıklıklar oluşturularak, yüksek binalar inşa edilebilir. Çelik yapılarda ortaya çıkan temel sorunlar korozyon gibi malzemenin kimyasal özelliklerini bozan durumların yok edilmesi ve yangın direncinin sağlanmasına ilişkindir.

Beton; agrega, çimento ve su ile meydana getirilmiş kompozit bir malzemedir. Suyla karıştırılan çimento ve agrega ile yarı-akışkan bir malzeme oluşturulur. Çimentonun hidratasyonunu takiben, malzeme karışımı sertleşir. Malzeme yarı akışkan durumda iken özellikleri kuvvetlendirecek başka katkılar eklenebilir. Çekme dayanımı düşük betonun çelikle güçlendirilmesi, yeni oluşan kompozit malzeme betonarmenin, çeliğin ve betonun olumlu özelliklerini barındırmasını sağlar. Akışkan malzemenin farklı biçimler alması mümkündür. Bunun yanında kalıba dökme işlemi elverişli bağlantıların oluşturulmasını sağlar. Betonarme yapılar büyük açıklıkların geçilmesine ve çok katlı yapıların inşa edilmesine olanak tanır. Biçim alabilme özelliğinden ötürü karmaşık yapılar oluşturulabilir (MacDonald, 2002).

2.5.2 Strüktürde biçim-etkinlik incelemesi

Rijitliği olmayan bir eleman olan kablo, iç kuvvetleri taşıyamaz ve yalnızca eksenel çekmeye cevap verir. Çelik tel ya da kablo gibi esnek malzemeler *biçim-etkin* modellerin oluşturulmasında kullanılır. Tel ve kablo düzenekleri, yükleme altında şekil almaya zorlanır. Boylamasına ekseni boyunca oluşan biçim, yükleme koşullarına özeldir (Şekil 2.22) . Bu yükler biçim-etkin model olarak tanımlanır. Farklı yükleme koşulları, farklı biçim-etkin modeller oluşturulmasını sağlar.

Kablo strüktürün, aynada yansıtılarak ters çevrilmiş görüntüsü, biçim-etkin eleman olarak tanımlanır. Kullanılan taş gibi rijit bir malzeme ile strüktür oluşturulur. 19. yüzyılda Gaudi'nin Colònia Güell Kilisesi'ni tasarlarken kurduğu asılı zincir modeli bu yöntemle oluşturulmuştur. Biçim-etkin elemanlar, eksenel iç kuvvetleri taşıyabilmektedir. Çünkü boylamasına eksenleri uygulanan yüklere karşı oluşan biçim-etkin modellere uymaktadır.



Şekil 2.22 : Boylamasına eksenel kuvvet etkisi altındaki biçim-etkin model.

Biçim-etkin strüktürler asma-germe kablo sistemler, şişme membran sistemler ve basınç kabuklarıdır. Karmaşık yapıda olan biçim-etkin strüktürlerde tasarım sürecinde yüklerin doğru tanımlanması gereklidir. Bu yapılmazsa biçim-etkin olmayan bir geometri oluşturulmuş olur. Dolayısı ile yükleme koşulları altında biçim-etkin modele dönüşmeye zorlanır. Örneğin basınç kabuklarının, tasarım sürecinde doğru geometrinin tanımlanması çok önemlidir. Aksi halde strüktür hatalı olacaktır.

Biçim-etkin modeller yüklemeye bağlı olarak oluşan biçimlerdir. Örneğin açı oluşturan bir kiriş ele alındığında iki noktasal kuvvet uygulanması durumunda biçim-etkin olarak kabul edilir. Ancak yükün düzenli ve yayılı yük olması durumunda yarı biçim-etkin olarak değerlendirilir.

2.5.3 Strüktürel biçim ve verimlilik arasındaki ilişki

Uygulanan yükleme koşulları ve yapı elemanlarının boylamsal eksenlerinin biçimleri, meydana gelen iç kuvvetlerin türünü ve şiddetini belirler. Elemanlara yeterli dayanım ve rijitliği verecek, malzeme miktarı ve yükleme arasındaki ilişki yapısal verimliliği etkiler. Yapısal verimlilik malzemenin belli bir yükü taşımada kullanılan ağırlığı göz önünde bulundurularak incelenir. Eğer bir elemanın verimliliği yüksekse, dayanımının ağırlığa oranı da yüksektir. Yapısal elemanlar için

türlerine göre sınıflandırma, biçim ve verimlilik arasındaki ilişkiyi ortaya koyar. Bütünsel bina başarımının değerlendirilmesinde elemanların rolü önemlidir. Biçim-etkin modeller potansiyel olarak en verimli, biçim-etkin olmayan modeller ise en az verimli yapılardır. Biçim-etkin, yarı biçim-etkin ve biçim-etkin olmayan elemanlar için temel gruplandırma, verimlilik derecesini tanımlamak açısından en önemli faktördür. Elemanların en kesitlerindeki ve uzun profillerindeki geliştirilmişlik derecesine göre de tanımlanırlar.

En az verimli yapılar, biçim-etkin olmayan, basit en ve boy kesitli biçimlerdir. Az verimli yapılarda, yapısal elemanlar üzerinde geliştirme işlemleri uygulanabilir. Geliştirilmiş kesitlerde verimlilik kesit merkezinde gerilmeye uğramayan ya da az etkilenen malzemenin çıkartılması yoluyla arttırılır. Daha az malzeme ile hafifleşen elemanlar, daha verimli hale getirilir. Biçim-etkin olmayan elemanlar, uzunlamasına profillerinin değişimi ile geliştirilebilir. Bu şekilde iç kuvvetin yüksek olduğu durumda yüksek dayanım elde edilir. Örneğin oluklu döşeme levhası gerilmeye etkisinde olmayan kısımların çıkartılması yolu ile geliştirilmiştir. Üçgenlerden oluşan strüktürler de geliştirilmiş profillere örnektir. Biçimi değiştirmek için üçgenin kenar uzunluklarının değiştirilmesi gereklidir ve sistem buna direnç gösterir. Bilinen diğer bir örnek olan uçaklardaki genel biçim, strüktürel olmayan, aerodinamik başarım koşulları göze alınarak oluşturulmuştur. Bu sebeple destek strüktürü biçim-etkin değildir. Ancak geliştirilmiş yapı elemanlarının düzenlemesi ile yükü hafifletme ilkesi uygulanmıştır.

Biçim-etkin kabuklar yüksek verimliliktedir. Bazı durumlarda 100 m' ye yakın ya da daha büyük açıklıklar ince sayılabilecek kabuklar ile geçilebilir. Yüksek derecede strüktürel süreklilik bunu mümkün kılar. Öte yandan Le Corbusier Ronchamp kilisesi ya da Gehry Vitra Tasarım Müzesi heykelsi biçimler olup, verimli olmayan strüktürler olarak kabul edilmektedir.

Biçim-etkin olan ya da olmayan yapılardaki elemanların mafsalları, yapıların strüktürünü etkiler. Bu kıstasa göre elemanlar bağlanış biçimine göre sürekli ve ya süreksiz olarak tanımlanır. Sürekli yapılar, statik olarak belirsiz olup, kararlı durumda olmak için en az sayıda kısıtlama içerir. Çok az sayıda içerirler ya da hiç mafsal içermezler. Sürekli strüktürler verimli olup, geometrik kararlılığa sahiptir. Özellikle mimarın yapının genel biçimi ile özgürce oynamasını sağlar. Ancak sürekli yapıların inşa edilmesi ve tasarlanması süreksiz yapılara göre daha zordur.

Biçim-etkin strüktürlerin tasarım sürecinde doğru tanımlanmaları zordur. Yüzeyin eğimi sabit değildir. Bu da strüktürün analizini ve yapımını zorlaştırır. Çift yönlü eğriliğe sahip yüzeyde geometrinin basitleştirilmesi söz konusu olur. Uygulamalarda, kubbe ve ya dönüştürülebilen parabol ve elipslerde olduğu gibi basit eğrilerle oluşturulan biçimler uygulanır. Bunun gibi biçimlerin analiz ve inşa edilmesi daha kolaydır, ancak daha az verimlilik sağlar. Buna ek olarak gerçek yapılar çok çeşitli yükleme biçimlerine maruz kalırlar ki bu yükleme koşullarına göre biçim-etkin modelin değişmesi anlamına gelmektedir. Basınç kabukları rijit oldukları için yalnızca tek bir biçim alabilirler. Bunun sonucu olarak, bu tip yapılar eğilme gerilmesine direnç gösterebilecek nitelikte ihtiyaç duyulandan kalın olarak yapılmalıdır. Bu sebeple diğer biçim-etkin modellere göre daha az verimlidir.

İyi mühendislik almış bir yapı, en verimli değil, ancak istenilen yükleri en az malzeme ile taşıyabilendir. İnşaatın karmaşıklık derecesi, strüktürün dayanımı gibi başka bazı teknik faktörler de önemlidir. Verimli biçimler karmaşık olmakla birlikte, tasarlanması, inşası ve bakımları zordur. Bu sebeple mimari yaklaşım ile iyi strüktürel tasarım arasında bir denge oluşturulmalıdır. Karmaşık biçimlerin gerçekleştirilmesi günümüzün incelikli modern teknolojilerinin uygun görsel ifadesini yansıtmaktadır. Çoğunlukla yapılar büyük miktarda elemanın bir araya getirilmesi ile oluşturulur. Tüm yapının başarımı eleman tiplerine ve bir araya getiriliş biçimlerine bağlıdır (MacDonald, 2002).

2.6 Mimari Geometri

Matematik, en genel anlamda sembolik modellerin tanım ve yönlendirilmesiyle ilgilenir. Matematiksel model ise tanımlı olmayan elemanlar ve bunlar arasındaki ilişkilerle ilgilenir. Matematiksel idare, sembolik doğasından ötürü, kelimelerle ya da grafiklerle ifadeye göre daha kapsamlı ve çok yönlü kabul edilir. Herbert Simon'un savunduğu gibi, matematik, yalnızca nicel oluşumdan değil, temelde kelimelerle ifade edilmesi çok karmaşık olabilecek fenomenlerin açıkça ve kesinlikle sorgulanmasına izin vermesinden ötürü, bilimin baskın dili olmuştur (March, 1976. sf: x). En genel anlamdaki matematiksel modeller integral, gerçel-sayı sistemleri ve öklid geometrisidir. Ancak modern bilim ve teknolojide en önemli ilerlemeler, daha az tanımlı olan matematiksel modellerden yani gruplar, halkalar, alanlar, vektör

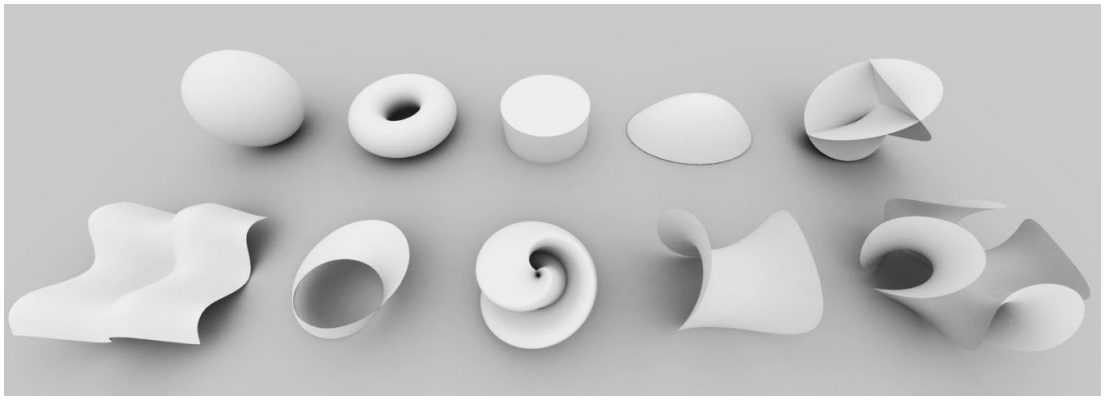
alanları, lineer ve boolean cebir, topoloji, grafik teorisi, cebir geometrisi, lineer, non-lineer, dinamik ve boolean programlamadaki uygulamalarla gerçekleştirilmiştir.

Mimari problemler, uygun şartlarda matematiksel problemlere dönüştürülebilir. March ve Steadman tarafından, inşa edilen biçimlerin kompozisyonlarının oluşturulması, mimaride biçimin sayısal olarak temsil edilmesinin ilk örneklerini oluşturur. İkisi de prizma matrislerine cevap veren, ikili kodlama kullanmıştır. Sonrasında daha karmaşık geometriler de incelenmiştir (Prousalidou ve Hanna, 2007). Biçimin Mimarisi (Architecture of Form, March, 1976) eserinde, yapılı biçimlerin geometrik tanımlamasıyla ilgili yöntemler geliştirilmiştir. Bu eser, aynı zamanda, başarım analizlerinin yapılması ve değerlendirilmesine yönelik yöntemler de sunar. Mimari geometri; görsel, işlevsel, teknik ve çevresel gereklilikleri karşılamalıdır (Holzer ve Downing, 2008).

Günümüzde, farklı matematiksel yöntemlerle oluşturulan biçimler çok çeşitlidir. Regle yüzeylerin parametrik temsili ile ilgili çalışmada, bilinen mimari yapılar, matrislerle ifade edilmiştir (Şekil 2.23). Regle yüzeyi, diferansiyel geometride incelenir. Birbirine paralel çizgilerle oluşturulan parametrik bir yüzeydir. En az değişkenle, çok çeşitli yüzeylerin temsili mümkündür. (Prousalidou ve Hanna, 2007). Ayrıca, matematiksel yüzeyler, eğri fonksiyonları kullanılarak oluşturulabilir (Şekil 2.24). Bu yöntemde, fonksiyonda bulunan değişkenlere atan değerler ile yüzey farklılaşacaktır.



Şekil 2.23 : Mimari yapının matrislerle ifade edilmesi(Prousalidou ve Hanna, 2007).



Şekil 2.24 : Yazar tarafından yürütülen çalışmada, eğri fonksiyonlarıyla matematiksel yüzeyler oluşturulmuştur (2012).

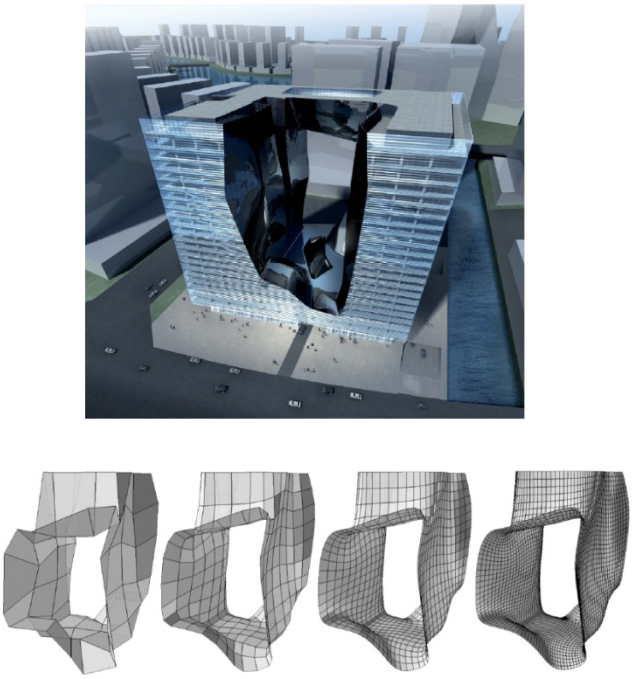
2.6.1 Serbest biçimlerin rasyonelleştirilmesi

Mimaride serbest biçimlerin özgürleşmesi dolayısıyla, *mimari geometri* alanında yapılan araştırmalar yoğunlaştırılmıştır. Mimari tasarımda oluşturulan yüzeyleri, analitik yöntemler geliştirerek incelemek amaçtır. Bu araştırmalar, diferansiyel geometri, hesaplamalı matematik, mimari tasarım ve mühendislik ara kesitinde bulunur (Pottman ve diğ, 2008). Karmaşık serbest biçimlerin inşa edilebilmesi için, biçimin daha basit parçalara bölünmesi gereklidir (Schiftner, 2008).

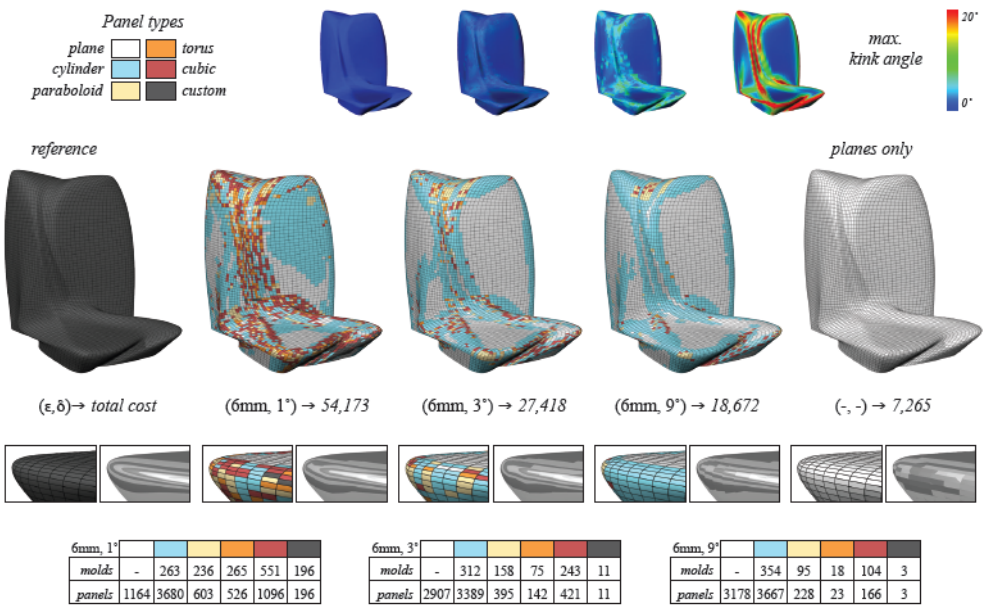
Serbest biçimlerin rasyonelleştirilmesi mimari geometri ile birlikte gelişen yeni araç ve teknikler üreten bir araştırma alanıdır. Ancak bu farklı malzemelerin kullanılması ile çözülemeyen sorunlar ortaya çıkmaktadır. Malzemenin davranışı ve üretim teknolojisinin panellerin oluşturulma hesaplamasına dâhil edilmesi gerekmektedir (Pottman ve diğ, 2008). Literatürde üç tip rasyonelleştirme süreci incelenmiştir: ön-rasyonelleştirme (pre-rationalization), rasyonelleştirme-sonrası (post-rationalization) ve eş zamanlı-rasyonelleştirme (co-rationalization). Eş zamanlı rasyonelleştirmede bileşenlerden oluşan sistem, biçimi tasarlarken eş zamanlı olarak ele alınır (Fischer, 2007). Ön-rasyonelleştirme işleminde ise, bina geometrisi bazı geometrik kısıtlamalar ile tasarımın erken aşamasında tanımlanmıştır. Rasyonelleştirme-sonrası işleminde ise, bina geometrisi gerçekçi ve inşa edilebilir bileşenler ile tasarımın ilerleyen aşamalarında basitleştirilir (Attar ve diğ, 2010). Rasyonelleştirme-sonrası işlemleri yaygın mimari uygulamalarda serbest biçimlerin gerçekleştirilmesine yöneliktir. Geometri, biçimin rasyonelleşmesi için uygulamalı geometrinin kuralları ile analiz edilip değerlendirilmelidir.

Klasik diferansiyal geometri yüzeyler gibi düzgün (sürekli) geometrik biçimleri inceler. Öte yandan, kesikli (süreksiz) geometri, sonsuz sayıda elemandan oluşan geometrik biçimleri inceler. Polihedron çok yüzü olan üç boyutlu bir şekildir. Geometrik katı cisim olmakla beraber, düz yüzeyleri ve düz kenarları mevcuttur. Polihedral yüzeylerin teorisi; yüzey teorisi yöntemleri ile geometrik kavramların eşleniklerini kesikli yüzeyler için geliştirmeyi hedefler (Bobenko ve diğ, 2006).

Karmaşık biçimleri parçalara bölmek ve eğrisel biçimler oluşturmak için çeşitli yollar mevcuttur. Kesikli yüzey çözümleri düşünüldüğünde, planar (düzlemsel) dörtgen paneller düğüm noktalarının daha az karmaşık olması sebebi ile üçgen panellere göre önemli avantajlar içermektedir. Tek yönlü eğriye sahip paneller, geliştirebilen şerit modeller (developable strip models) olarak kısmi- kesikli yüzey çözümleri olarak incelenir. Diğer tip kısmi- kesikli temsillerin negatif yüzey eğri parçalarını karşılayanlar regle yüzey panelleridir (Pottman ve diğ, 2008). Büyük ölçekli mimari serbest biçimlerin düzlemsel, tek ve çift eğrilikli panellerle rasyonelleştirilmesi algoritmanın uygun çözümü hesaplamasına dayalı bir yöntemdir (Şekil 2.25-2.26).



Şekil 2.25 : Serbest biçimli yüzey, algoritma aracılığı ile düzlemsel dörtgen bileşenlere bölünmüştür (Pottmann ve diğ, 2008).



6mm, 1°						
molds	-	263	236	265	551	196
panels	1164	3680	603	526	1096	196

6mm, 3°						
molds	-	312	158	75	243	11
panels	2907	3389	395	142	421	11

6mm, 9°						
molds	-	354	95	18	104	3
panels	3178	3667	228	23	166	3

Şekil 2.26 : Algoritma aracılığı ile paneller oluşturulurken maliyet hesabı gerçekleştirebilmektedir (Eigensatz ve diğ, 2010).

2.6.2 NURBS yüzeyler

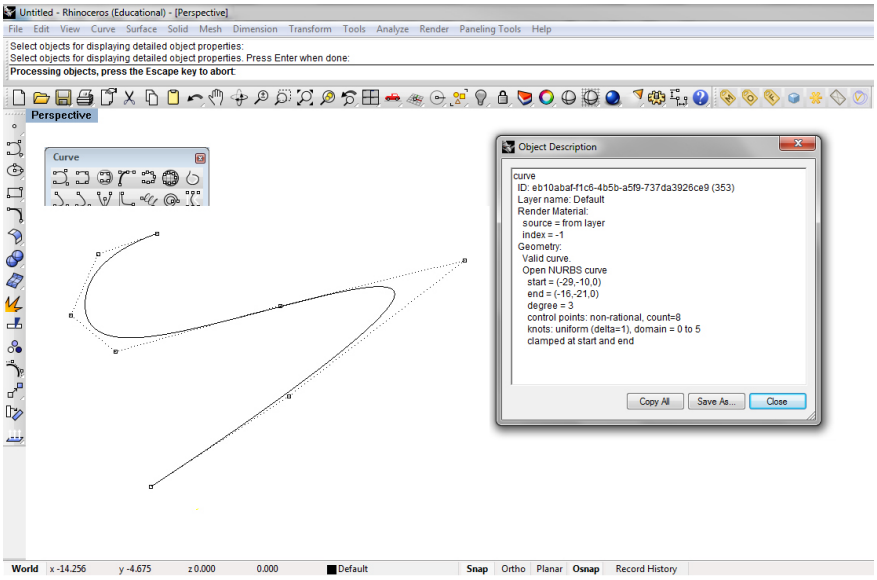
B-Spline eğri ve yüzeyler Pierre Bezier'in öncü çalışmalarıyla 1970' lerde ortaya çıkmıştır. NURBS (Non-uniform rational B-Spline : Üniform Olmayan Rasyonel B-spline), günümüzde eğri ve yüzeylerin standart tanımı olmuştur. NURBS' ün ileri matematiksel ve algoritmik özellikleri, başarılı endüstriyel uygulamalarla birleşmiştir. NURBS, BDT ve BDÜ alanlarında önemli rol oynamaktadır (Piegl ve Tiller, 1997). BDT yazılımlarında kullanılan grafik tanım ve işlemleri, 2D ve 3D grafik işlemlerin matematiksel temellere dayandırılması ile oluşturulur. Bu şekilde, geometri mekânsal bilgi içererek, her türlü noktanın belirli bir şekilde konumlanmasını sağlar (von Bülow, 2007).

Serbest biçimli binalar için kullanılan üretim teknolojileri havacılık, gemi ve araba yapımı ve tasarım endüstrilerinden yapı endüstrisine aktarılmıştır. Serbest yüzeylerin tasarım modellerinin oluşturulmasında hassasiyet sağlayan BDT yazılımlarının da bu tür endüstrilere yönelik olarak geliştirildiği bilinmektedir. Örneğin NURBS tabanlı üç boyutlu BDT yazılımı Rhino' nun, ilk olarak endüstriyel tasarım uygulamalarında kullanılmak amacıyla geliştirildiği bilinmektedir.

NURBS yüzeyleri, günümüzde, her türlü tasarım alanında biçimin geometrik temsili için kullanılan, önemli bir matematiksel araçtır. NURBS yüzeyler, matematiksel ve parametrik olarak tanımlanmaları açısından elverişlidir. Aynı zamanda, NURBS

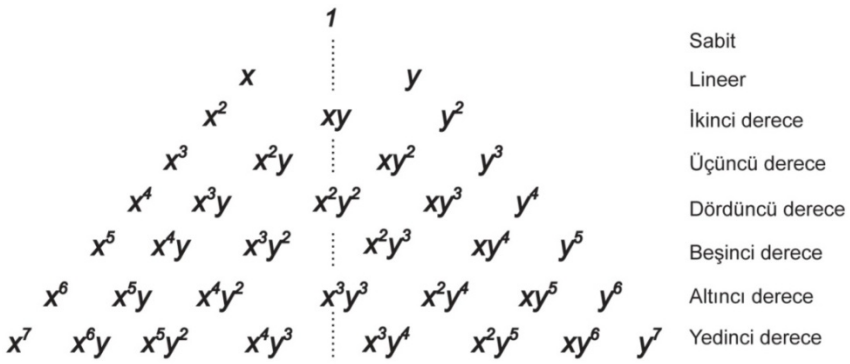
kontrol noktalarının seçilmesi ve modellenmesi tasarımda esneklik sağlar. NURBS yüzeylerinin kullanımı, her türlü serbest biçimli eğri ve yüzeylerin tanımlanmasına imkân tanır. NURBS' ün başarısı çeşitli nedenlerdendir. Öncelikle NURBS hem konik kesitler ve dörtgen yüzeyler gibi analitik şekilleri, hem de araba ve gemi gövdeleri gibi serbest-biçimleri ifade etmek için uygun bir matematiksel bir temel oluşturur. Ayrıca NURBS algoritmaları hızlı ve kararlıdır (Piegl ve Tiller, 1997). NURBS, grafik açıdan bakıldığında, uygun hızda ve dengeli olarak hesaplanabilirler. Ayrıca NURBS eğri ve yüzeyler bilgisayarda saklanırken, az hafızaya gereksinim duyulacaktır.

Rhino yazılımı, NURBS eğri ve yüzeylerini belirli kavramları kullanarak tanıtır (Şekil 2.27). Tez kapsamında geliştirilen MBHT-m, Rhino uyumlu ek yazılımdır. Bu sebeple, NURBS tabanlı mimari geometrinin tanımlanması ve anlaşılmasına yönelik olarak altyapı oluşturmayı hedefleyen, temel kavramlar incelenmiştir.



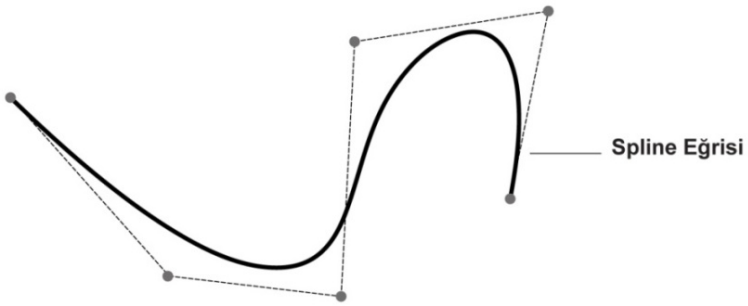
Şekil 2.27 : Rhino arayüzünde oluşturulan bir NURBS eğrisi ve buna ilişkin oluşturulan nesne tanımlamaları.

Polinom: Bir fonksiyon çeşidi olan polinom, katsayılarla çarpılmış bir ya da daha çok değişkenin kuvvetlerinin toplamıdır (MathWorld, 2012) (Şekil 2.28).



Şekil 2.28 : Paskal polinom üçgeni.

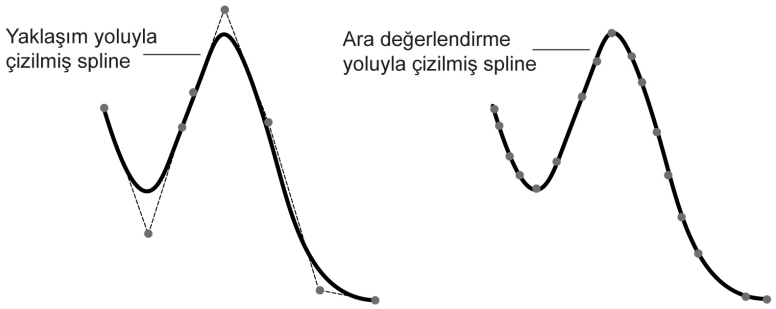
Spline: Matematikte spline, parça olarak tanımlanmış düzgün polinom fonksiyondur (MathWorld, 2012). Noktalar kümesi tarafından belirlenen bir eğri oluşturmak için kullanılan esnek bir şerittir. Şerit boyunca tanımlanmış olan ağırlıklar (weight), sabit konumda duran bir eğri oluşmasını sağlarlar (Şekil 2.29).



Şekil 2.29 : Spline eğrisinin gösterimi.

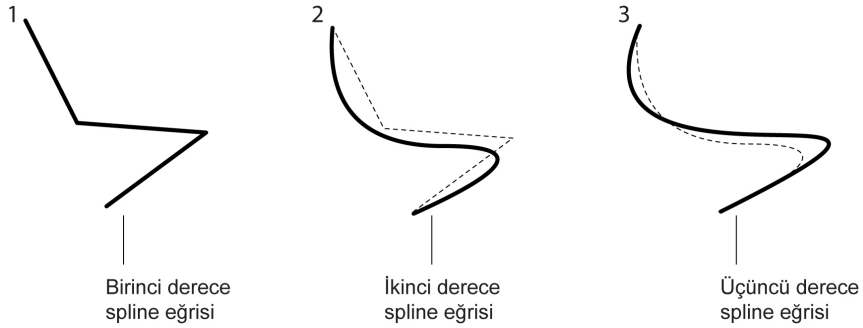
Kontrol Noktaları: Spline eğrilerini oluşturan kontrol noktaları, nokta koordinatları tarafından tanımlıdır. Kontrol noktalarının dizilişine göre eğrinin şekli oluşur. Köşe (vertex) ya da nokta (node) olarak adlandırıldığı da olur.

Kontrol noktaları ile ilişkili olarak iki tür spline gösterimi bulunmaktadır. Bunlardan *ara değerlendirme* (interpolation) türü spline için eğrinin tüm kontrol noktalarından geçmesi gerekmektedir (Şekil 2.30). *Yaklaşım* (approximation) spline için ise eğrinin tüm kontrol noktalarından geçme zorunluluğu yoktur. Spline eğrilerine yeni kontrol noktalarının eklenmesi ya da silinmesi mümkündür. Buna ek olarak etkileşimli BDT yazılım paketlerinde, kullanıcılar kontrol noktalarının koordinatlarının değiştirilmesini kolaylıkla gerçekleştirebilir.



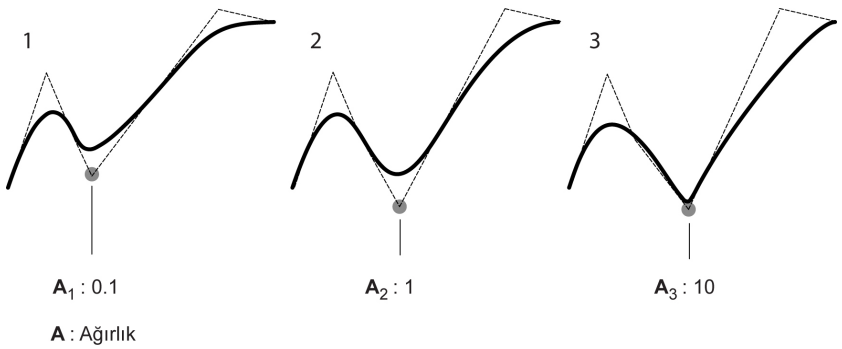
Şekil 2.30 : Ara değerlendirme ve yaklaşım spline türleri.

Derece: Bir polinom fonksiyonun derecesi, değişkenin en yüksek kuvvetini ifade eder. NURBS modelleme açısından, derecenin bir eksiği, bir aralıkta oluşturulabilecek kavis sayısını ifade eder. Örneğin, birinci derecede bir çizgi bükülemezken, ikinci dereceden çizgiler parabol, hiperbol ve yay gibi konik kesitli tek kavisli eğrileri temsil edebilir. Üçüncü dereceden, kübik eğrilerin kontrol noktalarının ayarlanış biçimine göre, iki kavisli eğrilerin oluşturulması mümkündür (Şekil 2.31).



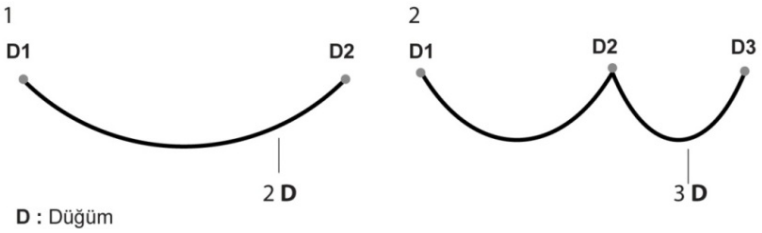
Şekil 2.31 : Birinci, ikinci ve üçüncü derecelerde spline eğrilerin davranışları.

Ağırlık: Bir kontrol noktasının ağırlığı, bir eğrinin ya da yüzeyin kontrol noktasına ne kadar bağlı olduğunu gösterir. Ağırlık değeri arttıkça, eğri ya da yüzeyin kontrol noktasına yakınlığı ve hassasiyeti artar (Şekil 2.32).



Şekil 2.32 : Kontrol noktası ağırlığının değiştirilmesi.

Düğüm: Düğüm (knot) bir eğri parametresidir. Düğüm noktasına göre B-spline polinom tanımı değiştirilebilir. Örneğin, yerçekimi etkisi altındaki, iki ucundan asılmış bir zincir eğrisi polinom fonksiyon ile tanımlanabilir. Eğer bu zincire yeni bir düğüm eklenip, bu noktadan da sabitlenirse, zincirin şekli değişecek ve farklı polinom tanımlarıyla düğümler arasındaki eğrilerin tanımlanması gerekecektir (Rhinoceros 4, 2012) (Şekil 2.33).



Şekil 2.33 : Düğüm noktasının tanımlanması.

Taban Eğrisi: Basit düz bir çizgi aşağıda belirtilen şekillerde ifade edilebilir:

Açık (explicit) fonksiyon olarak:

$$y = mx + b \tag{2.4}$$

Parametrik fonksiyon olarak:

$$x = x_0 + au$$

$$y = y_0 + bu$$

$$z = z_0 + cu \tag{2.5}$$

Eğer bağımsız bir parametre olarak u oluşturulmuşsa, eğri fonksiyonu x, y, z koordinat sisteminde, bir aralık arasında tanımlanan parametrelere bağlı kalarak ifade edilebilir:

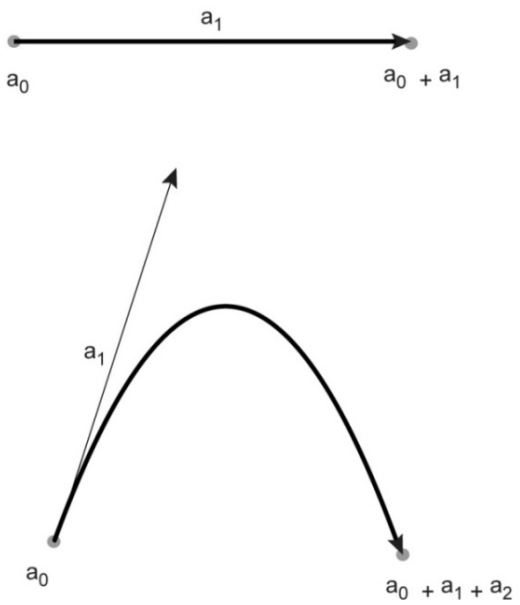
$$C(u)= (x(u), y(u)) , a<= u<= b \tag{2.6}$$

Buradan, n. dereceden kuvvet taban eğrisi (power basis curve) şöyle tanımlanır:

$$C(u) = (x(u), y(u), z(u)) = \sum_{i=0}^{n} a_i u^i,$$

$$0<=u<=1 \tag{2.7}$$

Bu denklemde, $a_i = (x_i, y_i, z_i)$ vektörlerdir (Şekil 2.34).



Şekil 2.34 : Düz çizgi: taban eğrisi derecesi 1, parabolik yay:taban eğrisi derecesi 2.

B'ezier Eğrileri: Kuvvet taban eğrileri, kullanıcı etkileşimli biçim oluşturmada yetersiz oldukları için, matematiksel olarak eş olan, ancak geometrik modelleme ve bilgisayarda biçimin yönlendirilmesi için daha uygun B'ezier eğrileri geliştirilmiştir. İlk olarak karmaşık araba yüzey tasarımları için kullanılmış olan bu eğriler üzerinde kolayca değişiklikler yapılabilir. B'ezier eğrisinin derecesi, kontrol noktası sayısının bir eksiğidir. Yani kontrol noktası sayısı artarsa derece yükselir. B'ezier eğrisi, bir kontrol poligonu tarafından oluşturulmaktadır. Karmaşık şekiller için birden çok B'ezier eğrisi birbirine bağlanabilir.

P_0 ile başlayan ve P_n ile son bulan noktaların çizgilerle birleşmesinden şekillenen geometri Bézier poligonu ya da kontrol poligonu olarak adlandırılır. Eğrinin başlangıcı ve sonu, kontrol poligonunun ilk ve son bölümüne teğettir. B'ezier eğrilerinin en önemli olumsuzluğu, eğrinin kontrol noktalarından geçmemesinden kaynaklanan hassasiyet eksikliğidir. Ayrıca, bir kontrol noktasının değişmesi tüm eğriyi değiştirir ve bölgesel kontrole izin verilmez. B' ezier eğrisi (n. dereceden) genel olarak şöyle tanımlanır:

$$C(u)= \sum_{I=0}^{n} Bi,n\ (u)Pi \qquad \textbf{(2.8)}$$

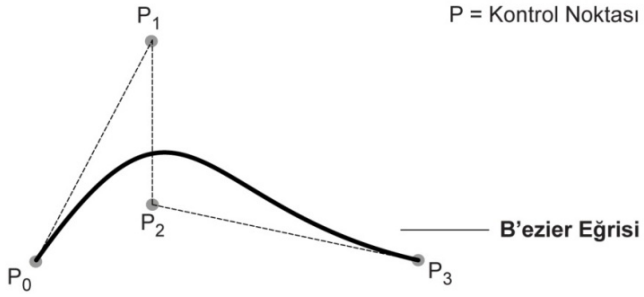
0<=u<=1; iken *Pi* kontrol noktalarının vektörü ve *Bi, n(u)* Taban Fonksiyon olarak tanımlanmıştır. *Pi*= (xi, yi, zi) koordinatlarıdır. Taban fonksiyonlar ise n. dereceden Bernstein polinomları olarak bilinir:

$$Bi, n(u) = \frac{n!}{i!(n-i)!}\, u^{i}\,(1-u)^{n-i},\ 0<=u<=1 \qquad \textbf{(2.9)}$$

Birinci dereceden B'ezier eğrisi düz bir çizgiyken, ikinci dereceden olanlar parabolik yaylar ve üçüncü dereceden olanlar kübik B'ezier eğrilerdir. Üçüncü dereceden B'ezier eğrisi şöyle ifade edilebilir:

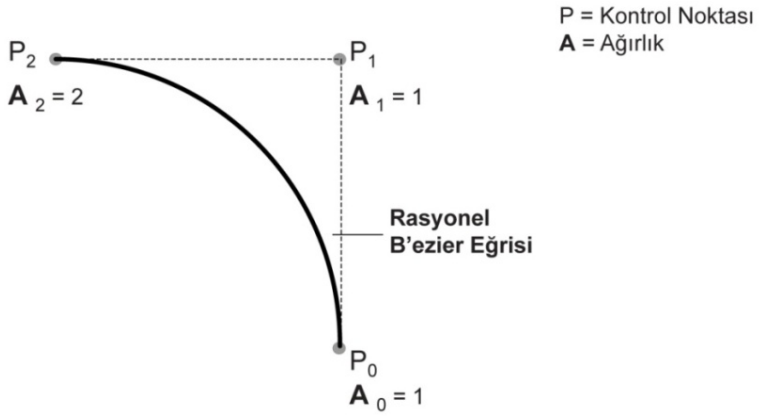
$$C(u) = (1-u)^3 P_0 + 3u(1-u)^2 P_1 + 3u^2(1-u)P_2 + u^3 P_3 \qquad \textbf{(2.10)}$$

Bu denklemde, P_0, P_1, P_2, P_3 kontrol noktalarını temsil eder (Şekil 2.35). Parametre u değerinin, 0'dan 1'e değiştirilmesi ve değerin denkleme oturulması ile eğrideki tüm noktalar tanımlanır (Şekil 2.35).



Şekil 2.35 : Üçüncü dereceden B'ezier eğrisi.

Rasyonel B'ezier Eğriler: B'ezier eğriler daire, elips, küre gibi konik kesitli şekilleri polinomlar ile hassas olarak temsil edemedikleri için, ağırlıkların tanıtılmasıyla rasyonel fonksiyonlar uygulanmıştır. Bu şekilde konik kesitlerin temsili mümkün olmuştur. Ağırlık faktörünün eklenmesiyle, tasarımda daha çok kontrol sağlanmış olur (Şekil 2.36).



Şekil 2.36 : Rasyonel B'ezier eğrisi.

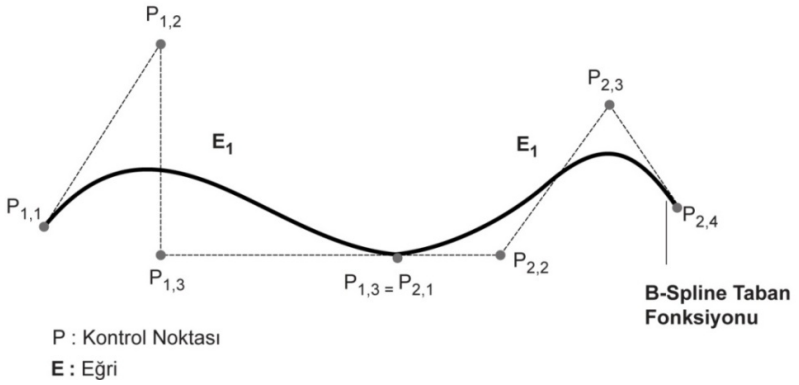
Rasyonel bir B'ezier eğrisi (n. dereceden), w_i ağırlık vektörü olmak kaydıyla şöyle ifade edilir:

$$C(u) = \frac{\sum_{i=0}^{n} B_{i,n}(u) P_i w_i}{\sum_{i=0}^{n} B_{i,n}(u) w_i}, \quad 0<=u<=1 \qquad \textbf{(2.11)}$$

B-Spline Taban Fonksiyonu: Yalnızca tek polinomdan ya da rasyonel bir parçadan oluşmaları nedeniyle, rasyonel B'ezier eğrilerinin kısıtlamaları bulunmaktadır. Çözüm olarak parçalı polinom eğrilerinin kullanılması önerilmiştir. Bu parçaların kesme noktaları arasında oluşturulan vektör şöyle ifade edilir:

$$U = \{u_i\},\ 0 < i < k \qquad \textbf{(2.12)}$$

Bu durumda, *k* parça sayısını ve *u* vektörleri ifade eder. Vektörler düğüm vektörleri, kesme noktaları da düğümler olarak adlandırılır. Düğüm vektörü, belirlenen parametre aralığında, eğrinin çizilme aşamasında polinomların başlangıç ve bitiş noktalarını belirler (Şekil 2.37).



Şekil 2.37 : Parçalı polinom fonksiyonu.

B-Spline Eğrileri: B-Spline (basis spline) eğrileri Bezier eğrilerinin genelleştirilmiş halidir. Bezier eğrilerine göre en önemli avantajları, bölgesel kontrolü mümkün kılmalarıdır. B-Spline eğrisinin derecesi, kullanılan kontrol noktasından bağımsızdır. Bölgesel kontrole izin veren B-spline eğrilerindede, bir kontrol noktası sadece belli bir bölüme etki eder. Eğrinin şekli kontrol noktalarını hareket ettirerek ayarlanabilir. B-Spline derecesi yükseldikçe, yakın olan kontrol noktasına etkisi azalır. B-Spline taban fonksiyonu, B'ezier eğrilerinin tek ifadede temsil edilmesini sağlar. Kontrol noktalarıyla birleştirilen p.dereceden B-Spline eğrisi şu şekilde ifade edilir:

$$C(u) = \sum_{i=0}^{n} N_{i,P}(U)P_i\,,$$

$$a <= U <= b \qquad \textbf{(2.13)}$$

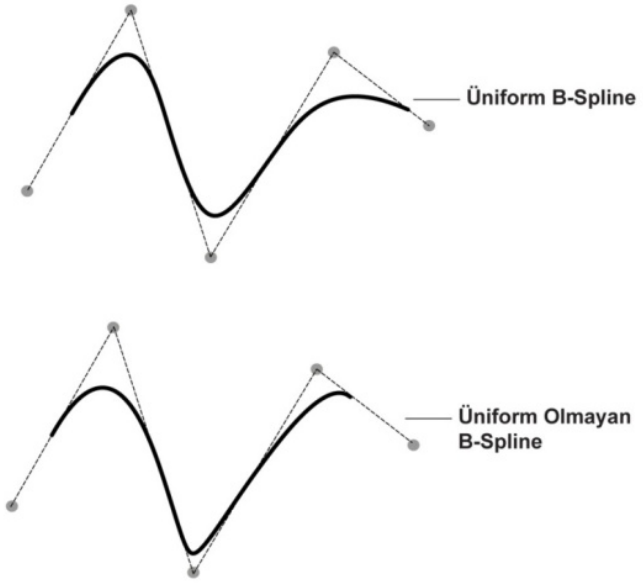
Bu denklemde, P_i kontrol noktası vektörüdür. $N_{i,P}(U)P_i$ ise p. dereceden, belirli periodik ya da üniform olmayan düğüm vektörü U ile temsil edilen, B-Spline taban fonksiyonu ifade eder.

Rasyonel B-Spline Eğri ve Yüzeyleri: B-Spline eğriler polinom eğrileri olduğu için daire ve elips gibi basit eğrileri temsil edemezler. Bu sebeple, B-Spline eğrilerin yanında, rasyonel B-Spline eğriler tanıtılmıştır. Rasyonel fonksiyon ve ağırlıkların belirtilmesi, p.dereceden NURBS eğrisi için şöyle gerçekleştirilir:

$$C(u) = \frac{\sum_{i=0}^{n} N_{i.p}(U) P_{i.wi}}{\sum_{i=0}^{n} N_{i.p}(U) w_i}$$

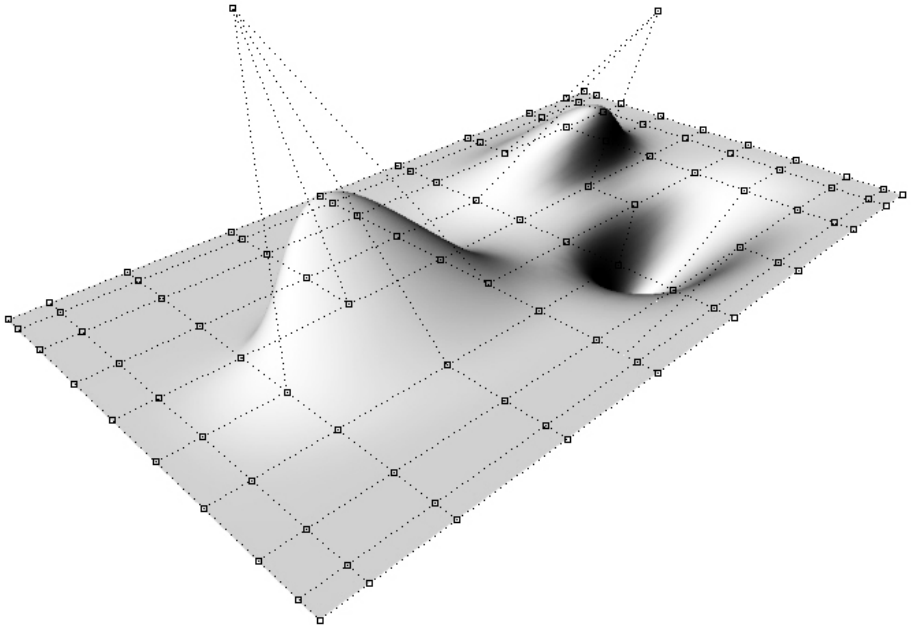
$$a <= U <= b \qquad \textbf{(2.14)}$$

Bu denklemde, P_i kontrol noktaları, w_i ağırlık, ve $N_{i,p}(U)$, p.dereceden B-Spline taban fonksiyonunu belirli, periyodik ve üniform olmayan düğüm vektörü u üzerinden tanımlanır. Üniform B-Spline eğrileri için eğri boyunca, düğümler eşit mesafelerde yerleşmiştir. Üniform olmayan için ise bu düğümler farklı mesafelerde bulunur (Şekil 2.38).



Şekil 2.38 : Üniform düğüm vektörü ve üniform olmayan düğüm vektörü.

NURBS eğrisinden yüzeye geçmek ise, diğer bir parametre olan V' nin, kendi B-Spline taban fonksiyonu ve düğüm vektörünün ikinci yönde uygulanması ile gerçekleşir. Bu şekilde p derecesinden U yönünde, q derecesinden V yönünde parçalı rasyonel polinom fonksiyonu olarak NURBS yüzeyi oluşturulmuş olur. NURBS eğrileri ve yüzeyleri hem B-spline hem de Bézier eğrileri ve yüzeylerinin genelleştirilmiş halidir. Kontrol noktası ve ağırlık kullanımı ile birçok biçimin tasarımında esneklik sağlanır. NURBS eğri ve yüzeyleri, kontrol noktalarının değiştirilmesiyle düzenlenebilir (Şekil 2.39).



Şekil 2.39 : Serbest biçimli bir NURBS yüzeyi.

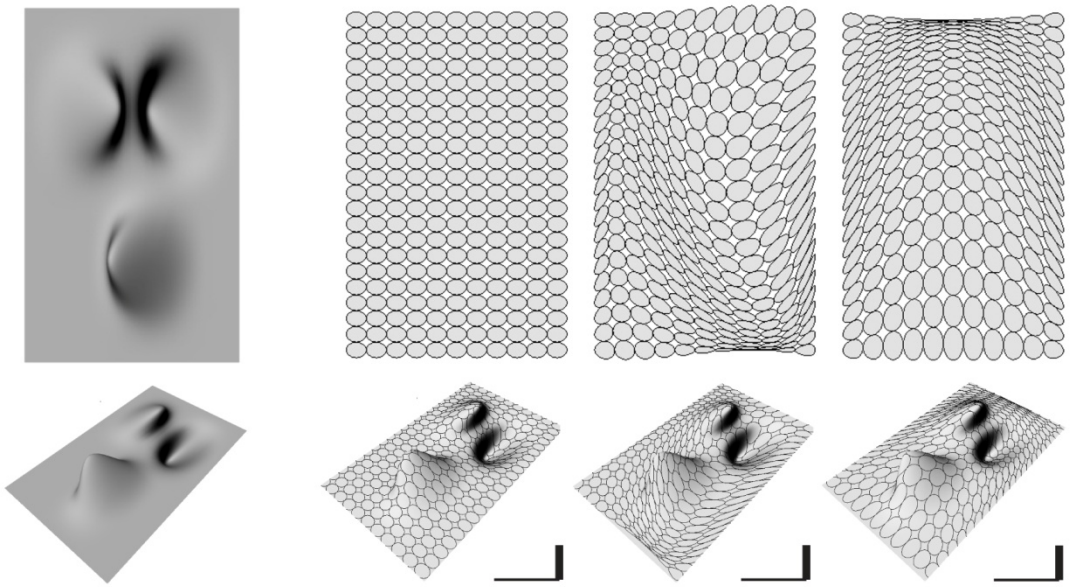
NURBS yüzeylerin matematiksel ifadesi, kullanıcı tarafından, biçim türetme işlemi sırasında kontrol edilen, bir dizi kontrol noktası ile tanımlanmıştır. Yüzey derecesi (p,q) olan bir NURBS yüzeyi şöyle ifade edilir:

$$S(u,v) = \frac{\sum_{i=0}^{m} \quad \sum_{j=0}^{n} \quad N_{i.p}(U) N_{j.q}(V) w_{i.j} \mathrm{P}_{i.j}}{\sum_{i=0}^{m} \quad \sum_{j=0}^{n} \quad N_{i.p}(U) N_{j.q}(V) w_{i.j}} \qquad \textbf{(2.15)}$$

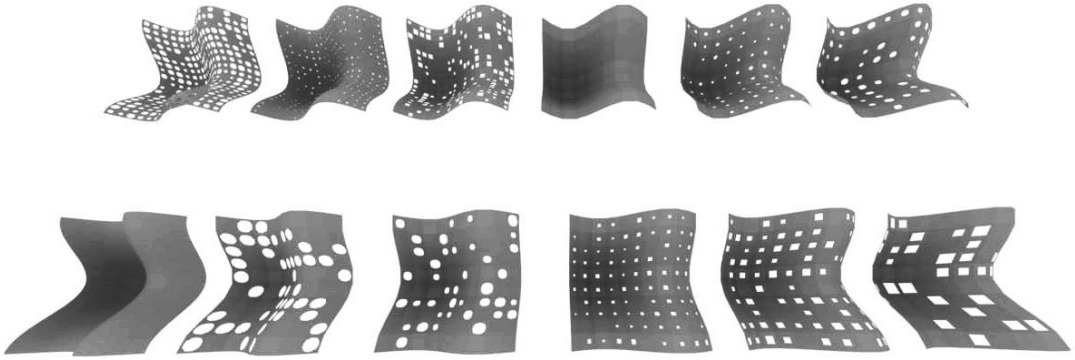
$\mathrm{P}_{i.j}$ control noktaları ve $N_{i.p}$ *ve* $N_{j.q}$ B-Spline taban fonksiyonlarıdır. $\mathrm{P}_{i.j}$ 'nin ağırlığı $w_{i.j,}$ homojen nokta olan $\mathrm{P}_{i.j}^{w}$ nin son ordinatıdır (MathWorld, 2012).

2.6.3 Mimari geometri ve bileşenler arasındaki ilişki

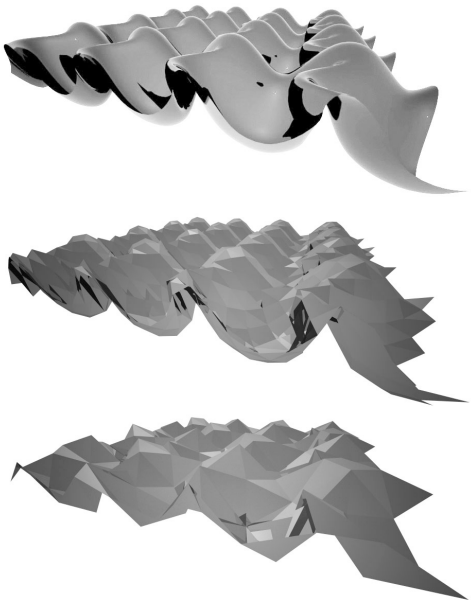
NURBS aracılığı ile her türlü biçim, iki bağımsız parametre olan U ve V'nin polinom fonksiyonu olarak ifade edilebilir. U ve V değerleri, yüzey üzerindeki x ve y yönlerinde olan bölünmelerle ifade edilir. Oluşturulan yüzey üzerindeki herhangi bir noktanın, özel birer U ve V değeri bulunmaktadır. Geometriyi oluşturan her nokta koordinatı tanımlıdır. Bu sebeple, mimari ölçekteki yüzeyin, malzeme ve üretim kısıtlamaları dolayısıyla bileşenlere bölünmesi gibi işlemler, elverişli bir biçimde uygulanabilir. Çeşitli geometrik örüntüler (pattern) NURBS yüzeyine kolaylıkla atanabilir (Şekil 2.40). Bunu gerçekleştirirken oluşan bileşenlerin yüzey eğrilik derecelerini tanımlamak mümkündür. Örneğin çift eğrilikli, karmaşık bir yüzeyin; algoritmalar aracılığı ile rasyonelleştirilerek, düz ya da tek eğrilikli panellerle, yeniden oluşturulması mümkündür (Şekil 2.41-2.43).



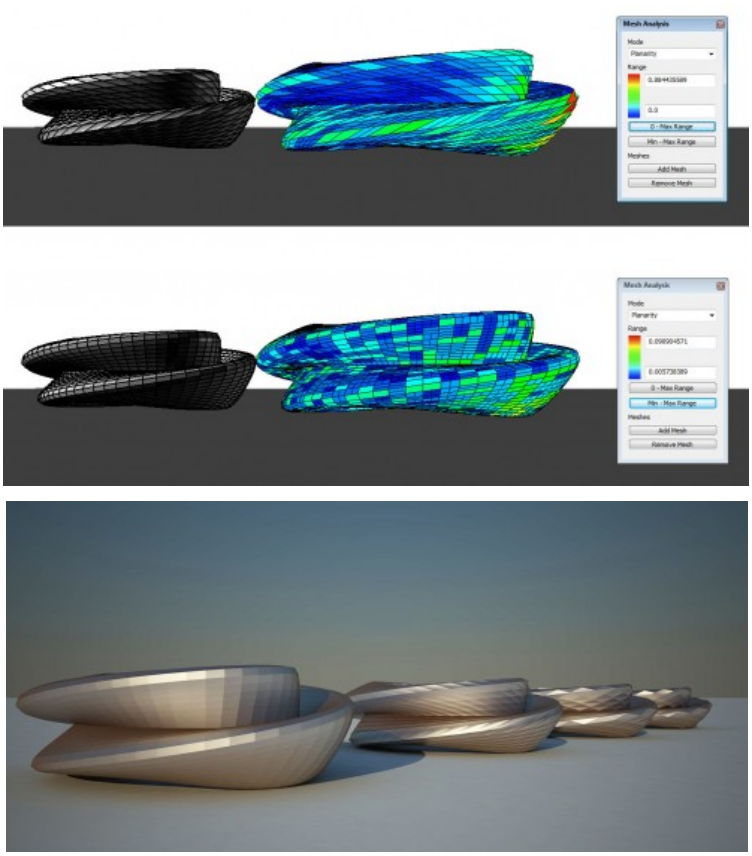
Şekil 2.40 : Yazar tarafından farklı örüntülerin NURBS yüzeylere atanması (2012).



Şekil 2.41 : Yazar tarafından yüzeylerde panel ve boşlukların incelenmesi (2012).

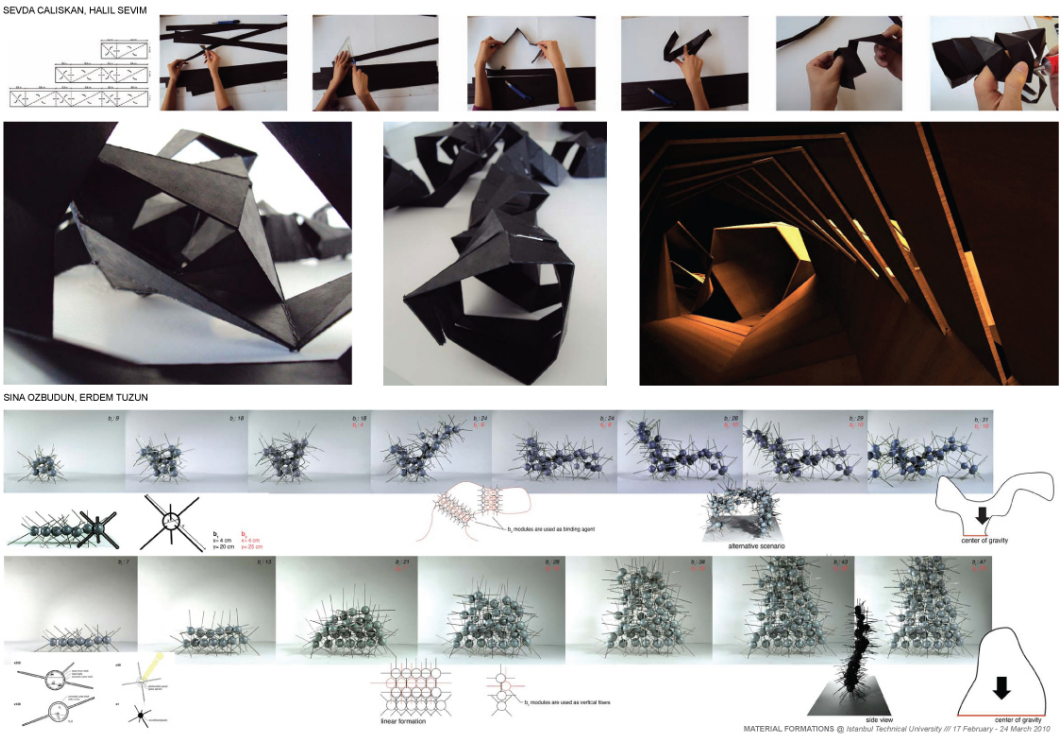


Şekil 2.42 : Yazar tarafından çift eğrilikli yüzeye farklı paneller atanması (2010).

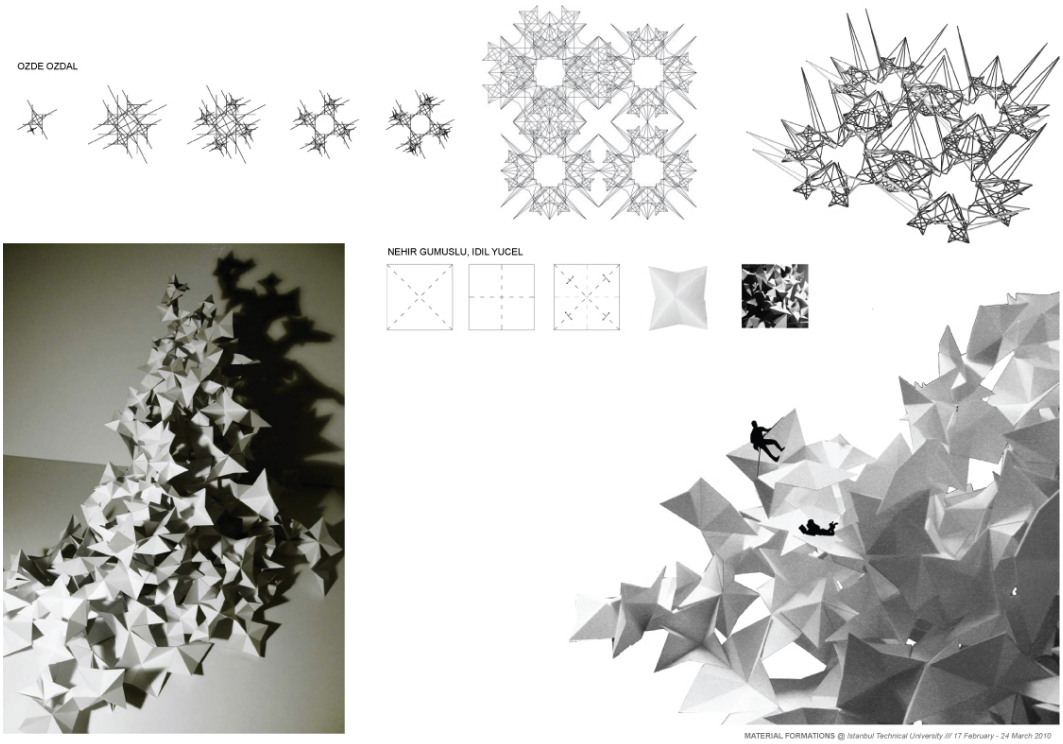


Şekil 2.43 : Yazar tarafından yüzeyin panellere bölünerek analiz edilmesi (2011).

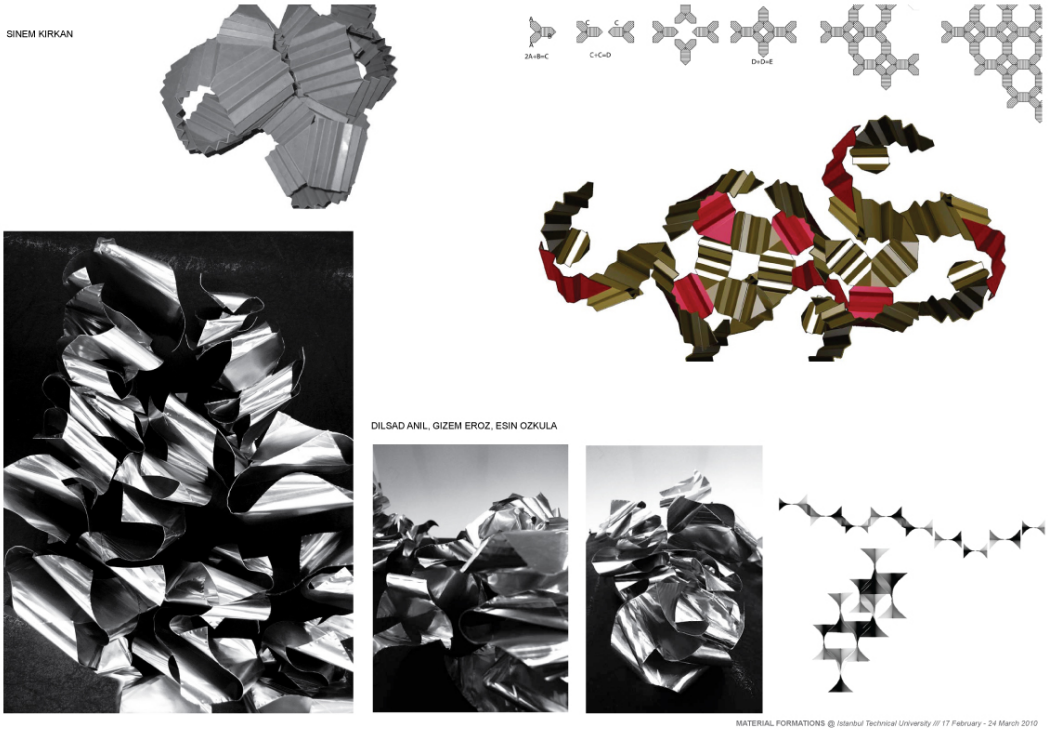
Yazar tarafından yönetilen "Malzeme Biçimlemeleri Çalıştayı", malzeme aracılığı ile biçim bulmaya dayalı fiziksel model tabanlı bir uygulamadır (Yazıcı, 2011) (Yazıcı ve Tanaçan, 2010). Biçim, bütünü oluşturan bileşenlerin tasarımıyla değerlendirilir. Malzeme ve biçim bütünleşik bir tasarım stratejisi içinde ele alınır. Malzeme davranışı prototiplerle denenir. Çalıştayda, kural tabanlı olarak sistemi tanımlamak, hesaplamaya dayalı geometrik ilişkileri oluşturmak amaçlanmıştır. (Şekil 2.44-2.48).



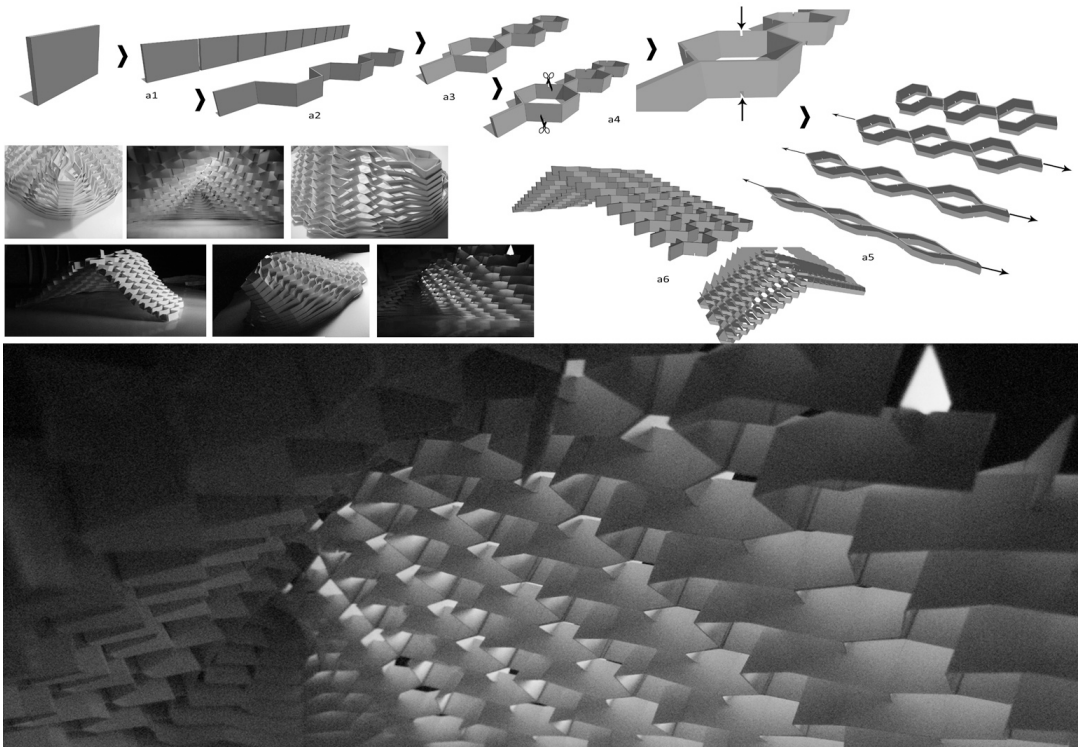
Şekil 2.44 : Malzeme Biçimlemeleri Çalıştayı, İTÜ (2010).



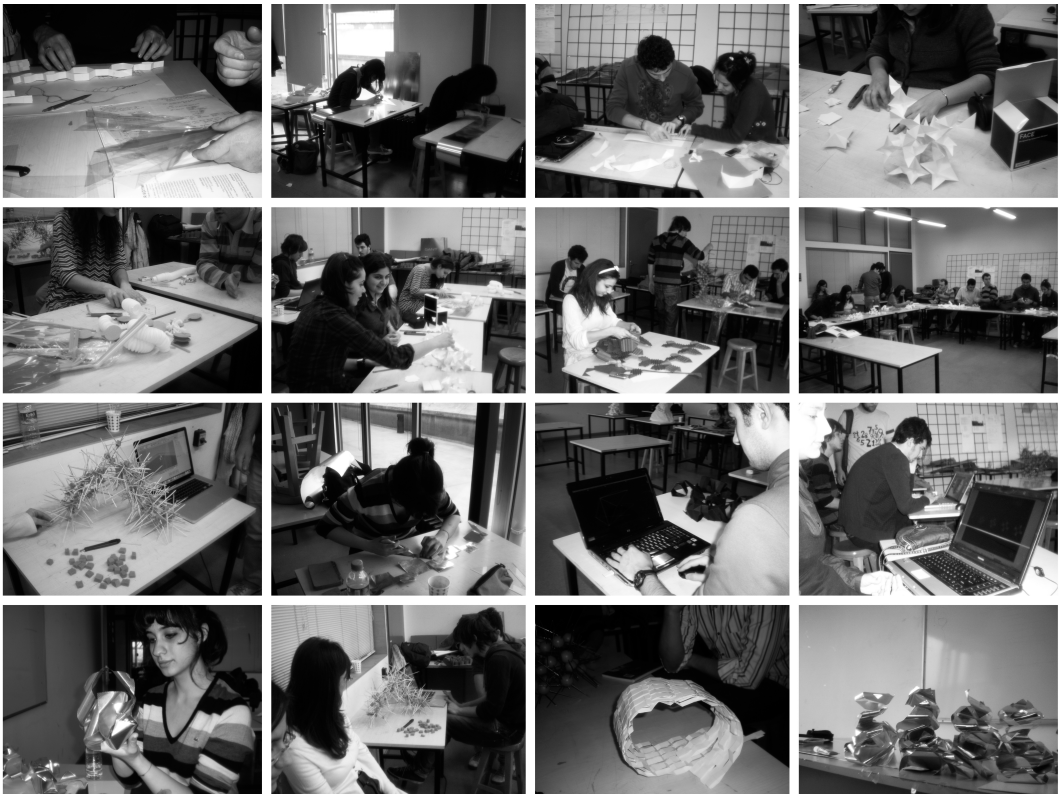
Şekil 2.45 : Malzeme Biçimlemeleri Çalıştayı, İTÜ (2010).



Şekil 2.46 : Malzeme Biçimlemeleri Çalıştayı, İTÜ (2010).



Şekil 2.47 : Malzeme Biçimlemeleri Çalıştayı, İTÜ (2010).



Şekil 2.48 : Malzeme Biçimlemeleri Çalıştayı, İTÜ (2010).

3. MALZEME VE BAŞARIM

Binalarda başarım (performans) kavramı eski çağlara dayanır. Antik çağda, Vitruvius (1998), "Mimarlık Üzerine On Kitap" isimli eserinde, binaların dayanıklılık, uygunluk ve güzellik (firmitas, utilitas, ve venustas) ilkelerine bağlı kalınarak yapılması gerekliliğinden söz ederek, bu üç kavramı mimarlığın temel ilkeleri olarak belirlemiştir. Bu ilkelerin yorumlanışına göre, bir binanın yerçekimi ve rüzgâr gibi kuvvetlere dayanım göstermesi ve tasarlanan yaşam döngüsünü tamamlaması için dayanıklı olması şarttır. Aynı zamanda, uygun ya da işlevsel olup, insan üzerinde olumlu etki bırakabilecek görsel niteliklere sahip olmalıdır (Cook, 2007).

Bu tezde amaçlanan, *malzeme, biçim ve başarım* arasındaki ilişkinin sınanması açısından, strüktürel başarım ve strüktürel optimizasyon konularının değerlendirilmesi önemli görevler üstlenir. Bundan dolayı, mimarlıkta başarım kavramı ve başarım değerlendirmesiyle ilgili temel altyapı oluşturularak, strüktürel başarım konusuna ağırlık verilmiştir. Bu bağlamda, yenileşimci mimarlık ve mühendislik uygulamalarının en önemli aktörlerinden, ileri mühendislik hesaplamaları olarak karşımıza çıkan SEY incelenmiştir. Her türlü karmaşıklıkta biçimin başarımını analiz etmekte kullanılan SEY hesaplamasında, 2. Bölüm' de detaylı olarak ele alınan, malzemenin yapısına ilişkin bilgiler ve mimari geometri en önemli rolleri üstlenir. Biçimin verilen koşullarda, başarım değerlendirmesine göre, *optimal* (en uygun) hale getirilmesi, yani *optimum* olması ise strüktürel optimizasyon süreciyle sağlanır. Bu kapsamda, temel optimizasyon kavramları, strüktürel optimizasyon türleri ve yöntemleri incelenmiştir. 2. Bölüm 'de bahsedilen, GA gibi doğal sistemlerdeki optimizasyon süreçleri, yapıya ilişkin karmaşık yapıdaki optimizasyon problemlerinin çözümüne esin kaynağı olmuştur. Strüktürel başarım ve strüktürel optimizasyona ilişkin parametre, kural ve ilişkiler, UML (4. Bölüm) ile oluşturulan MBHT-m'nin (5. Bölüm) içeriğinde bulunmaktadır.

3.1 Bina Başarımı

Başarım kavramı, kullanıcı gereksinimlerini karşılamak üzere, içinde malzeme, bileşen veya sistemin istenen özelliklerinin yer aldığı, düzenlenmiş bir işlemler dizisidir. Burada nesnenin ya da olgunun çözüm içinde nasıl davranması gerektiği önemlidir. Başarım düşüncesinde, kullanımda ihtiyaç duyulan gereksinimler öne çıkar. Aynı bağlamda, yapı ürünlerinin herhangi bir düzeyinde yapılacak değerlendirme, diğer düzeylerden sağlanan verilere bağlıdır. Bina içinde bulunan bir ürün tek başına değerlendirilemez. Dolayısı ile bina başarımı, birlikte kullanıldığı diğer ürünlerle beraber kullanımına bağlıdır. Başarım gereksinimlerinin saptanması, kullanılacak ürün veya kullanım sürecini etkileyen tüm etmenlerin bütünleşik olarak incelenmesine bağlıdır (Sirmen, 1997). Bu alanda modeller ve benzetimlerden yararlanılarak, gerçeği yansıtan varsayımlar yapılmaktadır.

Başarım gerekliliklerıyle ilgili farklı gruplamalar yapılabilir. Bazı araştırmalara göre, mekânsal konfor; termal konfor; görsel konfor; akustik konfor; hava niteliği ve bina sağlamlığı olarak altı başlıkta incelenebilir (Sevdin, 1992). Farklı bir yaklaşımla ise, güvenlik; insan sağlığı ve konforu; kullanılabilirlik; kalıcılık; ömür; ekonomi gibi başlıklar altında düzenlenebilir (Sirmen, 1997). Strüktür, durabilite, enerji başarımı, inşa edilebilirlik, alan verimliliği, yangın güvenliği, akustik başarım, çevresel etkiler ve bakım gibi unsurlarla b gereklilikler artabilir (Hensen ve Lamberts, 2011). Holzer ve Downing'in tanımına göre bina başarımı dört temel başlıkta incelenir. Bunlar, strüktürel analiz; termodinamik analiz, aydınlatma analizi, hava-akış analizi olmak üzere yapı fiziği; akustik analiz ile duman yayılma analizi, insan hareket analizi ve ısı akısı analizi olmak üzere yangın mühendisliğidir (Holzer ve Downing, 2008).

3.2 Bütünleşik Başarım Yaklaşımı

Sistemler yaklaşımı karmaşık problemlerin çözümünde kullanılan bir yaklaşımdır. Buna göre bütünü oluşturan parçaların ayrı olarak değerlendirilmesiyle bütünü algılamak mümkün olmaz. Tasarım kararları hiçbir zaman tek bir başarım gerekliliği ile değerlendirilmez. Tasarım, aynı zamanda birçok başarım gerekliliğini sağlamakla yükümlüdür (Hensen ve Lamberts, 2011). Sistematik tasarım yaklaşımlarının uzantısı olarak ortaya çıkan başarım yaklaşımında, başarım gereklilikleri bütünleşik olarak incelenir (Sevdin, 1992).

Bina sisteminin yapı, servis ve içerik olmak üzere üç alt sistemi bulunmaktadır. Bunlar, binanın yapısal parçaları; su, gaz, elektrik gibi servis tesisatları ile donanım, mobilyalar, armatürler ve bitirme elemanlarıdır (Markus, 1972). Bina bütünleşik başarımının karşılanması için geliştirilen yöntemde bina, üretim işlemi buyunca verilen kararlara bağlıdır. Bu yöntemdeki tanıda kullanılanlar, iki ana başlıkta incelenir (Sevdin, 1992):

1. Bina sağlamlığı ile ilişkili olarak, bina görünümünün ve özelliklerinin; yüklemeler, nem, sıcaklık değişimi, hava hareketi, radyasyon, kimyasal ve biyolojik etkiler ve doğal afetler gibi etkenlerden korunması.

2. Kullanıcı gereksinimleri ve konfor parametreleri ile ilgili olarak, fizyolojik, psikolojik, sosyolojik ve ekonomik kabul edilebilirlik limitlerinin belirlenmesi.

Kullanıcıların fizyolojik gereksinimleri, fiziksel sağlığın kullanılmasına ve kullanıcı güvenliğine yöneliktir. Psikolojik gereksinimler, uygun standartlarla kullanıcının akıl sağlığını korumayı amaçlar. Sosyolojik gereksinimler, toplulukta yaşayan bireylerin, toplulu olarak refahını amaçlar. Ekonomik gereksinimler ise, sosyal anlamda, tümüyle kullanıcı gereksinimleriyle ilgili kaynakların (finans, teknik, enerji, malzeme, zaman) en iyi biçimde elde edilmesini amaçlar (Sevdin, 1992).

3.3 Başarım Değerlendirmesi

Başarım değerlendirmesinde, ilgili ürün ve sürecin farklı çevresel etmeler altındaki davranışlarının fiziksel deneylerle ölçülmesi ve analizidir yaygın bir tekniktir. Bu amaçla, ürünün kalıcılık, oksitlenme dayanımı, yorulma, aşınma gibi özellikleri deneylerle ölçülür (Sirmen, 1997). Bilgisayarda modelleme (gerçek sistemin bilgisayar tabanlı temsili) ve benzetim (gerçek sistemin gelecekteki davranışının model kullanılarak tahmin edilmesi, simülasyon), günümüzdeki en kuvvetli ve yaygın kullanılan analiz yöntemlerindendir (Mallory-Hill ve diğ, 2012). Modeller sistemlerin temsilidir ve geliştirildikleri takdirde, belirlenen sınır koşulları ile sistem başarımı hakkında sonuçlara varmak mümkündür. Bir modelin temel elemanları, model strüktürünün parçaları olan girdi-çıktı ve parametreler için matematiksel hesaplamalardır. Hesaplamalı bina başarım modellemesi ve benzetimi çok disiplinli, problem odaklı ve geniş çerçevede incelenir. Benzetimler, gerçek dünyadaki karmaşıklığa ait gerçekçi model için, sayısal yöntemlerle yaklaşık çözümler sunar.

Etkin bina başarım benzetimi, yapılı çevrenin çevreye etkisini azaltırken, iç mekân kalitesi ve verimliliği ile inşaat sektörü için gelecekteki teknolojik gelişmelerin önünü açar (Hensen ve Lamberts, 2011). Uygulamalar, bilgisayar oyunlarından, ekonomik büyüme ve mühendislik problemlerine kadar çeşitlilik gösterir (Mallory-Hill ve diğ, 2012).

Hesaplamalı bina başarım benzetimi 1960' lı yıllardan beri araştırılmaktadır. Bina başarım modellemesinin ve benzetiminin temelleri fizik, matematik, malzeme bilimi, biyofizik, insan davranışsal, çevresel ve hesaplamalı bilimler gibi çeşitli disiplinlerden teorilere dayalıdır. İlk çalışmalar temelde soğutma yükleri hesabına odaklanmışken, daha sonraki yıllarda binada ısı transferi, hava akışı, gün ışığı ve ısıtma, havalandırma ve yapay iklimlendirme sistem tiplerini ve bileşenlerini kapsayacak şekilde genişlemiştir. Benzetimde, modelin olabildiğince basit tutulmasıyla, hedefe göre farklı modelleme yaklaşımları gereklidir (Mallory-Hill ve diğ, 2012). Modelleme ve benzetimde çözümü etkilemeyecek olanlar dışarıda bırakılır. Bina benzetimi, binanın başarımını bir kullanım senaryosu ile modelleyip gözlemlerken, süreçte başarım gerekliliklerinin belirlenmesi, başarım seviyesinin ölçülmesine ilişkin yöntemler ve rasyonel tasarım kararlarının alınması temel adımlardır. Örneğin, enerji başarımı benzetimi alanında, Energy Plus ve TRNSYS gibi ileri düzeyde yazılımlar, binalarda gerçekçi temsil sağlar (Hensen ve Lamberts, 2011). Bu gibi benzetimlerde, bina başarımı ile bina yapımında uyulması gereken standartlar arasında ilişki kurulabilir. Örneğin, bina enerji standartları ve kodları, enerji farkındalığı olan bina tasarımlarının birçok ülkede gelişmesi ve kullanılmasına imkân tanır. Enerji standartları, insanın ihtiyaç duyduğu konfor koşulları ile ilgilidir. Bu standartlar, iç mekândaki iklimsel koşulların seviyesi ile binanın enerji tüketiminin tanımlanması için yöntemler tanımlar. Tüm standartlar hava koşullarının belirli tarihlere göre değerlendirildiği coğrafi verilere bağlıdır. Enerji standartları ulusal olarak belirlendiği için, uygulamada farklı türde standartlar bulunmaktadır. Binada enerji ihtiyacı olan birimler ısıtma, soğutma, havalandırma, sıcak su ve aydınlatmadır. Buna ek olarak aydınlatma ve gereçler için mekân içinde enerji kullanımı olur. En az miktarda enerjinin kullanılarak, enerji tüketimini azaltmak esastır. Enerji başarım standartları; termal özellikler, ısıtma tesisatı, yapay iklimlendirme tesisatı, havalandırma, ankastre aydınlatma tesisatı, binanın konum ve

yönelimi, pasif güneş sistemleri ve güneşten korunma, doğal havalandırma, iç mekândaki hava koşulları gibi birimlerin değerlendirilmesini sağlar (Tereci, 2006).

Uluslarası Bina Başarım Benzetimi (International Building Performance Simulation-IBPSA) Topluluğu tarafından konu ile araştırma etkinlikleri yürütülmektedir İlgili konuları ise bina fiziği (ısı, hava ve nem akışı, elektrik ve gün ışığı-doğal aydınlatma-akustik ve duman iletimi); ısıtma, havalandırma ve yapay iklimlendirme sistemleri; enerji tedarik sistemleri (yenilenebilir enerji sistemleri, termal depo sistemleri, bölgesel ısıtma ve soğutma, birleşik ısıtma ve güç sistemleri); insan faktörleri (sağlık, üretkenlik, termal konfor, görsel konfor, akustik konfor, iç mekân hava kalitesi); bina servisleri; BDT bağlantılı modelleme ve benzetimlerde gelişmeler, ürün modelleme, yazılımlar, kullanıcı arayüzü sorunları, doğrulama ve ayarlama teknikleridir (Hensen ve Lamberts, 2011).

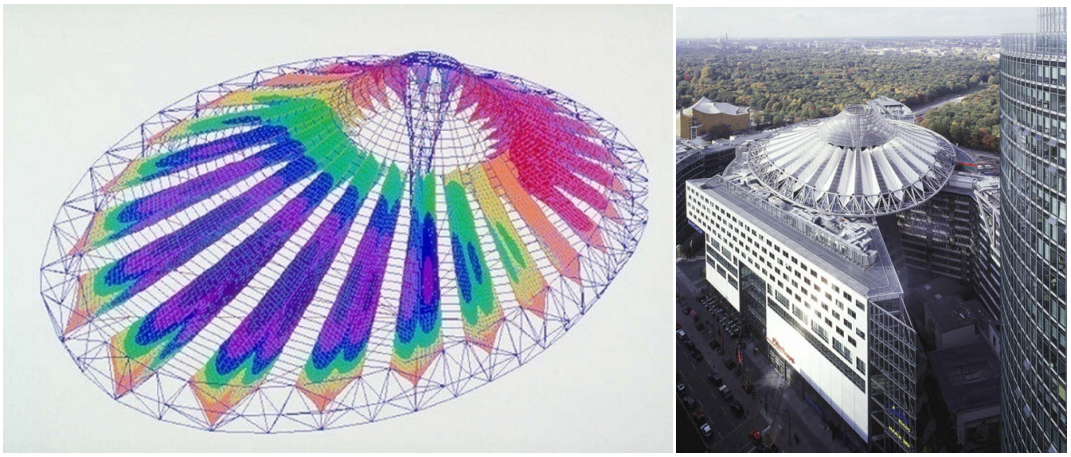
3.4 Strüktürel Başarım

Yapı, yaşam ömrü içerisinde dinamik ve statik yükleme koşulların etkisi altında kalır. *Malzeme, biçim ve başarım* arasındaki ilişki çerçevesinde, yapı öncelikli olarak üç koşulu yerine getirmelidir. Bunlar, yapının ayakta durması (stable), belirli bir dayanıma (strenght) ve rijitliğe (stiffness) sahip olmasıdır (Schierle, 2006). Strüktürel başarım değerlendirmesinde, Malzeme Dayanımı ya da Elastiklik Teorisi' ni kullanan çözümler, daha çok basit geometri için geçerli olan alan ve yüklemelere uygulanır. Ancak karmaşık biçim, sınır koşulları ve malzeme davranışı içeren fazla sayıda uygulama bulunmaktadır. Bu sebeple, farklı hesaplamalar geliştirilmiştir. Bu amaçla kullanılan SEY analizi, yaygın olarak kabul görmüştür.

3.4.1 Sonlu elemanlar yöntemi (SEY)

İlk kullanımı 1950 yılı sonrasında yapı mühendisliği alanında olan, SEY çeşitli mühendislik problemlerine belirli yaklaşımlarla çözüm arayan hesaplamalı bir çözüm yöntemidir (Şekil 3.1). Yöntemin temeli, Ritz tekniğine dayanmaktadır. Sonlu elemanlar düşüncesi yeni olmamakla birlikte, dairenin çevresi matematikçiler tarafından çokgene indirgenerek, yani basitleştirerek hesaplanmıştır. Dairenin içine ve dışına çizilen çokgenlerin kenar sayıları arttırılarak, yukardan ya da aşağıdan, yaklaşık olarak gerçek çözüme ulaşılmıştır. SEY' de, çözüm bölgesi (domain) alt bölgelere ayrıştırılırken, her alt bölgede aranan fonksiyon ifadesi polinomlarla

belirlenir. Elemanların birbirine bağlandığı noktalar düğüm noktalarıdır. SEY'de, karmaşık bir problem basite indirgenerek yaklaşık sonuca ulaşılır (Madenci ve Güven 2006).



Şekil 3.1 : Öncü nitelikteki SEY kullanım örneklerinden Potzdamer Platz, Berlin.

Hesaplamalı yöntemler arasında SEY dışında, Sınır Elemanı Yöntemi, Sonlu Farklar Yöntemi, Sonlu Hacim Yöntemi ve Ağsız Yöntem olarak sıralanabilir. Ancak SEY kullanım alanında gösterdiği verimlilikten ötürü mühendislik alanında yaygın kullanım alanı bulmuş, yazılımlarda uygulanmıştır. SEY dışında, tercih edilen diğer hesaplama yöntemlerinden birisi Sonlu Farklar Yöntemidir. Bu yöntemde, SEY' e benzer şekilde sistem bölgesi küçük bölgelere ayrılır. Çok sayıda bilinmeyen hesaplanır. Ancak sistemin iç kısımlarında ve bölgeler arasındaki geçişteki hata, SEY' e göre fazla çıkabilir. SEY' in bahsedilen yöntemle arasındaki en olumlu yanı, SEY' de her küçük bölgede çözümü istenen fonksiyonun, polinomlar ve katsayılar olarak tanımlanması ve yaklaşık değer bulunması nedeniyle ortaya çıkan hatanın en aza indirilmesidir. SEY' in diğer bir olumlu yanı da, karmaşık olabilen geometrileri, çeşitli sınır koşulları ve yüklemeler altında değerlendirebilmesidir (Utku, 2008).

Malzeme özellikleri ele alındığında malzemenin anizotropisi, lineer, nonlineer ve zamana göre değişme özellikleri, uygulanan analizin türüne göre SEY hesaplamasına dâhil edilir. Örneğin, SEY kompozit ve çok fazlı malzemelerin modellemesine imkân tanır. Bunun yanında SEY' e, zamana bağlı dinamik etkiler de dâhil edilebilir. SEY hesaplamasının doğruluğu, verilerin doğru girilmesine bağlıdır. Bu sebeple problemin iyi tanımlanması gerekmektedir.

3.4.1.1 SEY' in kullanım alanları

SEY' in kullanım alanları oldukça geniştir. Strüktürel analiz yanında biyomekanik alanında alyuvarların ve plasmanın kılcal damarlardaki hareketlerinin incelenmesi, kalbin ve kemiklerin gerilme analizi; hidroelastisite alanında sıvıların elastik kaplardaki hareketleri, baraj gövdesi ile göletin etkileşiminin analizi, elektrik ve manyetik alanların analizi; kompozit malzemeler alanında katmanlı ahşap sistemlerin analizi, sandviç kabukların analizi, mekanizmaların yer değiştirme (displacement) ve gerilme analizleri, dişlilerin gerilme analizi gibi çok çeşitlidir (Çizelge 3.1).

Çizelge 3.1 : Farklı mühendislik disiplinleri için SEY' de serbestlik derecesi ve kuvvet vektörleri (Madenci ve Güven, 2006).

Disiplin	Serbestlik Derecesi	Kuvvet Vektörü
Strüktürel / solid	Yer değiştirme	Mekanik kuvvetler
Isı İletimi	Isı	Isı akışı
Akustik sıvı	Yer değiştirme potansiyeli	Tanecik hızı
Potansiyel akış	Basınç	Tanecik hızı
Genel akış	Hız	Akışlar
Elektrostatik	Elektrik potansiyeli	Şarj yoğunluğu
Manyetostatik	Manyetik potansiyel	Manyetik şiddet

Farklı türde strüktürel problemler için kullanılan analizler şöyledir:

Statik Analiz: Katı cisme etkiyen yüklerin ve mesnet koşularının zamanla değişmediği durumlarda kullanılır. Plastiktik, sünme gibi nonlineer malzeme özellikleri ve geometrik özellikler analizde incelenebilir.

Modal Analiz*:* Bu seçenek, doğal frekanslar ve strüktür şekilleri ile ilgilidir.

Harmonik Analiz: Bu tip analiz için, strüktürün yüklere karşı davranışı, zamana bağlı olarak sinüs dalgası biçiminde davranış gösterir.

Süreksiz Dinamik: Zamana bağlı olarak, plansız olarak davranış gösteren strüktürlerin davranışında kullanılır.

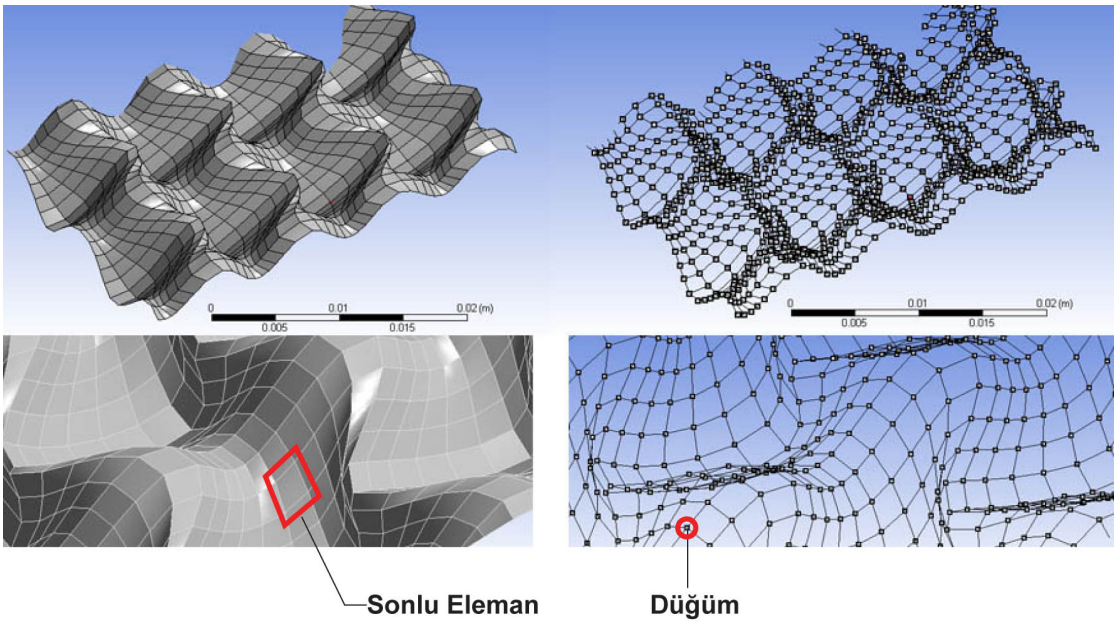
Öz (Eigen) Değer Burkulma*:* Bu analiz tipi, burkulma yükleri ve strüktürün burkulma hallerine ilişkindir.

SEY' in yazılımlarda uygulanması ve etkin kullanımı bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler ile birlikte 1970'lerden itibaren gerçekleşmiştir. SEY analizi, alanında kullanılan ANSYS, Abaqus, ALGOR, Nastran, SAP2000, STRAND7 ve SCAN & SOLVE gibi fazla sayıda yazılım ve yazılım modülü bulunmaktadır.

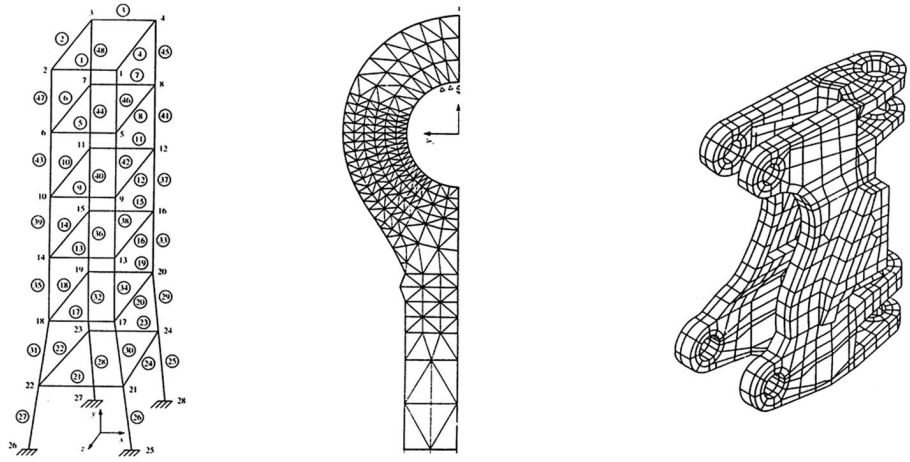
3.4.1.2 SEY' in işleyişi

SEY, cismin eleman adı verilen sonlu sayıda parçaya (subdomain) bölünmesini içerir. Eleman boyutu, biçimi ve yakınsama biçimi (approximation scheme) probleme uymak için farklılaşabileceği için, yöntem karmaşık geometri ve yükleme koşullarına ilişkin hassas bir benzetim gerçekleştirebilir

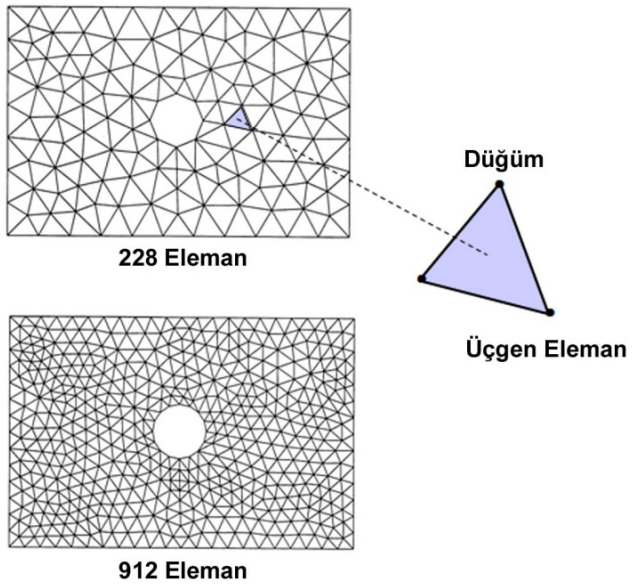
Öncelikli olarak fiziksel modelin matematiksel modeli ve probleme ait formülasyonu hazırlanır. Sonrasında çözüm bölgesi sonlu eleman adı verilen alt bölgelere bölünür. Daha sonra bu elemanlar, bir iğne ile tutturulmuşçasına düğüm noktalarında birbirine bağlanır (Şekil 3.2). Eleman tipleri lineer, alan ve hacim olmak üzere üç ana başlıkta incelenir (Şekil 3.3). Bu bölgelere sonlu eleman ağı (mesh) denilmektedir. Ağ yoğunluğu arttıkça, eleman sayısı ve yüzeyin hassasiyeti artar (Şekil 3.4). Varsayımlar, her eleman üzerindeki, bilinmeyen bağımlı değişkenlerin çeşitlilikleri üzerinde ara değeri bulma (interpolation) ya da yakınlık (approximation) fonksiyonları ile belirlenir. Bu ortalama çeşitlilik özel eleman bölümlerinde, düğümlerde hesaplanır.



Şekil 3.2 : Düğüm ve sonlu elemanların gösterimi.



Şekil 3.3 : Sonlu eleman ağını oluşturan eleman tipleri (Sadd, 2005).



Şekil 3.4 : Sonlu elemanlar ağı yoğunluğu (Sadd, 2005).

Yöntem parçalara ayırma işlemiyle, bilinmeyen değerler için, cebirsel sistem denklemleriyle sürekli çözümlere yönelik yakın çözümler oluşturur. Örneğin (e) sonlu eleman için kullanılan cebirsel denklem şöyle ifade edilebilir:

$$K^{(e)} * u^{(e)} = F^{(e)} \qquad \textbf{(3.1)}$$

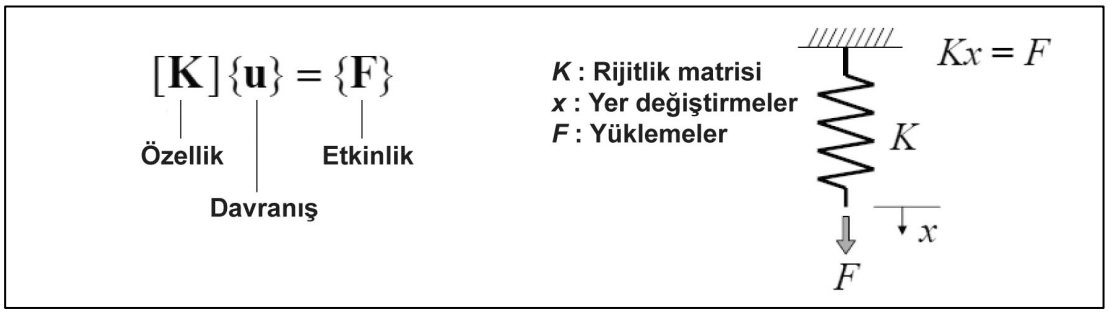
K = Rijitlik ya da özellik matrisi (Stiffness, property matrix)

u = Noktasal yer değiştirme vektörü (Nodal displacement vector)

F = Noktasal kuvvet vektörü (Nodal force vector)

Bu denklemde K, u ve F sırasıyla özellik, davranış ve eylemi temsil eder (Şekil 3.5) . Buna göre K rijitlik matrisi ve u bilinmeyenleri içeren vektörken, F kuvvet vektörünü temsil etmektedir. Buna bağlı olarak, her sonlu eleman için hesaplanan denklemlerin birleşiminden, sistemin denklem takımı elde edilir ve şu şekilde temsil edilir (de Weck ve Kim, 2004):

$$K * u = F \qquad \textbf{(3.2)}$$



Şekil 3.5 : SEY cebirsel denklemi (de Weck ve Kim, 2004).

Denkleme göre, bilinmeyen davranış {u} olduğu için, denklemin soluna getirilir:

$$\{u\} = [K]{-}1\{F\} \qquad \textbf{(3.3)}$$

Sınır koşulları, bu sisteme uygun satır ve sütunların eklenmesi ile dâhil edilir. Bu şekilde indirgenmiş sistem bulunur. Çözümün yapılması ile de her bir düğüm noktası için hesaplamalar gerçekleştirilir. Çözüm ise resim, grafik ya da tablo gibi araçlarla kullanıcıya sunulur. SEY aracılığı ile farklı durumlarda incelenen davranışlar incelenmiştir. Davranış (u) analiz sonuçlarına göre belirlenir (de Weck ve Kim, 2004) (Çizelge 3.2).

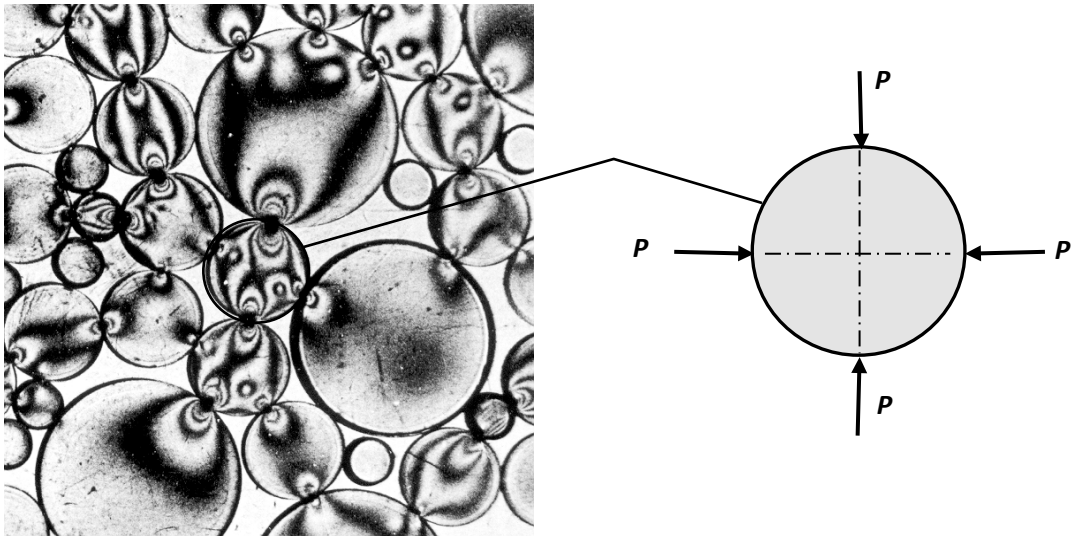
SEY' de bölge küçük elemanlara bölünmesini takiben, her bir eleman için çözümü aranan fonksiyona uygun bir yaklaşım ortaya konur. Problem tipine bağımlılık olarak, elemanlar arası sınırlarda sürekliliğin kaçıncı derecenden türeve kadar olması belirlenir. Örneğin, üçüncü dereceden polinom kullanıldığında sadece fonksiyonun kendisi değil, ikinci dereceden türevlerine kadar süreklilik elde edilebilir. Fonksiyonun, elemanlar arası sürekliliği matematiksel açıdan gereklidir.

Çizelge 3.2 : SEY ile farklı durumlardaki davranışlar (de Weck ve Kim, 2004).

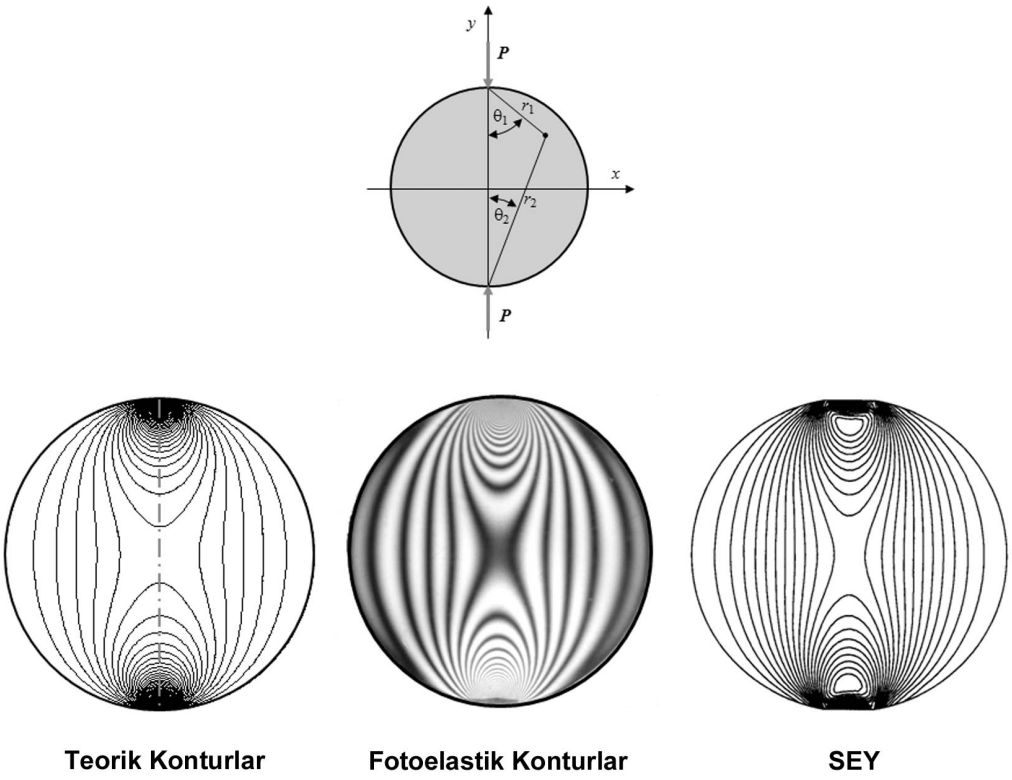
	Özellik [K]	Davranış {u}	Eylem {F}
Elastik	Rijitlik (stiffness)	Yer değiştirme (displacement)	Kuvvet (force)
Termal	İletkenlik (conductivity)	Akışkanlık (viscosity)	Isı kaynağı (heat source)
Akışkan	Akışkanlık (viscosity)	Hız (velocity)	Cisim kuvveti (body force)
Elektrostatik	Dielektrik geçirgenlik (dielectric permittivity)	Elektrik potansiyeli (electric potential)	Şarj olmak (charge)

Düğüm noktalarının geometride yerleştirilmesinde belli kurallar bulunur. Örneğin, bölge içinde değişik yapıda malzemelerden oluşan kısımlar bulunuyorsa, sınırlara yakın kısımlarda düğümler daha yoğun olarak yerleştirilmelidir. Bunun sebebi, malzeme özelliğinin aniden değişmesi ve sınır yüzeylerin tekil noktalar oluşturmasıdır. Malzeme özelliğinin değişmediği noktalarda daha az yoğunluklu olarak yerleştirilebilir. Özellikler belirli bir noktanın hesaplanması isteniyorsa, bu yerlere de düğüm noktaları konmalıdır. Düğüm sayısının artması iyi bir sonuç elde edilmesine imkân tanırken, daha çok bilgisayar hafızasına gereksinim duyulması olumsuzdur. SEY' in bilgisayara uyarlanması için global matrisler oluşturulur. Her bir sonlu eleman bölgesinde matrisler oluşturulur. Eleman matrislerinin büyüklüğü serbestlik derecesine bağlıdır (Utku, 2008).

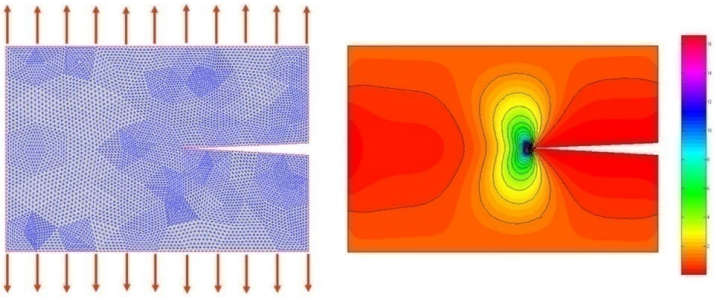
Fotoelastik yöntem, deneysel olarak malzeme üzerindeki gerilmeleri göstermekte kullanılır (Şekil 3.6). Gerilmeler teorik, deneysel ve hesaplamalı olarak, konturlar aracılığı ile gösterilebilir (Saad, 2004) (Şekil 3.7). SEY' de hesaplamalı olarak ifade edilen gerilmeler, renk kodlarını kullanır. Bu şekilde strüktürel açıdan elverişli olmayan bölgeler tanımlanmış olur (Şekil 3.8).



Şekil 3.6 : URI dinamik fotomekanik laboratuvarı (Sadd, 2012, a).



Şekil 3.7 : Gerilmelerin teorik, deneysel, SEY gösterimleri (Sadd, 2012, b).

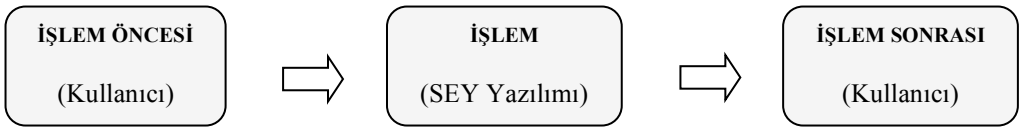


Şekil 3.8 : SEY ile yüzey gerilmelerinin renk kodlarıyla ifadesi (Sadd, 2012, b).

Daha çok yapı ve mekanik mühendisliği alanında araştırma alanı bulan SEY, hesaplamalı yöntemlerin tasarım sürecindeki etkinliğiyle bu alanda da kendini göstermektedir.

3.4.1.3 SEY işlem adımları

SEY' in işleyişinde, ön işlem aşamasında, kullanıcı SEY modelini oluşturur. Bunu takiben, sayısal analiz SEY yazılımı tarafından işleme konur. İşlem sonrasında ise sonuçlar kullanıcı tarafından incelenir (Şekil 3.9).



Şekil 3.9 : SEY' in temel işleyiş şeması.

İşlem Öncesi Adımlar:

- Malzeme özellikleri belirlenir.
- Eleman tipi belirlenir.
- Asıl sabitler belirlenir.
- Model geometrisi oluşturulur.
- Sonlu elemanlar ağı oluşturulur.

Çözüm İşlemi:

- Analiz tipi ve seçenekleri belirlenir.
- Sınır koşulları oluşturulur.
- Çözüm alınır.

İşlem Sonrası:

- Konturlar
- Vektör gösterimleri
- Bozulmuş biçimler

Öncelikli olarak analiz türünün seçilmesi gereklidir. Bunlar statik strüktürel, modal, geçici (transient) dinamik, burkulma (buckling), temas (contact) kararlı hal (steady-state) termal analiz, geçici (transient) termal analizler olarak adlandırılabilir. Sonrasında malzeme özellikleri ile 2D (makas, kiriş, kabuk, plaka) ya da 3D (katı) olmak üzere eleman türü belirlenir. Sonlu elemanlara bölünen geometrinin noktaları ve bunların bağlantıları oluşturulmasını takiben, sınır koşulları ve yükler tanıtılarak, SEY hesaplaması işleme konur. İşlem sonrası sonuçlarda yer değiştirmeler, gerilmeler, burkulmalar ve doğal frekanslar gibi sonuçlar izlenebilir.

SEY bir yakınsama yöntemi olduğu için hesaplamada hatalar meydana gelebilir. Hata kaynakları, sayıların yuvarlanmasından kaynaklanan bilgisayar hataları, mekan ve zaman gibi farklı türdeki parametrelerin sayısal bütünleşme hataları ve sonlu eleman ağının geometriyle uyumsuzluğu gibi nedenler olabilir. SEY yöntemlerinin hassasiyeti kesin sonuçtan, SEY sonucunun çıkarılmasıyla bulunabilir. Arada bulunan fark hatayı belirtir ve şöyle ölçülebilir:

$$\text{HATA} = \text{Kesin Çözüm} - \text{SEY Çözümü}$$

3.4.1.4 SEY ile hesaplamanın mantığı

SEY hesaplamalarının, tüm düğüm noktalarını içerecek şekilde, oldukça karmaşık olabilmesi sebebiyle, malzeme ile yükleme ve sınır koşulları arasındaki ilişkinin ortaya konması için, basit iki boyutlu bir plaka (Şekil 3.10-3.11) ve kiriş (Şekil 3.12) örnekleri incelenmiştir (Sadd, 2005).

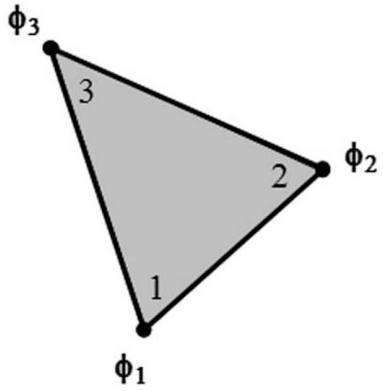
Skalar değerli iki boyutlu alan problemleri:

Skalar değerli iki boyutlu alan problemleri için kullanılan diferansiyel denklem şöyledir:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = f(x, y) \tag{3.4}$$

Sınır koşullarının belirlenmesi ise aşağıdaki denklemle gerçekleştirilir:

$$\phi \ , \ \frac{d\phi}{dn} = \frac{\partial \phi}{\partial x} n_x + \frac{\partial \phi}{\partial y} n_y \tag{3.5}$$



Şekil 3.10 : Skalar değerli iki boyutlu alan problemi (Sadd, 2005).

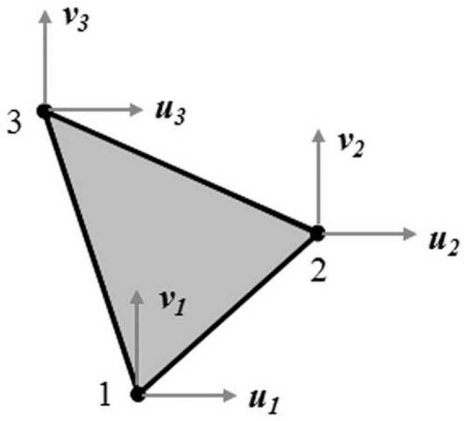
Vektör-tensör değerli iki boyutlu alan problemleri:

Bu tür problemlerdeki yer değiştirmeler için Elastiklik Alan Denklemleri şöyledir:

$$\begin{aligned} \mu \nabla^2 u + \frac{E}{2(1-\nu)} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + F_x = 0 \\ \mu \nabla^2 v + \frac{E}{2(1-\nu)} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + F_y = 0 \end{aligned} \tag{3.6}$$

Sınır Koşullarının belirlenmesi ise şu denklemle hesaplanır:

$$\begin{aligned} T_x = \left(C_{11} \frac{\partial u}{\partial x} + C_{12} \frac{\partial v}{\partial y} \right) n_x + C_{66} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) n_y \\ T_y = C_{66} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) n_x + \left(C_{12} \frac{\partial u}{\partial x} + C_{22} \frac{\partial v}{\partial y} \right) n_y \end{aligned} \tag{3.7}$$



Şekil 3.11 : Vektör-tensör değerli iki boyutlu alan problemi (Sadd, 2005).

Kirişin bükülmesi:

Kirişin bükülmesi için Sınır Koşulları şu şekilde belirlenir:

$$\sigma_y(x,\pm c)=0\ ,\ \tau_{xy}(x,\pm c)=\tau_{xy}(\pm l,y)=0$$
$$\int_{-c}^{c}\sigma_x(\pm l,y)dy=0\ ,\ \int_{-c}^{c}\sigma_x(\pm l,y)ydy=-M$$
$$\phi=A_{03}y^3\Rightarrow\sigma_x=-\frac{3M}{2c^3}y\ ,\ \sigma_y=\tau_{xy}=0$$
$$\frac{\partial u}{\partial x}=-\frac{3M}{2Ec^3}y\Rightarrow u=-\frac{3M}{2Ec^3}xy+f(y)$$
$$\frac{\partial v}{\partial y}=\nu\frac{3M}{2Ec^3}y\Rightarrow v=\frac{3M\nu}{4Ec^3}y^2+g(x) \qquad \textbf{(3.8)}$$

Yer Değiştirmeler ise:

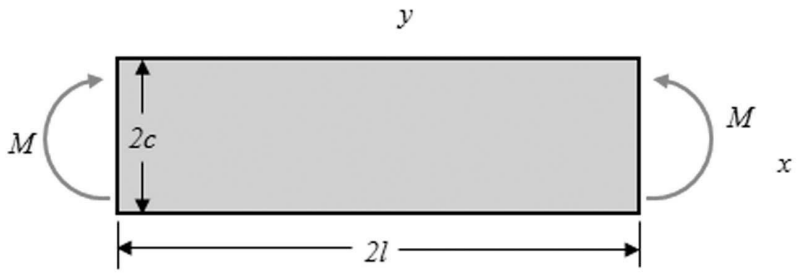
$$f(y)=-\omega_o y+u_o$$
$$g(x)=\frac{3M}{4Ec^3}x^2+\omega_o x+v_o$$
$$v(\pm l,0)=0\ \text{ve}\ u(-l,0)=0$$
$$u_o=\omega_o=0\ ,\ v_o=-3Ml^2/4Ec^3 \qquad \textbf{(3.9)}$$

Hesaplamada kullanılan Elastiklik Teorisi Denklemi şöyledir:

$$\sigma_x=-\frac{M}{I}y\ ,\ \sigma_y=\tau_{xy}=0$$
$$u=-\frac{Mxy}{EI}\ ,\ v=\frac{M}{2EI}[\nu y^2+x^2-l^2] \qquad \textbf{(3.10)}$$

Malzeme Dayanımı ise şu şekilde hesaplanır:

$$\sigma_x=-\frac{M}{I}y\ ,\ \sigma_y=\tau_{xy}=0$$
$$v=v(x,0)=\frac{M}{2EI}[x^2-l^2] \qquad \textbf{(3.11)}$$



Şekil 3.12 : Kirişe etkiyen sınır koşulları ve kuvvetler (Sadd, 2012, b).

SEY işlemleri için geliştirilmiş hesaplamalı teknikler, diferansiyel denklemlere ya da fiziksel problemin global enerji dengesine bağlıdır. Diferansiyel denklemlerle çözülen yöntem Ağırlıklı Kalıntılar Yöntemi (Weighted Residuals Method) veya Galerkin yöntemi olarak adlandırılır. Global enerji dengesine ilişkin yöntem de Varyasyonel Yöntem (Variational Method) ya da Rayleigh-Ritz yöntemi olarak adlandırılır (Madenci ve Güven, 2006).

Varyasyonel Yöntem: Rayleigh varyasyonel yöntemi, diferansiyel denklemleri aracılığı ile çözüm sağlar. Ritz de bu yöntemi geliştirmiştir. Sınır değer problemine yaklaşık çözüm bulmak için, ayrıklaştırma (discretization) genellikle gereklidir.

Ağırlıklı Kalıntılar Yöntemi (AKY): Tercih edilen bir yöntem olan AKY, lineer kendine-ek (self-adjoint) problemlerin çözümünde olduğu kadar kendine-ek olmayan sistemlerde de iyi bir yakınsamayla çözüm sağlaması açısından tercih edilir. AKY yöntemi ağırlık fonksiyonunun seçimine göre değişik adlarla adlandırılır. Galerkin Yöntemi bunlardan biridir.

Tez kapsamında önerilen modelde kullanılan AKY ile hata fonksiyonu elde edilir. Çözüm bölgesinde, hata fonksiyonun deneme fonksiyonu ile çarpımının integrali sıfıra eşitlenir. Kısmi entegrasyon yardımı ile aranan fonksiyon ve deneme fonksiyonu arasında türev mertebesi eşitlenir. Sınır koşulları ise kısmi entegrasyondan gelen terimlere uygulanır (Madenci ve Güven, 2006).

3.4.1.5 SEY' de malzeme

Her eleman türü için, istenen belirli malzeme özellikleri bulunmaktadır. Bu sayı analiz tipine bağlı olarak değişmektedir. Malzeme özellikleri şöyle gruplandırılır:

1. Lineer ya da nonlineer malzemeler

2. Izotropik, ortotropik ya da anizotropik malzemeler

3. Isı bağımlı ya da bağımsız malzemeler

Malzeme özellikleri ve eleman türleri, sonlu eleman ağı oluşturulmadan önce belirlenmelidir. Farklı malzemelerin birlikte ele alındığı problemlerde, kullanıcı birden çok sayıdaki malzeme ile ilgili mekanik ve fiziksel özelliklere ilişkin tanımlamaları yapmalıdır. Malzeme modelleri strüktürel ve termal analiz, hesaplamalı akışkanlar dinamiği, elektromagnatik, akustik analiz gibi farklı amaçlar için değişiklik gösterir. Örneğin, SEY yazılımı olan ANSYS arayüzünde malzemeye ait tüm özellikler analiz öncesinde, malzeme kütüphanesinde belirlenir (Şekil. 3.13). SEY kapsamında kullanılan, lineer malzeme özellikleri belirtilmiştir (Çizelge 3.3)

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	7850	kg m^-3		
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion				
6	Isotropic Elasticity				
7	Derive from	Young's Modulu...			
8	Young's Modulus	2E+11	Pa		
9	Poisson's Ratio	0.3			
10	Bulk Modulus	1.6667E+11	Pa		
11	Shear Modulus	7.6923E+10	Pa		
12	Alternating Stress Mean Stress	Tabular			
13	Interpolation	Log-Log			
14	Scale	1			
15	Offset	0	Pa		
16	Strain-Life Parameters				
17	Display Curve Type	Strain-Life			
18	Strength Coefficient	9.2E+08	Pa		
19	Strength Exponent	-0.106			
20	Ductility Coefficient	0.213			
21	Ductility Exponent	-0.47			
22	Cyclic Strength Coefficient	1E+09	Pa		
23	Cyclic Strain Hardening Exponent	0.2			
24	Tensile Yield Strength	2.5E+08	Pa		
25	Compressive Yield Strength	2.5E+08	Pa		
26	Tensile Ultimate Strength	4.6E+08	Pa		
27	Compressive Ultimate Strength	0	Pa		
28	Isotropic Thermal Conductivity	60.5	W m^-1 C^-1		
29	Specific Heat	434	J kg^-1 C^-1		
30	Isotropic Relative Permeability	10000			
31	Isotropic Resistivity	1.7E-07	ohm m		

Şekil 3.13 : ANSYS yazılımında malzeme özelliklerinin girilebildiği arayüz.

Çizelge 3.3 : Strüktürel, termal ve akışkan disiplinler için SEY hesaplamasında kullanılan lineer malzeme özellikleri (Madenci ve Güven, 2006).

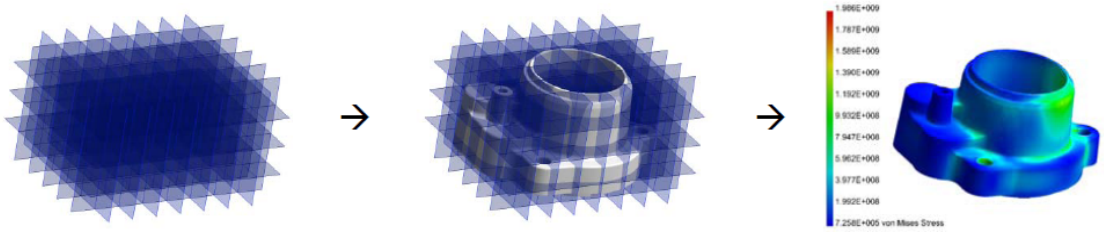
Bölümler	Özellik Tanımları
Kuvvet/Alan	Elastiklik modülü, eleman x-yönünde
	Elastiklik modülü, eleman y-yönünde
	Elastiklik modülü, eleman z-yönünde
Burkulma/Isı	Termal genleşme katsayısı, eleman x-yönünde
	Termal genleşme katsayısı, eleman y-yönünde
	Termal genleşme katsayısı, eleman z-yönünde
Sıcaklık	Referans sıcaklığı
	Büyük Poisson's oranı, *x-y* düzlemi
	Büyük Poisson's oranı, *y-z* düzlemi
	Büyük Poisson's oranı, *x-z* düzlemi
	Küçük Poisson's oranı, *x-y* düzlemi
	Küçük Poisson's oranı, *y-z* düzlemi
	Küçük Poisson's oranı, *x-z* düzlemi
Kuvvet / Alan	Kayma modülü, *x-y* düzlemi
	Kayma modülü, *y-z* düzlemi
	Kayma modülü, *x-z* düzlemi
Zaman	Sönümleme (damping) için K matrisi çarpanı
	Sürtünme katsayısı (ya da sıvı elemanlar için sınır giriş hakkı)
Kütle/Hacim	Kütle yoğunluğu
Sıcaklık/Kütle x Isı	Özgül ısı
Sıcaklık /Hacim	Toplu ısı (enthalpy)
Sıcaklık X Uzunluk /	Isıl iletkenlik, eleman x-yönünde
(Zaman x Alan x Isı)	Isıl iletkenlik, eleman y-yönünde
	Isıl iletkenlik, eleman z-yönünde

Çizelge 3.3 (devam) : Strüktürel, termal ve akışkan disiplinler için SEY hesaplamasında kullanılan lineer malzeme özellikleri (Madenci ve Güven, 2006).

Bölümler	Özellik Tanımları
Sıcaklık / (Zaman x Alan x Isı)	Isı yayımı (Convection) katsayısı Işıma oranı (Emissivity)
Sıcaklık / Zaman	Sıcaklık oluşturma oranı-*özel malzemeler*
Kuvvet x Zaman/Uzunluk^2	Akışkanlık (Viscosity)
Uzunluk/Zaman	Ses hızı (Sonic velocity)- *özel malzemeler*

SEY, gerilme analizleri, akışkanlar mekaniği, ısı iletimi, dalga yayılımı, statik ve dinamik elastisite gibi farklı mühendislik problemlerinin çözülmesinde kullanılır. Statik, doğrusal eğilme, termo-mekanik, çatlama mekaniği, dinamik akışkanlar dinamiği gibi farklı tipte strüktürel analizler farklı tipte verinin işlenmesini gerektirir.

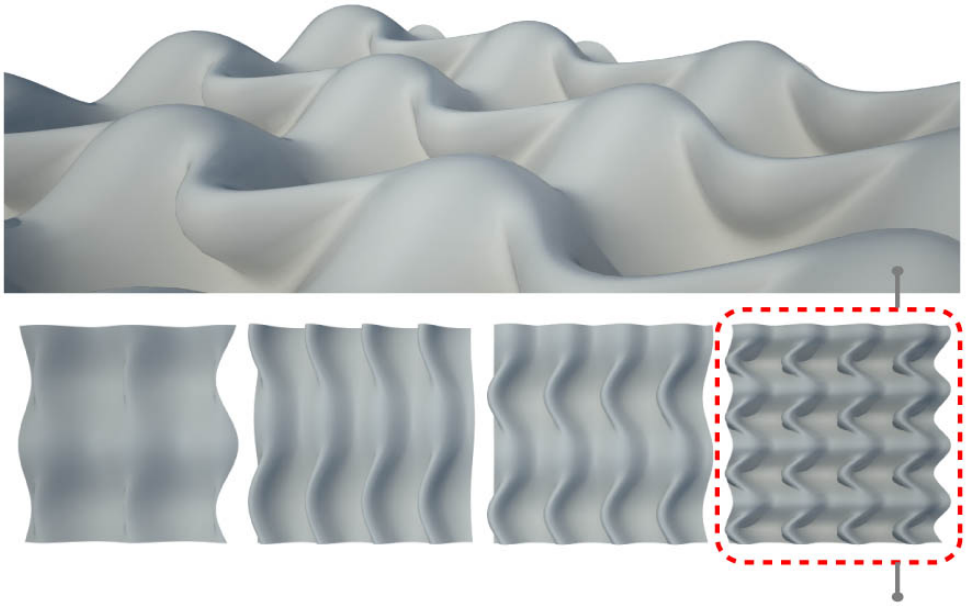
Rhino arayüzüyle çalışan patentli bir teknoloji olan Scan&Solve Rhino uyumlu ek-yazılımı Kantorovich yöntemiyle, sıklıkla uygulanan birçok SEY tekniğinden farklı olarak sonlu elemanlar ağı oluşturmadan hesaplamayı gerçekleştirir. NURBS yüzeyinin tek parça olarak Rhino arayüzünde incelenmesi oldukça hızlı ve verimli sonuç alınmasını sağlar (Şekil 3.14). Ancak bu yöntemin günümüz itibariyle olumsuz tarafı, birden çok yüzeyde analizin gerçekleştirilememesidir. Mimari geometrinin ölçeği ve üretim sürecinde geometrinin çoğunlukla bileşenlere ayrılmasının gerekliliği doğrultusunda kullanımı sınırlıdır. Scan & Solve yazılımı kapsamında tanıtılan ve malzeme özellikleriyle ilişkili olan *hata ölçütü*, bir malzeme özelliği olarak bu tez kapsamında tanıtılmıştır. Hata ölçütü, tehlike derecesi hesaplanmış değerin, malzemede hataya sebep olan eşik değerine oranıdır (Scan & Solve, 2011). Hata ölçütlerinden olan *von mises* ve *maksimum kayma gerilmeleri* sünek malzemeler için; *coulomb* ve *modified mohr* ise gevrek malzemeler için kullanılmıştır. Malzemelerin fiziksel ve mekanik özelliklerine bağlı olarak, yoğunluk, Poisson Oranı, Elastiklik Modulü, kayma-gerilme ve çekme dayanımları ile hata ölçütleri gibi parametrelerin değerleri SEY hesaplamasında kullanıcı tarafından belirlenir. SEY tarafından gerçekleştirilen farklı analiz türlerinde, parametreler de farklılaşacaktır.



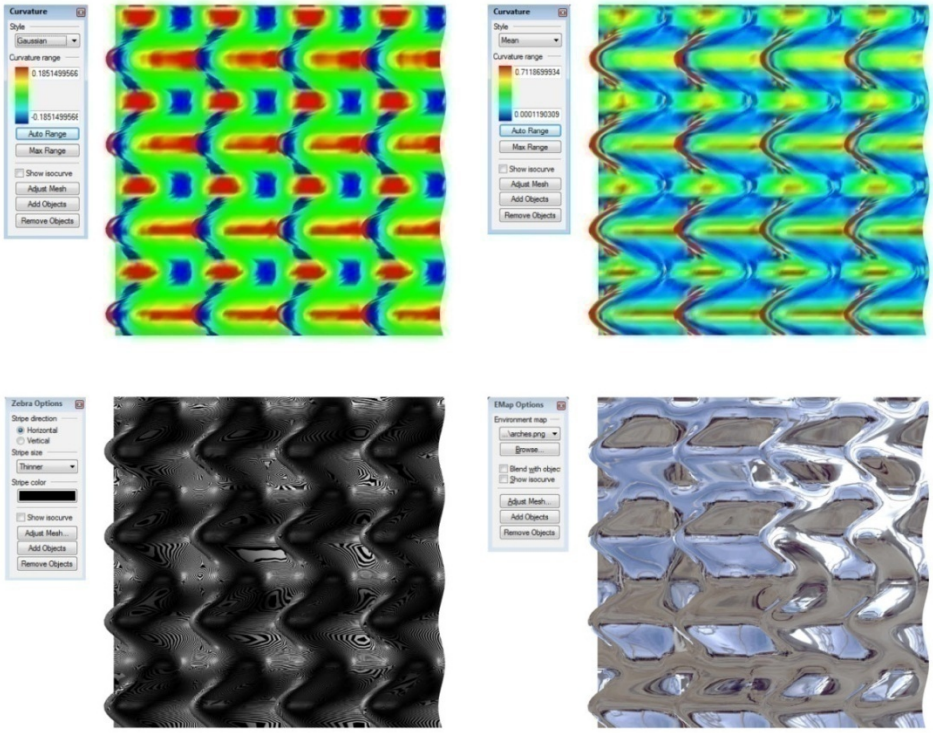
Şekil 3.14 : Scan & Solve yönteminde hesaplama sonlu eleman ağı oluşturulmadan uygulanır (Scan & Solve, 2011).

3.4.1.6 SEY kapsamındaki uygulamalar

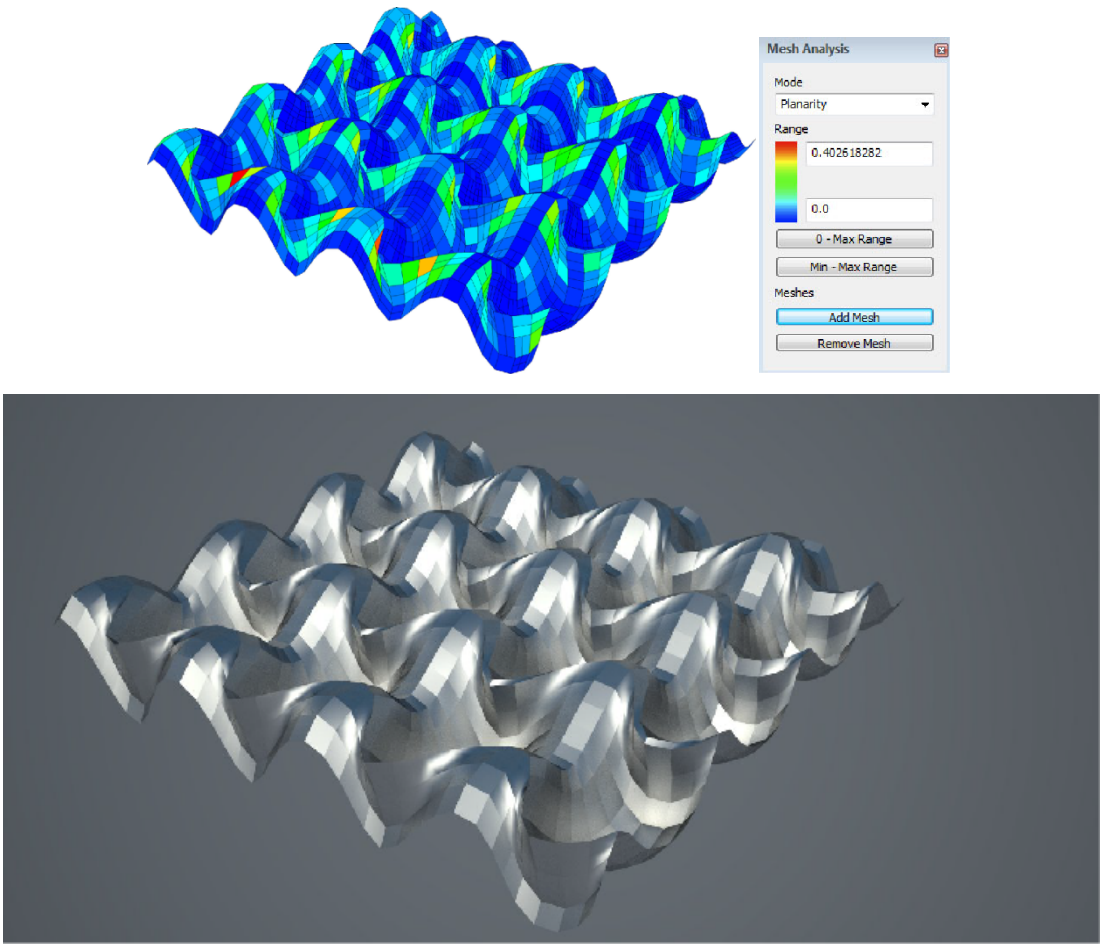
"Başarım Tabanlı Mimari Geometride Malzeme" çalışması biçim oluşturma, analiz ve değerlendirmeden oluşan karmaşık sayılabilecek bir sistemin temel kurallarının ortaya koyan bir yöntem sunar. Burada amaçlanan mimari ölçekte inşa edilecek serbest yüzeyler için tasarımcıya yol gösterecek kritik basamakların belirlenmesidir. Biçim oluşturmayı takiben, tasarım sürecinde çeşitli analizler yapılmıştır. Bunlar: yüzeyin eğrilik ve düzgünlük analizleri; panellerin planarlık (düzlemsellik) analizleri ve kullanılan farklı malzemelerde meydana gelen gerilmelerin karşılaştırıldığı statik strüktürel analizlerdir. Amaç, analiz ve değerlendirme sonuçlarını biçimle ilişkilendirmektir. Bu şekilde biçim; malzeme özellikleri, üretim teknolojisine ilişkin kısıtlamalar ve strüktürel başarım gerekliliklerine cevap verebilir (Yazıcı ve Tanaçan, 2012) (Şekil 3.15-3.19). Mimari geometriyi etkileyen farklı yükler, statik ve dinamik yükleme koşulları altında incelenebilir (Şekil. 3.20-3.23). Frekansa bağlı olarak mimari geometriyi etkileyen modal analiz uygulamaları, deprem yüklerinin analizi için elverişlidir (Şekil 3.24).



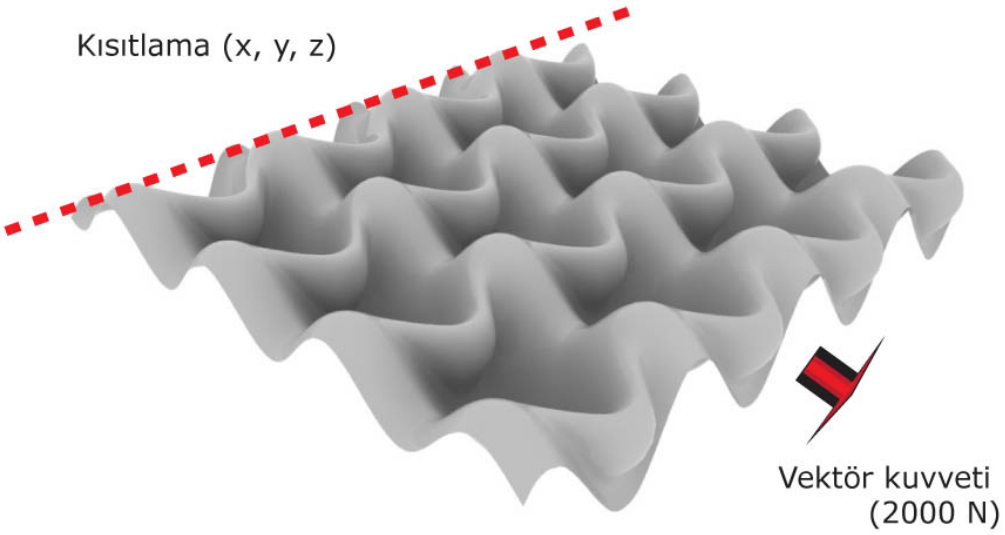
Şekil 3.15 : Başarım tabanlı mimari geometride malzeme / matematiksel eğri fonksiyonları (Yazıcı ve Tanaçan, 2012).



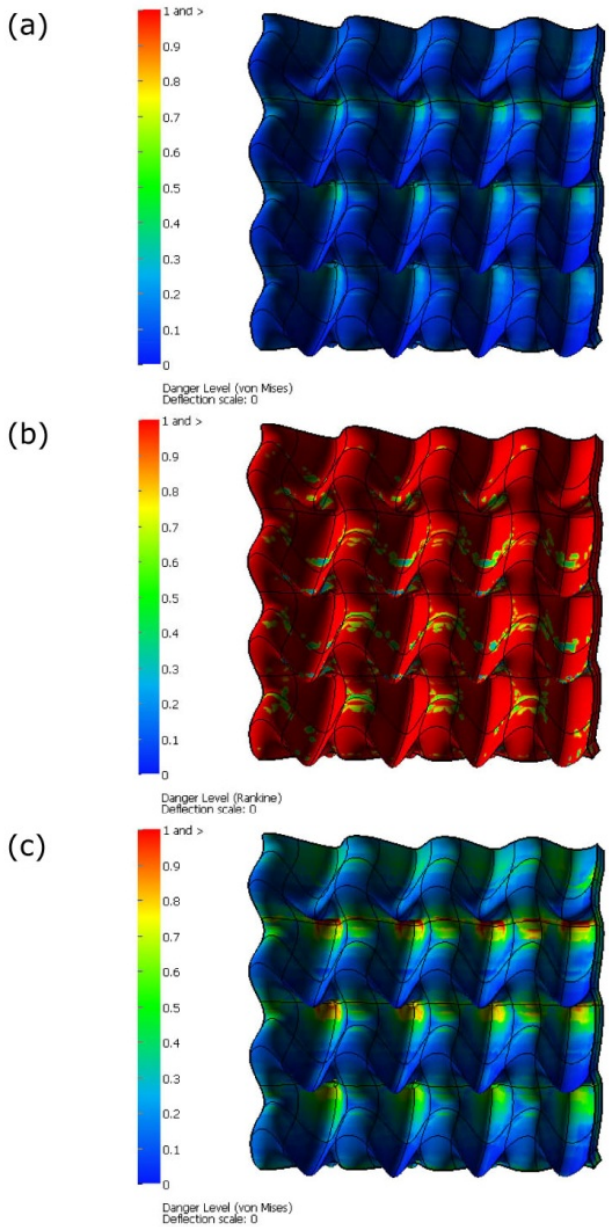
Şekil 3.16 : Başarım tabanlı mimari geometride malzeme / analiz (Yazıcı ve Tanaçan, 2012).



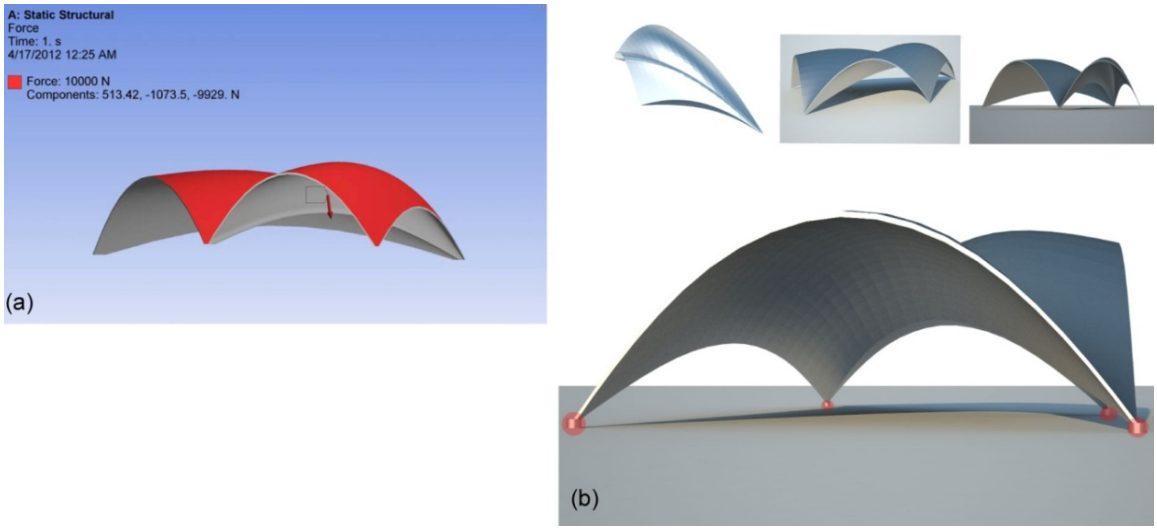
Şekil 3.17 : Başarım tabanlı mimari geometride malzeme / Panellerin düzlemsellik analizi (Yazıcı ve Tanaçan, 2012).



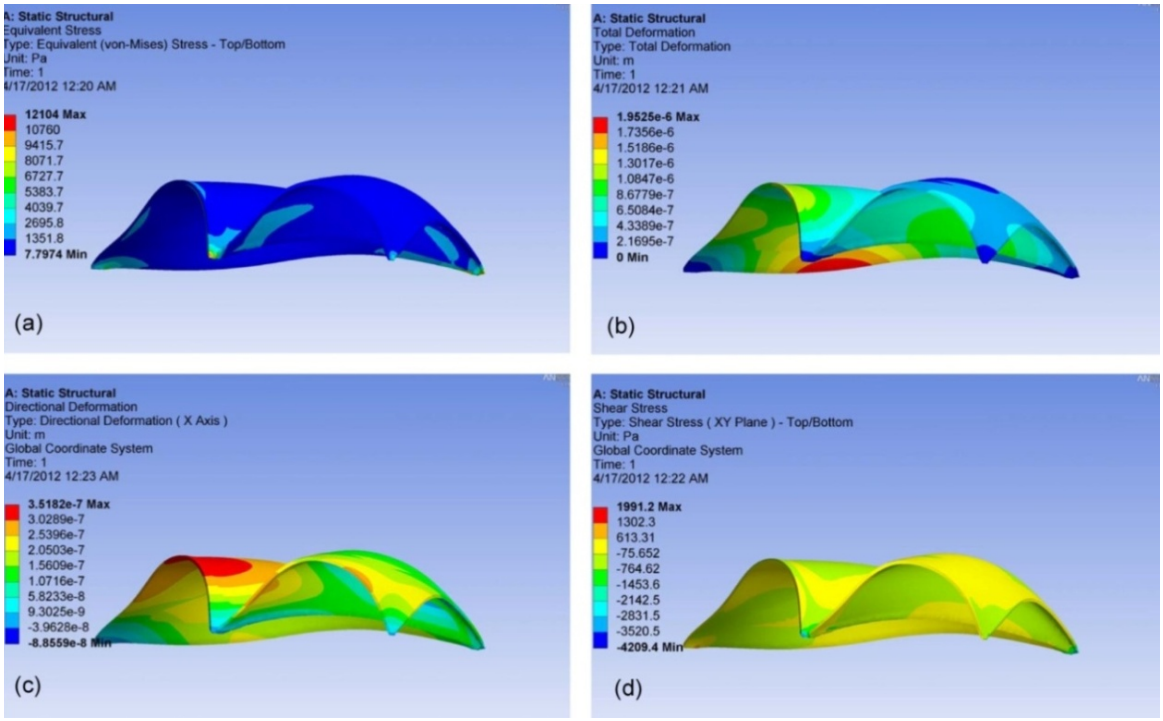
Şekil 3.18 : Başarım tabanlı mimari geometride malzeme / Sınır koşulları ve yüklemelerin oluşturulması (Yazıcı ve Tanaçan, 2012).



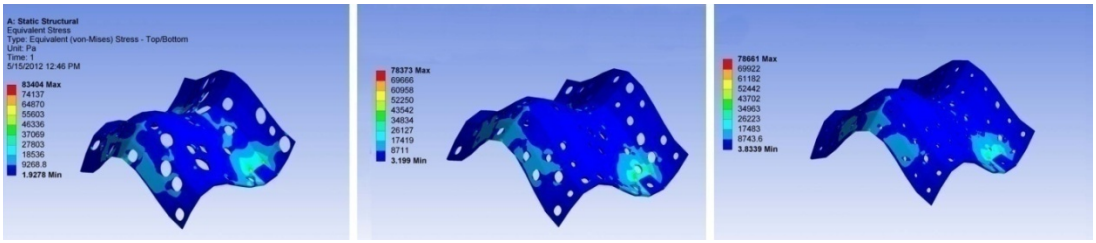
Şekil 3.19 : Başarım tabanlı mimari geometride malzeme / Strüktürel başarım benzetimi ve farklı malzemelerle karşılaştırma (a) çelik; (b) beton; (c) alüminyum (Yazıcı ve Tanaçan, 2012).



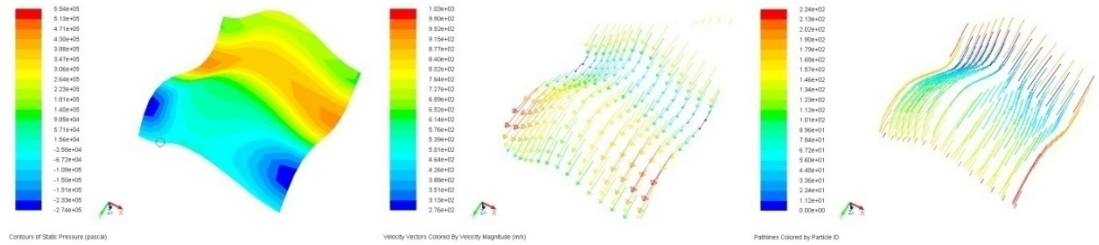
Şekil 3.20 : Yazar tarafından yürütülen malzeme ile mimari geometride verimlilik çalışması, sınır koşulları ve yüklemelerin belirlenmesi (2012).



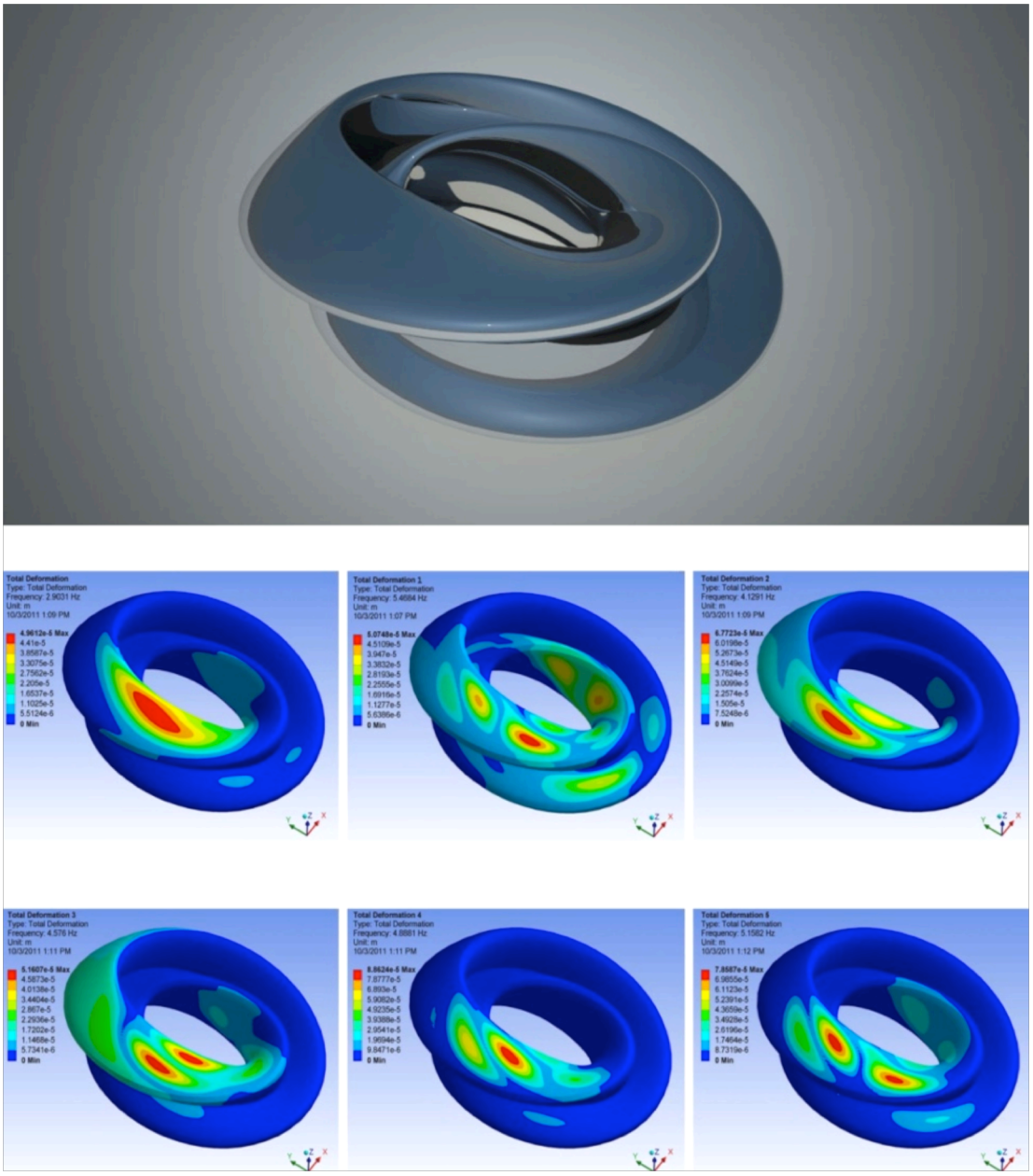
Şekil 3.21 : Yazar tarafından yürütülen çalışmada malzeme ile mimari geometride ve strüktürel başarım benzetimi arasındaki ilişkinin sorgulanması (2012).



Şekil 3.22 : Yazar tarafından yürütülen panellerin strüktürel başarım üzerindeki etkisinin incelenmesi (2012).



Şekil 3.23 : Yazar tarafından yürütülen mimari geometri ve rüzgâr yükleri arasındaki ilişkinin CFD ile analizi (2012).



Şekil 3.24 : Yazar tarafından yürütülen SEY aracılığı ile klein yüzeyine uygulanan titreşim analizi ve strüktürel başarım incelemesi (2011).

3.4.2 Strüktürel optimizasyon

Tasarımın kendisi bir optimizasyon (en uygun duruma getirme) süreci olarak kabul edilmektedir. Bunun sebebi, kararların oluşturulması, belirli çözümlerin seçilmesine ve belirli hedefler doğrultusunda değiştirilmesine bağlıdır. Diğer bir tanıma göre ise tasarım bir problem çözme yöntemidir (Markus, 1972). Mimari tasarım sürecinin, kavramsal tasarım ve tasarım geliştirme aşamalarında yaratıcı bir biçimde, tasarım alanında özgürce hareket etmek önemlidir. Bu şekilde, gelişmemiş fikirlerin çözüm

olarak sunulması engellenmiş olur. Tasarımın erken aşamasında tekilleşmiş çözümün sunulması, problemin çok yönlü olarak, yeterli seçeneklerle değerlendirilmesinin önüne geçer. Bu sebeple, tasarım sürecinde çok sayıda çözüm üreten tercih edilmelidir (von Bülow, 2007).

Tasarım optimizasyonu, bina ve inşaat için karar verme süreçlerinde kullanılan, mimari tasarım problemlerini çözmeyi hedefleyen bir paradigmasıdır. Bu paradigma, tasarım, analiz, değerlendirme ve sentez aşamaları arasındaki etkileşim aracılığı ile çözümler öne sürer. Bu alandaki ilk çalışmalarda, konut binalarının maliyetinin azaltılması ve dolaşım mesafelerinin kısaltılması gibi problemlerin çözümünde optimizasyon uygulamaları kullanılmıştır (Markus, 1972).

Optimizasyon bir işlemin en iyi sonucu, belirli kısıtlamaları yerine getirirken başarım sağlaması ile ilgilidir. İlk olarak uçak tasarımında ağırlığın, maliyetten önemli kabul edilmesiyle belirmiştir. Strüktürel analiz problemleri, hızlı hesaplama tekniklerindeki ilerlemeler öncesinde, analitik olarak çözülebilen diferansiyel denklemlerle ifade edilmekteydi. 1960' lardan başlayarak, bilgisayar kullanımının strüktürel analiz çözüm süreçlerinde önemli etkisi olmuştur. Bilgisayar uygulamalarıyla beraber, SEY baskın hale gelmiştir. Aynı dönemde strüktürel optimizasyon alanında da aynı dönüşüm yaşanmıştır (Haftka ve Gürdal, 1993).

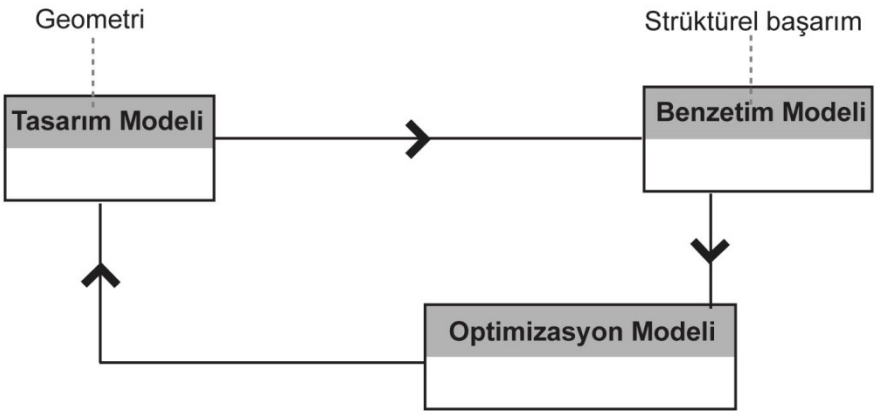
Optimal strüktürel tasarım uygulamalı matematik ve mekaniğin en önemli alanlarındandır. Bu alanın temel problemi, verilen kısıtlamalara göre en iyi kalite ve başarımda bir sistemin oluşturulmasıdır. Karmaşık mekânsal strüktürler için kullanımı ise modern analitik ve hesaplamalı yöntemlerle gerçekleştirilir. Optimal tasarımın teori ve uygulamasına önemli bir katılım da modern kompozit teknolojisindeki gelişmelerle olmuştur. Kompozit strüktürler, yalnızca belirlenen yükleme ve işleme koşulları ile optimal biçime ve malzeme dağılımına sahip olduklarında verimli olarak çalışabilirler (Vasiliev ve Gürdal, 1999).

Strüktürel analizler, malzemede oluşan gerilmeler ve yer değiştirmeler gibi özelliklerin gözlemlenerek strüktürel başarımın saptanmasında ve en uygun çözümü bulmada yol gösterir. Bu uygulamada, malzeme; strüktürün topolojisi ve biçimi; sınır koşulları ve yüklemeler önceden belirlenmiştir. Başarım sonuçlarına göre, mekanik kurallar ışığında, strüktürün yeniden düzenlenmesi strüktürel optimizasyon olarak tanımlanır (Kato, 2010). Mimarlıkta ve yapı mühendisliğinde optimizasyon,

çoğunlukla birden çok hedefe (multi-objective) yöneliktir. En uygun olma durumu, parametrelere verilen önem sırasına göre farklılaşabilir ve bir tasarım problemi için birçok seçenek üretilebilir.

Strüktürel optimizasyon konusu kapsamında, bazı kavramlar önemli olup, incelenmelidir. Bunlar tasarım değişkenleri (design variables), hedef fonksiyonlar (objective functions) ve kısıtlamalardır (constraints). Tasarım değişkenleri en uygun çözümü bulurken değiştirebilenlerdir. Bunun yanında, optimizasyonun amacı hedef fonksiyonlarla belirlenmiştir. Hedef fonksiyonlar matematiksel tanımlardır ve strüktürel optimizasyon için çoğunlukla en aza indirme olarak tanımlanmıştır. Optimizasyon işleminin gerçekleştirilmesi için, en uygun çözümü bulmak amacıyla oluşturulan arama alanının, sınırlandırılması ve kısıtlamalarla belirtilmiş olması gereklidir (Dimcic, 2011). Farklı karmaşıklık derecesine sahip olan strüktürel optimizasyon türleri dört temel başlıkta incelenir. Bunlar *malzeme, topoloji, geometri* (şekil) ve *en kesit* (boyutlandırma) optimizasyonlarıdır (Dimcic, 2011), (Kato, 2010). Optimizasyonun temel kavramlarına ilişkin tanımlama getirildikten sonra, optimizasyon türüne bağlı olarak, optimizasyon yönteminin seçilmesi gerekmektedir. Seçilen optimizasyon yönteminin en uygun çözümü, en kısa sürede bulması beklenmektedir. Bunlar da *hesap tabanlı* (calculus based) ve *stokastik* (stochastic) *yöntemler* olarak iki ana başlıkta incelenmiştir. Bahsedilen kavram ve başlıklar sonraki bölümlerde daha detaylı olarak ele alınacaktır.

Strüktürel optimizasyonun temel adımları 3D model, optimizasyon modeli ve analiz modeli arasındaki etkileşimle oluşturulur (Kato, 2010) (Şekil 3.25).



Şekil 3.25 : Optimizasyon modeli ve diğer modellerin ilişkisi (Kato, 2010).

3.4.2.1 Optimizasyon kavramları

Optimizasyon konusunun anlaşılması için temel kavramlar incelenmiştir.

Tasarım değişkenleri

Bir strüktür geliştirilirken ya da optimize edilirken, strüktürün değişmesine olanak tanınmalıdır. Bu özgürlük, parametre grubunun değişimine izin verilen aralıklarla ifade edilir. Değişkenler en-kesit ölçü ya da eleman boyutları, geometriyi kontrol eden parametreler ya da malzeme özellikleri olabilir. Bu parametreler, strüktürel optimizasyon terminolojisinde tasarım değişkenleri olarak ve genelde vektör x=(x1, x2,…xn) ile ifade edilir (Haftka ve Gürdal, 1993).

Tasarım değişkenleri en uygun çözümün bulunması sürecinde değiştirilebilen değerleri temsil eder. Mimar ya da tasarımcı tarafından kontrol edilebilir olanlardır. Strüktürün değişiklik gösterebileceği tasarım değişkenleri, çoğunlukla vektörle ifade edilir: x = (x_1, x_2, x_3 . . . , x_n) iken x tasarım değişkenleridir.

Strüktürel tasarımda, olası değişkenler optimizasyon türlerine bağlı olarak malzeme, geometri, topolojiye ve strüktürel elemanların en kesitlerine bağlı olarak değerlendirilebilir. Değişkenler alabildikleri değerlere göre sürekli (continuous), süreksiz (discontinuous) ya da mantıksal (boolean) olarak tanımlanabilirler. Sürekli değişkenler belirli bir aralık içinde her türlü değeri alabilirken, süreksiz değişkenler ayrıştırılmış değerlere sahip olmaktadır. Örneğin, önceden belirlenmiş boyutlarda seri üretimi gerçekleştirilen ürün boyutları, süreksiz tasarım değişkenleri olarak tanıtılabilir (Dimcic, 2011). Öte yandan sürekli değişkenler, seçilen optimizasyon yöntemini etkileyerek, süreci daha basitleştirir. İzole edilmiş değişken değerleri, arama alanını süreksiz ve kopuk hale getirir. Mantıksal değişkenlerde ise iki değer arasında seçim yapılır. Değişken değerleri için genellikle minimum ve maksimum sınırlar belirlenir.

Hedef fonksiyonlar

Optimizasyonun amacı, azaltılması ya da arttırılması gereken sayısal değerlerle ifade edilir. Strüktürel optimizasyon kapsamında, bu fonksiyonlar toplam yer değiştirmelerin ya da maksimum gerilmelerin azaltılması gibi çoğunlukla en aza indirme problemi olarak karşımıza çıkar. Strüktürel optimizasyon için yer değiştirmeler, gerilmeler, titreşim frekansları, burkulma yükleri, maliyet ya da bunların kombinasyonları hedef fonksiyon olabilir. Birden çok hedef ise süreci

karmaşık hale getirebilir (Haftka ve Gürdal, 1993). Örneğin eğer bir problem basit bir kirişin profilini en uygun hale getirmekse, hedef fonksiyon ağırlığı azaltmak olabilir. Bu durumda değişken en ve boy ölçüleri verilerek kesit geometrisi olabilir. Hedef fonksiyon ya da fonksiyonları şöyle ifade edilir:

$$F=F(x) \text{ ya da } F = F(x_1, x_2, x_3 \ldots, x_n) \quad \textbf{(3.12)}$$

F hedef fonksiyonunda x tasarım değişkenleridir. Hedef fonksiyonlar sayılarına göre tek hedefli (single objective) ya da birden çok hedefli (multi-objective) olarak ifade edilir. Çözüm yöntemleri çoğunlukla tek hedefe yönelik olmakla beraber, çok hedefe yönelik çözümler daha karmaşıktır ve farklı yöntemlerle ele alınır. Örneğin, eğer problemde bir değişken varsa, basit hesaplamalı yöntemlerle fonksiyonun belirlediği en çok (maxima) ve en az (minima) değerleri bulunabilir. Fonksiyonlar sürekli olduklarında diferansiyelinin alınabilmesi daha kolaydır. Öte yandan programlama yöntemleri mühendis ve tasarımcılara, lineer olmayan ve kesikli fonksiyonlarla çalışma imkânı tanır (von Bülow, 2007).

Kısıtlamalar

En uygun olan çözümü ararken, malzeme, strüktür ya da üretim teknolojisi özelliklerinden kaynaklanan kısıtlamalar göz önünde bulundurulmalıdır. Kısıtlamalar, arama alanını sınırlandırır. Eğer strüktürel tasarım problemlerini fonksiyon değerlerinin azaltılması olarak tanımlarsak, genel anlamda fonksiyon ve tanımlamalar şu şekilde ifade edilir:

Bu kısıtlamalar altında,

$$m_r(x) \geq 0 \, , \; r = 1, \ldots, M$$

$$p_t(x) = 0 \, , \; t = 1, \ldots, L \quad \textbf{(3.13)}$$

iken m_r ve p_t tasarım çözümünün sınırlarını belirler ve M ya da L' ye kadar olmak üzere birden fazla kısıtlama olabilir.

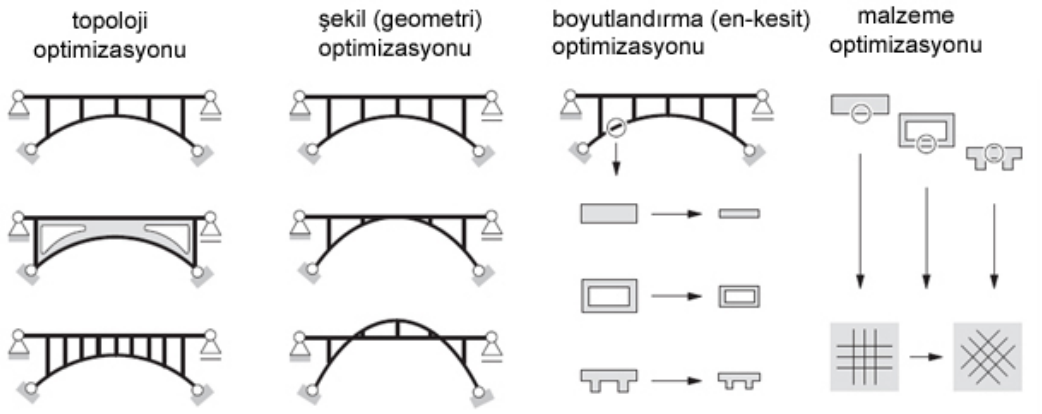
Fonksiyon değerini azalt:

$$F = F(x_1, x_2, x_3 \ldots, x_n) \quad \textbf{(3.14)}$$

Strüktürel tasarımda uygunluk genelde çok akılcı kurallarla belirlenmiştir. Kısıtlamalar malzemenin mekanik özellikleri ya da üretim teknolojilerine bağlı olabilir.

3.4.2.2 Strüktürel optimizasyon türleri

Strüktürel optimizasyon türleri malzeme, topoloji, şekil (geometri) ve boyutlandırma (en-kesit) olarak dört ana başlıkta incelenir (Şekil 3.26).



Şekil 3.26 : Strüktürel optimizasyon türleri (Kato, 2010)**.**

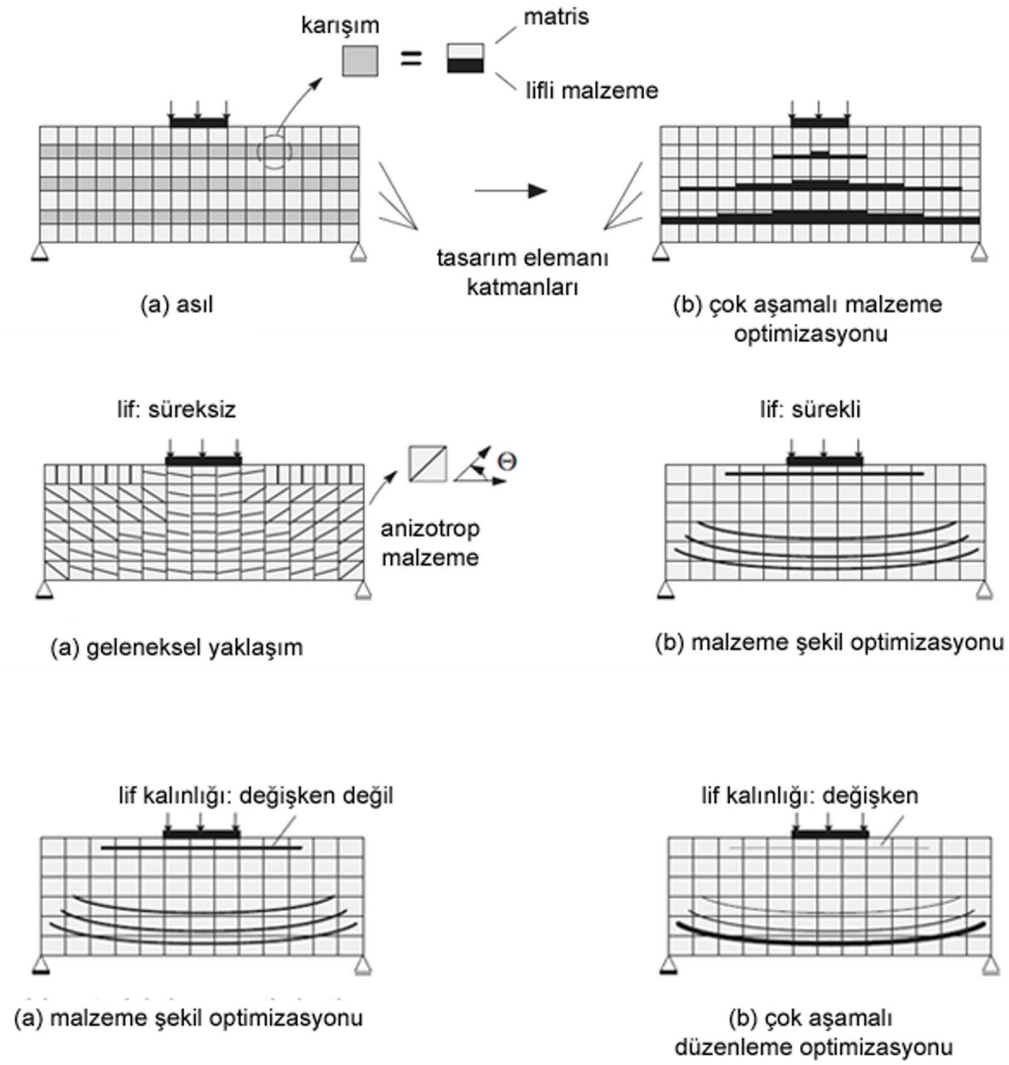
Malzeme optimizasyonu

Malzeme optimizasyonu ise malzemenin mekanik özellikleri ya da malzemenin mikro yapısını değiştirmekte kullanılır. Farklı tipte değişkenlere göre, farklı malzeme optimizasyon planları uygulanabilir. Kato (2010) araştırmasında, liflerle zenginleştirilmiş kompozit malzemeler için, çok fazlı malzeme optimizasyonu (multiphase material optimization), malzeme şekil optimizasyonu (material shape optimization) ve çok fazlı düzenleme optimizasyonlarını (multiphase layout optimization) geliştirmiştir (Şekil 3.27). Örnek olarak bunlar kısaca tanımlanacak olursa:

Çok fazlı malzeme optimizasyonu: Bu yöntem topoloji optimizasyonu ile yakından ilişkilidir. Lif uzunluğu, lif boyutları ve farklı lif malzemelerinin bir araya gelişleri tasarım değişkenleri olarak kullanılmıştır.

Malzeme şekil optimizasyonu: Malzeme liflerinin geometrisi B'ezier-spline gibi sürekli fonksiyonlarla ifade edilmiştir. Bu yöntemde fonksiyon eğrilerinin kontrol noktaları tasarım değişkenleri olarak belirlenmiştir ve geometri optimizasyonuna bağlıdır.

Çok fazlı düzenleme optimizasyonu: Yöntem yalnızca en uygun lif geometrisinin bulunması hedeflenmez, aynı zamanda lif boyutu ve farklı tipteki lif malzemelerinin de tanımlı lif hacmi için tanımlanmasını temsil eder. Bu yöntem çok fazlı malzeme optimizasyonu ve malzeme biçim optimizasyonun birleşiminden doğmuştur.

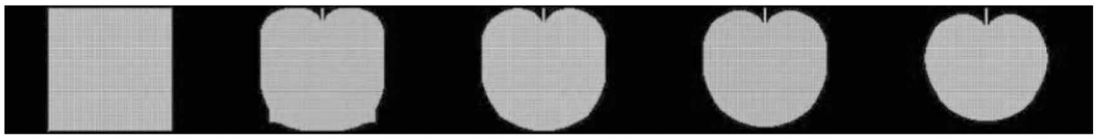


Şekil 3.27 : " Çok fazlı malzeme optimizasyonu", "malzeme şekil optimizasyonu" ve "çok fazlı düzenleme optimizasyonu" (Kato, 2010).

Optimizasyonla ilgili yapılan çalışmalar büyük oranda lineer strüktürel davranış gösteren strüktürel problemler için yapılmaktadır. Bunun en önemli sebebi strüktürlerin lineer elastik aralıkta (linear elastic range) tasarlanması ve kullanılmasıdır. Ancak non-linear özellikleri olan yeni malzemelerin kullanılması ile strüktürlerin tasarım gerekliliklerini yerine getirmesi ve ayakta kalabilmeleri için non-linear strüktürel davranış da en uygun tasarım arayışında incelenmelidir (Kato, 2010).

Topoloji optimizasyonu

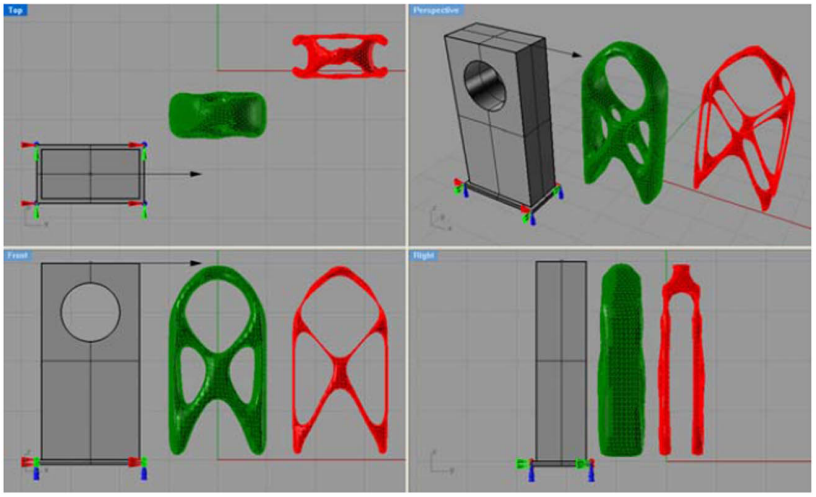
Topoloji optimizasyonu, belirli sınır koşulları ve yükler altında geometriye etkiyen gerilmeleri hesaplayarak ideal strüktürel düzenlemenin oluşturulmasını sağlar. Gerilmeler doğrultusunda geometriden malzemenin çıkartılması, evrimsel strüktürel optimizasyon (evolutionary structural optimization: ESO) ve malzemenin eklenmesi, çift yönlü evrimsel strüktürel optimizasyon (bi-directional evolutionary structural optimization: BESO) çalışmalarıyla incelenmiştir (Xie ve diğ, 2005); (Xie ve diğ, 2011). Örneğin ESO yöntemiyle incelenen geometrik olarak kararlı bir küp, yerçekimi bulunan ortamda tek bir noktadan asıldığında geometriye etkiyen kuvvetlerin hesaplanmasıyla ve fazla malzemenin çıkartılmasıyla, doğada aynı sınır koşullarını sağlayan elma biçimine ulaşılır (Şekil 3.28). Benzer şekilde ESO asılı zincir modeli ile üretilen strüktürler için çözüm üretebilmektedir (Şekil 3.29). Malzeme oranları değiştirilerek farklı topolojiler elde edilebilir (Şekil 3.30). Bunun yanında makas sistemler için geliştirilmiş EifForm da topoloji optimizasyonunu kullanır (Shea ve diğ, 2005).



Şekil 3.28 : ESO çözümüyle, asılı bir geometrinin, biçiminin kendi ağırlığı ile oluşturulması (Xie ve diğ, 2011).



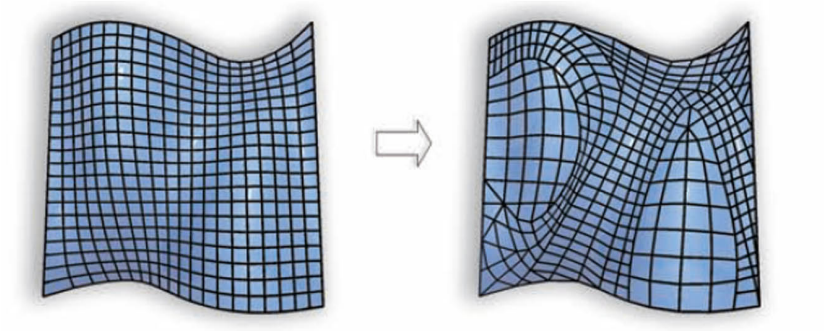
Şekil 3.29 : ESO'nun asılı zincir modeliyle tasarlanan strüktürler için geliştirdiği çözümler; (a) asıl durumu ifade ederken, (b-d) ESO ile oluşturulan çözümlerdir (Xie ve diğ, 2011).



Şekil 3.30 : 50% ve 20% malzeme kullanımı ile verilen geometri, sınır koşulları ve yükler için en uygun ESO çözümleri (Xie ve diğ, 2011).

Geometri optimizasyonu

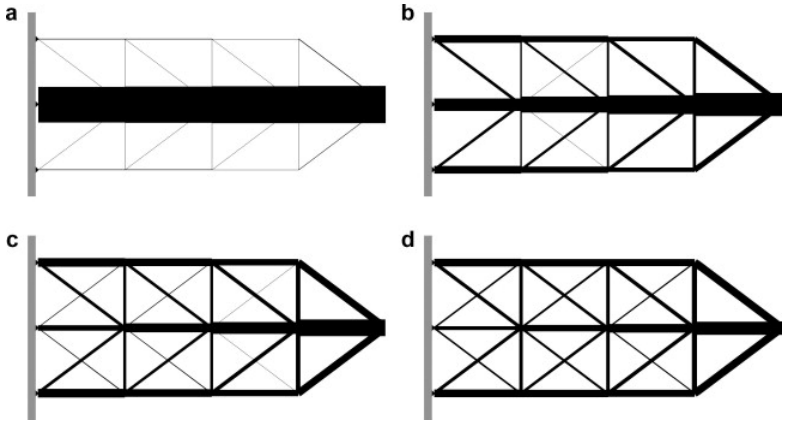
Strüktürün topolojisi tanımlandıktan sonra, strüktürün iç ve dış sınırları mekanik gereklilikler doğrultusunda değiştirilir. Bu, geometri ya da biçim optimizasyonu olarak adlandırılır (Kato, 2010). Geometri optimizasyonu, geometrinin karmaşıklığı ile orantılı olarak çok değişkenli karmaşık problemlerin çözümünü gerektirir. Örneğin, NURBS tabanlı geometrilerde kontrol noklarının koordinatları değişken olabilir (Dimcic, 2011) (Şekil 3.31).



Şekil 3.31 : Serbest yüzeye atanan örüntünün geometri optimizasyonu en uygun hale getirilmesi (Dimcic, 2011).

En-kesit optimizasyonu

En-kesit optimizasyonunda strüktürel elemanların profilleri başarım sonuçları doğrultusunda yeniden değerlendirilir. Seri üretimi gerçekleştirilen profillerin halihazırda belirlenmiş ölçüleri kesikli değişkenler olarak optimizasyon sürecine dahil edilir (Şekil 3.32).



Şekil 3.32 : Yapısal elemanların kalınlıklarının değiştirildiği en-kesit optimizasyonu (Guest ve Igusa, 2008).

3.4.2.3 Optimizasyon yöntemleri

Optimizasyon kavramlarının tanımlanmasını takiben, hesaplamayı gerçekleştirecek, bir matematiksel model olan optimizasyon yöntemi belirlenmelidir. Kullanılan yöntem, optimizasyon türüyle ilişkilidir. Örneğin, malzeme ve en-kesit optimizasyonları göreceli olarak daha basit oldukları için, matematiksel fonksiyon olarak ifade edilebilirler. Bu sebeple hesap tabanlı optimizasyon yöntemleriyle çözülmeleri uygundur. Geometri ve topoloji optimizasyonunda ise, biçimin karmaşıklığına bağlı olarak çözüm alanı malzeme ve en-kesit optimizasyonuna göre çok geniş bir alanı kaplayabilmektedir. Çok sayıda değişkenin bulunduğu birden çok hedefi olan, lineer olmayan bir optimizasyon uygulamaları söz konusudur. Bunun gibi problemlerin, sürekli diferansiyel fonksiyonlarla ifade edilmeleri mümkün değildir (Dimcic, 2011). Çözüm için, stokastik yöntemlerin kullanımı uygundur.

Hesap tabanlı optimizasyon yöntemleri

Matematiksel olarak tanımlı hedef fonksiyonların çözümünde hesap (calculus) tabanlı yöntemler uygulanır. Problem eğer lineer olmayan tekil ya da çoğul tasarım parametreleri ile tanımlanıyorsa, çözüm bu fonksiyonun uç noktalarını (extremes) bulmaktır.

Serbest Yöntemler (Unconstrained Methods): Bir değişkenli fonksiyon olarak ifade edilebilen problemler, fonksiyonun uç noktaları olan, en az ve en çok değerlerinin bulunmasıyla kolayca çözülebilir. İstenilen değerlerin elde edilmesi için, farklı yöntemler uygulanabilir. Temel kategoriler sıfırıncı, birinci ve ikinci dereceli yöntemlerdir.

Sıfır dereceli yöntemler sadece fonksiyonun değerini kullanır ve çözümü bir dizi fonksiyon değerlendirmesiyle bulur. Tek değişkenli fonksiyonlarda, kademelendirme yöntemi (bracketing method), ikinci dereceden iç değerlendirme (quadratic interpolation), fibonacci and altın kesit araması (golden section search) kullanılır. Çok değişkenli fonksiyonlarda aşamalı tek yönlü yöntem (sequential simplex method) and powel'in eşlenik eğimli yöntemi (Powell's conjugate gradient method) sıklıkla kullanılır (Haftka ve Gürdal, 1993; Dimcic, 2011).

Birinci derece yöntemler, fonksiyonların değerlerinin yanında fonksiyonların birinci türevlerini de kullanır. İki kesitli yöntem (bisection method) ve Davidon'un kübik iç değerlendirme yöntemi (Davidon's cubic interpolation method), fonksiyonun minimumlarını bulmakta sıklıkla kullanılmaktadır. Birden çok değişken olduğu durumlarda, Beale and Fletcher-Reeves' yöntemleri gibi farklı eşlenik eğimli (Conjugate Gradient) teknikler kullanılır (Haftka ve Gürdal, 1993; Dimcic, 2011).

İkinci dereceli yöntemler, fonksiyonun kendi değerleri dışında birinci ve ikinci türevlerini kullanır. Tek veya birden çok değişkenli fonksiyonun olması durumunda Newton yöntemi en verimli yöntemdir.

Kısıtlandırılmış Yöntemler (Constrained Methods): Strüktürel optimizasyon problemleri, karmaşık olabilen birçok kısıtlama ve koşulları sağlamakla yükümlülerdir. Bu sebeple optimizasyon Lagrange çarpanları (Lagrange multipliers), ikinci dereceden ve lineer olmayan programlama, azaltılmış eğimli yöntemler (reduced gradient methods) ve ceza fonksiyonlarının (penalty functions) kullanımı gibi matematiksel ifadelerle belirtilir.

Eğer problem malzeme optimizasyonunda olduğu gibi matematiksel fonksiyonlarla tanımlanacak şekilde basitse, ETO (Eğim Tabanlı Optimizasyon : Gradient Based Method) uygundur (Dimcic, 2011) (Kato, 2010).

Stokastik optimizasyon yöntemleri

Serbest biçimlerin geometri optimizasyonu ve topoloji optimizasyonu gibi karmaşık olabilen süreçler, kesikli tasarım değişkenleriyle çalışan ve lineer olmayan bir süreç olduğundan, bu gibi görevler için stokastik yöntemler kullanılmaktadır.

Stokastik aramada, arama alanında her bir noktanın analiz edildiği, sayılabilen optimizasyon (enumerative optimization) yöntemlerinden bahsedilir. Bunlar, arama alanında gelişigüzel seçilen noktalarla yapılan, gelişigüzel aramalardan çok farklı

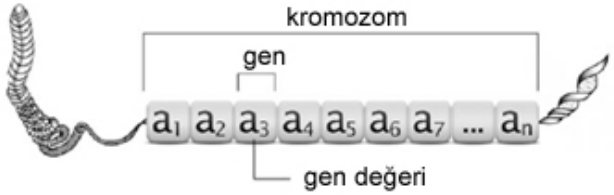
değildir. Bu uygulamalar çok hedefli ve değişkenli arama alanın söz konusu olduğu durumlarda oldukça verimsiz olup, en uygun çözüm için geçen süre çok fazladır. Düzensizlik (perturbation), tepeye tırmanma (hill climbing), benzetimli tavlama (simulated annealing) ve sürü algoritmaları (swarm algorithms) gibi başka tekniklerle de stokastik arama gerçekleştirilebilir (Dimcic, 2011). Stokastik yöntemler altında incelenen evrimsel algoritmalar ve bu gruba dâhil olan genetik algoritmalar, mevcut probleme uygunluk göstermeleri sebebiyle mimarlıkta ve yapı mühendisliğindeki uygulamalarda önem kazanmaktadır.

Genetik Algoritmalar (GA)

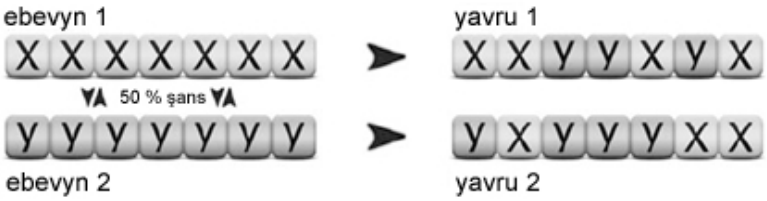
Klasik optimizasyon teknikleri, problemler için birden çok çözüm üretmede yetersiz kalır. Bunun sebebi, algoritmanın birden çok, farklı başlangıç noktalarıyla işletilmesinde bile farklı çözümlerin üretilmesinin kesinliği olmayışıdır. Ancak evrimsel algoritmalar (evolutionary algorithms), birden çok çözüm üretebilirken, çok hedefli optimizasyon görevlerini gerçekleştirebilmektedir. Evrimsel hesaplamalar, uygulamadaki bazı küçük farklılıklarla GA, evrimsel programlama, evrim stratejileri ve genetik programlama isimleriyle adlandırılır (Yıldız, 2010). İlk olarak John Holland tarafından 1975 yılında ortaya atılan, GA farklı disiplin alanlarında yaygın kullanım olanağı bulmaktadır.

Doğal oluşumların gözlemlenmesiyle oluşturulmuş olan GA, evrimsel sürecin incelenmesiyle, genetiğe bağlanmıştır (Turrin ve diğ, 2012; Kawamura ve Ohmori 2001; von Bülow ve diğ, 2010). Biyolojik genetik, organizma populasyonlarının çevreye uyum sağlamak için evrimleşeceği prensibine dayalıdır. Buna göre çevreye uyumlu özellikler daha uzun süre yaşar. Böyle bireylerin üremek ve önemli özelliklerini gelecekteki nesillere aktarmak için daha çok şansları vardır. Ondan beri bu yöntem birçok hesaplamalı problemde kullanılmıştır. Bunlar arasında yapay örüntü tanınması doğal dil işleme ve mühendislik problemleri için çok değişkenli arama algoritmaları sayılabilir. GA mühendislikteki optimizasyon problemlerinde sıkça uygulanır. GA kesikli ya da tamsayı değişkenleri için uygundur. Sürekli değişkenler için genetik algoritmaların kullanımından kaçınılmalıdır. GA'da hedef fonksiyon fitness ya da fitness fonksiyonu olarak ifade edilir (Vasiliev ve Gürdal, 1999).

Süreçte kullanılan temel ilkeler doğaya ve doğanın seçim yöntemlerine bağlıdır. En uygun bireyleri oluşturmak için üreme (breeding), mutasyon (mutation) ve seçim (selection) işlemlerini gerçekleştiren genetik algoritmada, değişkenler bir kromozomda dizilmiştir (von Bülow, 2008; Hoffmeister, 1991; Dimcic, 2011) (Şekil 3.33-34). Doğaki mutasyonlar, çevresel etmelerle birlikte çeşitliliği sağlamış ve özgün bireylerin oluşturulmasını sağlamıştır. Her yeni doğan birey farklı sürelerde yaşamıştır. Bazı türler diğerlerinden daha uzun ve fazla sayıda üretildiği için, genetik bilginin yavrulara aktarılması ve türün hayatta kalması sağlanmıştır.



Şekil 3.33 : Kromozom ve gen dizilimi örneği (Dimcic, 2011).



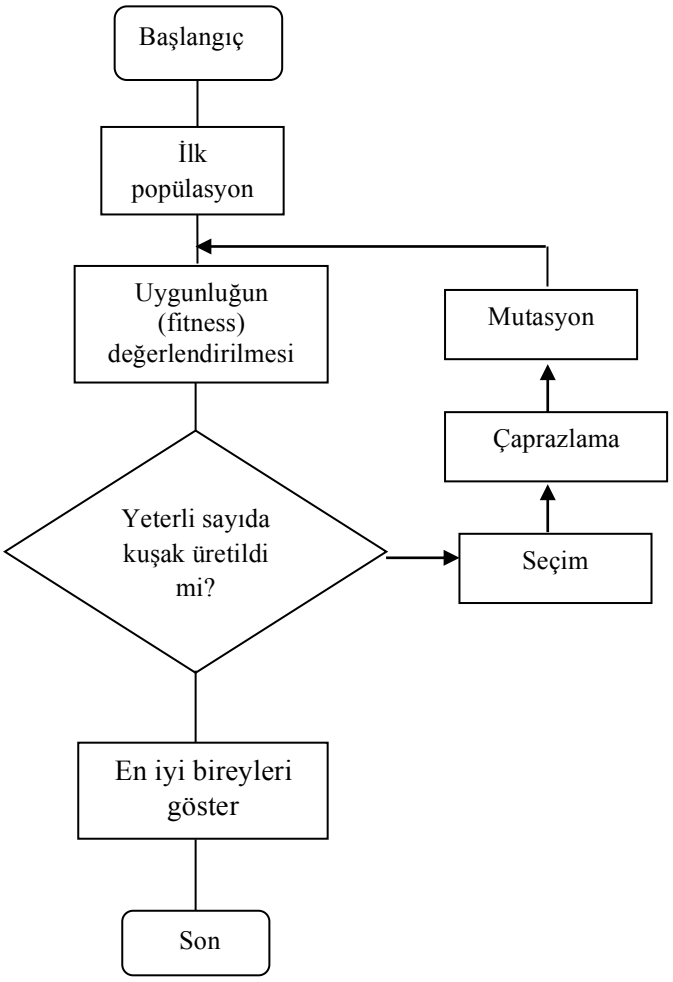
Şekil 3.34 : Düzgün çaprazlama örneği. Ebevynlerin genleri 50% oranında çaprazlanarak yavruları oluşturur (Dimcic, 2011).

Evrimsel süreç tanımlama, üretim ve değerlendirme olmak üzere üç aşamadan oluşur. Tanımlama aşamasında kısıtlamalar, değişkenler kümesi ve problemin mevcut çözümlerinden oluşan bir başlangıç popülasyonu sayısal olarak oluşturulur. Üretim aşamasında ölçütler dâhilinde tasarım süreci yürütülür. Değerlendirme aşamasında, uygun olan çözümler seçilir. En uygun olana ulaşana dek üretim ve değerlendirme aşamaları tekrarlanır. En iyi tasarımın hayatta kalması ve kötülerin yok olması, GA ile yapılan optimizasyon uygulamalarının temelini oluşturur (Şekil 3.35) .

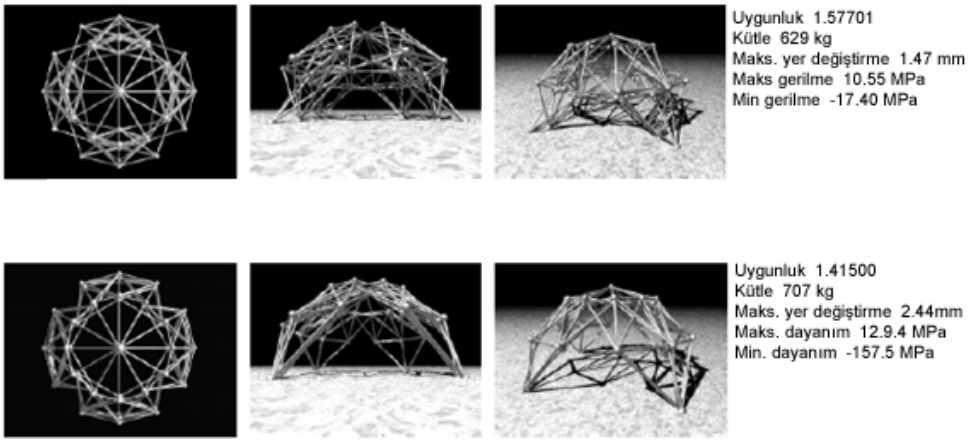
GA ve daha genel anlamda evrimsel algoritmalar, geniş bir alanda strüktürel ve mimari problemlerin çözümünde uygulanabilir. Farklı disiplinlerde genetik algoritmalar otuz yılı aşkın süredir, doğal ve yapay sistemlere adaptasyonunu gerçekleştirmek üzere biyoloji alanında başlamış, genetik programlamaya dek

sürdürülmüştür (Koza, 1992). John Frazer 70'lerde bu araştırmayı mimari tasarıma taşıyan öncü kişidir. Yazılımın özelleşmesi ve parametrik hale getirilmesi ile geliştirilmiştir (Frazer, 1995). Evrimsel algoritmaların mimarlık ve tasarım alanlarındaki uygulamaları göreceli olarak yenidir (Banichuk ve diğ, 2006).

GA kullanıcı etkileşiminde çok uygundur. GA lineer olmayan fonksiyonların ya da kesikli (discrete) eleman boyutlarının optimizasyonu için daha uygun olabilir. GA çoğunlukla analiz ve tasarım amaçlı kullanılabilir (von Bülow, 2007). GA kullanımı, strüktürel optimizasyon alanında, özellikle makas (truss) topoloji optimizasyonu oldukça sıklıkla başvurulan bir yöntemdir (Togan ve Daloglu, 2006; Iuspa ve diğ, 2003; Shea ve diğ, 2006). Örneğin taşıyıcı kesikli strüktürlere (load-bearing discrete structures) yönelik, topoloji optimizasyonu amaçlı yöntem, GA kullanımıyla stokastik bir arama gerçekleştirir (Kawamura ve Ohmori, 2002) (Şekil 3.36). Aynı zamanda, serbest biçimlerin geometrilerin optimizasyonu gibi uygulamalarda da GA başvurulan bir yöntemdir (Dimcic, 2011).



Şekil 3.35 : Genetik algoritma akış diyagramı (Springer Images, 2012).



Şekil 3.36 : Taşıyıcı kesikli strüktürlerin tasarımında GA kullanımı (Kawamura ve Ohmori, 2002)

4. MİMARLIKTA KULLANILAN SAYISAL ARAÇLAR VE YÖNTEMLER

1980' lerden itibaren bilgisayarın mimarlık uygulamalarında kullanılmaya başlanmasıyla, mimari tasarım ve buna bağlı olarak malzemenin algılanışı değişmeye başlamıştır. Gelişen sayısal (dijital) araçlarla, geleneksel temsil farklılaşmıştır. Elle yapılan çizimlerin ve eskizlerin yerini, bilgisayar ortamındaki 2D ve 3D grafik temsiller almıştır. Öncelikli uygulamalarda, AutoCAD ve ArchiCAD gibi yazılımlar aracılığıyla, çizgi ve genellikle birincil geometriler kullanarak, çeşitli biçimsel kompozisyonlar oluşturulmuştur. Günümüzde ise, Rhinoceros (kullanılan adıyla Rhino), Autodesk 3ds Max ve Maya gibi yazılımlar her türlü karmaşık biçimin modellenmesine imkân tanır. Ancak bu karmaşık biçimler, bilgisayar ekranının ardında, soyut ve malzemeden bağımsız olarak tasarlanır. Diğer yandan, sorunları bütünsel sistemler olarak değerlendiren yaklaşımlar, mimarlıktaki geleneksel tasarım süreçlerine ait anlayışı tümüyle değiştirecektir.

Tez kapsamındaki, *malzeme, biçim ve başarım* arasındaki ilişkinin ortaya konması açısından 2. Bölüm' de "Malzeme ve Biçim" ile 3. Bölüm' de "Malzeme ve Başarım" konuları ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bu bölümde ise, MBHT-m'yi (5. Bölüm) oluşturmaya yönelik unsurların değerlendirilmesi hedeflenmektedir. Bu kapsamda, mimarlıkta kullanılan ve MBHT-m'yi besleyen, sayısal araçlar ve yöntemler sunulmuştur. Sayısal yöntemler, terim olarak, bilgisayar ile ilgili becerileri geniş kapsamda tanımlamak için kullanılmıştır. Öncelikli olarak sorunları bir sistem bütünlüğü içinde çözmeyi gerektiren HT, sonrasında ise enformasyon sistemleri ile mimarlık pratiğinde hızla kendine önemli bir yer edinen YEM ele alınmıştır. MBHT-nin temel unsuru olan UML, yazılım mühendisliğinde kullanılan bir araç olmasından ötürü mimarlıkta bilgisayar programlama başlığında incelenmiştir. Son olarak, BDÜ tekniklerinin günümüz koşullarındaki yenileşimci uygulamalarına yer verilmiştir. BDÜ tekniklerinin, üretim kısıtlamaları ve parametreleri MBHT-m'nin yapısında yer almaktadır.

4.1 Hesaplamalı Tasarım (HT)

Sayısal teknolojiler, veri girdilerinin, ikili sistemin kodlarına göre sayısallaştırılmasıdır. Bu teknolojilerin mimari tasarımda yaygınlaşması, kişisel bilgisayarların kullanılmaya başlanması ile olmuştur. Günümüzde, bir yandan geleneksel tasarım yöntemleri uygulanmaya devam ederken, diğer yandan bilgiyi bilgisayar ortamında depolama, işleme ve matematiksel ifadeler ile sanal ortama aktarma sistemine dayalı HT sürecine geçiş dönemi başlamıştır (Yıldız, 2010).

Hesaplama (computation) kelimesi, çoğunlukla bilgisayar ile yürütülen kontrol süreçleriyle (computerization) karıştırılır. Hesaplama, bir durumu matematiksel ya da mantıksal yöntemlerle saptarken, bilgisayarla yürütülen kontrol süreçlerinde bilginin bilgisayarda ya da bilgisayar sisteminde yalnızca işleme konması, işlenmesi ve depolanması söz konusudur (Terzidis, 2006).

Bilgisayarın ilk kullanım örneklerinde, geleneksel mimaride kullanılan birincil geometrik biçimlere dayalı anlayışın yansıtıldığı görülmektedir. Bunun en önemli sebebi, kullanılan yazılımlardaki grafik temsil ile ilgili kısıtlamalardı. Sayısal tekniklerin, mimari tasarımda yaygın olarak kullanıldığı günümüzde ise ileri grafik temsil özelliklerine sahip 3D yazılımlarla, biçim özgürleşmiştir. İleri 3D modelleme yazılımları ile bilgisayar arayüzünde eskiz niteliğinde birçok biçimsel deneme yapılabilir. Ancak, oluşturulan bu biçimler matematiksel çözümleme yapılmaksızın, tasarımcı tarafından sezgisel yolla oluşturulmaktadır. Oluşturulan serbest biçimler, tasarımın tüm kısıtlamalarından bağımsızdır. Oysa ki, HT ile tasarım kısıtlamaları, tasarım sürecinin en başından itibaren süreci yönlendiren aktörlere dönüştürülürler.

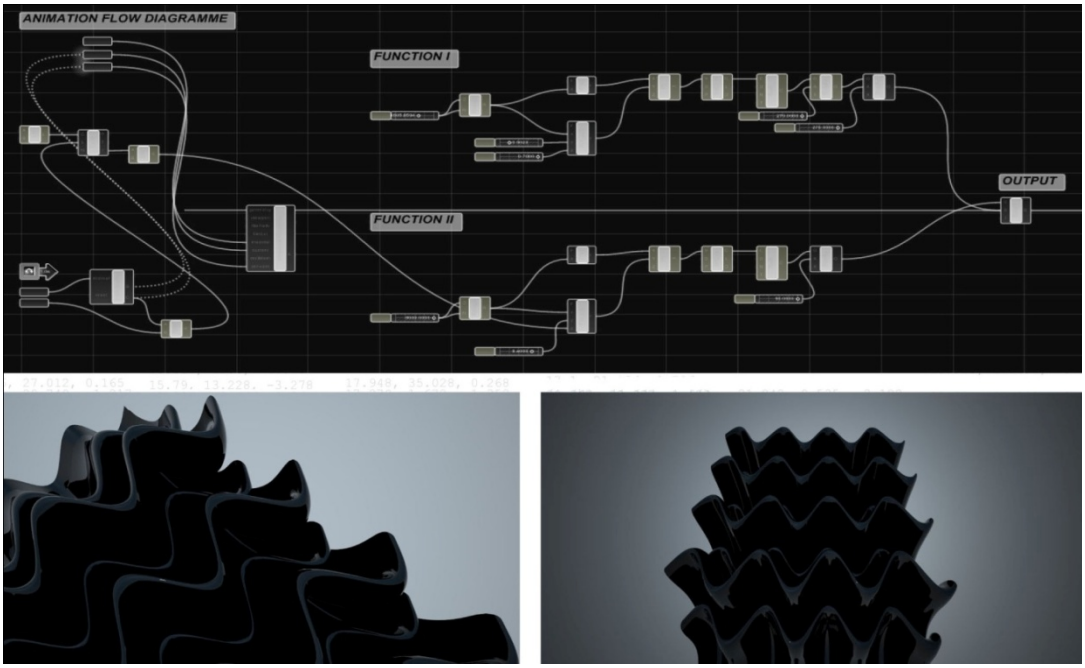
HT tekniklerinde, mimari biçime ilişkin tüm veriler sistem bütünlüğü içinde tanımlanma özelliğine sahiptir. Ekolojik ve sistematik farkındalık ilk olarak Aristotle (384-322 BC) tarafından metafiziksel bir görüşle sunmuştur (Skyttner, 1998). Sistem düşüncesi problem çözmede kullanılmaktadır. Bütüncül sistem davranışı, doğal oluşumlarda gözlemlendiği gibi, ayrı olarak belirlenen bileşen davranışı ile tahmin edilemez (Gorman, 2005). Sistem bir bütün olarak ele alınarak, bileşenler arasındaki bağlantılar ve etkileşimler değerlendirilir.

Parametrik tasarım, betik (script) oluşturma ya da bilgisayar programlama aracılığı ile kurulan tasarım sistemleri, matematiksel olarak tanımlı, *parametre, kural ve ilişkiler* ile oluşturulur. RhinoScript, MEL ya da 3dMaxScript gibi mimari tasarımda

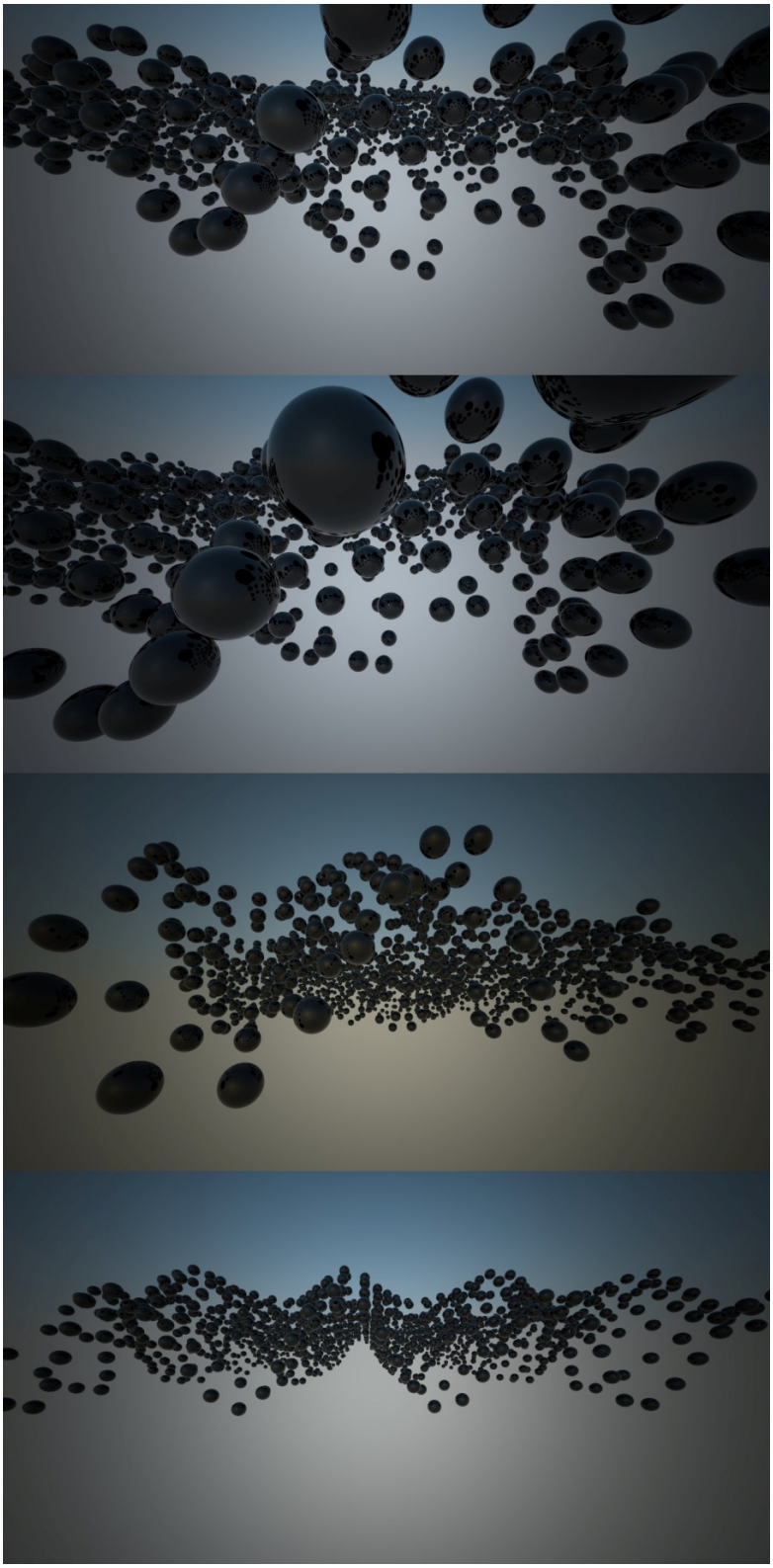
kullanılan yazılımların özellikleri, betikler aracılığıyla güçlendirilebilir. Parametrelerin değiştirilmesiyle, tasarımın bütüncül olarak cevap verdiği ve değişimlerin etkisinin kolayca gözlemlenebildiği parametrik tasarımda, Rhino Grasshopper, Generative Components, ParaCloud gibi araçlar yaygın olarak kullanılmaktadır.

Algoritmik tasarımda, kural tabanlı mantıkla mekân ve biçim üretilir. Algoritma bir problemi sonlu sayıda adımla ifade eder. Bilinen bir problemin stratejik planı ya da kısmi olarak bilinen bir problem ise olasılıklı arama ile çözümler üretir. Sonlu sayıda, tutarlı ve rasyonel adımlarla problemin kodlanmasını sağlar. Teorik olarak bir problem mantıklı olarak tanımlanabilirse, çözüm problem ihtiyacına göre üretilebilir. Algoritma, problemin dilbilimsel ifadesidir ve yazım içindeki dilsel elemanlar ve işlemlerden oluşur. Problemin insan tarafından çözülecek biçimde ifade edilmesi ya da bilgisayar tarafından anlaşılması sağlanmalıdır. Algoritmik süreçler bilgisayara bağlı olmadan da yapılabilir (Terzidis, 2006).

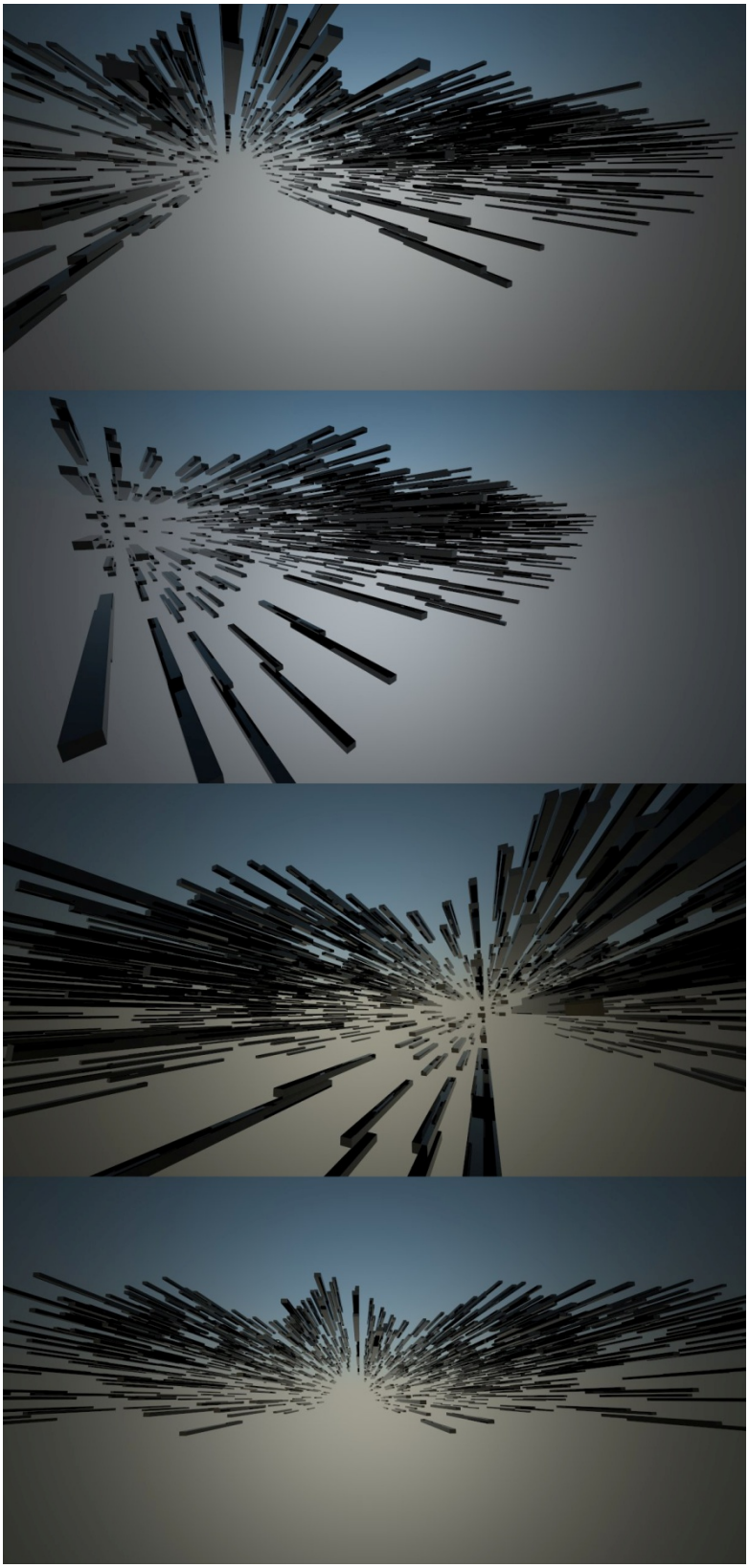
Hesaplamalı tasarım aracılığı ile tez konusu kapsamında yazar tarafından gerçekleştirilen çalışmalarda geometri, geometri bileşenleri ve malzeme arasındaki ilişkiyi ortaya koymayı amaçlamaktadır. Kullanılan araçlar Rhino Grasshopper ve RhinoScript'tir (Şekil 4.1-4.8).



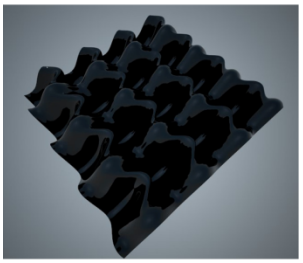
Şekil 4.1 : HT araçlarından, Rhino Grasshopper ile ilişkilere dayalı hesaplamalı geometri oluşturma (Yazıcı ve Tanaçan, 2010).

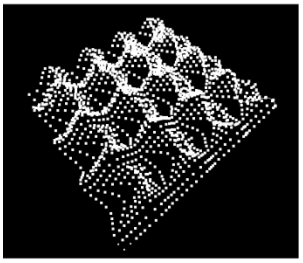


Şekil 4.2 : Yazar tarafından geliştirilen çalışmada, çift eğrilikli yüzeye kod aracılığı ile bileşen atanması (2010).



Şekil 4.3 : Yazar tarafından geliştirilen çalışmada, çift eğrilikli yüzeye kod aracılığı ile bileşen atanması (2010).





```
Option Explicit

'RhinoScript ile metin dosyasından
nokta koordinatı okuma
'20.01.2010, Sevil Yazıcı

Call NoktaOkuma()

Sub NoktaOkuma()

        ' Aktarılacak dosyanın yeri
belirtilir

        Dim strFilter, strFileName
        strFilter = "Text File
(*.txt)|*.txt|All Files (*.*)|*.*||"
        strFileName =
Rhino.OpenFileName("Noktaların
bulunduğu dosyanın yerini belir-
tiniz", strFilter)
        If IsNull(strFileName) Then
Exit Sub

        ' Dosya sistem cismi

        Dim objFSO, objFile
        Set objFSO =
CreateObject("Scripting.FileSystemObj
ect")

        ' Metin dosyasını açınız

        On Error Resume Next
        Set objFile =
objFSO.OpenTextFile(strFileName, 1)
        If Err Then
        MsgBox Err.Description
        Exit Sub
End If


Rhino.EnableRedraw False

 ' Dosyadaki tüm satırların okunması
amaçlı

        Dim strLine, arrPoint
  Do While objFile.AtEndOfStream <>
True
        strLine = objFile.ReadLine
        If Not IsNull(strLine) Then

        ' Tırnak işareti olanlari
ortadan kaldır

        strLine = Replace(strLine,
Chr(34), "", 1)

        ' Koordinatları n
tanımlanması
        arrPoint =
Rhino.Str2Pt(strLine)

        ' Rhino'ya nokta eklenmesi

        If IsArray(arrPoint) Then

        'Nokta eklenmesi komutu yeni
noktalar ekleyecektir

        Rhino.AddPoint arrPoint
End If

End If
    Loop

Rhino.EnableRedraw True
objFile.Close
Set objFile = Nothing
Set objFSO = Nothing

End Sub


Option Explicit

'RhinoScript ile noktalara
farklılaşan cisimlerle döngü
'20.01.2010, Sevil Yazıcı

Call sinusyuzeyi()
Sub sinusyuzeyi()

        Dim cisim, nokta, i, nokta-
Koordinati

        ' girdiler: noktalar + cisim

        cisim =
Rhino.GetObject("tekrarlanacak
cisimleri seçiniz")
        nokta =
Rhino.GetObjects("cisimlerin
atanacağı noktaları seçiniz")

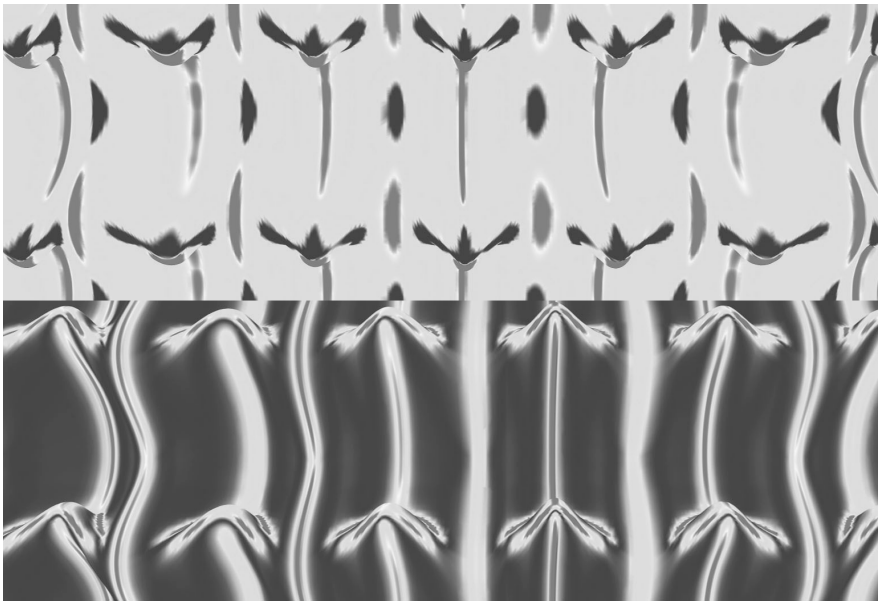
        ' tüm noktalar için döngü
oluştur

        For i = 0 To UBound(nokta)

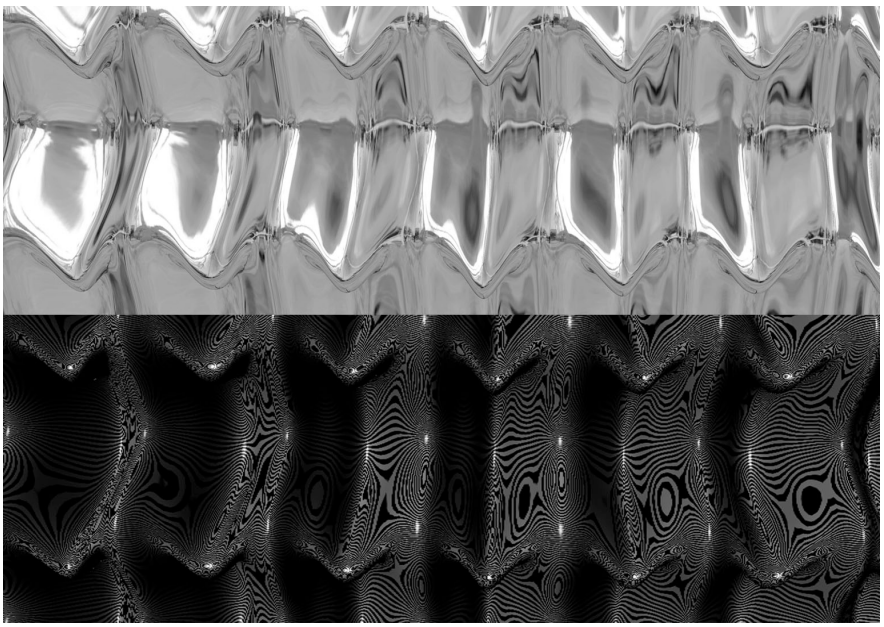
                ' noktanın pozisyonu
belirlenir

......
```

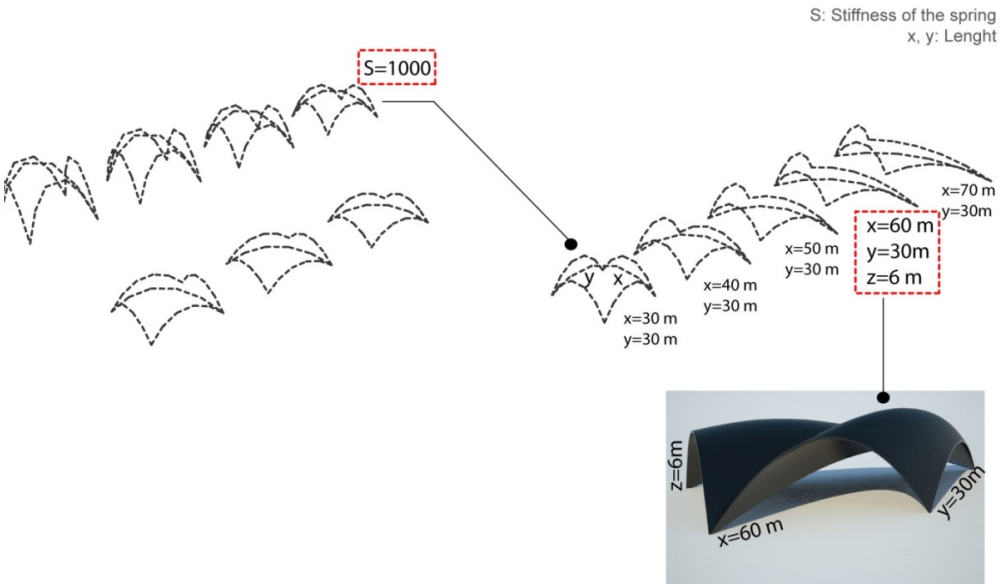
Şekil 4.4 : Yazar tarafından geliştirilen çalışmada, çift eğrilikli yüzeye bileşen atanmasını sağlayan kodun yapısı (2010).



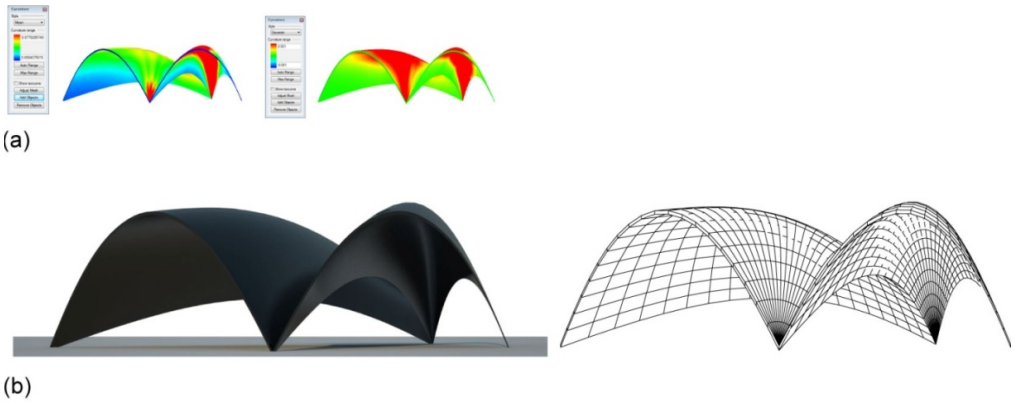
Şekil 4.5 : Yazar tarafından gerçekleştirilen çalışmada, çift eğrilikli bir yüzeyin eğrisellik analizi gerçekleştirilmiştir (2010).



Şekil 4.6 : Yazar tarafından gerçekleştirilen çalışmada, çift eğrilikli bir yüzeyin pürüzsüzlük analizi gerçekleştirilmiştir (2010).

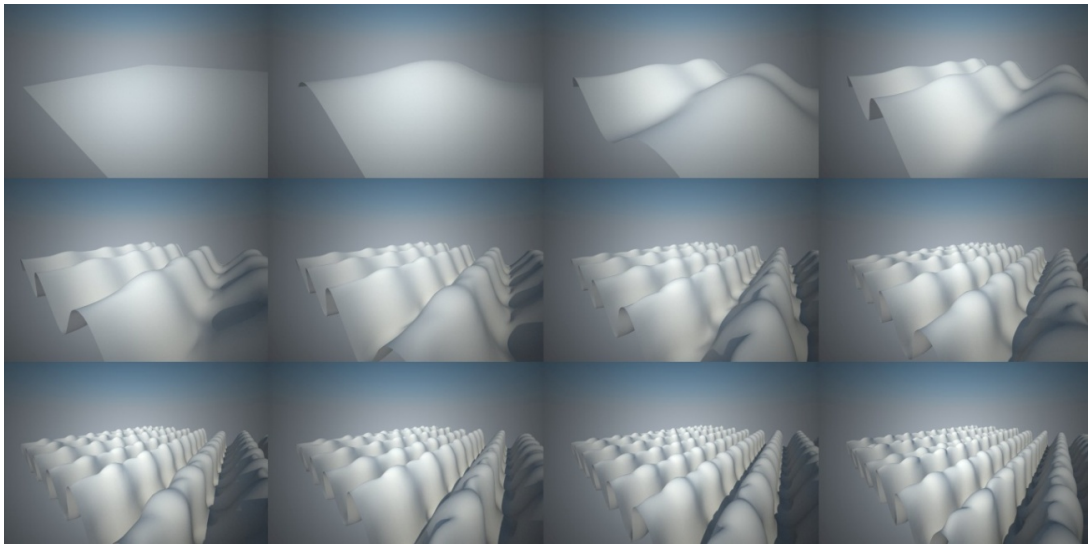


Şekil 4.7 : Yazar tarafından gerçekleştirilen malzeme ile mimari geometride verimlilik / biçim bulma konularının incelenmesi (2012).

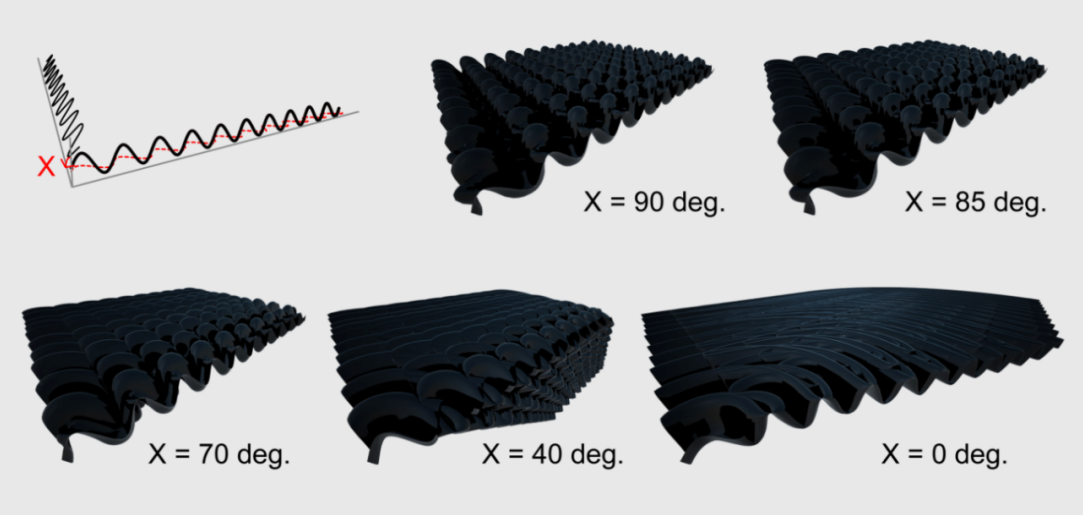


Şekil 4.8 : Yazar tarafından gerçekleştirilen malzeme ile mimari geometride verimlilik / biçim bulma konularının incelenmesi (2012) (a) Yüzeyin eğrilik analizi (b) Yüzeyin geometrik yapısı.

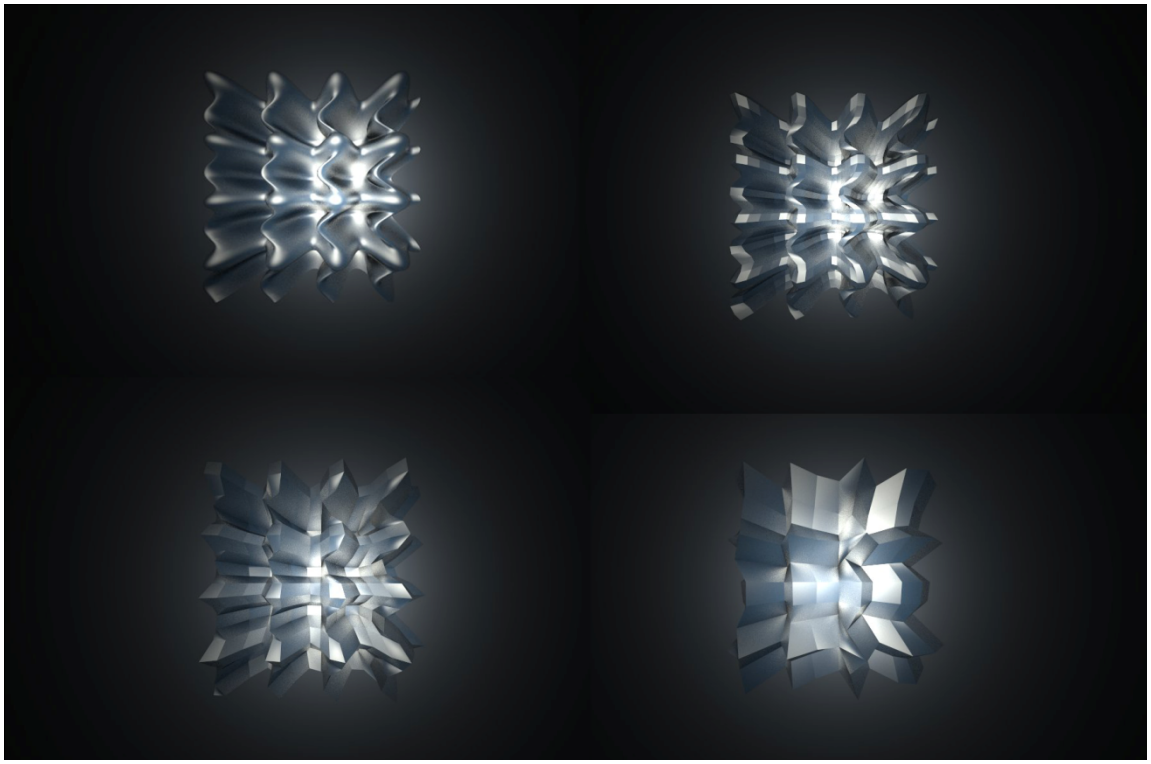
Yazıcı ve Tanaçan tarafından geliştirilen "Çift Eğrilikli Yüzeyin Optimizasyonu" projesinde, karmaşık geometriye sahip yüzey, parametrik tasarım yöntemleri kullanılarak oluşturulmuştur. Hesaplamalı yüzeyin nesneleştirilmesi ve üretim sürecinin incelenmesi amaçlanmaktadır. Çalışma, karmaşık bir mimari yüzeyin nesneleştirilmesi için, farklı malzemeler ile biçimin yeniden oluşturmasına yönelik bir yöntem sunar. Geometri optimizasyonu mimari ölçekte tasarım sürecinin bütünleşik bir parçasına dönüşür. Malzeme özellikleri ve üretim kısıtlamalarını göze alarak, çift yönlü eğrileri (antiklastik ve sinklastik), tek yönlü eğri yüzeyler ya da düz yüzeylere çevirerek elemek gerekmektedir (Yazıcı ve Tanaçan 2010) (Şekil 4.9-4.11).



Şekil 4.9 : "Çift Eğrilikli Yüzeyin Malzemeleşme Süreci ile Optimizasyonu " çalışması kapsamında hesaplamalı yüzey oluşturma (Yazıcı ve Tanaçan, 2010).



Şekil 4.10 : "Çift Eğrilikli Yüzeyin Malzemeleşme Süreci ile Optimizasyonu" çalışmasında yüzeyin elverişlilik denemesi (Yazıcı ve Tanaçan, 2010).



Şekil 4.11 : "Çift Eğrilikli Yüzeyin Malzemeleşme Süreci ile Optimizasyonu" çalışmasına malzeme ve panel boyutları arasındaki ilişkinin sorgulanması (Yazıcı ve Tanaçan, 2010).

4.2 Mimarlıkta Bilgisayar Programlama

Bilgisayar programlama, çoğunlukla yazılım mühendisliğinin araştırma alanıdır. Bilgisayar programlarının oluşturulmasını sağlayan programlama dilleri, hangi veri üzerinde işlem yapılacağı, verinin depolanma ve iletim biçimi ile işlemlerin hangi koşullarda yapılacağının bütünsel olarak anlatılmasını sağlar. Programlama dillerinin gelişimi, bilgisayarın gelişimine paralel olarak yol almıştır. 1950 sonrasında modern programlama dillerinin temeli atılmıştır.

Programlama dilleri gelişim evrelerine göre beş nesilde ele alınabilir. Bilgi teknolojilerinin ilk çağlarında makina diline (machine language) yakın olan diller, ilerleyen süreçte insan diline (human language) yakınlaşmıştır. Birinci nesil programlama dillerinden olan makina dilleri, bilgisayarların ortaya çıkış sürecinde, tamamen makina özelliklerine yönelik olarak geliştirilmiştir. Makina dillerinde komutlar herhangi bir derleyici (compiler) ya da çevirmene (assembler) ihtiyaç duyulmadan bilgisayara girilebilir. Günümüzde kullanılan modern programlama dilleri, derlendikleri durumda birinci nesil makina diline dönüştürülürler. İkinci nesil programlama dillerinde, özel kodların yerini komutlar ve kısaltmalar almıştır.

Örneğin, FAP (FORTRAN Assembly Program), BAL (Basic AssembLer), MASM (Microsoft Macro Assembler) bu diller arasındadır. Yapısal diller olarak adlandırılan üçüncü nesil programlama dilleri, İngilizce konuşan insanların kullandığı dillere yakın olan, yüksek seviyede kabul edilen dillerdir. Bu yaklaşımla, yazılan programların farklı makinalarda kullanımı olanaklı hale gelmiştir. Bu diller arasında Pascal, Fortran, Basic, C, C^{++}, Delphi ve Java yaygın olarak bilinenlerdir. Yapısal diller, mimarlık alanındaki çalışmalarda da kullanılmıştır. Dördüncü nesil programlama dilleri, özel durumlara yönelik olarak hızlı çözümler sunma ihtiyacından dolayı geliştirilmiştir. Bu dillerin kullanımı, diğer dillere göre daha kolay ve hızlıdır. SQL, Mathematica, PostScript gibi diller bu gruba girmektedir. Beşinci nesil programlama dilleri ise, programcı tarafından çözüm üretilmesinin ötesinde, bilgisayarın çözümü kendisinin bulmasına yönelik olarak geliştirilmiştir. Özellikle yapay zekâ alanındaki araştırmalarda kullanılan bu programlama dillerine örnek olarak Prolog verilebilir (Çamoğlu, 2009).

Mimari tasarım sürecinde kullanılan betikler, özel sorunların çözümüne olanak tanır. Özelleşmiş görevler üstlenen bu kodları oluşturmak tasarımcının özgürlük alanını geliştirir. Bu şekilde BDT yazılımlarına ait kısıtlamalar aşılmış olur. Ancak betiklerle kapsamlı tasarım problemlerinin ifade edilmesi bazı durumlarda güçleşebilir. Problemin çözümüne yönelik olarak, yeni bir bilgisayar programının yazılması da verimli olmayabilir. Çünkü zaten var olan yazılım işlevlerini, önerilen programda yeniden tanımlamak gerekecektir. Dolayısı ile mevcut BDT araçlarıyla uyumlu ek yazılımlar (plug-in) geliştirilebilir. Uyumlu ek yazılım, beraber kullanıldığı yazılımın arayüzünü ve işlevlerini kullanarak, onun üzerine yeni işlevler eklenmesine olanak tanır.

Mevcut BDT yazılımlarının içeriğinde, biçim türetmeye yönelik olarak 2D çizim ve 3D modellemeye ilişkin işlemler bulunmaktadır. Tez kapsamında önerilen MBHT-m ise biçim türetmenin yanında, benzetim ve optimizasyon işlemlerini de yürütmek üzere oluşturulmuştur. Model, BDT yazılımlarının biçim türetme işlemlerini kullanacak şekilde uyumlu ek yazılım olarak tasarlanmıştır. Bu şekilde modelin kapsamı daraltılarak, mevcut BDT yazılımlarında var olan işlevlerin yeniden tanımlanmasını engellenmiştir. MBHT-m'nin Rhino yazılımı üzerinden yürütülmesi öngörülmektedir. Rhino' nun seçilme sebebi, günümüzde oldukça kabul görmüş bir 3D modelleme yazılımı olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca Rhino' nun NURBS

tabanlı yüzeylere bağlı olarak çalışması MBHT-m için elverişlidir. NURBS yüzeyler parametrik olarak tanımlanabildikleri için modelde mimari geometrinin sayısal olarak ifade edilmesini sağlamaktadır (2. Bölüm, 2.6.2) . Bu sebeplerden dolayı, Rhino' nun MBHT-m' ye katkı sağlayacağı düşünülmüştür. Model kapsamında tüm mantıksal ilişkiler belirlenmiş, parametre, kural ve ilişkiler ortaya konmuştur. Bu doğrultuda, MBHT-m'nin oluşturulmasıyla yalnızca Rhino' ya yönelik olarak değil, başka yazılımlarla da uyumlu hale getirilebilecek bir altyapının oluşturulduğunu söylemek doğru olacaktır.

Yazılım geliştirmek için sürecin en başında algoritmanın doğru kurulması gerekmektedir. Bu sebeple yazılım ve sistem mühendisleri tarafından, yazılım modelinin oluşturulması için Bütünleştirilmiş Modelleme Dili (Unified Modeling Language : UML) ya da IDEF0 gibi modelleme araçları kullanılır. Tez kapsamındaki MBHT-m'yi oluşturmada, yazılım geliştirme alanında kabul görmüş, çok işlevli ve yaygın kullanımı olan UML kullanılmıştır. MBHT-m' nin oluşturulmasında UML'nin seçilme sebebi, oldukça kapsamlı olan modelin farklı türdeki UML diyagramlarıyla ayrıntılı olarak tanımlanmasının mümkün olmasındandır. Ayrıca UML sınıf diyagramlarından iskelet kodlar üretilebilmesi, yazılım geliştirme için oldukça elverişli bir durumdur.

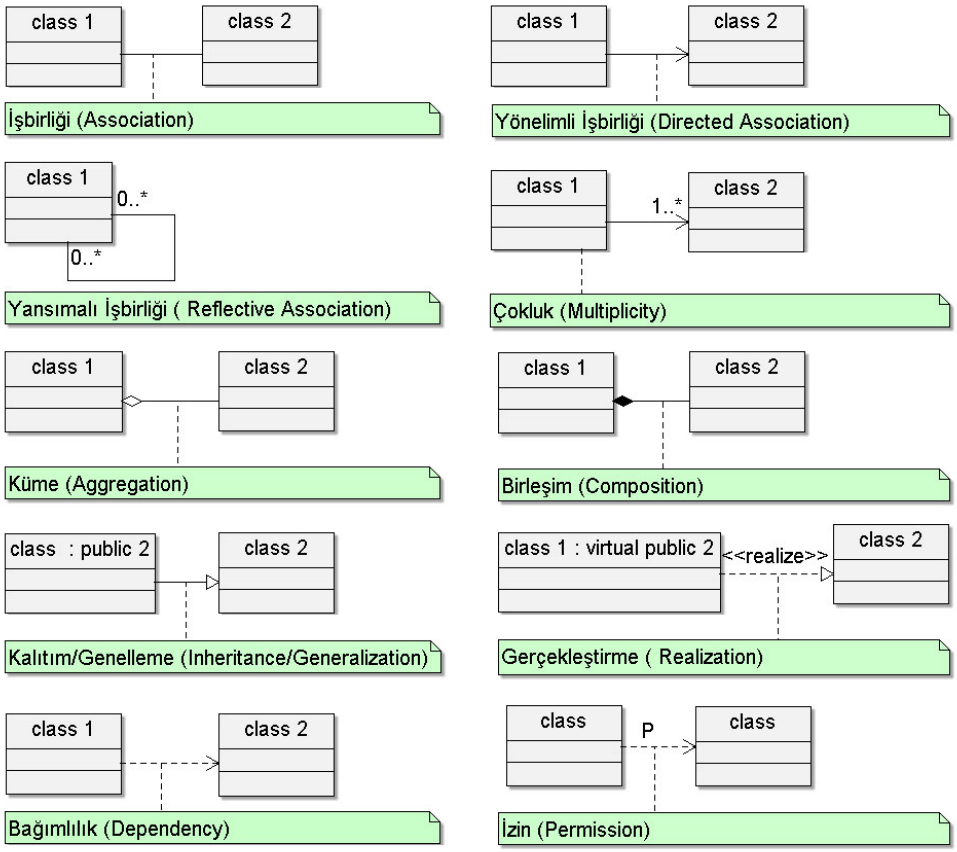
UML, çeşitli grafik işaret teknikleri ve görsel ifadelerle uygulanır. Farklı türdeki diyagramlar karmaşık yazılım sistemlerinin belirli kısımlarını açıklamada fayda sağlar (McLaughlin, 2007). Bu sebeple, istenilen modelin oluşturulması sürecinde ihtiyaca göre farklı türde diyagramlar kullanılmalıdır. *Paket* (package), *sıralama* (sequence), *etkinlik* (activity) ve *sınıf* (class) diyagramları bu görüş kapsamında farklı amaçlarla kullanılır. UML diyagramları temelde iki farklı görüşü temsil eder:

Statik görüş: Sistemin statik (durağan) yapısını ifade etmekte kullanılır. Nesneler, özellikler ve işlemlerin tanımlanması ile ilişkilerin kurulmasını kapsar. Paket ve sınıf diyagramları, işleme konacak her türlü verinin, analitik olarak tanımlanmasını sağladığı için önemlidir. Detaylı olarak oluşturulabilen sınıf diyagramları aracılığı ile tüm özellik ve ilişkilerin net olarak ortaya konduğu iskelet bir kod oluşturmak mümkündür.

Dinamik görüş: Sistemin dinamik (devingen) yapısını ifade etmekte kullanılır. Nesneler arasındaki işbirliği ve nesnelerin durumlarındaki değişiklikleri gösterir. Sıralama ve etkinlik diyagramları bu kapsamda değerlendirilir.

UML, nesne yönelimli (object oriented) yazılım geliştirmede kullanılan genel amaçlı bir modelleme dilidir. Nesne yönelimli programlama, günümüzde pek çok çağdaş programlama dili tarafından desteklenmektedir. Bu programlama dili, nesne kullanımını destekleyen nitelik taşır. UML' de, yazılımın içeriğindeki kavramlar nesnelerle tanımlanır. Nesneler kendi içlerinde veri işleyebilirken, diğer nesnelerle veri alışverişinde bulunabilir. Örneğin, MBHT-m kapsamında tanıtılmış sınıflar birer nesnedir. Sınıflar arasındaki ilişkinin olabildiğince basit tutulması farklı kişilerce kolayca anlaşılmasına olanak tanır. Bu sebeple, sınıflar ve aralarındaki ilişkiler tanımlayıcı olmalıdır. Sınıf diyagramları, yazılımın geliştirilmesiyle beraber olgunlaşarak değişimi temsil eder. Gerçekleştirilecek sistemin bütünleşik bir parçası olan sınıf diyagramları, geliştirme sürecinde ilerledikçe açıklığa kavuşur (Bell, D.2004). Sınıflar arasındaki ilişkiler ilk aşamada belirgin olmayabilir. Her yenilemede, ilişkiler yeniden gözden geçirilerek sınıf diyagramları belirginleştirilir. Tasarım değişken bir süreçtir. Bu sebeple, bir sistemi anlatan sınıf diyagramları ilk aşamadan dondurulmamalıdır (Chitnis ve diğ, 2003).

Sınıf diyagramlarındaki ilişkileri tanımlamakta kullanılan gösterimler temelde; işbirliği (association), yönelimli işbirliği (directed/uni-association), yansımalı işbirliği (reflexive association), çokluk (multiplicity), küme (aggregation), birleşim (composition), kalıtım/genelleme (inheritance/generalization), gerçekleştirme (realization), bağımlılık (dependency) ve izin (permission) olarak ifade edilir (Şekil 4.12). Bu gösterimlerin bazıları kendi içlerinde de özelleşebilir. Örneğin, küme ya da birleşim gösterimleri, tanımladıkları ilişki durumuna göre yönelimli küme ya da yönelimli birleşim olarak karşımıza çıkabilir.



Şekil 4.12 : UML sınıf diyagramlarındaki gösterimlerin anlamları.

Bu gösterimleri şöyle tanımlamak mümkündür:

İşbirliği: Eğer iki sınıf birbirine herhangi bir şekilde bağlıysa ‘işbirliği’ kurulur. Örneğin, ‘uçak’ ve ‘yolcular’ birer sınıf olarak gösterilecek olursa, aralarında işbirliği bulunmaktadır.

Yönelimli işbirliği: Sınıflar arasında kurulan işbirliği kendiliğinden iki yönlüdür. Ancak, kurulan işbirliği yönelimli işbirliğiyle de ifade edilebilir. Örneğin, ‘uçak’ ve ‘yolcular’ birer sınıfla gösterilecek olursa, uçaktan yolculara yönelimli işbirliği mevcuttur.

Yansımalı işbirliği: Yansımalı işbirliğinde, bir sınıfın birden çok sorumluluğu bulunmaktadır. Örneğin, ‘üniversite çalışanları’ bir sınıf olarak düşülürse; çalışanlar, ‘üniversitedeki akademisyenler’, ‘idari memurlar’ ve ‘işçiler’ olmak üzere birçok türde olabilmektedir.

Çokluk: Çokluk ilişkisi kurulduğu zaman, sınıflar arasında niceliğe bağlı bir ilişki kurulur. Örneğin bir ‘üniversitede’ çok sayıda ‘öğrencinin’ eğitim alması bu ilişki türüyle gösterilebilir. Bu durumda öğrenci sınıfının hemen yanındaki ‘1…*’ tanımı,

öğrenci sayısının bir ya da daha fazla olduğunu belirtir. Niceliğe bağlı ilişkilerden bazıları şöyle gösterilebilir:

0...1: Sıfır ya da Bir

1 : Yalnızca Bir

0...*: Sıfır ya da daha fazla

1...*: Bir ya da daha fazla

3 : Sadece Üç

0...5: Sıfırdan Beşe

Küme: Eğer bir sınıf, diğer sınıfları kapsıyorsa ve sınıfların toplamından oluşuyorsa, bu sınıflar arasında 'küme' ilişkisi bulunmaktadır. Örneğin, 'kütüphane' ve 'kitap' ilişkisinde, kütüphane küme olup, kitapları kapsar.

Birleşim: Birleşim küme ilişkisinin bir çeşididir. Ancak kümeye göre daha kuvvetli bir anlamı vardır. Örneğin, birleşim ilişkisi söz konusu olduğunda kütüphane kitaba sahip olmaktadır.

Kalıtım/Genelleme: Kalıtım / genelleme türünde, çocuk-ebevyn ilişkisinde olduğu gibi çocuk sınıfları ebevyn sınıflarının işlevlerini taşır. Örneğin, 'C^{++}' ve 'Java' çocuk sınıflar olarak, 'yazılım dili' olarak adlandırılabilecek ebevyn sınıfın altındadır.

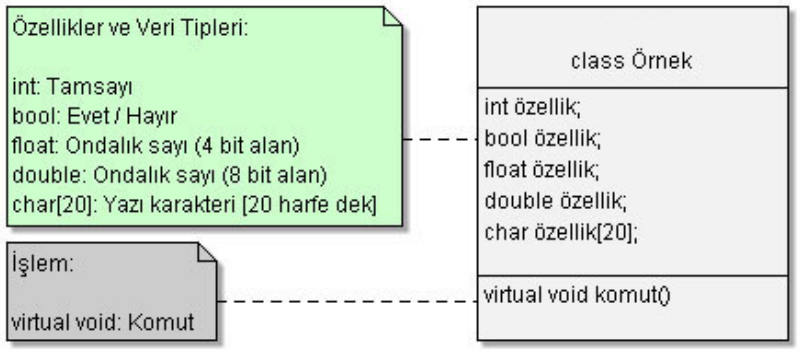
Gerçekleştirme: Gerçekleşme ilişkisinde, işlevlerin tanımlı olduğu sınıf ve işlevlerin uygulanması ile oluşan bir sınıf bulunmaktadır. Örneğin, bir 'yazıcı (printer) kurulumu' ve 'yazıcı' birer sınıf olarak düşünülürse, aralarında bu tür bir ilişki bulunmaktadır.

Bağımlılık: Bağımlılık ilişkisinde sınıflardan biri diğerini kullanır. Örneğin, 'yazıcı' ve 'kağıt' birer sınıf olarak düşünülürse, aralarında bu tür bir ilişki bulunmaktadır.

İzin: Bu ilişki türünde, sınıf işlevi gerçekleştirirken diğer sınıfın iznine ihtiyaç duyar. Örneğin, 'kullanıcı' ve 'yazıcı' birer sınıf olarak düşünülürse, aralarında bu tür bir ilişki bulunmaktadır.

İskelet kodlar oluşturabilen sınıf diyagramları, MBHT-m'de C^{++} gösterim diliyle oluşturulmuştur. Genel kullanımlı bir programlama dili olan C^{++} , standart Rhino uyumlu ek yazılımlarını oluşturmada kullanıldığı için tercih edilmiştir. C^{++} gösterim diliyle oluşturulmuş olan sınıf diyagramlarının özellikleri, veri tipleri ve işlemler tanıtılmıştır (Şekil 4.13). *Int* tamsayı; *bool* evet ya da hayır; *float* 4 bit alana dek yer

kaplayan ondalık sayı; *double* 8 bit alana dek yer kaplayan ondalık sayı ve *char[20]* 20 harfe dek yazı karakteri ifadelerini temsil eden veri tipleridir. İşlem ise, C^{++} gösterim diline özgü bir kalıp olan *virtual void* ifadesinden sonra tanıtılır.



Şekil 4.13 : MBHT-m için geliştirilmiş, UML sınıf diyagramlarında kullanılan, C^{++} gösterim dilindeki veri tiplerinin anlamları.

4.3 Mimarlıkta Enformasyon Sistemleri

Enformasyon, kaydedilmiş olay ve rakamlardan elde edilmiş olan verilerden üretilen bilgidir. Veri ise, fiziksel oluşumlar veya üzerinde çalışılmakta olan işlemlerle ilgili ham olaylar ve gözlemlerdir. Enformasyon Sistemi, veri kaynaklarını işleyen ve enformasyon ürünlerine dönüştüren bir sistem olarak görülebilir. Girdi, süreç ve çıktı, enformasyon sisteminin temel bileşenleridir. Çıktı, üretilen raporlar, dosyalar, bilgisayar çıktıları, enformasyonun depolandığı her türlü ortamdır. Girdi ise, çıktı vermek üzere enformasyon sistemini besleyen verilerdir. Süreçler, verilerin, girdilerden çıktılara dönüştürüldüğü, yöntem ve eylemlerdir. 1970' lerden itibaren, önceden tanımlanmış raporlar yardımıyla karar verme konusundaki sorunlar üzerine, Karar Destek Sistemleri kavramı ortaya atılmıştır. Buna ek olarak, Yapay Zekâ konusundaki hamleler, Uzman Sistemler ve Bilgi Tabanlı Sistemler, enformasyon sistemlerine yeni yollar açmaktadır (Yaman, 1996). Örneğin, mimarlıkta kullanım alanı bulan yapay zekâ uygulamalarında; işitme, konuşma, görme gibi insan algılama yeteneklerine sahip bilgisayarlar, insanlar gibi çevre ile iletişim kurma becerisine sahip olabilmektedir. Akıllı binalarda kullanılan, ses ve görüntü tanıma üniteleri bu gruba girmektedir. Farklı kapsamda bir örnek olarak, mimarlık alanında bir uygulama olan IZODER TS 825 Hesap Programı verilebilir. Bu program, binaların ısı yönetmeliğine uygunluğunu uzman sistem aracılığıyla değerlendirmek amacıyla kullanılmaktadır.

Mimarlıkta enformasyon sistemlerinin incelenmesi, MBHT-m'nin işleyişinin anlaşılmasında büyük önem taşımaktadır. Tez kapsamında önerilen model, enformasyon sistemlerinin temel bileşenleri olan, girdi, süreç ve çıktı kavramları ışığında oluşturulmuştur.

4.4 Yapı Enformasyonu Modellemesi (YEM)

Yapı sadece geometriye ilişkin bilgileri değil; kullanıcı ihtiyaçları, çevresel koşullar, maliyet hesapları gibi geniş bir bilgiler bütününü içerir. Tasarım sürecine dâhil olan mimar, mühendis ve ilgili uzmanlar arasındaki ilişkinin ve bilgi akışının sağlanması önemlidir. 1990'lı yılların başında, nesne yönelimli sistemlerin geliştirilmesiyle, geometrik olmayan bilgilerin de mimari modele eklenmesi mümkün kılınmıştır. Buna göre, nesneler hiyerarşik olarak tanımlanıp, ilişkilendirilebilir. Nesne yönelimli sistemlerin diğer önemi ise, tasarımın, birbirinden bağımsız olarak üretilen, 2D ve perspektif çizimlerle değil; doğrudan tüm bilgileri içeren 3D model ile ifade edilebilmesidir.

Yenileşimci BDT araçları olarak karşımıza çıkan YEM, günümüzde bu alanda gelinen son noktayı oluşturmaktadır. YEM geometrik ve geometrik olmayan verilerin sayısal temsilini sağlar. Geleneksel tasarım ve yapım yöntemlerinin tersine, YEM tasarım sürecinde oluşturulan tek bir veri tabanı aracılığı ile farklı disiplinlerden projeye dâhil olan ve özelleşmiş konularda çalışan uzman kişiler arasında bilgi akışı sağlar (Cheung, 2012). Paylaşılan bilgi ve projeye dâhil olan kişiler arasındaki işbirliği; tasarımın gelişmesi sürecinde, farklı özelliklerin dikkate alınmasıyla, Mimarlık, Mühendislik ve Konstrüksiyon (Architecture, Engineering and Construction: AEC) endüstrilerinde verimlilik sağlar (Eastman ve diğ, 2008). YEM sayesinde projeyi geliştiren tüm katılımcılar tasarım sürecine dâhil olarak çözüm üretip, değerlendirme yapabilirler. YEM araçlarına örnek olarak Autodesk Revit, Digital Project, ArchiCAD, VectorWorks Architect, Bentley Architecture verilebilir (Pektaş, 2009).

YEM sistemlerinin, sektörde yaygınlaşması beklendiğinden yavaş gerçekleşmektedir. Bu durumun çeşitli sebepleri bulunmaktadır. Öncelikli olarak, yapı sektörünün dağınık örgütlenme biçimi, yeni bilgi teknolojilerinin uygulanmasında bir engel oluşturmaktadır. Küçük organizasyonlar teknoloji değişikliklerinin maliyetlerini çoğunlukla karşılayamazken, kendileri dışında

çalıştıkları gruplarla işlerlik açısından problemler yaşayabilmektedirler. Buna ek olarak, yapı sektöründe yeni tasarım yöntemleri geliştirmek başlı başına bir sorun olabilir. Bu konudaki direnci kırmak için, yapı profesyonellerinin geleneksel tasarım yöntemlerinin sınırlamalarının net olarak belirlenmesi ve aktarılması gerekir (Pektaş, 2009).

YEM, geleneksel araçların aksine iki ve üç boyutlu çizim ve modellerle değil, model verileriyle ilgilidir. YEM' in içeriğinde bulunan bilgi; geometrik, semantik ve topolojik olmak üzere üç başlıkta incelenir. Geometrik bilgi, üç boyutlu bina biçimiyle ilişkilidir. Semantik bilgi ise sisteme dâhil olan bileşenlerin özelliklerini verir. Örneğin, duvarın ısı tutuculuk katsayısı bunlardan biridir. Topolojik bilgi ise sistemdeki bileşenlerin bağımlılıklarını gösterir. YEM; biçim, başarım ve bileşen ile takımlar arasındaki ilişkilerden oluşur (Eastman, 1999).

YEM, bina sistemlerinin tasarım ve analiz süreçlerini destekler. Deneysel strüktürel analizler ve strüktürel bütünlük; çevresel kontroller; yapım yönetimi; yeni malzemelerin kullanımı; kullanıcıya ait kısıtlamalar; ısı kontrolü; havalandırma; aydınlatma; dolaşım; akustik; enerji dağıtımı ve tüketimi gibi konular YEM ile tasarımın erken aşamasında ele alınabilir (Eastman ve diğ, 2008; Mallory-Hill ve diğ, 2012).

Mimarlıktaki bilgisayar uygulamaları ileri geometri ve üretim teknolojileri alanında gelişirken, başarım benzetimlerinin tasarımın ilerleyen aşamalarında uygulandığını ve tasarım karar verme sürecine dâhil olmadığı gözlemlenmektedir. Başarım parametrelerinin, malzeme, biçim ve teknik sistemlerle bütünleşmesi gereklidir. Ancak mimarların kullandığı BDT programlarında, bütünsel başarım değerlendirmesi bulunmamaktadır. Bunun çeşitli sebepleri bulunur. Çeşitli yazılımlar her türde benzetimi gerçekleştirebilmektedir. Verilerin girilmesi, benzetimin işleme konması ve sonuçların değerlendirilmesi için ise, mühendis gibi uzman bir kişinin bilgisine ihtiyaç duyulabilir. Ancak çoğunlukla, tasarımın erken aşamasında bu detayda veriye ulaşmak mümkün olmaz (Schlueter ve Thesseling, 2009). Gehry Teknolojileri tarafından geliştirilen Sayısal Proje (Digital Project) örneğinde olduğu gibi, YEM araçları SEY aracılığıyla, mevcut tasarımın belirlenen malzeme, sınır koşulları ve yüklemeler altındaki gerilme durumuna ilişkin, tasarımcıya görsel bir geri-bildirim yapabilir. Ancak tasarımın iyileştirilmesi içim nasıl değiştirileceğine ilişkin kullanıcıya rehberlik yapmaz (Whiting ve diğ, 2009). Mimarlar, başarıma

ilişkin verilerin yorumlaması konusunda yeterli bilgiye sahip olmadıkları için, bu görev çoğunlukla konuda uzman mühendisler ve danışmanlar tarafından ele alınır. YEM araçları tüm verilerin bütünleşmesini sağlamalarına karşın, tasarım erken aşaması için çözüm üretmekte yetersiz kalır (Cavieres ve diğ, 2011). Mimar ve tasarımcılar, mühendis ve danışmanların işlev ve başarıma ilişkin uzman görüşünü almadan önce, tasarımın erken evresinde, bazı kararların alınması için desteğe ihtiyaç duyar. Ancak başarım geri bildirimlerinin alımı sırasında gecikmeler olabilir. Bu zaman alan ve verimliliği düşüren bir durumdur. Dolayısı ile tasarımın birçok parametre ile değerlendirildiği, en uygun tasarım çözümüne ulaşmayı hedefleyen bütünsel yaklaşım sağlanmalıdır (Cheung ve diğ, 2012).

Tez kapsamında önerilen MBHT-m, tasarımın erken aşamasında bütünleşme sağlayacak ve dolayısıyla başarım geri bildirimlerinden doğan gecikmelerin yarattığı sorunları ortadan kaldıracaktır. MBHT-m ile uzmanlık bilgisi gerekmeden, tasarımın erken aşamasında başarım değerlendirmesi ve optimizasyon gerçekleştirmek mümkün olacaktır. MBHT-m kapsamındaki benzetim ve optimizasyon modülleri, kullanıcının kolaylığı düşünülerek sadeleştirilmiştir. Dolayısıyla MBHT-m, mevcut YEM araçları incelendiğinde önemli faydalar sağlayacaktır.

4.5 Bilgisayar Destekli Üretim (BDÜ)

Uzunca bir süre, mimarlık çevrelerince tartışılan, serbest biçimlerin, mimari proje ölçeğine aktarılması ve nesnelleştirilmesine ilişkin kısıtlamalar, özellikle son yıllardaki BDÜ alanındaki atılımlarla ve kullanımının yaygınlaşmasıyla olumlu yönde gelişerek azalmaktadır. BDT tekniklerindeki ilerlemelerle, her türlü karmaşıklıkta biçimi oluşturmak mümkün hale gelmiştir. BDÜ' de model verileri bina ya da bina bileşenine hassas olarak aktarılmaktadır. Örneğin, RP'de 3D modelden gelen veriyi kullanarak, ürün oluşturulur.

BDÜ araçları çoğunlukla, havacılık, gemi ve araba endüstrisi gibi farklı alanlar için geliştirilmiş, sonradan mimari tasarım sürecine tasarım sürecine girişiyle dâhil edilmiştir.

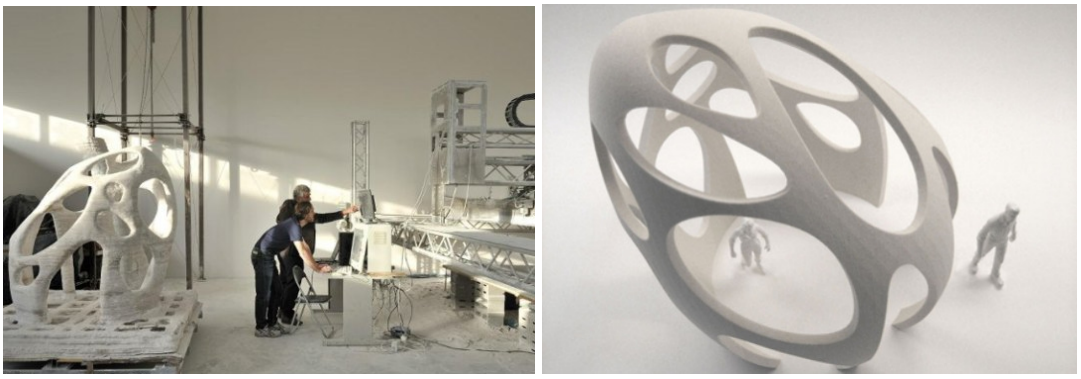
Günümüzde sıkça kullanılan bir terim olan sayısal imalat (digital fabrication), eksiltmeli (subtractive) ya da eklemeli (additive) yöntemler kullanarak, malzemenin işlenmesini sağlayan bilgisayar destekli işlemler olarak tanımlanır. Bu süreçler iki

temel gruba ayrılır. Bunlardan ilki, Bilgisayar Sayım Kontrolü (Computer Numerical Control : CNC) işlemleri iken, diğeri Hızlı Prototipleme (Rapid Prototyping : RP) işlemleridir. Bu iki yöntem arasındaki en önemli fark, CNC işlemlerinde ürün malzemenin bütünden çıkarılmasıyla oluşturulurken; RP işlemlerinde ürün malzemenin katmanlı olarak eklenmesi ile elde edilir. CNC işlemlerine örnek olarak freze, su jeti kesimi ve lazer kesimi verilebilir. RP işlemleri için ise üç boyutlu yazıcılar (3D printer) farklı malzemeler kullanılarak üretim yapılabilir (Seely, 2004).

Freze, kesme ve yerleştirme işlemlerinde kullanılan CNC ve RP makinaları yenileşimci uygulamalarla karşımıza çıkar (Lynn, 2009, D-Shape, 2010, Lim ve diğ, 2012; Khoshnevis ve diğ, 2006; Lim ve diğ, 2009) (Şekil 4.14-4.16). Bunun yanında otomatik tuğla dizilimi ve püskürtme beton, bu kapsamdaki diğer öncü yöntemlerdendir (Bonwetsch ve diğ, 2007; Shotcrete, 2012).



Şekil 4.14 : Blob Duvarı duvar bileşenlerinin oluşturulması (Lynn, 2009).



Şekil 4.15 : Eklemeli üretim yöntemiyle oluşturulan Radiolaria Pavyonu (D-Shape, 2010).



Şekil 4.16 : Betonun RP uygulamalarında kullanımı (Lim ve diğ, 2012).

BDÜ teknikleri ile her türlü karmaşıklıkta biçim oluşturabilmesine karşın; BDÜ malzeme, üretim türü ve işlemi gerçekleştiren makinaya ilişkin kısıtlamalar içerir. Örneğin RP işlemlerini gerçekleştiren farklı makinalar için, değişik türde malzemeler kullanılmakta ve malzemenin türü dolayısıyla dayanımı, katman kalınlıkları ve geometrik toleranslar değişmektedir. Dolayısıyla, BDÜ tekniklerine ilişkin kısıtlamaların tasarım sürecine katılması gerekmektedir.

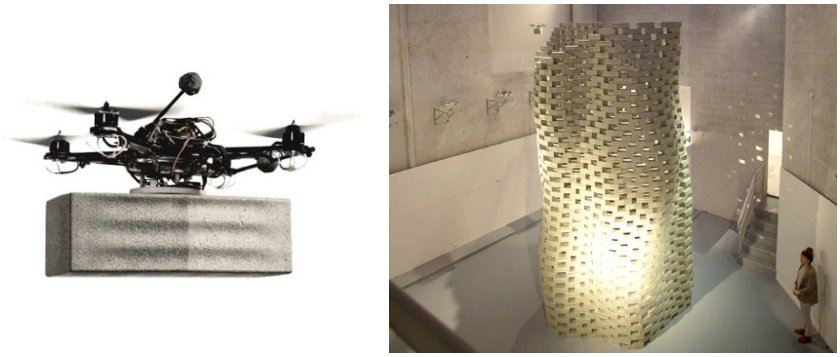
Stuttgart Üniversitesi tarafından geliştirilen ICD/ITKE araştırma pavyonu tasarımında, öncelikli olarak malzeme başarımı test edilmiştir. Tasarım ve analiz modelinden gelen verilerle, çok eksenli CNC robot tasarım süreci yönetilir (Şekil 4.17) (ICD/ITKE, 2010).



Şekil 4.17 : Stuttgart Üniversitesi 2010 Araştırma Pavyonu (ICD/ITKE, 2010).

Her geçen gün BDÜ alanında, yeni teknolojilerin geliştirildiği gözlemlenmektedir. Örneğin, İsviçre Federal Teknoloji Enstitüsü (Eidgenössische Technische Hochschule : ETH) kapsamındaki bir araştırmada kullanılan uçan makinalar bunlardan biridir. İlk deneysel yapı üretimi 2011 yılında gerçekleştirmiştir. Bu teknoloji, yapı bloklarının, sayısal olarak tanımlı mekân koordinatlarına yerleştirilmesini sağlar. Bu şekilde, eğrisel yüzeylerin üretilebilir. Bu teknoloji,

geleneksel yığma yapıların biçimsel olanaklarının yeniden sorgulanmasına olanak tanır (Şekil 4.18).

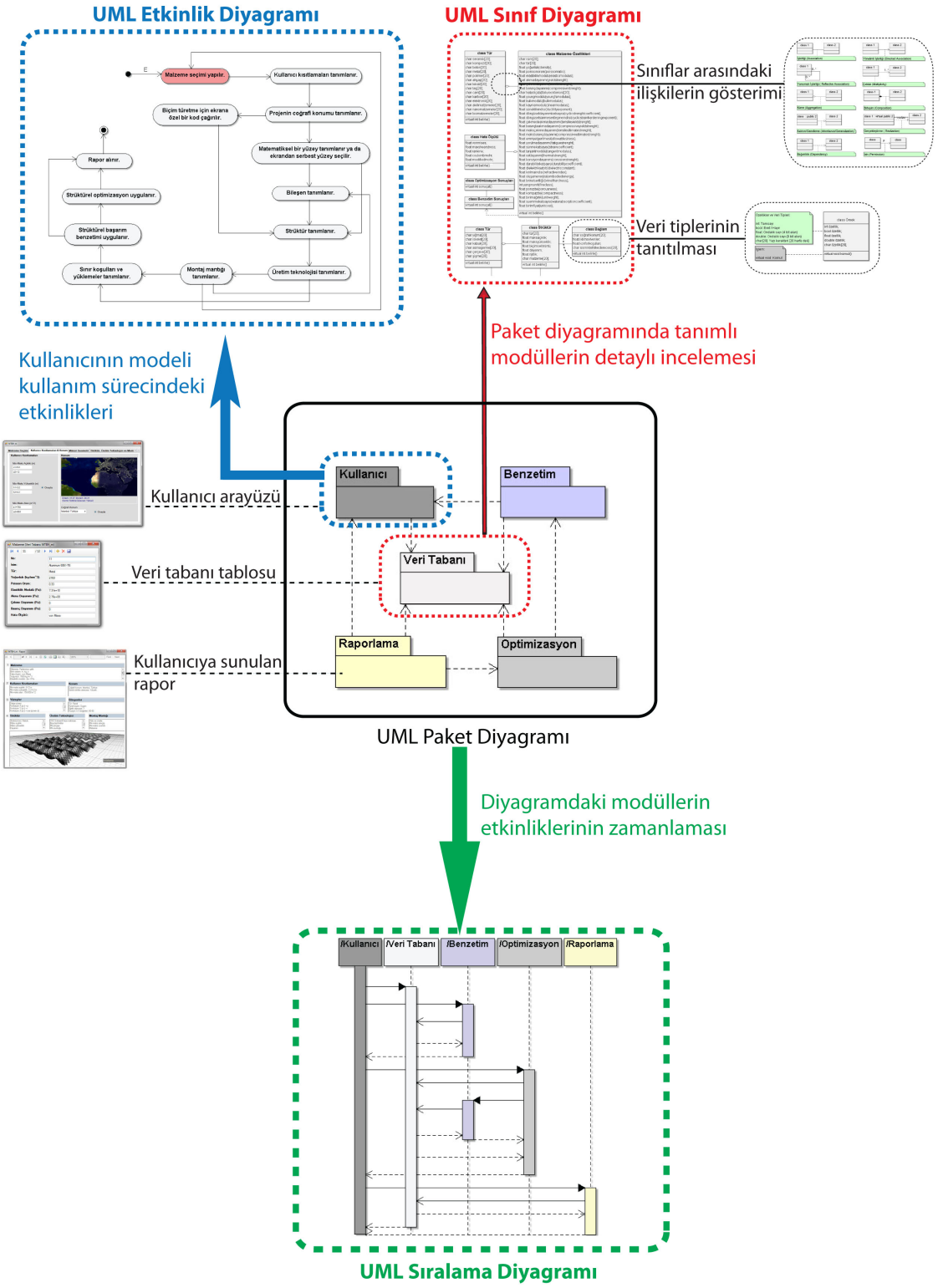


Şekil 4.18 : Uçuş montajlı mimarlık (Gramazio & Kohler, 2011).

5. MALZEME TABANLI BÜTÜNLEŞİK HESAPLAMALI TASARIM MODELİ (MBHT-m)

Bütünleşik hesaplamalı tasarım modeli, *malzeme, biçim ve başarımın* ayrı elemanlar olarak değil, karşılıklı karmaşık olabilecek ilişkilerle tanımlanmasını sağlar. Bu yaklaşım mimari tasarımın üretim sürecinde karşılaşılan kısıtlamaların üstesinden gelir (Hensel ve Menges, 2008; Menges, 2009). MBHT-m öncelikli olarak malzeme ve bunu takiben kullanıcı kısıtlamaları, coğrafi konum yani bağlam, mimari geometri, strüktür, üretim teknolojisi ve montaj mantığını bütünleşik olarak inceler. Strüktürel başarım benzetimi ve strüktürel optimizasyon süreçlerini gerçekleştirerek, kritik olan parametrelerin seçilmesiyle, tasarımın erken aşamasında en uygun çözümü sunar. Amaç, mimari tasarım sürecinde verimliliği arttırmak ve tasarımda esnekliği sağlayarak, kullanıcıyı malzeme, biçim ve başarım arasındaki ilişki hakkında bilgilendirmektir.

Bu bölümde MBHT-m'nin yapısını oluşturan yöntem ve ilgili unsurlar açıklanmıştır. UML aracılığı ile oluşturulan modelde 2., 3. ve 4. Bölüm kapsamlarında ayrıntılı olarak incelenmiş olan tüm *parametre, kural ve ilişkiler*; malzeme, biçim ve başarım kavramları doğrultusunda ele alınmıştır. Buna ek olarak, uyumlu ek yazılım için kullanıcı arayüzü, veri tabanı tabloları ve raporlar tasarlanarak tanıtılmıştır (Şekil 5.1). Model, ayrıca faydaları ve kısıtlamaları ile süreçte karşılaşılan zorluklar kapsamında değerlendirilmiştir.

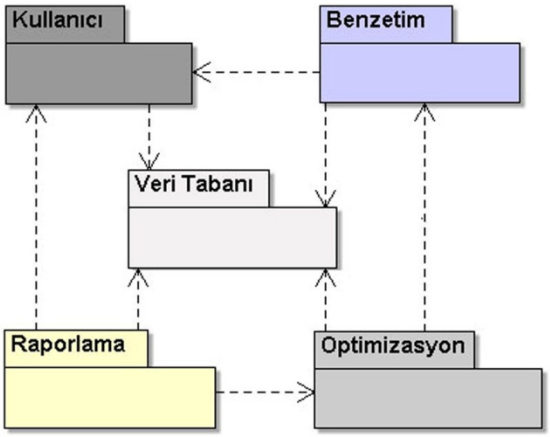


Şekil 5.1 : MBHT-m için geliştirilmiş UML diyagramlarının, kendileri arasında ve kullanıcı arayüzü, veri tabanı tablosu ve kullanıcıya sunulan raporla ilişkilendirilmesi.

5.1 Yöntem

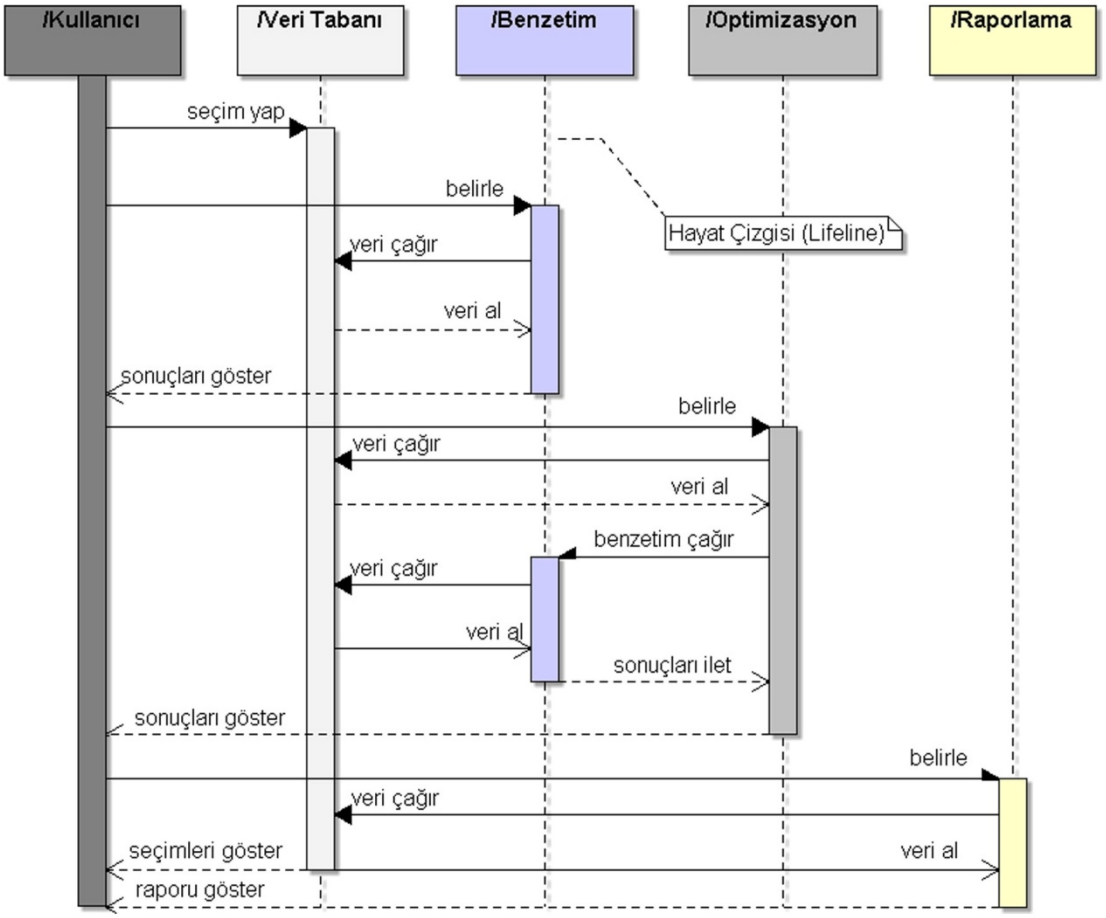
MBHT-m, yaygın kullanımı olan üç boyutlu BDT aracı Rhino için uyumlu ek yazılım olarak geliştirilmiştir. Model, YEM ve diğer BDT yazılımlarına da uygulanabilir. MBHT-m' nin içeriğini tanımlamak için UML kullanılmıştır. UML diyagramları Visual Paradigm, Poseidon ve ArgoUML gibi birçok araç yardımıyla oluşturulabilir. MBHT-m kapsamında ArgoUML kullanılmıştır. Paket, sıralama, etkinlik ve sınıf diyagramları MBHT-m'yi farklı açılardan tanımlar.

Paket diyagramı, sistemin statik durumunu aktarmakta kullanılır. Bu kapsamda gösterilen kullanıcı, veri tabanı, benzetim, optimizasyon ve raporlama olmak üzere beş modül modelin temel yapısını ifade eder (Şekil 5.2).



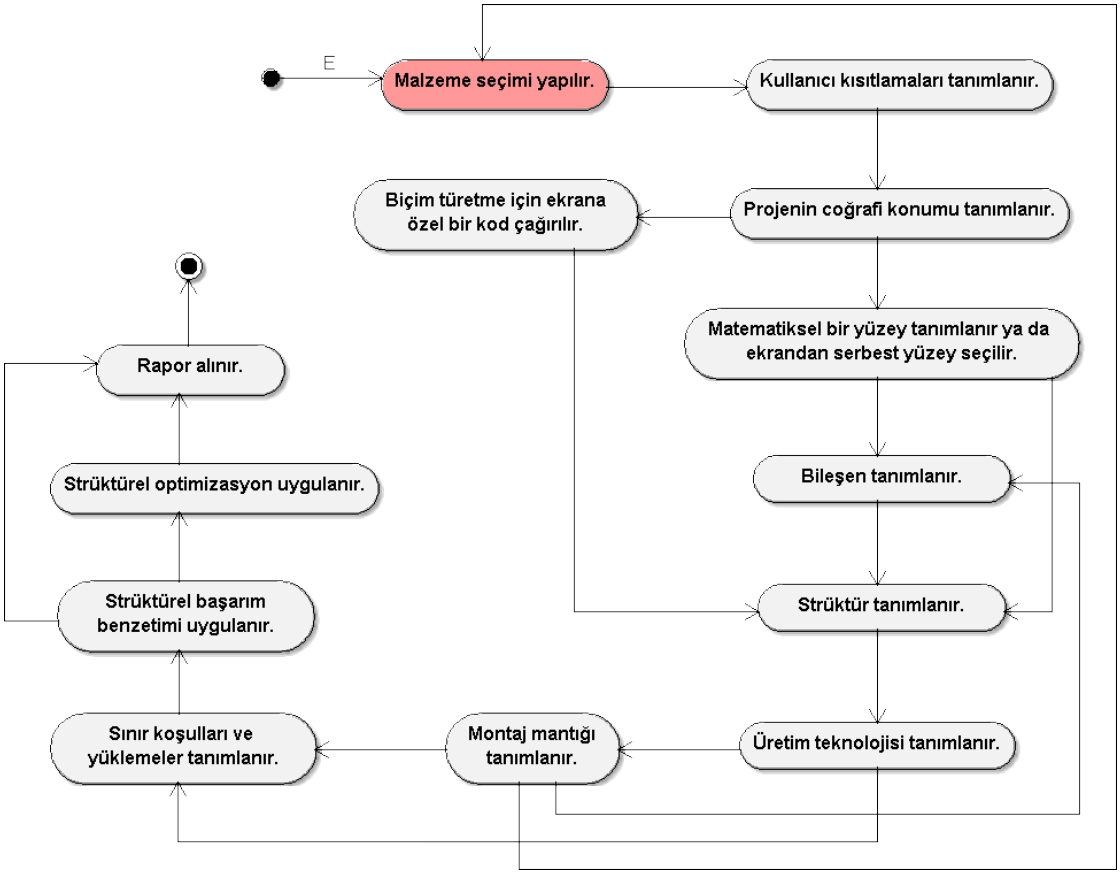
Şekil 5.2 : MBHT-m için geliştirilmiş, aralarında bağımlılık ilişkisi bulunan beş modülü temsil eden UML paket diyagramı.

Sıralama diyagramı, beş modülün zamana göre aralarında kurdukları ilişkileri düşey eksende göstermektedir (Şekil 5.3).



Şekil 5.3 : MBHT-m için geliştirilmiş, beş modül ve düşey eksende etkinliklerinin zamanlamalarını gösteren UML sıralama diyagramı.

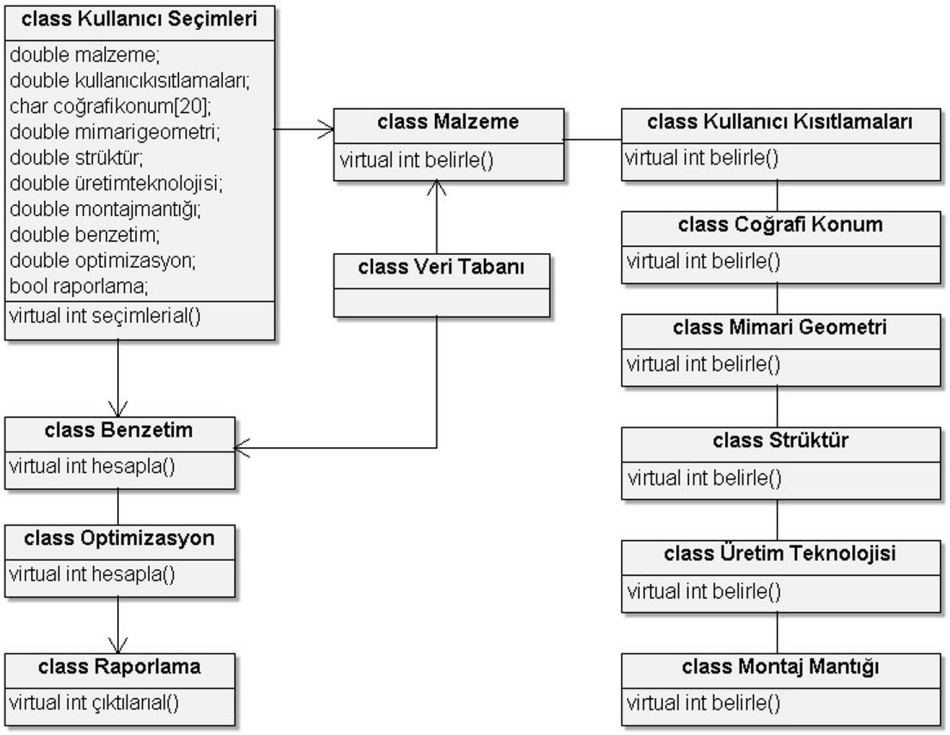
Etkinlik diyagramı, MBHT-m'de bulunan dinamik bilgiyi ifade etmekte kullanılır. Nesnelerin arasındaki işbirliğini ve durumlarındaki değişimleri göstermekte kullanılan etkinlik diyagramıyla, kullanıcı MBHT-m sürecinde bir dizi eylem gerçekleştirir (Şekil 5.4).



Şekil 5.4 : MBHT-m için geliştirilmiş, iş akışını kullanıcının adımlarıyla gösteren UML etkinlik diyagramı.

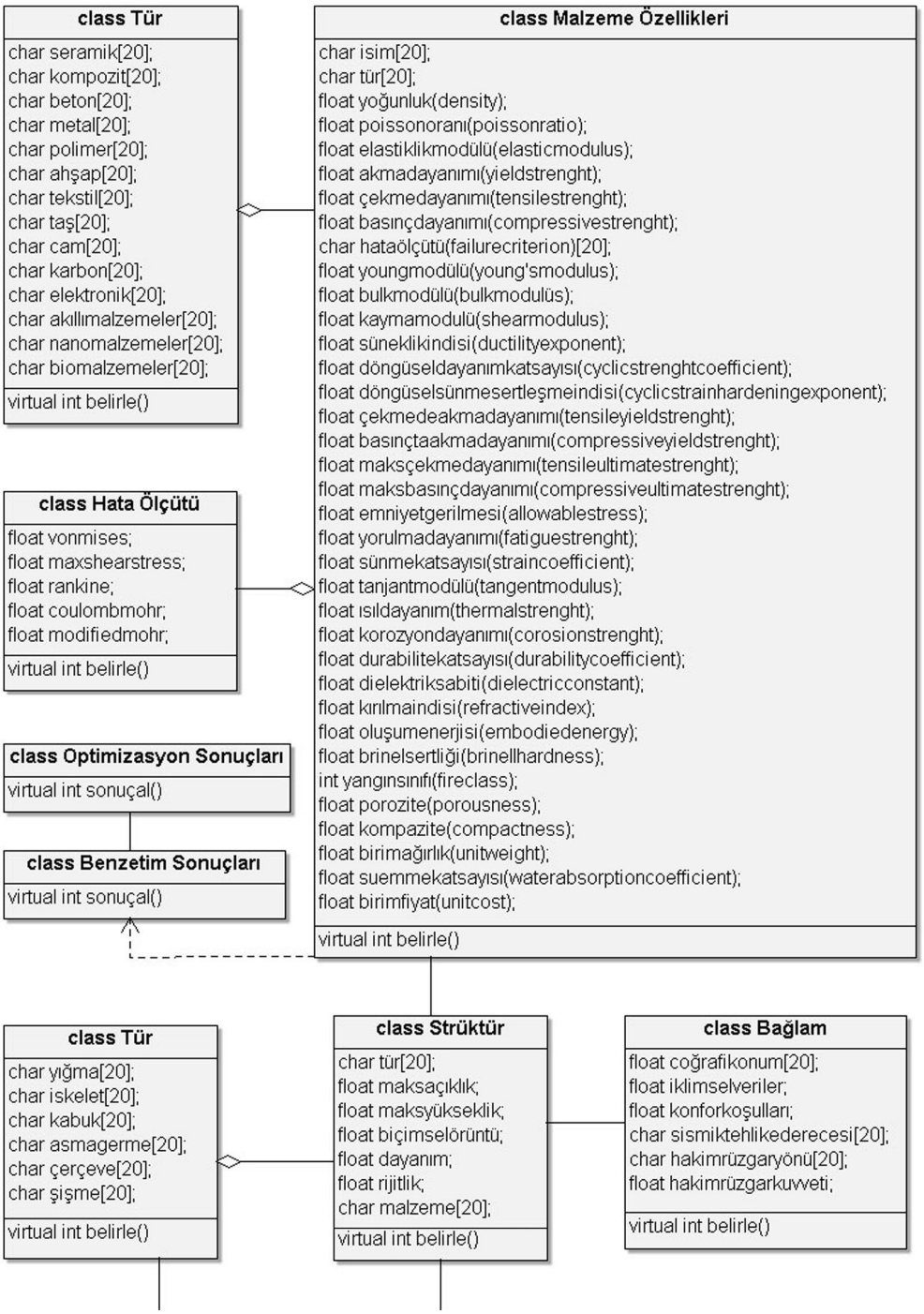
MBHT-m kapsamında değerlendirilen beş modülün her biri, kendi içlerinde ayrı birer sınıf diyagramı olarak tanıtılmıştır. MBHT-m sınıf diyagramlarında sınıflar arasındaki ilişkiler belirlenmiştir. Ancak bu ilişkiler dondurulmamıştır (Chitnis ve diğ, 2003) (4. Bölüm). Modelin yazılıma uyarlanması sürecinde, sınıflar arasındaki ilişkiler yenilenebilir.

MBHT-m için geliştirilmiş "Kullanıcı Modülü", kullanıcı seçimlerini ve seçimler arasındaki ilişkileri ortaya koyar (Şekil 5.5). Kullanıcı modülünü gösteren UML sınıf diyagramında işbirliği ve yönelimli işbirliği ilişkileri kullanılmıştır. Kullanıcıya ait tüm seçim sınıfları, veri tabanı dolayısıyla birbirleriyle ilişkilidir. Kullanıcı seçimleri ve veri tabanından verilerin çıkışı, yönelimli işbirliği içinde tanımlanmıştır. Kullanıcı seçimleriyle, benzetim ve optimizasyon hesaplamaları işleme konur. Benzetim ve optimizasyon sonuçlarının kullanıcı seçimlerine de eklenmesiyle raporlar oluşturulur.

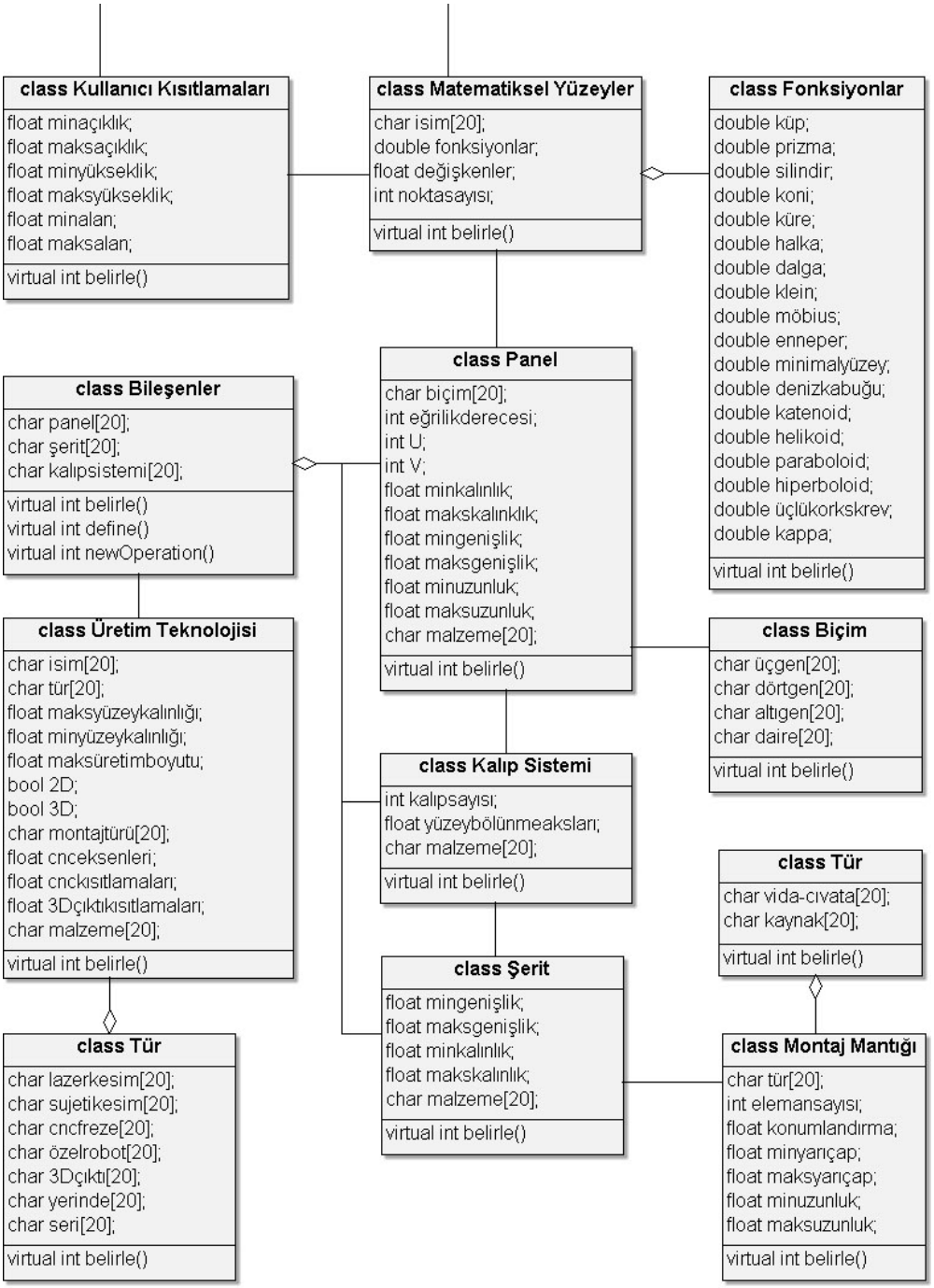


Şekil 5.5 : MBHT-m için geliştirilmiş, kullanıcı modülünü gösteren, C^{++} gösterim diliyle oluşturulmuş UML sınıf diyagramı.

MBHT-m' nin "Veri Tabanı" modülü malzeme, kullanıcı tanımlı kısıtlamalar, coğrafi konum, mimari geometri, bileşenler, strüktür, üretim teknolojisi ve montaj mantığına ilişkin tüm özellikleri, işlemleri, aralarındaki ilişkilerle belirler (Şekil 5.6-5.7). Veri tabanı modülünü gösteren UML sınıf diyagramında; bağımlılık, küme ve işbirliği ilişkileri kullanılmıştır. Malzeme özellikleri, üst ölçekte tür ile küme ilişkisi kurar. Malzeme özelliklerinden, gerilmeleri gösteren hata ölçütü, malzeme özelliklerinin alt kümesidir. Malzeme özellikleri; kullanıcı kısıtlamaları, bağlam, mimari geometri (matematiksel yüzeyler ve bileşenler), strüktür, üretim teknolojisi ve montaj mantığı ile işbirliği içindedir. Benzer şekilde, optimizasyon sonuçları ve benzetim sonuçlarıyla bağımlılık ilişkisi kurmaktadır. Strüktür, üretim teknolojisi ve montaj mantığı, ilgili türleriyle, panel bileşenlerle, fonksiyonlar da matematiksel yüzeyler ile küme ilişkisi kurmaktadır. Veri tabanında tüm sınıflar birbirleriyle doğrudan ya da dolaylı olarak ilişkilidir.



Şekil 5.6 : MBHT-m için geliştirilmiş, veri tabanı modülünü gösteren, C^{++} gösterim diliyle oluşturulmuş UML sınıf diyagramı. Veri tabanında malzeme konusu, modelin ileride ek görevler yerine getirmesi olasılığı düşülerek detaylı olarak ele alınmıştır.

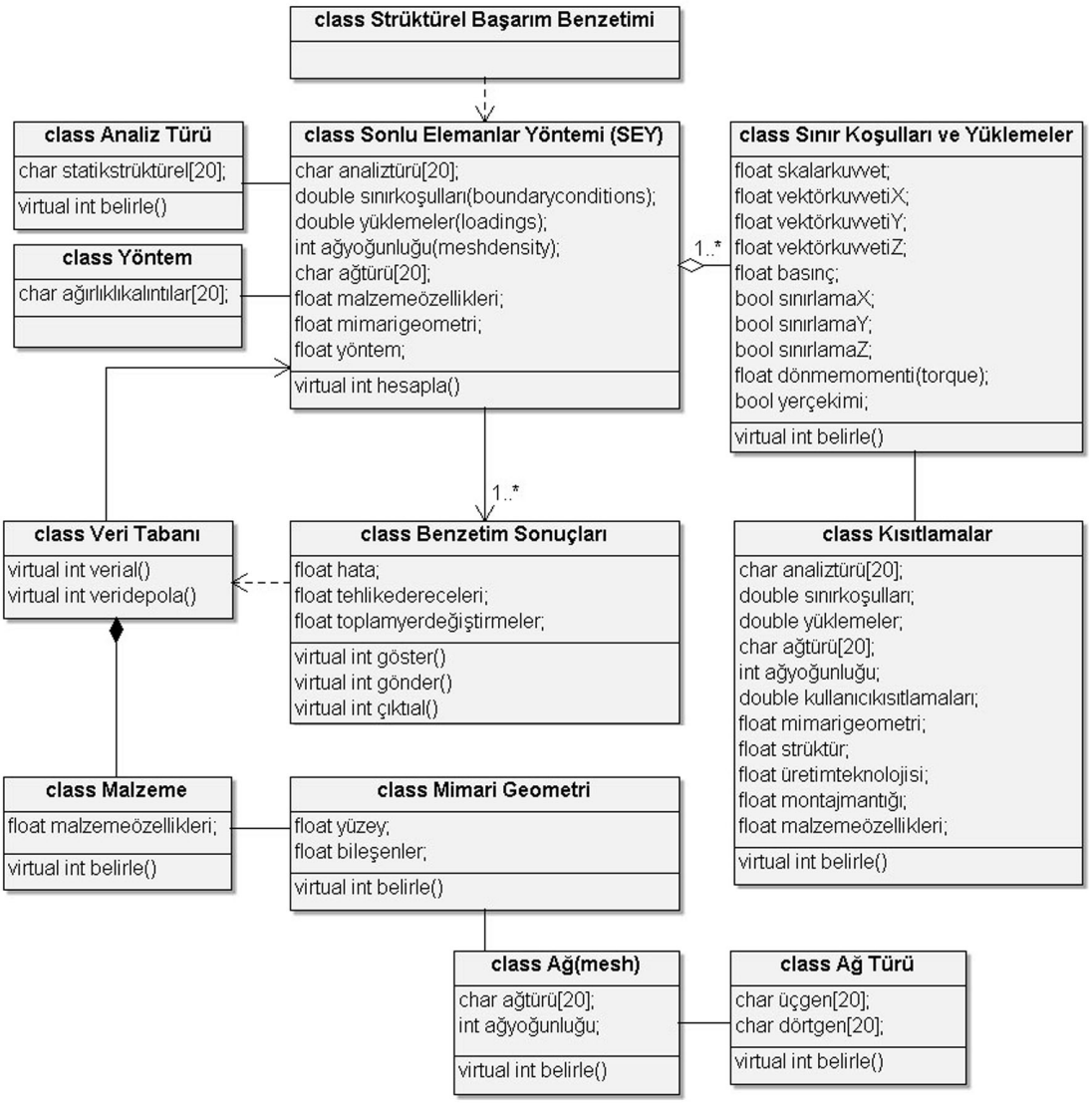


Şekil 5.6 (devam) : MBHT-m için geliştirilmiş, veri tabanı modülünü gösteren, C^{++} gösterim diliyle oluşturulmuş UML sınıf diyagramı.

MBHT-m' nin "Benzetim Modülü" ve "Optimizasyon Modülü", malzeme, biçim ve başarım arasındaki ilişkinin ortaya konmasına yönelik olarak, MBHT-m için geliştirilmiş diğer sınıf diyagramlarıdır. Model kapsamındaki benzetim ve optimizasyon modülleri, BDT yazılımı olan Rhino' nun altyapısını kullanamamaktadır. Benzetim ve optimizasyon işlemlerinin, başka bir yazılımın ekrana çağrılmadan modelle bütünleştirilmesi kullanım kolaylığı sağlayacağı için

tercih edilmiştir. Mevcut çalışmalar incelenerek, başarım ve optimizasyon işlemlerinin çözümünde elverişli bulunan yöntemler modelle bütünleştirilmiştir. Yönelimli işbirliği, küme, bağımlılık, birleşim ve çokluk ilişkileri benzetim ve optimizasyon sınıf diyagramlarında kullanılmıştır.

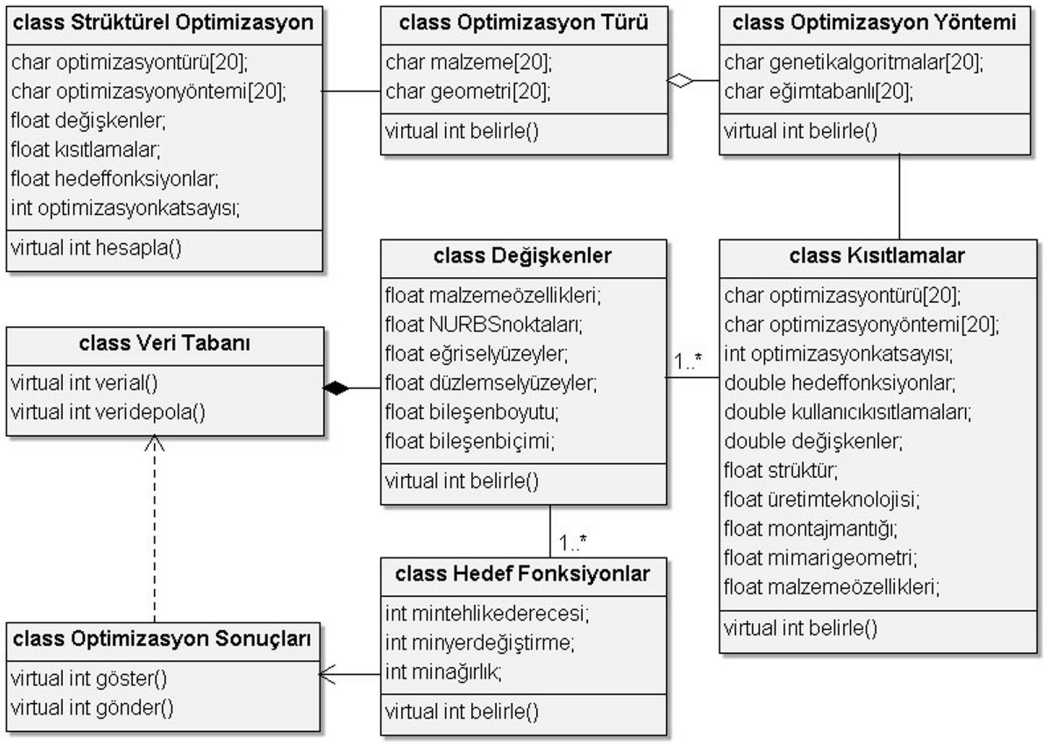
Benzetim modülünde, strüktürel başarım benzetimi SEY ile bağımlılık ilişkisi kurar. Veri tabanı, yönelimli işbirliği içinde SEY ile veri akışını gerçekleştirir. Başarım türü olarak Statik Strüktürel Analiz, dolayısıyla Ağırlıklı Kalıntılar Yöntemi' nin (AKY) belirlenmesiyle SEY işleme konduğu için, bu sınıflar arasında işbirliği ilişkisi sağlanmıştır. SEY kapsamında sınır koşulları ve yüklemeler belirlenmelidir. Bu kapsamda birden çok seçim yapmak mümkün olduğu için, SEY ile sınır koşulları ve yüklemeler arasında küme ve çokluk ilişkisi kurulmuştur. SEY hesaplamasının gerçekleştirilmesiyle benzetim sonuçları alınmaktadır. Sonuçlar alınırken de birden fazla seçim yapılabilir. Örneğin, kullanıcı hem gerilmeleri gösteren tehlike derecelerini, hem de toplam yer değiştirmeleri görmek isteyebilir. Veri tabanı modülü, SEY hesaplamalarında kullanılan malzeme ve mimari geometriye ait verilere sahiptir. Mimari geometri, SEY hesaplamasında yüzey hassasiyetini belirleyen ağ (mesh) ile işbirliği ilişkisi kurar (Şekil 5.7).



Şekil 5.7 : MBHT-m için geliştirilmiş, benzetim modülünü gösteren, C^{++} gösterim diliyle oluşturulmuş UML sınıf diyagramı.

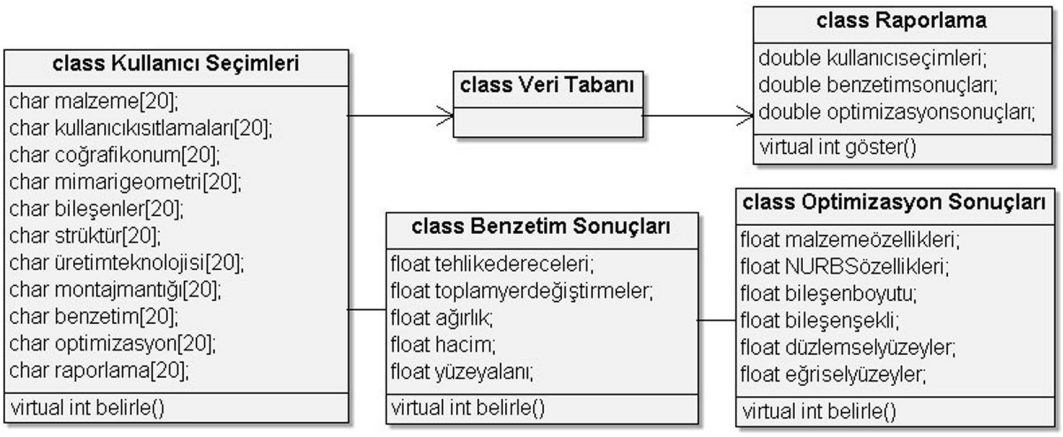
Optimizasyon modülünde, strüktürel optimizasyon türü kullanıcı tarafından belirlenir. Modele Malzeme ve Geometri Optimizasyonu katılmıştır. Strüktürel optimizasyon ve optimizasyon türü arasında işbirliği ilişkisi kurulmuştur. Optimizasyon türüne göre, optimizasyon yöntemi de belirlenmiş olur. MBHT-m kapsamında, geometri optimizasyonu için Genetik Algoritmalar (GA) ve malzeme optimizasyonu için Eğim Tabanlı Optimizasyon (ETO) kullanılması önerilmiştir. Optimizasyon türü ve yöntemi arasında küme ilişkisi kurulmuştur. Optimizasyon yöntemine bağlı olarak kısıtlamalar tanımlanırken, iki sınıf arasında işbirliği ilişkisi kurulur. Değişkenler ve hedef fonksiyonlar kullanıcı tarafından çok sayıda belirlenebildiği için çokluk ve işbirliği ilişkileri ile tanımlıdır. Örneğin kullanıcı aynı anda geometri optimizasyonunu, malzeme ve strüktürün kısıtlanmasını, yer

değiştirmeler ve ağırlığın en aza indirilmesini, bileşen boyutu ve NURBS özelliklerinin değişkenler olarak belirlenmesini seçebilir. Tüm bu seçimlerin yapılması ile yönelimli işbirliği içinde optimizasyon sonuçları oluşturulur. Optimizasyon sonuçları, veri tabanında depolanmış verileri kullandığı için, veri tabanı sınıfı ile bağımlılık ilişkisi kurar (Şekil 5.8).



Şekil 5.8 : MBHT-m için geliştirilmiş, optimizasyon modülünü gösteren, C^{++} gösterim diliyle oluşturulmuş UML sınıf diyagramı.

MBHT-m "Raporlama Modülü" aracılığı ile kullanıcı seçimleri, benzetim ve optimizasyon sonuçlarının özetleri kullanıcıya sunulur. Raporlama modülünde, işbirliği ve yönelimli işbirliği ilişkileri kurulmuştur. Optimizasyon sonuçları ve benzetim sonuçları ile kullanıcı seçimleri işbirliği ilişkisi içinde bulunurlar. Kullanıcı seçimleri veri tabanıyla, veri tabanı ise raporlama ile yönelimli işbirliği ilişkisi kurmaktadır. Öncelikli olarak kullanıcı seçimleri veri tabanında depolanmakta, sonrasında bu veriler raporlamada kullanılmaktadır (Şekil 5.9).



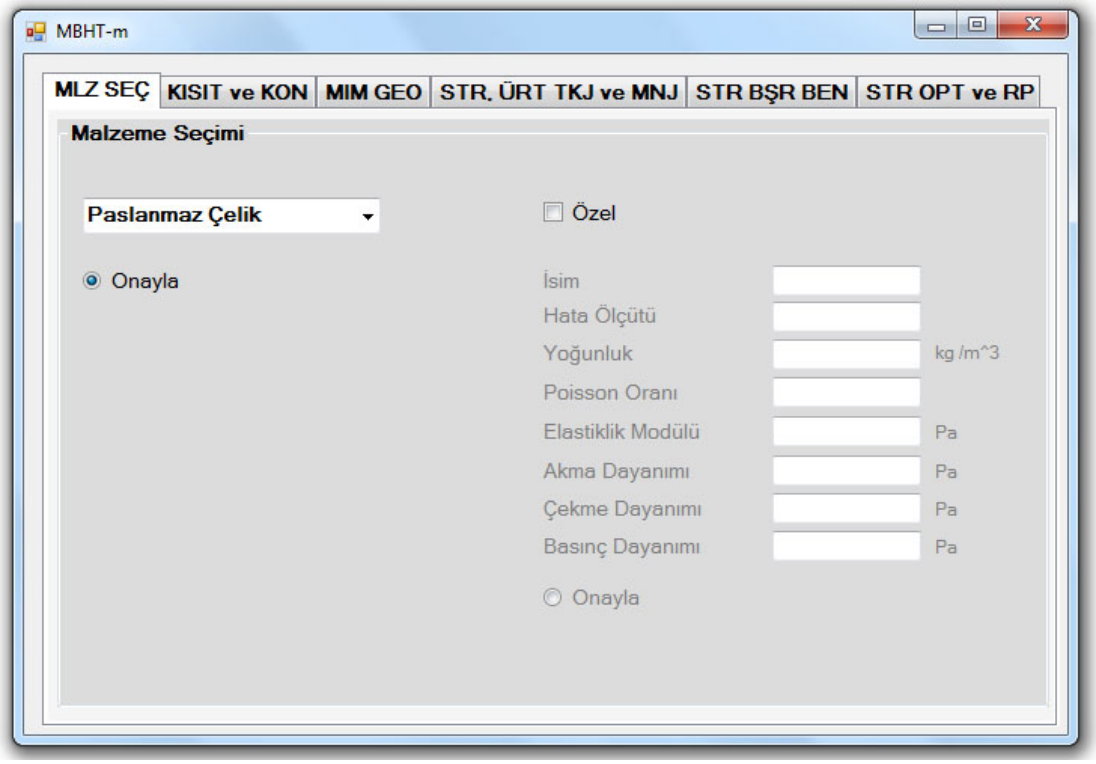
Şekil 5.9 : MBHT-m için geliştirilmiş, raporlama modülünü gösteren, C^{++} gösterim diliyle oluşturulmuş UML sınıf diyagramı.

5.1.1 - 5.1.6. Bölümler ile, mimari biçimin tasarlanmasından, üretimine dek olan süreçte, MBHT-m'de kullanıcı arayüzü aracılığıyla uygulanan işlem adımları açıklanmıştır. Bu adımlar, en kritik parametrelerin seçilerek kullanılmasıyla oluşturulmuştur. Kullanıcı girdileri belirleyerek, veri tabanı, benzetim, optimizasyon ve raporlama modülleri ile arayüz aracılığıyla etkileşime geçer. Arayüz Microsoft Visual Studio yazılımında tasarlanmıştır. Kullanıcı arayüzü; malzeme seçimi, kullanıcı kısıtlamaları ve konum, mimari geometri, strüktür-üretim teknolojisi ve montaj mantığı, strüktürel başarım benzetimi, strüktürel optimizasyon ve raporlama olmak üzere toplam altı pencereden oluşmaktadır.

5.1.1 Malzeme seçimi

Bütünsel yaklaşım söz konusu olduğunda, malzeme, MBHT-m' ye ilk aşamadan katılmalıdır (Yazıcı, 2011). Çeşitli malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri MBHT-m veri tabanı modülünde belirlenmiştir. Malzeme özellikleri; strüktür, üretim teknolojisi, montaj mantığının yanında, strüktürel başarım ve optimizasyon süreçlerinde de önemli görevler üstlenir.

İlk pencerede, veri tabanına bağlı malzeme listesinden seçim yapılır ya da özel olarak malzemenin fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenir. Kullanıcı, örnek çalışmada malzeme seçiminin yapıldığı arayüz aracılığıyla malzeme veri tabanından paslanmaz çeliği atamıştır (Şekil 5.10).



Şekil 5.10 : MBHT-m için geliştirilmiş, "Malzeme Seçimleri" ile ilgili kararların alındığı kullanıcı arayüzü.

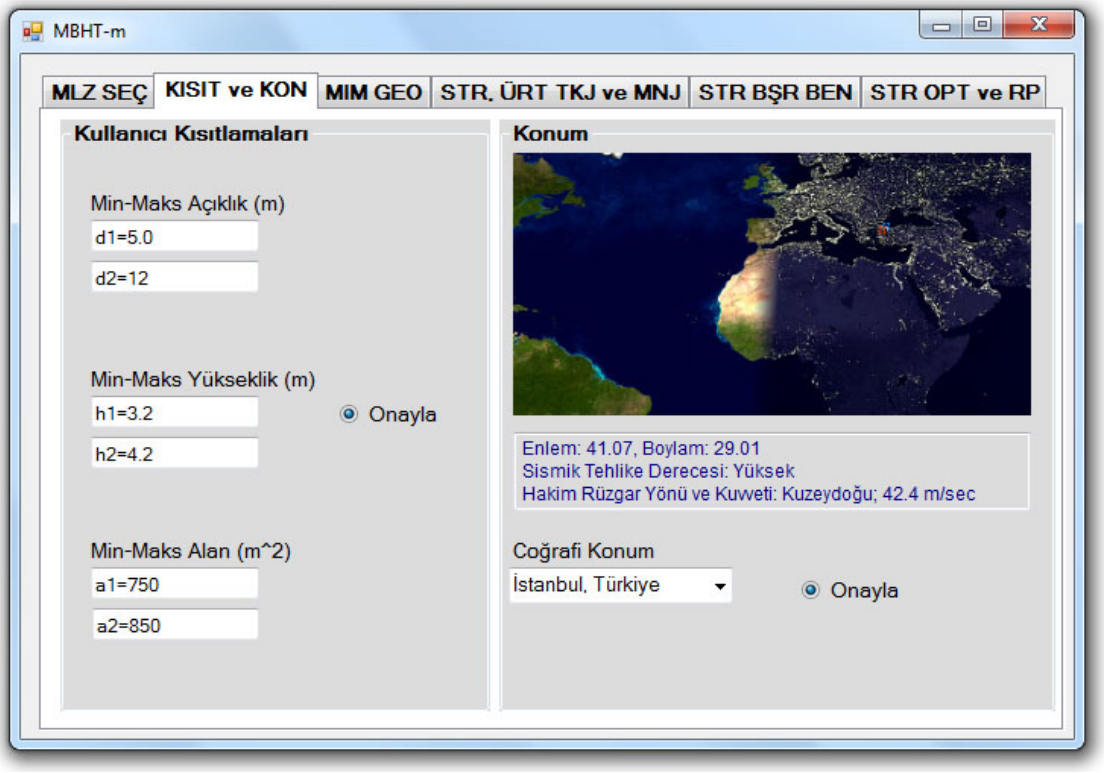
5.1.2 Kullanıcı kısıtlamaları ve konum

Tasarım süreci genellikle kullanıcı tarafından belirlenmiş kısıtlamalar ile başlar. Bu kısıtlamalar, modeldeki diğer kısıtlamalar ile ilişkilendirilmelidir. Minimum ve maksimum olarak açıklık değerleri, yükseklik ve alan değerleri kullanıcı tarafından belirlenir. Buna göre matematiksel yüzeyler, strüktür ve üretim teknolojisine ait listeler elverişli olmayan çözümleri eleyerek yenilenir.

Coğrafi konumunun belirlenerek mimari tasarımın bağlamında incelenmesi, başarım değerlendirmesinde önemli rol oynar. Strüktürün, bulunduğu bölgenin koşullarından etkilendiği göz önüne alınarak, MBHT-m kapsamında projenin bulunduğu arsanın sismik tehlike derecesi ile hâkim rüzgâr yönü ve kuvveti belirlenmiştir.

Kullanıcı malzeme seçiminden sonra kendi belirlediği kısıtlamalarla ve projenin bağlamını, yani coğrafi konumunu MBHT-m'de tanımlar. Örnek çalışmada kullanıcı, minimum ve maksimum açıklıkları 5 m ve 12 m olarak; minimum ve maksimum yükseklikleri 3.2 m ve 4.2 m olarak; minimum ve maksimum alanı ise 750 m^2 ve 850 m^2 olarak belirlemiştir. Aynı örnekte, coğrafi konum kullanıcı tarafından İstanbul, Türkiye olarak tanıtılmıştır. Bu şekilde coğrafi konumla ilişkili olarak veri tabanında

bulunan, İstanbul'a ait enlem ve boylam değerleri, sismik tehlike derecesi ile hâkim rüzgâr yönü ve kuvveti kullanıcıya sunulur (Şekil 5.11).



Şekil 5.11 : MBHT-m için geliştirilmiş, "Kullanıcı Kısıtlamaları ve Konum" ile ilgili kararların alındığı kullanıcı arayüzü.

5.1.3 Mimari geometri

Hesaplamalı tasarım modelinde biçim sayısal olarak tanımlanmalıdır. Karmaşık biçimler matris değerleriyle (Prousalidou ve Hanna, 2007) ve kontrol parametreleriyle oluşturulmuş matematiksel yüzey fonksiyonlarıyla ifade edilebilir (Tang, 2010). Eğer biçim kısmen düzgünse, değişkenleri kullanıcı tarafından ekrandan girilerek, matematiksel fonksiyonlarla ifade edilebilir. MBHT-m kapsamında, matematiksel yüzey fonksiyonlarıyla listeden seçim yapılarak biçim oluşturmak mümkündür. Buna ek olarak, tasarımda esnekliği arttırmak adına, ekrandan kullanıcı tarafından tasarlanmış NURBS yüzeyleri seçmek de olanaklıdır (2. Bölüm, 2.6.2).

Mimari mekân, ısı kontrolü ve suyun binaya girişinin önlenmesi gibi birçok başarım koşulunu sağlamak durumundadır. Bazı yüzeyler mimari mekân yaratmak için uygun olmasına rağmen, açık yüzeylere sahip olabilir. MBHT-m, istenirse cam gibi saydam

malzeme kullanarak, açık cephelere eklenen düşey yüzeyler aracılığı ile üç boyutlu kapalı mekânlar oluşturulmasına olanak tanır.

Mimari geometri; malzeme, ulaşım, üretim ve bütçe kısıtlamaları gibi sebepler dolayısı ile çoğunlukla bileşenlere bölünür. Serbest biçimler gibi karmaşık olabilen geometrilerin üretimi temelde, yüzeyin bölünmesi ve geometrinin rasyonelleştirilmesi ile gerçekleştirilir. MBHT-m' de post-rasyonelleştirme yöntemi ile bileşen oluşturulması uygulanmıştır (2. Bölüm, 2.6.1). Bileşen tipleri panel, şerit ve kalıp sistemleri olarak farklılaşmaktadır. Tüm bileşenler, malzemeler ile yüzeyin topolojik özellikleriyle ilişkilidir.

Modelde panel biçimleri, üçgen, dörtgen, altıgen ve dairesel olarak tanıtılmıştır. Yüzeyin x ve y yönlerindeki bölünmelerini temsil eden U ve V değerleri ve panel eğrilik dereceleri belirlenmiştir. Panel eğrilik derecesi 1'den 3'e artış göstererek, sırasıyla düz, tek eğrilikli ve çift eğrilikli olarak tanımlanır.

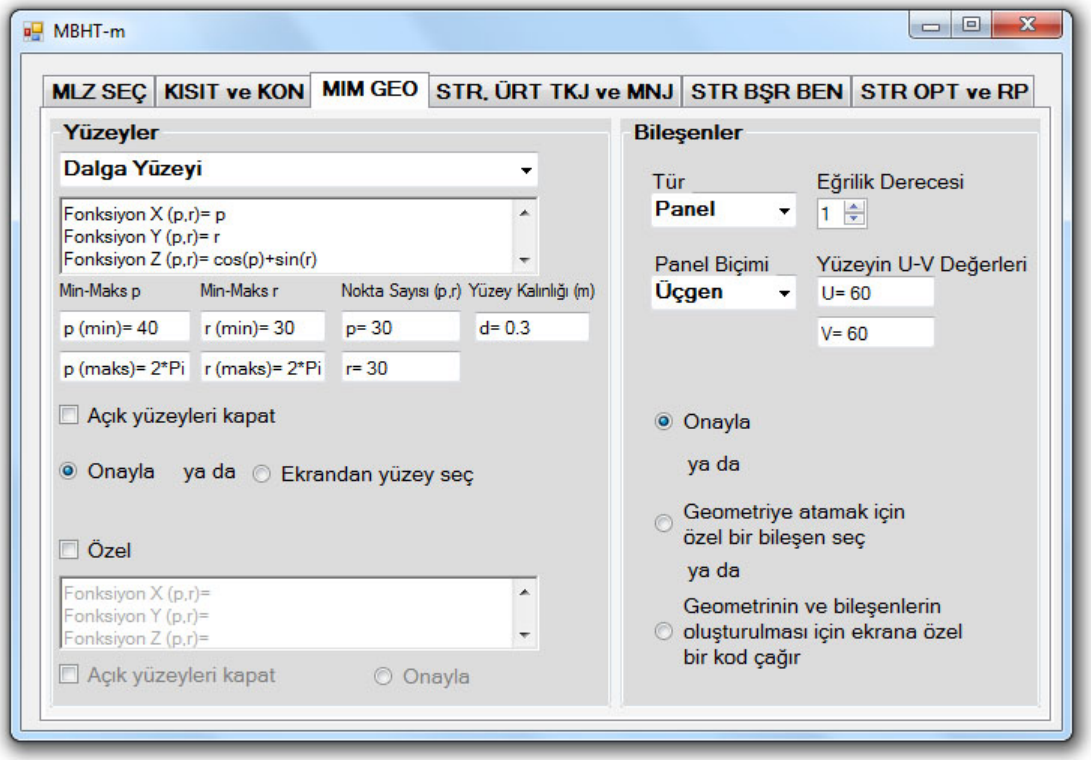
Şerit seçeneği için, geometrinin eşyükselti eğrileri belirlenir. Bunun için şeritlerin kalınlıkları ve eşyükselti oluşturacak eksenin belirlenmesi gereklidir. Eşyükselti eğrileri tanımlandıktan sonra, paralel eğriler arasında yüzeyler oluşturularak geometrinin tamamı elde edilir.

Beton gibi bir malzemenin seçilmesi ile bileşen olarak kalıp sistemi uygulanabilir. Parametreler, geometrinin bölünme eksenleri ve kalıp bileşenlerinin sayısıdır.

Esneklik sağlayan diğer bir seçenek ise, özel olarak tasarlanmış bir bileşenin ekrandan seçilerek, NURBS yüzeyinin kontrol noktalarına atanmasıdır. Buna ek olarak, ekrana çağırılan özel bir kod aracılığıyla mimari geometriyi (yüzey ve bileşenler) oluşturma işlemi gerçekleştirmek model kapsamında mümkündür.

Kullanıcı belirlenen örnek çalışmada, mimari geometri için veri tabanına bağlı matematiksel eğri fonksiyonlarıyla Dalga Yüzey oluşturmuştur. Bu yüzeyin seçilmesiyle, ekranda yüzeyin oluşmasını sağlayan fonksiyonların değişken değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Yüzeyin fonksiyon değişkenleri "p" ve "r" ile tanımlıdır. Kullanıcı minimum ve maksimum "p" değerlerini 40 ve 2 * Pi olarak; minimum ve maksimum "r" değerlerini 30 ve 2 * Pi olarak; "p" ve "r" için nokta sayısını 30 olarak ve yüzey kalınlığını 0.3 m olarak belirlemiştir. Kullanıcı tarafından atanan bileşenler ise, düz, yani eğrilik derecesi 1 olan üçgen biçimli panellerdir.

Panelin oluşturulmasında önemli rol oynayan U ve V değerleri ise 60 olarak atanmıştır (Şekil 5.12).



Şekil 5.12 : MBHT-m için geliştirilmiş, "Mimari Geometri" ile ilgili kararların alındığı kullanıcı arayüzü.

5.1.4 Strüktür-üretim teknolojisi ve montaj mantığı

MBHT-m kapsamında strüktürel sistem belirlenmelidir. Modelde strüktürler, kabuk, çerçeve, şişme, asma-germe, yığma ve iskelet olmak üzere, altı ana başlıkta ele alınmıştır. Strüktür tiplerine göre kısıtlamalar; maksimum açıklık, yükseklik, dayanım, rijitlik ve malzeme olarak belirlenmiştir.

Küp, prizma ve küre parçası gibi birincil geometrilerle oluşturulan geleneksel biçimler modelde değerlendirilebilir. Diğer yandan, MBHT-m serbest biçimler ve her türlü karmaşıklıktaki matematiksel yüzeylerle çalışma olanağı tanıdığı için monokok (strüktürel kabuk) elverişli çözümdür. Çerçeve strüktürün düzenlemesi için NURBS yüzeyinin x ve y yönlerindeki bölünmeleri olan U ve V eğrileri belirlenir. Bu tipteki strüktürlerin düzenlenme kuralları; biçimsel örgütlenme, yani çerçevenin oluşturulma biçimi, strüktürel bileşenlerin kesit ölçüleri ile strüktürel bileşenler arasındaki minimum ve maksimum uzaklıklardır. Diğer seçeneklerden olan şişme ve asma-germe strüktürlerde, kullanıcı tarafından belirlenen malzeme, mimari geometri ile sınır koşulları ve yüklemeler, birbirleriyle uyum içinde olmalıdır. Yığma yapılarda,

geometrinin topolojisi strüktürün düzenleme kurallarını belirler. Bu kurallar; biçimsel örgütlenme (örneğin tuğlaların dizilimi), kesit ölçüleri ve strüktürel bileşen ölçüleridir. Benzer şekilde iskelet yapılar için, kesit ölçüleri ve strüktürel bileşenlerin binadaki yerleşimleri, düzenlenme kuralları olarak belirlenir.

Giydirme cephe örneğinde olduğu gibi bazı durumlarda, tasarlanan yüzey ancak mevcut başka bir strüktürden destek alarak ayakta durabilir. Bunun gibi durumlarda, MBHT-m strüktürün ekrandan seçilmesine olanak tanır.

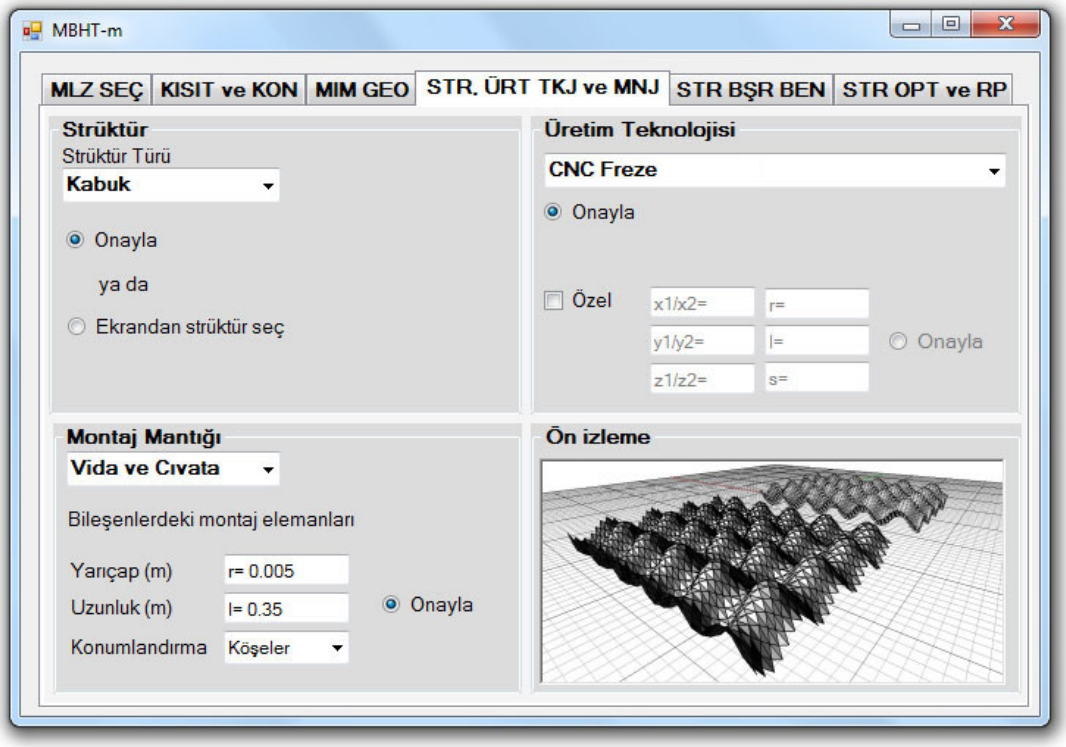
Modele, üretim teknolojilerinin de katılması kaçınılmazdır. 2D ve 3D BDÜ tekniklerinden lazer kesim, su jeti kesim, CNC freze, eklemeli üretim ve özel endüstriyel robotlar MBHT-m kapsamında belirlenmiştir. Buna ek olarak, yerinde üretim ve seri üretim de modelde tanıtılmıştır. Üretim teknolojilerinin getirdiği kısıtlamalar; malzeme, boyut, 2D ve 3D olmak üzere üretim tekniği ile minimum ve maksimum kalınlık olarak belirlenmiştir. Örneğin, eklemeli üretimde (additive manufacturing), bu teknikle uyumlu malzemenin kullanıcı tarafından tercih edilerek önceden seçilmesi önemlidir. Eklemeli üretim ve CNC frezede olduğu gibi, geometri makina tarafından tanımlı tolerans değerler çerçevesinde değerlendirilir. Üretilen geometri yüzeyinin düzgünlüğü; malzeme seçimi, makina özellikleri ve üretim zamanı gibi birkaç parametrenin birlikte değerlendirilmesine bağlıdır.

MBHT-m, malzeme, mimari geometri ve strüktürün belirlenmesinden sonra elverişsiz olanları eleyerek, uyumlu olan tekniği/teknikleri vurgular. Örneğin, birincil geometrilerden oluşan geleneksel bir biçimin seçilmesi durumda, MBHT-m ürün şekil ve boyutlarının önceden tanımlı olduğu seri üretim tekniğini öne çıkartabilir. 2D üretim tekniklerinden lazer kesim ya da su jeti kesim seçildiği durumda, bileşenler düz panellere dönüştürülür. Buna ek olarak, özel endüstriyel robotlar, modelde kullanıcı tarafından tanımlanan görevleri yerine getirir.

Mimari geometrinin panel, şerit ya da özel bileşenlerden oluşması durumunda, bütüne ulaşılması için, uygun montaj mantığının modelde belirlenmesi gereklidir. Montaj elemanları ve yüzeyin bileşenleri arasında topolojik bir ilişki bulunmaktadır. Montaj seçeneklerinden, vida ve cıvata ile kaynak, modelde tanıtılmıştır. Vida ve cıvata seçeneği çoğunlukla tüm malzemeler ve yüzey bileşenleri için uygulanabilir. Köşe veya kenar ortası olarak yerleştirilme biçimleri ve montaj elemanlarının ölçüleri kullanıcı tarafından tanımlanır. Çok sayıda montaj elemanı hesaplama

süresini uzatabilir ve bilgisayarda kayıtlı olan dosya boyutunu arttırabilir. Bu sebeple, montaj elemanları, biçimleri basitleştirilerek geometriye atanır. Metal veya termoplastik olarak çelik, alüminyum, polimer gibi malzemeler seçildiği durumda, bileşenlerin bitişik kenarlarına kaynak seçeneği uygulanabilir.

Örnek çalışmada kullanıcı strüktür türünü kabuk olarak atamıştır. Kullanıcı aynı örnekte, üretim teknolojisini CNC Freze Makinası olarak seçmiştir. Montaj mantığı olarak ise, üçgen panellerin köşeler kullanılmak üzere, vida ve cıvata ile birleştirilmesini belirlemiştir. Strüktür türü, üretim teknolojisi ve montaj mantığı ile ilgili kısıtlamalar veri tabanında bulunmaktadır (Şekil 5.13).



Şekil 5.13 : MBHT-m için geliştirilmiş, "strüktür, üretim teknolojisi ve montaj mantığı" ile ilgili kararların alındığı kullanıcı arayüzü.

5.1.5 Strüktürel başarım benzetimi

Strüktürel başarım benzetiminde kullanılan SEY hesaplaması için değişik problem çözümlerine yönelik olarak, farklı matematiksel yöntemler kullanılmaktadır. Karmaşık olabilen biçimlerin analizinde elverişli bulunan ve MBHT-m'ye katılan, Ağırlıklı Kalıntılar Yöntemi (AKY) sorunlara yaklaşık çözümler sunar. Bu yöntem Galerkin isimli diferansiyel denkleme dayalıdır (Madenci ve Güven, 2006).

Statik strüktürel analiz, malzeme, biçim ve strüktürel başarımın bütünleştirilmesine ilişkin temel anlayışı sağlar. Bu sebeple MBHT-m benzetim modülünde, statik

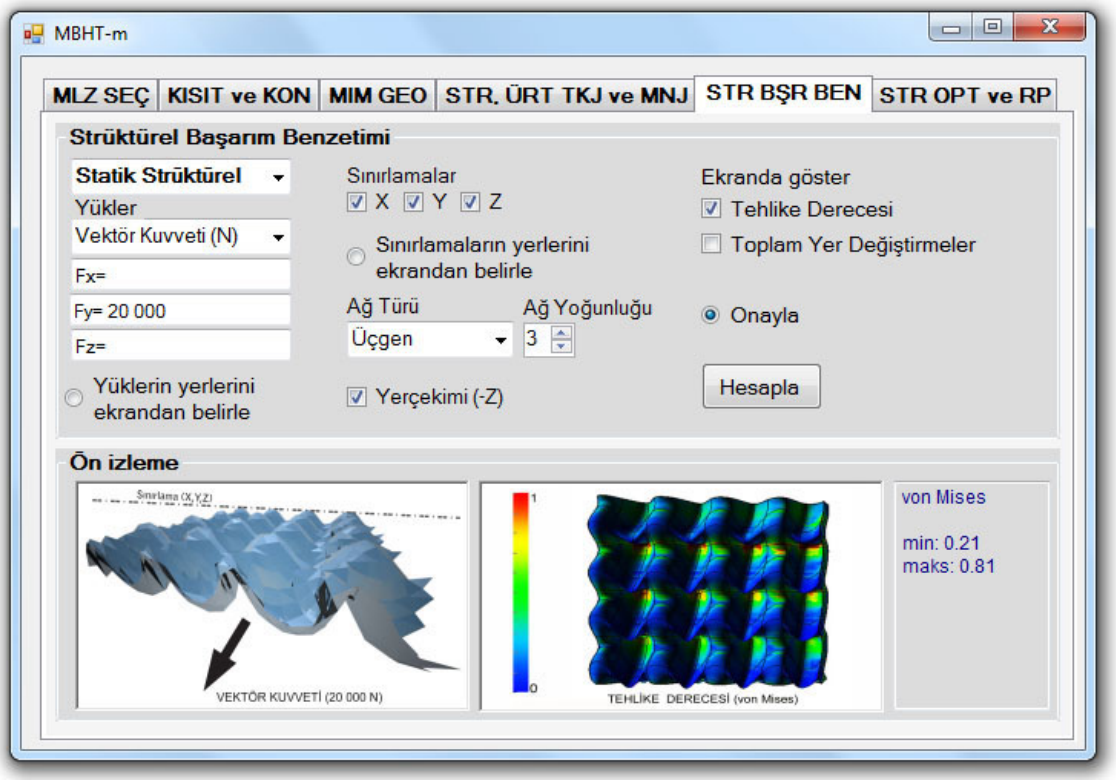
strüktürel analiz uygulanmıştır. SEY ile geometrideki toplam yer değiştirmeler ve tehlike dereceleri hesaplanabilir. 0 ile 1 arasında değer alabilen tehlike derecesi; malzemede hesaplanan gerilmenin, malzemede hataya yol açabilecek eşik değerine oranıdır (Scan & Solve, 2011) (3. Bölüm, 3.4.1.5). İşleme başlamadan önce, geometriyi etkileyen sınır koşulları ve yüklemeler kullanıcı tarafından belirlenmelidir. X-Y-Z yönlerinde vektör kuvvetleri, basınç, skalar yük ve döndürme momenti olarak tanımlı yüklemelerin sayısal değerleri, etki ettikleri konumlarla beraber tanıtılır. Geometrinin hareketini kısıtlayan sınırlamalar da belirlenmelidir. Sınır koşulları ve yüklemelerin belirlenmesinden sonra geometri, kesikli sonlu elemanlar ağına (discrete finite element mesh) dönüştürülür (3. Bölüm, 3.4.1). Sonlu elemanlar ağının yoğunluğundaki artış, 1 - 2 ve 3 numaralarıyla temsil edilir. Sonlu elemanlar ağ yoğunluğunun artması ile yüzeyin daha detaylı olarak çözümlenebilmesi ile benzetimin sonucunun gerçeğe yakınsaması mümkündür. Ancak bu durum, hesaplama süresinde artışa neden olacağı için kullanıcının seçimine bırakılmıştır. Ağ yoğunluğu düşük tutularak birçok deneme hızla gerçekleştirilebilir.

Analiz sürecinde, tasarımın ağırlığının hesaplamaya katılması için yerçekimi kuvvetinin seçilmesi kullanıcıya bırakılmıştır. Gerçek şudur ki, dünyadaki tüm cisimler yerçekimi etkisi altındadır. Ancak duruma göre bazı etkilerin benzetim dışında tutulması, incelenen konunun basit olarak ele alınması ihtiyacı ya da hesaplama süresinin kısaltılması açılarından tercih edilebilir.

Gerekli olan tüm değişken parametrelerin belirlenmesinden sonra, SEY çözücüsü ile strüktürel başarım benzetimi işleme konur. Geometrideki toplam yer değiştirmeler ve tehlike dereceleri, grafik olarak maviden kırmızıya, minimumdan ve maksimuma sayısal değerlerin yansıtılmasıyla ifade edilir. Malzeme, mimari geometri, sınır koşulları ve yüklemelerden kaynaklanan bir hata mevcut ise, MBHT-m kullanıcıya geri bildirimde bulunur.

Örnek çalışma kapsamında yüzeyin bir kenarından, Y yönünde uygulanan 20000 Newton'luk bir vektör kuvveti belirlenmiş, karşı kenarda ise yüzeyin X,Y,Z yönünde sınırlanması sağlanmıştır. Bu şekilde, yüzeyin hareketi engellenmiştir. Yüzeyin, yerçekimi etkisi altında bulunduğu benzetim kapsamında değerlendirilmiştir. SEY hesaplamasının gerçekleştirilmesi için yüzeye atanan ağ türü üçgen; benzetimin hassasiyetini belirleyen bir ölçü olan ağ yoğunluğu ise 3 olarak belirlenmiştir. Yüzeydeki gerilmeleri gösteren tehlike derecesinin gösterimi onaylanarak, SEY

hesaplaması gerçekleştirilmiştir. Tehlike derecesi, sünek bir malzeme olan paslanmaz çelik için "von mises" olarak tanımlı olup, minimum 0.21 ve maksimum 0.81 olarak hesaplanmıştır. Sonuç ise, hem sayısal olarak hem de renk kodlarıyla belirlenmiş grafik gösterimle kullanıcıya sunulmuştur (Şekil. 5.14).



Şekil 5.14 : MBHT-m için geliştirilmiş, "Strüktürel Başarım Benzetimi" ile ilgili kararların alındığı kullanıcı arayüzü.

5.1.6 Strüktürel optimizasyon ve raporlama

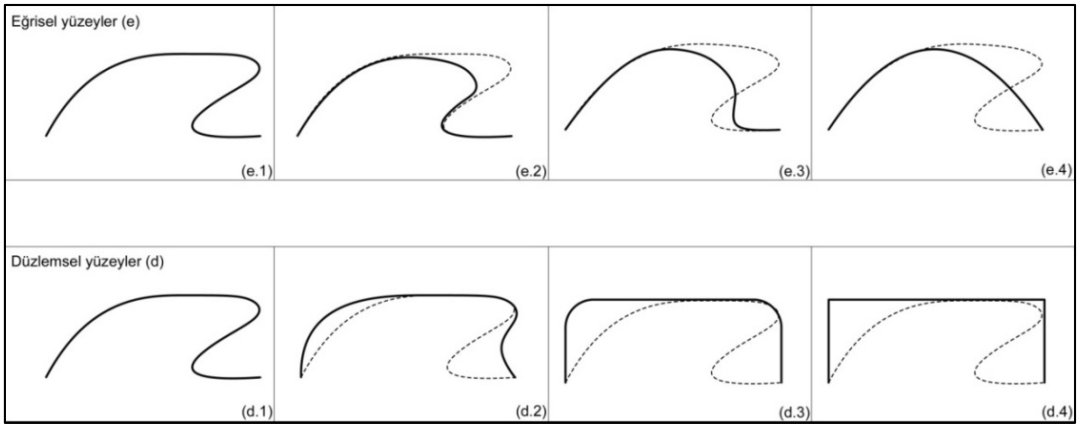
Strüktürel optimizasyon, MBHT-m'nin bütünleşik bir parçasıdır. Modeldeki temel unsur olan *malzeme, biçim ve başarımın* bir arada incelenmesi amacıyla, öncelikli olarak Malzeme ve Geometri Optimizasyonu MBHT-m' ye eklenmiştir.

Tasarım değişkenleri, hedef fonksiyonları ve kısıtlamalar strüktürel optimizasyondaki önemli kavramlardır (3. Bölüm; 3.4.2). MBHT-m birden çok hedef fonksiyonun seçimine olanak tanır. Strüktürel optimizasyondaki hedef fonksiyonlar; toplam yer değiştirmeler, tehlike derecesi ve ağırlığı minimum seviyeye indirmek olarak belirlenmiştir.

MBHT-m kapsamında yürütülen geometri optimizasyonu, serbest biçimli yüzeyler ile çalışma olanağı taşımasından ötürü oldukça karmaşık bir görev üstlenir. Bu sebeple, optimizasyon yöntemi olarak, stokastik yöntemlerden olan GA seçilmiştir.

Geometri optimizasyonuna göre daha az karmaşık olan malzeme optimizasyonu için ise ETO yöntemi uygundur (Dimcic, 2011; Kato, 2010).

Modelde 1-5 numaraları arasında tanımlı optimizasyon katsayısı, sırasıyla en uygun çözüme yakınsama durumunu ifade eder. Optimizasyon türünün belirlenmesi ile değişkenlerin de tanımlanması gereklidir. Örneğin, geometri optimizasyonu seçilmişse, NURBS özellikleri seçeneğinde kontrol noktaları değişkenler olarak tanımlanmıştır. Diğer seçenekte ise, en uygun çözüm, geometrinin eğrisel veya düzlemsel yüzeylere yakınsamasıyla oluşturulur (Şekil 5.15).

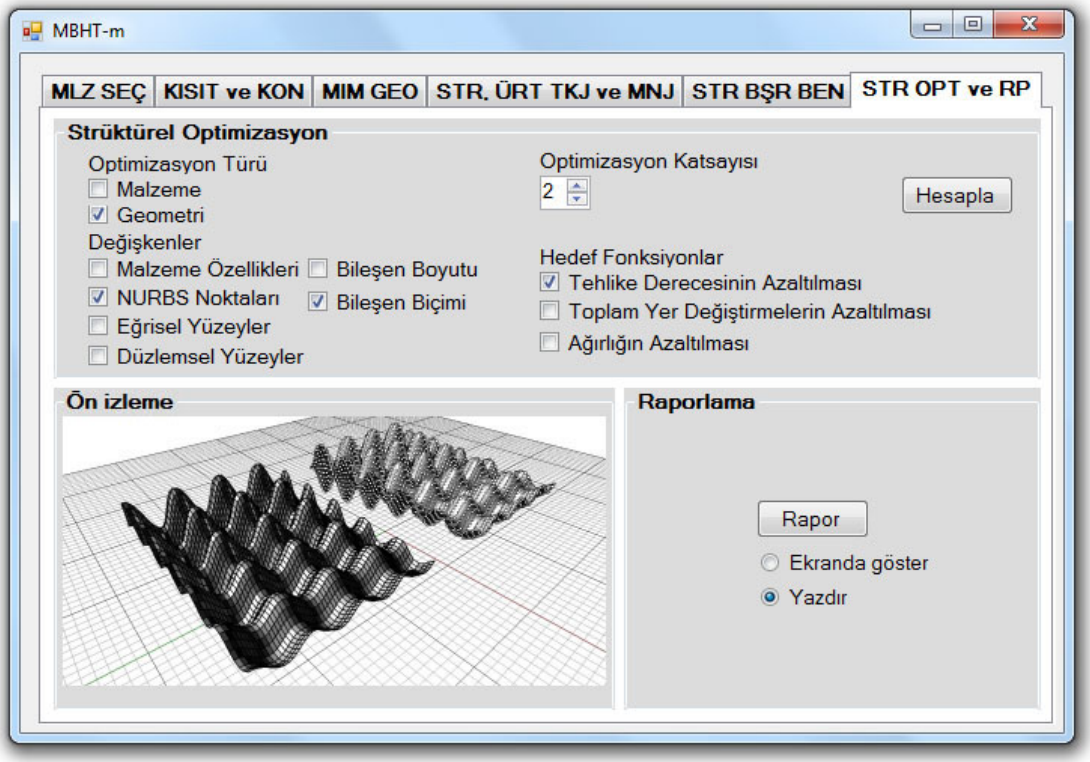


Şekil 5.15 : MBHT-m için geliştirilmiş, eğrisel ve düzlemsel yüzeylere göre geometri optimizasyonundaki aşamalar.

MBHT-m' de, yüzeyi oluşturan bileşen boyutları ve biçimleri, geometri optimizasyonundaki diğer değişken seçenekleridir. NURBS yüzeyindeki kontrol noktalarına bağlı bu değişkenler, hedef fonksiyonlara ulaşmak için farklı değerler alabilir. Eğer kullanıcı malzeme optimizasyonunu seçmişse, malzeme özellikleri strüktürel başarım benzetimine göre uyum sağlayabilen değişkenler olur. Örneğin, malzeme dayanımı, belirlenen biçim, sınır koşulları ve yüklemeler doğrultusunda, değiştirilerek arttırılabilir. Bu, MBHT-m'nin veri tabanı içinden yeni bir malzeme önerilmesi ya da başarım koşullarını sağlayacak bir malzeme tasarlanması anlamına gelir. Bu süreçte, strüktürel başarım benzetim modülündeki SEY çözücüsü, uygun çözümün oluşturulması için yeniden işleme çağırılır.

Son olarak, kullanıcıya raporlar ile enformasyon sunulur. Raporlarda, metin, grafikler ile ekran görüntüleri kullanılır. Raporların içeriğinde malzeme; kullanıcı kısıtlamaları; konum; mimari geometri; strüktür; üretim teknolojisi; montaj mantığına ilişkin tanımlamalarla; strüktürel başarım benzetimi ve strüktürel optimizasyon sonuçları bulunmaktadır.

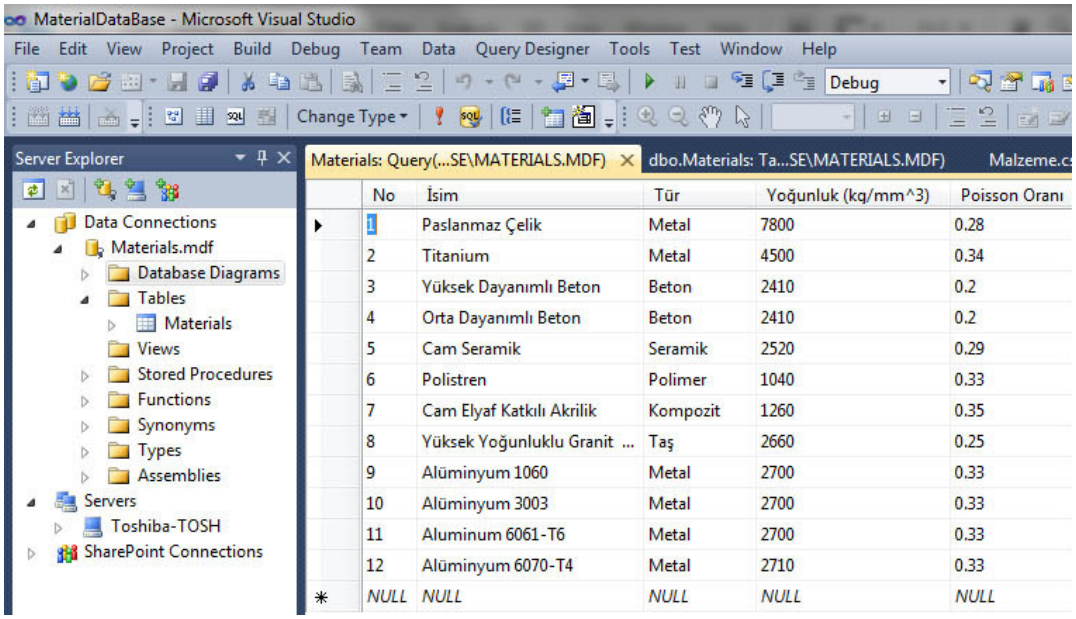
Örnek kapsamında, geometri optimizasyonu uygulamıştır. Değişkenler ise NURBS noktaları ve bileşen biçimidir. Model tarafından sunulan önerinin uygunluk derecesini belirleyen optimizasyon katsayısı 2 olarak atanmıştır. Bu katsayısının artması, en uygun çözüme ulaşmayı sağlarken, hesaplama süresini uzatabilir. Optimizasyonun hedef fonksiyonu ise, tehlike derecesinin azaltılmasıdır. Kullanıcı seçimleri ve benzetim sonuçları doğrultusundaki kısıtlamalar, veri tabanında belirlenmiştir. Optimizasyon hesaplamasının gerçekleştirilmesiyle kullanıcıya sunulan öneride, tehlike derecesinin azaltılmasına yönelik olarak, NURBS noktaları düşeyde hareket ettirilmiştir. Yüzeyin X, Y, Z yönünde sınırlandığı kenar doğrultusunda kalınlaşarak dayanımının arttırılması sağlanmıştır. Model tarafından sunulan öneride, bileşen biçimi üçgen yerine dörtgen panel olarak atanmıştır. Tehlike derecesinin düşürülmesine yönelik olarak yapılan bu işlemde optimizasyon modülü, benzetim modülünü yeniden göreve çağırmış ve bu şekilde önerinin uygunluğu denenmiştir. Son olarak, kullanıcı raporu yazdırılmıştır (Şekil 5.16).



Şekil 5.16 : MBHT-m için geliştirilmiş, "Strüktürel Optimizasyon ve Raporlama" ile ilgili kararların alındığı kullanıcı arayüzü.

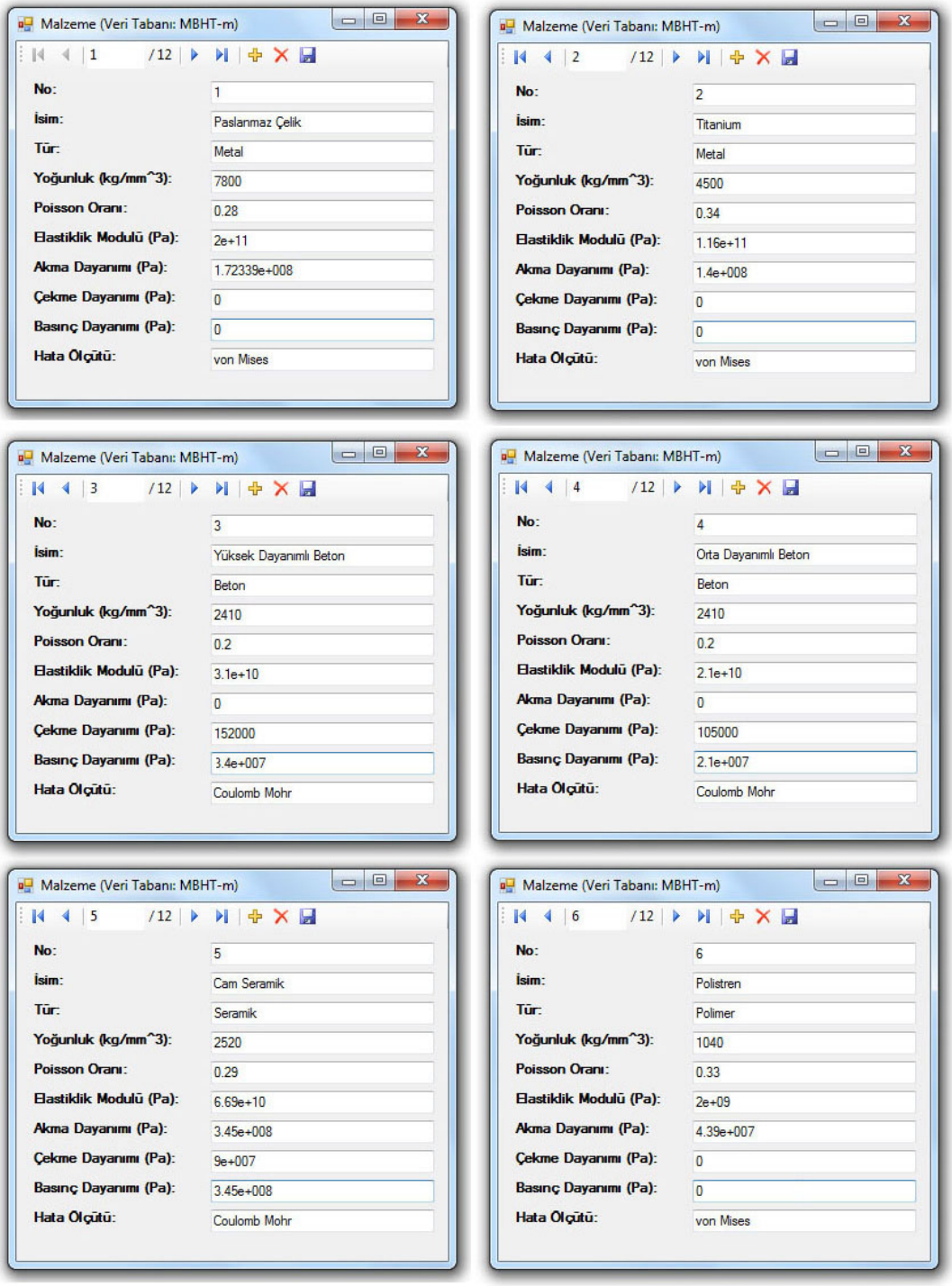
Arayüz aracılığıyla gerçekleştirilen işlemlere yönelik olarak ayrıca veri tabanı tabloları oluşturulmuştur. MBHT-m için geliştirilmiş, malzeme veri tabanı örnek nitelik taşımaktadır. Malzeme veri tabanı, Microsoft Visual Studio yazılımında

hazırlanmıştır (Şekil 5.17-5.18) (Çizelge 5.1). Veri tabanında bulunan malzeme özellikleri, SEY hesaplaması gerçekleştiren Rhino uyumlu ek yazılımı Scan & Solve içeriğinden alınmıştır (Scan & Solve, 2011). Malzeme, mimari geometri ve strüktür gibi tüm verilere ilişkin kapsamlı veri tabanının oluşturulması, MBHT-m'nin yazılıma dönüşme sürecinde en önemli görevlerden birini üstlenmektedir. Bu sebeple, veri tabanın gelişime açık olduğu gözden kaçırılmamalıdır.

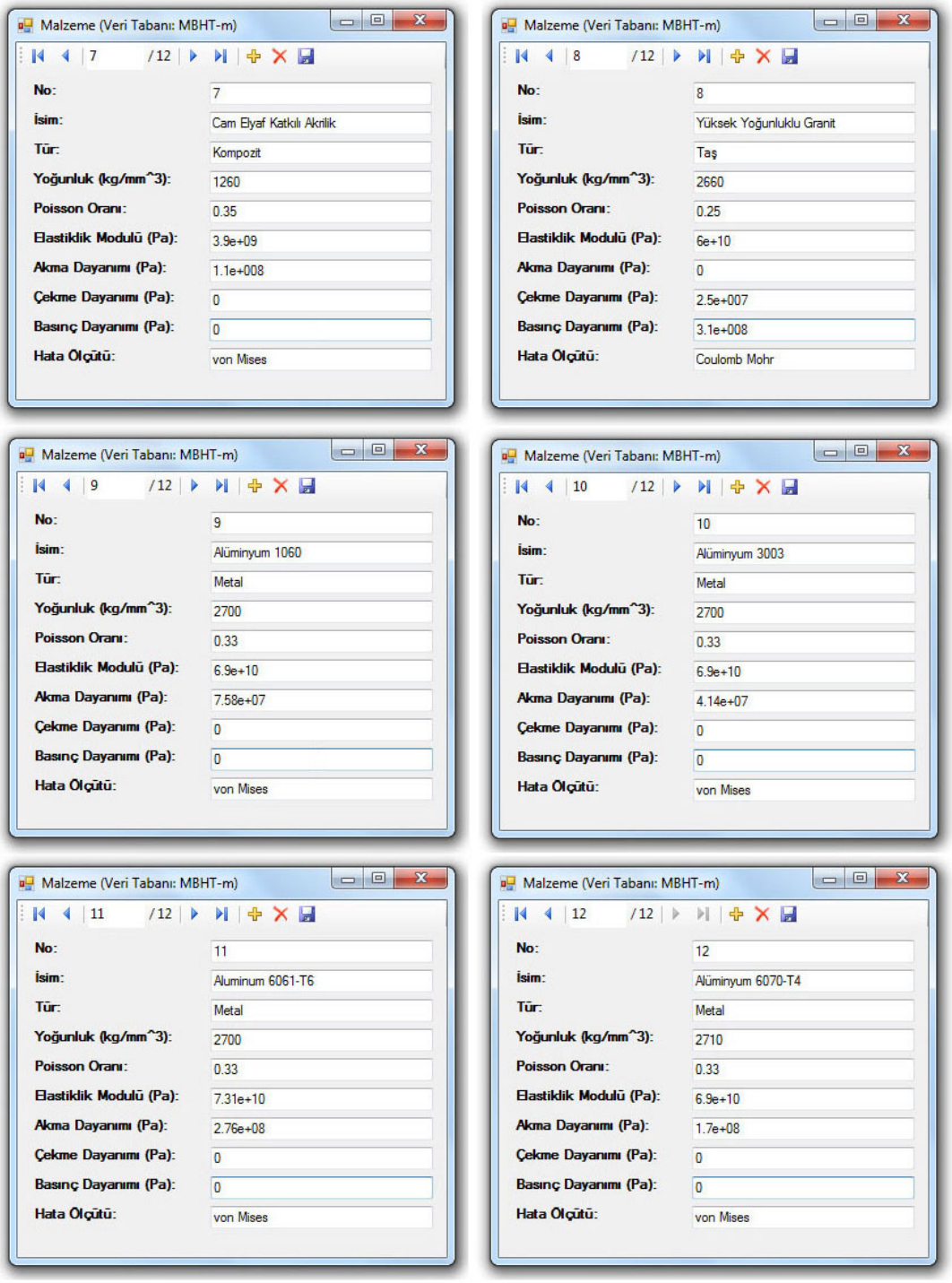


No	İsim	Tür	Yoğunluk (kq/mm^3)	Poisson Oranı
1	Paslanmaz Çelik	Metal	7800	0.28
2	Titanium	Metal	4500	0.34
3	Yüksek Dayanımlı Beton	Beton	2410	0.2
4	Orta Dayanımlı Beton	Beton	2410	0.2
5	Cam Seramik	Seramik	2520	0.29
6	Polistren	Polimer	1040	0.33
7	Cam Elyaf Katkılı Akrilik	Kompozit	1260	0.35
8	Yüksek Yoğunluklu Granit ...	Taş	2660	0.25
9	Alüminyum 1060	Metal	2700	0.33
10	Alüminyum 3003	Metal	2700	0.33
11	Aluminum 6061-T6	Metal	2700	0.33
12	Alüminyum 6070-T4	Metal	2710	0.33
NULL	NULL	NULL	NULL	NULL

Şekil 5.17 : MBHT-m için geliştirilmiş, veri tabanı tablolarının Microsoft Visual Studio yazılımında hazırlanması.



Şekil 5.18 : MBHT-m için Microsoft Visual Studio yazılımında tanımlanan malzeme veri tabanı.

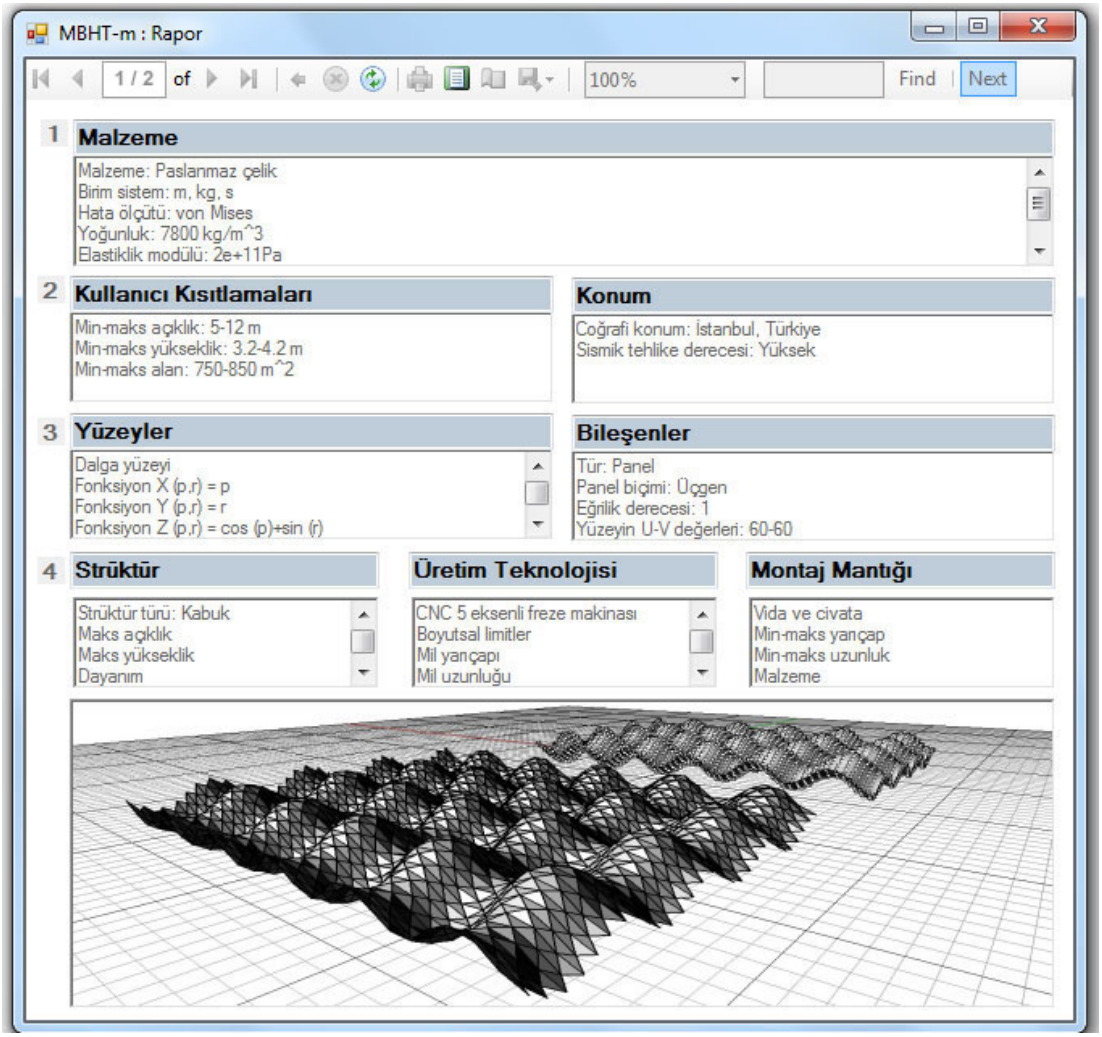


Şekil 5.18 (devam) : MBHT-m için Microsoft Visual Studio yazılımında tanımlanan malzeme veri tabanı.

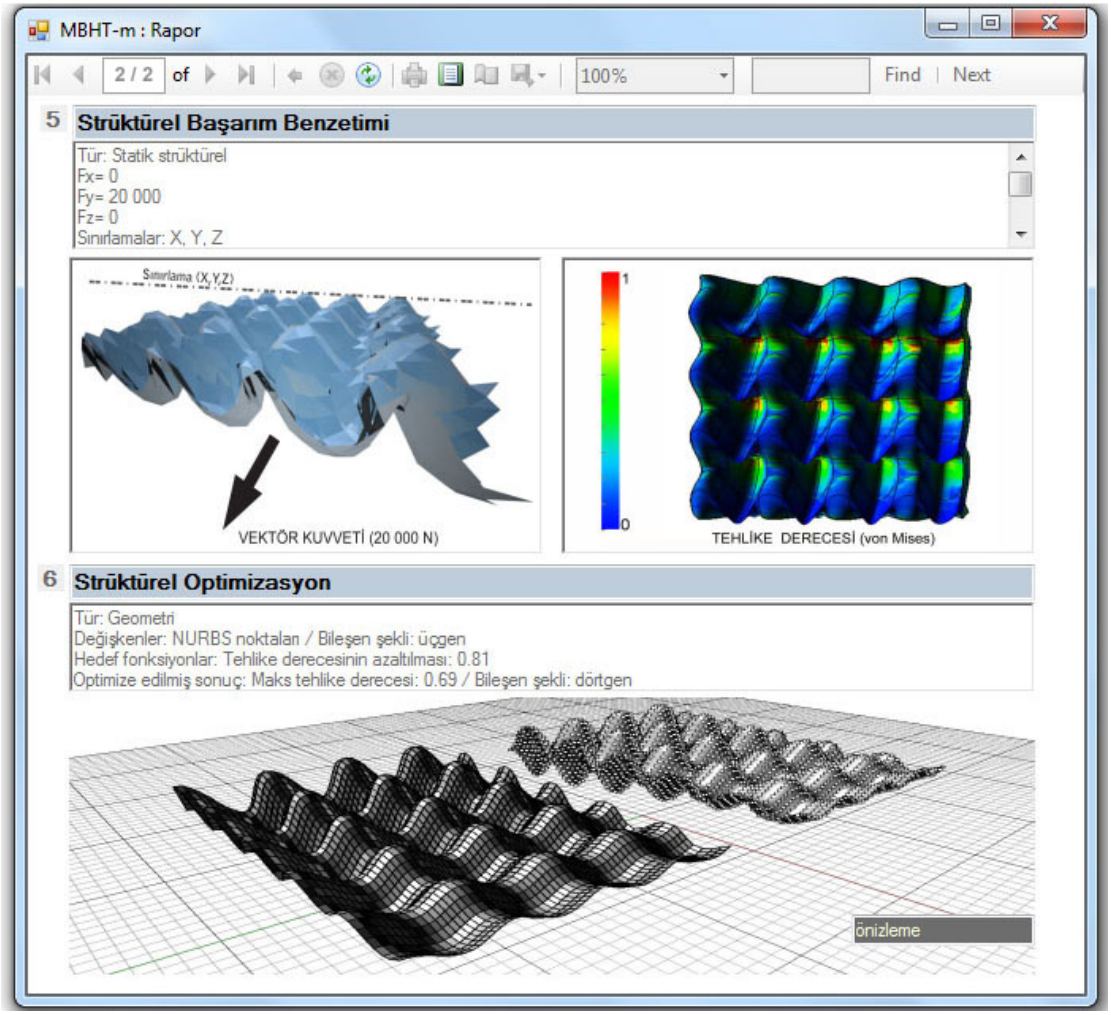
Çizelge 5.1 : Veri tabanında kullanılan malzeme özellikleri tablosu.

No	İsim	Tür	Yoğunluk (kg / mm^3)	Poisson Oranı	Elastiklik Modülü (Pa)	Akma Dayanımı (Pa)	Çekme Dayanımı (Pa)	Basınç Dayanımı (Pa)	Hata Ölçütü
1	Paslanmaz Çelik	Metal	7800	0.28	2e+11	1.72339e+008	0	0	von Mises
2	Titanyum	Metal	4500	0.34	1.16 e+11	1.4e+008	0	0	von Mises
3	Yüksek Dayanımlı Beton	Beton	2410	0.2	3.1 e +10	0	152000	3.4e+007	C. Mohr
4	Orta Dayanımlı Beton	Beton	2410	0.2	2.1 e +10	0	105000	2.1e+007	C. Mohr
5	Cam Seramik	Seramik	2520	0.29	6.69 e + 10	3.45e+008	9e+007	3.45e+008	C. Mohr
6	Polistren	Polimer	1040	0.33	2e + 09	4.39e+007	0	0	von Mises
7	Cam Elyaf Katkılı Akrilik	Kompozit	1260	0.35	3.9 e + 09	1.1e+008	0	0	von Mises
8	Yüksek Yoğunluklu Granit	Taş	2660	0.25	6e +10	0	2.5e+007	3.1e+008	C. Mohr
9	Alüminyum 1060	Metal	2700	0.33	6.9e+10	7.58e+07	0	0	von Mises
10	Alüminyum 3003	Metal	2700	0.33	6.9e+10	4.14e+07	0	0	von Mises
11	Alüminyum 6061-T6	Metal	2700	0.33	7.31e+10	2.76e+08	0	0	von Mises
12	Alüminyum 6070-T4	Metal	2710	0.33	6.9e+10	1.7e+08	0	0	von Mises

Microsoft Visual Studio yazılı aracılığıyla kullanıcı işlemleri sonucu oluşturulan raporlar da tasarlanmıştır (Şekil 5.19-5.20). Raporlar, kullanıcı seçimleri, strüktürel başarım benzetimi ve strüktürel optimizasyon sonuçlarını kapsamaktadır. Altı pencereden oluşan arayüzdeki sıra takip edilerek, kullanıcıya iki sayfadan oluşan bir rapor sunulur.



Şekil 5.19 : MBHT-m kullanıcı işlemleri sonucu oluşturulan rapor (sayfa 1/ 2).



Şekil 5.20 : MBHT-m kullanıcı işlemleri sonucu oluşturulan rapor (sayfa 2/ 2).

5.2 Modelin Değerlendirilmesi

Modelin faydaları, kısıtlamaları ve süreçte karşılaşılan zorluklar belirlenmiştir. MBHT-m'nin faydaları, 1. Bölüm' de belirlenen güncel ve yenileşimci araştırma projeleriyle karşılaştırılarak ifade edilmiştir.

Modelin faydalarından birisi, MBHT-m'nin birçok malzemeyle çalışabilmesine olanak tanımasıdır. "Zero.1" araştırma grubunun geliştirdiği İki Kararlı Yapılar çalışması, malzeme, biçim ve başarım arasındaki ilişkiyi tek bir malzeme üzerinden, özel bir çelik türüne bağlı kalarak incelemiştir (Chima ve diğ, 2006). MBHT-m ise, farklı türde birçok malzemeyle çalışan, kapsamlı bir malzeme veri tabanı üzerinden yürütülmektedir.

Modelin diğer bir faydası ise, bazı gruplar tarafından, geniş kapsamlı olarak araştırılmakta olan "Mimari Geometrinin Rasyonelleştirilmesi (MGR)" ve

bileşenlere bölme problemi ile ilgilidir (Pottman ve diğ, 2008) (Eigensatz ve diğ, 2010; Schiftner ve Balzer, 2010; Bobenko ve diğ, 2006). Farklı türde biçimler için çeşitli algoritmalar geliştirilmesine rağmen; malzeme, başarım ve üretim teknolojisi kısıtlamalarının MGR üzerindeki etkisi henüz bütünleşik olarak incelenmemiştir. MBHT-m, bu sorunun çözümü için önemli bir adımdır.

MBHT-m'nin faydalarından bir diğeri, "Biçim Bulmaya yönelik Araç ve Yöntemler (BBAY)" alanındadır. Çeşitli hesaplamalı araçlar, karmaşık görevleri yerine getirmek için geliştirilmiştir. Bu alandaki önemli çalışmalar; "Kilian" (2004) tarafından gerçekleştirilmiş, sayısal olarak benzetimi yapılmış membran ve kabuk strüktürler için geliştirilmiş asılı zincir modeli düzenekleri; topoloji optimizasyonu ile verimli strüktürel düzen için "ESO" ve "BESO" (Xie ve diğ, 2005) (Xie ve diğ, 2011); makas sistemler için geliştirilmiş "EifForm" (Shea ve diğ, 2005) ve "YSGY" olarak belirlenmiştir (Whiting ve diğ, 2009). Bu projeler, başarım kavramını tasarımla bütünleşik olarak ele alsalar da, temelde verimli strüktürlerin oluşturulması için veya belirli bir strüktür türü için geliştirilmişlerdir. Dolayısıyla, tasarım çözümleri oluşturulurken, biçimsel kısıtlamalar içermektelerdir. Bu sebeple, söz konusu araç ve yöntemlerin mimarlık pratiğinde, yaygın olarak kullanıldıklarını söylemek zordur. MBHT-m ise tasarımı geniş bir alanda ele alarak, kullanıcıya tasarım sürecinde birçok seçenek ve esneklik sunar. Bu yaklaşımda mimar ya da tasarımcı farklı tasarım seçeneklerini deneyerek keşfeder.

Biçimin, malzeme davranışına bağlı olarak tanıtıldığı "V-FEM" ile biçimi oluşturan bileşenlere farklı mekanik özellikte malzemeler atanır. Malzeme, biçim ve başarıma eşit derecede önem verilir (Oxman, 2009). Ancak bu yöntem, ürün ölçeği için üretilmiş, özel bir eklemeli üretim tekniği ile kısıtlıdır. Dolayısıyla, bina ölçeği için çözüm sağlamamaktadır. MBHT-m malzeme, biçim ve başarım ilişkisini, hem ürün, hem de mimari tasarım ve ölçeğinde ortaya çıkarmaktadır. V-FEM aynı zamanda, doğadaki sistemlerden esinlenerek belirlenmiş, hücrelerden oluşan kendine özgü bir tasarım diline sahiptir. Bu durum, mimari tasarım sürecinde kullanıcıya esneklik sunmayı hedefleyen MBHT-m' nin amacıyla çelişmektedir.

Malzeme, biçim ve başarım arasındaki ilişkiyi ortaya koyan, bütünleşik hesaplamalı tasarım anlayışıyla oluşturulmuş ve uygulanmış projeler, malzeme tabanlı hesaplamalı tasarım, benzetim ve üretim süreçlerindeki gelişmeleri yansıtmaktadır. "ICD/ITKE" 2010 Araştırma Pavyonu yenileşimci tasarım ve üretim teknolojilerinin

bütünleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Projenin tasarım modeli, SEY analizi ve CNC makinası arasında kurulmuş olan, kapalı bir sayısal bilgi döngüsüyle oluşturulmuştur (ICD/ITKE, 2010). Bu karmaşık süreç otomatik olmasına karşın, işin akışı farklı yazılım ve uzmanların görevleri üstlenmesiyle geleneksel mimari tasarım sürecine benzemektedir. Bu çalışma ayrıca, iç ve dış ortam için konfor koşullarının sağlaması bakımından daha karmaşık yapıda bulunan, bina ölçeğindeki biçimlere yönelik kapsamlı çözümler üretme kaygısı taşımamaktadır. MBHT-m, mimari tasarımda kullanılmak üzere oluşturulmuş, birçok veriyle çalışabilen, bütünleşik bir çözüm sunmaktadır. Dolayısıyla, mimar ya da tasarımcı, süreçte farklı yazılım ve uzman bilgisine ihtiyaç duymadan, tasarımın erken aşamasında birçok deneme yapabilir.

"Dimcic" (2011) tarafından sunulan Rhino uyumlu ek yazılımında, tasarım parametreleri bütünleşik olarak ele alınarak, SEY aracılığı ile serbest biçimlerin geometri optimizasyonu gerçekleştirilir (Dimcic, 2011). Ancak bu çalışma, üretim teknolojileri ve montaj mantığı ile farklı türde malzeme ve strüktürler için çözüm üretmede yetersiz kalır. Tasarım sürecinde verimliliği arttırmak için malzeme, mimari geometri, strüktür, üretim teknolojisi, montaj mantığı ve SEY analizinin tek bir hesaplamalı modelde toplanması gerekliliği bulunmaktadır (Yazıcı ve Tanaçan 2012). MBHT-m bu açığı kapatmak üzere tasarlanmıştır.

YEM' nin tasarım sürecinde kullanımının yararlarının belirlenmesi oldukça önemli olmasına rağmen (Schlueter ve Thesseling, 2009), YEM araçları erken tasarım aşamasında uyumluluk ve bütünleşme sağlayamamaktadır (Cavieres ve diğ, 2011). Çeşitli yazılımlar, binanın farklı tipteki benzetimlerinde kullanılabilir. Ancak mevcut benzetim araçları uzman bilgisi gerektirmektedir. Bu sebeple bu işlem çoğunlukla tasarımın ilerleyen aşamasında uygulanır ve tasarımın karar verme sürecine katılmazlar (Schlueter ve Thesseling, 2009). Başarım değerlendirme geri bildirimleri arasında oluşan zaman kaybını önlemek için, en uygun tasarım çözümünü sunan, tasarım görevinin birden çok kıstasa göre şekillendiği bütünsel bir değerlendirme gereklidir (Cheung ve diğ, 2012). Mimari tasarımın erken aşamasında bütünleşme sağlayan ve uzman bilgisi gerektirmeyen MBHT-m bu açıdan önemli bir katkı sağlamaktadır.

Literatür araştırmasında incelenen çalışmalar ile MBHT-m' nin karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir (Çizelge 5.2).

Çizelge 5.2 : Literatür araştırmasında incelenen çalışmalarla MBHT-m'nin karşılaştırılması.

	Zero. 1	*MGR*	*BBAY (Kilian, ESO/ BESO, Eifform, YSGY)*	*V-FEM*	*ICD / ITKE*	*Dimcic*	*YEM*	***MBHT -m***
Geometrinin rasyonelleş-tirilmesi		x						x
Belirli türde biçimsel ve strüktürel çözümler	x		x	x		x		
Farklı malzemeler kullanma, biçimsel ve strüktürel çeşitlilik								x
Malzeme, başarım ve üretim teknolojisi kısıtlamaları			x	x	x		x	x
Mimari tasarım ölçeği		x	x		x	x		x
Ürün ölçeği	x			x				x
Kapsamlı çözümler sunabilme							x	x
Tasarım sürecini bütünleşik değerlendirme	x		x		x	x	x	x
Uzman bilgisi gerektirme					x		x	

MBHT-m ile tezin 1. Bölüm' de belirlenen amaçlarına büyük oranda ulaşılmıştır. MBHT-m, mimari geometrinin rasyonelleştirilmesi, biçimsel ve strüktürel çeşitlilik sağlama; malzeme, başarım ve üretim teknolojisine ait kısıtlamaların tasarım sürecine dâhil edilmesi; hem mimari hem de ürün ölçeğinde çalışabilmesi; tasarım sürecini bütünleşik olarak değerlendirmesi; kapsamlı çözümler sunması ve uzman bilgisi gerektirmediği için mevcut araç ve yöntemlere göre fayda sağlamaktadır.

Modelin kısıtlamaları da belirlenmiştir. Öncelikli olarak, modelin birçok malzemeyle çalışmasının getirdiği bazı kısıtlamalarla karşılaşılmıştır. Örneğin, ahşap malzeme konusu başlı başına kapsamlı araştırmalara konu olmaktadır. Anizotrop davranıştaki ahşap, liflerin yönelimine göre farklılaşan davranışa sahiptir. Bu da biçim ve başarımı doğrudan etkileyecek bir durumdur. Modelde bulunan veri tabanındaki malzemeler, mevcut durumda davranışları yönlere göre değişmeyen izotrop malzemelerle oluşturulmuştur.

Buna ek olarak, bina tasarımı birçok yönüyle karmaşık olduğu için, uygun parametre, kural ve ilişkileri belirleyip modelde kullanmak, araştırmanın kritik bölümünü oluşturmaktadır. Mevcut durumda model, araştırmalar ve örnek çalışmalar ışığında yazar tarafından belirlenmiş olan parametre, kural ve ilişkilerle kısıtlanmıştır. Örneğin, malzeme, mimari geometri, strüktür, üretim teknolojisi ve montaj mantığı gibi seçimlerin yapılması önceden tanımlanmış listelerle gerçekleştirilir. Ancak, esneklik sağlanması adına, modelde bulunan değişken değerlerinin kullanıcı tarafından girilmesi ve özel seçimler yapılabilmesi mümkün kılınmıştır.

MBHT-m, Rhino uyumlu ek yazılım prototipi olarak geliştirilmiştir. Modelde karşılaşılan en önemli zorluk, tasarım parametreleriyle ilgili kapsamlı bilgi içeren modelin veri tabanın oluşturulmasıdır. Modelin diğer zorluğu ise, strüktürel başarım benzetimi ve strüktürel optimizasyon gibi karmaşık süreçlerde kullanılan matematiksel yöntemlerin MBHT-m ile bütünleştirilmesinde yatmaktadır. Bu görevlerin gerçekleştirilmesi için, başka bir yazılımın ekrana çağrılmasına gerek olmadan, MBHT-m'de çözümlenmesi oldukça kapsamlı ve karmaşık olabilen bir durumdur. MBHT-m disiplinler arası alanlardan gelen verilerle beslenmektedir. MBHT-m' nin yaygın olarak kullanılan bir yazılıma dönüşme sürecinde; mimarlık, mekanik ve yazılım mühendisliği alanlarını kapsayacak bir çalışma yürütülmesi elverişlidir. Örneğin, SEY ile strüktürel başarım benzetiminin gerçekleştirilmesi için malzeme, biçim ve sınır koşullarından oluşan global matrislerin çözülmesi gerekmektedir. Bu amaçla, mekanik mühendisleriyle işbirliği yapılarak, MATLAB gibi bir yazılım aracılığıyla matrislerin oluşturulması sağlanabilir. Benzer şekilde, MBHT-m kapsamındaki optimizasyon hesaplamaları için önerilen GA ve ETO yöntemlerinin yazılım mühendisleri ile birlikte geliştirilerek, model ile bütünleştirilmesi öngörülmektedir.

6. SONUÇLAR

Doğadaki malzeme kavramı ve optimizasyon süreçleri incelendiğinde, malzeme tarafından yönetilen tasarım süreci daha iyi algılanmaktadır. Doğada *malzeme, biçim ve başarım* yaygın mimarlık uygulamalarında olduğu gibi ayrı olarak değil, bütünleşik olarak değerlendirilmektedir. GA gibi doğal sistemlerdeki optimizasyon süreçleri, yapıya ilişkin karmaşık yapıdaki optimizasyon problemlerinin çözümüne esin kaynağı olmuştur.

Malzemenin tanınarak biçim ve tasarımla ilişkisinin sağlanması için malzeme yapısı ve malzemenin biçimsel durumunu etkileyen mekanik özellikleri önemli rol oynamaktadır. Mimarlıkta biçimin, sayısal olarak ifade edilmesine yönelik olarak mimari geometri konusunun değerlendirilmesi gerekmektedir. 3D modelleme araçları arasında kullanım faydaları açısından genel kabul görmüş olan NURBS eğri ve yüzeyleri, biçimin sayısal olarak ifade edilmesini sağlayan elverişli araçlardır.

Yaygın olarak mühendislik uygulaması olarak karşımıza çıkan strüktürel başarım değerlendirmesi, malzeme, biçim ve başarım arasındaki ilişkinin ortaya konmasını sağlar. Malzeme yapısına ilişkin bilgiler ve mimari geometri, her türlü karmaşıklıkta biçimin başarımını analiz etmekte kullanılan SEY hesaplamasında en önemli rolleri üstlenmektedir. Biçimin verilen koşullarda, strüktürel başarım değerlendirmesine göre, en uygun hale getirilmesi ise strüktürel optimizasyon süreciyle sağlanır. Benzetim ve optimizasyona ilişkin parametre, kural ve ilişkilerin ortaya konması, tıpkı doğal sistemlerde olduğu gibi malzemenin tasarım sürecinin başına getirilerek, biçim ve başarımla beraber değerlendirilmesine olanak tanır.

Mimarlıkta kullanılan sayısal araç ve yöntemler, bütünleşik hesaplamalı tasarım model oluşturmada kullanılan önemli aktörlerdir. Tüm parametre, kural ve ilişkilerin açıkça ortaya konduğu bir sistem, sorunların bütünleşik olarak incelenmesine olanak tanıyacaktır. HT araç ve tekniklerinin mimarlık alanında kullanımı ile malzeme, biçim ve başarım gibi farklı unsurlar bir arada incelenebilir. Bu anlayış doğrultusunda, bilgisayar programlama ile tasarım sorunlarına göre özelleşmiş araçlar oluşturulabilir. Yazılım modelleri oluşturmada UML elverişli bir tekniktir.

BDÜ tekniklerine ait parametre, kural ve ilişkilerin ortaya konması ile, tasarım süreci tasarımdan üretime kadar sayısal olarak ifade edilerek, bütünleşik hesaplamalı tasarım modeli kapsamında değerlendirilebilir.

Mimari tasarımın erken aşamasında uyumluluk ve bütünleşme sağlamayı amaçlayan, doğadan esinlenerek oluşturulan MBHT-m ile malzeme, biçim ve başarım kavramları doğrultusundaki kritik parametre, kural ve ilişkiler ele alınır. Model biçim türetme, strüktürel başarım benzetimi ve strüktürel optimizasyon işlemlerini gerçekleştirmek üzere oluşturulmuştur. Rhino uyumlu ek yazılım olarak geliştirilen MBHT-m, öne sürdüğü mantıksal ilişkilerle farklı BDT yazılımlarına da uygulanabilir. Buna ek olarak yeni modüllerin eklenmesiyle farklı işlevlerin modele eklenmesi sağlanabilir. Kullanıcı, 3D modelleme konusunda bilgi ve deneyime sahip olmadığı durumlarda bile modelde önceden tanımlı listelerden biçimi türeterek, yalnızca kritik parametrelerle benzetim ve optimizasyon işlemlerini gerçekleştirebilir. Erken aşamada kullanılan, iyi tanımlanmış parametre, kural ve ilişkilerin, sürecin başında tasarımı dondurduğu ve dolayısıyla yaratıcı çözümlerin üretilmesini engellediği düşünülebilir. Bu gibi durumlarda kullanılmak üzere, ekrandan yüzey seçmek gibi kullanıcıya esneklik sağlayan seçimler modelde olanaklı hale getirilmiştir. Ayrıca gerekli görülen durumlarda başarım değerlendirmesi ve optimizasyon adımlarının atlanması mümkündür.

MBHT-m' nin mimari tasarım sürecine sağladığı katkılar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- MBHT-m, mimari tasarım sürecinde kullanılan mevcut biçim türetme, benzetim ve optimizasyona yönelik yazılımlardan farklıdır. Rhino gibi yaygın kullanımı olan BDT yazılımlarında tasarlama işlemi biçim türetmeye indirgenmiş olup, 3D model malzeme kısıtlamaları göz önünde bulundurulmaksızın oluşturulur. Benzetim ve optimizasyona yönelik uygulamalar ise farklı mühendislik yazılımları olarak karşımıza çıkmaktadır. Ancak tasarım sürecinde, ilerleyen aşamada uygulandıkları için bütünleşik bir tasarım elde edilmesi mümkün olmaz. Bu türdeki yazılımlar çoğunlukla karmaşık ve uzman bilgisi gerektiren verilerle çalışmaktadır. MBHT-m kapsamındaki benzetim ve optimizasyon işlemlerinde kullanılan seçilmiş parametreler, konu hakkında uzmanlık bilgisi olmayan mimar ve tasarımcıların kolaylıkla kullanabilmesi doğrultusunda sadeleştirilmiştir.

MBHT-m, malzeme, biçim ve başarımı bütünleşik olarak ele aldığı için farklı yazılımların kullanımı ile ortaya çıkan sınırlamaları ortadan kaldırır.

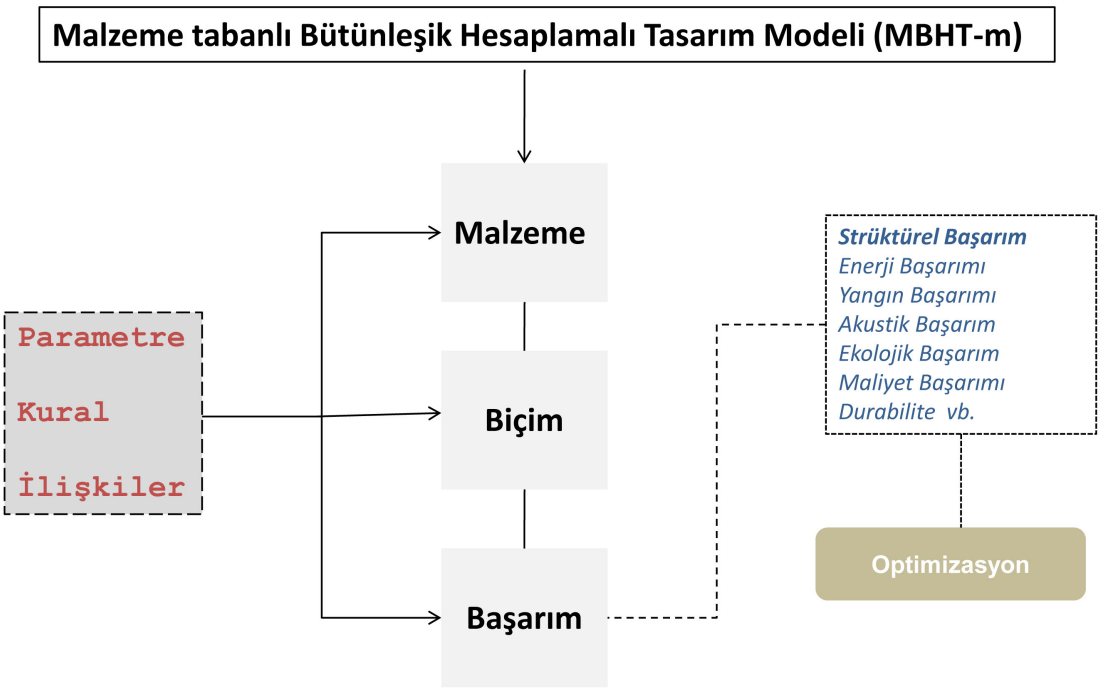
- MBHT-m ile tasarımcıya, tasarımın erken aşamasında en uygun seçenek ya da seçenekler sunulur. Model kapsamındaki optimizasyon modülünde, tasarımın uygunluk derecesini belirleyen, kullanıcı tanımlı optimizasyon katsayısı bulunmaktadır. Ancak, optimizasyon işleminin tasarımı kısıtladığı düşünülerek uygulanması istenmediği koşullarda, bu adımın atlanması da mümkündür. Bu şekilde en uygun seçenek kullanıcı tarafından belirlenebilir.
- MBHT-m tasarım sürecinde esneklik sağlar. Örneğin, mimari geometri; matematiksel eğri fonksiyonlarını içeren listeden belirlenerek oluşturabilir ya da ekrandan önceden tasarlanmış bir yüzey seçilebilir. Benzer şekilde, geometri bileşenleri modelde tanımlı listeden seçilebildiği gibi, kullanıcı tarafından özel olarak tasarlanabilir ya da kod aracılığıyla oluşturulabilir. Tasarımda esneklik sağlayan bu işlemler, kullanıcıyı tasarım sürecinde kısıtlamamak adına modelde tanıtılmıştır.
- Malzemenin temel sürücü olduğu, kritik parametrelerin iyi tanımlı olduğu bütünleşik tasarım yaklaşımıyla, mimarın tasarım sürecindeki farkındalığı arttırılır. MBHT-m ile mimar, biçim türetme, benzetim ve optimizasyon süreçleri ile eşzamanlı olarak etkileşimde bulunur. Bu şekilde, tasarımı etkileyen tüm parametre, kural ve ilişkiler kullanıcı tarafından sorgulanmış olur.
- Mimar, tasarımın erken aşamasında mühendislik desteği almadan, malzeme, biçim ve başarım arasında ilişki kurar. Karmaşık yapıdaki binaların üretim sürecinde mühendislerin uzman bilgisi şarttır. Ancak, MBHT-m en kritik tasarım parametrelerini tasarım sürecinin başına getirerek, aralarındaki ilişkinin anlaşılmasına olanak tanır. Bu sebeple, MBHT-m tasarım sürecinde mimar, tasarımcı ve yapı mühendisleri tarafından kullanılabilir.
- MBHT-m ile malzeme ve üretim teknolojilerine ait kısıtlamalar tasarım sürecinin en başında dikkate alınarak mimari geometrinin rasyonelleştirilmesi sağlanır.
- MBHT-m kapsamında isteğe bağlı olarak tanımlanabilen coğrafi konum, modelin mimarlık bağlamında değerlendirilmesine olanak tanır. Ancak

dilenirse modelde bu adım atlanabilir. Bu şekilde, MBHT-m ile endüstriyel ürün tasarımından, mimarlık tasarımına kadar her ölçekte ürün tasarlanabilir.

- YEM araçları, tasarımın erken aşamasında uyumluluk ve bütünleşme sağlayamamaktadır. MBHT-m, YEM araçlarıyla uyumlu hale getirilerek mevcut açığı kapatmak üzere kullanılabilir.
- MBHT-m kapsamında, malzeme, biçim ve başarıma ilişkin tüm parametre, kural ve ilişkiler mantıksal olarak belirlenmiştir. Model, günümüz koşullarında yaygın kullanımlı, Rhino uyumlu ek yazılımı olarak belirlenmiş olsa da, modelin yalnızca Rhino' ya yönelik olarak geliştirildiği düşünülmemelidir. MBHT-m'de kurulan mantıksal ilişkiler, farklı yazılımlara da uygulanabilir. C^{++} programlama dili kullanılarak oluşturulmuş UML diyagramları, farklı programlama dillerine de çevrilebilir.

Gelecekte Yapılabilecek Çalışmalar

Bu araştırma kapsamında, gelecek için önemli çalışma olanakları bulunmaktadır. Öncelikle, *farklı türdeki başarım değerlendirmeleri*, yeni modüllerle modele eklenebilir. Buna ek olarak, model *malzeme tasarımına* yönelik olarak geliştirilebilir. MBHT-m mevcut durumda statik strüktürel analiz gerçekleştirmek üzere tasarlanmıştır. Ancak, modal analiz ve harmonik analiz gibi farklı türde strüktürel başarım analizlerinin de yeni modüllerle modele eklenmesi mümkündür. Ayrıca, enerji başarımı, yangın başarımı, akustik başarım, ekolojik başarım, maliyet başarımı ve durabilite gibi değişik verilere ihtiyaç duyabilecek, farklı türdeki başarım değerlendirmeleri de modele eklenebilir (Şekil 6.1). Örneğin ısıl bölgelerin oluşturulması, ısı kazanç ve kayıpları ile soğutma ve ısıtma enerjilerinin hesaplanması için "EnergyPlus" ya da "Autodesk Vasari" yazılımları ekrana çağırılabilir. Yangın başarımı için "PyroSim", akustik başarım için "Adem" ve "Aurora" ve maliyet başarımı için "Nemetschek Allplan" gibi yazılımlar da modelle uyumlu hale getirilebilir. Buna ek olarak, rüzgâr ve hava akımı gibi her türlü akışkanın malzeme ve biçim üzerindeki etkisini ölçmekte kullanılan "Fluent" gibi CFD yazılımları da başarım benzetim modülüne eklemlenebilir. Ek modüllerin belirlenmesi ile optimizasyon ve raporlama modülleri de ilgili modüle cevap verecek şekilde yeniden tasarlanacaktır.



Şekil 6.1 : Gelecekte farklı başarım değerlendirmelerinin yeni modüllerle MBHT-m'ye eklenmesi mümkündür.

MBHT-m kapsamındaki malzeme seçimi ve malzeme optimizasyonu konuları geliştirilerek, malzeme tasarımı tanıtılabilir. Bu şekilde, mimari tasarım sorunlarına bütünleşik çözümler getiren model, farklı tasarım problemleri için yeni malzemelerin buluşuna olanak tanıyacaktır. Biçim ve başarım koşullarına göre malzeme mikrostrüktürünün belirlenmesinin, yalnızca mimarlık disiplini için değil, farklı disiplinler için de fayda sağlayacağı öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

Achten, **H**. (2009). Experimental Design Methods – A Review, *International Journal of Architectural Computing*, cilt. 7, sayı. 4, sf: 505-534.

Akdağ, S. G. (2011). *Yüksek binaların kent silüetine etkisinin değerlendirilmesi için CBS tabanlı bir yöntem: Zincirlikuyu-Maslak hattı örneği*, (doktora tezi), İTÜ, İstanbul.

Aliakseyeu, D., Martens, J.B.O.S., Rauterberg, G.W.M. (2006). A computer support tool for the early stages of architectural design, *Interacting with computers*, 18(4), sf: 528-555.

Allen, S. (1995). *From Object to Field*, Architectural Design: After Geometry, London, sf: 24-31.

Alp, N. Ç. (2011). *Binalarda kullanıcıların acil durum davranışının ve hareketinin etmen tabanlı bir model ile temsili ve benzetimi,* (doktora tezi), İTÜ İstanbul.

Arıkan, S. (t.y). Sonlu Elemanlar Metodunun Mühendislikte Uygulamaları, *Makina Mühendisleri Odası Arşivi*. Alındığı tarih: 12.07.2012. Adres. http://www.arsiv.mmo.org.tr/pdf/10944.pdf

Arıoğlu, N. (1993). *Yapı ürünlerinin seçimi için bir yöntem*, (doktora tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Arpacıoğlu, T. Ü. (2010). *Günışığı öncelikli fiziksel çevre tasarım destek modeli*, (doktora tezi), Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, İstanbul.

Arslan Selçuk, S. ve Gönenç Sorguç, A. (2007). Mimarlık Tasarımı Paradigmasında Biomimesis'in Etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, cilt. 22, sayı. 2, sf. 451-459.

Ashby, M. F. (1999). *Materials Selection in Mechanical Design*, Butterworth-Heinemann, Oxford-UK; (içinde) McDowell, D.L., Pancal, J.H., Choi, H., Seepersad, C.C., Allen, J.K., Mistree, F. (2010). Integrated Design of Multiscale Multifunctional Materials and Products, *Elsevier*, Burlington-MA.

Alaçam, S. (2008). *Mimari tasarımda işbirliği sürecinde kullanılabilecek bir arayüz önerisi,* (yüksek lisans tezi), İTÜ, İstanbul.

Attar, R., Aish, R., Stam, J., Brinsmead, D., Tessier, A., Gluek, M. ve Khan, A. (2010). Embedded Rationality: A Unified Simulation Framework for Interactive Form Finding, *International Journal of Architectural Computing,* 8/ 4, sf. 399-418.

Banichuk, N.V., Serra, M. ve Sinitsyn, A. (2006). Shape, optimization of quasi-brittle axisymmetric shells by genetic algorithm, *Computers and Structures*, cilt. 84, sf. 1925–33.

Bell, D. (2004). *IBM Developer Works, UML Basics: The Class Diagram*, Alındığı Tarih: 21.12.2012, Adres: http://www.ibm.com/developerworks/rational/library/content/RationalEdge/sep04/bell/

Benyus, J. (1997). *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*, William Morrow and Company, New York.

Bergson, H. (1988). [orig.publ.1908] , *Matter and Memory*, Zone Books, sf. 9-16.

Bobenko, A., Hoffmann, T. ve Springborn, B. (2006). Minimal Surfaces From Circle Patterns: Geometry From Combinatorics. *Annals of Mathematics*, 164, sf. 231 -264.

Bogdanovich, E. (2006). Multi-scale modeling, stress and failure analyses of 3-D woven composites , *Journal of Materials Science*, 41(20), 6547-6590.

Bonwetsch, T., Gramazio, F. ve Kohler, M. (2007). Digitally fabricating non-standardised brick walls, *Manu Build conference proceedings*, Rotterdam.

Bouchlaghem, D., Shang, H., Whyte, J. ve Ganah, A. (2005). Visualisation in Architecture, Engineering and Construction (AEC), *Automation in Construction*, sf. 287-295.

Burry, M. (2006). The exception that proves the rule, *Arq, Letters: Almost rectangular Thinking beyond the commonplace*, cilt. 10, sayı. 3/4, sf. 182-184.

Cavieres, A., Gentry, R. ve Al-Haddad, T. (2011). Knowledge-based parametric tools for concrete masonry walls: conceptual design and preliminary structural analysis, *Automation in Construction*, 20 (6), sf. 716–728.

Chase, S. (2005). Generative design tools for novice designers: Issues for selection, *Automation in Construction*, 14 (6), sf. 689-698.

Cheung, F.K.T., Rihan, J., Tah, J., Duce, D. Ve Kurul, E. (2012). Early stage multi-level cost estimation for schematic BIM models, *Automation in Construction,* 27, sf. 67–77.

Chima, J., Leung, E., Nikolakaki, S., Yazıcı, S. (2006). *Bi-stable Structures*, (yüksek lisans tezi), Design Research Laboratory: Architectural Association, London, UK.

Cook, M. (2007). *The Design Quality Manual: Improving Building Performance,* Blackwell Publications, Oxford, UK.

Cui, C., Ohmori, H. ve Sasaki, M. (2003). Computational Morphogenesis of 3D Structures by Extended ESO Method, *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, cilt.44, sf. 51-61.

Cryer, J. N. (1994). Design Team Agreements 3.43", in: Haviland, David (ed.) *The Architect's Handbook of Professional Practice*, The Project, AIA Press, cilt. 2, Washington, D.C.

Çamoğlu, K. (2009). *Geçmişten Günümüze Programlama Dilleri*. Alındığı Tarih: 15. 02. 2013, adres: www.chip.com.tr/blog/kadircamoglu/Gecmisten-Gunumuze-Programlama-Dilleri_1846.html

D-Shape. (2010). *Radiolara pavyonu.* Alındığı tarih: 23.09.2012, adres: http://inhabitat.com/3-d-printer-creates-entire-buildings-from-solid-rock/

Darwin, C. (2004). *The Correspondence of Charles Darwin: 1866*, cilt.14, Cambridge University Press, Cambridge.

Darwin, C. (1985). *On the origin of species by means of natural selection*. Penguin Books, New York.

De Weck, O. L. ve Kim. Y. I. (2004). *Massachusetts Institute of Technology, "Finite Element Method" Notları*, Alındığı Tarih: 07.08.2012, Adres: http://web.mit.edu/16.810/www/ içinde "CAE".

Deleuze, G. ve Guattari, F. (1987). [orig. Mille Plateaux, 1980], *A Thousand Plateaus: Capitalism & Schizopherenia*, The Athlone Press, London, sf. 140-148, 343-347.

Dimcic, M. (2011). *Structural optimization of grid shells based on genetic algorithms*, (doktora tezi), Institute of Building Structures and Structural Design, University of Stuttgart, Stuttgart.

Do, E.Y.L. (2002). Drawing marks, acts, and reacts: Toward a computational sketching interface for architectural design, *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing (AI EDAM),* 16(3), sf. 149-171.

Donders, P. *(2010). Karbon Fiber Bank.* Alındığı tarih: 26. 12. 2012, adres: http://peterdonders.com/index.php?channel=gallery2&section=viewpoint&show=2&lang=en

Eastman, C. (1994). A data model for design knowledge, *Automation in Construction,* 3:2-3, sf. 135-147.

Eastman, C. (1999). *Building Product Models: Computer Environments Supporting Design and Construction*, CRC Press, Boca Raton.

Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R. ve Liston, K. (2008). BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Architects, Engineers, Contractors, and Fabricators, *John Wiley and Sons*, NJ.

Eigensatz, M., Kilian, M., Schiftner, A., Mitra, N., J., Pottmann, H ve Pauly, M. (2010). Paneling Architectural Freeform Surfaces, *ACM SIGGRAPH 2010*, Los Angeles.

Eisenman, P. (1971). *Notes Toward a Conceptual Architecture*, Casabella, sf. 49-57.

Eriç, M. (2002). *Yapı Fiziği ve Malzemesi*, Literatür Yayınları, İstanbul.

Ersoy, H. Y. (2001). *Kompozit Malzeme*, Literatür Yayıncılık, İstanbul.

Fischer, T. (2007). Enablement or Restriction?. *12th International Aided Architectural Design Futures Conference*. Sydney. sf: 585–598.

Fischer, T., Burry, M. ve Frazer, J. (2005). Triangulation of generative form for parametric design and rapid prototyping, *Automation in Construction*, 14(2), sf: 233-240.

Fonseca, C. M. ve Fleming, P. J. (1998). Multiobjective Optimization and Multiple Constraint Handling with Evolutionary Algorithms-Part I: A Unified Formulation, *Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on*, cilt. 28, sayı. 1, sf. 38-47.

Frazer, J. (1995). *An evolutionary architecture*, Architectural Publications Association, London.

Glymph J., Shelden D., Ceccato C., Mussel J. ve Schober H. (2004). A Parametric Strategy for Freeform Glass Structures Using Quadrilateral Planar Facets, Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture, *Automation in Construction*, cilt. 13, sayı. 2, sf. 187-202.

Gmelin, S., Agger, K. ve Henry, M. (2011). Simulation Design Tools: Using Parametric Building Information Modeling and Physical Simulation for Form Finding of Double Curved Surfaces, Respecting Fragile Places, *29th eCAADe Conference Proceedings. University of Ljubljana*, Faculty of Architecture. Slovenia, sf. 215-224.

Goel, V. (1992). Ill-structured representations for ill-structured problems in Proceedings of the *Fourteenth Annual Conference of the Cognitive Science Society*, Lawrence Erlbaum Associates, Publishers, Hillsdale, New Jersey, sf. 844-849.

Gorman, M., J. (2005), *Buckminister Fuller: Designing for Mobility*, Milano: Skira, sf. 115-122.

Gramazio & Kohler. (2011). *Uçuş montajlı mimarlık.* Alındığı tarih: 29.09.2012, adres: http://www.suckerpunchdaily.com/tag/gramazio-kohler/

Granta Design. (2006). *Mike Ashby Malzeme Çizelgesi*. Alındığı tarih: 28.09.2012, adres: http://www.grantadesign.com/ashbycharts.htm

Guest, J., Igusa, T. (2008) Structural optimization under uncertain loads and nodal locations. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, sf. 116–124.

Haftka, R. T. ve Gürdal, Z. (1993). *Elements of Structural Optimization*, Kluwer Akademik Yayınları, Hollanda.

Hanafin, S., Pitts, G. ve Datta, S. (2009). Non-Deterministic Exploration through Parametric Design. *International Journal of Architectural Computing*, 7/4, sf. 605 - 622.

Hanna, S. ve Mahdavi, S.H. (2004). Modularity and Flexibility at the Small Scale: Evolving Continuous Material Variation with Stereolithography". Fabrication: Examining the Digital Practice of Architecture, Proceedings of the *23rd Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture and the 2004 Conference of the AIA Technology in Architectural Practice Knowledge Community Cambridge*, Ontario, sf. 76 -87.

Hensel, M. ve Menges, A. (2008). Inclusive Performance: Efficiency Versus Effectiveness, Architectural Design, John Wiley & Sons, London, cilt. 78, sayı. 2, sf. 54-63.

Hensen, J. L. M. ve Lamberts, R. (2011). *Building performance simulation for design and operation,* Spon Press, Abingdon-UK.

Holland, J. (1992). An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence: *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, the MIT Press, Cambridge.

Holzer, D. ve Downing, S. (2008). The Role of Architectural Geometry in Performance-orientated Design. *Proceedings of Advances in Architectural Geometry*,Vienna, sf. 99-102.

ICD/ITKE. (2010). *Stuttgart Üniversitesi Araştırma Pavyonu*. Alındığı tarih: 02. 08. 2012, adres: http://icd.uni-stuttgart.de/?p=4458

International Council for Building Research Studies and Documentation. (1982) *Working with the performance approach in building*, Rotterdam.

Iuspa, A, L., Scaramuzzino, F. ve Petrenga, P. (2003). Optimal design of an aircraft engine mount via bit-masking oriented genetic algorithms, *Advances in Engineering Software*, sayı. 34, sf. 707–720.

Kato, J. (2010) Material optimization for fiber reinforced composites applying a damage formulation, *(doktora tezi),* Institute for Structural Mechanics, University of Stuttgart, Stuttgart.

Kawamura, H. ve Ohmori, H. (2002).Computational morphogenesis of discrete structures via genetic Algorithms, Memoirs of the School of Engineering, Nagoya University, cilt. 53, sayı. 1/2, sf. 28-55.

Kilian, A. (2004). Linking Digital Hanging Chain Models to Fabrication, Fabrication: Examining the Digital Practice of Architecture - Proceedings of the *23rd Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture* and the *2004 Conference of the AIA Technology in Architectural Practice Knowledge Community*, Cambridge (Ontario), sf. 110-125.

Kilian, A. (2006). *Design exploration through bidirectional modeling of constraints*, (doktora tezi), MIT, Cambridge, MA.

Khoshnevis, B., Hwang, D., Yao, K. ve Yeh, Z. (2006), Mega-scale fabrication by contour crafting, *International journal of Industrial and System Engineering*, cilt.1, sayı.2, sf. 301–320.

Kocataşkın, F. (2000). *Yapı Malzemesi Bilimi*, Birsen Yayınevi, İstanbul

Kolarevich, B. ve Klinger, K. (2008) *Manufacturing Material Effects Rethinking Design and Making Architecture*, Routledge, New York, sf. 196 -198.

Kolarevic, B. (2009). Towards Integrative, *International Journal of Architectural Computing*, cilt.7, sayı. 3, sf. 335-344.

Kunin, I. (2003). On extracting physical information from mathematical models of chaotic and complex systems, *International Journal of Engineering Science*, sf. 417–432.

Kvan, T., Mark, E., Oxman, R., ve Martins, B. (2004). Ditching the Dinosaur: Redefining the Role of Digital Media in Education, *International Journal of Design Computing*, 7.

Koza, J. R. (1992). *Genetic programming: On the programming of computers by means of natural selection*, The MIT Press, Cambridge.

Leach, N. (2009). Digital morphogenesis, *Architectural Design*, John Wiley & Sons, London, cilt. 79, sayı. 1, sf. 32-37.

Lewitt, S.(1967). *Paragraphs on Conceptual Art*, Artforum, cilt. 5, sayı. 10.

Lim, S., Buswell, R.A, Le, T. T, Austin, S.A, Gibb, A. G. F ve Thorpe, T. (2012). Developments in construction-scale additive manufacturing processes, *Automation in Construction*, 21, sf. 262–268.

Lim, S., Le, T., Webster, J., Buswell, R., Austin, S, Gibb, A., Thorpe, T. (2009). Fabricating construction components using layer manufacturing technology, (GICC'09), *Global Innovation in Construction Conference*, Loughborough University, Leicestershire, UK.

Lindsey, B. (2006). *Digital Gehry*, Birkhauser, Torino.

Llach, D., C. (2010). Shift+Design: Scripts and Other Design Artifacts, *International Journal of Architectural Computing*, cilt. 8, sayı. 1, sf. 17-28.

Lynn, G. (1999). *Animate Form*, Princeton Architectural Press, New York, sf. 8-43.

Macdonald, A. J. (2002). *Structure & Architecture*, Architectural Press, Oxford.

Madenci, E. ve Güven, İ. (2006). *The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS*, Springer, New York.

Maher, M. L. ve Garza, A. G. S. (1997). Case-Based Reasoning in Design, *IEEE Expert: Intelligent Systems and Their Applications*, cilt. 12, sayı. 2, sf. 34-41.

Mallory-Hill, S., Preiser, W. F. E. ve Watson, C. (2012). *Enhancing Building Performance*, Wiley-Blackwell, Singapore.

Mandar S. Chitnis, Lakshmi Ananthamurthy, and Pravin S. Tiwari.(2003), *Developer.com,* Alındığı Tarih: 21.12.2012, Adres: http://www.developer.com/design/article.php/10925_2206791_2/The-UML-Class-Diagram-Part-1.htm

Mathworld. (2012). *Wolfram Mathematica*. Alındığı tarih: 02.08.2012, adres: http://mathworld.wolfram.com/NURBSSurface.html

March, L. (1976), *The Architecture of Form*, Cambridge University Press, Cambridge.

Markus, T. A. (1972), *Building Perfomance*, Wiley, New York.

McDowell, D. L., Pancal, J.H., Choi, H., Seepersad, C. C., Allen, J.K. ve Mistree, F. (2010). *Integrated Design of Multiscale Multifunctional Materials and Products*, Elsevier, Burlington-MA.

McLaughlin, B. D., Pollice, G. ve West, D. (2007). *Head First Object-Oriented Analysis & Design*, O'Reilly Media.Inc., California.

Menges, A. (2007). Computational Morphogenesis: Integral Form Generation and Materialization Processes, *3rd Int'l ASCAAD Conference on Em'body'ing Virtual Architecture, ASCAAD-07,* Alexandria-Egypt, sf. 725-744

Menges, A. (2008). Manufacturing Performance, *Architectural Design*, John Wiley & Sons, London, cilt. 78, sayı. 2, sf. 42-47.

Menges, A. (2009). Integral Computational Design for Composite Spacer Fabric Structures, *Proceedings of the Tweenty seventh Annual Conference of the ECAADE*, Istanbul, sf. 289-297.

Mori, T. (2002). *Immaterial & Ultramaterial*, George Braziller, New York, sf. 3-30.

Oğultekin, G. (2007). *Yüksek teknoloji yapılarında biçim / sentez ilişkisi*, (doktora tezi), İTÜ, İstanbul.

Ohmori, H. (2008). Computational Morphogenesis Its Current State and Possibility for the Future, *Proceedings of the 6th International Conference on Computation of Shell and Spatial Structures*, Ithaca, NY.

Ohmori, H., Kimura, T. Ve Maene, A. (2009). Computational Morphogenesis of Free Form Shells, *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium, Valencia.*

Olson, G. B. (1997). Computational Design of Hierarchically Structured Materials, Science, cilt. 227, sayı. 5330, sf. 1237-1242; (içinde) McDowell, D.L., Pancal, J.H., Choi, H., Seepersad, C.C., Allen, J.K., Mistree, F. (2010). *Integrated Design of Multiscale Multifunctional Materials and Products*, Elsevier, Burlington-MA.

Onaran, K. (2006). *Malzeme Bilimi*, Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul.

Oxman, **N.** (2007). Get Real Towards Performance-Driven Computational Geometry, *International Journal of Architectural Computing*, cilt. 5, sayı. 4, sf. 663-684.

Oxman, N. ve Rosenberg, J. L. (2007). Material-based Design Computation: An Inquiry into Digital Simulation of Physical Material Properties as Design Generators, *International Journal of Architectural Computing*, cilt. 5, sayı.1 , sf. 26-44.

Oxman, N. (2009). Material-based design computation: Tiling behavior". ReForm: Building a Better Tomorrow, Proceedings of the *29th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture*. Chicago, sf. 122-129.

Oxman, N. (2010). *Material-based design computation*, (doktora tezi), MIT, Cambridge, MA.

Oxman, R. (2008). Performance-based Design: Current Practices and Research issues. *International Journal of Architectural Computing*, cilt. 06, sayı. 01, sf. 1-18.

Otto, F. (1995). *Pneu and Knochen*, Karl Kraemer Vertrieb, Stuttgart, sf. 47-53.

Piegl, L. ve Tiller, W. (1997). *The Nurbs Book*, Springer-Verlag, Berlin.

Piqueira, J. R. C. (2009). A mathematical view of biological complexity, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, cilt. 14, sayı. 6, sf. 2581-2586.

Pak, B. (2009). *Design activities and decisions in conventional and computer aided architectural design processes*, (doktora tezi), İTÜ, İstanbul.

Passino, K.M. (2005). *Biomimicry for Optimization, Control and Automation*, Springer -Verlag, London.

Pektaş, Ş. T. (2009). Mimarlıkta Yapı Bilgi Modellemesi Uygulamaları, Mimarlık Dergisi, Mimarlar Odası, Ankara, s. 346. Alındığı tarih: 28. 12.2012, adres:http://www.mo.org.tr/mimarlikdergisi/index.cfm?sayfa=mimarlik&DergiSayi=360&RecID=2024

Pottmann, H., Schiftner, A. ve Wallner, J. (2008). Geometry of Architectural Freeform Structures. *Internationale Mathematische Nachrichten*, 209. sf.15 -28.

Powell D. (1993) Skolnick M. Using Genetic Algorithms in Engineering Design Optimization with Non-Linear Constraints. In Proceedings of the 5th International Conference on Genetic Algorithms. Morgan Kaufmann Publishers.

Prousalidou, E. ve Hanna, S. (2007). A Parametric Representation of Ruled Surfaces. Proceedings of the *12th International Conference on Computer Aided Architectural Design Futures*. Sydney. (2007), sf. 265-278.

Ramm E., Maute K. ve Schwarz S. (1998). Conceptual design by structural optimization, In: Proceedings of the Euro–C 1998 *Conference on Computational Modelling of Concrete* (eds. Borst R. de et al.), Badgastein, Austria.

Ratze. C, Gillet. F, Müller, J. P. ve Stoffel. K. (2007). Simulation modelling of ecological hierarchies in constructive dynamical systems. *Ecological Complexity*, sf. 13 – 25.

Reiser, J. (2003). On Material Logics in Architecture: Interview with RUR, *Landscape and Urbanism*, AA Publications, London, sf. 102-110.

Rhinoceros 4. (2012). Yazılım yardım menüsü.

Roland, C. (1970). *Frei Otto- Structures*. Praeger Publishers, New York, sf. 84-93.

Rossi, F. ve Liveri, M. L. T. (2009). Chemical self-organization in self-assembling biomimetic systems. *Ecological Modelling*, sf. 1857–1864.

Sadd, M. H. (2005). *University of Rhode Island, "Introduction to Finite Element Methods" Notları*, Alındığı Tarih: 05.08.2012, Adres: http://mcise.uri.edu/sadd/mce565/FEM%20Lecture.ppt

Sadd, M. H. (2012) a. *University of Rhode Island, "Two Dimensional Problem Solution"Notları.* Alındığı Tarih: 28.12.2012, Adres: http://mcise.uri.edu/sadd/mce571/mce571.htm

Sadd, M. H. (2012) b*. University of Rhode Island, "Application Solutions of Plane Elasticity" Notları,* Alındığı Tarih: 05.08.2012, Adres: http://mcise.uri.edu/sadd/mce561/Elasticity3.ppt

Scan & Solve. (2011). *Intact Solutions*. Alındığı tarih: 02.08.2012, adres: http://www.intact-solutions.com/sns_documents/glossary.htm

Schiftner, A., Baldassini, N., Bo, P. ve Pottmann, H. (2008). Architectural Freeform Structures From Single Curved Panels. *Proceedings of Advances in Architectural Geometry*. Vienna.

Schiftner, A. ve Balzer, J. (2010). Statics-Sensitive Layout of Planar Quadrilateral Meshes. *Advances in Architectural Geometry Conference Proceedings,* Vienna.

Schlueter, A. ve Thesseling, F. (2009). Building information model based energy/exergy performance assessment in earlydesign stages, *Automation in Construction*, 18, sf. 153–163.

Seely, J. (2004). Digital fabrication in the architectural design process, (yüksek lisans tezi), MIT, Cambridge, MA.

Sevdin, A. (1992) *Mimari tasarımda bina total performansı kavramı: metro istasyonlarında değerlendirme,* (yüksek lisans tezi), İTÜ, İstanbul.

Shea, K., Aish, R. ve Gourtovaia, M. (2005). Towards Integrated Performance-driven Generative Design Tools, *Automation in Construction*, sf. 253-264.

Shelden, D. (2002). *Digital surface representation and the constructability of Gehry's architecture*, (doktora tezi), MIT, Cambridge, MA.

Shotcrete. (2012). *Sprayed Concrete.* Alındığı tarih: 12.09.2012, adres: http://www.shotcrete.co.uk

Sirmen, A. Y. (1997). *Performans yaklaşımı ile yapı bileşenlerinin değerlendirilmesi için bir yöntem üzerine inceleme*, (yüksek lisans tezi), İTÜ, İstanbul.

Skyttner, L. (1998). The Future of Systems Thinking. *Systemic Practice and Action Research*, cilt. 11, sayı. 2, sf. 193-205.

Somol, R. E (1999). Dummy Text, or The Diagrammatic Basis of Contemporary Architecture, *Diagram Diaries*, Thames & Hudson, London, sf. 7-25.

Springer Images. (2012). *Genetik algoritma akış diyagramı.* Alındığı tarih: 29. 09. 2012, adres: http://www.springerimages.com/Images/Engineering/1-10.1007_s00202-003-0215-1-3

Spuybroek, L. (2005). *NOX*, Thames & Hudson, London, sf. 158-172.

Sweeney, J. J. ve Sert, J. L. (1960). *Antoni Gaudí*, Verlag Gerd Hatje, Stuttgart, sf. 83-89.

Tanaçan, L. (1993). *Hafif duvar tuğlası üretiminde perlit ve bazı katkıların etkilerinin araştırılması*, (doktora tezi), İTÜ, İstanbul.

Tang, M. ve Anderson, J. (2010). Mathematically Driven Forms and Digital Tectonic: A formula for realizing the digital. In *Proceedings of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA),* New York, 97-102.

Tereci, A. (2006). *Evaluation of EU building energy performance standards related to commercial buildings*, (yüksek lisans tezi), İTÜ, İstanbul.

Terzidis, K. (2006). Algorithmic Architecture, Elsevier, Oxford-UK.

Teuffel, P., Plomp. H., Heinzelmann., F. ve Geurts. C. (2009). Computational morphogenesis using environmental simulation tools. In *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium,* Valencia.

Togan, V. ve Daloglu A. (2006). Optimization of 3d trusses with adaptive approach in genetic algorithms, *Engineering Structures*, cilt. 28, sf. 1019–27.

Turrin, M, Von Buelow, P., Kilian, A. ve Stouffs, R. (2012). Performative skins for passive climatic comfort: A parametric design process, *Automation in Construction*, 22, sf. 36–50.

Turkle, S. (2005). *The second self: Computers and the human spirit* (20th anniversary edition), MIT Press, Cambridge.

Utku, H. (2008). Sistem Benzeşimi için Sonlu Elemanlar Yöntemi, Alındığı Tarih: 07.08.2012, Adres: http://www.belgeler.com/blg/28wn/sonlu-elemanlar-yntemi

Vasiliev, V. V. ve Gürdal, Z. (1999). *Optimal Design, Theory and Applications to Materials and Structures*. Technomic publication, Lancaster, Pennsylvania.

Van Vlack, L. H. (1990). *Malzeme Bilimine Giriş*. Birsen Yayınevi, İstanbul.

Vitruvius. (1998). *Mimarlık Üzerine On Kitap.* Şevki Vanlı Mimarlık Vakfı, İstanbul.

Von Bülow, P. (2007). *An intelligent genetic design tool (IGDT) applied to the exploration of architectural trussed structural systems*, (doktora tezi), ILEK, University of Stuttgart, Stuttgart.

Von Bülow, P., Falk, A. ve Turrin, M. (2010). Optimization of structural form using a genetic algorithm to search associative parametric geometry, Structures & Architecture, Proceedings of *the First International Conference on Structures and Architecture (ICSA 2010),* Portugal.

Von Bülow, P. (2008). Using Evolutionary Computation to explore geometry and topology without ground structures, Proceedings of *the 6th International Conference on, Computation of Shell and Spatial Structures IASS-IACM 2008: Spanning Nano to Mega*, Cornell University, Ithaca, NY.

Wahlroos-Ritter, R. (2009). Neil Leach ile Röpörtaj, USC School of Architecture *Idea News Spring*, Dialogues 14, Los Angeles- CA.

Whiting, E., Ochsendorf, J. ve Durand, F. (2009). Procedural Modeling of Structurally-sound Masonry Buildings. *ACM SIGGRAPH Conference Proceedings.*

Wyss Enstitüsü. (2012) a. *Harvard Üniversitesi*. Alındığı tarih: 02. 10. 2012, adres: http://wyss.harvard.edu/viewmedia/84/biologically-made-glass-

Wyss Enstitüsü. (2012) b. *Harvard Üniversitesi*. Alındığı tarih: 02. 10. 2012, adres: http://wyss.harvard.edu/viewmedia/95/cover-1-aizenberg

Wyss Enstitüsü. (2012) c. *Harvard Üniversitesi*. Alındığı tarih: 02. 10. 2012, adres: http://wyss.harvard.edu/viewmedia/91/artificial-biolenses-aizenberg

Xie.Y. M., Felicetti, P., Tang. J. W. ve Burry, M. (2005). Form finding for complex structures using evolutionary structural optimization method. *Design Studies*, cilt. 26, sayı. 1, sf. 55-72.

Xie, Y. M., Zuo, Z.H., Huang, X., Tang, J.W., Zhao, B. ve Felicetti, P. (2011), Architecture and Urban Design through Evolutionary Structural Optimisation Algorithms. *International Symposium on Algorithmic Design for Architecture and Urban Design*, Tokyo, Mart 14-16.

Yaman, H. (1996). Yüklenici firmalar için bir inşaat ekipmanı yönetim enformasyon sistemi modeli, (doktora tezi), İTÜ, İstanbul.

Yaman, H., Çetiner. İ., Tavil, A. ve Çoşkun, K. (2008) A conceptual model for analyzing life-cycle coat of residential windows in Turkey, *Proceeding of the 2008 World Sustainable Building Conference*, 21-25 September 2008.

Yang, X. Y., Xie, Y. M. ve Steven, G. P. (2005), Evolutionary methods for topology optimisation of continuous structures with design dependent loads, *Computers and Structures*, cilt. 83, sf. 956–963.

Yaşa, E. (2010). *Avlulu bina biçiminin farklı iklim bölgelerinde iklimsel performansa göre optimizasyon için geliştirilen bir yöntem*, (doktora tezi), İTÜ, İstanbul.

Yazıcı, S. (2009). Yenilikçi Malzeme Sistemleri, *Mimarlıkta Malzeme,* Mimarlar Odası Yayınları, İstanbul, sayı. 14, sf. 42-48.

Yazıcı, S. (2010). Malzeme Zekası ile Mekanı Kurgulama, *Mimarlıkta Malzeme,* sayı.15, İstanbul, sf. 53-63.

Yazıcı, S. (2011). Computing through Holistic Systems Design Method: Material Formations Workshop, *Dearq Journal of Architecture*, Universidad de Los Andes, sayı. 09, sf. 90-101.

Yazıcı, S. (2012). ParaMaterial Topographies for the Built Environment, *Rio+20 Birleşmiş Milletler Konferansı, Eğitim Programı*, Hindistan, sf: 28-34.

Yazıcı, S. ve Tanaçan, L. (2010). The Optimization of the Double-Curved Computational Surface through the Materialization Process, Sigradi (Sociedad Iberoamericana de Grafica Digital) *XIV Congress of Iberoamerican Society of Digital Graphics Proceedings,* Disruption, Modeling and Construction: Shifting Dialogues, Bogota-Colombia.

Yazıcı, S. ve Tanaçan, L. (2010). Workshop: Material Formations, Spontaneous Schooling, *London Festival of Architecture, Nous Gallery and 4M Group,* Spontaneous Schooling Publication, London-UK.

Yazıcı, S. ve Tanaçan, L. (2012). Material in Performance-driven Architectural Geometry, Association of Collegiate Schools of Architecture (ACSA) *100th Meeting, 1-4 March 2012, Digital Aptitudes Conference*, Massachusetts Institute of Technology (MIT), Boston-MA, sf: 266-273.

Yıldız, Ö. (2010). *Hesaplamalı mimarlıktan zaman temelli etkileşimli mimarlığa geçiş,* (yüksek lisans tezi), İTÜ, İstanbul.

Yu-Ying, W. (2010). *Nefes Alan Koltuk*. Alındığı tarih: 10.08.2012, adres: http://mocoloco.com/fresh2/2010/05/25/breathing-chair-by-wu-yu-ying.php

Zhao, J., Wang. X.M. ve Chang. J.M. (2010). Sound insulation property of wood–waste tire rubber composite, *Composites Science and Technology,* cilt. 70, sayı. 14, sf. 2033-2038.

EKLER

EK A : MBHT-m Akışı
EK B : MBHT-m Kullanıcı Seçimleri
EK C : MBHT-m Kısıtlamaları
EK D : Matematiksel yüzey için farklı malzemelerle, aynı sınır koşullarında gerçekleştirilmiş SEY Benzetim Raporları (Scan & Solve yazılımı)
EK E : Yazar tarafından yürütülen Malzeme ile Mimari Geometride Verimlilik (2012) çalışması için ANSYS Workbench platformunda oluşturulmuş, NASTRAN yazılımı ile uyumlu, SEY' in örnek kod strüktürü.

EK A : MBHT-m Akışı

1. Tasarımcı, mimari tasarım sürecinde MBHT-m' yi kullanmak istiyor mu?
2. Sınama Evet (E) / Hayır (H) Evet ise bilgi toplama aşamasında veri depolanmış olan Malzeme Tablosu'ndan malzeme seçimi yapılır.

3. Tasarımcı gereksinimi doğrultusunda Tasarım Kısıtlamaları'nı belirler: maksimum (maks)-minimum (min) yükseklik, maks-min kullanım alanı, maks-min açıklık mesafesi.

4. Tasarımcı, çevresel veriler ile dış ortam koşullarının belirlenmesi amacıyla hangi şehirde bulunduğu sorusuna yanıt vererek Tasarım Kısıtlamaları'nı belirler.

5. Tasarım ürün ölçeğinde ise hangi şehirde bulunduğu sorusunun cevaplamasına gerek yoktur.

6. Bilgi toplama aşamasında mimari geometrinin oluşturulması için önceden tanımlanmış Matematiksel Yüzeyler Tablosu'nda veri depolanmıştır.

7. Tasarımcı yüzey oluşturmak amacı ile Matematiksel Yüzeyler Tablosu'ndan seçim yaparak eğri parametrelerini belirler ya da ekrandan kendi tasarladığı yüzeyi seçer.

8. Tablodan yapılan seçim ile tasarımcı mimari biçimi uygun buldu mu? E /H

9. Hayır ise mevcut yüzey eğrilerinin parametreleri değiştirilir ya da tablodan başka yüzey seçenekleri denenir.

10. Evet ise döngüye devam edilir.

11. Tasarımcıya şu soru yönetilir: Açık yüzeyler kapatılsın mı? E / H

12. Evet ise, açık yüzeyler, düşey doğrultuda düz yüzeylerle (cam + dikmeler) kapatılır.

13. Bilgi toplama aşamasında strüktürün oluşturulması için Strüktür Tablosu'nda veri depolanmış ve ilgili kısıtlamalar sayısal olarak belirlenmiştir (maks. yükseklik, maks. açıklık mesafesi, biçimsel örüntü, dayanım ve rijitlik değerleri vb.)

14. Tasarımcı, ekrandan kendi tasarladığı strüktürü seçer ya da tablodan strüktür türü seçimini yapar: Yığma, iskelet, kabuk, asma-germe, kafes ve şişme.

15. Bilgi toplama aşamasında mimari ölçekteki geometrinin üretilmesini sağlamak amacıyla Bileşen Tablosu' nda veri depolanmıştır.

16. Tasarımcı, tasarım kararlarına göre (ölçek, hızlı prototipleme ile tek parçada üretilebilme olanağı ya da özgün strüktür çözümü gibi durumlarda) dilerse parçalara bölme işlemini atlayabilir.

17. Tasarımcı mimari geometriyi parçalara bölmek istiyorsa, ekrandan tasarladığı parçayı seçer ya da tablodan parçalara bölme türünü, biçimsel parametreleri ile belirler: Panel, şerit ya da kalıp sistemi.

18. Tasarımcı mimari geometriyi uygun buldu mu? E /H

19. Hayır ise parametreler değiştirilir ya da tablodan yeni bir parçalara bölme türü belirlenir.

20. Evet ise döngüye devam edilerek Üretim Teknolojisi (yerinde üretim, seri üretim, lazer kesim, su jeti kesim, CNC kesim, katkılı üretim ya da özel robotlar)

belirlenir. Bilgi toplama aşamasında Üretim Teknolojisine ait kısıtlamalar veri tabanında bulunmaktadır.

21. Strüktürel Başarım' ın incelenmesi için sınır koşulları ile yüklemeler belirlenir. Tasarımcı statik yükleme koşullarını, sınırlamalar ile birlikte oluşturur.

22. Yerçekiminin hesaba katılması doğrultusunda tasarımcı kararını belirtir.

23. Hesaplama işlemi başlatılarak SEY aracılığı ile Strüktürel Başarım Benzetimi (statik strüktürel analiz) gerçekleştirilir.

24. Bilgi aşamasında farklı tipte strüktürel başarım benzetimleri (titreşim, yorulma ya da rüzgâr yükü gibi), yapı fiziği, yangın mühendisliği, akustik başarım, ekolojik verimlilik, durabilite ve ortalama maliyet değerlendirmeleri için veri depolanmıştır. Tasarımcının isteği doğrultusunda ayrı hesaplama modüllerinde bu işlemler gerçekleştirilir.

25. Çözümleme sırasında seçimlerle oluşturulan mimari geometrinin uygunluğu, sistemdeki kısıtlamalara bağlı olarak Hata Değerlendirmesi ile sorgulanır.

26. Bilgi toplama aşamasında Strüktürel Optimizasyon ile ilgili (malzeme ve geometri optimizasyonu) veri depolanmıştır. Biçimin uygunluğu değerlendirilir. Geometri optimizasyonunda, her türlü karmaşıklıktaki mimari geometri, kademeli olarak kararlı birincil geometrilere (eğrisel ya da düzlemsel yüzeylere) indirgenir ya da NURBS noktaları değiştirilir. Malzeme optimizasyonunda ise malzeme özellikleri başarım benzetimi sonuçlarına göre yeniden ele alınır.

27. Tasarımcı sonuçtan memnun mu? E / H

28. Hayır ise, Optimizasyon Türü ve Katsayısı tasarımcı tarafından yeniden belirlenerek farklı bir çözüm üretilir.

29. Evet ise, Raporlama aşamasına geçilerek kullanıcı seçimleri, benzetim ve optimizasyon sonuçlarını içeren rapor yazdırılır ya da ekranda gösterilerek işlem sonlandırılır.

EK B : MBHT-m Kullanıcı Seçimleri

Çizelge B.1 : MBHT-m kullanıcı seçimleri tablosu.

Kullanıcı Seçimleri	Malzeme	Kullanıcı Kısıtlamaları	Bağlam	Mimari Geometri	Strüktür
	• Veri tabanından malzeme seçimi yapılır. ya da • Malzeme özellikleri tanıtılır.	• Kısıtlamalar belirlenir. Min açıklık Maks açıklık Min yükseklik Maks yükseklik Min alan Maks alan	• Coğrafi konum belirlenir.	• Matematiksel yüzey belirlenir. İsim Fonksiyonlar Değişkenler Nokta sayısı ya da • Ekrandan seçim yapılabilir. • Açık yüzeyler kapatılabilir. • Bileşenler belirlenebilir. ya da • Ekrandan seçim yapılır. ya da • Ekrana kod çağrılır.	• Strüktür türü belirlenir. Yığma İskelet Kabuk Asma germe Çerçeve Şişme
				Fonksiyonlar Küp Prizma Silindir Koni Küre Halka Dalga Klein Möbius Enneper Minimal yüzey Deniz kabuğu Katenoid Helikoid Paraboloid Hiperboloid Kappa **Bileşenler** Panel Şerit Kalıp sistemi	**Panel** Biçim Eğrilik derecesi U, V değerleri Min kalınlık Maks kalınlık Min genişlik Maks genişlik Min uzunluk Maks uzunluk **Panel biçimi** Üçgen Dörtgen Altıgen Dairesel **Şerit** Min genişlik Maks genişlik Min kalınlık Maks kalınlık **Kalıp sistemi** Kalıp sayısı Yüzey bölünme aksları

Çizelge B.1 (devam) : MBHT-m kullanıcı seçimleri tablosu.

Kullanıcı Seçimleri	Üretim Teknolojisi	Montaj Mantığı	Benzetim
	• Üretim teknolojisinin türü belirlenir.	• Montaj mantığı belirlenir.	• Benzetim işleme konur.
	Lazer kesim Su jeti kesim CNC freze Özel robot 3D çıktı Yerinde Seri	Tür Eleman sayısı Konumlandırma Min yarıçap Maks yarıçap Min uzunluk Maks uzunluk	Sınır koşulları ve yüklemeler Ağ yoğunluğu Ağ türü Benzetim sonuçları
	• İstenirse üretimi gerçekleştirecek makina özellikleri belirlenir.	**Montaj türü** Vida-cıvata Kaynak	**Sınır koşulları ve yüklemeler** Skalar kuvvet Vektör kuvveti X Vektör kuvveti Y Vektör kuvveti Z Basınç Sınırlama X Sınırlama Y Sınırlama Z Dönme momenti Yer çekimi Yüklemenin yeri Yüklemenin şiddeti **Ağ yoğunluğu** 1 2 3 **Ağ türü** Üçgen Dörtgen **Benzetim sonuçları** Tehlike dereceleri Toplam yer değiştirmeler

Çizelge B.1 (devam) : MBHT-m kullanıcı seçimleri tablosu.

Kullanıcı Seçimleri	Optimizasyon	Raporlama
	• Optimizasyon işleme konur.	• Raporlama işleme konur.
	Optimizasyon türü Değişkenler Optimizasyon katsayısı Hedef fonksiyonlar	Ekranda göster Yazdır
	Optimizasyon türü Malzeme Optimizasyonu Geometri Optimizasyonu	
	Değişkenler Malzeme özellikleri NURBS noktaları Eğrisel yüzeyler Düzlemsel yüzeyler Bileşen boyutu Bileşen biçimi	
	Optimizasyon katsayısı 1 2 3 4 5	
	Hedef fonksiyonlar Tehlike derecesi azaltılması Toplam yer değiştirmelerin azaltılması Ağırlığın azaltılması	

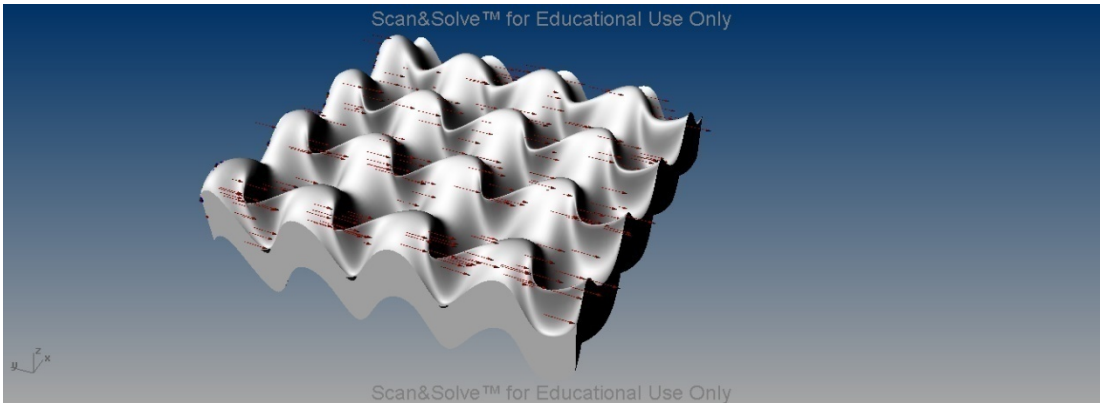
EK C : MBHT-m Kısıtlamaları

Çizelge C.1 : MBHT-m kısıtlamalar tablosu.

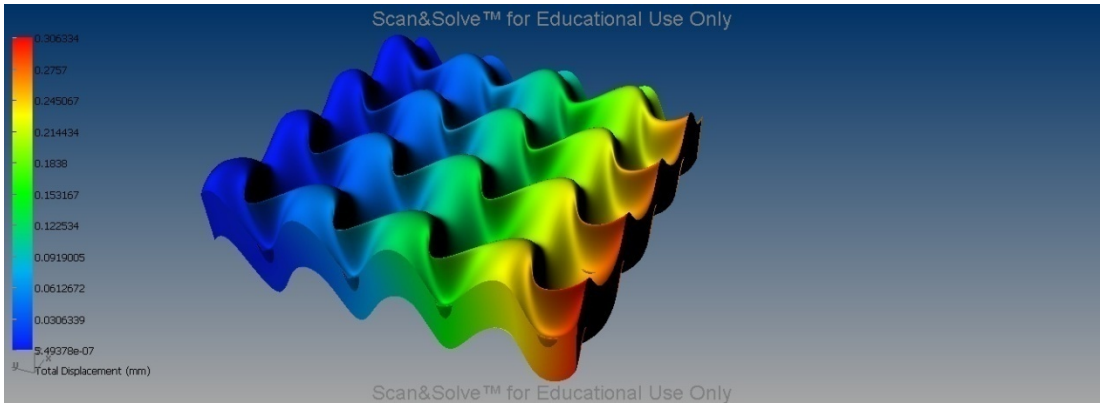
Kısıtlamalar	Malzeme	Kullanıcı Kısıtlamaları	Bağlam	Mimari Geometri	Strüktür	Üretim Teknolojisi
	Malzeme özellikleri	*Min açıklık* *Maks açıklık* *Min yükseklik* *Maks yükseklik* *Min alan* *Maks alan*	*Konfor koşulları* *Sismik tehlike derecesi* *Hâkim rüzgar yönü* *Hâkim rüzgar kuvveti*	*Fonksiyonlar* *Değişkenler* *Nokta sayısı* *Kullanıcı kısıtlamaları* ***Malzeme özellikleri***	*Strüktür türü* *Maks açıklık* *Maks yükseklik* *Biçimsel örüntü* *Dayanım* *Rijitlik* *Kullanıcı kısıtlamaları* *Mimari geometri* ***Malzeme özellikleri***	*Üretim teknolojisinin türü* *Maks yüzey kalınlığı* *Min yüzey kalınlığı* *Maks üretim boyutu* *2D* *3D* *Montaj türü* *CNC kısıtlamaları* *3D çıktı kısıtlamaları* *Kullanıcı kısıtlamaları* *Mimari geometri* *Strüktür* ***Malzeme özellikleri***
	Montaj Mantığı	Benzetim		Optimizasyon		Raporlama
	Montaj türü *Eleman sayısı* *Konumlandırma* *Min yarıçap* *Maks yarıçap* *Min uzunluk* *Maks uzunluk* *Kullanıcı kısıtlamaları* *Mimari geometri* *Strüktür* *Üretim teknolojisi* ***Malzeme özellikleri***	*Analiz türü* *Sınır koşulları* *Yüklemeler* *Ağ türü* *Ağ yoğunluğu* *Kullanıcı kısıtlamaları* *Mimari geometri* *Strüktür* *Üretim teknolojisi* *Montaj mantığı* ***Malzeme özellikleri***		*Optimizasyon türü* *Optimizasyon yöntemi* *Değişkenler* *Optimizasyon katsayısı* *Hedef fonksiyonlar* *Kullanıcı kısıtlamaları* *Mimari geometri* *Strüktür* *Üretim teknolojisi* *Montaj mantığı* ***Malzeme özellikleri***		*Kullanıcı seçimleri* *Benzetim sonuçları* *Optimizasyon sonuçları*

EK D : Başarım Tabanlı Mimari Geometride Malzeme (Yazıcı ve Tanaçan, 2012) çalışmasında yürütülmüş olan, matematiksel yüzeyin farklı malzemelerle, aynı koşullarında, strüktürel başarımlarının Scan & Solve yazılımı ile gerçekleştirilmiş SEY Benzetim Raporları.

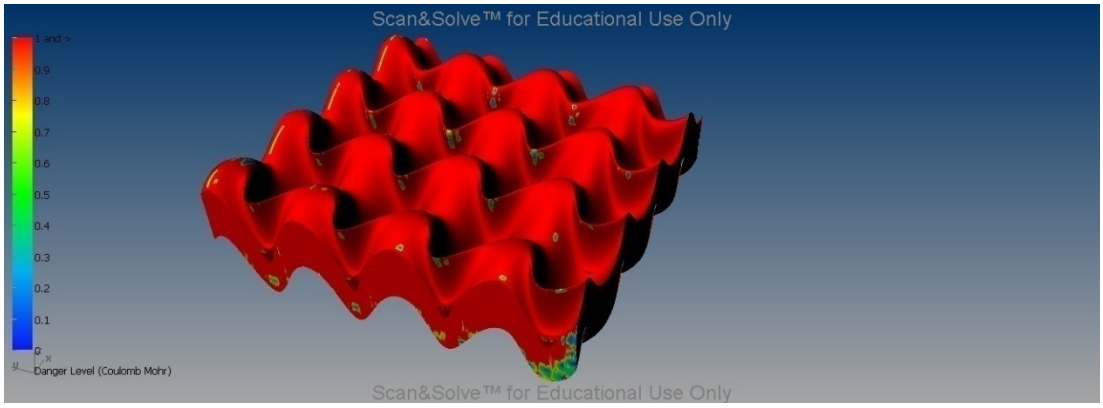
BETON:



Şekil D.1 : Yüzeye uygulanan vektör kuvvetinin temsili.



Şekil D.2 : Beton malzeme için toplam yer değiştirmelerin temsili.



Şekil D.3 : Beton malzeme için geometrideki tehlike derecelerinin temsili.

Çizelge D.1 : Beton malzeme için yazılım tarafından üretilen benzetim raporu.

Geometry Summary

Quantity	Unit
Volume	6045.77 mm^3
Surface Area	5162.02 mm^2
Mass	1.45703e-05 Mg
Bounding Box	
min. corner	{2.20412,-1.90026,-10.1674}
max. corner	{37.7918,33.0063,2.31608}

Material Properties

Property	Value
Description	Concrete, Medium Strength
Density	2.41e-09 Mg/mm^3
Elastic Modulus	21000 MPa
Poisson Ratio	0.2
Default Failure Criterion	Coulomb Mohr
Ultimate Tensile Strength	0.105 MPa
Ultimate Compressive Strength	21 MPa

Load Summary

Description	Type	Definition
Load 0	Vector Force	{0,-2000,0} N

Restraint Summary

Description	Definition
Restraint 0	X-Fixed,Y-Fixed,Z-Fixed

Settings

Basis Functions	
Degree	1
nx	36
ny	35
nz	13
Element size	{1.04613,1.04613,1.04613}
Resolution setting	9998
Computation Box	
min. corner	{1.15931,-2.75538,-10.729}
max. corner	{38.8199,33.8591,2.87061}

Units

Quantity	Unit
Length	mm
Mass	Mg
Force	N
Time	s

Çizelge D.1 (devam) : Beton malzeme için yazılım tarafından üretilen benzetim raporu.

Displacement Summary

	Amount	Location
Minimum	5.49378e-07 mm	{34.6291,33.0063,-4.89582}
Maximum	0.306334 mm	{4.76458,-1.89464,1.32188}

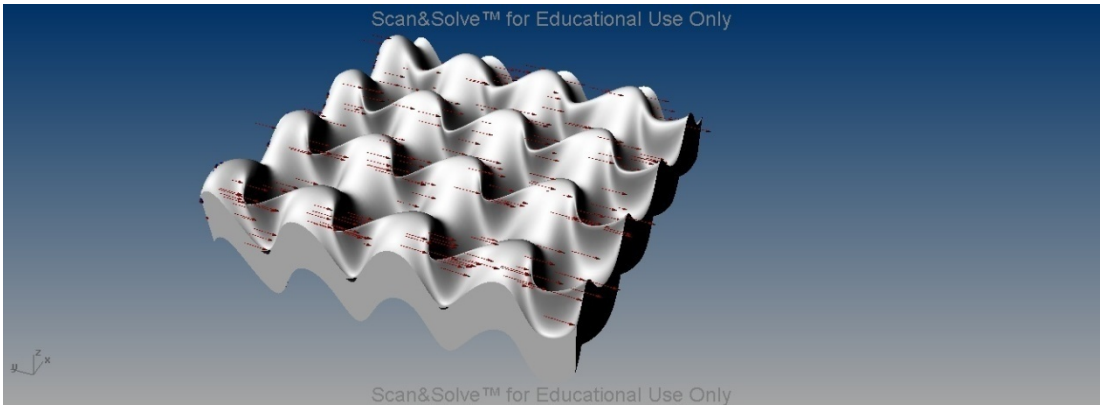
Danger Level Summary

	Amount	Location
Minimum	0.00209445	{37.1081,9.71371,-9.85392}
Maximum	Criterion Limit Exceeded	{3.78825,27.5466,-0.754281}

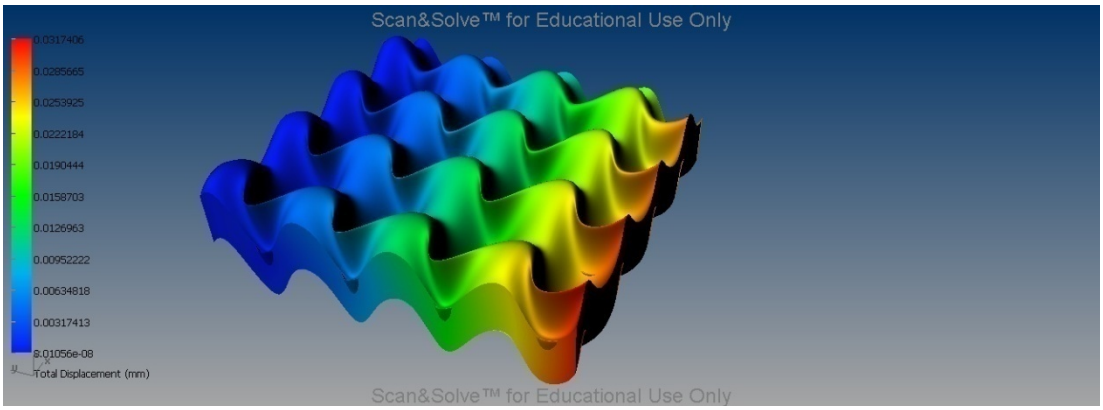
Results Extrema

	Minimum	Maximum
X-Displacement	-0.00514265 mm	0.0140731 mm
Y-Displacement	-0.0833377 mm	0.0587283 mm
Z-Displacement	-0.296091 mm	0.00306399 mm
Total Displacement	5.49378e-07 mm	0.306334 mm
Von Mises Stress	0.0296385 MPa	173.604 MPa
Max. Principal Stress	-11.8959 MPa	180.715 MPa
Mid. Principal Stress	-18.9105 MPa	36.2998 MPa
Min. Principal Stress	-105.994 MPa	23.1694 MPa
Danger Level (Rankine)	0.00209445	Criterion Limit Exceeded
Danger Level (Coulomb Mohr)	0.00209445	Criterion Limit Exceeded
Danger Level (Modified Mohr)	0.00209445	Criterion Limit Exceeded

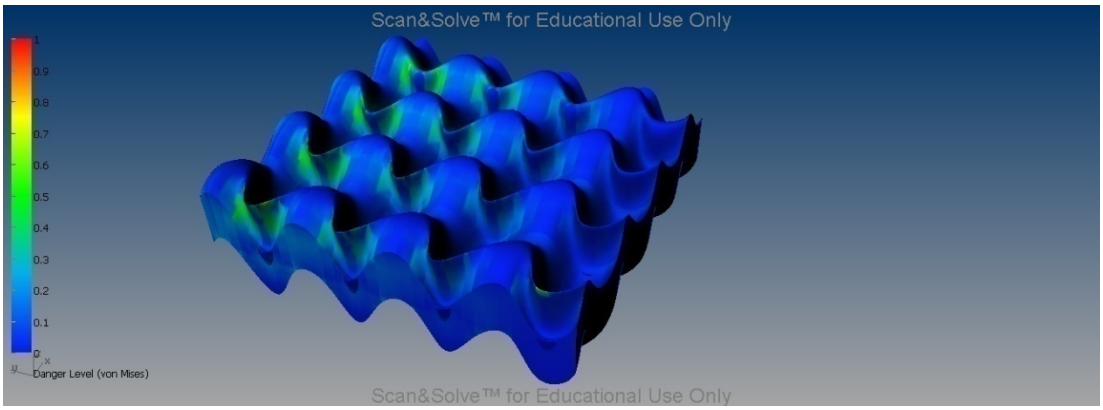
ÇELİK:



Şekil D.4 : Yüzeye uygulanan vektör kuvvetinin temsili.



Şekil D.5 : Beton malzeme için toplam yer değiştirmelerin temsili.



Şekil D.6 : Beton malzeme için geometrideki tehlike derecelerinin temsili.

Çizelge D.2 : Çelik malzeme için yazılım tarafından üretilen benzetim raporu.

Geometry Summary

Quantity	Unit
Volume	6045.77 mm^3
Surface Area	5162.02 mm^2
Mass	4.7157e-05 Mg
Bounding Box	
min. corner	{2.20412,-1.90026,-10.1674}
max. corner	{37.7918,33.0063,2.31608}

Material Properties

Property	Value
Description	Steel, Stainless (ferritic)
Density	7.8e-09 Mg/mm^3
Elastic Modulus	200000 MPa
Poisson Ratio	0.28
Default Failure Criterion	von Mises
Tensile Yield Strength	172.339 MPa
Description	Steel, Stainless (ferritic)

Load Summary

Description	Type	Definition
Load 0	Vector Force	{0,-2000,0} N

Restraint Summary

Description	Definition
Restraint 0	X-Fixed,Y-Fixed,Z-Fixed

Settings

Basis Functions	
Degree	1
nx	36
ny	35
nz	13
Element size	{1.04613,1.04613,1.04613}
Resolution setting	9998
Computation Box	
min. corner	{1.16422,-2.75521,-10.731}
max. corner	{38.8248,33.8592,2.86863}

Units

Quantity	Unit
Length	mm
Mass	Mg
Force	N
Time	s

Çizelge D.2 (devam) : Çelik malzeme için yazılım tarafından üretilen benzetim raporu.

Displacement Summary

	Amount	Location
Minimum	8.01056e-08 mm	{34.6291,33.0063,-4.89582}
Maximum	0.0317406 mm	{4.76458,-1.89464,1.32188}

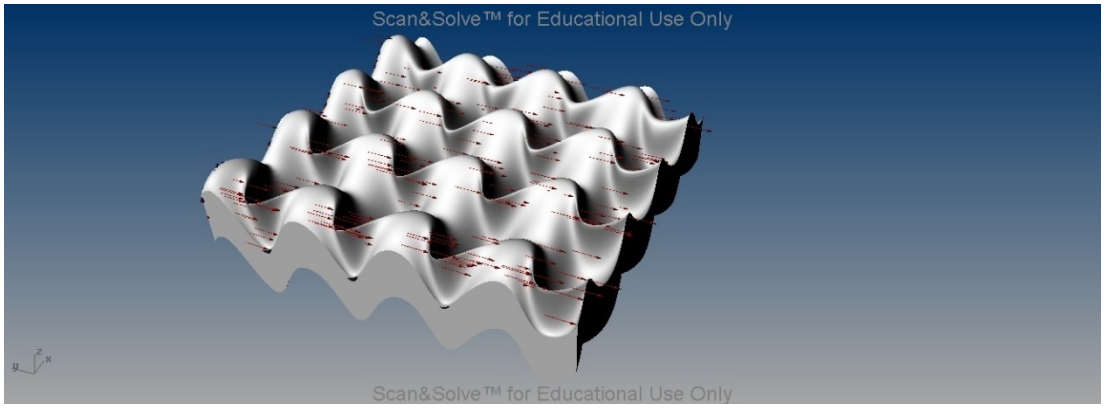
Danger Level Summary

	Amount	Location
Minimum	0.00026867	{2.79665,-0.484113,-7.8193}
Maximum	0.931084	{3.09463,27.5466,0.25858}

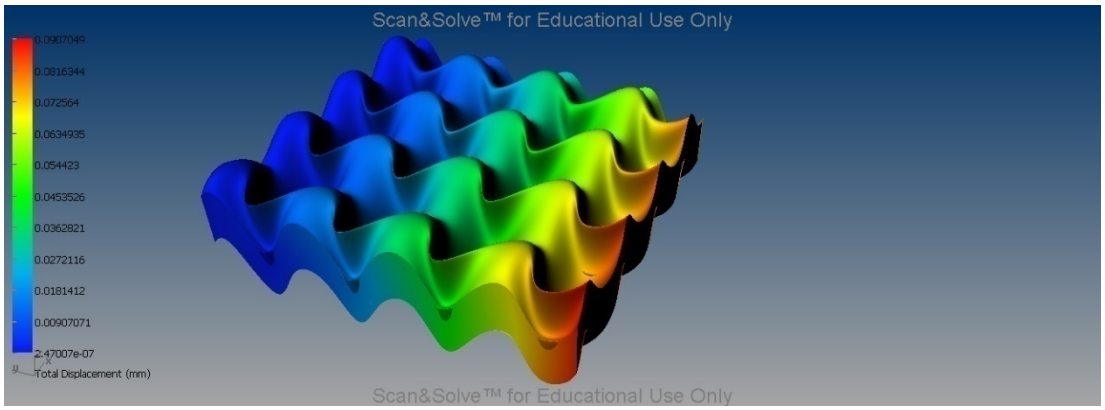
Results Extrema

	Minimum	Maximum
X-Displacement	-0.000530971 mm	0.00152668 mm
Y-Displacement	-0.00865168 mm	0.00608119 mm
Z-Displacement	-0.0306777 mm	0.000352056 mm
Total Displacement	8.01056e-08 mm	0.0317406 mm
Von Mises Stress	0.0463023 MPa	160.462 MPa
Max. Principal Stress	-19.8201 MPa	193.347 MPa
Mid. Principal Stress	-29.4168 MPa	58.0053 MPa
Min. Principal Stress	-114.597 MPa	46.2488 MPa
Danger Level (von Mises)	0.00026867	0.931084
Danger Level (Max. Shear Stress)	0.000598871	Criterion Limit Exceeded

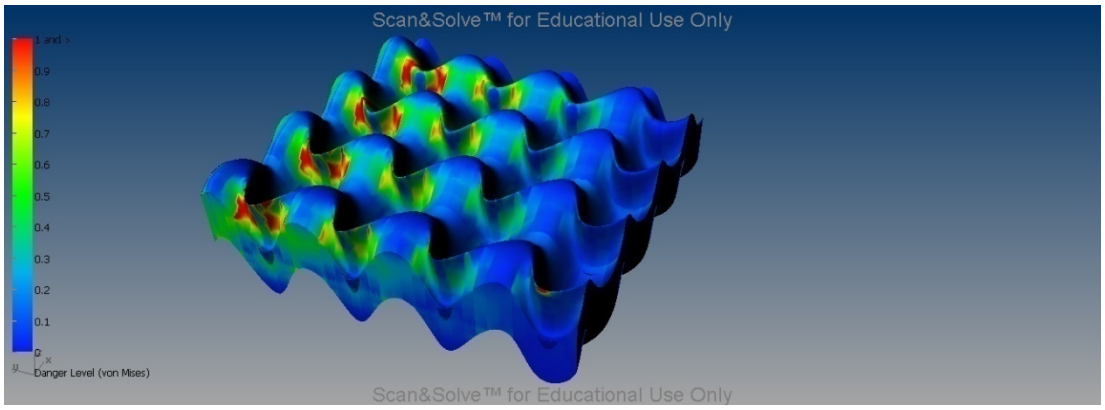
ALÜMİNYUM:



Şekil D.7 : Yüzeye uygulanan vektör kuvvetinin temsili.



Şekil D.8 : Alüminyum malzeme için toplam yer değiştirmelerin temsili.



Şekil D.9 : Alüminyum malzeme için geometrideki tehlike derecelerinin temsili.

Çizelge D.3 : Alüminyum malzeme için yazılım tarafından üretilen benzetim raporu.

Geometry Summary

Quantity	Unit
Volume	6045.77 mm^3
Surface Area	5162.02 mm^2
Mass	1.6384e-05 Mg
Bounding Box	
min. corner	{2.20412,-1.90026,-10.1674}
max. corner	{37.7918,33.0063,2.31608}

Material Properties

Property	Value
Description	Aluminum 6070-O
Density	2.71e-09 Mg/mm^3
Elastic Modulus	69000 MPa
Poisson Ratio	0.33
Default Failure Criterion	von Mises
Tensile Yield Strength	70 MPa
Description	

Load Summary

Description	Type	Definition
Load 0	Vector Force	{0,-2000,0} N

Restraint Summary

Description	Definition
Restraint 0	X-Fixed,Y-Fixed,Z-Fixed

Settings

Basis Functions	
Degree	1
nx	36
ny	35
nz	13
Element size	{1.04613,1.04613,1.04613}
Resolution setting	9998
Computation Box	
min. corner	{1.15896,-2.75534,-10.7252}
max. corner	{38.8195,33.8591,2.87444}

Units

Quantity	Unit
Length	mm
Mass	Mg
Force	N
Time	s

Çizelge D.3 (devam) : Alüminyum malzeme için yazılım tarafından üretilen benzetim raporu.

Displacement Summary

	Amount	Location
Minimum	2.47007e-07 mm	{34.5376,33.0063,-4.80109}
Maximum	0.0907049 mm	{4.76458,-1.89464,1.32188}

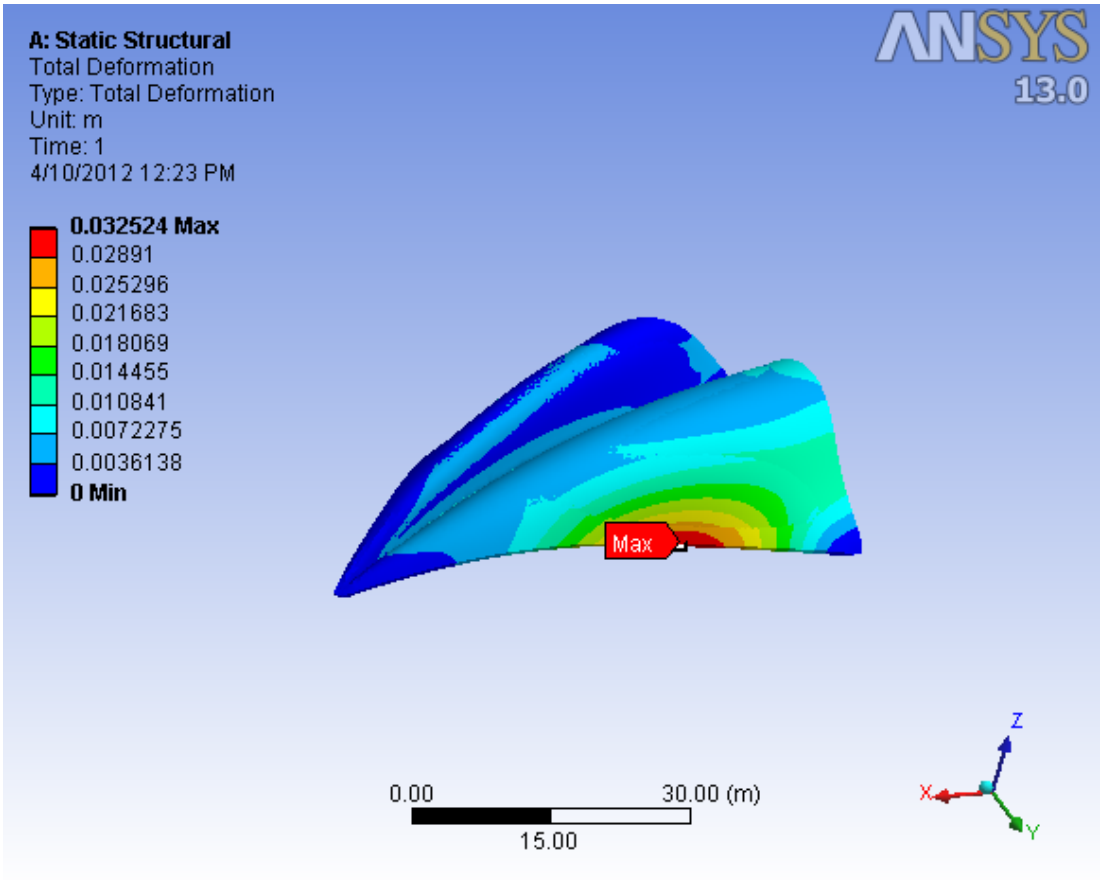
Danger Level Summary

	Amount	Location
Minimum	0.000654873	{3.00355,0.612187,-8.80091}
Maximum	Criterion Limit Exceeded	{3.0025,27.5466,0.405401}

Results Extrema

	Minimum	Maximum
X-Displacement	-0.00159723 mm	0.00452052 mm
Y-Displacement	-0.024755 mm	0.0173603 mm
Z-Displacement	-0.0876701 mm	0.00107826 mm
Total Displacement	2.47007e-07 mm	0.0907049 mm
Von Mises Stress	0.0458411 MPa	152.756 MPa
Max. Principal Stress	-29.1512 MPa	200.348 MPa
Mid. Principal Stress	-43.4391 MPa	67.8978 MPa
Min. Principal Stress	-120.751 MPa	51.687 MPa
Danger Level (von Mises)	0.000654873	Criterion Limit Exceeded
Danger Level (Max. Shear Stress)	0.00144916	Criterion Limit Exceeded

EK E : Yazar tarafından yürütülen Malzeme ile Mimari Geometride Verimlilik (2012) çalışması için ANSYS Workbench platformunda oluşturulmuş, NASTRAN yazılımı ile uyumlu, SEY'in örnek kod strüktürü.



Şekil E.1 : Geometrinin verilen sınır koşulları ve yüklemeler karşısında toplam yer değiştirmelerinin gösterimi.

KOD STRÜKTÜRÜ:

```
$ File created at Wed Apr 11 14:30:59 2012
$
$ This template extracts the FEModeler mesh in a format
$ compatible with NASTRAN input.
$
BEGIN BULK
$
$ COORDINATE SYSTEMS
$
$
$ MATERIAL PROPERTIES
$
MAT1,1,200000.,,0.3, 7.85e-006,1.2e-005,22.
MAT4,1, 6.05e-002, 434000.
$
$ MESH NODES
$
$********** Nodes from FE Modeler **********
$Number of nodes 19050
GRID,      1,,  -2.014678606E+005,   1.110000000E+005,   7.200000000E+004
GRID,      2,,  -2.302247384E+005,   1.110022910E+005,   7.242018960E+004
GRID,      3,,  -2.299354920E+005,   1.110172173E+005,   7.282867705E+004
GRID,      4,,  -2.296256852E+005,   1.110071307E+005,   7.322195227E+004
GRID,      5,,  -2.293119361E+005,   1.109963058E+005,   7.361206935E+004
GRID,      6,,  -2.290024486E+005,   1.109962460E+005,   7.400572501E+004
GRID,      7,,  -2.286922282E+005,   1.109997499E+005,   7.439878793E+004
```

```
GRID,      8,,  -2.283768955E+005,   1.110012314E+005,   7.478777451E+004
GRID,      9,,  -2.280560410E+005,   1.110006282E+005,   7.517222134E+004
GRID,     10,,  -2.277308245E+005,   1.109997955E+005,   7.555298491E+004
GRID,     11,,  -2.274018244E+005,   1.109996991E+005,   7.593048496E+004
GRID,     12,,  -2.270684702E+005,   1.109999435E+005,   7.630414567E+004
GRID,     13,,  -2.267300652E+005,   1.110000847E+005,   7.667323844E+004
GRID,     14,,  -2.263862458E+005,   1.110000573E+005,   7.703729289E+004
GRID,     15,,  -2.260368345E+005,   1.109999915E+005,   7.739598381E+004
GRID,     16,,  -2.256815292E+005,   1.109999770E+005,   7.774883725E+004
GRID,     17,,  -2.253198166E+005,   1.109999934E+005,   7.809511939E+004
GRID,     18,,  -2.249513163E+005,   1.110000057E+005,   7.843416936E+004
GRID,     19,,  -2.245757350E+005,   1.110000047E+005,   7.876535830E+004
GRID,     20,,  -2.241927038E+005,   1.109999998E+005,   7.908790214E+004
GRID,     21,,  -2.238017550E+005,   1.109999983E+005,   7.940080217E+004
GRID,     22,,  -2.234024160E+005,   1.109999993E+005,   7.970292085E+004
GRID,     23,,  -2.229943999E+005,   1.110000003E+005,   7.999321433E+004
GRID,     24,,  -2.225776418E+005,   1.110000004E+005,   8.027081134E+004
GRID,     25,,  -2.221520867E+005,   1.110000000E+005,   8.053472463E+004
GRID,     26,,  -2.217176242E+005,   1.109999999E+005,   8.078370215E+004
GRID,     27,,  -2.212745083E+005,   1.109999999E+005,   8.101693089E+004
GRID,     28,,  -2.208232735E+005,   1.110000000E+005,   8.123403592E+004
GRID,     29,,  -2.203646047E+005,   1.110000000E+005,   8.143495955E+004
GRID,     30,,  -2.198992290E+005,   1.110000000E+005,   8.161981861E+004
GRID,     31,,  -2.194277771E+005,   1.110000000E+005,   8.178858020E+004
GRID,     32,,  -2.189504702E+005,   1.110000000E+005,   8.193999181E+004
GRID,     33,,  -2.184674756E+005,   1.110000000E+005,   8.207214172E+004
```

…….Continue to calculate!

```
GRID,  19032,,  -1.694492963E+005,   1.389858941E+005,   7.273877732E+004
GRID,  19033,,  -1.822006229E+005,   1.332290968E+005,   7.601215700E+004
GRID,  19034,,  -1.821002456E+005,   1.332729289E+005,   7.599123622E+004
GRID,  19035,,  -1.683181447E+005,   1.395014487E+005,   7.239375454E+004
GRID,  19036,,  -1.677633687E+005,   1.398113318E+005,   7.229978432E+004
GRID,  19037,,  -1.723306573E+005,   1.376718300E+005,   7.359580459E+004
GRID,  19038,,  -1.857151643E+005,   1.315988248E+005,   7.663265501E+004
GRID,  19039,,  -1.826214366E+005,   1.329589132E+005,   7.622606525E+004
GRID,  19040,,  -1.717593096E+005,   1.380624806E+005,   7.357218293E+004
GRID,  19041,,  -1.718873669E+005,   1.378825546E+005,   7.345427114E+004
GRID,  19042,,  -1.752472629E+005,   1.363531982E+005,   7.438761096E+004
GRID,  19043,,  -1.753150384E+005,   1.363083021E+005,   7.443893564E+004
GRID,  19044,,  -1.755816503E+005,   1.362035794E+005,   7.447316399E+004
GRID,  19045,,  -1.690039204E+005,   1.391907313E+005,   7.260249214E+004
GRID,  19046,,  -1.693970390E+005,   1.390614262E+005,   7.278413483E+004
GRID,  19047,,  -1.692479524E+005,   1.390748248E+005,   7.268126740E+004
GRID,  19048,,  -1.699953304E+005,   1.387404401E+005,   7.290066776E+004
GRID,  19049,,  -1.698040173E+005,   1.388377933E+005,   7.284647397E+004
GRID,  19050,,  -1.700846897E+005,   1.387096562E+005,   7.292895604E+004
$
```

$ MESH ELEMENTS

```
$
$ Elements <SECTION=ELEMENTS>
CTRIA3,1,1,40,41,110
CTRIA3,2,1,45,46,105
CTRIA3,3,1,70,80,81
CTRIA3,4,1,27,124,125
CTRIA3,5,1,2,3,149
CTRIA3,6,1,16,17,135
CTRIA3,7,1,19,20,132
CTRIA3,8,1,20,131,132
CTRIA3,9,1,23,24,128
CTRIA3,10,1,5,6,146
CTRIA3,11,1,38,112,113
CTRIA3,12,1,44,106,107
CTRIA3,13,1,56,57,94
CTRIA3,14,1,71,72,79
CTRIA3,15,1,33,118,119
CTRIA3,16,1,6,145,146
CTRIA3,17,1,18,19,133
CTRIA3,18,1,71,79,80
CTRIA3,19,1,70,71,80
CTRIA3,20,1,6,7,145
CTRIA3,21,1,7,8,144
CTRIA3,22,1,8,143,144
CTRIA3,23,1,67,83,84
```

CTRIA3,24,1,10,11,141
CTRIA3,25,1,28,29,123
CTRIA3,26,1,59,91,92
CTRIA3,27,1,15,136,137
CTRIA3,28,1,23,128,129
CTRIA3,29,1,40,110,111
CTRIA3,30,1,28,123,124
CTRIA3,31,1,57,93,94
CTRIA3,32,1,12,139,140
CTRIA3,33,1,8,9,143
CTRIA3,34,1,15,16,136
CTRIA3,35,1,35,116,117
CTRIA3,36,1,72,73,78
CTRIA3,37,1,66,67,84

……..Continue to calculate!

CTRIA3,38031,1,409,526,525
CTRIA3,38032,1,409,525,410
CTRIA3,38033,1,431,502,432
CTRIA3,38034,1,429,505,504
CTRIA3,38035,1,446,487,447
CTRIA3,38036,1,437,497,496
CTRIA3,38037,1,151,472,154
CTRIA3,38038,1,452,482,481
CTRIA3,38039,1,425,509,508
CTRIA3,38040,1,397,537,398
CTRIA3,38041,1,424,510,509
CTRIA3,38042,1,425,508,426
CTRIA3,38043,1,422,512,511
CTRIA3,38044,1,406,529,528
CTRIA3,38045,1,420,514,513
CTRIA3,38046,1,443,490,444
CTRIA3,38047,1,420,513,421
CTRIA3,38048,1,372,563,562
CTRIA3,38049,1,418,516,515
CTRIA3,38050,1,426,508,507
CTRIA3,38051,1,383,552,551
CTRIA3,38052,1,408,527,526
CTRIA3,38053,1,416,415,518
CTRIA3,38054,1,415,520,519
CTRIA3,38055,1,413,521,414
CTRIA3,38056,1,370,564,563
CTRIA3,38057,1,414,521,520
CTRIA3,38058,1,412,523,522
CTRIA3,38059,1,405,530,529
CTRIA3,38060,1,428,506,505
CTRIA3,38061,1,365,779,784
CTRIA3,38062,1,567,782,778
CTRIA3,38063,1,567,784,781
CTRIA3,38064,1,241,778,782
CTRIA3,38065,1,365,784,471
CTRIA3,38066,1,567,783,784
CTRIA3,38067,1,779,781,784
CTRIA3,38068,1,567,781,782
CTRIA3,38069,1,779,780,781
$
$ PHYSICAL PROPERTIES
$
PSHELL,1,1,300.000,1
$
ENDDATA



ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Sevil Yazıcı

E-Posta: sevilyazici@itu.edu.tr; info@paramaterial.com

Yüksek Lisans: Architectural Association Londra, 2006

Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi, 2003

Ortaokul ve Lise: İstanbul (Erkek) Lisesi, 1998

Mesleki Deneyim ve Ödüller:

Zaha Hadid Mimarlık Londra, Şubat 2006 - Ağustos 2009

1.'lik Ödülü, Yarışma: Ocean Terminal Extension, Hong Kong (Proje Lideri, Zaha Hadid Mimarlık).

1.'lik Ödülü, Yarışma: King Abdullah II House of Culture & Art, Amman (Proje Grubu, Zaha Hadid Mimarlık).

1.'lik Ödülü, Yarışma: Kartal-Pendik Masterplan, Türkiye (Proje Grubu, Zaha Hadid Mimarlık).

Yayın ve Patent Listesi:

Chima, J., Leung, E., Nikolakaki, S., **Yazıcı, S**. *(soyadı sırasıyla)*. (2009). Intelligent bi-stable structure system, *United Kingdom Patent*, No: GB2445572 tarih: 27 Ocak 2009.

Chima, J., Leung, E., Nikolakaki, S., **Yazıcı, S**. *(soyadı sırasıyla)*. (2006). *Bi-stable structures*, (yüksek lisans tezi), Design Research Laboratory: Architectural Association, Londra, İngiltere.

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR / SUNUMLAR

Yazıcı, S. ve Tanaçan, L. (2012). Material in Performance-driven Architectural Geometry, Association of Collegiate Schools of Architecture (ACSA) *100th Meeting, 1-4 March 2012, Digital Aptitudes Conference*, Massachusetts Institute of Technology (MIT), Boston-MA, sf. 266-273.

Yazıcı, S. (2012). ParaMaterial Topographies for the Built Environment, *Rio+20 Birleşmiş Milletler Konferansı, Eğitim Programı*, Hindistan, sf. 28-34.

Yazıcı, S. (2011). Computing through Holistic Systems Design Method: Material Formations Workshop, *Dearq Journal of Architecture*, Universidad de Los Andes, sf. 90-101.

Yazıcı, S. ve Tanaçan, L. (2010). The Optimization of the Double-Curved Computational Surface through the Materialization Process, Sigradi (Sociedad Iberoamericana de Grafica Digital), *XIV Congress of Iberoamerican Society of Digital Graphics Proceedings*, Disruption, Modeling and Construction: Shifting Dialogues, Bogota, Kolombia (poster).

Yazıcı, S. ve Tanaçan, L. (2010). Workshop: Material Formations, Spontaneous Schooling, *London Festival of Architecture, Nous Gallery and 4M Group,* Spontaneous Schooling Publication, Londra.

Yazıcı, S. (2010). Malzeme Zekâsı ile Mekânı Kurgulama, *Mimarlıkta Malzeme*, TMMOB Mimarlar Odası Büyükkent Şubesi, İstanbul, sayı.15, sf. 53-63.

Yazıcı, S. (2009) Yenilikçi Malzeme Sistemleri, *Mimarlıkta Malzeme*, TMMOB Mimarlar Odası Büyükkent Şubesi, İstanbul, no. 14, sayı. 42-48.