

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**BİNALARDA ENERJİ VE RÜZGÂR SİMÜLASYONLARININ AYNI
ALGORİTMA ÜZERİNDEN PARAMETRİK ÜRETİLEBİLMESİ İÇİN MODEL
GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Oğuzhan KORAL

Mimarlık Anabilim Dalı

Çevre Kontrolü ve Yapı Teknolojileri Programı

TEMMUZ 2024

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**BİNALARDA ENERJİ VE RÜZGÂR SİMÜLASYONLARININ AYNI
ALGORİTMA ÜZERİNDEN PARAMETRİK ÜRETİLEBİLMESİ İÇİN MODEL
GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Oğuzhan KORAL
(502191513)**

Mimarlık Anabilim Dalı

Çevre Kontrolü ve Yapı Teknolojileri Programı

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Gülten MANİOĞLU
Eş Danışman: Prof. Dr. Mustafa Serdar ÇELEBİ**

TEMMUZ 2024

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 502191513 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Oğuzhan KORAL, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “BİNALARDA ENERJİ VE RÜZGÂR SİMÜLASYONLARININ AYNI ALGORİTMA ÜZERİNDEN PARAMETRİK ÜRETİLEBİLMESİ İÇİN MODEL GELİŞTİRİLMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Gülten MANİOĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Eş Danışman : **Prof. Dr. Mustafa Serdar ÇELEBİ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Hakan AKYILDIZ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Gör. Neşe GANIÇ SAĞLAM
Özyeğin Üniversitesi

Dr. Öğr. Gör. Betül DEMİRÖZ BOZ
Marmara Üniversitesi

Teslim Tarihi : 13 Mayıs 2024
Savunma Tarihi : 12 Temmuz 2024





Eşime ve Kızıma,



ÖNSÖZ

Bu çalışma, mimarlık ve hesaplamalı bilimler alanlarını kapsayan disiplinlerarası bir anlayışla yürütülmüştür.

Mimarlık ana bilim dalı altında yürütülen yüksek lisans tez çalışması kapsamında, Tübitak araştırma projesinde bana yer veren, diğer ana bilim dallarından ders almam konusunda beni teşvik eden, inanan, her zaman yol gösteren tez danışmanım Doç. Dr. Gülten Manioğlu'na,

Hesaplamalı bilimler alanında aldığım derslerde bir mimar olarak yabancılık çekmemem için elinden geleni yapan ve daima yol gösterici olan tez eş danışmanım Prof. Dr. Mustafa Serdar Çelebi'ye,

Bilgisayar mühendisliği konularında her zaman danışabildiğim ve desteğini hiç bir zaman esirgemeyen Dr. Öğr. Gör. Betül Demiröz Boz'a,

Tezimin akışkanlar dinamiği bölümlerindeki sorunların çözülmesinde önemli katkıları bulunan Ar. Gör. Cenk Emre Ersan'a,

Jürilerime katılarak değerli görüşlerini esirgemeyen Dr. Öğr. Gör. Neşe Ganiç Sağlam ve Prof. Dr. Hakan Akyıldız'a,

Bütün eğitim hayatım boyunca hep arkamda duran abim Feyyaz Koral, annem Ömriye Koral ve babam Mesut Koral'a,

Güleryüzüyle ve enerjisi ile tezde görünmez katkıları bulunan sevgili eşim Sinem Celen Koral ve canım kızım Işıl Koral'a

teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Temmuz 2024

Oğuzhan Koral
(Mimar)



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xiii
SEMBOLLER	xv
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xvii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xix
ÖZET.....	xxv
1. GİRİŞ	1
2. BİNALARDA ENERJİ VE RÜZGÂR SİMÜLASYONLARI.....	5
2.1. Binalarda Enerji Simülasyonları	5
2.1.1. Binalarda enerji simülasyon değişkenleri	7
2.1.1.1. Kullanıcıya ilişkin değişkenler.....	7
2.1.1.2. İklimle ilişkin değişkenler.....	9
2.1.1.3. Binaya ilişkin değişkenler	15
2.1.1.4. Yapma sistemlere ilişkin değişkenler.....	20
2.1.1.5. Hesaplamaya ilişkin değişkenler.....	20
2.2. Binalarda Rüzgâr Simülasyonları	24
2.2.1. Binalarda rüzgâr simülasyonu değişkenleri	27
2.2.1.1. Akışkana ilişkin özelliklerin belirlenmesi.....	27
2.2.1.2. Geometrik modelin oluşturulması.....	29
2.2.1.3. Ağ (Mesh) yapısı oluşturulması	30
2.2.1.4. Akış rejiminin belirlenmesi.....	33
2.2.1.5. Türbülans modelinin belirlenmesi.....	35
2.2.1.6. Başlangıç ve sınır şartlarının belirlenmesi	36
2.3. Binalarda Enerji ve Rüzgâr Simülasyonlarında Parametrik Yaklaşım	37
2.3.1. Parametrelerde bağlantısallık	38
2.3.2. Binalarda enerji ve rüzgâr modellerinin bir arada üretilme gereksinimi	42
3. GEOMETRİK KÜTÜPHANE GELİŞTİRİLMESİ.....	47
3.1. Temel Geometrik Nesnelerin Oluşturulması	47
3.1.1. CoordinateArray.....	47
3.1.2. Vector3d.....	48
3.1.3. Point3d	48
3.1.4. Plane3d.....	49
3.1.5. Orientation.....	49
3.1.6. LineSegment	50
3.1.7. Polyline	51
3.1.8. Loop	51
3.1.9. Face	52
3.1.10. BoundingBox	52
3.2. Temel Geometrik Fonksiyonların Oluşturulması.....	53
3.2.1. Move	53
3.2.2. Rotate	54

3.2.3.	Scale	54
3.2.4.	Offset.....	55
3.2.5.	Earcut3d	55
3.3.	Temel Simülasyon Nesnelerinin Oluşturulması.....	56
3.3.1.	Domain	56
3.3.2.	Zone.....	57
3.3.3.	Wall	57
3.3.4.	WallType.....	57
3.3.5.	Opening	57
3.4.	Geometrik Dönüştürücülerin Oluşturulması	58
3.4.1.	IDF	58
3.4.2.	STL.....	58
3.4.3.	Speckle	58
4.	BİNALARDA ENERJİ VE RÜZGÂR SİMÜLASYONLARININ AYNI ALGORİTMA ÜZERİNDEN PARAMETRİK ÜRETİLEBİLMESİ İÇİN MODEL GELİŞTİRİLMESİ.....	61
4.1.	Kullanıcıya İlişkin Değişkenlerin Belirlenmesi	61
4.2.	İklim İlişkin Değişkenlerin Belirlenmesi	62
4.2.1.	İç iklim ilişkili değişkenlerin belirlenmesi	62
4.2.2.	Dış iklim ilişkili değişkenlerin belirlenmesi.....	62
4.3.	Binaya İlişkin Değişkenlerin Belirlenmesi	63
4.3.1.	Bina formu ve hacim organizasyonunu etkileyecek değişkenlerin belirlenmesi	63
4.3.2.	Bina kabuğunun optik ve termofiziksel özelliklerinin belirlenmesi ..	64
4.4.	Parametrik Modelin Oluşturulması	64
4.4.1.	Binalarda enerji simülasyonlarının parametrik model ile oluşturulması	66
4.4.1.1.	İklim dosyalarının belirlenmesi.....	67
4.4.1.2.	Geometrik modelin oluşturulması	68
4.4.1.3.	Girdi dosyasının oluşturulması.....	70
4.4.2.	Binalarda rüzgâr simülasyonlarının parametrik model ile oluşturulması.....	72
4.4.2.1.	Çözücünün seçilmesi.....	72
4.4.2.2.	İklim verilerinin belirlenmesi.....	72
4.4.2.3.	Geometrik modelin oluşturulması	73
4.4.2.4.	Akış hacminin oluşturulması.....	75
4.4.2.5.	Ağ yapısının örülmesi	76
4.4.2.6.	Reynold sayısının hesaplanması.....	77
4.4.2.7.	Senaryo dosyalarının oluşturulması	77
4.4.2.8.	Ağ yapısından bağımsızlaştırma analizinin yapılması	79
4.4.2.9.	Artık değer analizinin yapılması	80
4.4.2.10.	Simülasyon değişkenlerinin güncellenmesi	81
4.5.	Simülasyonların Eş Zamanlı Çalıştırılması.....	81
4.6.	Sonuç Dosyalarının Okunması.....	83
5.	BİNALARDA ENERJİ VE RÜZGÂR SİMÜLASYONLARININ AYNI ALGORİTMA ÜZERİNDEN PARAMETRİK ÜRETİLEBİLMESİ İÇİN MODEL GELİŞTİRİLMESİ: AVLULU BİNA ÖRNEĞİ.....	85
5.1.	Kullanıcıya İlişkin Değişkenlerin Belirlenmesi	85
5.2.	İklim İlişkin Değişkenlerin Belirlenmesi	86
5.2.1.	İç iklim ilişkili değişkenlerin belirlenmesi	87

5.2.2.	Dış iklime ilişkin değişkenlerin belirlenmesi.....	87
5.3.	Binaya İlişkin Değişkenlerin Belirlenmesi	87
5.3.1.	Bina formu ve hacim organizasyonunu etkileyecek değişkenlerin belirlenmesi	87
5.3.2.	Bina kabuğunun optik ve termofiziksel özelliklerinin belirlenmesi ..	88
5.4.	Parametrik Modelin Oluşturulması	89
5.4.1.	Binalarda enerji simülasyonlarının parametrik model ile oluşturulması	92
5.4.1.1.	İklim dosyalarının belirlenmesi.....	93
5.4.1.2.	Geometrik modelin oluşturulması.....	93
5.4.1.3.	Girdi dosyalarının oluşturulması.....	97
5.4.2.	Binalarda rüzgâr simülasyonlarının parametrik model ile oluşturulması	98
5.4.2.1.	Çözücünün seçilmesi.....	98
5.4.2.2.	İklim verilerinin belirlenmesi.....	98
5.4.2.3.	Geometrik modelin oluşturulması.....	101
5.4.2.4.	Akış hacminin oluşturulması	104
5.4.2.5.	Ağ yapısının örülmesi	106
5.4.2.6.	Reynolds sayısının hesaplanması	108
5.4.2.7.	Senaryo dosyalarının oluşturulması	109
5.4.2.8.	Ağ bağımsızlaştırma (Mesh independency) analizinin yapılması	109
5.4.2.9.	Artık değer (Residual) analizinin yapılması	115
5.4.2.10.	Simülasyonun parametrik çözümlemeye hazır hale getirilmesi	116
5.5.	Senaryoların Eş Zamanlı Çalıştırılması	116
5.6.	Sonuçların Dosyalardan Okunması.....	117
6.	SONUÇLAR	121
	KAYNAKÇA	125
	ÖZGEÇMİŞ.....	131



KISALTMALAR

ASHRAE : American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

TSE : Türk Standardları Enstitüsü

ISO : International Organization for Standardization

CAD : Computer Aided Design

HAD : Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

STL : Stereolithography

HBJSON : Honeybee JavaScript Object Notation

MET : Metabolizma düzeyi

idf : Input data file

epw : EnergyPlus weather

TMY : Typical Meteorologic Year

XPS : Ekstrüde Polistren



SEMBOLLER

$^{\circ}\text{C}$: Santigrat derece

P : Yoğunluk

kPa : KiloPascal

W : Watt

$d_1, d_2, \dots d_n$: Opak bileşeni oluşturan malzemelerin kalınlıkları

a : Kalınlık

ac : Saydam bileşenlerin yutuculuk katsayısı

ao : Bileşenin yutuculuk katsayısı

U_0 : opak bileşenin toplam ısı geçiş katsayıları



ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1 : Metabolik hızlar [8, 9].....	8
Çizelge 2.2 : ASHRAE iklim bölgeleri	11
Çizelge 5.1 : Kullanıcı takvimi.....	86
Çizelge 5.2 : Kullanıcıların aktivite düzeyi takvimi.....	86
Çizelge 5.3 : Bölgelere göre en fazla değer olarak kabul edilmesi tavsiye edilen U değerleri (TS 825).....	88
Çizelge 5.4 : Bina kabuğunun optik ve termofiziksel özelliklerini oluşturan katmanlaşma modeli	89



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 : Çok değişkenli problem havuzu ve üretilen olası senaryoların gösterimi- Değişkenler: D1, D2,... Dn – Senaryolar: S1, S2,...Sn	3
Şekil 2.1 : Dış iklim elemanları	10
Şekil 2.2 : TS 825 Türkiye iklim bölgeleri	12
Şekil 2.3 : Direkt, yansımış ve yaygın Güneş ışıınımı.....	13
Şekil 2.4 : NACA/NASA, Langley Research Center (Anderson, 2015)	25
Şekil 2.5 : (Colorado üniversitesi arşivi, 1964) Soldan, Alan Davenport, Ph.D., Minoru Yamasaki, Malcolm Levy, John Skilling, P.E.,Dist.M.ASCE, Jack Cermak, Ph.D., P.E., and Leslie E. “Les” Robertson, P.E., S.E., Dist.M.ASCE, İkiz kulelerin Colorado Üniversitesinde yürütülen rüzgar tüneli testleri.....	26
Şekil 2.6 : Çözüm geometrisi .stl -üçgenlenmiş- örneği.....	29
Şekil 2.7 : Akış hacminin oluşturulması.....	30
Şekil 2.8 : Ağ yapısının akış hacmine örülmesi	32
Şekil 2.9 : Laminar akıştan türbülanslı akışa geçiş (Kadivar ve diğerleri, 2021).....	34
Şekil 2.10 : (Som ve diğerleri, 2012) Deneysel çalışma, RANS ve LES türbülans modelleri karşılaştırması	36
Şekil 2.11 : Hesaplamaların ayrı ayrı oluşturulup ele alındığı akış.....	37
Şekil 2.12 : Hesaplamaların aynı parametrik model üzerinden ele alındığı akış.	38
Şekil 2.13 : Girdi, gizli değişken ve çıktı arasındaki ilişki.....	39
Şekil 2.14 : Bağlantısallıkta bir girdinin başka bir girdi ile ilişkisi.	39
Şekil 2.15 : Bağlantısallıkta bir girdinin başka bir girdi farkı derecelerden ile ilişkisi.	40
Şekil 2.16 : Enerji modelinde geometrik bağlantısallık.	40
Şekil 2.17 : Rüzgâr modelinde geometrik bağlantısallık.....	41
Şekil 2.18 : Enerji modeli cam geometrik tanımının (Şekil 2.16) hacim üzerindeki bağlantısallığı.	41
Şekil 2.19 : (1) Isı transferi çözümü için hacim/yüzey şematik modeli, (2) akış çözümü için ağ yapısı şematik modeli.	42

Şekil 2.20 : Enerji modeli hacmini (Şekil 2.16) oluşturan yüzeyler.	43
Şekil 2.21 : Enerji modelinde örtüşen komşu yüzey ilişkileri.	44
Şekil 2.22 : Enerji modelinde örtüşmeyen komşu yüzey ilişkileri.	44
Şekil 2.23 : Rüzgâr modeli için oda içinde ağ yapısının örüldüğü akış alanı.	45
Şekil 2.24 : Ağ yapısının örülmesi için gerekli olan akış hacminin oluşturulması. ..	45
Şekil 2.25 : Rüzgâr modelindeki açıklıkların geometrideki değişime etkisi.	46
Şekil 3.1 : CoordinateArray gösterimi.	48
Şekil 3.2 : Vector3d gösterimi.	48
Şekil 3.3 : Point3d gösterimi.	49
Şekil 3.4 : Plane3d gösterimi.	49
Şekil 3.5 : Orientation gösterimi.	50
Şekil 3.6 : LineSegment gösterimi.	50
Şekil 3.7 : Polyline gösterimi.	51
Şekil 3.8 : Loop gösterimi.	51
Şekil 3.9 : Face gösterimi.	52
Şekil 3.10 : BoundingBox gösterimi.	52
Şekil 3.11 : Earcut3d üçgenleştirme gösterimi.	56
Şekil 4.1 : Örnek geometrik değişkenler.	63
Şekil 4.2 : Geometriyi etkilemeyen enerji modeli değişkenleri.	64
Şekil 4.3 : Parametrik modelin oluşturulması.	65
Şekil 4.4 : Örnek şematik mimari 3B model, plan ve kesit.	66
Şekil 4.5 : Hacim 1 ve Hacim 2'nin enerji modeli için yüzey geometri modeli.	68
Şekil 4.6 : Hacim 1 ve Hacim 2'nin (Şekil 4.5) patlatılmış geometrik model.	69
Şekil 4.7 : Hacim 1 için Zone nesne yapısı.	69
Şekil 4.8 : Zone nesnesinin IDF dosyası içindeki tanımı.	70
Şekil 4.9 : Opak yüzeylerin IDF dosyası içindeki tanımı.	71
Şekil 4.10 : Saydam yüzeylerin IDF dosyası içindeki tanımı.	71
Şekil 4.11 : Hacim 1 ve Hacim 2'nin rüzgâr geometri modeli.	73
Şekil 4.12 : WallType.INNER tipindeki Wall nesnesinin dışa aktarılış biçimi.	73
Şekil 4.13 : WallType.OUTER tipindeki Wall nesnesinin dışa aktarılış biçimi.	74
Şekil 4.14 : .stl ASCII dosya formatı.	75
Şekil 4.15 : Akış hacminin ölçeklendirilmesi.	76
Şekil 4.16 : OpenFOAM senaryo dosyalarının yapısı.	78
Şekil 4.17 : EnergyPlus'ın çalıştırılması için kullanılan betik.	81

Şekil 4.18 : OpenFOAM'un çalıştırılması için kullanılan ./Allrun betiği	82
Şekil 4.19 : Akış diyagramı	84
Şekil 5.1 : Avlulu bina tipolojisi üzerinden değişkenlerin gösterimi	87
Şekil 5.2 : CLI programın değişkenlerini gösteren yardım menüsü	91
Şekil 5.3 : Senaryo dosyası	92
Şekil 5.4 : Enerji simülasyonu senaryo dosyası	92
Şekil 5.5 : Değişkenlerin OpenStudio'ya aktarıldığı python dizini	93
Şekil 5.6 : Değişkenlerin OpenStudio'ya aktarıldığı python dizini	94
Şekil 5.7 : 3 odalı, 1 katlı ve avlu genişliği 10 metre olan senaryo için enerji modeli geometrisini (Şekil 5.8) üretmek için kullanılan komut örneği	94
Şekil 5.8 : 3 odalı, 1 katlı, 10 metre avlu genişliğine sahip enerji modeli geometrisi	95
Şekil 5.9 : 4 odalı, 1 katlı ve avlu genişliği 10 metre olan senaryo için enerji modeli geometrisini (Şekil 5.10) üretmek için kullanılan komut örneği	95
Şekil 5.10 : 4 odalı, 1 katlı, 10 metre avlu genişliğine sahip enerji modeli geometrisi	95
Şekil 5.11 : 4 odalı, 1 katlı ve avlu genişliği 20 metre olan senaryo için enerji modeli geometrisini (Şekil 5.12) üretmek için kullanılan komut örneği	96
Şekil 5.12 : 4 odalı, 1 katlı, 20 metre avlu genişliğine sahip enerji modeli geometrisi	96
Şekil 5.13 : 3 odalı, 3 katlı ve avlu genişliği 8 metre olan senaryo için enerji modeli geometrisini (Şekil 5.14) üretmek için kullanılan komut örneği	96
Şekil 5.14 : 3 odalı, 3 katlı, 8 metre avlu genişliğine sahip enerji modeli geometrisi	97
Şekil 5.15 : Enerji simülasyonu için gerekli olan .idf dosyasının yeri	98
Şekil 5.16 : Rüzgâr simülasyonu senaryo dosyası	98
Şekil 5.17 : Muğla-Bodrum havalimanında 2007-2021 yılları arasında ölçüler rüzgâr verisi	99
Şekil 5.18 : 340 derece rüzgar yönü ve 16 m/s rüzgar hızı verilerine göre senaryo oluşturmak için kullanılan komut	99
Şekil 5.19 : Domain'i rüzgâr yönüne göre hizalama	99
Şekil 5.20 : Çalıştırılan komuttan (Şekil 5.18) sonra 0 klasörü altındaki oluşturulan U dosyasının örneği	100
Şekil 5.21 : 3 odalı, 1 katlı ve avlu genişliği 10 metre olan senaryo için rüzgâr modeli geometrisini (Şekil 5.22) üretmek için kullanılan komut örneği ...	101

Şekil 5.22 : 3 odalı, 1 katlı, 10 metre avlu genişliğine sahip rüzgâr modeli geometrisi	101
Şekil 5.23 : 4 odalı, 1 katlı ve avlu genişliği 10 metre olan senaryo için rüzgâr modeli geometrisini (Şekil 5.24) üretmek için kullanılan komut örneği ...	101
Şekil 5.24 : 4 odalı, 1 katlı, 10 metre avlu genişliğine sahip enerji modeli geometrisi	102
Şekil 5.25 : 4 odalı, 1 katlı ve avlu genişliği 20 metre olan senaryo için geometri (Şekil 5.26) üretmek için kullanılan komut örneği	102
Şekil 5.26 : 4 odalı, 1 katlı, 20 metre avlu genişliğine sahip rüzgâr modeli geometrisi	102
Şekil 5.27 : 3 odalı, 3 katlı ve avlu genişliği 8 metre olan senaryo için rüzgâr modeli geometrisini (Şekil 5.28) üretmek için kullanılan komut örneği	103
Şekil 5.28 : 3 odalı, 3 katlı, 8 metre avlu genişliğine sahip rüzgâr modeli geometrisi	103
Şekil 5.29 : Rüzgâr modeli geometrisinin plan kesiti	104
Şekil 5.30 : Domain genişliği 50 m, derinliği 50 m ve yüksekliği 25 m olarak senaryo için çalıştırılan komut örneği.....	104
Şekil 5.31 : Domain genişliği 50 m, derinliği 50 m ve yüksekliği 25 m olarak senaryo için çalıştırılan komut sonrası oluşan blockMeshDict dosyası.....	105
Şekil 5.32 : Ağ yapısı iyileştirme aşamaları	106
Şekil 5.33 : Ağ yapısının level 1, 2 ve 3 iyileştirme aşamaları ile plan görünümü .	107
Şekil 5.34 : Ağ yapısının level 2 ve 3 iyileştirme aşamaları ile plan görünümü	107
Şekil 5.35 : Ağ yapısının level 3 iyileştirme aşaması ile plan görünümü.....	107
Şekil 5.36 : Ağ yapısının level 1, 2 ve 3 iyileştirme aşaması ile kesit görünümü ...	108
Şekil 5.37 : Ağ yapısının level 2 ve 3 iyileştirme aşaması ile kesit görünümü	108
Şekil 5.38 : Ağ yapısının level 3 iyileştirme aşaması ile kesit görünümü	108
Şekil 5.39 : Ölçüm noktalarının plan ve kesitteki görünümü	109
Şekil 5.40 : 107.000 ve 129.000 ağ yapısı simülasyon sonuç farkları.....	110
Şekil 5.41 : 129.000 ve 184.000 ağ yapısı simülasyon sonuç farkları.....	111
Şekil 5.42 : 184.000 ve 244.000 ağ yapısı simülasyon sonuç farkları.....	111
Şekil 5.43 : 244.000 ve 338.000 ağ yapısı simülasyon sonuç farkları.....	112
Şekil 5.44 : 338.000 ve 443.000 ağ yapısı simülasyon sonuç farkları.....	112
Şekil 5.45 : 443.000 ve 591.000 ağ yapısı simülasyon sonuç farkları.....	113
Şekil 5.46 : 591.000 ve 850.000 ağ yapısı simülasyon sonuç farkları.....	113

Şekil 5.47 : 850.000 ve 1.149.000 ağ yapısı simülasyon sonuç farkları	114
Şekil 5.48 : 1.149.000 ve 1.531.000 ağ yapısı simülasyon sonuç farkları	114
Şekil 5.49 : Artık değer analizi	115
Şekil 5.50 : Süreklilik (continuity) değerleri	116
Şekil 5.51 : Senaryoların python subprocess kütüphanesi ile eş zamanlı çalıştırılması	117
Şekil 5.52 : Sonuçların Speckle platformunda ölçekten bağımsız görünümü	117
Şekil 5.53 : Sonuçların ParaView aracındaki plan görünümü	118
Şekil 5.54 : Sonuçların ParaView aracındaki kesit görünümü	118
Şekil 5.55 : Sonuçların ParaView aracındaki streamline görünümü – 1	119
Şekil 5.56 : Sonuçların ParaView aracındaki streamline görünümü – 2	119
Şekil 5.57 : Sonuçların ParaView aracındaki streamline görünümü – 3	120



BİNALARDA ENERJİ VE RÜZGÂR SİMÜLASYONLARININ AYNI ALGORİTMA ÜZERİNDEN PARAMETRİK ÜRETİLEBİLMESİ İÇİN MODEL GELİŞTİRİLMESİ

ÖZET

Yapı performans analizleri, enerji tüketimini değerlendirerek işletme maliyetlerini düşürmeye ve karbon ayak izini azaltmaya yardımcı olurken, binaların sürdürülebilirlik ve dayanıklılık hedeflerine ulaşmasını sağlar. Enerji etkin tasarım için güneş-dünya hareketleri, iklim-mikro iklim ilişkileri, mimari malzemeler ve kullanıcı istekleri gibi çeşitli faktörler dikkate alınır. Bu analizler yapılmadığında ise düşük iç mekân kalitesi, konforsuz yaşam alanları, artan işletme ve bakım maliyetleri ve düşük yatırım değeri gibi olumsuz sonuçlar ortaya çıkabilir. Generatif tasarım, bu faktörleri hızla değerlendirebilir ve enerji ve konfor performansını artırabilir. Bu nedenle, enerji ve konfor analizleri, mimari tasarımın ayrılmaz bir parçasıdır ve günümüzün ve geleceğin yapıları için büyük önem taşır.

Binalarda enerji ve rüzgâr simülasyonları iki farklı geometrik modelleme gerektiren ve farklı fiziksel hesaplamalarla ele alınan sistemlerdir. Her bir tasarım seçeneğini bu iki alanda simüle edebilmek için iki farklı model oluşturulması ve bu iki modelin ayrı çözümler ile çözülmesi gerekmektedir. Çoklu tasarım seçeneklerinin denenmesini gerektiren durumlarda, her bir modelin her iki çözücü için hazırlanması zaman almaktadır. Modellemenin elle hazırlandığı durumlarda hata ihtimali vardır ve bu durum da ayrıca zaman kaybına neden olabilmektedir. Bu çalışmada, binalarda enerji ve rüzgâr simülasyonlarının aynı algoritma üzerinden parametrik üretilebilmesi için bir model geliştirilmiştir. Tek bir model üzerinden her iki çözücü için senaryoların parametrik olarak oluşturulabilmesi, zaman kaybı ve hata ihtimali gibi konuları aşabilecek bir yaklaşımdır.

Çalışma altı bölümden oluşmaktadır.

Birinci bölümde, insan-mekân ilişkisindeki konfor parametrelerinin insanlık tarihi boyunca değişimi ve gelişiminden; insanın konforlu mekân yaratma, yaşadığı mekânı kişisel konfor koşullarına göre değiştirme ihtiyacı duymasından bahsedilmiştir. Binaların tasarım aşamasında, bilimsel yöntemlerle enerji ve konfor analizleri yapılmadığında, daha sonradan pasif sistemlerle istenen konfor koşullara sağlanmaya çalışılmakta ve bu durum binanın karbon ayak izini, işletme ve bakım maliyetlerini artırmakta ve binaların yatırım değerini de düşürmektedir. Sürdürülebilir olmayan bu durumu engellemek, binanın ihtiyaç duyacağı ısıtma ve soğutma yüklerini önceden hesaplamak, enerji ve rüzgâr simülasyonları sayesinde mümkün olabileceği tartışılmıştır.

İkinci bölümde, binalarda enerji ve rüzgâr simülasyonlarının çıkış noktaları ve zaman içindeki evrimi ele alınmıştır. Enerji simülasyonları, ısı transferi ve termodinamik prensiplerine dayanırken, rüzgâr simülasyonları akışkanlar dinamiği hesaplamaları ile

çözölmektedir. Her iki simölasyon farklı fiziksel problemleri ele aldığından, farklı geometrik modellerlemler gerektirmektedir. Binaların enerji tüketimi ve konfor koşullarını optimize etmek amacıyla, enerji ve rüzgâr simölasyonlarının aynı parametrik model üzerinden gerçekleştirilebilmesi, zaman kaybını ve hata ihtimallerini azaltan etkili bir yaklaşım olarak sunulmuştur. Bu kapsamda, enerji ve rüzgâr simölasyonları için gerekli olan geometrik tanımlar, parametreler arası bağlantısallık ve simölasyon kütüphanelerinin oluşturulması detaylı olarak incelenmiş ve bu iki modelin tek bir algoritma ile entegre edilmesi üzerine çalışmalar yapılmıştır.

Üçüncü bölümde, enerji ve rüzgâr simölasyonları için geometrik modellerin oluşturulmasını kolaylaştıran Archaea adlı Python tabanlı bir geometrik yazılım kütüphanesinin geliştirilmesi ele alınmıştır. Kütüphane, temel geometrik nesneler (koordinatlar, vektörler, düzlemler, çizgiler) ve bu nesneler üzerinde gerçekleştirilen matematiksel işlemlerle karmaşık simölasyon modellerinin inşasını sağlar. Ayrıca, simölasyon ortamını ve bölümlerini temsil eden nesneler (Domain, Zone, Wall) tanımlanmıştır. Farklı dosya formatları (IDF, STL, VTK, Speckle) arasındaki veri transferini sağlayan dönüştürücüler, enerji ve rüzgâr simölasyonları gibi disiplinler arası projelerde veri paylaşımını ve entegrasyonu kolaylaştırmak amacıyla geliştirilmiştir.

Dördüncü bölümde ise binalarda enerji ve rüzgâr simölasyonlarının aynı parametrik model ve algoritma üzerinden gerçekleştirilebilmesi için bir model geliştirilmiştir. Modelde, kullanıcıya, iklime ve binaya ilişkin değışkenler belirlenerek enerji ve rüzgâr simölasyonları için gerekli geometrik ve fiziksel parametreler tanımlanmıştır. Python tabanlı Archaea ve Archaea-sim kütüphaneleri kullanılarak, enerji simölasyonları için EnergyPlus ve rüzgâr simölasyonları için OpenFOAM çözücöleriyle uyumlu girdi dosyaları otomatik olarak üretilmiştir. Enerji modelinde iklim dosyalarının seçilmesi, geometrik modelin oluşturulması ve girdi dosyalarının hazırlanması adımları detaylandırılmıştır. Rüzgâr simölasyonları için ise çözücünün seçilmesi, iklim verilerinin belirlenmesi, geometrik modelin ve akış hacminin oluşturulması, ağ yapısının örölmesi ve senaryo dosyalarının hazırlanması süreçleri ele alınmıştır. Geliştirilen parametrik model sayesinde, enerji ve rüzgâr simölasyonları eş zamanlı olarak çalıştırılarak, tasarım senaryolarının hızlı ve hatasız bir şekilde analiz edilmesi sağlanmıştır.

Beşinci bölümde, geliştirilen parametrik modelin avlulu bina örneği üzerinde uygulanması hedeflenmiştir. Bu uygulama esnasında geliştirilen modelin örnek üzerinden nasıl çalıştırılabileceği farklı parametreler ile oluşturulan farklı mimari seçeneklerin gösterimi yapılmıştır. Senaryo dosyalarının ve bu senaryoların çalıştırıldıktan sonra oluşan sonuç dosyalarının nasıl derlendiği de tariflenmiştir. Simölasyon sonuçlarının doğruluğu ağ bağımsızlaştırma ve artık değeri analizleri ile irdelenmiştir ve ilgili grafikler ile bu doğrulamalar aktarılmıştır. Ayrıca simölasyon sonuçlarının Speckle platformu aracılığı ile internet tarayıcısı aracılığı ile nasıl erişilebilir hale geldiği de gösterilmiştir.

Altıncı bölümde ise çalışmadan elde edilen sonuçlar derlenmiştir ve bulgular şu şekildedir. Çalışmada geliştirilen parametrik model sayesinde, enerji ve rüzgâr simölasyonları aynı algoritma üzerinden gerçekleştirilebilmiştir. Bu durum, simölasyon sürecini hızlandırarak tasarımcıların farklı bina senaryolarını hızlıca test etmelerine olanak sağlamaktadır. Aynı model üzerinde farklı tasarım senaryoları üretilip test edilebildiğinden, çok sayıda simölasyon farklı modeller oluşturmak yerine tek bir modelin modifikasyonu ile gerçekleştirilmiştir. Kullanıcılar basitleştirilmiş ve otomatize edilmiş iş adımları sayesinde zaman tasarrufu sağlarken, geometrik

kütüphane de daha fazla senaryo üretimi ve simülasyonların hızla gerçekleştirilmesi açısından önemli bir rol oynamaktadır. Aynı zamanda, geometrik kütüphanenin farklı simülasyon araçlarına genişletilebilir olması, esneklik ve kullanıcı ihtiyaçlarına göre özelleştirme imkanı sunmaktadır. İleride yapılacak çalışmalar için öneriler arasında, rüzgâr simülasyonlarının enerji simülasyonlarından önce yapılması ve atmosferik sınır tabakası ile çözülmesi, bulut tabanlı çözümlerle iş akışının hızlandırılması gibi yöntemler yer almaktadır. Ayrıca, geometrik verilerin CAD araçlarından Speckle yardımıyla hızlıca alınması, iş birliğini artıracak bir entegrasyon sağlayacaktır. Geliştirilen kütüphanelerin diğer simülasyon araçlarına uygun girdi dosyaları üretebilecek şekilde genişletilmesi de önerilmiştir. Farklı kullanıcıların bu araçları kullanabileceği arayüzlerin geliştirilmesi ise daha iyi bir kullanıcı deneyimi hedeflemektedir.





DEVELOPMENT OF A MODEL FOR PARAMETRIC GENERATION OF ENERGY AND WIND SIMULATIONS IN BUILDINGS THROUGH A SINGLE ALGORITHM

SUMMARY

Building performance analyses help reduce operational costs and carbon footprint by evaluating energy consumption, while enabling buildings to meet sustainability and resilience goals. Energy-efficient design takes into account various factors such as sun-earth movements, climate-microclimate relationships, architectural materials, and user preferences. When these analyses are not conducted, negative outcomes such as poor indoor air quality, uncomfortable living spaces, increased operational and maintenance costs, and reduced investment value may arise. Generative design can rapidly assess these factors and improve energy and comfort performance. Therefore, energy and comfort analyses are an integral part of architectural design and are essential for current and future buildings.

Energy and wind simulations in buildings require two different geometric models and are addressed through distinct physical calculations. To simulate each design option in these two domains, two separate models need to be created and solved using different solvers. When multiple design options need to be tested, preparing each model for both solvers takes time. There is also a risk of errors when the modeling is done manually, further contributing to time loss. In this study, a model has been developed to enable the parametric generation of energy and wind simulations using the same algorithm. The ability to parametrically generate scenarios for both solvers through a single model provides a solution to time loss and potential errors.

The study consists of six chapters.

The first chapter discusses the evolution of comfort parameters in the human-space relationship throughout human history and the need for individuals to create comfortable spaces and modify their environments according to personal comfort conditions. It is argued that when energy and comfort analyses are not performed using scientific methods during the design phase of buildings, later efforts to achieve desired comfort conditions with passive systems increase the building's carbon footprint, operational and maintenance costs, and decrease its investment value. Preventing this unsustainable situation, calculating the heating and cooling loads a building will need in advance, is made possible through energy and wind simulations.

In the second chapter, the origins and evolution of energy and wind simulations in buildings are examined. Energy simulations are based on heat transfer and thermodynamic principles, while wind simulations are solved using fluid dynamics calculations. Since both simulations address different physical problems, they require

different geometric modeling. To optimize the energy consumption and comfort conditions of buildings, performing energy and wind simulations through the same parametric model is presented as an effective approach to reduce time loss and potential errors. In this context, the geometric definitions required for energy and wind simulations, the interconnections between parameters, and the development of simulation libraries are detailed, and studies have been conducted on integrating these two models using a single algorithm.

The third chapter discusses the development of a Python-based geometric software library called Archaea (<https://github.com/archaeans/archaea>), which facilitates the creation of geometric models for energy and wind simulations. The library provides basic geometric objects (coordinates, vectors, planes, lines) and enables the construction of complex simulation models through mathematical operations performed on these objects. Additionally, objects representing the simulation environment and sections (Domain, Zone, Wall) are defined. Converters facilitating data transfer between different file formats (IDF, STL, VTK, Speckle) have been developed to ease data sharing and integration in interdisciplinary projects such as energy and wind simulations.

In the fourth chapter, a model has been developed to enable energy and wind simulations to be performed through the same parametric model and algorithm. Variables related to users, climate, and the building have been defined to specify the geometric and physical parameters required for energy and wind simulations. Using the Python-based Archaea and Archaea-sim (<https://github.com/archaeans/archaea-simulation>) libraries, input files compatible with the EnergyPlus solver for energy simulations and the OpenFOAM solver for wind simulations were automatically generated. The steps of selecting climate files, creating geometric models, and preparing input files for the energy model were detailed. For wind simulations, processes such as selecting the solver, defining climate data, creating the geometric model and flow volume, generating the mesh, and preparing scenario files were discussed. The developed parametric model allows energy and wind simulations to run simultaneously, ensuring the rapid and error-free analysis of design scenarios.

In the fifth chapter, the application of the developed parametric model on a courtyard building example was aimed. During this application, different architectural options created with different parameters were demonstrated, showing how the developed model can be run based on the example. The preparation of scenario files and how the resulting files were compiled after the scenarios were run were explained. The accuracy of the simulation results was assessed through mesh independence and residual analyses, and these validations were presented with relevant graphs. Additionally, it was shown how the simulation results could be accessed via a web browser using the Speckle platform.

In the sixth chapter, the results obtained from the study were summarized with the following findings. Thanks to the developed parametric model, energy and wind simulations were performed using the same algorithm. This accelerates the simulation process, allowing designers to quickly test different building scenarios. Since different design scenarios can be generated and tested on the same model, many simulations were performed through the modification of a single model rather than creating multiple models. Users save time through simplified and automated workflows, while the geometric library plays an important role in generating more scenarios and quickly executing simulations. Moreover, the geometric library's ability to expand for different simulation tools offers flexibility and allows customization according to user needs.

Outcomes of the study extracted as following.

Within the scope of this study, it was made possible to conduct simulations through a shared parametric model generated by a single algorithm, rather than creating two separate models for energy and wind simulations. This approach shortens the time required to determine the building's thermal performance, thus expediting the design process.

With the shared parametric model developed in this study, it is feasible to generate and test all possible scenarios on the same model for analyzing and optimizing building thermal performance. This allows numerous design scenarios to be achieved not by producing separate models but through the modification of a single model.

The simplified and automated workflow of the model enables users to save significant time in its application.

The geometric library developed within the study facilitates the creation of basic geometric objects, operations on these objects, and the generation or transformation of the geometry into required formats. Additionally, variables defined in this library can directly produce the geometry necessary for energy and wind simulations. Consequently, this library supports the generation of numerous scenarios for thermal performance assessment and enables a large number of simulations by creating scenario pools. As the ease of scenario generation and testing in simulations relies on the features of the geometric library, updating this library in line with the study's requirements is essential for conducting specific analyses.

The extensibility of the geometric library for different comfort requirements, and thus for different simulation tools, allows users to perform customized simulations to meet a variety of needs. This flexibility presents a significant advantage for applicability across diverse projects.

The correct construction of the parametric model is achievable by accurately defining the upper and lower bounds and range values of the variables used according to the study's requirements. In this way, multiple scenarios can be solved through parallel computation methods, enabling the analysis of a greater number of scenarios in a shorter period.

Since the numerous scenarios generated through the parametric model ensure the production of all potential scenario options for performance evaluation, obtaining numerous results and assessing them with optimization tools becomes easier. This approach allows a more comprehensive and detailed examination of simulations, facilitating the swift and efficient determination of optimal solutions.

The accessibility of wind simulation results independent of the Linux environment via Speckle enables end users to easily access the results. Thus, the user-friendly model produced in the study enhances user access to simulation outcomes and increases the model's usability.

The model produced in this study makes it feasible to swiftly conduct both energy and wind simulations for design scenarios developed during the architectural design process and to evaluate the thermal performance of these scenarios. Notably, the practical provision of data for designers from wind simulations, which typically require extensive modeling and computation time, is simplified. This assists designers in making faster, more effective, and accurate decisions when selecting optimal solutions among numerous scenarios during the design process.

Suggestions for future research include as following.

Altering the model workflow by conducting wind simulations before energy simulations could yield more effective results, especially for cooling-priority studies. This approach would allow the results from wind simulations to inform energy simulations.

Solving wind simulations with an atmospheric boundary layer would yield more realistic and accurate results, allowing simulations to more closely align with atmospheric conditions.

Incorporating workflows that enable solutions to be executed in cloud environments would facilitate faster and more efficient simulations, allowing users to perform simulations on a larger scale and in shorter time frames.

Integrating input geometries obtained from CAD tools via Speckle and incorporating Speckle Automate into a workflow accessible to all would enable users to share geometric data rapidly and efficiently. This integration would facilitate collaboration by allowing different users to work on the same data, enhancing the process's efficiency.

The developed libraries can be extended to generate input files required for other simulation tools beyond those needed for energy models (idf) or wind simulations (stl). For example, files required by the Radiance solver for lighting simulations could also be exported through related improvements.

Developing interfaces that allow different users to utilize these libraries and tools can enhance the user experience, making the tools more accessible and effective for a broader audience.

1. GİRİŞ

Mimari tasarımı, insanın temel gereksinimlerini konforlu bir şekilde karşılayabilecekleri mekanların üretimi olarak ele aldığımızda, tasarımın yapılma biçimi tarih içerisindeki kümülatif gelişmelerle sürekli değişmektedir. Dünya üzerinde yaşayan insan sayısının artması, şehirleşmenin teknoloji ile ivme kazanması ve yaşam biçimlerinin değişmesiyle insan-mekân arasındaki konfor parametreleri de sürekli olarak değişmektedir. İlk enerji kaynağımız olan güneş hayatta kalabilmemizi sağlayan en önemli konfor parametremizdir. Gündüz ısınma ve aydınlanma ihtiyaçlarını güneş yoluyla karşılayabilen insanoğlu, geceleri soğuktan korunmak ve gecenin karanlığından gizlenmek için mekân arayışına girmiştir. Bu mekânlar; ateş, kömür, türbin, petrol, elektrik, buhar, doğalgaz, nükleer gibi enerji kaynaklarının zamanla keşfedilmesiyle evrime uğramıştır. Mekânların evrimi, kullanıcının ısı, görsel ve işitsel konfor koşullarını sağlaması amacıyla gün geçtikçe hızlanmakta ve mimari tasarım gereksinimleri sürekli değişmektedir. Kullanıcının konfor koşulları pasif tasarım ilkeleriyle gerçekleştirilebileceği gibi yapma sistemler yardımıyla da sağlanabilmektedir. Binaların kullanıcı konforunu sağlayacak şekilde tasarlanması ise binanın inşasından önce binaların ısı, görsel ve işitsel performanslarının test edilmesiyle olanaklıdır. Çağdaş tasarım stratejileri kapsamında, binaların özellikle ısı performanslarının değerlendirilmesi, enerji ve rüzgâr simülasyonlar yolu ile yapılabilmektedir.

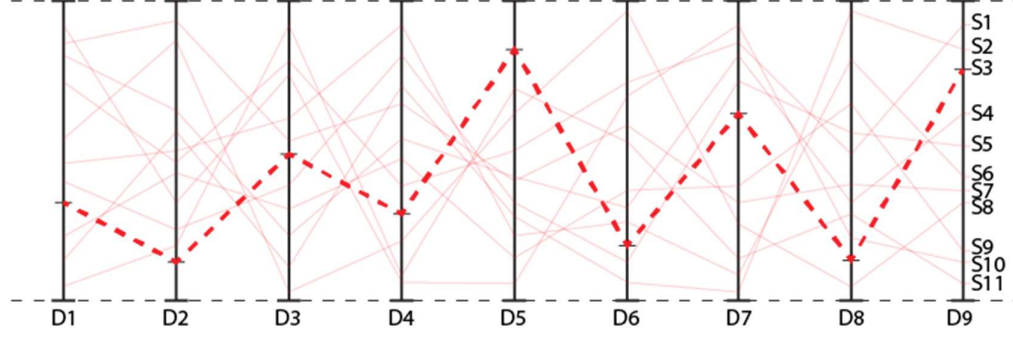
Günümüz yapılarında enerji tüketimini; iklimsel etmenler, çevresel etmenler, mekânsal etmenler ve kullanıcı konforu gibi temel parametreler etkilemektedir. Dünya’da üretilen enerjinin yaklaşık %40’ını yapıların tükettiğini düşündüğümüzde bu parametrelerin enerji simülasyonları kullanılarak ele alınan yapı performans analizleri ile mimari tasarım aşamasında irdelenmesi enerji etkin ve konforlu yapıların ortaya çıkmasında büyük önem taşımaktadır (IEA, 2023).

Binalarda havalandırma ve soğutmayı pasif şekilde sağlamanın en önemli yollarından birisi de doğal havalandırmadır. Mekanik sistemlerden destek alınmadan havalandırılan ve soğutulan binalarda hem kullanıcı açısından daha konforlu ve sağlıklı ortamlar

üretilebilmekte hem de binalarda gerçekleşen enerji harcamaları önemli ölçüde azaltılmaktadır. Özellikle sıcak nemli iklim bölgelerinde, konforsuzluk yaratan yüksek nemi azaltmak açısından doğal havalandırma çok önemlidir.

Binalarda enerji simülasyonları ve rüzgâr simülasyonlarının yapılabilmesi günümüzde farklı simülasyon programları ile gerçekleştirilmektedir. Enerji ve rüzgâr hesaplamalarının yapılabilmesi için test edilecek olan binanın da her durum için yeniden modellenmesi gerekmektedir. Enerji hesaplamaları için gereksinim duyulan modelin hazırlanmasında bina kabuğunun optik ve termofiziksel özellikleri tanımlanmaktadır. Oysa ki, rüzgâr hesaplamaları için hacmi çevreleyen duvarların sınır elemanı olarak tanıtılması yeterlidir. Ancak rüzgâr hesaplamalarında da akışkanın hareket ettiği bina dışı ortamın akış çözüm alanı olarak tanımlanması ve bu ağın matematiksel olarak çözülebilir nitelikte ağ yapılarına (mesh) bölünmesi gerekmektedir. Bu nedenle enerji hesaplamaları için üretilen model rüzgâr hesaplamaları için yetersiz kalmakta ve her farklı performans değerlendirmesi için farklı modeller üretilmesi gerekmektedir. Ek olarak üretilen model yardımıyla sadece tek bir koşul test edilebilmekte, olası diğer seçenekler için modelin yeniden yapılması gerekmektedir. Bu durum mimari çalışmalarda binanın ısıl performansının belirlenmesi aşamasında çok sayıda farklı modelin oluşturulması ve sayısız simülasyon gereksinimi nedeniyle oldukça fazla zaman almakta ve iş akışı ve iş programlarını yoğunlaştırmaktadır.

Bu çalışmada, mimari tasarımın ısıl performans değerlendirmesi adımıyla farklı gereksinimler için farklı modeller üretilmesi yerine hem enerji hem de rüzgâr simülasyonlarının parametrik olarak gerçekleştirilebilmesi amacıyla ortak bir model geliştirilmiştir. Oluşturulan parametrik modelin mevcut modellere göre en önemli farkı, aynı model kullanılarak hem enerji hem de rüzgâr simülasyonlarının birbirinden bağımsız bir şekilde yapılabilmesidir. Aynı zamanda bu parametrik model yardımıyla performans değerlendirmesi için gerekli olan tüm olası senaryoların (Şekil 1.1) da aynı model üzerinde üretilip test edilmesinin sağlanabilmektedir. Böylece modelin parametризasyonu ile olası tüm senaryolar oluşturulup içlerinden seçim yapılabilmesi olanaklıdır. Sonuç olarak bu parametrik model sayesinde mimarlar; hem enerji ve rüzgâr simülasyonları için hem de bu simülasyonlardaki olası tüm senaryolar için ayrı model üretmek zorunda kalmayacak ve bu sayede tasarım süreci hızlanacaktır.



Şekil 1.1 : Çok değişkenli problem havuzu ve üretilen olası senaryoların gösterimi-
Değişkenler: D1, D2,... Dn – Senaryolar: S1, S2,...Sn

Tez çalışması kapsamında üretilen generatif tasarımın mimarlara sağlayacağı en önemli fayda; belirlenen sınırlar içerisinde çok sayıda tasarım alternatifini hızlı bir şekilde değerlendirerek yeniden üretme yoluyla (evolve-generate) tasarımların ısıt performanslarını arttırmak olacaktır.

2. BİNALARDA ENERJİ VE RÜZGÂR SİMÜLASYONLARI

İçinde yaşadığımız binalar ve çevresi insanların çeşitli konfor koşullarını sağlayabilmesi amacıyla tasarlanır. Erken tasarım aşamasında bu konfor koşullarının ölçülmesi, çevresine uygun mimari tasarımların ortaya çıkmasında çok önemlidir. Bu ölçüm, gerçek test düzenekleri veya bilgisayar ortamında hazırlanmış sanal modellerin simülasyon araçları ile çözümlenmesi ile mümkündür. Bu bölümde binalarda enerji ve rüzgâr simülasyonlarının çıkış noktaları, zaman içinde nasıl evrimleştiği, simülasyona uygun model hazırlığı için gerekli olan girdi/çıkış verilerinin neler olduğu ve son olarak bu iki simülasyon modelinin tek bir parametrik model üzerinden nasıl ele alınabileceği tartışılacaktır.

Binalarda enerji ve rüzgâr simülasyonları temelde fizikğin iki ayrı konusu ile çözümlenmektedir. Enerji simülasyonları ısı transferi ve termodinamik ile ele alınırken rüzgâr simülasyonları akışkanlar dinamiği hesaplamaları ile ele alınmaktadır. Bu ayrım beraberinde değişkenlerin ve model tanımlama biçiminin farklılaşmasına neden olmaktadır.

2.1. Binalarda Enerji Simülasyonları

Gün içinde barınma, eğitim ve çalışma gibi amaçlarla insanların uzun süre içerisinde zaman geçirdikleri binalar, kullanıcı konforu gereksinimi nedeniyle dünyadaki enerji tüketiminin yaklaşık %40'ına neden olmaktadır (IEA, 2023). Bu nedenle enerji etkin ve düşük karbon ayak izine sahip binalar tasarlanması doğal kaynakların etkin kullanılması açısından oldukça önemlidir.

Enerji etkin bir binanın tasarımı aşamasında enerji hesaplamaları yardımı ile binanın inşa edildikten sonra harcayacağı enerji ve üreteceği karbon dioksit miktarı hesaplanabilir. Binalardaki enerji hesaplamaları, ısı transferi alanındaki temel fiziksel prensiplere dayanır. Binalar, iç ve dış ortam arasında ısı transferinin gerçekleştiği ve bunun sonucunda iç ortam koşullarının oluştuğu ortamlardır. Bu nedenle ısı transferi, binaların ısınması, soğutulması ve havalandırılması süreçlerinde belirleyici bir rol oynar.

Isı transferi, iletim (kondüksiyon), taşınım (konveksiyon) ve ışıınım (radyasyon) olmak üzere üç temel yöntemle gerçekleşir: İletim, ısı enerjisinin katı maddeler yardımıyla doğrudan geçmesidir ve binanın duvarları, pencereleri ve çatı ve döşemeleri gibi yapı elemanlarında meydana gelir. Taşınım, ısıının akışkanlar (su, hava vb.) yardımıyla geçmesini ifade eder ve bu, ısıtma ve havalandırma sistemleri ve bina içinde hava hareketi ile ilişkilidir. Işıınım, elektromanyetik dalgalar yoluyla ısı geçiştir ve özellikle güneş ışıınımları ile ilgilidir (Çengel & Ghajar, 2015).

Enerji hesaplamaları, bu ısı transferi mekanizmalarını hesaba katarak bina içindeki ısı dengesini, sıcaklık dağılımlarını ve enerji tüketimini analiz eder. Bu hesaplamalar, bina tasarımında, enerji etkin önlemlerin optimize edilmesine yardımcı olur.

Binalarda enerji modellemesi ve hesaplamalarının kökenleri, enerji krizinin yaşandığı 1970'lerde ortaya çıkmıştır (Office of the historian US State, t.y.). Bu dönemde, enerji maliyetleri arttıkça ve enerji kaynakları sınırlı hale geldikçe, bina tasarımında ve işletmelerinde enerji verimliliğı önemli hale gelmeye başlamıştır. İlk enerji simülasyon yazılımları bu dönemde geliştirilmeye başlanmıştır.

1970'lerin sonlarına doğru, Lawrence Berkeley Ulusal Laboratuvarı tarafından geliştirilen DOE-2 (DOE-2, 1991), bina enerji modellemesinde öncü bir rol oynamıştır. Bu yazılım, binaların enerji tüketimini hesaplamak için kullanılmış ve bu alandaki birçok gelişmenin temelini atmıştır.

Amerikan Isıtma, Soğutma ve Klima Mühendisleri Derneğı (ASHRAE), enerji verimliliğı standartları geliştirmeye başlamıştır (ASHRAE, 2022). 1975 yılında ilk versiyonu yayınlanan ASHRAE Standard 90.1, ticari bina enerji standartlarının belirlenmesinde ve enerji modellemesinde kullanılmaya başlanmıştır.

1990 yıllarından itibaren bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle kullanıcı deneyimi yüksek yazılımlar geliştirmeye başlanmıştır. Bilgisayara olan erişilebilirliğı ve kullanıcı deneyiminin artmasıyla enerji simülasyon yazılımları da daha yaygın kullanılmaya başlanmıştır. Şimdilerde DOE-2 yazılımının yerini alan açık kaynak kodlu EnergyPlus yazılımı DOE-2'nin de geliştiricisi olan DOE (Department of Energy) tarafından geliştirilmiştir ve ilk versiyonu Nisan 2001'de yayınlanmıştır (Desideri & Asdrubali, 2018).

Günümüzde binalarda enerji simülasyonları, global ve yerel yönetmelikler ile desteklenerek artık mimari tasarımın bir parçası olmuşlardır. ASHREA 90.1'in yanı

sıra Türkiye’de de “Binalarda Isı Yalıtım Kuralları” adlı TS 825 yönetmeliği Mayıs 2008’de yayınlanmıştır (TSE, 2013).

Standartların yanı sıra, mimari yapıların enerji etkinlik ve çevresel etki açısından derecelendirilmesi özel sertifika programları ile sağlanabilmektedir. Bu durum binalarda enerji modelleme ve simülasyonlarının ticari kaygılar nedeni ile olsa bile bilinirliğinin ve öneminin artmasına destek olmaktadır.

Enerji modelinin oluşturulabilmesi için kullanıcıya ilişkin, iklime ilişkin ve binaya ilişkin tasarım değişkenlerinin ve yapma sistemlere ilişkin değişkenlerin tanımlanması gerekmektedir. Bu değişkenlerin tanımlanması ile enerji modeli çözücüler ısı transfer denklemlerini çözebilmektedir.

2.1.1. Binalarda enerji simülasyon değişkenleri

Binalarda enerji simülasyonun bir çözücü ile çalıştırılabilmesi için modele ait tüm değişkenlerin girdi dosyaları aracılığıyla tanımlanması gereklidir. Bu değişkenler kullanıcıya, iklime, binaya, yapma sistemlere ve hesaplamaya ilişkin değişkenler olarak açıklanabilir.

2.1.1.1. Kullanıcıya ilişkin değişkenler

Enerji modellemesinde kullanıcıya ilişkin değerler, genellikle bina kullanıcılarının etkileşimlerini, varlıklarını ve davranışlarını simülasyon içinde temsil etmek üzere simülasyon programlarına entegre edilir. Bu değerler, bina içi ortam koşullarının yanı sıra enerji tüketimi ve konfor seviyeleri üzerinde büyük etkiye sahip olabilir.

Aktivite düzeyi

İklimsel konfor, binalarda kullanıcılarla, iç mekân yüzeyleri arasında gerçekleşen ısı alışverişi sonucu gerçekleşmektedir. Aktivite düzeyi ise, insanın yediği yiyecekleri yakarak birim zamanda ürettiği ve metabolizma düzeyi olarak adlandırılan enerji miktarını etkileyen ve kullanıcıların yaş, ırk, cinsiyet ve sağlık durumu gibi değişkenlere bağlı olarak farklılık gösterebilen ve dolayısıyla ısı konforu etkileyen en önemli değişkenlerden biridir. Bu nedenle metabolizma düzeyi ile bağlantılı olan aktivite düzeyi, iç mekandaki ısı konforunun sağlanabilmesi için enerji hesaplamalarına dahil edilen önemli bir değişkendir.

Metabolizma düzeyi MET birimi ile ifade edilmektedir ($1 \text{ MET} = 58.2 \text{ W/m}^2$). Belirli eylem türlerine göre metabolizma düzeylerinin aldığı değerler değişkenlik gösterir. 1 MET, oturarak dinlenen bir insanın birim vücut yüzey alanından birim zamanda üretilen enerji miktarıdır (Bekar, 2018).

Çizelge 2.1 : Metabolik hızlar (TS-EN-ISO 7730, 2006; Bekar, 2018)

Aktivite	Metabolik Hız	
	W/m ²	Metabolik birim (met)
Yaslanma	46	0,8
Oturma	58	1
Durgun aktivite (ofis, ev, okul, laboratuvar)	70	1,2
Ayakta durma, hafif aktivite (alışveriş, laboratuvar, hafif sanayi)	93	1,6
Ayakta durma, orta seviye aktivite (tezgahtar, ev işi, makine işi)	116	2
Yer seviyesinde yürüme		
2 km/h	110	1,9
3 km/h	140	2,4
4 km/h	165	2,8
5 km/h	200	3,4

Giysi türü

Giysiler, ısı yalıtım dirençlerine bağlı olarak, binada kullanıcılarla çevre arasındaki ısı alışverişini dolayısıyla ısıl konfor koşullarını etkilemektedir. Bu nedenle, ısıl konfor hesaplamalarında kullanıcıların giysi türleri, yani giydikleri kıyafetlerin kumaşı, çeşidi ve ısı yalıtım değerleri de hesaplamalara dahil edilen değişkenlerdendir. Giysilerin ısı yalıtım değerleri, Clo değeri ile ifade edilmekte olup birimi m².K/W ya da m².°C/W olarak kabul edilir. 1 Clo 0,155 m².°C/W değerindedir [8].

Kullanıcı yoğunluğu

Aktivite düzeyi ve giysi türüne bağlı olarak binadaki kullanıcı sayısının belirlenmesi, kullanıcıların çevre ile gerçekleştirdikleri ısı alışverişinin sonucu olarak gereksinim duyulacak aktif sistemlerin ve dolayısıyla enerji harcamalarının belirleyicileridir.

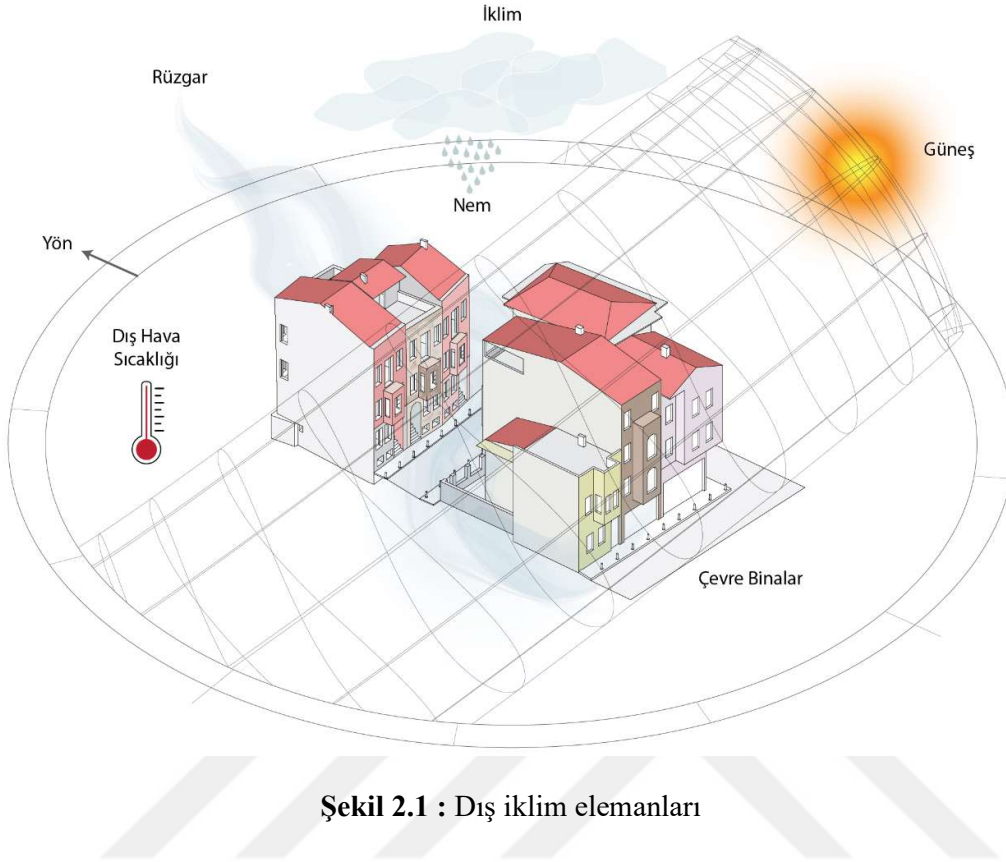
Kullanıcı takvimi

Bina enerji simülasyonlarında kullanıcı planlamasının önemi çok yönlüdür ve bu tür analizlerin sonuçları üzerinde doğrudan etkilidir. Planlama, binadaki farklı zonların ne zaman ve ne süre ile kullanılacağını belirler; bu da gün boyunca ve mevsimler boyunca gerçekleşen enerji talebini doğrudan etkiler. Enerji talebindeki bu değişkenlik, bina aktif sistemlerinin boyutu ve CO2 salım düzeyi üzerinde doğrudan etkiye sahiptir.

Bu faktörlerin her biri, bir binanın enerji tüketimini etkileyebilir ve enerji simülasyonlarında dikkate alınmalıdır. Simülasyon girdisi olarak doğru tanımlanmaları, enerji verimliliği stratejilerinin geliştirilmesi ve sürdürülebilir bina tasarımı ve işletmesi için temel bir adımdır.

2.1.1.2. İklimle ilişkin değişkenler

İklim, binaların enerji tüketimini büyük ölçüde etkileyen temel bir faktördür. Soğuk kışlar ve sıcak yazlar, binaların ısıtma ve soğutma ihtiyaçlarını artırır. İklim koşullarına bağlı olarak güneşlenme süresi, güneş ışınımına dayalı enerji sistemlerinin performansını etkiler. Rüzgâr hızı rüzgâr enerjisi sistemlerinin etkinliğini belirler. Dış iklim elemanları, binaların içinde bulunduğu atmosferik koşulları tanımlar. Bu koşullar; coğrafi konum, deniz seviyesinden yükseklik, topografya, güneş ışınımı, dış hava sıcaklığı, yağış, nem, basınç gibi birçok parametreye bağlıdır. İklimsel veriler meteoroloji istasyonları, radyo sondaları, uzay araçları yardımıyla toplanarak uzun yıllık veriler olarak anlamlı hale getirilmektedir. Bina tasarımında iklimlendirme ve enerji hesaplamaları için veri olarak kullanılan bu değişkenler yardımıyla enerji etkin binalar tasarlamak veya binaların mevcut durumlarını iyileştirebilmek olanaklıdır. Dış iklimle ilişkin değişkenler güneş ışınımı, dış hava sıcaklığı, dış hava nemliliği ve dış hava hareketi başlıkları altında incelenebilir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 : Dış iklim elemanları

Bina enerji simülasyonlarında gereksinim duyulan en temel iklim verileri her farklı simülasyon programı için farklı iklim dosyalarında derlenmektedirler.

Bu dosyalar, 8760 saat (1 yıl) için belirli bir konumun ayrıntılı hava durumu verilerini içerir. Bu iklim dosyaları dünya üzerindeki meteoroloji istasyonlarından derlenen uzun süreli verilerin ortalamalarına ve ekstrem durumlarına dayanmaktadır. İklim dosyalarındaki veriler;

Konum bilgisi

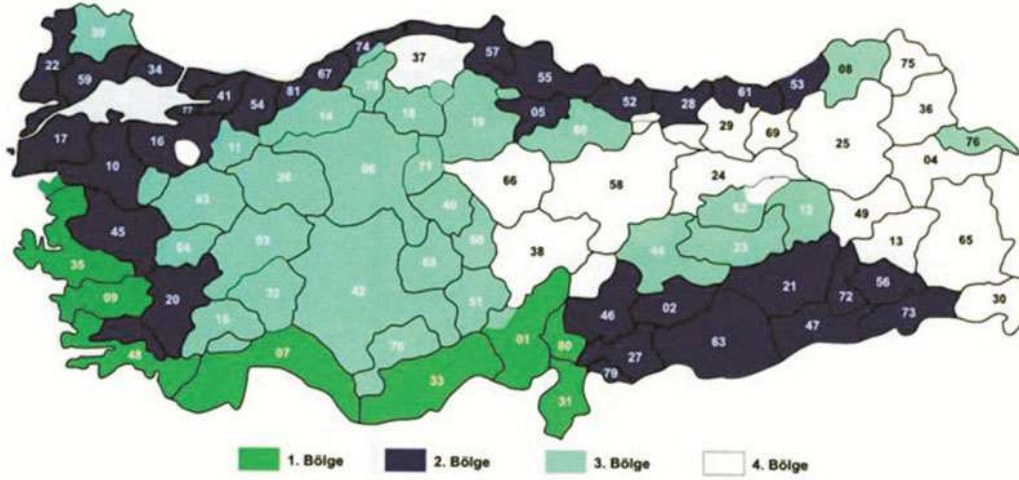
Hava durumu verilerinin sağlandığı ve simüle edilecek binanın bulunduğu konumun enlemi, boylamı, zaman dilimi ve yüksekliğini içerir. Binanın dünya üzerinde bulunduğu konumu (enlem, boylam), bulunduğu coğrafya, iklimi, deniz seviyesinden yüksekliği, eğimli arazide olup olmadığı, kırsal ya da kentsel alanda olup olmaması, arazinin yönlenişi, arazideki konumu gibi faktörleri ifade eder. Binaların güneş ışınlamı kazançları ve rüzgârdan yararlanma değerleri binanın arazi içindeki yerine göre değişmektedir. Binanın yerinin bilimsel hesaplamalara dahil edilebilmesi için dünya ve Türkiye ölçeğinde, iklim bölgeleri standart kodlarla ifade edilmektedir. Böylelikle, enerji etkin ve iklimle uyumlu bina tasarımları yapmak mümkün olmaktadır.

Dünya ölçeğinde iklim bölgeleri ASHREA tarafından hazırlanmış olan sınıflandırma sistemi ile tanımlanmıştır. Bu iklim bölgeleri, 1-8 arasında numaralandırılmış ve her numara A, B, C harfleriyle alt kategorilere ayrılarak kodlanmıştır.

Çizelge 2.2 : ASHRAE iklim bölgeleri

İklim Bölgesi	Sıcaklık	Nemlilik	Köppen Sınıflandırması
1A	Çok Sıcak	Nemli	Tropical Wet and Dry
1B	Çok Sıcak	Kuru	Arid Middle Latitude
2A	Sıcak	Nemli	Humid Subtropical (Warm Summer)
2B	Sıcak	Kuru	Arid Subtropical
3A	Ilımlı	Nemli	Humid Subtropical (Warm Summer)
3B	Ilımlı	Kuru	Semiarid Middle Latitude/Arid Subtropical/Highlands
C	Ilımlı	Deniz	Dry Summer Subtropical (Mediterranean)
4A	Karışık	Nemli	Humid Subtropical/Humid Continental (Warm Summer)
4B	Karışık	Kuru	Semiarid Middle Latitude/Arid Subtropical/Highlands
4C	Karışık	Deniz	Marine (Cool Summer)
5A	Soğuk	Nemli	Humid Continental (Warm Summer)
5B	Soğuk	Kuru	Semiarid Middle Latitude/Highlands
5C	Soğuk	Deniz	Marine (Cool)
6A	Soğuk	Nemli	Humid Continental (Warm Summer/Cool Summer)
6B	Soğuk	Kuru	Semiarid Middle Latitude/Highlands
7	Çok Soğuk	-	Humid Continental (Cool Summer)
8	Yarı Aktik Bölge	-	Yarı Aktik Bölge

Türkiye’de ise TS 825 standardında tanımlanan 5 farklı iklim bölgesi kullanılmaktadır. Binanın bulunduğu yer ile ilgili değişkenler, yerel iklim koşulları ve konfor koşulları bir arada değerlendirildiğinde, yapma ısıtma ve iklimlendirme ihtiyacının ve dolayısıyla enerji harcamalarının en aza indirilmesine imkân sağlamaktadır.



Şekil 2.2 : TS 825 Türkiye iklim bölgeleri

Zaman ve tarih damgaları

Dosyadaki her veri noktasının karşılık gelen bir tarih ve zaman damgası vardır, bu da simülasyonun zamana bağımlı hava değişikliklerini doğru bir şekilde takip etmesini sağlar.

Sıcaklık verileri

Kuru ve ıslak termometre sıcaklıklarını içerir. Dış hava sıcaklığı, atmosferin ısınma ve soğuma derecesini ifade eden; enlem, mevsim, günün saati, güneşin geliş açısı ve coğrafi konum gibi değişkenlere bağlıdır. İç mekân ısıl konforunu, ısıtma ve soğutma ihtiyaçlarını doğrudan etkileyen dış hava sıcaklığı, bina enerji tüketimini de belirleyen bir faktördür ve bu nedenle enerji hesaplamalarına dahil edilir. Güncel dış hava verilerini elde etmek için çoğunlukla meteorolojik istasyonlar ve uydu verileri kullanılır.

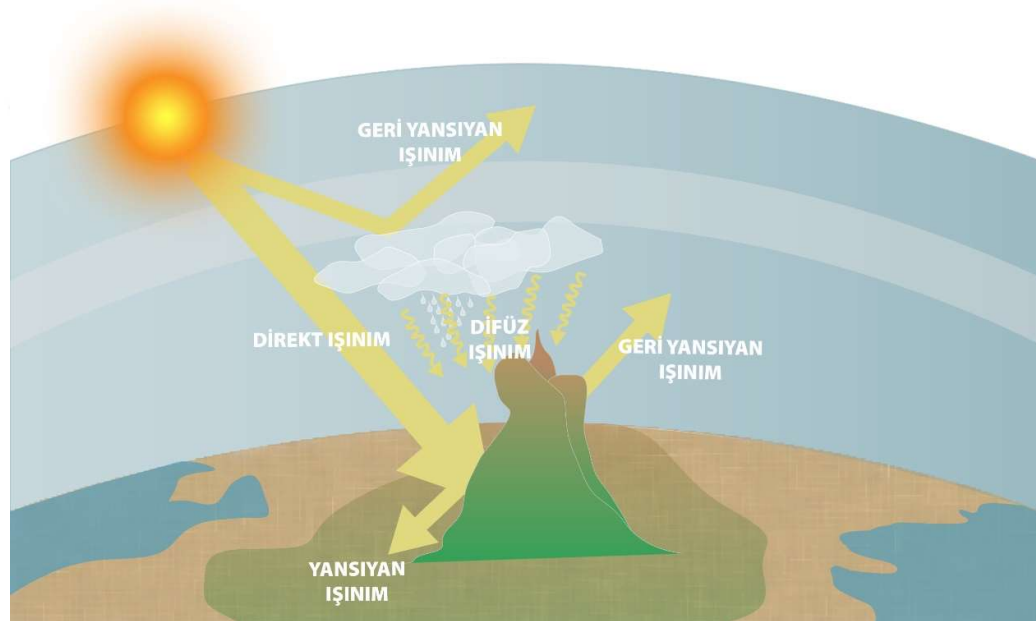
Nem verileri

Göreceli nem ve çiğ noktası verilerini içerir. Dış hava nemliliği, atmosferde su buharı şeklinde bulunan nem miktarıdır. Çoğunlukla yüzdelik olarak ifade edilen dış hava nemliliğinin ideal seviyenin altında ya da üzerinde olması, binaların iç konfor koşullarını dolayısıyla enerji harcamalarını etkileyen bir değişkendir. Bu nedenle dış hava nemliliği, enerji etkin bina tasarımına dahil edilmesi gereken bir başka değişken olması sebebiyle enerji hesaplamalarında kullanılmaktadır (Zevenhoven vd., 2019).

Nem verileri konfor seviyelerini değerlendirmek ve nem kontrol sistemlerinin performansını analiz etmek için gereklidir.

Güneş ışıınımı

Konuma ait güneş ışıınım verilerini içerir. Bu veriler, gün ışııı ve termal yükler üzerinde etkili olur. Güneş ışıınımı, güneş ışıınlarının dünya yüzeyine ulaştıktan sonra çeşitli yüzeylerden yansıması ya da doğrudan yayılması ile ısı ve ışıık kaynağı olarak algılanan elektromanyetik enerjiyi ifade eder. Enerji hesaplamaları açısından ele alındığında ise güneş ışıınımı, ısıl konfor koşullarının sağlanması ve enerji etkin tasarım yapılabilmesi için enerji hesaplamalarına dahil edilmesi gerekli olan en önemli değişkenlerden biridir. Güneş ışıınımı değişkeni değerlendirilirken, güneşten doğrudan binaya ulaşan direkt güneş ışıınımı; yüzeylerden yansıyarak binaya ulaşan yansımış güneş ışıınımı ve nesnelerin yüzeylerinden yayılan yaygın ışıınım göz önünde bulundurularak hesaplamalara dahil edilir (de la Flor vd., 2005; Şekil 2.3).



Şekil 2.3 : Direkt, yansımış ve yaygın Güneş ışıınımı

Direkt güneş ışıınımı, Güneş'ten gelen elektromanyetik dalgaların atmosferdeki parçacıklar tarafından önemli ölçüde saçılmadan veya emilmeden doğrudan yeryüzüne ulaşan bölümüdür. Bu ışıınım türü, açık ve bulutsuz hava koşullarında en yüksek seviyede olup, güneş ışıınlarının açısına ve atmosferin optik yoğunluğuna bağlı olarak değişkenlik gösterir. Direkt güneş ışıınımı, fotovoltaik paneller gibi güneş enerjisi

sistemlerinin verimliliğinde kritik bir rol oynar ve güneşlenme veya D vitamini sentezi gibi biyolojik süreçler üzerinde etkilidir.

Yansımış güneş ışıınımı, güneş ışıınlarının yeryüzüne veya atmosferdeki diğer yüzeylere çarptıktan sonra yansması sonucu oluşur. Bu yansma süreci, ışıının yüzeyin özelliklerine (örneğin, rengi, dokusu ve materyalin türü) bağılı olarak değışir. Örneğın, kar ve buz gibi açık renkli yüzeyler ışığı daha fazla yansıtırken, koyu renkli ormanlık alanlar daha az yansıtır. Yansımış ışıınım, özellikle kentsel ve sucul ekosistemlerde mikro iklim koşullarını etkileyebilir ve güneş ışıına maruz kalma oranlarını değıştirebilir.

Yaygın (veya difüz) güneş ışıınımı, atmosferdeki parçacıklar tarafından saçılan ve böylece doğrudan güneşin kaynağından saparak yeryüzüne ulaşan güneş ışıınımını ifade eder. Bulutlu hava koşullarında, güneş ışıınlarının çoğı bu şekilde saçılır. Yaygın ışıınım, gölge alanlarda ve güneş ışıınımının doğrudan ulaşmadığı yerlerde bitki büyümesi ve fotosentez için önemlidir. Ayrıca, yaygın ışıınım, güneş enerjisi toplayıcılarının tasarımı ve yerleşimi için önemli bir faktördür, çünkü bu ışıınlar tüm yönle yayılır ve dolayısıyla farklı açılardan toplanabilir.

Rüzgâr verileri

Rüzgâr hızı ve yönü, doğal havalandırma potansiyelini ve dış konvektif ısı transferini tahmin etmek için kullanılır. Atmosferdeki hava akışının hızı ve yönü, rüzgâr olarak tanımlanmaktadır. Atmosfer basınç farklılıklarından dolayı oluşan rüzgâr yüksek basınçtan alçak basınca doğru hareket etmektedir. Dünya'nın her bölgesinde hâkim rüzgâr yönü farklılık göstermekte ve binalarda ısı kazanç ve kayıplarını dolayısıyla ısıl konfor koşullarını doğrudan etkilemektedir. Atmosferin üst tabakasında bu hâkim rüzgârlar belli bir rejimde hareket ederken, yaya seviyesinde yüzey pürüzlülüğü, yüksek katlı binalar, dar sokaklar gibi birçok etki ile mikro-iklim alanının hâkim rüzgârlarında değışimlere neden olabilmektedir. Yönüne ve hızına bağılı olarak bina kabuğundan içeri geçen hava miktarı, iç hava sıcaklığı, nemi ve iç hava hareketi miktarını dolayısıyla ısıl konfor koşullarını değıştirmektedir. Rüzgâr; iç mekânların doğal havalandırması, yapı cephelerinde oluşan yük, mekanik sistemlerin yükü ve performansı gibi konularda binanın enerji harcamalarını ve ısıl konfor koşullarını doğrudan etkileyen iklimsel bir etmendir (Allard & Santamouris, 1998; Kleiven, 2003). Bu nedenle binalardaki iç mekân sıcaklığının kontrolü ve doğal havalandırma

sistemlerinin tasarımında belirleyici bir değişken olan dış hava hareketi verileri, enerji hesaplamalarına dahil edilmektedir.

Gökyüzü açıklığı ve parlaklığı

Güneşlenme süreleri dünya üzerindeki enleme göre yıl içinde değişiklik göstermektedir. Bu durum ise yıl içinde yapay aydınlatmaya olan ihtiyacı belirlemek ve gün ışığı potansiyelini belirlemek için yardımcı olur.

Yağış

Doğrudan enerji hesaplamalarında kullanılmasa da yağmur suyunu toplayıp kullanan sistemlerin simülasyonu için yararlıdır.

Atmosfer basıncı

Doğal havalandırma ve bina içi hava akışları gibi bazı gelişmiş hesaplamalar için gereklidir.

Bulut örtüsü

Bir binaya ulaşan güneş radyasyonu miktarının belirlenmesinde kullanılır ve termal ve görsel konforu etkiler. Fotovoltaik paneller ile üretilebilecek olan enerji miktarının hesaplanmasında önemli bir girdidir (Chrobak vd., 2016).

2.1.1.3. Binaya ilişkin değişkenler

Binalarda enerji hesaplamaları kişisel ve çevresel değişkenlere ek olarak binaya ilişkin değişkenler etkisinde de farklı sonuçlar verebilir. Binaya ilişkin değişkenler, binanın yeri, formu, diğer binalara göre konumu, hacim organizasyonu ve yönlendiriliş durumu, bina kabuğuna ait optik ve termofiziksel özellikler ve doğal havalandırma başlıklarında incelenebilir.

Geometrik tanım

Enerji simülasyonlarında hacim organizasyonunun oluşturulabilmesi ve çözücülere gerekli yüzey alanı/hacim ilişkilerinin aktarılabilmesi için binanın ve çevresinin geometrik olarak tanımlanması gerekmektedir.

Binanın formunun enerji simülasyonu için tanımlanması

Binanın geometrik tanımı, enerji simülasyonlarının gerçekleştirilmesi için en öncelikli adımdır.

Bina formu, binanın dış iklim elemanlarından korunma ve yararlanma düzeyini belirleyen ve enerji tüketimini doğrudan etkileyen faktörlerdendir. Bina formu; biçim faktörü (bina cephesinin derinliğine oranı), bina yüksekliği, çatı tipi (düz, beşik, kırma), döşeme turu (toprağa oturan döşeme, altı açık döşeme), çatı eğimi ve cephe eğimi gibi geometrik değişkenlerle tanımlanabilir.

Bina formunda enerji tüketimini etkileyen en önemli faktörlerden biri, yüzey alanıdır. Binanın yüzey alanları baktıkları yönler de bağlı olarak bina kabuğunda gerçekleşen ısı kayıp ve kazançlarını dolayısıyla binanın enerji yüklerini belirlemektedirler. Binanın formu, bina kabuğunda gerçekleşen güneş ışıınımı kazanç ve kayıplarını etkilediği gibi, hava akımı karakterini de doğrudan etkiler. Bina formunu belirleyen; binanın yüksekliği, çatı türü, çatı eğimi ve biçim faktörü (bina cephesi/bina derinliği) gibi boyutlar, bina kabuğundaki saçak ve gölgeleme elemanları, cephenin eğimi gibi değişkenler bina çevresindeki rüzgâr hızlarını ve basınç alanlarını değiştirmekte ve binanın doğal havalandırılması üzerinde etkili olmaktadır (Ok, 2005). Bu nedenle bina formu, enerji ve rüzgâr hesaplamalarında etkili ve kullanılması kritik olan bir değişkendir.

Binanın çevre yapılara göre konumu ve enerji simülasyonu için tanımlanması

Çevredeki yapıların binaya olan uzaklıkları ve yüksekliklerine bağlı olarak binayı etkileyen güneş ışıınımı miktarı ve gölgeleme durumlarını ve hava hareketi hızı ve rüzgâr etkilerini değiştirebilirler. Bu durum iç hava sıcaklıklarını, ısı konforu ve dolayısıyla enerji harcamalarını da etkileyecektir (Li & Wong, 2007). Enerji simülasyonunda, bu çevresel faktörlerin doğru bir şekilde tanımlanması, özellikle şehir içi yoğun yerleşim alanlarında, hesaplama yapılacak olan binada gerçekleşen ısıtma ve soğutma yüklerinin belirlenebilmesi için gereklidir.

Kentsel yapılaşmanın yoğunluğu aynı zamanda bölgede mikro-iklim etkisi gösterebilmektedir. Bu etki çevre yapıların gölgeleme etkisinin yanı sıra hesaplamalar yersel mikro-iklim verilerinin de dikkate alınmasını gerekli kılmaktadır (Boccalatte ve diğerleri, 2020).

Binanın yönlendiriliş durumunun tanımlanması

Binayı çevreleyen kabuk elemanlarının farklı yönlere bakan yüzeylerini etkileyen güneş ışıını şiddeti de farklı olacaktır. Bu durum güneş ışıını aracılığı ile kazanılan ısı miktarını, dolayısıyla enerji harcamalarını da etkileyecektir (Carlander ve diğerleri, 2020). Bu nedenle binanın yönlendiriliş durumu bina iç hacimlerinin güneş ışıını kazançlarının belirleyicisi olması nedeniyle bina enerji simülasyonlarında tanımlanması gereken en önemli verilerden biri olarak kabul edilebilir.

Bina kabuğunun optik ve termofiziksel özelliklerinin tanımlanması

Optik ve termofiziksel özellikler, binaların enerji performansını etkileyen ve enerji simülasyonlarında dikkate alınması gereken temel değişkenler arasındadır. Bu özellikler, binanın ısıtma, soğutma ve aydınlatma ihtiyaçlarını doğrudan etkileyen unsurları kapsar. Bina kabuğunun optik ve termofiziksel özellikleri, bina kabuğunda gerçekleşen ısı transferini, iç mekânda oluşan iç hava, iç yüzey ve ortalama ışıınısal sıcaklıkları, dolayısıyla ısı konforu ve enerji harcamalarını belirleyen en önemli değişkenlerden biridir.

Opak ve saydam bileşenlerden oluşan bina kabuğunun ısı geçişini ve dolayısıyla binanın yapma ısıtma ve soğutma sisteminin yüklerini etkileyen bina kabuğu optik ve termofiziksel özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir.

Opak ve saydam bileşenlerin toplam ısı geçirme katsayısı – U değeri

Toplam Isı Geçirme Katsayısı (U), bir binanın hem opak hem de saydam bileşenlerine ilişkin bir termofiziksel özelliktir. U katsayısı, farklı iki ortamı ayıran bina kabuğunun iki yüzünde etkili olan hava sıcaklıkları arasındaki farkı 1⁰ C olduğunda, 1 m² alandan dik bir çizgi boyunca 1 saatte geçen toplam ısı miktarını ifade eder (Çengel & Ghajar, 2015). Bu değer, bina kabuğunun direncinin ve enerji performansının belirlenmesinde kritik bir faktördür (Formül 2.1).

$$U_0 = \frac{1}{\frac{1}{a_i} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{d_n}{\lambda_n} + \frac{1}{a_d}} \quad (2.1)$$

U_0 , opak bileşenin toplam ısı geçiş katsayıları (W/m².K)

a_i ve a_d , iç ve dış yüzeylerin yüzeysel ısı geçiş katsayıları (W/m².K)

$d_1, d_2, \dots, d_n$, opak bileşeni oluşturan malzemelerin kalınlıklarıdır ve metre (m) cinsinden ifade edilir.

$\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$, opak bileşeni oluşturan malzemelerin ısı iletkenlik katsayılarıdır ve W/m.K birimiyle ifade edilir.

Opak bileşenin zaman geciktirmesi ve genlik küçültme faktörü

Opak Bileşenin Zaman Geciktirmesi ve Genlik Küçültme Faktörü, opak bina kabuğu bileşenlerinin ısı depolama kapasiteleriyle ilişkili temel termofiziksel özelliklerdir. Opak bileşenler, bina kabuğunu oluşturan malzemelerin ısı iletkenlik katsayıları (λ), kalınlıkları (a), yoğunlukları (ρ), özgül ısıları (c) ve dolayısıyla ısı kapasitelerinin (ρc) bir fonksiyonudur. Isı dalgalanmalarının geçiş süresi, malzemenin kalınlığı ve direnci arttıkça uzar. Saydam bileşenlerin ısı depolama kapasiteleri göz ardı edilebilecek seviyede olduğundan, zaman geciktirmesi ve genlik küçültme faktörü genellikle sadece opak bileşenler için uygundur.

Zaman geciktirmesi, gün içinde kabuk bileşeninin iç yüzeyinde maksimum sıcaklığın oluştuğu saat ile dış yüzeyinde maksimum sıcaklığın oluştuğu saat arasındaki süre farkı olarak tanımlanır. Bu parametre, bina kabuğunun ısı tepkisinin ne kadar hızlı veya yavaş olduğunu gösterir ve ısı konfor ve enerji verimliliği için önemlidir.

Genlik küçültme faktörü ise, gün içinde bileşenin maksimum iç yüzey sıcaklığı ile ortalama iç yüzey sıcaklıkları farkının, maksimum dış yüzey sıcaklığı ile ortalama dış yüzey sıcaklıkları farkına oranıdır.

Formül 2.2 ile ifade edilen bu oran, bina kabuğunun ısı dalgalanmalarını ne derece azalttığını gösterir ve bina içi konfor seviyesinin yanı sıra enerji tüketimini etkileyen bir faktördür.

$$f = \frac{t_{0im} - t_{0io}}{t_{odm} - t_{odo}} \quad (2.2)$$

f , genlik küçültme faktörü

t_{0im}, t_{odm} , iç ve dış yüzeylerindeki maksimum sıcaklık değerleri (°C)

t_{0io}, t_{odo} , yüzeylerin günlük ortalama sıcaklık değerleri (°C)

Opak ve saydam bileşenlerin güneş ışınlamına karşı geçirgenlik, yutuculuk ve yansıtıcılık katsayıları

Bu özellikler bina kabuğunun birim alanından geçen güneş ışınlamı ile kazanılan ısı miktarını doğrudan etkiler. Bir başka deyişle bu katsayılar, binanın ısı kazançlarını ve dolayısıyla iç mekânlarda oluşan ısı konfor seviyesinin de belirleyicileridir. Opak bileşen için Güneş ışınlamına karşı yutuculuk ve yansıtıcılık katsayıları aşağıdaki bağıntı (Formül 2.3) ile ifade edilir.

$$a_0 + r_0 = 1 \quad (2.3)$$

a_0 , opak bileşenin yutuculuk katsayısı

r_0 , opak bileşenin yansıtıcılık katsayısı

Saydam bileşenin güneş ışınlamına karşı yutuculuk, yansıtıcılık ve geçirgenlik katsayıları ise aşağıdaki bağıntı (Formül 2.4) ile ifade edilir.

$$a_c + r_c + \tau_c = 1 \quad (2.4)$$

a_c , saydam bileşenin yutuculuk katsayısı

r_c , saydam bileşenin yansıtıcılık katsayısı

τ_c , saydam bileşenin geçirgenlik katsayısı

Bu katsayılar bina kabuğunun güneş kontrolü stratejilerinin optimizasyonu için de esastır. Örneğin, yüksek yansıtıcılık katsayısına sahip malzemeler, aşırı güneş ışınlamını minimize etmek için kullanılırken, yüksek geçirgenlik katsayısına sahip malzemeler, doğal aydınlatmayı maksimize etmek için tercih edilir.

Saydamlık oranı

Saydamlık oranı, binanın cephesindeki saydam yüzeylerin toplam alanının, cephenin toplam alanına oranını ifade eder (Berköz ve diğerleri, 1995). Bu oran, güneş ışınlamı kazanç ve kayıplarının en temel belirleyicisi olduğundan özellikle ısıtma ve soğutma yüklerinin hesaplanmasında önemlidir. Aynı zamanda, saydam malzemelerin açılabilir kısımları, iç mekânın doğal yollardan havalandırılmasını sağlayan hava giriş ve çıkış noktalarını oluşturur. Bu sebeple saydam malzemelerin boyutları sadece güneş ışığının

alınması ve kaybedilmesi üzerinde değil, aynı zamanda iç mekânın havalandırılması ve dolayısıyla iç konfor şartları üzerinde de doğrudan bir etkiye sahiptir.

Doğal havalandırmanın etkili bir şekilde gerçekleşebilmesi için, binanın dış yüzeyinde yer alan açıklıkların, içeriye yeterli miktarda temiz hava alıp, içerideki kirli havayı dışarı atacak biçimde düzenlenmesi gerekir. Binanın kabuğunda bulunan bu açıklıklar; pencereler, kapılar, hava delikleri ve fanlar gibi unsurlardan oluşur. Açıklıkların büyüklüğü, tipi, duvarda konumlandırılması, açılım şekli ve kanat düzeni, sağlanan doğal havalandırmanın kalitesi üzerinde kritik bir etkiye sahiptir. Sıcak ve kirli olan hava, duvar boşluğunun üst kısımlarında toplanırken, daha serin ve temiz hava alt kısımlarda birikir. Bu iki hava tabakası arasında, hareketsiz bir tarafsız bölge yer alır ve pencere tasarımında bu alanın göz önünde bulundurulması gerekir.

2.1.1.4. Yapma sistemlere ilişkin değişkenler

Isıtma, soğutma, havalandırma ve aydınlatma sistemleri gibi yapma sistemler, enerji tüketiminin büyük bir kısmını oluşturur ve bu sistemlere ilişkin kararlar enerji yüklerini önemli ölçüde etkiler.

Yapma sistemlerin binada hangi saat aralıklarında kullanıldığı, yapma sistemler kullanıldığında binadaki kullanıcı yoğunluğu, ısıtmanın ve soğutmanın istendiği ve istenmediği dönemde iç hava sıcaklığı konfor değerleri, ısıtma ve soğutma sistemlerinin seçimi, bu sistemlerin verimi ve kullanılan yakıt türü, iç kazançları etkileyen elektrikli aletlere ilişkin değerler, iç kazançları etkileyen aydınlatma sisteminin türü, binanın fonksiyonuna bağlı olarak sağlanması gerekli olan aydınlık düzeyi değeri, lamba türü, kullanıldığı saat aralıkları ve kontrol sistemleri vb. kararlar binanın enerji yüklerini ve iç mekanlarda oluşan ısı ve görsel konfor koşullarını dolayısıyla bu konfor koşullarının sağlanması için harcanacak enerji miktarlarını da doğrudan etkileyecektir (Wang ve diğerleri, 2020).

2.1.1.5. Hesaplamaya ilişkin değişkenler

Hesaplama seçilen algoritmalar, zaman dilimleri, yakınsama limitleri gibi hesaplamanın hangi modeller üzerinden ilerleyeceği, hangi zaman aralıkları ile çözümleneceği ve detay seviyesi gibi değişkenler hesaplamaya ilişkin değişkenleri oluşturur.

Isı dengesi algoritması seçimi

Isı transferi hesaplamalarının yapıldığı modeller simülasyonda ulaşılmak istenen sonuçların çeşidine veya detay seviyesine göre değişiklikler gösterebilir (EnergyPlus, 2022).

Conduction transfer function (CTF)

Conduction Transfer Function, yapı elemanlarındaki ısı transferini zamana bağlı değişen sıcaklık koşullarına göre modellemek için kullanılan bir yöntemdir. CTF, yapı elemanlarının ısıl tepkisini, sıcaklık farklarına bağlı olarak transfer fonksiyonları kullanarak hesaplar. Bu yöntem, özellikle standart yapı malzemeleri ve koşulları için yeterli doğruluk sağlar ve geniş kullanım alanına sahiptir. Avantajı, nispeten basit hesaplama yöntemi ve hızlı işlem süresidir. Ancak, çok katmanlı veya faz değiştiren malzemeler gibi karmaşık yapı elemanlarında daha ileri düzey bir algoritma seçilebilir (EnergyPlus, 2022).

Conduction finite difference (CFD)

Conduction Finite Difference, yapı elemanları içindeki ısı transferini zamana bağlı kısmi diferansiyel denklemleri çözerek simüle eden bir yöntemdir. Bu yöntem, özellikle değişken veya karmaşık malzeme özelliklerine sahip yapı elemanları için daha yüksek doğruluk sunar. CFD, ısı transferini zamansal ve mekânsal olarak daha detaylı bir şekilde modelleyebilir, ancak bu detay seviyesi, hesaplama süresini artırabilir. Karmaşık yapı durumlarında ve detaylı termal analizlerde tercih edilir (EnergyPlus, 2022).

Combined heat and moisture transfer (HAMT) Model

HAMT modeli hem ısı hem de nem transferini bütünleşmiş bir şekilde ele alır. Bu model, yapı malzemelerinin hem ısıl hem de nem özelliklerini dikkate alarak, ısı ve nem transferini eş zamanlı olarak simüle eder. HAMT, özellikle yüksek nemli ortamlarda veya nemin ısıl davranış üzerinde önemli etkileri olduğu durumlarda kullanışlıdır. Bu modelin karmaşıklığı, hesaplama süresini ve gereksinimlerini artırabilir, ancak daha gerçekçi ve kapsamlı bir simülasyon sunar (EnergyPlus, 2022).

Effective Moisture Penetration Depth (EMPD) Model

EMPD modeli nem transferini, etkili nem penetrasyon derinliği kavramı üzerinden modelleyen daha basitleştirilmiş bir yaklaşımdır. Bu model, nemin yapı elemanlarına nasıl nüfuz ettiğini ve bu nüfuzun ısı davranış üzerindeki etkilerini tahmin eder. EMPD, HAMT'ye göre daha az hesaplama yoğunluğuna sahip olup, genel nem etkilerini modellemek için kullanışlıdır. Ancak, bu model, nemin daha detaylı davranışlarını, özellikle de çok yüksek nem koşullarında, tam olarak yakalayamayabilir (EnergyPlus, 2022).

Her bir algoritma, farklı senaryolar ve kullanıcı ihtiyaçları için uygun olabilir. CTF ve CFD, ısı transferi farklı detay seviyelerinde modelleme yeteneğine sahipken, HAMT ve EMPD, nemin bina ısı performansı üzerindeki etkilerini farklı yaklaşımlarla ele alır. Bu algoritmaların seçimi, simülasyonun amacına, karmaşıklığına ve sonuçların detay düzeyine bağlı olarak yapılmalıdır.

Yüzey konveksiyon algoritması seçimi

Yüzey konveksiyon algoritmaları binaların iç ve dış yüzeylerinde hava ile yüzey arasındaki ısı transferini hesaplamak için kullanılır. Konveksiyon, ısı enerjisinin bir akışkan (bu durumda hava) aracılığıyla transfer edilmesi sürecidir. Bina simülasyonlarında, bu ısı transferi, binaların enerji performansını ve iç mekân konforunu doğrudan etkileyen temel bir faktördür (EnergyPlus, 2022).

DOE-2

DOE-2 Algoritması, en eski yüzey konveksiyon algoritmalarından biridir. Bu algoritma, bina enerji simülasyonlarında yaygın olarak kullanılan ve yüzey ile çevre arasındaki hava sıcaklığı farkına dayalı ısı transfer katsayılarını hesaplamak için geliştirilmiştir. DOE-2'nin en büyük avantajı, basitliği ve hesaplama hızıdır, bu da onu genel amaçlı simülasyonlar için uygun kılar. Ancak, bu algoritma daha karmaşık durumlar ve farklı iklim koşullarında yetersiz kalabilir. Hesaplama süresine etkisi diğer daha karmaşık algoritmalarla karşılaştırıldığında nispeten azdır.

SimpleCombined

SimpleCombined algoritması, daha gelişmiş bir yaklaşım sunar. Bu algoritma hem iç hem de dış yüzey konveksiyon katsayılarını hesaplamak için kullanılır ve özellikle

bina içi hava akışlarının modellenmesinde etkilidir. SimpleCombined, DOE-2'ye göre daha karmaşık durumları modelleme yeteneğine sahiptir ve bu nedenle daha geniş uygulama alanlarında tercih edilir. Bununla birlikte, bu algoritmanın hesaplama süresi ve kaynak tüketimi, DOE-2'ye göre daha fazladır. Doğruluk açısından, SimpleCombined, özellikle iç mekân dinamiklerinin önemli olduğu durumlarda, DOE-2'den daha iyi sonuçlar sunar.

TARP

TARP Algoritması özellikle ABD'deki binalar için geliştirilmiş ve test edilmiş bir algoritmadır. TARP, yüzey hava hızı ve sıcaklık farkına dayalı bir yaklaşım benimser. Bu algoritma, özellikle ABD iklim koşullarında yüksek doğruluk oranı sunar ve öncelikle konut tipi binalar için tasarlanmıştır. TARP'ın avantajı, yerel iklim koşullarına göre ayarlanabilen esnek bir yapıya sahip olmasıdır. Bununla birlikte, bu algoritma, ABD dışındaki farklı iklim koşullarında ve ticari binalarda performans açısından sınırlamalar gösterebilir. Hesaplama süresi açısından, TARP DOE-2'ye kıyasla biraz uzundur.

MoWiTT

MoWiTT Algoritması, özellikle pencere yüzeyleri için geliştirilmiş ve test edilmiş bir modeldir. Bu algoritma, cam yüzeylerdeki konveksiyon ve radyasyon transferini detaylı bir şekilde ele alır. MoWiTT, özellikle güneş ışıının ve cam yüzeylerin ısı performansının önemli olduğu durumlarda tercih edilir. Bu algoritmanın avantajı, cam yüzeylerin karmaşık davranışlarını daha doğru bir şekilde modelleyebilmesidir. Ancak, bu detay düzeyi, hesaplama süresini ve kaynak kullanımını artırır. MoWiTT, özellikle güneş kontrolü ve ışık geçirgenliği önemli olan durumlarda yüksek doğruluk sağlar.

Adaptive convection algorithm

Adaptive Convection Algorithm en gelişmiş yüzey konveksiyon algoritmalarından biridir. Bu algoritma, gerçek zamanlı hava akışı ve sıcaklık değişimlerine adaptif bir yanıt verebilir, bu da onu dinamik ve değişken hava koşullarına karşı son derece etkili kılar. Adaptive Convection Algorithm, yüksek doğruluk seviyesi ve geniş uygulama yelpazesi ile dikkat çeker. Ancak, bu algoritmanın en büyük dezavantajı, yüksek hesaplama kaynağı gereksinimidir. Bu, özellikle büyük ölçekli simülasyonlarda veya

sınırlı hesaplama kaynaklarına sahip durumlarda bir engel oluşturabilir. Yine de bu algoritma, özellikle karmaşık hava akışları ve termal dinamiklerin önemli olduğu durumlarda tercih edilen bir seçenektir.

Zaman aralıklarının belirlenmesi

Enerji simülasyonlarında zaman aralıklarının belirlenmesi, simülasyonun doğruluğu ve hesaplama verimliliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Zaman aralığı, simülasyon sürecinde enerji dengesinin ne sıklıkta hesaplandığını belirler. Daha kısa zaman aralıkları, bina içi ve dışı koşullardaki hızlı değişimleri daha doğru bir şekilde temsil edebilir. Özellikle, güneş ışıınımı, sıcaklık, nem gibi değişkenlerin hızlı değiştiği senaryolar veya yoğun kullanılan binalarda, kısa zaman aralıkları tercih edilir. Bu, özellikle HVAC sistemlerinin dinamik yanıtlarını ve ısı konfor analizlerini daha gerçekçi bir şekilde modellemek için önemlidir.

Ancak, kısa zaman aralıklarının kullanılması, hesaplama yükünü ve dolayısıyla simülasyon süresini önemli ölçüde artırabilir. Bu nedenle, simülasyonun amacına ve ihtiyaçlarına bağlı olarak bir denge bulmak önemlidir. Enerji tasarrufu stratejilerinin değerlendirilmesi veya uzun dönem enerji analizleri gibi durumlarda, daha uzun zaman aralıkları yeterli olabilir ve hesaplama süresini azaltabilir.

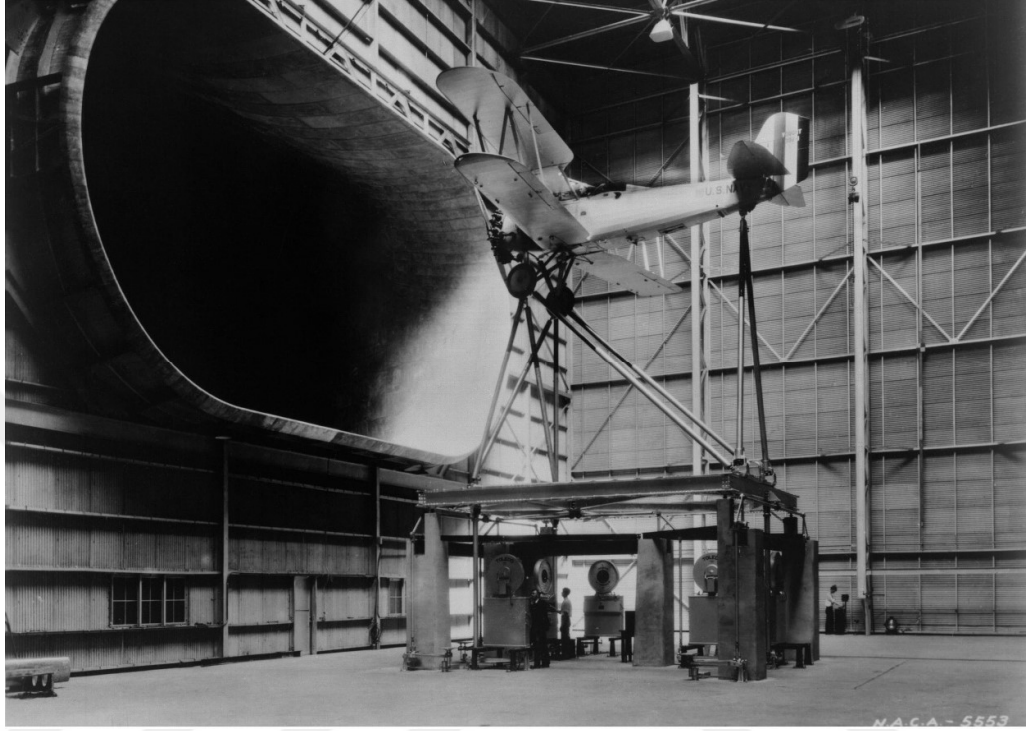
Enerji modelleme yazılımları genellikle kullanıcıya zaman aralığını seçme esnekliği sunar. Bu seçim yapılırken, simüle edilen binanın özellikleri, iklim koşulları, kullanım senaryoları ve simülasyonun amacı gibi faktörler dikkate alınmalıdır. Optimal bir zaman aralığı seçimi, simülasyonun verimliliğini artırarak, enerji performans analizlerinde daha güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlar.

2.2. Binalarda Rüzgâr Simülasyonları

Rüzgâra yönelik tasarım hesaplamalarının yaygınlaşması aerodinamik biliminin gelişimiyle doğrudan ilişkilidir. İlk rüzgâr testleri 20. yüzyılın başlarında havacılık ve savunma sanayi çalışmalarında gerçek ölçekli rüzgâr tünelleri kurularak başlamıştır.

Rüzgâr tüneli testleri, fiziksel modeller kullanarak yapıların rüzgâr yüklerine maruz kalacağı koşulları gerçekçi bir şekilde yeniden yaratır. Bu testler, özellikle karmaşık geometrilere sahip yapılar ve büyük ölçekli projeler için değerli veriler sunar. Ancak, rüzgâr tüneli testlerinin maliyeti yüksektir ve zaman alıcıdır.

Şekil 2.4'te ilk 1e 1 ölçekli rüzgar tünelinin uçak tasarımı için kullanıldığını görebiliriz.



Şekil 2.4 : NACA/NASA, Langley Research Center (Anderson, 2015)

1960'lı yıllardan bu yana rüzgâr tüneli testleri yüksek binaların ve köprü gibi büyük ölçekli yapıların tasarımında yaygın olarak kullanılan bir araç haline geldi. New York'taki Dünya Ticaret Merkezi Kulelerinin tasarımı sırasında rüzgâr tünelinin kullanımı bu alandaki öncü çalışmalardan biri oldu (Irwin ve diğerleri, 2013).



Şekil 2.5 : (Colorado üniversitesi arşivi, 1964) Soldan, Alan Davenport, Ph.D., Minoru Yamasaki, Malcolm Levy, John Skilling, P.E., Dist.M.ASCE, Jack Cermak, Ph.D., P.E., and Leslie E. “Les” Robertson, P.E., S.E., Dist.M.ASCE, İkiz kulelerin Colorado Üniversitesinde yürütülen rüzgar tüneli testleri.

Rüzgâr tüneli testlerinden bilgisayar destekli rüzgâr hesaplamalarına geçiş hem teknolojik gelişmeler hem de mühendislik ve tasarım ihtiyaçlarındaki değişikliklerle şekillenmiş bir süreçtir. Bu geçişin tarihçesini anlamak için, bilgisayar teknolojisinin

evrimi ve bilgisayar destekli tasarım (CAD) alanındaki yeniliklerin bina tasarımına nasıl entegre edildiğini incelemek gerekmektedir.

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) problemlerinin yüksek başarılı bilgisayarlar aracılığı ile hesaplanması rüzgâr tünelleri için harcanan modelleme ve zaman maliyetlerini geride bırakmıştır.

Günümüzde hesaplamalı akışkanlar dinamiği; kentsel ölçekte ve binalarda (Liu ve diğerleri, 2017), yayaların rüzgâr konfor düzeyinin hesaplanmasında (Blocken ve diğerleri, 2012; Kang ve diğerleri, 2020; Hagbo & Giljarhus, 2024), iç mekân hava kalitesinin iyileştirilmesi (Yang & Ye, 2014) için tasarlanan çapraz havalandırma sistemlerinin iyileştirilmesinde (Ramponi & Blocken, 2012; Montazeri & Montazeri, 2018) ve cephe rüzgâr yükü hesaplamalarında (Cavcar, 2000) yaygın olarak kullanılmaktadır.

2.2.1. Binalarda rüzgâr simülasyonu değişkenleri

Binalarda rüzgâr simülasyonları ile doğal havalandırma sonucunda bina iç mekanlarında ve bina çevresinde oluşan hava akımı hızları, hız dağılımının kontur ve vektörel olarak ifade edilmesi, sıcaklık alanları, basınç alanları ve açıklıkların akış karakteristikleri gibi hesaplamalar yapılabilmektedir. Bu hesaplamalara iç mekanlarda meydana gelen hava hareketinin sayısal çözümlerinin yapılabilmesi için gerek duyulmakta ve bu hesaplamalar sadece HAD yazılımları ile yapılabilmektedir.

2.2.1.1. Akışkana ilişkin özelliklerin belirlenmesi

Yoğunluk

Akışkanın yoğunluğu, akışkanın kütsel özelliklerini ifade eder ve akışkanın hareketini belirleyen temel faktörlerden biridir. Örneğin, yoğunluğun yüksek olduğu durumlarda, akışkan üzerindeki yerçekimi etkisi daha belirgin olur. Bu, özellikle doğal konveksiyon akışlarında ve hidrodinamik hesaplamalarda önemlidir. Standart atmosferik koşullarda, hava yoğunluğu yaklaşık olarak 1.225 kg/m civarındadır (Franke, 2006). Bu değer, hava sıcaklığı, basıncı ve nem oranına bağlı olarak değişebilir. Yüksek irtifalarda veya farklı sıcaklıklarda hava yoğunluğu bu standart değerden farklılık gösterebilir.

Viskozite

Akışkanın iç sürtünme özelliği olan viskozite, akışkanın katı yüzeylerle etkileşimini ve akış rejimini (laminer veya türbülanslı) etkiler. Viskozitenin yüksek olduğu durumlarda akışkan daha yavaş hareket eder ve türbülans oluşumu azalır. Hava viskozitesi de sıcaklıkla değişir, ancak bu değişim yoğunluktan daha az etkilenir. Standart atmosferik koşullarda (yaklaşık 15°C'de), hava viskozitesi yaklaşık olarak 1.81×10^{-5} Pa·s (Pascal saniye) veya 1.81×10^{-5} kg/(m·s) (Cavcar, 2000) olarak ifade edilir.

Rüzgâr hızı ve yönü

Rüzgâr hızı ve yönü, konum ve atmosferik koşullara göre büyük ölçüde değişkenlik gösterir. Örneğin, şehir merkezlerinde rüzgâr hızları genellikle 3-5 m/s (yaklaşık 10-18 km/saat) arasında değişirken, kırsal alanlarda ve yüksek binaların üst katlarına etkileyen bu hızlar daha yüksek olabilir. Rüzgâr yönü ise genellikle bölgesel iklim şartlarına ve mevsimsel etkilere bağlıdır. Rüzgâr hızı ve yönü yıllar boyunca meteoroloji istasyonlarından toplanan değerlerin ortalamaları ile belirlenir ve simülasyon araçlarına girdi olarak aktarılır.

Atmosferik basınç

Atmosferik basınç, HAD simülasyonlarında özellikle başlangıç ve sınır koşullarını etkileyen bir faktördür. Akışkanın başlangıç basıncı genellikle atmosferik basınca eşit olarak alınır. Basınç gradyanları, akışkanın hızını ve yönünü etkiler, bu da açık hava simülasyonlarında ve geniş ölçekli akış analizlerinde önemli bir rol oynar. Ayrıca, atmosferik basınç değişiklikleri, akışkanın yoğunluğunu etkileyebilir, bu da Reynolds sayısını ve dolayısıyla akış rejimini değiştirebilir. Standart atmosferik basınç, deniz seviyesinde yaklaşık 101.325 kPa olarak kabul edilir (Cavcar, 2000). Ancak bu değer, yükseklik ve hava koşullarına bağlı olarak değişebilir. Yüksek basınç altında rüzgâr hızları genellikle düşer.

Sıcaklık

Akışkanın sıcaklığı, onun termal özelliklerini ve dolayısıyla HAD simülasyonlarının sonuçlarını doğrudan etkiler. Sıcaklık artışıyla akışkanın viskozitesi azalabilir ve yoğunluğu değişebilir. Bu, özellikle ısı transferi ve konveksiyon akışları üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Sıcaklık farklılıkları, akışkan içindeki yoğunluk

farklılıklarına neden olur, bu da doğal konveksiyon akışlarını tetikleyebilir. Akışkanın sıcaklık dağılımı, ısı transferi mekanizmalarının ve termal enerjinin akışkan akışı üzerindeki etkilerini belirler.

Nem

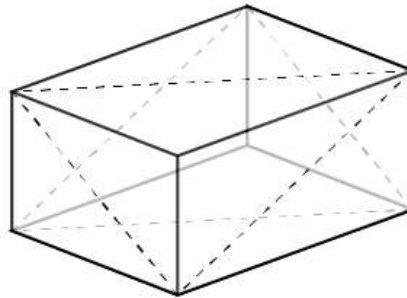
Nem oranı, özellikle hava akışı simülasyonlarında önemli bir faktördür. Yüksek nem oranları, hava yoğunluğunu ve dolayısıyla aerodinamik kuvvetleri etkileyebilir. Nem, hava akışının termal özelliklerini de etkiler, çünkü nemli hava farklı ısı kapasitesine ve ısı iletimine sahiptir. Bu, özellikle binaların çevresindeki hava akışı ve iç mekân havalandırma sistemleri gibi uygulamalar için önemlidir.

2.2.1.2. Geometrik modelin oluşturulması

Simüle edilecek nesnenin fiziksel şekli ve boyutları, akışkanın hareketini ve etkileşimini doğrudan etkiler. Simülasyon araçları için bu geometrilerinin uygun formatlarda çözücülere aktarılması gerekmektedir. Hesaplama akışkanlar dinamiği simülasyonları için yaygın olarak kullanılan geometrik formatlar, .step, .igs, .stl, .cxf, .obj söylenebilir (Kortelainen, 2009). Bu formatlar, CFD yazılımlarının farklı geometrileri ve karmaşık şekilleri işleyebilmesi için gerekli detay ve doğrulukta veri sağlar. Kullanılan CFD yazılımının gereksinimlerine bağlı olarak, bu formatların her biri farklı avantajlar ve kısıtlamalar sunar.

Çözüm geometrisinin oluşturulması

CAD araçları aracılığı ile akış probleminin ele alınmak istendiği çözüm geometrisinin ağ yapısı örülebilir formatlarda oluşturulması gerekmektedir (Şekil 2.6).

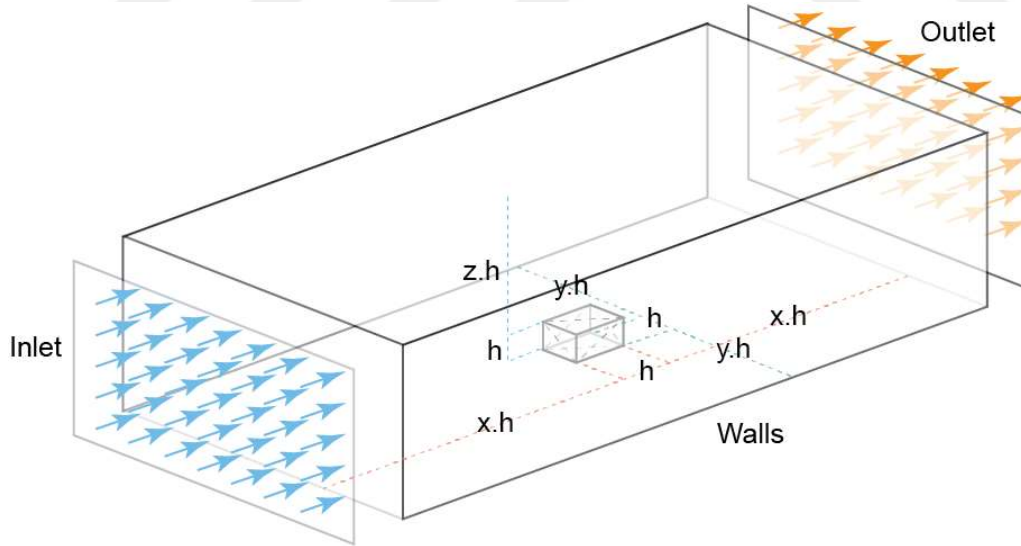


Şekil 2.6 : Çözüm geometrisi .stl -üçgenlenmiş- örneği

Akış hacminin oluşturulması

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonlarında "akış hacmi" ya da "çözüm alanı", simülasyonun yapıldığı fiziksel alanı temsil eder. Bu alan, akışkanın (sıvı veya gaz) hareket ettiği, simüle edilen nesnenin geometrisi ile etkileşime girdiği ve analiz edildiği bölgeyi kapsar. Akış hacmi oluşturulurken girdi (inlet) ve çıktı (outlet) yüzeylerinin tanımlanması, bu yüzeylerin rüzgâr yönüne dik şekilde oluşturulması simülasyon sonuçlarının doğruluğu açısından önemlidir.

Binanın yüksekliğine (h) bağlı olarak, rüzgâra göre arka bölgesinde, yan kısımlarda ve binanın üstünde bırakılacak mesafeler binanın etrafında yeniden hava akışı oluşmasına imkân sağlayan, dış ortamdan gelen rüzgârın etkisinin incelenebilmesi için gerekli olan ve literatürde (Franke, 2006; Hall, 1997) önerilen ölçüler yardımıyla belirlenerek akış hacminin boyutları belirlenir. Bina ile akış hacmi arasında bırakılan mesafe akış yönünde istenmeyen gradyanların sınırlandırılmasını sağlayacak şekilde belirlenmelidir (Peren ve diğerleri, 2016; Ramponi & Blocken, 2012). Akış hacmi boyutlarına ilişkin kararlar, sayısal çözümün doğruluğunu önemli ölçüde değiştirmektedir.



Şekil 2.7 : Akış hacminin oluşturulması

2.2.1.3. Ağ (Mesh) yapısı oluşturulması

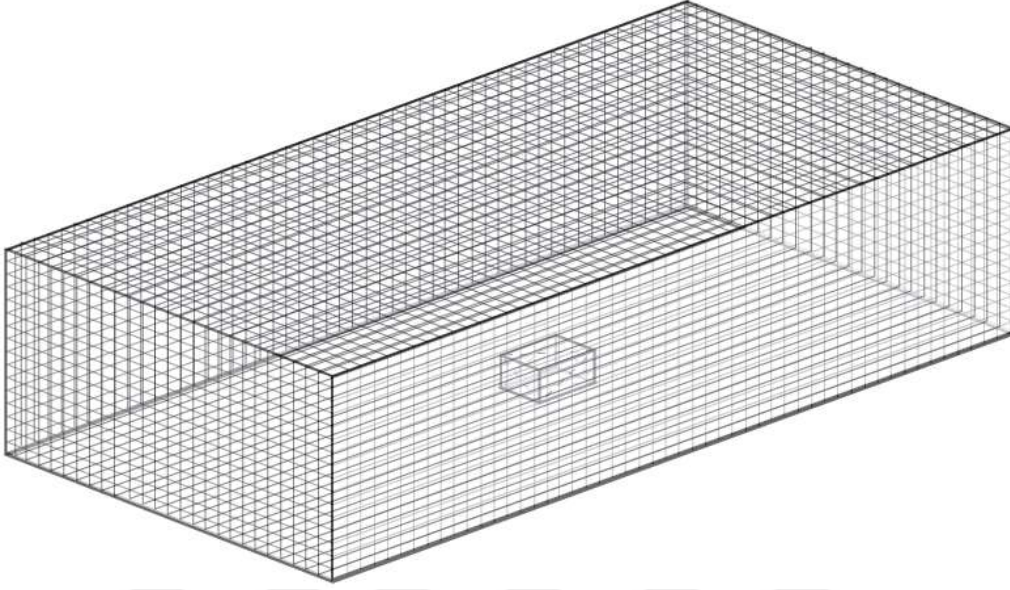
Hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonlarında kullanılan ağ yapısının oluşturulması (mesh); akışkanın hareketlerini ve etkileşimlerini daha yönetilebilir ve matematiksel olarak çözülebilir nitelikte—parçalara ayırma işlemidir. Ağ yapısı,

simülasyon alanını küçük, ayırık hücrelere böler ve bu şekilde oluşan sonlu sayıdaki elemanların tamamı çözüm ağı veya sayısal ağ olarak adlandırılmaktadır. Oluşturulan ağ yapısı sayısal analiz yöntemine uygun tanımlandığında, hücreler küçüldükçe çözümün güvenilirliği artar ve bu sayede akışkanın her noktasındaki hız, basınç, sıcaklık gibi fiziksel özelliklerin detaylı bir şekilde hesaplanması sağlanır. Bu ayrıştırma, karmaşık akışkan etkileşimlerini, simülasyonun doğruluğunu artırır ancak hücrelerin küçülmesi işlem süresini ve çözüm için gerekli olan bilgisayar sistemini arttırır (Baker, 2005; Balafas, 2014).

Ağ yapısının çeşitleri arasında yapılandırılmış ağ yapısı, düzenli geometrik şekillerden oluşur ve hesaplamalarda verimlilik sağlar, ancak karmaşık geometrilere uyarlanması zor olabilir. Yapılandırılmamış ağ yapısı ise daha düzensiz şekiller ve boyutlara sahiptir ve karmaşık geometrilere daha kolay uyum sağlayabilir. Hibrit ağ yapısı, yapılandırılmış ve yapılandırılmamış meshlerin bir kombinasyonunu temsil eder ve karmaşık simülasyon senaryolarında tercih edilebilir. Adaptif ağ yapısı ise, simülasyon sırasında kendini değiştirebilen ve akışkanın davranışına göre uyum sağlayabilen gelişmiş bir ağ yapısı türüdür.

Ağ yapısının seçimi, simüle edilen akışkanın özelliklerine, incelenen problemin karmaşıklığına ve mevcut hesaplama kaynaklarının sınırlarına bağlı olarak yapılır. Doğru mesh yapısının seçimi, simülasyonun hem doğruluğunu hem de verimliliğini artıran kritik bir faktördür. Bu seçim, simülasyonun başarısı için stratejik bir öneme sahiptir ve mühendislik ve bilimsel araştırmalarda dikkatli bir değerlendirme gerektirir.

Ağ yapısı üzerindeki her bir hücrede (Şekil 2.8), akışkanın temel denklemleri (Formül 2.5) ile çözülür, böylece akışkanın hızı, basıncı, sıcaklığı ve diğer özellikleri her bir mesh noktası için hesaplanır.



Şekil 2.8 : Ağ yapısının akış hacmine örülmesi

Bu hesaplamalar sırasında Navier-Stokes (Formül 2.5) ve süreklilik denklemleri (Formül 2.6) yönetici denklemler olarak kullanılır (Temam, 2001; Jameson ve diğerleri, 1998). Bu denklemlerin nümerik çözümleri genellikle ayırık hale getirilmiş fiziksel alanlar (ağ) üzerinde gerçekleştirilir. Ağ yapısı, sürekli akış alanını sonlu sayıda küçük kontrol hacimlerine veya elementlere böler. Bu sayede, sürekli alan üzerinde tanımlanan kısmi diferansiyel denklemler, sonlu farklar, sonlu hacimler veya sonlu elemanlar metodları gibi çeşitli nümerik yöntemler kullanılarak ayırık matematiksel problemlere dönüştürülür.

$$\begin{aligned}
 \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho \operatorname{div} (u\vec{v}) &= G_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \nabla^2 u \\
 \rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho \operatorname{div} (v\vec{v}) &= G_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \nabla^2 v \\
 \rho \frac{\partial w}{\partial t} + \rho \operatorname{div} (w\vec{v}) &= G_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \nabla^2 w
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

ρ , yoğunluk (kg/m^3)

u, v, w , hız vektörleri (m/s)

$\frac{\partial u}{\partial t}, \frac{\partial v}{\partial t}, \frac{\partial w}{\partial t}$, akışkan hızındaki zamana bağlı değişim (m/s^2)

p ,	basınç (Pa)
μ ,	viskozite (kg/(m·s))
∇ ,	Laplace operatörü
G_x, G_y, G_z ,	birim hacim başına etki eden dış kuvvet (N/m ³)

Süreklilik denklemi ise kütle korunumunun matematiksel ifadesidir. Fiziksel olarak, bu denklem bir akışkanın herhangi bir kontrol hacmi içerisindeki kütle değişiminin, bu hacme giren ve çıkan akışkan kütlesi akışı ile dengede olması gerektiğini belirtir. Matematiksel olarak, süreklilik denklemi, akışkan hız alanının ıraksamasının (divergence) sıfıra eşit olduğunu ifade eder (Formül 2.6).

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (2.6)$$

∇ ,	Vektör gradyanı
u ,	hız vektörü (m/s)

Süreklilik denklemi olmadan, Navier-Stokes denklemleri fiziksel olarak anlamlı çözümlere ulaşamaz. Özellikle, akışkanın hız ve basınç alanları arasındaki ilişkileri doğru bir şekilde modellemek için bu denkleme ihtiyaç vardır.

2.2.1.4. Akış rejiminin belirlenmesi

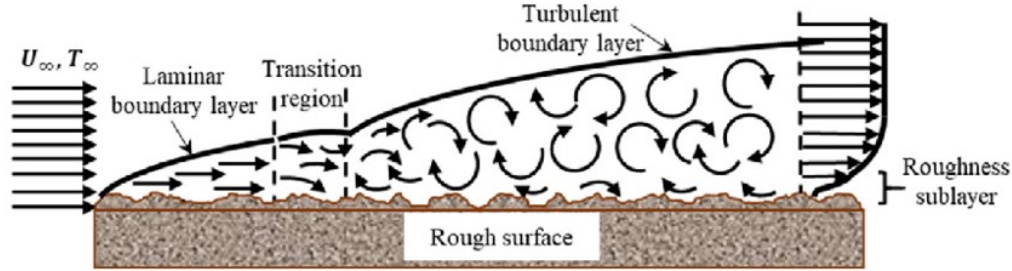
Akış rejimi, akışkanlar mekaniğinde bir akışkanın hareket karakterini tanımlayan bir terimdir ve genellikle laminar ve türbülanslı olmak üzere iki ana kategoriye ayrılır. Akış rejimi, akışkanın hızı, viskozitesi, karakteristik boyutları ve yoğunluğu gibi çeşitli faktörlere bağlıdır ve bu özellikler Reynolds sayısı ile nicelendirilir (Lin ve diğerleri, 2021).

Reynolds sayısı, akışkanlar mekaniğinde bir akışın karakterini belirlemek için kullanılan boyutsuz bir sayıdır. Akışkanın viskozitesi ve inersiyel kuvvetleri arasındaki ilişkiyi temsil eder ve akışkanın laminar mı yoksa türbülanslı mı akacağını tahmin etmede kullanılır. Reynolds sayısı şu formülle (Formül 2.7) hesaplanır;

$$Re = \frac{\rho u L}{\mu} \quad (2.7)$$

- ρ , akışkanın yoğunluğu (kg/m^3)
- u , akışkanın karakteristik hızı (m/s)
- L , karakteristik uzunluk (m)
- μ , akışkanın dinamik viskozitesi (m^2/s)

Binalarda rüzgâr simülasyonlarında kullanılan Reynolds sayıları, binanın boyutlarına, rüzgârın hızına ve atmosferik koşullara bağlı olarak büyük ölçeklere ulaşabilir. Genellikle, binalar için Reynolds sayısı çok yüksek olduğundan (milyonlarca veya daha fazla), akış türbülanslı olarak kabul edilir. Bu, bina çevresindeki hava akışının karmaşık ve düzensiz olduğu anlamına gelir. Özellikle yüksek binalar, köprüler ve diğer büyük yapılar söz konusu olduğunda, rüzgâr simülasyonları genellikle türbülans modellerini ve türbülanslı akış koşullarını dikkate alır. Bu, rüzgârın yapı üzerindeki basınç, sürüklenme kuvveti ve titreşim etkilerini daha doğru bir şekilde modellemek için gereklidir. Reynolds sayısının yüksek olması, aynı zamanda simülasyonun karmaşıklığını ve hesaplama sayısını artırır. Bu nedenle, binalar için rüzgâr simülasyonları genellikle gelişmiş sayısal yöntemler ve detaylı ağ (mesh) yapısı gerektirir. Simülasyonlarında kullanılan akış rejimleri aşağıda açıklanmıştır.



Şekil 2.9 : Laminar akıştan türbülanslı akışa geçiş (Kadivar ve diğerleri, 2021)

Laminar akış

Laminar akışta, akışkan katmanları düzenli ve paralel bir şekilde hareket eder. Bu tür akış, düşük Reynolds sayıları (genellikle 2000'den daha az) için gözlemlenir ve akışkanın iç sürtünmesinin hâkim olduğu durumlarda ortaya çıkar. Laminar akış, düşük hızlarda ve küçük ölçekli veya viskoz akışkanlarda daha yaygındır. Örneğin, ince borulardan geçen yavaş su akışı tipik bir laminar akış örneğidir. Laminar akışın temel özelliği, akışkanın düzenli hareketidir ve bu, akışkanın tahmini ve analizi açısından daha basit bir durum oluşturur.

Türbülanslı akış

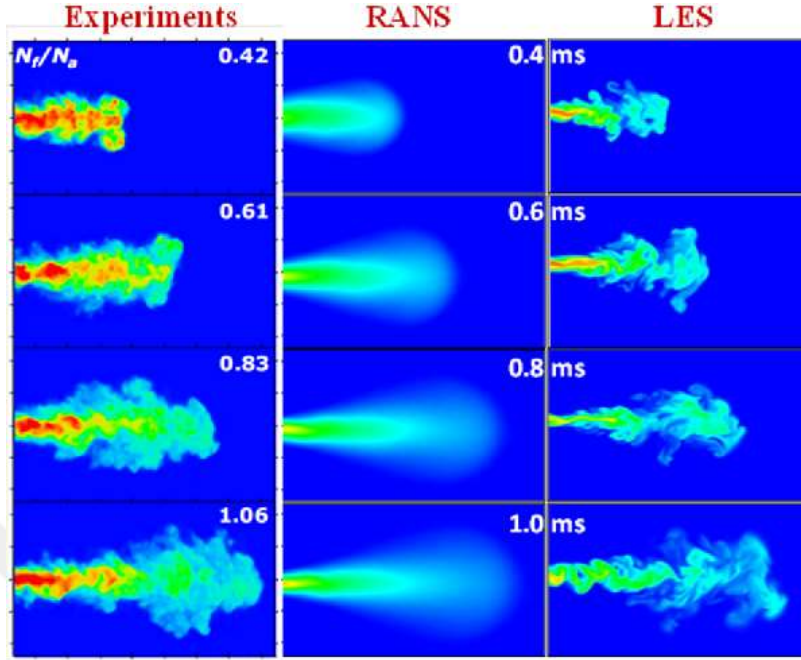
Türbülanslı akışta ise akışkanın hareketi düzensizdir ve rastgele dalgalanmalar, girdaplar ve çapraz akımlar içerir. Türbülanslı akış, genellikle daha yüksek Reynolds sayılarında (genellikle 4000 ve üzeri) görülür ve akışkanın kinetik enerjisinin hâkim olduğu durumlarda ortaya çıkar. Türbülans, özellikle yüksek hızlarda ve büyük ölçekli akışlarda yaygındır. Örneğin, nehirlerin hızlı akıntıları veya rüzgârın yüksek hızda esmesi türbülanslı akış örneklerindendir. Türbülanslı akışın analizi ve tahmini daha karmaşıktır, çünkü akışkanın hareketi düzensizdir ve büyük ölçekli varyasyonlar gösterir.

Akış rejiminin belirlenmesi, mühendislik tasarımı, akışkanların kontrolü ve enerji sistemlerinin optimizasyonu gibi birçok alanda önemlidir. Akış rejiminin seçimi, akışkanların davranışını doğru bir şekilde modellemek ve etkili çözümler geliştirmek için kritik öneme sahiptir. Akış rejimi, akışkanın özelliklerine ve çalışma koşullarına göre seçilir ve bu, akışkanın performansını ve etkinliğini doğrudan etkiler.

2.2.1.5. Türbülans modelinin belirlenmesi

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonlarında türbülans modelleri, türbülanslı akışın karmaşık doğasını yaklaşık bir şekilde modellemek için kullanılır. Türbülans, akışkan hareketinde rastgele dalgalanmalar ve girdaplarla karakterize edilen karmaşık bir fenomendir. Doğrudan tüm türbülans ölçeklerini çözmek hesaplama açısından çok maliyetli olduğundan, türbülans modelleri bu süreçleri basitleştirmek ve simülasyonları pratik hale getirmek için kullanılır.

Binaların rüzgâr simülasyonlarında genellikle $k-\varepsilon$ veya $k-\omega$ gibi two-equation modelleri tercih edilir. Bu modeller, rüzgârın bina yüzeylerine ve çevresine etkisini modellemek için iyi bir denge sunar ve genel olarak hesaplama açısından verimlidir. Büyük ölçekli veya karmaşık yapılar için LES (Large Eddy Simulation) gibi daha detaylı modeller de kullanılabilir, ancak bunlar daha fazla hesaplama kaynağı gerektirir. RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) modelleri ise türbülanslı akışları modellemek için nispeten düşük hesaplama kaynakları gerektirir. Bu, özellikle geniş ölçekli ve karmaşık simülasyonlar için önemlidir, çünkü bu tür simülasyonlar daha az hesaplama süresi ve daha az donanım kaynağı kullanarak gerçekleştirilebilir.



Şekil 2.10 : (Som ve diğerleri, 2012) Deneysel çalışma, RANS ve LES türbülans modelleri karşılaştırması

Bu türbülans modelleri, binaların aerodinamik performansını anlamak, rüzgâr yüklerini tahmin etmek ve yapısal tasarımı optimize etmek için kullanılır. Her modelin kendi avantajları ve sınırlamaları vardır, bu yüzden seçim, simülasyonun amacına, karmaşıklığına ve mevcut hesaplama kaynaklarına göre yapılır.

2.2.1.6. Başlangıç ve sınır şartlarının belirlenmesi

Simülasyonun başlangıcında, akışkanın hızı, sıcaklığı ve basıncı gibi temel özellikleri tanımlanır. Bu koşullar, simülasyonun ilk aşamasında akışkanın durumunu belirler ve sonuçların doğruluğu için kritik öneme sahiptir. Simülasyon alanının fiziksel sınırlarında akışkanın nasıl davranacağını tanımlayan koşullardır. Örneğin, bir duvarın yüzeyinde sıfır hız koşulu (no-slip condition) uygulanabilir veya akışkanın simülasyon alanına giriş ve çıkış koşulları belirlenebilir.

Uzayda sonsuz çözüm havuzuna sahip Navier-Stokes ve süreklilik yönetici denklemlerinin çözülebilir bir hacim için indirgenebilmesi için çözüm hacminin sınır şartları belirlenmelidir (Bouris ve diğerleri, 2021; Franke ve diğerleri, 2011). Simülasyonun zamana bağlı çözümü için zaman aralığının belirlenmesi gerekmektedir. Akış hacmini oluşturan yüzeylerdeki hız ve basınç (Formül 2.8)

koşullarının tanımlanması gerekmektedir. Akışın hacime girdiği kısım olan Inlet sınır koşulunun hız değeri ve hız profili tanımlanır.

$$V_{inlet} = u \quad (2.8)$$

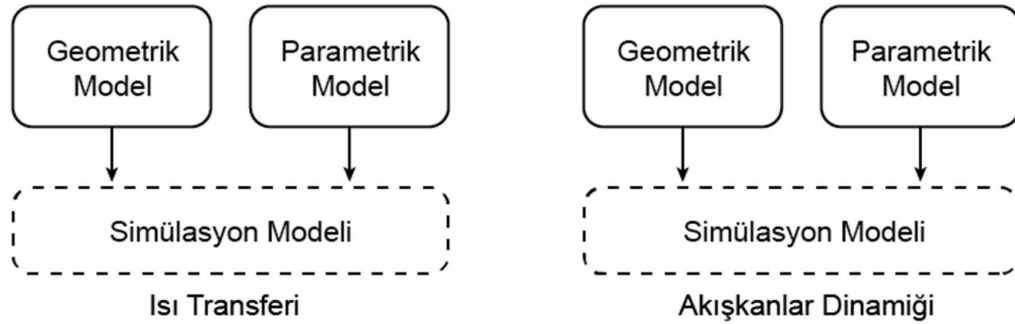
Akışın hacimden çıkması için tanımlana sınırdaki basınç değerinin (Formül 2.9) tanımlanması gerekmektedir.

$$P_{outlet} = p \quad (2.9)$$

Akış hacmini tanımlayan diğer duvarlardaki kayma koşullarının tanımlanması gerekmektedir. Bu duvarlardaki hızın normal bileşeni 0 olurken duvara teğet olan hız değerleri 0'dan farklı değerler alabilmektedir.

2.3. Binalarda Enerji ve Rüzgâr Simülasyonlarında Parametrik Yaklaşım

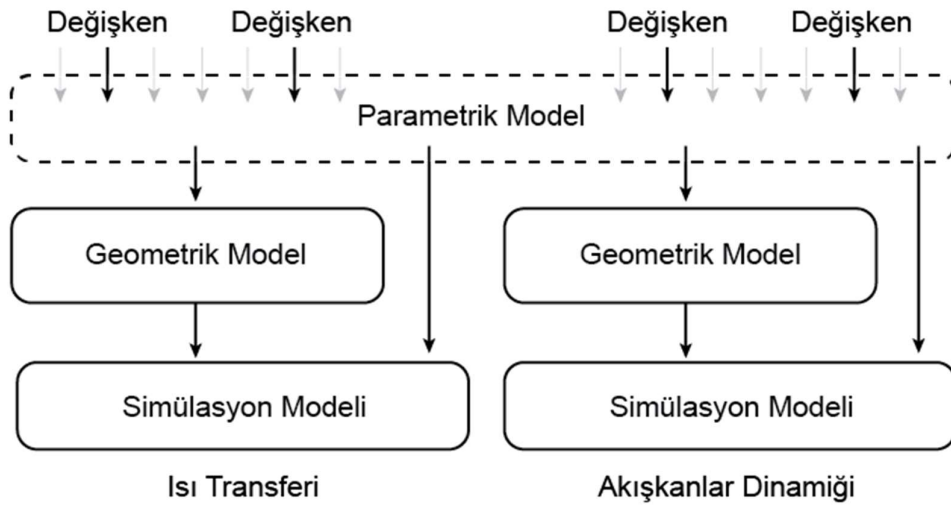
Binaların enerji etkin tasarlanması, binanın enerji harcamalarını belirleyen tüm etkenlerin belirlenmesi ve inşa edilmeden önce detaylı analizi ile mümkündür. Önceki bölümlerde açıklandığı gibi binaların enerji ve rüzgâr performanslarını ayrı ayrı simüle etmek mümkündür. Binalarda enerji simülasyonları ısı transferi denklemlerini çözerken, rüzgâr simülasyonları akışkanlar dinamiği denklemleri ile çözülmektedir. Denklem takımlarının farklı olması, denkleme girdi olacak verinin elde edilebilmesi açısından simülasyon modellerinin de farklı şekilde tanımlanmasını gerektirebilmektedir. Bu nedenle mimari çalışmalarda ele alınan probleme bağlı olarak farklı çözümleme modellerine gereksinim duyulmaktadır (Şekil 2.11).



Şekil 2.11 : Hesaplamaların ayrı ayrı oluşturulup ele alındığı akış.

Binaların simülasyon araçları için modellenebilmesi, enerji ve rüzgâr hesaplamalarının gerektirdiği geometrik tanımlar ile mümkündür. Bu geometrik tanımlar çoğunlukla

mimari modelin soyutlanmış veya hesaplamaya uygun bir biçimde basitleştirilmiş hali ile ifade edilir. Binanın tasarımı, yalnızca görünür olan yapı elemanlarının çeşidi veya boyutu değil aynı zamanda onu oluşturan bütün hacim, yapı elemanı ve yapı bileşeninin detay ve malzeme özellikleriyle de ifade edilir. Simülasyon araçları, binanın bileşenlerini hesaplamanın gerektirdiği ölçülerde soyutlayarak çözümlerin anlayabileceği şemalardan oluşan hesaplama girdi dosyaları ile çözümleme yapabilmektedirler. Bu girdi dosyalarının parametrik olarak hazırlanabilmesi çoklu senaryoların simüle edilebilmesini olanaklı hale getirir (Şekil 2.12).



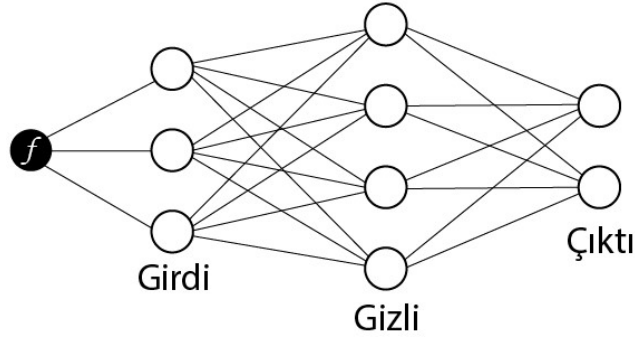
Şekil 2.12 : Hesaplamaların aynı parametrik model üzerinden ele alındığı akış.

Farklı simülasyon problemlerini aynı algoritma/model üzerinden oluşturabilmek için, parametrik modele girdi olan her bir değişkenin birbiri ile ve simülasyon değişkenleri ile bağlantısallığı çözümlenerek her bir problem için ayrı geometrik modeli oluşturmak mümkündür.

2.3.1. Parametrelerde bağlantısallık

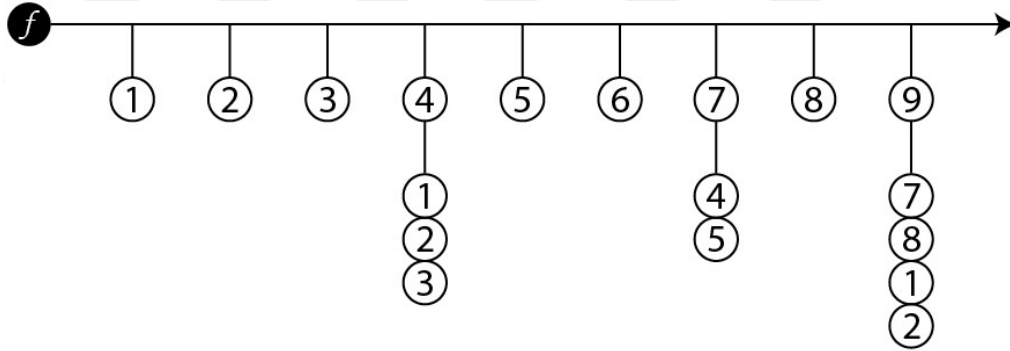
Bağlantısallık kavramı, bir değişkenin başka bir değişkene olan bağımlılığını ifade eder. Bu kavram, çeşitli alanlarda farklı şekillerde uygulanabilir, ama genellikle veri analizi, programlama ve sistem tasarımı gibi teknik alanlarda sıklıkla kullanılır (Buckner & Garson, 2019).

Parametrik olarak hazırlanmak istenen herhangi bir modelin, girdi olan parametrelerinin gizli ve çıktı parametreleri üzerindeki etkisini bilmek doğru modelin hazırlanması açısından önemlidir (Şekil 2.13).



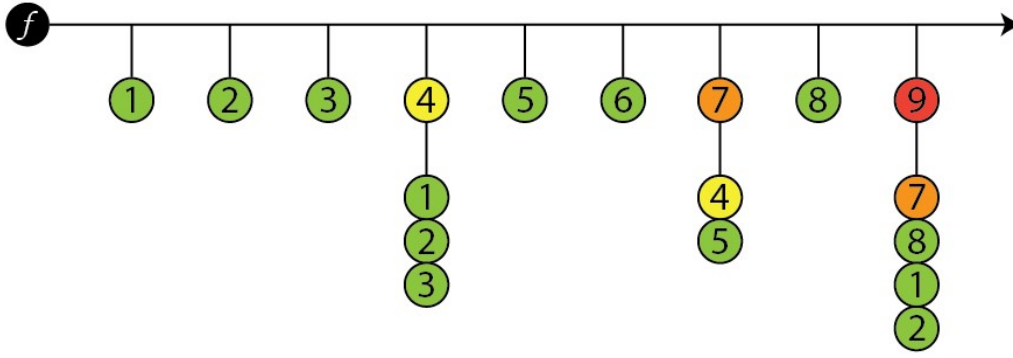
Şekil 2.13 : Girdi, gizli değişken ve çıktı arasındaki ilişki.

Bağlantısallık, bir girdinin diğer girdiyle olan ilişkisini tanımlar. Şekil x.2.'de şemada bir fonksiyona girdi olan parametrelerin birbiri ile olan ilişkisi tariflenmiştir. 1, 2, 3, 5, 6 ve 8 numaralı parametreler herhangi bir bağlantısallık içermemektedir. 4 numaralı parametre 1, 2 ve 3 numaralı parametrelerle, 7 numaralı parametre 4 ve 5 numaralı parametrelerle ve 9 numaralı parametre 7, 8, 1 ve 2 numaralı parametrelerle bağlantısallık içerir (Şekil 2.14).



Şekil 2.14 : Bağlantısallıkta bir girdinin başka bir girdi ile ilişkisi.

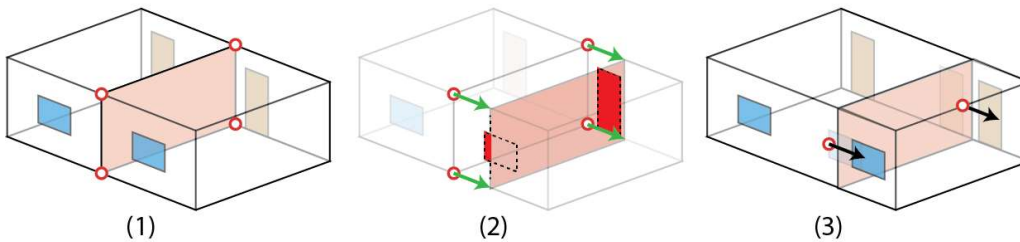
Bağlantısallık aynı zamanda farklı düzeylerde olabilmektedir. Şekil 2.15'te yeşil renkle ifade edilen parametreler kendi başlarına herhangi bir bağlantısallık içermemektedir. Sarı renkle ifade edilen 4 numaralı parametre sadece kendi başlarına bağlantısallığı olmayan parametrelerle bağlantısallık içerdiği için 1. derece bağlantısaldır. Turuncu renkle ifade edilen 7 numaralı parametre 1. derece bağlantısallık içeren 4 numaralı parametre ile bağlantısallık içerdiği için 2. derece bağlantısaldır. Son olarak kırmızı renkle ifade edilen 9 numaralı parametre ise 2. derece bağlantısallık içeren 7 numaralı parametre ile bağlantısallık içerdiğinden 3. derece bağlantısaldır (Şekil 2.15).



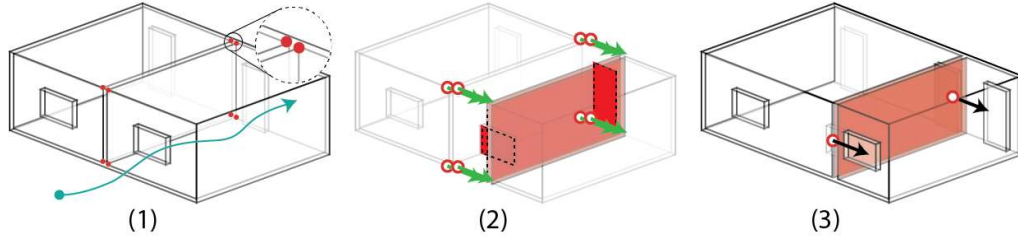
Şekil 2.15 : Bağlantısallıkta bir girdinin başka bir girdi farkı derecelerden ile ilişkisi.

Bağlantısallık içeren bir parametrede olan bir değişiklik, ona bağlı olan değişkenlerde bir yan etki oluşturabilir. Bu durum düzeltilmediğinde yapılan değişiklik hatalara sebep olabilmektedir. Aynı şekilde, enerji ve rüzgâr modeli oluştururken tanımladığımız geometrik yüzeyler, yüzeylerdeki farklı yapı bileşenleri ve hacimler birbiri ile yüksek bağlantısallık içerir.

İki hacmin birbiri ile olan ilişkisi ele alındığında Şekil 2.16'daki enerji modeli geometrik bağlantısallık görselinde 4 nokta-kullanılarak hacmin iki zona ayrılabilirdiği, Şekil 2.17'deki rüzgâr modeli geometrik bağlantısallık görselinde ise (1) akış hacmini bölerek iki odayı birbirinden ayıran bölücü duvarın yüzey ile ilişkisinin 8 nokta ile tanımlandığı görülmektedir (1). Bu noktaların hareket etmesi her iki hacmi de doğrudan etkilemektedir. Noktaların sağdaki hacmi küçültüp soldaki hacmi büyültecek şekilde hareket ettirilmesi her iki hacmin geometrisini doğrudan etkiler. Aynı şekilde bu noktaların hareket ettirilmesi bölücü duvar ile hacimlerde bulunan açıklıklar arasında çakışmalara (2) neden olabilmektedir. Bu çakışmaların giderilmesi, açıklıkların da aynı düzeyde kaydırılması (3) ile mümkündür.

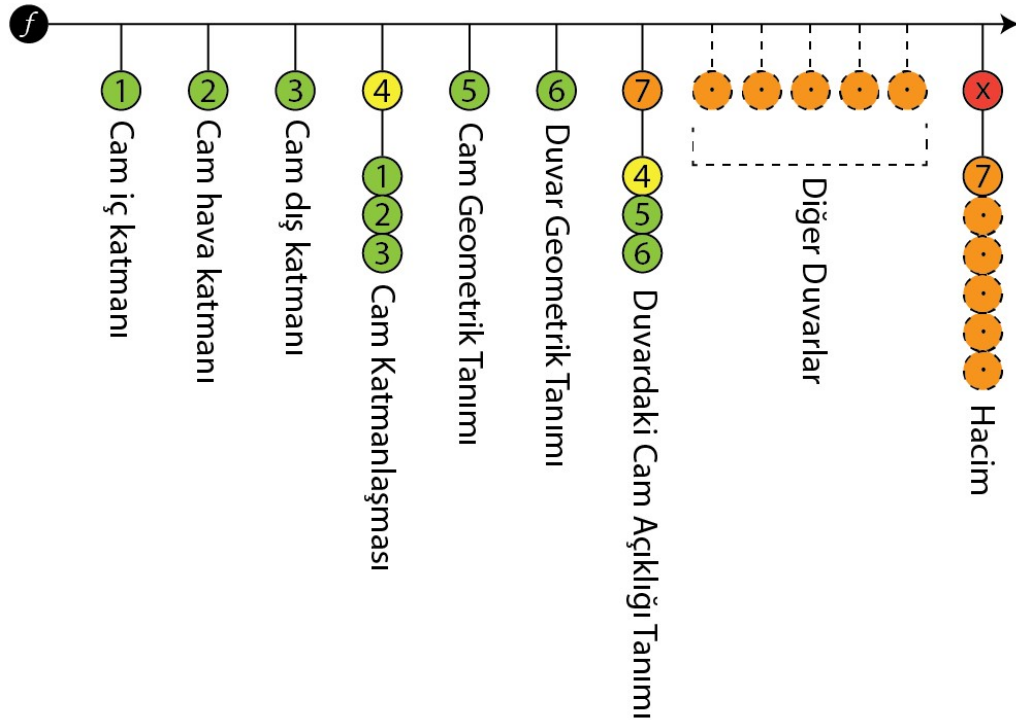


Şekil 2.16 : Enerji modelinde geometrik bağlantısallık.



Şekil 2.17 : Rüzgâr modelinde geometrik bağlantısallık.

Hacimdeki açıklığın -pencere/cam- hacim üzerindeki bağlantısallığı ele alacak olursak, Şekil 2.16 ve Şekil 2.17’de olduğu gibi camın bileşenleri hacim üzerinde yüksek derecede bağlantısallık oluşturur. Cam objesinin tanımı onu oluşturan katmanlara ve geometrik olarak onu tanımlayan noktalara bağlıdır. Aynı şekilde duvar üzerindeki açıklık tanımı ise geometrik olarak duvarın ve camın yüzeysel olarak örtüşmesi ile yüksek derece bağlantısaldır. Tüm bu bağlantısallıklar simülasyonu oluşturan her bir tanım için geçerlidir ve simülasyonun başarıya ulaşmasında bu bağlantısallık ilişkilerinin doğru kurgulanması ve ona uygun bir şekilde senaryoların oluşturulması gerekmektedir.



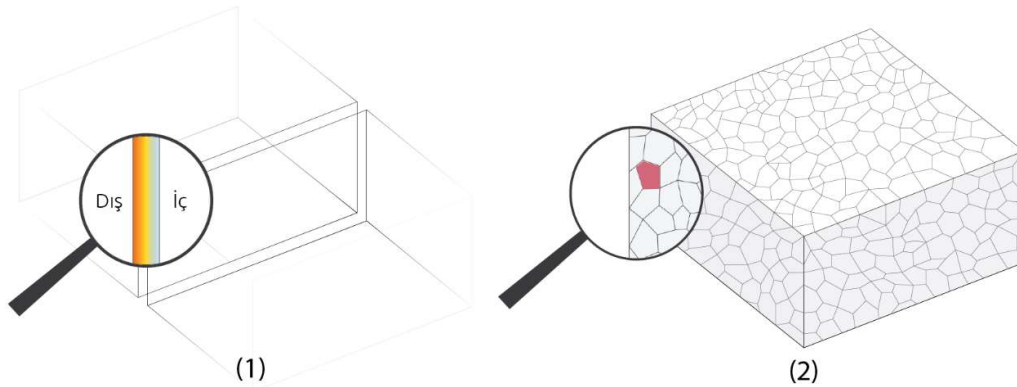
Şekil 2.18 : Enerji modeli cam geometrik tanımının (Şekil 2.16) hacim üzerindeki bağlantısallığı.

Tek bir parametrik model üzerinden iki farklı problem için model üretebilmek amacıyla her iki modeldeki bağlantısallıkların çözülmesi ve bunu uygun bir şekilde parametrik modelin oluşturulması gerekmektedir.

2.3.2. Binalarda enerji ve rüzgâr modellerinin bir arada üretilme gereksinimi

Binalarda enerji ve rüzgâr simülasyonları iki farklı geometrik modelleme gerektiren ve farklı fiziksel hesaplamalarla ele alınan sistemlerdir. Her bir tasarım seçeneğini bu iki alanda simüle edebilmek için iki farklı model oluşturulması ve bu iki modelin ayrı çözümler ile çözülmesi gerekmektedir. Çoklu tasarım seçeneklerinin denenmesini gerektiren durumlarda, her iki çözücü için iki farklı model hazırlanması zaman almaktadır. Modellemenin manuel yapıldığı durumlarda hata ihtimali vardır ve bu durum da ayrıca zaman kaybına neden olabilmektedir.

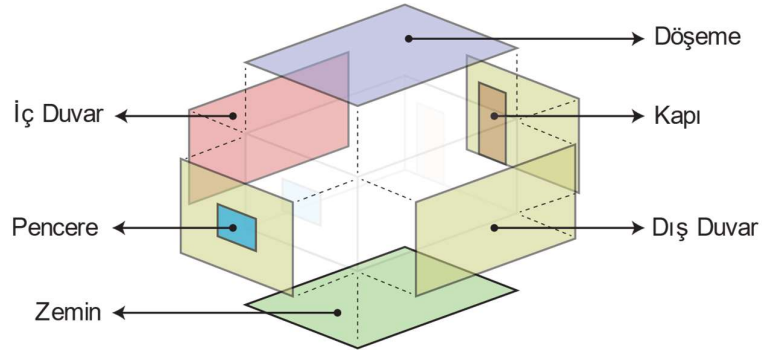
Tek bir parametrik model üzerinden her iki çözücü için çoklu senaryoların oluşturulabilmesi, zaman kaybı ve hata ihtimali gibi konuları aşabilecek bir yaklaşımdır. Bu modellerin üretilebilmesi için her iki simülasyon için gerekli adımların, geometrik tanımların ve parametrelerdeki bağlantısallık ilişkilerinin anlaşılması gerekmektedir. En temelinde bu çözümlerin farklı fiziksel problemleri ele alması, geometrik olarak farklı tanımlanmalarını gerektirmektedir. Örneğin, ısı transferi çözümlerinde duvar katmanları önemliiyken; akış çözümlerinde ağ yapısının modellenmesi önemli olmaktadır (Şekil 2.19).



Şekil 2.19 : (1) Isı transferi çözümü için hacim/yüzey şematik modeli, (2) akış çözümü için ağ yapısı şematik modeli.

Binalarda enerji simülasyonu için hazırlanacak modelde her bir hacim zon olarak ifade edilir ve kapalı bir hacmi tanımlayan farklı yüzeylerden oluşur. Isı transferinin (1)

gerçekleştirdiği bu yüzeyler, hacim içerisindeki ısı konfor koşullarını karşılamak için gerekli olan tasarım değişkenlerinin performansının hesaplanmasına yardımcı olur.

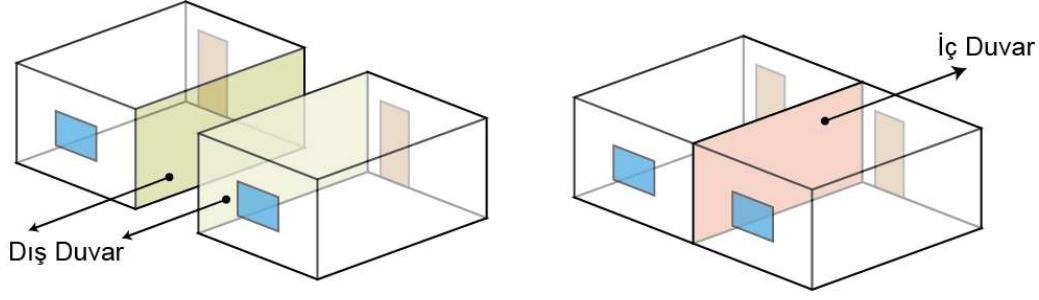


Şekil 2.20 : Enerji modeli hacmini (Şekil 2.16) oluşturan yüzeyler.

Binalarda rüzgâr simülasyonu için hazırlanacak olan modelde ise akış hacmini parçalara bölen ağ yapılarının (2) oluşturulmasıyla akışkanlar dinamiği hesaplamalarının yapılmasıyla rüzgârın etkisinin hesaplanması mümkün olmaktadır.

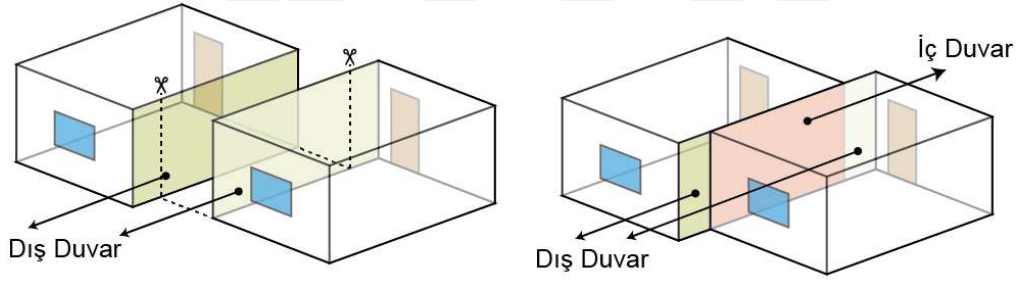
Enerji modelinin, hacimlerin birbiri ile yüzey ilişkileri kurduğu ve bu sayede ısı transferi denklemlerini çözerek tüm binadaki gerekli konfor koşullarının sağlanması için gerekli olan enerjiyi hesapladığı önceki bölümlerde ele alınmıştır. Enerji modelinde her yüzeyin alanı ve onu oluşturan malzemelerin termofiziksel özellikleri hesaplamadaki en önemli unsurdur.

Hacmi oluşturan bu yüzeyler iç ve dış olarak ikiye ayrılır. İç yüzeyler, iç duvar, iç döşeme, iç kapı gibi mekânın içinde tanımlanan yüzeyler iken, dış yüzeyler doğrudan dış iklim koşullarıyla temas eden yüzeylerdir. Bu farklı yüzey çeşitlerinin geometrik olarak doğru ayrıştırılması gerekmektedir. Şekil 2.21’de iki farklı hacmi bağımsız modellediğimizde bağımsız dış duvarlar elde edilir. Hacimleri bitişik olacak şekilde modellediğimizde ise enerji modelinde komşu hacimlerin ortak duvarlarını (üst üste binen –örtüşen) tespit ederek iç duvar niteliğine çevirmek gerekmektedir (Şekil 2.21).



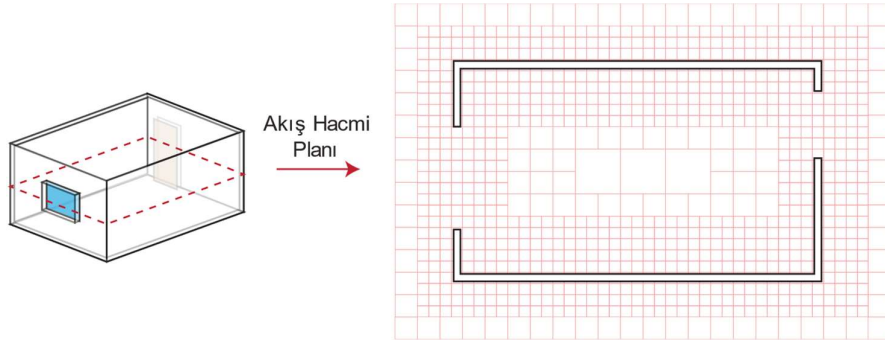
Şekil 2.21 : Enerji modelinde örtüşen komşu yüzey ilişkileri.

Hacimleri bitişik olacak şekilde modellediğimiz bazı durumlarda üst üste tam olarak binmeyen -örtüşmeyen- dış duvarlar elde edilebilir. Bu hacmi oluşturan ve örtüşmeyen duvar niteliğinde olan bu yüzeylerin ayrı ayrı belirlenmesi ve duvarın bir bölümünü iç, diğer bölümünü dış duvar niteliğine çevrilmesi gerekmektedir. Bu sayede doğru niteliğe sahip yüzeyler elde edilebilir (Şekil 2.22).



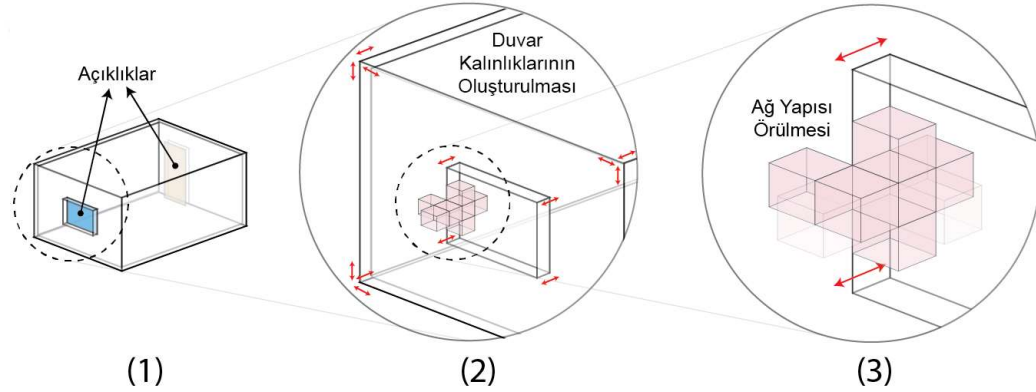
Şekil 2.22 : Enerji modelinde örtüşmeyen komşu yüzey ilişkileri.

Binalarda rüzgâr simülasyonu için hazırlanacak modelde ise her bir hacim akış hacminin bir parçası olabilmektedir. Bu sebeple geometrik olarak ifade ediliş biçimi farklıdır. Akışa maruz kalacak hacimlerin (odaların) açıklıklar aracılığı ile akış hacmine dahil edilmesiyle rüzgârın o odanın içindeki ve çevresindeki hareketleri simüle edebilmek mümkündür (Şekil 2.23).



Şekil 2.23 : Rüzgâr modeli için oda içinde ağ yapısının örüldüğü akış alanı.

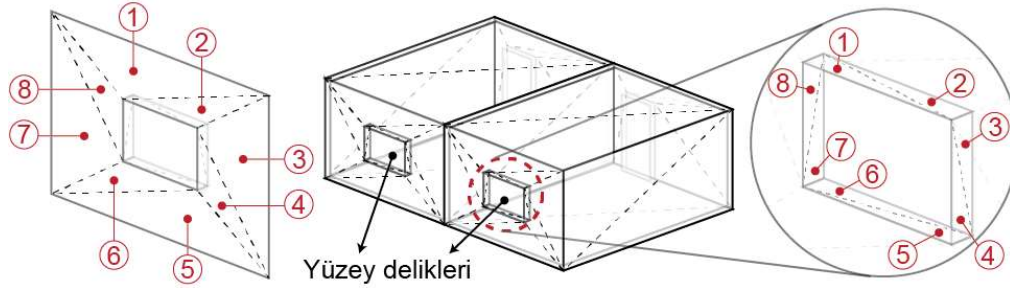
Rüzgâr simülasyonu için gerekli olan geometrinin oluşturulması (Şekil 2.24), açıklıkların tanımlandığı alanlarda (1) duvar kalınlıklarının oluşturulmasıyla ve yüzeylerde oluşturulan boşluklara (2) ağ yapısının örülmesiyle (3) gerçekleştirilir. Burada ağ yapısının büyüklüğü simülasyonun detay seviyesini belirlemektedir, bu sebeple geometrik modeldeki en kısa yüzey olan duvar kalınlığı ağ yapısının ebatlarında belirleyici olmaktadır. Örneğin duvar kalınlığının 10cm olması, en küçük ağ yapısının boyutunun da 10cm'e eşit veya altında olmasını gerektirmektedir.



Şekil 2.24 : Ağ yapısının örülmesi için gerekli olan akış hacminin oluşturulması.

Rüzgâr modelinin, mimari tasarımda odaları oluşturan birimlerin akış hacmine oda içindeki açıklıklar yoluyla katılması sayesinde odaların içindeki rüzgâr konforunun hesaplandığı önceki bölümlerde ele alınmıştır. Akış hacmini oluşturan geometrik tanımların ağ yapısının örülmesine olanak sağlayacak ebatlarda yüzey kenar ebatlarına sahip olması gerekmektedir. Bu yüzden rüzgâr modeli, odaların duvar kalınlıklarını tanımlayan geometriler ile modellenmektedir. Enerji modelinin aksine açıklıklar yüzeylerde açılan delikler ile tanımlanır ve bu deliklerin etrafında duvar kalınlığının sebep olduğu yeni yüzeyler oluşur.

Rüzgâr modelinde akışın girmesi için açılan açıklıklar -yüzey delikleri- üzerinde delik açılan yüzeyde yapısal değişikliklere neden olmaktadır. Normalde 4 noktadan oluşan ve 2 üçgenle ifade edilebilen yüzey, deliğin açılmasıyla 8 noktadan oluşan ve 8 üçgen ile ifade edilen daha karmaşık bir geometriye dönüşmektedir. Açılan delik, duvar kalınlığının da sebep olduğu her biri 4 noktadan oluşan ve 2 üçgen ile ifade edilen 4 yeni yüzeyin oluşmasına neden olmaktadır (Şekil 2.25).



Şekil 2.25 : Rüzgâr modelindeki açıklıkların geometrideki değişime etkisi.

Parametrik olarak her iki modelin de oluşturulabilmesi için tüm bu geometrik değişikliklerin, parametreler değiştiğinde tekrar tekrar üretilmesini gerektirmektedir. Bu sayede bu modellerin oluşturulması için gereken zaman ve hata payı önemli ölçüde azaltılabilmektedir.

Bu nedenle, farklı tasarım senaryolarının her iki model için parametrik olarak üretilebilmesi için geometrik kütüphanenin ve simülasyon objelerini içeren simülasyon kütüphanesinin yazılım dilleri ile oluşturulmasını gerekli kılmaktadır.

Enerji ve rüzgâr modellerindeki bu farklılıklar, her iki modelin beraber üretilebilmesini güçleştirmektedir. Bu tez çalışması, bu iki modelin tek bir algoritma üzerinden ortak bir model şeklinde üretilebilmesinin araştırılması ve örnek senaryolar üzerinden incelenmesini amaçlamaktadır.

3. GEOMETRİK KÜTÜPHANE GELİŞTİRİLMESİ

Parametrik hesaplamalar için enerji ve rüzgâr geometrik modellerinin oluşturulması için gerekli olan temel geometrik tanımların ve bu tanımlar üzerinden matematiksel hesaplamaların yapılabilmesi için Python programlama dilinde **Archaea**¹ adında geometrik yazılım kütüphanesi oluşturulmuştur. Bu kütüphane temel geometrik nesneleri, bu nesneler üzerinde yapılan çeşitli operasyonları ve üretilen geometrinin gerekli formatlar ile üretilmesi veya dönüştürülmesini hedeflemektedir.

3.1. Temel Geometrik Nesnelerin Oluşturulması

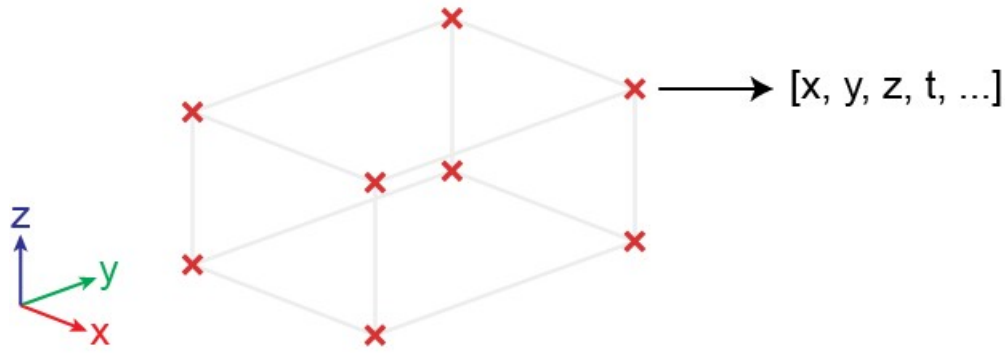
Temel geometrik objeler karmaşık geometrik ve simülasyon modellerinin temelini oluşturan bir dizi temel nesneleri tanımlamaktadır. Bunlar arasında, üç boyutlu koordinatları ifade eden **'CoordinateArray'**, vektörel hesaplamalarda temel birim olan **'Vector3d'**, belirli bir noktayı tanımlayan **'Point3d'**, düzlemleri ifade eden **'Plane3d'**, iki nokta arasındaki doğrusal segmenti temsil eden **'LineSegment'**, çok noktalı çizgiler için **'Polyline'**, kapalı döngüleri tanımlayan **'Loop'** ve nesnelerin yönelimini belirleyen **'Orientation'** ve nesnelerin x, y ve z eksenlerinde minimum ve maximum değerlerini hesaplayarak kaba hacmini hesaplayan **'BoundingBox'** yer almaktadır. Bu objeler, geometrik modellemenin temel yapı taşları olarak hizmet eder ve daha karmaşık yapıların inşasını mümkün kılar.

3.1.1. CoordinateArray

CoordinateArray, üç boyutlu uzaydaki noktaların koordinatlarını ve bu koordinatlara ait üst verileri saklamak için kullanılan bir veri yapısıdır. Bu yapı, geometrik modellemede, özellikle de karmaşık üç boyutlu nesnelerin ve yapıların tanımlanmasında temel bir rol oynar. CoordinateArray, matematiksel ve geometrik hesaplamaların yanı sıra, bilgisayar grafiklerinde ve simülasyonlarda da etkin bir

¹ <https://github.com/archaeans/archaea>

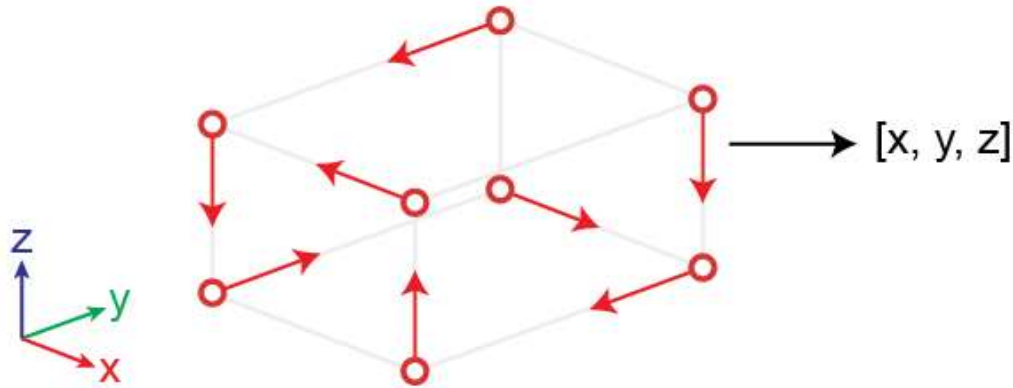
şekilde kullanılır. Bu yapının dizi nesnesinden türemektedir ve dizinin sıfırıncı indeksi x, birinci indeksi y, üçüncü indeksi z koordinatına denk gelmektedir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 : CoordinateArray gösterimi.

3.1.2. Vector3d

Vector3d, üç boyutlu vektörlerin temsilinde kullanılan bir geometrik objedir. Bu obje, yön ve büyüklük bilgilerini içerir ve fizik, mühendislik, bilgisayar grafikleri gibi birçok alanda temel bir araç olarak kullanılır (Ko & Steinfeld, 2018; Woodbury, 2010). Vector3d, kuvvet ve hız gibi fiziksel büyüklüklerin yanı sıra, geometrik dönüşümler ve yönlendirme işlemlerinde de önemli bir rol oynar. Vektörlerin bu çok yönlülüğü, onları modern bilimsel ve mühendislik hesaplamalarında büyük önem taşır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 : Vector3d gösterimi.

3.1.3. Point3d

Point3d, üç boyutlu uzayda bir noktanın konumunu tanımlar. Bu obje, x, y ve z koordinatları üzerinden bir noktanın kesin konumunu ifade eder ve bu sayede üç boyutlu modelleme ve tasarımda temel bir rol oynar (Ko & Steinfeld, 2018;

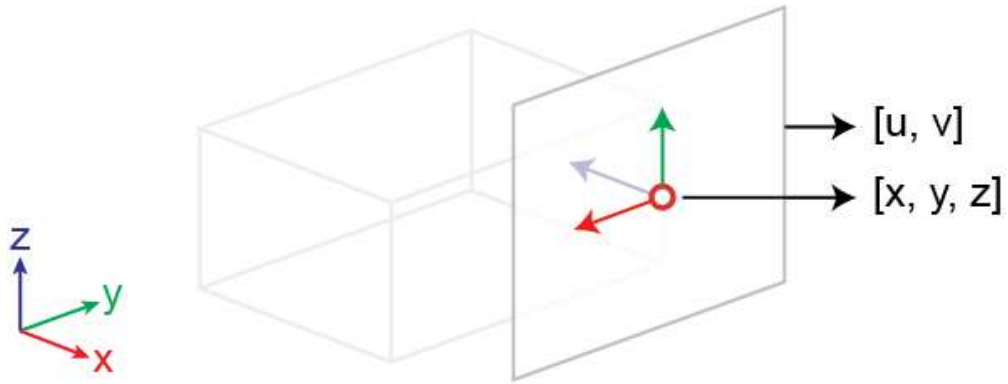
Woodbury, 2010). Point3d, karmaşık geometrik yapıların noktasal analizlerinde, ölçüm ve modelleme işlemlerinde kullanılır. Ayrıca, bilgisayar grafikleri, mimari tasarım ve mühendislik uygulamalarında da yaygın olarak tercih edilir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 : Point3d gösterimi.

3.1.4. Plane3d

Plane3d, üç boyutlu uzayda bir düzlemi temsil eden geometrik bir objedir. Bu düzlem, genellikle bir nokta ve normal vektör kullanılarak tanımlanır. Plane3d, geometrik modellemede, özellikle kesitlerin ve yüzeylerin tanımlanmasında önemli bir rol oynar (Ko & Steinfeld, 2018; Woodbury, 2010). Mimarlık, mühendislik ve bilgisayar grafikleri gibi alanlarda, çeşitli yapısal ve görsel hesaplamalarda temel bir unsur olarak kullanılır (Şekil 3.4).

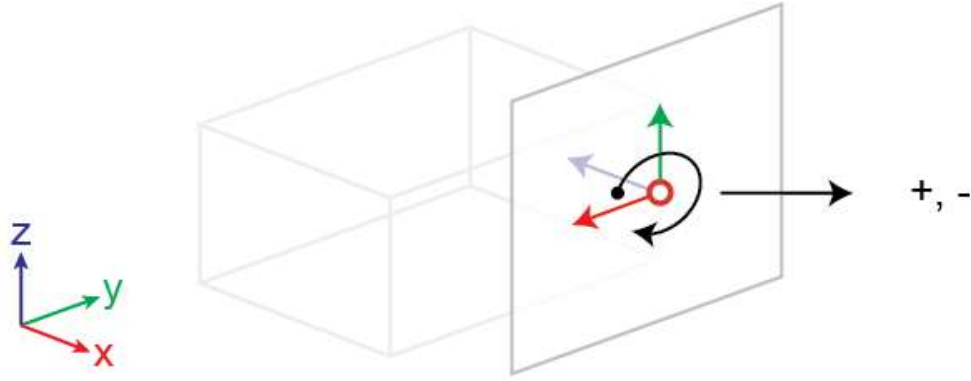


Şekil 3.4 : Plane3d gösterimi.

3.1.5. Orientation

Orientation, bir nesnenin üç boyutlu uzaydaki yönünü ve açısal konumunu tanımlayan bir geometrik objedir. Bu obje, nesnelerin uzaydaki yönlendirilmesi, dönüş açılarının

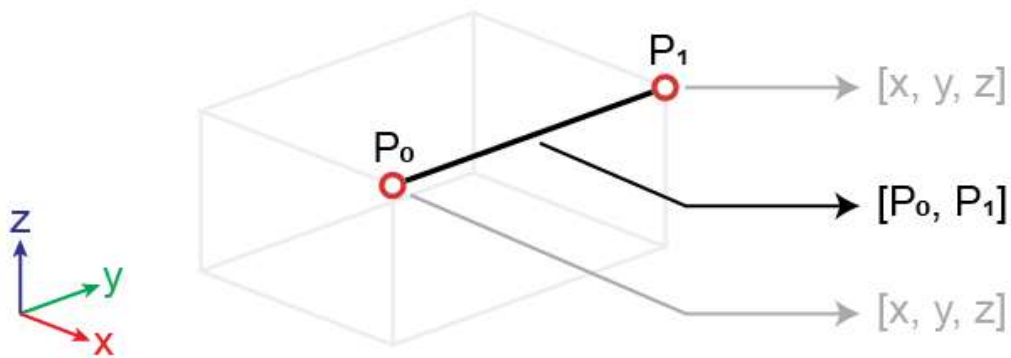
belirlenmesi ve konumlandırılmasında kritik bir rol oynar (Ko & Steinfeld, 2018; Woodbury, 2010). Orientation, özellikle robotik, otomotiv tasarımı ve bilgisayar grafikleri gibi alanlarda, nesnelerin doğru açılarla konumlandırılmasını ve yönlendirilmesini sağlar, bu da daha gerçekçi ve doğru modellemelerin yapılmasına olanak tanır (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 : Orientation gösterimi.

3.1.6. LineSegment

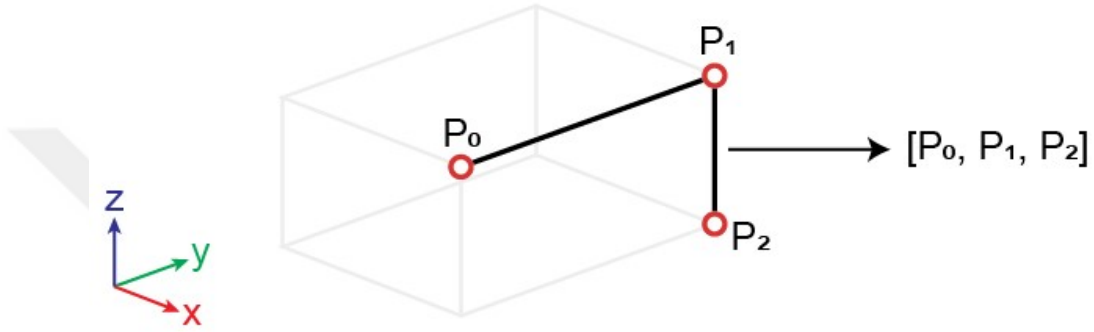
LineSegment, iki nokta arasındaki en kısa mesafeyi temsil eden bir geometrik objedir. Bu obje, başlangıç ve bitiş noktaları arasındaki doğrusal bağlantıyı simgeler ve genellikle geometrik yapıların temel yapı taşlarından biri olarak kabul edilir (Ko & Steinfeld, 2018; Woodbury, 2010). LineSegment, teknik çizimlerde, bilgisayar grafiklerinde ve geometrik modellemede yaygın olarak kullanılır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6 : LineSegment gösterimi.

3.1.7. Polyline

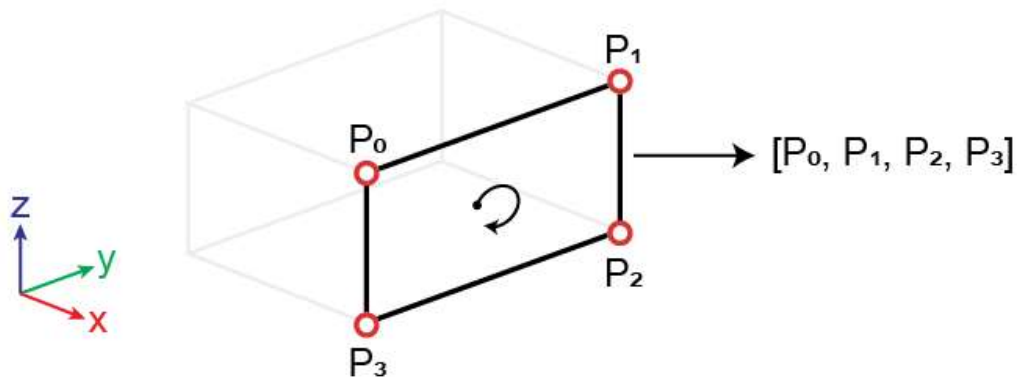
Polyline, bir dizi bağlantılı Line Segment'ten oluşan bir geometrik objedir. Bu obje, karmaşık geometrik şekillerin ve yolların tanımlanmasında kullanılır (Ko & Steinfeld, 2018; Woodbury, 2010). Polyline, özellikle harita çizimi, mimari planlama ve bilgisayar grafiklerinde, çok sayıda noktanın birleştiği sürekli hatları oluşturmak için tercih edilir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7 : Polyline gösterimi.

3.1.8. Loop

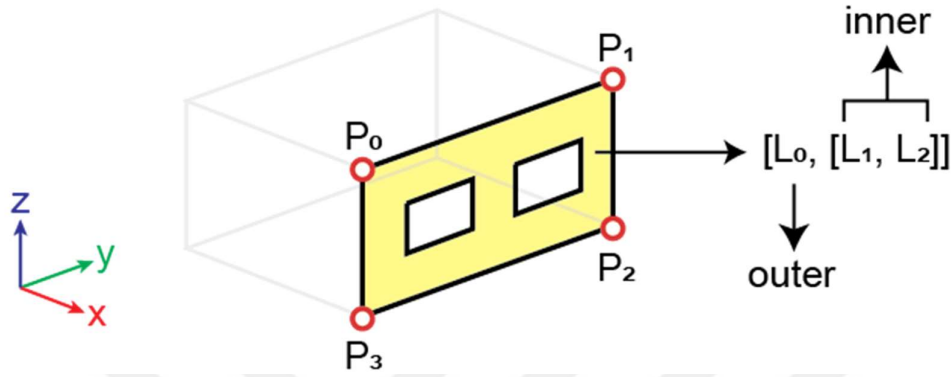
Loop, bir dizi bağlantılı noktanın oluşturduğu kapalı bir çizgiyi temsil eden geometrik bir objedir. Bu obje, özellikle yüzeylerin sınırlarını tanımlamak ve kapalı alanları oluşturmak için kullanılır. Loop, mimaride, mühendislikte ve bilgisayar grafiklerinde, kapalı geometrik formların ve yüzeylerin modellenmesinde temel bir araç olarak kullanılır (Şekil 3.8).



Şekil 3.8 : Loop gösterimi.

3.1.9. Face

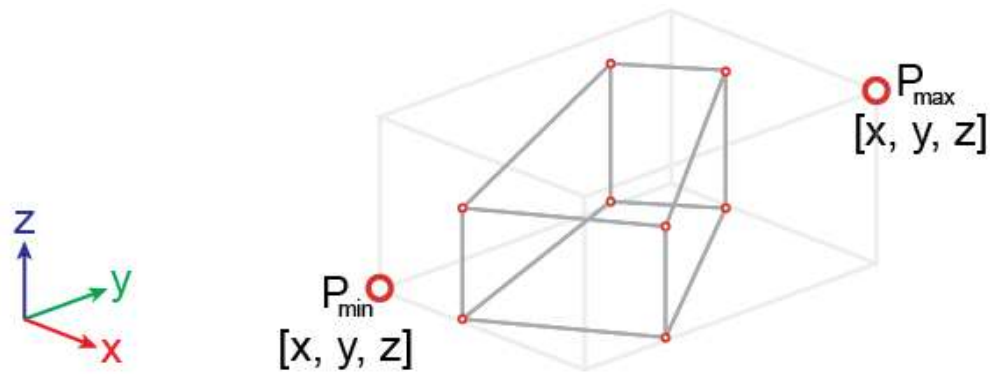
Face, bir yüzey tanımlar. Dış sınır ve iç boşluklardan oluşur, bu sınır ve boşluklar aslında birer Loop nesnesidir (Şekil 3.9).



Şekil 3.9 : Face gösterimi.

3.1.10. BoundingBox

BoundingBox, bir nesnenin veya şeklin sınırlarını tanımlamak için kullanılan sanal bir "kutu"yu ifade eder. BoundingBox, genellikle dörtgen şeklinde olup, içine aldığı nesnenin veya şeklin en küçük ve en büyük X, Y ve Z koordinatlarını kapsar. Bu, nesnenin konumunu, boyutunu ve yerleşimini anlamak için basit bir yol sağlar. Özellikle, bilgisayarla görme, oyun geliştirme ve CAD gibi alanlarda sıkça kullanılır. BoundingBox'lar, nesne tanıma, çarpışma algılama ve uzamsal analiz gibi işlemlerde önemli bir rol oynar (Şekil 3.10).



Şekil 3.10 : BoundingBox gösterimi.

3.2. Temel Geometrik Fonksiyonların Oluşturulması

Bu bölümde, temel geometrik objeler üzerinde uygulanabilecek çeşitli işlevler incelenmiştir. Bu işlevler arasında, nesnelerin konumunu değiştiren '**Move**', nesnelerin kopyalarını oluşturan '**Copy**', nesneleri belirli bir eksen etrafında döndüren '**Rotate**', nesnelerin boyutunu arttıran veya azaltan '**Offset**', üç boyutlu yüzeylerin üçgenleştirilmesini sağlayan '**Earcut3d**' bulunmaktadır. Bu fonksiyonlar, geometrik modelleme sürecinde esneklik ve çeşitlilik sağlar, kullanıcıların karmaşık geometrik yapıları daha etkin bir şekilde manipüle etmelerine olanak tanır.

3 boyutlu afin dönüşümleri, üç boyutlu uzaydaki nesnelerin konum, yönelim ve ölçeklenmesini değiştirmek için kullanılır (Ko & Steinfeld, 2018; Woodbury, 2010). Bu dönüşümler genellikle matrislerle ifade edilir ve bu matrisler, 3 boyutlu grafikler ve bilgisayarlı görü işlemede yaygın olarak kullanılır. Move, Rotate, Shear ve Scale bu dönüşümlerden bazılarıdır.

3.2.1. Move

Move fonksiyonu, geometrik objelerin konumlarını üç boyutlu uzayda değiştirmek için kullanılır. Bu işlev, belirli bir vektör boyunca nesnelerin yer değiştirmesini sağlar, böylece modelin farklı bölümlerine kolayca taşınabilir veya konumlandırılabilir. Move, özellikle mimarlık, mühendislik ve bilgisayar grafikleri gibi alanlarda, nesnelerin ve yapıların uzay içerisindeki dinamik yerleşimini ayarlamak için temel bir araçtır. Bu fonksiyon, karmaşık geometrik yapıların ve simülasyonların esnek bir şekilde yönetilmesine olanak tanır.

Move matrisi, bir nesnenin uzayda bir noktadan diğer bir noktaya hareket ettirilmesi için kullanılır. Standart bir Move matrisi formül 3.1'deki gibi gösterilir (Ko & Steinfeld, 2018; Woodbury, 2010).

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & 0 & t_y \\ 0 & 0 & 1 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Bir noktanın koordinat düzleminde Move edilmesi için matris çarpımı yapılır. Örneğin, P = (5, 2, -1) noktasının, x ekseninde 2 birim, y ekseninde 3 birim ve z ekseninde 5 birim kaydırılması için formül 3.2'deki hesaplama yapılır.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 1 & 0 & 3 \\ 0 & 0 & 1 & 5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 5 \\ 2 \\ -1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 7 \\ 5 \\ 4 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Move sonucu oluşan yeni nokta P = (7, 5, 4) şeklindedir.

3.2.2. Rotate

Rotate fonksiyonu, geometrik objelerin belirli bir eksen etrafında döndürülmesini sağlar. Bu işlev, nesnelerin açısal pozisyonlarını değiştirerek, farklı perspektiflerden ve yönelimlerden görselleştirilmesine olanak tanır. Rotate, mimarlık, mühendislik ve bilgisayar grafikleri gibi alanlarda, nesnelerin ve yapıların uzaydaki oryantasyonunun hassas bir şekilde ayarlanmasında önemli bir rol oynar. Bu fonksiyon, kullanıcıların kompleks geometrik yapıları ve tasarımları farklı açılardan değerlendirmesine ve düzenlemesine imkân tanır.

Rotate matrisi, bir nesnenin uzayda bir eksen etrafında döndürülmesi için kullanılır. Z eksenini etrafında döndürülmek istenen bir nesnenin standart bir Rotate matrisi formül 3.3'deki gibi gösterilir (Ko & Steinfeld, 2018; Woodbury, 2010).

$$\begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Bir noktanın koordinat düzleminde Rotate edilmesi için matris çarpımı yapılır. Örneğin, P = (5, 2, -1) noktasının, z ekseninde 90 derece döndürülmesi için formül 3.4'deki hesaplama yapılır.

$$\begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 5 \\ 2 \\ -1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2 \\ 5 \\ -1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Rotate sonucu oluşan yeni nokta P = (-2, 5, -1) şeklindedir.

3.2.3. Scale

Scale fonksiyonu bir şeklin boyutlarını belirli bir oranda büyütme veya küçültme işlemidir. Bu işlem, şeklin tüm noktalarının bir referans noktasına göre orantılı olarak uzaklaştırılmasını veya yaklaştırılmasını içerir. Ölçeklendirme, geometrinin yanı sıra

bilgisayar grafikleri, mühendislik ve mimaride de yaygın olarak kullanılır. Ölçeklendirme sırasında şeklin oranları korunur, yani şekil sadece boyut olarak değişir, ancak formu veya açıları değişmez. Bu, özellikle farklı boyutlardaki nesnelerin tasarımlarının yapılması veya analiz edilmesi durumlarında önemlidir.

Standart bir Scale matrisi formül 3.5'deki gibi gösterilir (Ko & Steinfeld, 2018; Woodbury, 2010).

$$\begin{bmatrix} S_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Eğer bir nesneyi $P = (5, 2, -1)$ referans noktasına göre, x ekseninde 2 kat, y ekseninde 1,5 kat ve z ekseninde 3 kat büyütmek istiyorsak, ölçeklendirme matrisi formül 3.6'daki şekilde olacaktır.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -5 \\ 0 & 1 & 0 & -2 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 5 \\ 0 & 1 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Ölçeklendirilecek olan nesne öncelikle referans noktasına göre orijin noktasına taşınır ve Scale matris çarpımından sonra tekrardan ilk konumuna taşınmak için ilk yapılan taşıma işleminin tersi uygulanır.

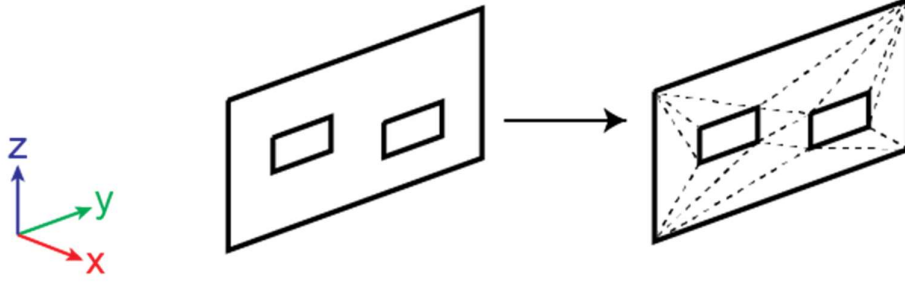
3.2.4. Offset

Offset fonksiyonu, geometrik nesnelerin boyutlarını ve şekillerini değiştirmek için kullanılır. Bu işlev, bir nesnenin yüzeylerini veya kenarlarını belirli bir mesafe boyunca genişletir veya daraltır, böylece nesnenin boyutları ve oranları üzerinde kontrol sağlar. Offset, özellikle mimarlık, mühendislik ve endüstriyel tasarımda, nesnelerin ve yapıların boyutlarının ve şekillerinin değiştirilmesinde temel bir araç olarak kullanılır. Bu fonksiyon, kullanıcıların tasarımlarını daha esnek ve çeşitli şekilde uyarlamalarına olanak tanır.

3.2.5. Earcut3d

Earcut3d fonksiyonu, üç boyutlu yüzeylerin üçgenleştirilmesi için kullanılan bir algoritmadır. Bu fonksiyon, karmaşık geometrik yüzeyleri daha basit üçgenlerden

oluşan yüzeylere dönüştürerek, grafik ve simülasyon uygulamalarında daha verimli bir şekilde işlenmelerini sağlar. Earcut3d, özellikle bilgisayar grafikleri, oyun geliştirme ve sanal gerçeklik uygulamalarında, detaylı ve karmaşık yüzeylerin görselleştirilmesinde ve işlenmesinde kritik bir rol oynar. Bu fonksiyon sayesinde, içinde delikler barındıran yüzeyler de üçgenleştirilebilir.



Şekil 3.11 : Earcut3d üçgenleştirme gösterimi.

3.3. Temel Simülasyon Nesnelerinin Oluşturulması

Simülasyon modellerinin temel yapı taşları olan 'Domain', 'Zone' ve 'Wall' objeleri bu bölümde ele alınmıştır. 'Domain', simülasyonun gerçekleştiği genel alanı temsil ederken, 'Zone' bu alan içerisindeki özel bölümleri ifade eder. 'Wall' ise bu bölgeleri birbirinden ayıran duvarları veya bariyerleri temsil eder. Bu objeler, özellikle enerji simülasyonları ve yapısal analizlerde kritik öneme sahiptir, çünkü bu objeler sayesinde simülasyon ortamının fiziksel sınırları ve bölümleri net bir şekilde tanımlanabilir. Bu nesneler **archaea-simulation**² kütüphanesi altında geliştirilmiştir.

3.3.1. Domain

Domain, simülasyon ortamının genel fiziksel sınırlarını tanımlayan bir nesnedir. Bu nesne, simülasyonun gerçekleştiği toplam alanı ve bu alanın sınırlarını belirler. Domain, özellikle enerji simülasyonları, çevresel modelleme ve yapısal analizler gibi disiplinlerde temel bir öneme sahiptir. Bu nesne sayesinde, simülasyonlar belirli bir fiziksel alan içerisinde gerçekleştirilir ve bu alanın dışındaki etkiler dikkate alınmaz.

² <https://github.com/archaeans/archaea-simulation>

Domain, simülasyonun doğruluğu ve gerçekçiliği açısından kritik bir rol oynar, çünkü simüle edilen olayların ve süreçlerin sınırları net bir şekilde tanımlanır.

Bu nesne senaryoların simülasyona hazır hale getirilmesi için gerekli olan tüm bilgileri içerisinde bulundurur.

3.3.2. Zone

Zone, Domain içerisinde tanımlanan ve belirli bir işlevi veya özelliği temsil eden alt bölümleri ifade eder. Zone, genellikle Wall objeleri kullanılarak oluşturulan kapalı hacimlerden meydana gelir ve bu hacimler, simülasyonda ayrı ayrı analiz edilebilecek bireysel alanları temsil eder. Bu nesne, özellikle bina enerji simülasyonları, iç mekân iklimlendirme analizleri ve akustik modellemede kullanılır. Her bir Zone, belirli bir ortamın veya koşulların özelliklerini ve tepkilerini yansıtır, böylece daha karmaşık ve gerçekçi simülasyonlar oluşturulabilir.

3.3.3. Wall

Wall, Zone nesnelerinin sınırlarını oluşturan ve bu sınırlar arasındaki ayrımı belirleyen Face geometrik nesnesinden türeyen bir simülasyon nesnesidir. Duvarlar, fiziksel yapıların ve simüle edilen alanların temel bileşenlerinden biridir ve bu yapıların mekânsal sınırlarını tanımlar. Wall nesneleri, ısı transferi, ses yalıtımı ve yapısal dayanıklılık gibi çeşitli fiziksel ve mühendislik özelliklerini de içerebilir.

3.3.4. WallType

WallType, Wall tipini belirleyen ve rüzgâr simülasyonu için geometrik modelin doğru bir şekilde oluşturulmasında önemlidir. WallType.INNER ve WallType.OUTER olmak üzere iki çeşit duvar tipi vardır. Eğer bir duvar iç duvar olarak nitelendirildiyse rüzgâr geometrik modeli oluşturulurken bu duvarın duvar kalınlığı kadar offseti alınarak duvarın kendisi geometriden çıkarılır.

3.3.5. Opening

Opening, Wall üzerinde pencere veya kapı boşluğu açmamızı sağlayan ve geometrik olarak ait olduğu Wall ile aynı düzlemde bulunan ve Loop geometrik nesnesinden türeyen bir simülasyon nesnesidir. Bu tanım sayesinde enerji modelinde pencere ve kapıların yerlerinin tanımlanması, rüzgâr modelinde ise yüzey üzerinde Earcut3d fonksiyonu ile delikler açılması sağlanmaktadır.

3.4. Geometrik Dönüştürücülerin Oluşturulması

Bu kısımda, farklı dosya formatları ve platformlar arasında geometrik veri transferini sağlayan dönüştürücüler incelenmektedir. 'IDF' (EnergyPlus Input Data File), enerji modelleme yazılımı için standart bir formatı temsil ederken; 'STL' (Stereolithography), üç boyutlu baskı ve modelleme için yaygın olarak kullanılır, aynı zamanda hesaplamalı akışkanlar dinamiği hesaplamalarına girdi olan geometrilerin tanımlarında da yaygın olarak kullanılır. 'VTK' (Visualization Toolkit), bilimsel veri görselleştirme için tercih edilen bir formattır. 'Speckle' ise, AEC (Mimarlık, Mühendislik ve İnşaat) endüstrisinde kullanılan açık kaynak bir veri platformudur. Bu dönüştürücüler, farklı yazılım ve platformlar arasında sorunsuz bir veri akışı sağlayarak, disiplinler arası iş birliğini ve entegrasyonu kolaylaştırır.

3.4.1. IDF

IDF, EnergyPlus için kullanılan bir dosya formatıdır. Bu format, enerji modelleme ve analiz süreçlerinde kullanılan çeşitli yapısal ve çevresel parametreleri içerir. Archaea kütüphanesi, parametrik modelleme araçlarıyla oluşturulan geometrik tanımları Ladybug Tools kütüphanesi aracılığıyla IDF formatına dönüştürmeyi sağlar. Bu işlem, enerji modelleme yazılımı ile uyumlu veri setlerinin üretimini kolaylaştırır, bu sayede kullanıcılar enerji verimliliği ve bina performansı analizleri yapabilir.

3.4.2. STL

STL formatı, özellikle üç boyutlu baskı ve modelleme alanında yaygın olarak kullanılır. Archaea kütüphanesi, parametrik modelleme araçlarıyla oluşturulan geometrik tanımları STL formatına dönüştürmeyi sağlar. Bu işlem, OpenFOAM gibi hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) yazılımları için gerekli geometrik tanımların hazırlanmasında büyük önem taşır. STL dosyaları, OpenFOAM'ın CFD analizleri için temel geometri bilgilerini sağlar.

3.4.3. Speckle

Speckle, AEC endüstrisinde kullanılan açık kaynak bir veri platformudur (Stefanescu, 2020). Archaea kütüphanesinin sağladığı VTK'den Speckle formatına dönüşüm, disiplinler arası iş birliği ve veri paylaşımını kolaylaştırır. Bu özellik, projelerde farklı ekipler arasında veri akışının ve entegrasyonunun sorunsuz bir şekilde gerçekleşmesini

sağlar. Speckle'ın görselleştirme araçları, karmaşık bilimsel verilerin kolayca anlaşılabilir ve etkileşimli bir biçimde sunulmasına imkân tanır.





4. BİNALARDA ENERJİ VE RÜZGÂR SİMÜLASYONLARININ AYNI ALGORİTMA ÜZERİNDEN PARAMETRİK ÜRETİLEBİLMESİ İÇİN MODEL GELİŞTİRİLMESİ

Gerçek hayattaki problemleri bilgisayar yardımıyla çözmenin yolu, bu problemleri gerçeğe en yakın olacak şekilde bilgisayar programlarının çözebileceği bir modele dönüştürmekle olanaklıdır. Binalarda enerji ve rüzgâr hesaplamalarını yapmak için geliştirilen yazılımlar da bina tasarımlarını analiz etmek ve mimar veya mühendislere binanın performansını belirlemede yardımcı olmak üzere tasarlanmıştır.

Bina performans simülasyon araçları, binanın bileşenlerini hesaplamanın gerektirdiği ölçülerde soyutlayarak çözümlerin anlayabileceği şemalardan oluşan hesaplama girdi dosyaları ile çözümleme yapabilmektedirler

Bu yazılımlar hesaplamaları yapabilmek için yazılımın üzerinde veri işleyebileceği formatlarda geometriler ve geometriye ait veriler ile çalışmaktadırlar. Bu nedenle geometri ve geometriye ait veri, yazılımlar için üretilecek olan simülasyon senaryolarının şemalarına uygun bir şekilde üretilmelidir.

Binalarda enerji ve rüzgâr simülasyonlarına ait geometrik nesnelerin üretilmesi için Python yazılım dili kullanılarak Archaea yazılım kütüphanesi, üretilen geometrik nesnelerin üzerine simülasyona ait verilen eklenmesi ve üretilen senaryoların simülasyonlara girdi olacak dosyaların üretilmesi için Archaea-sim yazılım kütüphanesi geliştirmiştir.

Binalarda enerji simülasyonlarında çözücü olarak EnergyPlus ve OpenStudio, binalarda rüzgâr simülasyonlarında çözücü olarak ise OpenFOAM kullanılacaktır. Bu çalışma kapsamında üretilen yazılım kütüphaneleri bu çözümlerin hesaplamayı yapabilmesi için gerekli olan girdi dosyalarının oluşturulmasını hedefler.

4.1. Kullanıcıya İlişkin Değişkenlerin Belirlenmesi

Binadaki toplam kullanıcı sayısı, binanın hangi amaçlarla günün hangi saatlerinde kullanılacağı simülasyon sonuçlarını doğrudan etkileyen ve sonuçların yorumlanmasında yönlendirici olan değişkenlerdir.

Enerji modeli için kullanıcıların mekandaki bulunuşu ve aktivite düzeyleri ısıtıcı kazanımları ve mekandaki iklimlendirme elemanlarını, ekipman ve aydınlatma kullanımlarını doğrudan etkiler.

Rüzgâr modeli için kullanıcıların hangi mekanlarda hangi rüzgâr konforları altında bulunması gerekliliği ise rüzgâr sonuçlarının hangi bölgeler için yorumlanacağı konusunda önemli bilgi verir. Örneğin, avlulu bir yapının kullanım alanlarının belirlenmesi, sonuçların o alanlar için okunmasını önemli hale getirecektir. Aynı zamanda istenen rüzgâr konfor koşullarının belirlenmesi de çıktı lejantlarının o doğrultuda hazırlanmasının önünü açacaktır.

4.2. İklima İlişkin Değişkenlerin Belirlenmesi

İklima ilişkin değerler enerji ve rüzgâr simülasyonları için başlangıç koşullarını ve sınırlarını belirlediğinden sonuçları doğrudan etkilemektedir. İklima ilişkin değişkenleri iç ve dış iklim değişkenleri olarak ikiye ayırabiliriz.

4.2.1. İç iklim ilişkili değişkenlerin belirlenmesi

İç iklim ilişkili değerler iç mekân konfor koşulunun belirleyicisidir. Kullanıcının konfor koşullarında olması, bu değişkenlerin istenen aralıkta olması ile olanaklıdır. İç iklim ilişkili değişkenler, ortalama ışınsal sıcaklık, iç hava sıcaklığı, iç hava nemi, iç hava hareketi ve operatif sıcaklık olarak ele alınabilir. Bu adımda, enerji hesaplamalarının türüne bağlı olarak; sağlanması istenen iç hava sıcaklığı konfor değerleri tanımlanıp enerji yükleri hesaplanabildiği gibi, binanın hiçbir aktif sistem kullanılmadan pasif olarak performansı da belirlenebilir.

4.2.2. Dış iklim ilişkili değişkenlerin belirlenmesi

Dış iklim ilişkili değişkenler; güneş ışıması, dış hava sıcaklığı, dış hava nemliliği ve dış hava hareketi olarak ele alınabilir. Bu değerler, meteorolojik veri dosyası olarak tasarımı yapılacak binanın konumu esas alınarak belirlenirler.

Enerji ve ısıtıcı konfor hesaplamalarında; uzun yıllara ait ortalama meteorolojik veriler kullanılabilir. Bir diğer yöntem ise, iklimi temsil eden bir meteoroloji veri kümesidir üretmektir (TWY-typical weather year). Bu veri kümeleri farklı formatlarda (Typical meteorological year (TMY), Test Reference Year (TRY), Weather Year for Energy Calculations (WYEC), International Weather Year for Energy Calculation (IWEC) ve

kullanılmaktadır.

4.3. Binaya İlişkin Değişkenlerin Belirlenmesi

Binaya ilişkin değişkenler binanın geometrisini doğrudan etkileyen ve enerji tüketimini doğrudan etkileyen değişkenlerden oluşur.

4.3.1. Bina formu ve hacim organizasyonunu etkileyecek değişkenlerin belirlenmesi

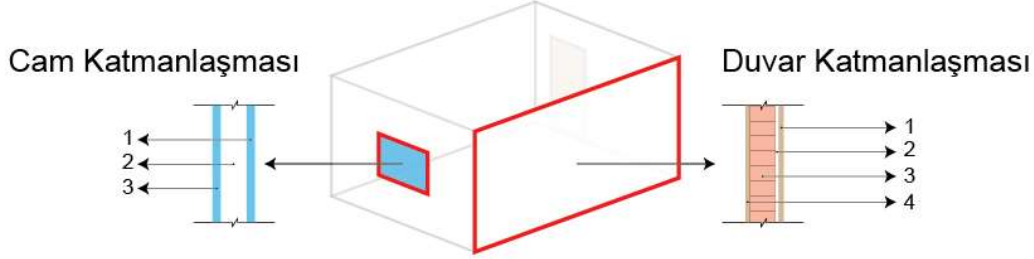
Binaya ilişkin değişkenler binanın geometrisini doğrudan etkileyen ve enerji modeline doğrudan etkileyen değişkenlerden oluşur.

Binanın yönü, kat sayısı, oda sayısı, pencere ve kapı genişlikleri (Şekil 4.1) gibi temel özelliklerini değiştirerek çeşitli tasarım senaryolarını oluşturmak mümkündür. Belirlenen değişkenler ile oluşturulacak her bir senaryo geometrik modelde tanımlanan temel geometrik nesneler ile oluşturulan simülasyon nesneleri (Wall, Zone) ile ifade edilir.



4.3.2. Bina kabuğunun optik ve termofiziksel özelliklerinin belirlenmesi

Binanın geometrik tanımını etkilemeyen değişkenler de parametrik modele dahil edileceğinden; duvar ve camların termofiziksel özellikleri (Şekil 4.2) enerji modelinin oluşturulması için önemlidir.



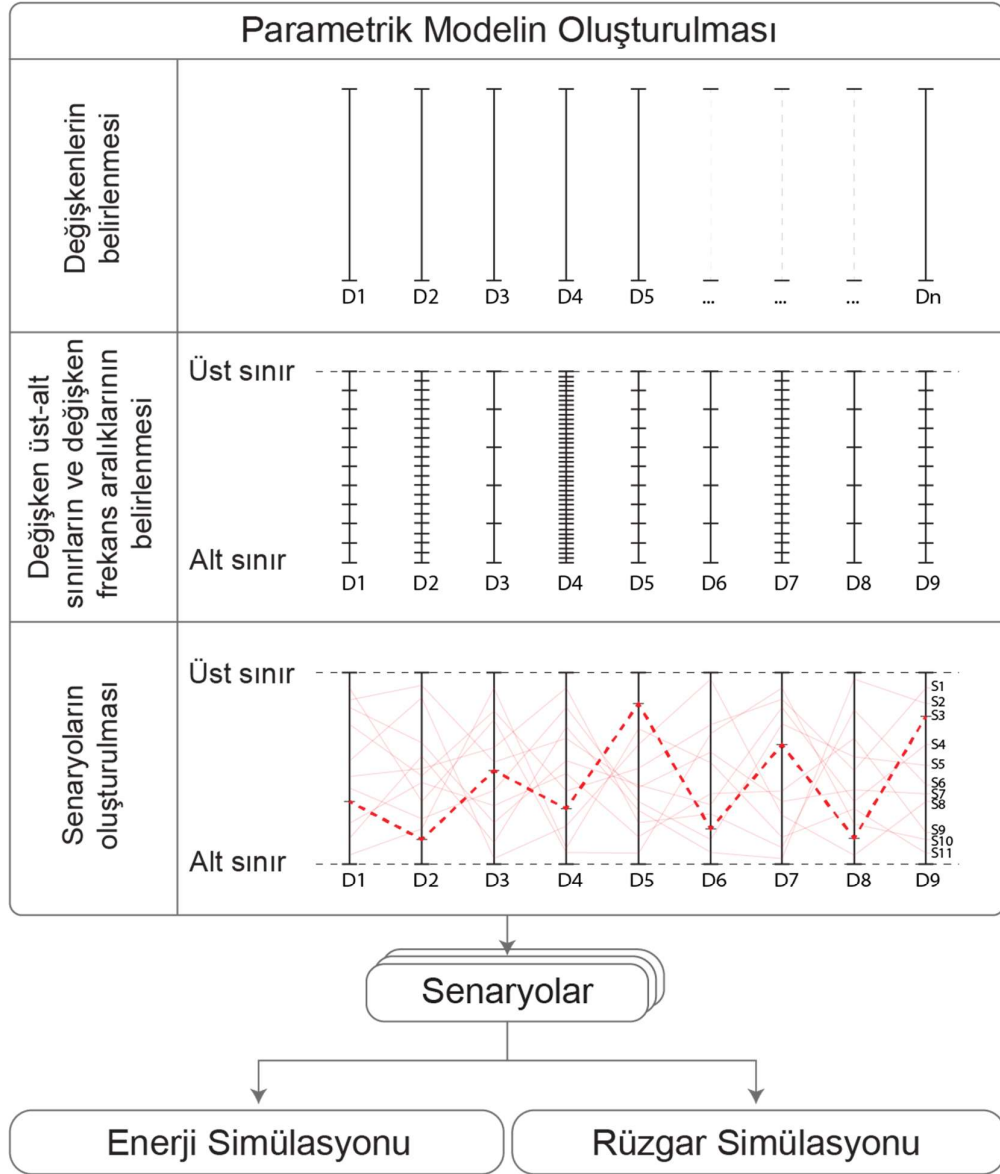
Şekil 4.2 : Geometriyi etkilemeyen enerji modeli değişkenleri.

Bu aşamada belirlenecek olan katmanlaşma modelleri enerji modeline doğrudan parametre olarak aktarılacaktır.

4.4. Parametrik Modelin Oluşturulması

Bina geometrisi **Archaea** kütüphanesinde bulunan temel geometrik nesneler (Point3d, Polyline, Loop vb.) ve fonksiyonları (Move, Offset vb.) kullanılarak oluşturulmalıdır. Geliştirilen bu parametrik model farklı senaryolar için simülasyon araçlarına doğrudan entegre edilebilecek bir yapıda olmalıdır. Bu parametrik model Archaea kütüphanesine bağlılık içeren Archaea-sim kütüphanesi ile oluşturulmaktadır. Bu kütüphanede belirlenen değişkenler doğrudan enerji ve rüzgâr simülasyonunu oluşturacak olan geometriyi üretebilmektedir.

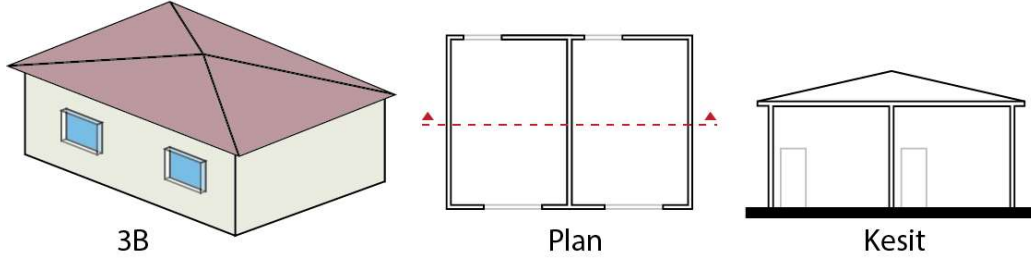
Parametrik modelin üretmesini beklediğimiz senaryoların hangi değişkenler etrafında üretileceği ve bu değişkenlerin alt ve üst sınırlarının belirlenmesi gerekmektedir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3 : Parametrik modelin oluşturulması.

Parametrik model, bina tasarımı ve analizi için bir iş akışı oluşturur. Bu iş akışı, tasarım sürecinin her aşamasında, kullanıcıların gereksinimlerini karşılayacak şekilde enerji ve rüzgâr simülasyon senaryolarının hızlı ve etkin bir şekilde modellenmesini ve analiz edilmesini sağlar.

Parametrik model yardımıyla hem enerji hem de rüzgâr modellerinin oluşturulmasının açıklandığı adımlar Şekil 4.4’de verilen örnek mimari model senaryo ile ele alınacaktır.



Şekil 4.4 : Örnek şematik mimari 3B model, plan ve kesit.

Örnek model, her odasında 1 pencere ve 1 kapı açıklığı bulunan kırma çatılı 1 katlı 2 odalı basit bir modeldir. 2 odayı ayıran 1 iç duvar ve binayı çevreleyen 4 duvardan oluşmaktadır.

4.4.1. Binalarda enerji simülasyonlarının parametrik model ile oluşturulması

Enerji simülasyonları için kullanılan yazılımlar, bina enerji modellemesi, HVAC sistemlerinin tasarımı ve çevresel etki analizleri gibi konularda çeşitli özellikler ve yetenekler sunmaktadır. Bu yazılımlar arasında EnergyPlus, OpenStudio, TRNSYS, eQUEST, IESVE, DesignBuilder, LadybugTools, SimScale ve BIM tabanlı çözümler gibi alternatifler bulunmaktadır. Her biri, kullanıcı dostu arayüzler, geniş uygulama yelpazeleri ve özelleştirilebilir modelleme seçenekleri sunarak farklı ihtiyaçlara cevap verir. Ancak, EnergyPlus'ın tercih edilmesinin temel sebepleri arasında açık kaynaklı yapısının önemli bir yeri vardır. Açık kaynak olması, kullanıcılara yazılımın temel kodlarını değiştirme ve özelleştirme imkânı tanır, bu da araştırmacılar ve mühendisler için bir esneklik sağlar. Ayrıca, sürekli gelişen bir kullanıcı ve geliştirici topluluğu tarafından desteklenen, yeni özelliklerin ve iyileştirmelerin kolayca entegre edilmesi nedeniyle bu çalışmada geliştirilen parametrik model EnergyPlus'a uyumlu olacak şekilde ele alınmıştır.

Enerji simülasyonları için gerekli girdi dosyaları, Archaea, Archaea-sim ve LadybugTools kütüphaneleri kullanılarak hazırlanır. Archaea temel geometrik nesnelerin üretilmesini, Archaea-sim simülasyon nesnelerinin geometrik nesneler üzerinden üretilmesini ve LadybugTools kütüphanesi ile uyumlu hale getirilmesi, LadybugTools kütüphanesi ise EnergyPlus için gerekli olan .idf dosyalarının oluşturulmasında kullanılır.

4.4.1.1. İklim dosyalarının belirlenmesi

EnergyPlus'ın çözümlemeye başlayabilmesi için gerekli olan ilk koşulları sağlayan dosyalar iklim dosyalarıdır. Buradaki sıcaklık, nem, rüzgar vb. verilere göre simülasyon başlatılır. Bu dosyalardan bazıları .epw ve .ddy dosyalarıdır.

.epw (EnergyPlus Weather File)

İklimsel gereksinimler başlığı altında bahsi geçtiği gibi belirli iklim koşulları altında bir binanın enerji performansını doğru bir şekilde hesaplamak için gerekli olan konuma özgü meteorolojik verileri içerir. Bu dosya, coğrafi koordinatları, saat dilimi bilgilerini ve TMY (Typical Meteorologic Year) veri kümesini temel alan uzun yıllık verileri içerir. TMY verileri kuru termometre ve çiğ noktası sıcaklığı, nem, rüzgâr hızı ve yönü, güneş ışıınımı ve atmosfer basıncı gibi parametreleri kapsar. Bu veri ısı transfer denklemlerinin çözümlemeye başlaması için ilk değerleri oluşturduğundan bütün çözüme doğrudan etkilemektedir.

.ddy (Design Day Weather File)

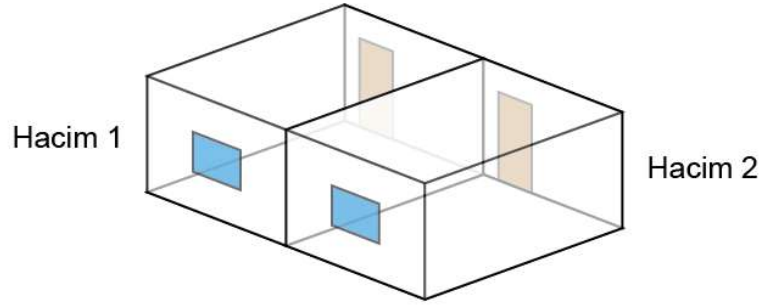
Tasarım gününe ait iklim verilerini içerir. Tasarım günleri aşırı veya tipik hava koşullarını temsil eder ve bir binanın bu koşullar altındaki performansını değerlendirmek için kullanılır. Bu veriler, simülasyonun bina davranışını dış çevre koşullarıyla ilişkilendirmesine yardımcı olur. Bu dosya, bu tasarım günlerine ait kuru termometre sıcaklığı, ıslak termometre sıcaklığı, rüzgâr hızı, güneş radyasyonu ve diğer parametreler gibi verileri belirtir ve bu dosyasındaki bilgiler, EnergyPlus'ın uygun hava durumu dosyaları oluşturmaya veya bu özel koşullar altında bir binanın enerji performansını çözümlemek için mevcut hava durumu verilerini kullanmasına yardımcı olur. Tasarım günü verileri (ddy dosyası), bina enerji simülasyonlarında enerji yükü hesaplamaları ve HVAC sistem boyutlandırması için çok önemli olup binanın performansının hem standart hem de aşırı koşullar altında modellenebilmesini sağlar.

Bu iklim verileri aşağıda belirtildiği gibi farklı kaynaklardan elde edilebilir.

- EnergyPlus (<https://energyplus.net/weather>)
- Climate.OneBuilding.Org (<https://climate.onebuilding.org/>)
- ECMWF (<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets>): Anlık iklim verileri kullanılarak herhangi bir konum için hava tahmin verilerinin tutulduğu ve paylaşıldığı platform. Bu platform verileri kullanılarak herhangi bir konum için .epw dosyası üretmek mümkündür.

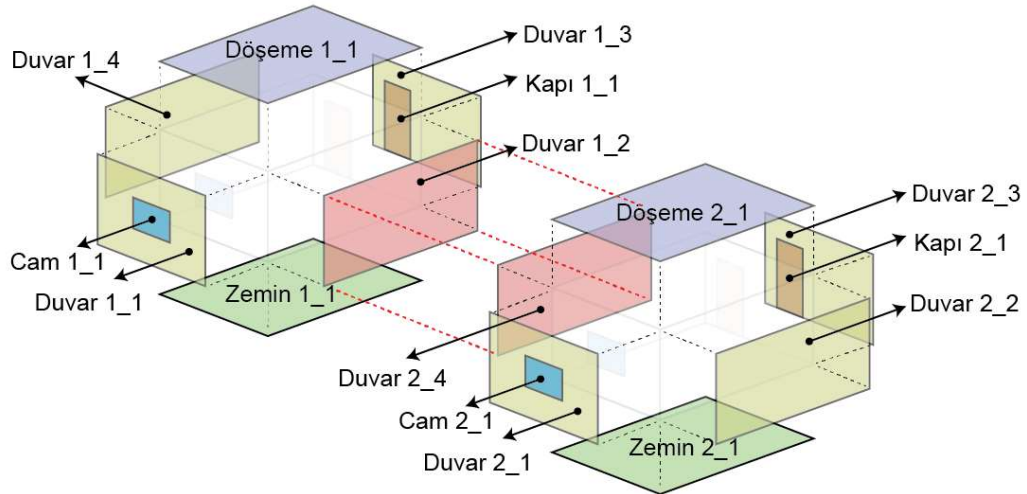
4.4.1.2. Geometrik modelin oluşturulması

Binaya ilişkin belirlenen değişkenlerden yola çıkarak enerji modeli için geometrik model oluşturulmaya başlanır. Şekil 4.4'deki örnek mimari model kullanılarak geometrik modelin oluşturulması adımı ele alınacaktır.



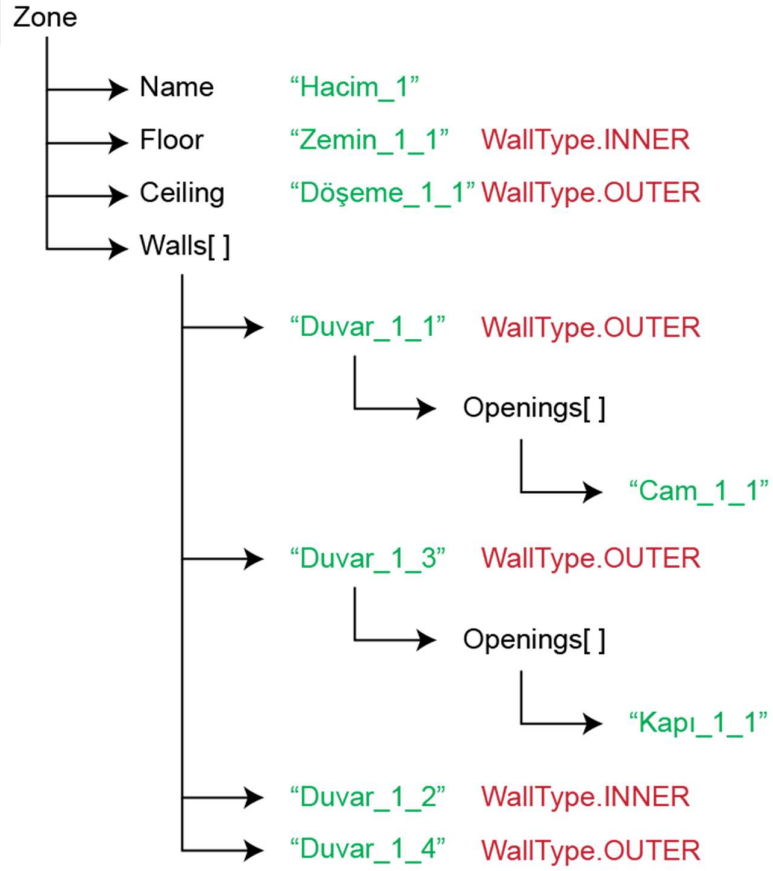
Şekil 4.5 : Hacim 1 ve Hacim 2'nin enerji modeli için yüzey geometri modeli.

Enerji modeli için üretilecek olan geometrik model zonlardan oluşmaktadır. Bu zonlar yüzeylerin kapalı hacmi oluşturması ile meydana gelir. Her bir zonun oluşturan yüzeylerin tipolojisi belirlenerek EnergyPlus'a aktarılması gerekir. Bu zonların oluşturulması için Zone nesnesi içerisindeki Floor, Ceiling ve Walls değişkenlerinin işlenmesi gerekmektedir. Bu değişkenlerin her biri aslında Wall tipine aittir. Floor ve Ceiling yatay Wall tanımlarken, Walls içerisindeki her bir Wall dikeydir. Dikey Wall nesneleri aynı zamanda Openings dizisi içermektedir. Eğer bir Wall bir pencere veya kapı boşluğu içeriyorsa Openings dizisi içerisine eklenmesi gerekmektedir.



Şekil 4.6 : Hacim 1 ve Hacim 2’nin (Şekil 4.5) patlatılmış geometrik model.

Yukarıdaki patlatılmış geometrik modeldeki hacim 1’in nesne yapısı Şekil 4.7’deki gibidir.



Şekil 4.7 : Hacim 1 için Zone nesne yapısı

Her bir hacim için Zone nesnesinden oluşturulan bu yapılar ile geometrik model çıktısını .idf dosyası içerisine yazmak mümkün olmaktadır.

4.4.1.3. Girdi dosyasının oluşturulması

Enerji modeline ait bina ve yapı grubu geometrisi, malzeme özellikleri, ısıtma ve soğutma sistemleri, kullanıcı ve ekipman programları ve diğer girdileri içinde barındıran EnergyPlus çözüm senaryosunu tanımlayan dosyadır.

Bu dosyalar, bina ve onun bileşenlerinin özelliklerini tanımlayan bir dizi nesne ve ilgili özellikler içerir. Her nesne, belirli bir bina bileşeni veya sistemini temsil eder ve bu nesneler, EnergyPlus'ın çözücüsü tarafından işlenerek bina enerji performansının kapsamlı bir analizini sağlar. Bu dosyalarda; yapı elemanlarının ve yapı bileşenlerinin konumları, boyutları, yapma sistemlere ilişkin seçimler ve zaman çizelgeleri ve kullanıcıların davranışları gibi çeşitli parametreler tanımlanabilir.

.idf dosyaları, metin tabanlıdır ve EnergyPlus'ın özel bir editörü aracılığıyla oluşturulabilir. Aynı zamanda EnergyPlus'ı çözücü olarak kullanan ve üzerine kullanıcı arayüzü geliştirilerek oluşturulmuş açık kaynaklı ve ticari yazılımlar da bu dosyanın oluşturulmasını sağlar. Temelde Grasshopper aracılığı ile görsel düzenleme imkânı sunan LadybugTools veya kendi geometrik düzenleme imkânı olan DesignBuilder gibi araçlar, geometriden olan değişimleri ve her bir geometriye ait üst veriyi anlamlandırarak .idf dosyası üzerine aktarır.

Her bir hacim aşağıdaki betikteki gibi .idf dosyasının içinde tanımlanır.

```
Zone,
  Hacim 1,           !- name
  ,                 !- north
  ,                 !- x
  ,                 !- y
  ,                 !- z
  ,                 !- type
  1,                 !- multiplier
  3.0,               !- ceiling height
  360.0,             !- volume
  120.0;             !- floor area
```

Şekil 4.8 : Zone nesnesinin IDF dosyası içindeki tanımı.

.idf dosyası içinde hacimleri oluşturan her bir yüzeyin için koordinat düzleminde yerini tanımlayan veriler ver bu yüzeyin niteliğini, optik ve termofiziksel özelliklerinin tanımlandığı katmanlaşma detaylarının bulunduğu bir tanım yapılır.

Her bir yüzey Duvar 1_4, Döşeme 2_1 gibi eşsiz bir kimlik ile tanımlanır. Bu kimlik .idf dosyası içerisinde çözücülerin her birbirini birbirinden ayırmasına yardımcı olur.

```
BuildingSurface:Detailed,
Zemin 1_1,                !- name
Floor,                    !- surface type
Ground Floor,             !- construction name
Hacim 1,                  !- zone name
Ground,                   !- boundary condition
,                          !- boundary condition object
NoSun,                    !- sun exposure
NoWind,                   !- wind exposure
autocalculate,           !- view factor to ground
4,                         !- number of vertices
-48.000, 3.000, 0.000,
-60.000, 3.000, 0.000,
-60.000, 13.000, 0.000,
-48.000, 13.000, 0.000;
```

Şekil 4.9 : Opak yüzeylerin IDF dosyası içindeki tanımı.

```
FenestrationSurface:Detailed,
Cam 1_1,                  !- name
Window,                   !- surface type
Exterior Glazing,         !- construction name
Duvar 1_1,                !- building surface name
,                          !- boundary condition object
Autocalculate,            !- view factor to ground
,                          !- frame and divider name
1,                         !- multiplier
4,                         !- number of vertices
-57.286, 3.000, 2.322,
-57.286, 3.000, 0.678,
-50.714, 3.000, 0.678,
-50.714, 3.000, 2.322;
```

Şekil 4.10 : Saydam yüzeylerin IDF dosyası içindeki tanımı.

Parametrik modelin oluşturulması aşamasında belirlenen değişkenlerin her birinin değiştirilmesi .idf dosyasın içerisinde görünen koordinat verilerine veya nesnenin niteliğine doğrudan etki eder. Amaç her senaryo için bu .idf dosyasının çok hızlı bir şekilde üretilmesi ve çalıştırılmasıdır.

4.4.2. Binalarda rüzgâr simülasyonlarının parametrik model ile oluşturulması

Rüzgâr simülasyonları için gerekli girdi dosyaları, archaea ve archaea-sim kütüphaneleri kullanılarak hazırlanır. archaea temel geometrik nesnelerin üretilmesini, archaea-sim simülasyon nesnelerinin geometrik nesneler üzerinden üretilmesini ve OpenFOAM için gerekli olan system, constant ve 0 dosyasının oluşturulmasında kullanılır.

4.4.2.1. Çözücünün seçilmesi

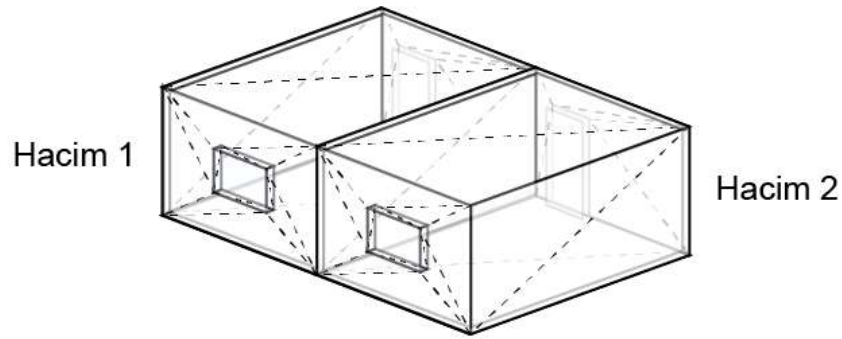
OpenFOAM, akışkanlar dinamiği problemlerinin sayısal çözümlemesi için geniş bir çözücü yelpazesi sunar. Bu çözücüler, laminar veya türbülanslı akış rejimleri, ısı transferi, kimyasal reaksiyonlar ve çok fazlı akışlar gibi çeşitli fiziksel süreçleri modellemek için tasarlanmıştır (Medina ve diğerleri, 2015). Çözücü seçimi, incelenen akış fenomeninin doğası, hesaplama kaynaklarının kısıtları ve analiz edilen problemin hassasiyet gereksinimleri göz önünde bulundurularak yapılmalıdır. Örneğin, sabit hal, incompressible, türbülanslı akışlar için 'SimpleFoam' çözücüsü sıklıkla tercih edilir. simpleFoam, SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) algoritmasını kullanarak, akış alanındaki hız ve basınç alanlarını iteratif bir şekilde çözer. Bu çözücü, özellikle aerodinamik ve hidrodinamik uygulamalar için uygun olup, karmaşık geometrilerde ve türbülanslı akış koşullarında bile yüksek doğruluk ve hesaplama verimliliği sağlar. Parametrik modelin farklı çözücülere uyarlanması archaea-sim kütüphanesi içerisinde bulunan cfd klasörün altındaki taslak dosyalarının ilgili çözücüye uyarlanması ile mümkün olacaktır.

4.4.2.2. İklim verilerinin belirlenmesi

Enerji denklem takımlarının dahil edilmediği senaryolarda sadece rüzgâr hızı ve yönü simülasyon için yeterli bir değişkendir. Bu değişkenler OpenFOAM 0 klasörü altındaki hız başlangıç değerlerinin yazıldığı U dosyasına girdi olarak aktarılır. archaea-sim kütüphanesi aldığı hız ve yön değişkenlerini her bir senaryo için bu dosyaya yazmaktadır.

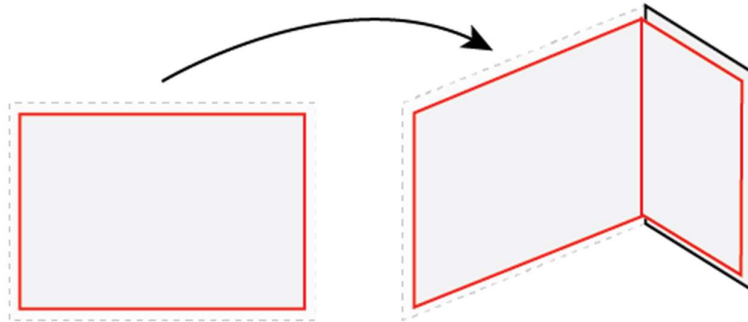
4.4.2.3. Geometrik modelin oluşturulması

Binaya ilişkin belirlenen değişkenlerden yola çıkarak rüzgâr modeli için geometrik model oluşturulmaya başlanır. Şekil 4.4'deki örnek mimari model kullanılarak geometrik modelin archaea-sim oluşturulması adımı ele alınacaktır. Şekil 4.8'de görüleceği üzere enerji modelinden farklı bir geometrik model karşımıza çıkmaktadır. Bunun temel sebebi akış hacmini oluşturabilecek geometri oluşturma gereksinimidir. Enerji modelindeki geometriden temel farkı duvar kalınlıklarının olması ve pencere ve kapılarda gerçek deliklerin olmasıdır. Bu sayede rüzgârın içeriye girmesi mümkün olmaktadır.



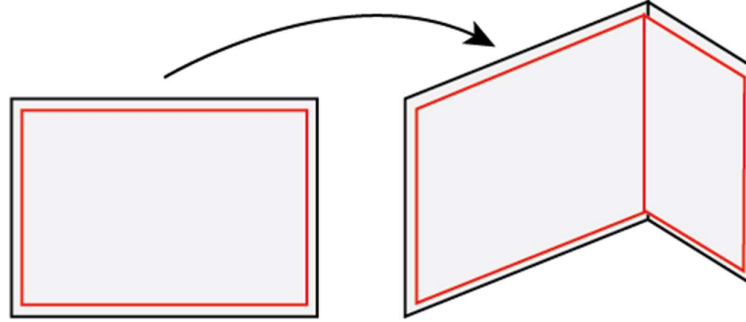
Şekil 4.11 : Hacim 1 ve Hacim 2'nin rüzgâr geometri modeli

Zone nesnesinin altındaki her bir Wall nesnesinin WallType'ı bu geometrinin oluşturulmasında oldukça önemlidir. WallType'ın INNER olması o Wall nesnesinin duvar kalınlığının yarısının içeriye offsetlenmiş halinin yüzey normal boyunca yine duvar kalınlığının yarısı kadar Move edildiği hali ile dışa aktarılır (Şekil 4.12).



Şekil 4.12 : WallType.INNER tipindeki Wall nesnesinin dışa aktarılış biçimi

WallType'ın OUTER olması o Wall nesnesinin duvar kalınlığının yarısının içeriye offsetlenmiş halinin yüzey normal boyunca yine duvar kalınlığının yarısı kadar Move edildiği hali ve Wall nesnesinin kendisi ile iki yüzey olarak dışa aktarılır (Şekil 4.13).



Şekil 4.13 : WallType.Outer tipindeki Wall nesnesinin dışa aktarılış biçimi

Tüm değişkenleri doğru bir şekilde tanımlanmış Zone nesnesinin dışa aktarımı Şekil 4.8'de görüldüğü gibi .stl formatında olur. Bu .stl dosyası "**Solid** <geometri_adı>.stl" adlı bir 3B katı modeli içerir ve içerisinde bir çok yüzey bulunabilir.

.stl dosyasının yapısı iç içe tanımlardan oluşur. Bu tanımlara basit bir örnek üzerinden ele alacak olursak, bu örnek iki adet üçgen yüzeyden oluşur. Her **facet** ifadesi, bir üçgeni temsil eder ve bu üçgenlerin her biri, üç adet **vertex** (köşe) ile tanımlanır. İlk **facet** ifadesindeki normal 0.0 1.0 0.0, üçgenin yüzey normalini (yani yüzeyin hangi yöne baktığını) gösterir. Burada, normal vektörü y eksenine paralel olarak tanımlanmıştır. Ardından **outer loop** ve **endloop** ifadeleri arasında, üçgenin üç köşesi belirtilmiştir. İlk üçgenin köşeleri (10.0, 0.0, 0.0), (0.0, 0.0, 0.0) ve (0.0, 0.0, 10.0) koordinatlarında yer alır. İkinci **facet** de benzer şekilde bir üçgen tanımlar ve bu üçgenin köşeleri (0.0, 0.0, 10.0), (10.0, 0.0, 10.0) ve (10.0, 0.0, 0.0) koordinatlarında bulunur. Bu iki üçgen, genellikle bir düzlem parçasını veya yüzeyi oluşturacak şekilde bir araya getirilmiştir. Dosyanın sonunda "**endsolid** yuzey.stl" ifadesi, bu yüzey tanımının sonlandığını belirtir. Kısacası, bu .stl dosyası iki üçgen kullanarak bir düzlem parçasını tanımlar ve her üçgenin yüzey normali ve köşe koordinatları ile bu geometrik şekil oluşturulur. Tariflenen yüzeyin .stl dosyası aşağıdaki betik gibi veri içermektedir (Şekil 4.14).

```

Solid yuzey.stl
facet normal 0.0 1.0 0.0
  outer loop
    vertex 10.0 0.0 0.0
    vertex 0.0 0.0 0.0
    vertex 0.0 0.0 10.0
  endloop
endfacet
facet normal 0.0 1.0 0.0
  outer loop
    vertex 0.0 0.0 10.0
    vertex 10.0 0.0 10.0
    vertex 10.0 0.0 0.0
  endloop
endfacet
endsolid yuzey.stl

```

Şekil 4.14 : .stl ASCII dosya formatı

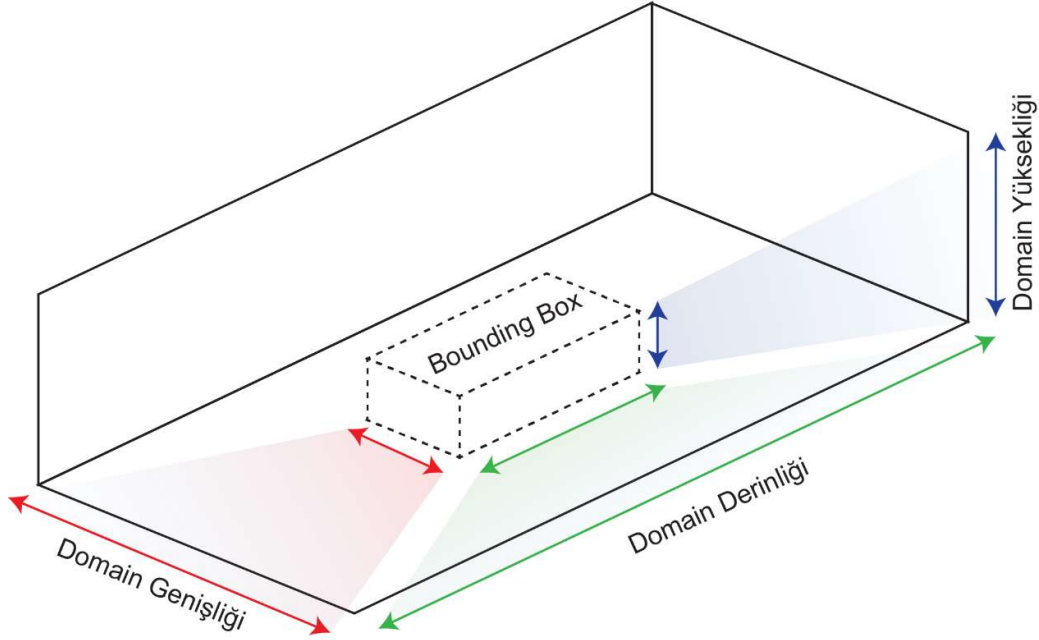
Dışarıya aktarılan bu tip üçgenlenmiş dosyalar senaryo dosyasının içindeki ‘constant/triSurface’ dizininde saklanır. Parametrik modelin oluşturulması aşamasında belirlenen değişkenlerin her birinin değiştirilmesi .stl dosyasın içerisinde görünen koordinat verilerine doğrudan etki eder. Amaç her senaryo için bu .stl dosyasının çok hızlı bir şekilde üretilmesi ve çalıştırılmasıdır.

4.4.2.4. Akış hacminin oluşturulması

Akış hacmi domain nesnesinde tanımlanan ölçeklendirme ebatlarına ve belirlenen rüzgâr yönüne göre üretilir.

Bir önceki adımda hesaplama için üretilen geometrik model için BoundingBox hesaplaması yapılarak rüzgâr yönüne paralel olarak uzayda kapladığı hacim bulunur. Akış hacmi domain ölçeklendirme ebatları ile temel geometrik fonksiyonlarda anlatılan Scale fonksiyonu ile üretilir.

Domain nesnesi içerisinde tanımlanan genişlik, derinlik ve yükseklik katsayıları ile hesaplama alanını saran BoundingBox’ın genişlik, derinlik ve yükseklik değerleri sırasıyla çarpılarak akış alanının hacmi elde edilir (Şekil 4.15).



Şekil 4.15 : Akış hacminin ölçeklendirilmesi

Oluşturulan akış hacminin geometrik sınırları 'system' adlı dizinin altındaki 'blockMeshDict' isimli dosyada tanımlanır. Bu dosyada akış hacminin x, y ve z doğrultusunda kaç parçaya bölüneceği ilk değer olarak belirlenebilmektedir. Burada belirlenen hücre sayısının fazlalığı ağ (mesh) sayısının artmasına ve simülasyon sürelerinin uzamasına neden olursak sonuçların doğruluğuna katkı sağlayabilmektedir. İlk hücre sayılarının yüksek belirlenmesi aynı zamanda gereksiz iyileştirmeye neden olabilmektedir. Bu sebeple bu değerın ağ bağımsızlaştırma (mesh independency) analizleri ile belirlenmesi gerekmektedir.

4.4.2.5. Ağ yapısının örülmesi

Oluşturulan akış hacminin küçük ağ (mesh) yapılarına bölünerek örülmesiyle her bir birim için Navier-Stokes ve süreklilik denklemlerinin çözülerek hesaplamanın yapılacağı yapıyı oluşturmak gerekmektedir. Bu nümerik hesaplamanın her bir ağ yapısı üzerinde ayrı ayrı iteratif bir şekilde yapılması nedeniyle, ağ yapısının geometrik seçimi, ebatları sonuçların doğruluğunu önemli derecede etkilemektedir.

Ağ yapısının örülmesi adımı snappyHexMesh aracı kullanılarak yapılmaktadır. snappyHexMesh, karmaşık geometrilere sahip modeller için uygun bir araçtır ve yüzey detaylarını yakalamak için ara yüzey hassasiyeti sunar. Bu aracı etkin bir şekilde kullanabilmek için, 'system' klasöründe yer alan 'snappyHexMeshDict' dosyasında

ilgili parametrelerin ayarlanması gerekir. Bu dosya, ağ yoğunluğu, ağ boyutu, yüzey iyileştirme (refinement) seviyeleri ve ağ örme (meshing) için gerekli diğer önemli parametreler gibi ağ yapısının temel özelliklerini tanımlar. Ayrıca, 'blockMeshDict' dosyası, meshin temel yapısını ve sınırlarını tanımlamak için kullanılır. Bu, snappyHexMesh tarafından detaylandırılacak başlangıç meshinin oluşturulmasını sağlar. 'system' klasöründeki 'meshQualityDict' dosyası ise ağ yapısının kalite kontrol parametrelerini, örneğin minimum yüzey açıları ve hücre boyutları gibi, belirler. Bu parametreler, meshin sayısal çözümlemeler için yeterli hassasiyete sahip olmasını sağlamak amacıyla kritik öneme sahiptir. Ağ yapısının oluştururken dikkate alınan bir diğer husus ise 'constant/triSurface' dizininde bulunan .stl uzantılı geometri dosyalarını içerir.

4.4.2.6. Reynold sayısının hesaplanması

Reynold sayısı akışkanın atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranını temsil eder ve akışkanın akış rejimi hakkında önemli bilgiler sağlar. Hesaplanan Reynolds sayısı, CFD analizlerinin doğruluğu ve güvenilirliği için kritik bir parametredir, zira bu değer akışın laminar veya türbülanslı olup olmadığını belirler. Bu sayı 2.7 formülüne göre hesaplanabilir.

4.4.2.7. Senaryo dosyalarının oluşturulması

OpenFOAM kullanıcılara karmaşık simülasyon senaryolarını modellemek ve çözmek için esneklik sağlayan kapsamlı bir yapılandırma ve kontrol sistemi sunar. Bu sistem, bir dizi yapılandırma dosyası ve dizin aracılığıyla gerçekleştirilir. Bu dosyalar (Şekil 4.16), simülasyonun her bir yönünü -başlangıç koşulları, mesh özellikleri, fiziksel modelleme parametreleri ve çözüm algoritmaları- tanımlar.

Senaryo dosyası

```
| - 0
|   | - epsilon
|   | - k
|   | - nut
|   | - p
|   | - U
| - constant
|   | - momentumTransport
|   | - transportProperties
|   | - triSurface
| - system
|   | - blockMeshDict
|   | - controlDict
|   | - cutPlaneSurface
|   | - decomposeParDict
|   | - fvSchemes
|   | - fvSolution
|   | - meshQualityDict
|   | - sampleDict
|   | - snappyHexMeshDict
|   | - surfaceFeaturesDict
| - Allrun
| - Allclean
```

Şekil 4.16 : OpenFOAM senaryo dosyalarının yapısı

Kullanıcı, simülasyonun başlangıç ve sınır koşullarını '0' dizininde, malzeme özellikleri ve sabit fiziksel parametreleri 'constant' dizininde ve simülasyonun kontrol parametreleri, mesh oluşturma ayarları ve çözüm algoritmalarını 'system' dizininde belirtir. 'Allrun' ve 'Allclean' betikleri ise, simülasyon sürecinin otomasyonunu ve temizliğini kolaylaştırır.

‘0’ Klasörünün Oluşturulması

Simülasyonun başlangıç koşullarının tanımlandığı dosyaları içeren klasördür.

- **epsilon:** Türbülans enerji dağılım hızının başlangıç ve sınır koşullarını tanımlar.
- **k:** Türbülans kinetik enerjisinin başlangıç ve sınır koşullarını tanımlar.

- **nut**: Türbülanslı kinematik viskozitenin başlangıç ve sınır koşullarını tanımlar.
- **p**: Akışkanın basıncının başlangıç ve sınır koşullarını tanımlar.
- **U**: Akışkanın hız alanının başlangıç ve sınır koşullarını tanımlar.

‘constant’ Klasörünün Oluşturulması

Bu klasör, simülasyonun fiziksel ve matematiksel sabitlerini içerir:

- **momentumTransport**: Momentum taşınımıyla ilgili modelleri ve katsayıları içerir.
- **transportProperties**: Akışkanın taşıma özelliklerini (örneğin, viskozite) tanımlar.
- **triSurface**: Üçgen yüzey geometrisi dosyalarını içerir.

‘system’ Klasörünün Oluşturulması

Simülasyonun yapılandırma ve kontrol dosyalarını içerir:

- **blockMeshDict**: Blok tabanlı mesh oluşturulması için gerekli parametreleri içerir.
- **controlDict**: Simülasyonun genel kontrol parametrelerini (örneğin, zaman adımları, çözücü ayarları) tanımlar.
- **cutPlaneSurface**: Kesit düzlemlerinin tanımlarını içerir.
- **decomposeParDict**: Paralel hesaplama için domainin nasıl bölüneceğini tanımlar.
- **fvSchemes**: Sonlu hacim yöntemleri için diskretizasyon şemalarını tanımlar.
- **fvSolution**: Çözüm algoritması ve lineer çözücüler için ayarları içerir.
- **meshQualityDict**: Mesh kalitesi kontrol parametrelerini tanımlar.
- **sampleDict**: Sonuçların örneklenmesi ve post-process için ayarları içerir.
- **snappyHexMeshDict**: snappyHexMesh aracı ile mesh oluşturmak için gerekli ayarları içerir.
- **surfaceFeaturesDict**: Yüzey özelliklerini tanımlar.

4.4.2.8. Ağ yapısından bağımsızlaştırma analizinin yapılması

Akışkanlar dinamiği analizlerinde, fiziksel problemlerin nümerik çözümleri için ayrıklaştırma sürecinde bir hesaplama ağ yapısı (mesh) kullanılır. Ağ yapısı, sürekli fiziksel alanın sonlu sayıda kontrol hacimlerine veya elemanlarına bölünmesiyle

oluşturulur. Ağ yapısı yoğunluğu ve kalitesi, simülasyon sonuçlarının doğruluğunu doğrudan etkiler. Eğer ağ yapısı çok kaba ise, önemli fiziksel detaylar göz ardı edilebilir; çok küçük ise, hesaplama maliyeti gereksiz yere artabilir (Almohammadi ve diğerleri, 2013). Bu nedenle, simülasyonun hem doğru hem de verimli olması için optimum ağ yapısı yoğunluğunun belirlenmesi gerekmektedir. Ağ yapısı bağımsızlık analizi, bu optimal yoğunluğun belirlenmesinde kritik bir rol oynar. Analiz, farklı ağ yapısı yoğunluklarında simülasyonların tekrarlanarak, sonuçların ağ yapısı yoğunluğuna duyarlılığının değerlendirilmesini içerir. Sonuçlar arasındaki fark önemsiz hale geldiğinde, ağ yapısının yeterince küçük olduğu ve sonuçların ağ yapısı yoğunluğundan bağımsız olduğu sonucuna varılır.

- **Başlangıç Ağ Yapısının Oluşturulması:** İlk olarak, problem için uygun bir başlangıç ağ yapısı oluşturulur. Bu ağ yapısı, problemin genel özelliklerini yakalayacak kadar detaylı olmalıdır.
- **Simülasyonun Yapılması ve Sonuçların Değerlendirilmesi:** Başlangıç ağ yapısı kullanarak simülasyon yapılır ve sonuçlar değerlendirilir. Bu aşamada, ilgi alanındaki fiziksel büyüklükler (örneğin, basınç, hız) dikkate alınır.
- **Mesh Yoğunluğunun Artırılması:** Ağ yapısı yoğunluğu artırılarak yeni bir mesh oluşturulur. Bu işlem, genellikle ağ yapısı hücrelerinin boyutunun azaltılması veya belirli bölgelerde ağ yapısı yoğunluğunun minimum %40 artırılması yoluyla yapılır.
- **Adım 2'nin Tekrarlanması:** Yeni ağ yapısı ile simülasyon tekrar yapılır ve sonuçlar, önceki ağ yapısı sonuçlarıyla karşılaştırılır.
- **Karşılaştırma ve Değerlendirme:** Farklı ağ yapısı yoğunluklarındaki sonuçlar karşılaştırılır. Eğer sonuçlar arasındaki fark belirli bir toleransın altındaysa, sonuçların ağ yapısı yoğunluğundan bağımsız olduğu kabul edilir ve analiz tamamlanmış olur.

4.4.2.9. Artık değer analizinin yapılması

CFD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) simülasyonlarında artık değer (residual) analizi, simülasyonun doğruluğunu ve güvenilirliğini değerlendirmek için kritik bir adımdır. Artık değerler, hesaplamalı çözümün kesinlik derecesini belirleyen, gerçek fiziksel sistemle matematiksel model arasındaki farkları temsil eder. Bu analiz, simülasyon sonuçlarının hem niceliksel hem de niteliksel olarak değerlendirilmesinde önemli bir rol oynar.

Artık değer analizinin temel amacı, simülasyonun yakınsama durumunu belirlemektir. Yakınsama, iteratif bir hesaplama sürecinin, belirlenen bir hata toleransı içinde sabit bir çözüme ulaşması durumudur. Artık değerler azaldıkça, simülasyonun gerçek sistemle olan uyumu artar ve sonuçların doğruluğu yükselir. Bu nedenle, artık değerlerin zaman içindeki değişimi, simülasyonun stabilitesi ve güvenilirliği hakkında önemli bilgiler sağlar.

4.4.2.10. Simülasyon değişkenlerinin güncellenmesi

Parametrik simülasyonları çalıştırmadan önce yapılan ön analizler sonrası (mesh independency, residuals) değiştirilmesi gereken ilk değerler var ise simülasyon değişkenleri buna göre güncellenir.

4.5. Simülasyonların Eş Zamanlı Çalıştırılması

archaea-sim kütüphanesinde bulunan run.py dosyası bir CLI (Command-Line Interface) programdır. Simülasyona ait parametreler bu program aracılığı ile senaryolara aktarılabilmektedir. Programın değişkenleri aşağıdaki dizindeki gibidir.

Girilen parametreler ile run.py dosyası temelde iki farklı betiği çalıştırır. Bunlardan birincisi EnergyPlus'ı çalıştırır, örnek komut aşağıdaki gibidir. Enerji simülasyonu için oluşturulan .idf dosyası ve .epw iklim dosyası komuta parametre olarak alınır (Şekil 4.17).

```
>> EnergyPlus -w iklim dosyasi.epw qirdi dosyasi.idf
```

Şekil 4.17 : EnergyPlus'ın çalıştırılması için kullanılan betik

İkinci betik ise rüzgâr simülasyonu için oluşturulan senaryo dosyasının çalıştırılması için 'Allrun' betiğinin çalıştırılmasıdır. Bu betik OpenFOAM araçlarını belli bir sıraya göre çalıştırır (Şekil 4.18).

```
#!/bin/bash
# ./Allrun betiği
runApplication surfaceFeatures
runApplication blockMesh
runApplication decomposePar -copyZero
runParallel snappyHexMesh -overwrite
runParallel patchSummary
runParallel $(getApplication)
runApplication reconstructParMesh -constant
runApplication reconstructPar -latestTime
foamRun -postProcess writeCellCentres
foamRun -postProcess probes
foamRun -postProcess cutPlaneSurfaces
```

Şekil 4.18 : OpenFOAM'un çalıştırılması için kullanılan ./Allrun betiği

- **surfaceFeatures:** Bu komut, geometri üzerinde önemli yüzey özelliklerini (kenarlar gibi) tanımlar. snappyHexMesh mesh oluşturucusu için önemli bir adımdır çünkü bu yüzey özellikleri, ağın daha doğru olmasını sağlar. constant/triSurface dizinindeki bulunan geometri dosyalarına dayalı olarak constant/polyMesh içinde yüzey özellikleri dosyalarını oluşturur.
- **blockMesh:** Bu komut, kullanıcının blockMeshDict dosyasında tanımladığı temel ağ yapısını oluşturur. Bu, çoğunlukla basit geometriler için kullanılır ve hesaplama alanının temel hücresel yapısını oluşturur.: constant/polyMesh dizinine ağ dosyalarını üretir.
- **decomposePar -copyZero:** Paralel hesaplama için hesaplama alanını alt bölümlere ayırır. -copyZero seçeneği, sıfır zaman adımıdaki alan dosyalarını tüm alt bölümlere kopyalar. processor* adında klasörler oluşturur ve bu klasörler altında ağ ve alan dosyalarının bölünmüş versiyonlarını saklar.
- **snappyHexMesh -overwrite:** Bu komut, daha karmaşık geometriler için kullanılan gelişmiş bir ağ oluşturucusudur. blockMesh tarafından oluşturulan temel ağı alır ve geometriye daha yakın, detaylı bir ağ yapısı oluşturur. constant/polyMesh içindeki ağ dosyalarını günceller veya üzerine yazar.
- **patchSummary:** Oluşturulan ağın özetini ve istatistiklerini sağlar, özellikle sınır koşulları (patch'ler) hakkında bilgi verir. Bu bilgileri komut ekranına yazdırır.

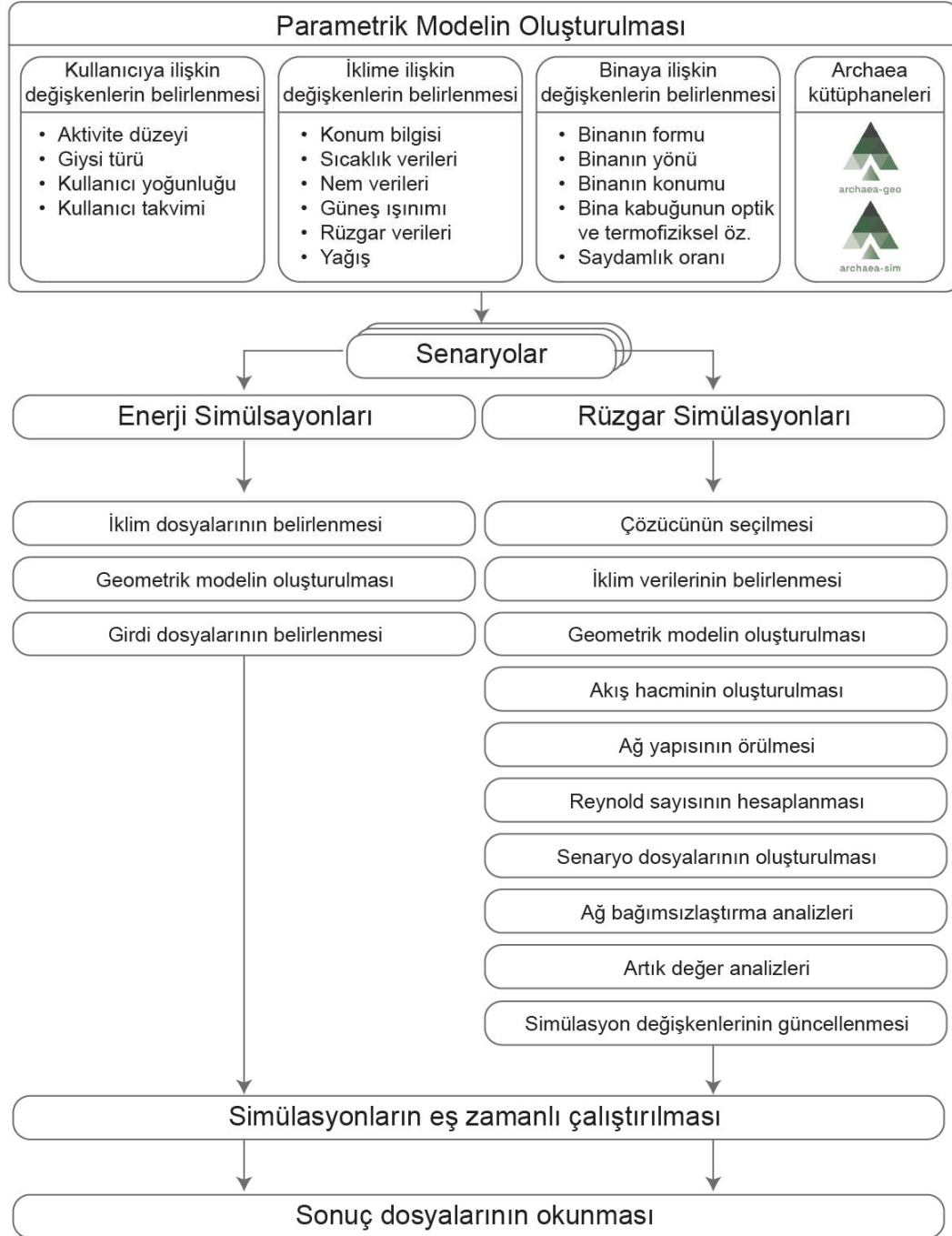
- **runParallel \$(getApplication):** Bu komut, genellikle OpenFOAM'daki bir akışkanlar dinamiği çözücüsünü çalıştırmak için kullanılır. \$(getApplication) ifadesi, bir çözücü adının yer alacağı bir değişkendir. Çözüm sürecinde çeşitli zaman adımlarında alan dosyalarını oluşturur.
- **reconstructParMesh -constant:** Paralel olarak hesaplanan ağ yapısını tek bir ağ yapısında birleştirir. constant/polyMesh klasöründe birleştirilmiş ağ dosyalarını oluşturur.
- **reconstructPar -latestTime:** En son zaman adımıdaki paralel olarak hesaplanan sonuçları birleştirir. İterasyon klasörlerinde birleştirilmiş alan dosyalarını oluşturur.
- **foamRun -postProcess writeCellCentres:** bu komut, post-processing işlemi olarak ağın hücre merkezlerini yazdırır. Hücre merkezlerinin konumlarını içeren dosyaları oluşturur, postProcessing klasörü altında saklanır.
- **foamRun -postProcess probes:** bu komut, post-processing işlemi olarak önceden belirlenmiş probe noktaları için sonuç değerlerini postProcessing klasörü altında oluşturur.
- **foamRun -postProcess cutPlaneSurface:** bu komut, post-processing işlemi olarak önceden belirlenmiş plane için sonuç değerlerini postProcessing klasörü altında oluşturur.

4.6. Sonuç Dosyalarının Okunması

Enerji simülasyon sonuçları .csv ve .html formatlı dosyalar .idf dosyasının olduğu dizinde veya simülasyon çalıştırılırken belirlenen çıktı klasöründe oluşturulur. Bu çıktılar yıllık/aylık/günlük olmak üzere farklı zaman dilimleri için enerji tüketimini, PMV ve PPD cinsinden konfor koşullarını, iç ve güneş kazançlarını kapsayabilmektedir.

Rüzgâr simülasyon sonuçları enerji simülasyonuna göre daha karmaşıktır. Sonuçlar her bir ağ yapısındaki hız ve basınç değerlerinin olduğu vektör değerleri ile ifade edilir. cutPlaneSurfaces dosyasında tanımlanan kesit tanımı ile .vtk dosyası olarak çıktı alınabilir. .vtk dosyası ParaView programı içerisinde görselleştirilebilir veya archaea-sim kütüphanesindeki vtk_to_speckle.py betiğini kullanarak Speckle formatına dönüştürülerek web tarayıcısında görüntülenebilir.

Bu açıklamalar ışığında, aynı algoritma üzerinden parametrik bir model üretilerek binalarda enerji ve rüzgar simülasyonlarının yapılması için izlenen yol Şekil 4.19'da görülmektedir.



Şekil 4.19 : Akış diyagramı

5. BİNALARDA ENERJİ VE RÜZGÂR SİMÜLASYONLARININ AYNI ALGORİTMA ÜZERİNDEN PARAMETRİK ÜRETİLEBİLMESİ İÇİN MODEL GELİŞTİRİLMESİ: AVLULU BİNA ÖRNEĞİ

Binaların tasarım sürecinde, özellikle pasif tasarım stratejilerini göz önünde bulundurmak ve bu aşamada doğru tercihler yapmak, aktif ısıtma, soğutma ve iklimlendirme sistemlerine olan ihtiyacı ve dolayısıyla binada kullanılacak enerji tüketimini azaltacaktır. Enerji korunumu açısından tasarlanacak olan binaya ve binanın bulunduğu çevreye ilişkin değişkenlerinin belirlenmesi önemlidir. Binanın yeri, yönlendiriliş durumu, formu, diğer binalara göre konumu ve bina kabuğunun optik ve termofiziksel özellikleri; binanın bulunduğu çevrenin iklimsel özellikleriyle de uyumlu olacak şekilde binaların enerji yüklerini azaltan pasif sistemler olarak işlev görmelerini sağlayacak şekilde optimize edilmelidir.

Tez çalışması kapsamında Şekil 4.19'daki adımlar izlenerek avlulu bir bina örneği için, enerji ve rüzgâr simülasyonlarının, geliştirilen algoritma yardımıyla parametrik olarak üretilebilmesi sağlanmıştır. Bu süreç; tasarımcının pasif tasarım karar sürecini ve bu kararlara bağlı olarak tasarlanan binanın performansının değerlendirilmesini hızlandırmayı amaçlamaktadır. Böylece; değişkenlere ilişkin değerlendirme kriter setleri belirlendiğinde farklı bina türleri için de aynı algoritmanın kullanılması ve sürecin optimize edilmesi olanaklı olabilecektir.

5.1. Kullanıcıya İlişkin Değişkenlerin Belirlenmesi

Bu çalışmada avlulu bina tipi konut kullanım senaryosu üzerinden ele alınmıştır. Binada hacim başına 2 kullanıcının olduğu kabul edilmiştir.

Konut binası için öngörülen kullanım süreleri Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1 : Kullanıcı takvimi

	Kullanım Aralığı	Kullanım Oranı
Hafta İçi	00:00 - 07:00	1
	07:00 - 19:00	0
	19:00 - 24:00	1
Hafta Sonu	00:00 - 12:00	1
	12:00 - 24:00	0.5

Kullanıcının mekandaki aktivite düzeyi ise iç kazançları etkileyen diğer bir değişkendir. Hesaplama dikkate alınacak aktivite düzeyleri ASHRAE 55 standardına göre belirlenmiştir.

Çizelge 5.2 : Kullanıcıların aktivite düzeyi takvimi

	Kullanım Aralığı	Kullanım Oranı	Aktivite	Aktivite Düzeyi (W/m²)
Hafta İçi	00:00 - 07:00	1	Uyuma	40
	07:00 - 19:00	0	-	0
	19:00 - 24:00	1	Akşam Yemeği, Oturma, Okuma, Çalışma	60
Hafta Sonu	00:00 - 09:30	1	Uyuma	40
	09:30 - 12:00	1	Ev işleri (ayakta)	80
	12:00 - 18:00	0.5	Yemek Yapma	100
	18:00 - 24:00	0.5	Akşam Yemeği, Oturma, Okuma, Çalışma	60

Bu takvimlerdeki kullanım aralıkları ve aktivite düzeyleri enerji modeli için hazırlanan .idf dosyası aracılığı ile simülasyona aktarılmıştır.

5.2. İklima İlişkin Değişkenlerin Belirlenmesi

Bu çalışmada avlulu yapının sıcak nemli Akdeniz iklim bölgesinde bulunan Muğla'nın Bodrum ilçesinde olduğu varsayımı ile örnekleme yapılmıştır. TS 825'e göre Bodrum 1. derece gün bölgesinde bulunmaktadır.

5.2.1. İç iklimle ilişkin değişkenlerin belirlenmesi

Avlulu binada, binanın pasif performansının değerlendirilebilmesi için, iç ortam konfor koşullarının sağlanmasında herhangi bir aktif sistem kullanılmadığı kabul edilmiştir.

5.2.2. Dış iklimle ilişkin değişkenlerin belirlenmesi

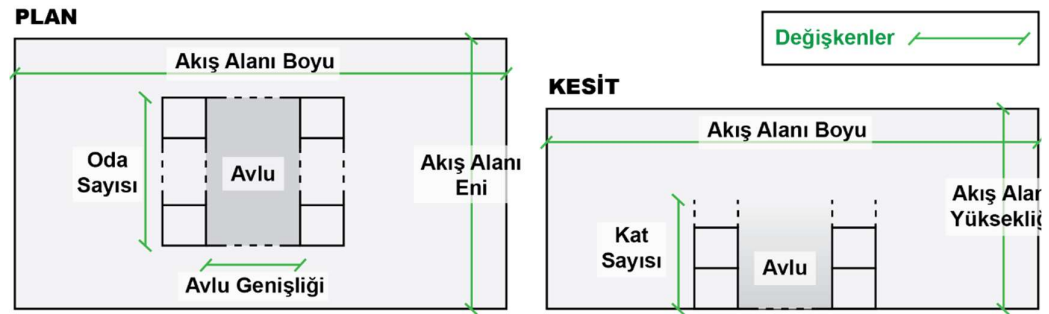
Bu çalışmada, güncel iklim verileri ile yapılması planlanan hesaplamalarda, Muğla-Bodrum'a ait .epw uzantılı TMY dosyası kullanılacaktır.

5.3. Binaya İlişkin Değişkenlerin Belirlenmesi

Binaya ilişkin değişkenler binanın geometrisini doğrudan etkileyen ve enerji modeline doğrudan etkiyen değişkenlerden oluşur.

5.3.1. Bina formu ve hacim organizasyonunu etkileyecek değişkenlerin belirlenmesi

Başka bir bina tarafından gölgelenmeyen ve düz bir arazide bulunduğu varsayılan avlulu bina, Şekil 5.1'de görüldüğü gibi karşılıklı iki bina grubu ve avluyu kapatan yan duvarlardan oluşmaktadır. Bina grupları kapıları iç avluya açılan ve boyutları parametrize edilebilen karşılıklı odalardan oluşmaktadır.



Şekil 5.1 : Avlulu bina tipolojisi üzerinden değişkenlerin gösterimi

Oda sayısı, kat sayısı ve avlu boyutu seçeneklerinin artırılmasıyla elde edilebilecek yeni bina formu ve dolayısıyla akış alanı boyutu seçenekleri ve pencere ve kapı boyutlarının artırılmasıyla elde edilebilecek açıklık/saydam bileşen/giriş çıkış açıklığı seçenekleri ile farklı tasarımlar üretebilmek olanaklıdır. Böylece parametrik olarak üretilen tasarımlar için binaya ilişkin değişkenlerin olası farklı seçenekleri

belirlenmiş olacaktır. Aynı zamanda parametrik modelde tanımlanabilen dönüş açısı değeri sayesinde modeli döndürmek de mümkündür.

5.3.2. Bina kabuğunun optik ve termofiziksel özelliklerinin belirlenmesi

Bina kabuğunun opak bileşeninin U değerleri TS 825'te 1. Bölge için belirlenen üst sınır değerler esas alınarak belirlenmiştir (Çizelge 5.3).

Çizelge 5.3 : Bölgelere göre en fazla değer olarak kabul edilmesi tavsiye edilen U değerleri (TS 825)

	$U_D (W/m^2 K)$	$U_T (W/m^2 K)$	$U_t (W/m^2 K)$	$U_p (W/m^2 K)$
1. Bölge	0.66	0.43	0.66	1.8
2. Bölge	0.57	0.38	0.57	1.8
3. Bölge	0.48	0.28	0.43	1.8
4. Bölge	0.38	0.23	0.38	1.8
5. Bölge	0.36	0.21	0.36	1.8

U_D , Dış duvarın ısı geçirgenlik katsayısı ($W/m^2 K$)

U_T , Tavanın ısı geçirgenlik katsayısı ($W/m^2 K$)

U_t , Zemine oturan tabanın ısı geçirgenlik katsayısı ($W/m^2 K$)

U_p , Pencerenin ısı geçirgenlik katsayısı ($W/m^2 K$)

Çizelge 5.3'te gösterilen sınır değerler esas alınarak oluşturulan bina kabuğu katmanlaşma detayları ve kabuğu oluşturan malzemelerin termofiziksel özellikleri Çizelge 5.4'te gösterilmektedir.

Çizelge 5.4 : Bina kabuğunun optik ve termofiziksel özelliklerini oluşturan katmanlaşma modeli

	<i>Malzemeler</i>	λ (W/m ² K)	<i>Kalınlık(m)</i>	<i>U</i> (W/m ² K)
U_D	Alçı Sıva	0.4	0.01	0.66
	Kireç Harcı	0.8	0.01	
	Tuğla	0.72	0.19	
	XPS Ekstrüde Polistren	0.034	0.04	
	Kireç Sıva	0.8	0.02	
U_T	Ahşap Kaplama	0.14	0.03	0.62
	Şap	0.41	0.03	
	Hafif Beton	1.9	0.05	
	Betonarme	1.13	0.12	
	XPS Ekstrüde Polistren	0.034	0.04	
U_t	Alçı Sıva	0.4	0.01	0.38
	Agrega-kum-çakıl	1.3	0.08	
	Şap	0.41	0.03	
	XPS Ekstrüde Polistren	0.034	0.08	
	Betonarme	1.13	0.12	
U_p	Alçı Sıva	0.4	0.01	1.8
	Çift Camlı Low-e kaplamalı pencere (12mm boşluklu)	-	-	

5.4. Parametrik Modelin Oluşturulması

Binalarda enerji ve rüzgâr simülasyonlarının aynı algoritma ile üretilmesi için değişkenler belirlenmiştir. Bu parametreler algoritmaya girdi olarak geometrinin oluşmasına veya simülasyonların çalışması için zorunlu olan girdilere aktarılmaktadır. Bu değişkenler;

- Senaryonun ismi
- Rüzgâr hızı
- Rüzgâr yönü
- Domain ölçüleri (genişlik, uzunluk, yükseklik)
- Kat sayısı
- Avlu genişliği
- Oda sayısı
- Oda ölçüleri (genişlik, uzunluk, yükseklik)
- Oda duvar kalınlığı
- Oda pencere ölçüleri (genişlik, uzunluk, yükseklik)

- Odadaki pencerenin varlığı/yokluğu
- Oda kapı ölçüleri (genişlik, uzunluk, yükseklik)
- Odadaki kapının varlığı/yokluğu
- ddy dosyası
- epw dosyası

şeklindedir.

Bu parametreler archaea-sim kütüphanesi içerisinde bulunan run.py isimli betik dosyasına girdi olarak alınabilmektedir. Bu girdiler ile archaea-sim kütüphanesi her iki simülasyon için ayrı ayrı senaryo dosyaları üreterek, enerji simülasyonları için LadybugTools ve OpenStudio kullanılarak EnergyPlus'ı, rüzgâr simülasyonları için OpenFOAM'u çalıştırmaktadır. Her bir rüzgâr senaryosu için çalışan simülasyon sonuçları ise vtk formatında üretilen verinin Speckle'a dönüştürülerek internet ortamında görselleştirilmesi sağlanmıştır.

Binaya ilişkin belirlenen değişkenlerin doğrultusunda avlulu bina için oluşturulan parametrik modele ait tüm değişkenler ve bu değişkenlerin varsayılan (default) değerleri aşağıdaki CLI programının kullanıcı rehberinde de görülmektedir (Şekil 5.2).

```

>> python3 run.py --help
Welcome to Archaea Simulation CLI program for CFD and BES
calculations!

options:
  -h, --help            show this help message and exit
  -n NAME,              --name NAME    Project name (default: test)
  -x, --exec            Execute simulations (default: False)
  -ws WIND_SPEED,       --wind-speed    Wind speed (default: 10)
  -wd WIND_DIRECTION,   --wind-direction Wind direction (default: 0)
  -dw DOMAIN_WIDTH,     --domain-width   Domain width (default: 25.0)
  -dd DOMAIN_DEPTH,     --domain-depth   Domain depth (default: 25.0)
  -dh DOMAIN_HEIGHT,    --domain-height   Domain height (default: 10.0)
  -nos NUMBER_OF_STOREYS, --number-of-storeys Number of storeys (default: 1)
  -nor NUMBER_OF_ROOMS, --number-of-rooms Number of rooms (default: 3)
  -cw COURTYARD_WIDTH,  --courtyard-width Courtyard width (default: 10.0)
  -rw ROOM_WIDTH,       --room-width     Room width (default: 4.0)
  -rd ROOM_DEPTH,       --room-depth     Room depth (default: 4.0)
  -rh ROOM_HEIGHT,      --room-height    Room height (default: 3.0)
  -rwt ROOM_WALL_THICKNESS, --room-wall-thickness Room wall thickness (default: 0.1)
  -rwe ROOM_WINDOW_EXISTENCE, --room-window-existence Room window existence (default: 1)
  -rww ROOM_WINDOW_WIDTH, --room-window-width Room window width (default: 0.6)
  -rwh ROOM_WINDOW_HEIGHT, --room-window-height Room window height (default: 1.2)
  -rde ROOM_DOOR_EXISTENCE, --room-door-existence Room door existence (default: 1)
  -rdw ROOM_DOOR_WIDTH,  --room-door-width Room door width (default: 0.8)
  -rdh ROOM_DOOR_HEIGHT, --room-door-height Room door height (default: 2.0)
  -ddy DESIGN_DAY_YEAR_FILE, --design-day-year-file .ddy file for EnergyPlus simulation
  -epw ENERGY_PLUS_WEATHER_FILE, --energy-plus-weather-file .epw file for EnergyPlus simulation

```

Şekil 5.2 : CLI programın değişkenlerini gösteren yardım menüsü

Varsayılan değeri olmayan tüm değişkenler programın çalışması için zorunlu değişkenlerdir. Bu değerler sağlanmadığı takdirde program çalışmaz ve hata verir. Bu programda 2 tane zorunlu değişken vardır; bunlar -ddy ve -epw değişkenleri ile tanımlanan iklim dosyalarının programın çalıştığı bilgisayarda dosya yoludur.

Üretilen her bir senaryo ismine göre “home/Documents/archaea-simulation” yolu altında bir senaryo klasörü oluşturulmaktadır. Bu senaryo klasöründe enerji modeli için “bes” isimli, rüzgâr modeli için “cfd” isimli klasörler oluşturulmaktadır (Şekil 5.3).

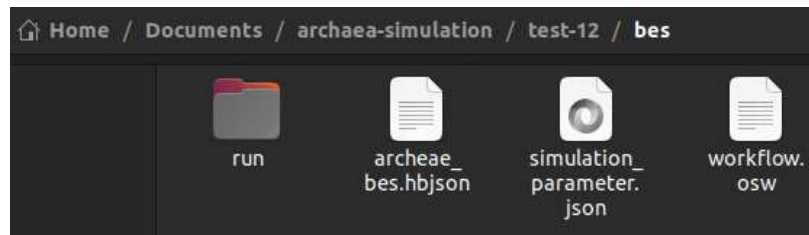


Şekil 5.3 : Senaryo dosyası

Her bir klasör ilgili simülasyonun çalışması için gerekli veriyi bulundurmaktadır ve sonuçlar da yine bu dosya içine yazılmaktadır. Parametrik modelin enerji ve rüzgâr simülasyonları için ayrı ayrı nasıl oluşturulduğu aşağıdaki bölümlerde tariflenmiştir.

5.4.1. Binalarda enerji simülasyonlarının parametrik model ile oluşturulması

Parametrik model, enerji simülasyonu için zorunlu olan değişkenleri girdi olarak aldıktan sonra ilgili senaryoyu “bes” klasörü altında üretir (Şekil 5.4).



Şekil 5.4 : Enerji simülasyonu senaryo dosyası

Bu dosyada “run” klasörü altında EnergyPlus çalışması için gerekli olan .idf uzantılı dosya bulunur ve simülasyon sonuçları da -farklı bir klasör tanımlanmadıysa- bu klasör altına yazılır.

5.4.1.1. İklim dosyalarının belirlenmesi

İklim dosyaları parametrik modele -ddy ve -epw değişkenleri ile aktarılır ve enerji simülasyonu OpenStudio veya EnergyPlus ile çalıştırılırken CLI programı değişkeni olarak aktarılır. Aşağıdaki betikte -w değişkeni ile OpenStudio'ya aktarımı gösterilmiştir.

```
cmd_bes_osw = [  
    "/usr/local/openstudio-3.6.1/EnergyPlus/energyplus",  
    "-w", arg_epw_path, # iklim dosyasının aktarıldığı kısım  
    "-d", out_path,  
    "-i", "/usr/local/openstudio-3.6.1/EnergyPlus/Energy+.idd",  
    "-x", idf_file_path  
]
```

Şekil 5.5 : Değişkenlerin OpenStudio'ya aktarıldığı python dizini

Bu betik henüz çalıştırılmamış komut (cmd) dizinini içerir.

5.4.1.2. Geometrik modelin oluşturulması

Parametrik modele girdi olan geometrik değişkenler, archaea kütüphanesine aktarıldıktan sonra temel geometrik nesneleri ve temel geometrik fonksiyonlar yardımıyla temel simülasyon nesneleri oluşturulur. Burada oluşturulan “Wall”, “Zone” gibi simülasyon nesneleri LadybugTools kütüphanesinde bulunan “Room”, “Model” gibi nesnelere dönüştürülerek .hbjson formatında bir çıktı üretilir. Bu dosya bir çeşit json dosyasıdır ve içeriğinde enerji modelinin ihtiyaç duyduğu tüm verileri içerir. Aşağıdaki betikte bu dosyanın yapısı gösterilmiştir. Temelde simülasyon değişkenleri (“properties.energy”) ve geometrik verilerden (“rooms”) oluşmaktadır.

```
{
  "type": "Model",
  "identifier": "archeae_bes",
  "display_name": "archeae_bes",
  "units": "Meters",
  "properties": {
    "type": "ModelProperties",
    "energy": {
      // simülasyon değişkenleri
    }
  },
  "rooms": [
    // geometrik tanımlar
  ],
  "orphaned_shades": [
    // gölgeleme elemanları
  ],

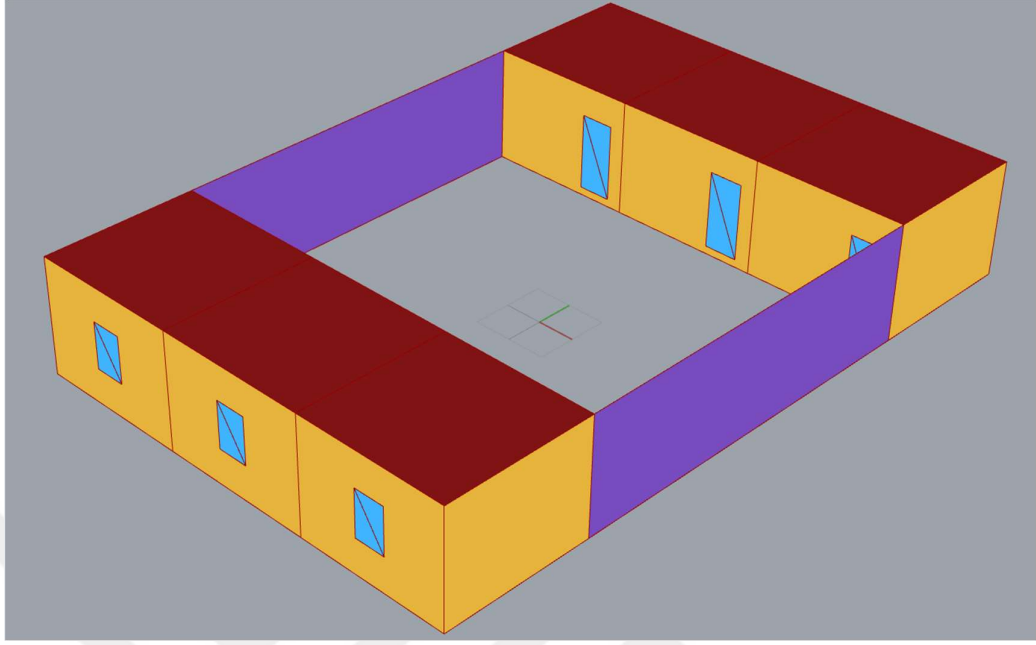
  "tolerance": 0.0001,
  "angle_tolerance": 1.0,
  "version": "1.57.1"
}
```

Şekil 5.6 : Değişkenlerin OpenStudio'ya aktarıldığı python dizini

Bu dosya formatını Rhino-Grasshopper yazılımlarını kullanarak görselleştirmek mümkündür (Şekil 5.8, Şekil 5.10, Şekil 5.12, Şekil 5.14).

```
>> python3 run.py -nor 3 -nos 1 -cw 10
```

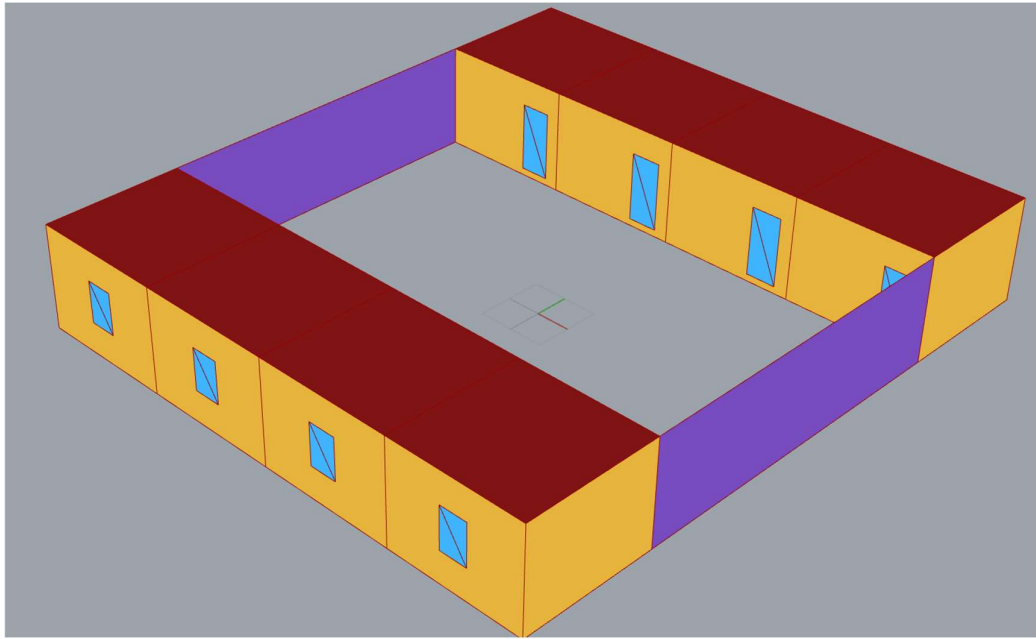
Şekil 5.7 : 3 odalı, 1 katlı ve avlu genişliği 10 metre olan senaryo için enerji modeli geometrisini (Şekil 5.8) üretmek için kullanılan komut örneği



Şekil 5.8 : 3 odalı, 1 katlı, 10 metre avlu genişliğine sahip enerji modeli geometrisi

```
>> python3 run.py -nor 4 -nos 1 -cw 10
```

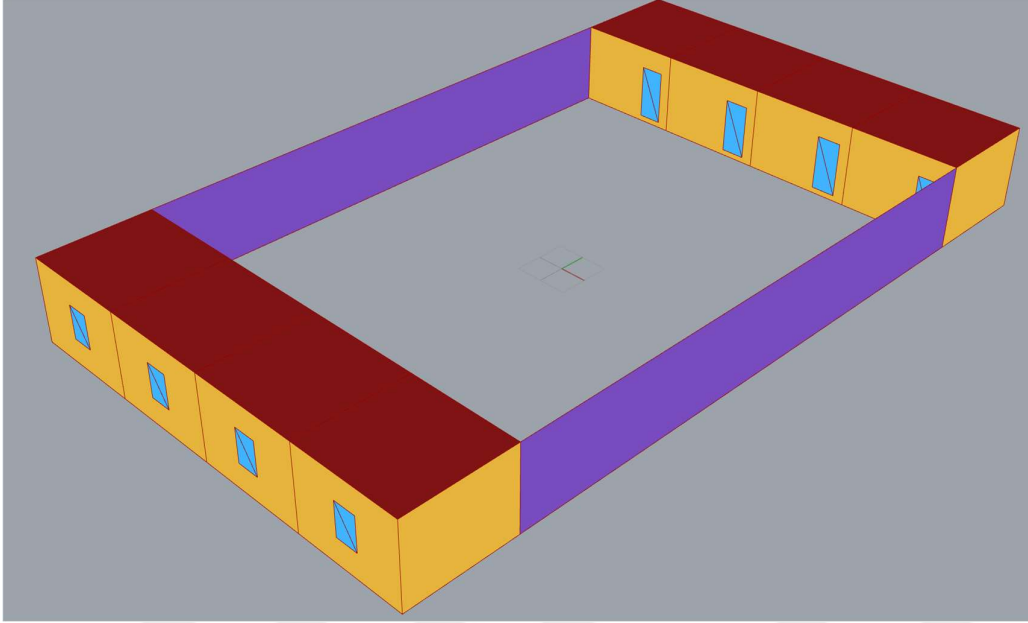
Şekil 5.9 : 4 odalı, 1 katlı ve avlu genişliği 10 metre olan senaryo için enerji modeli geometrisini (Şekil 5.10) üretmek için kullanılan komut örneği



Şekil 5.10 : 4 odalı, 1 katlı, 10 metre avlu genişliğine sahip enerji modeli geometrisi

```
>> python3 run.py -nor 4 -nos 1 -cw 20
```

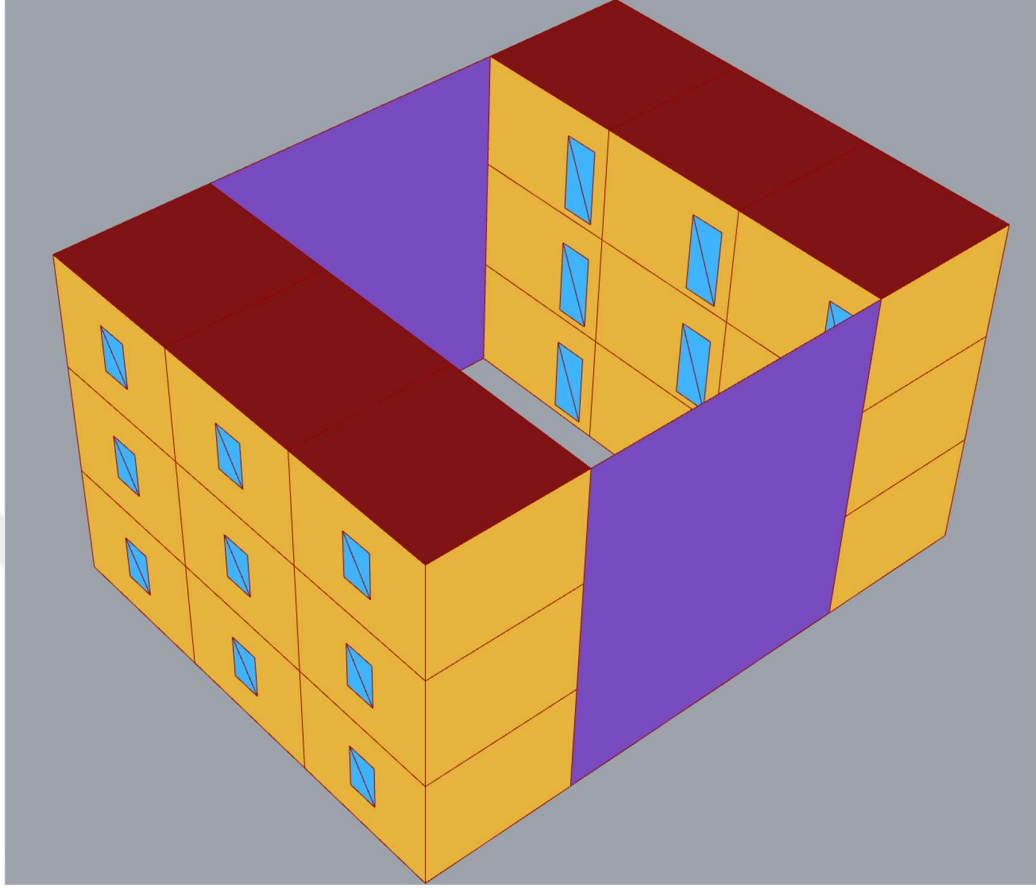
Şekil 5.11 : 4 odalı, 1 katlı ve avlu genişliği 20 metre olan senaryo için enerji modeli geometrisini (Şekil 5.12) üretmek için kullanılan komut örneği



Şekil 5.12 : 4 odalı, 1 katlı, 20 metre avlu genişliğine sahip enerji modeli geometrisi

```
>> python3 run.py -nor 3 -nos 3 -cw 8
```

Şekil 5.13 : 3 odalı, 3 katlı ve avlu genişliği 8 metre olan senaryo için enerji modeli geometrisini (Şekil 5.14) üretmek için kullanılan komut örneği

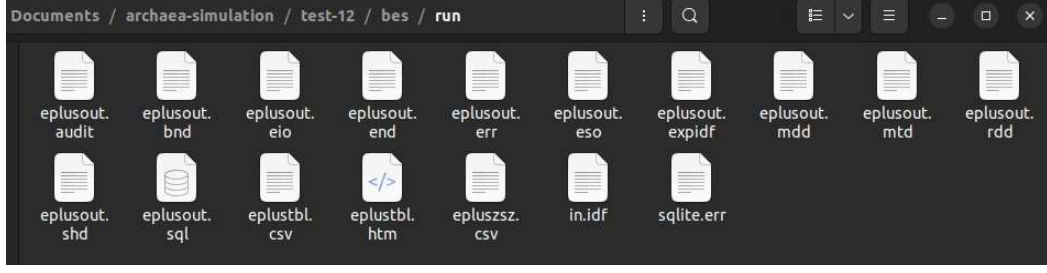


Şekil 5.14 : 3 odalı, 3 katlı, 8 metre avlu genişliğine sahip enerji modeli geometrisi

Girilen parametreler sonucunda üretilen avlunun yan duvarları (mor renk) kat sayısına ve avlu genişliğine bağlı olarak dinamik bir şekilde üretilir.

5.4.1.3. Girdi dosyalarının oluşturulması

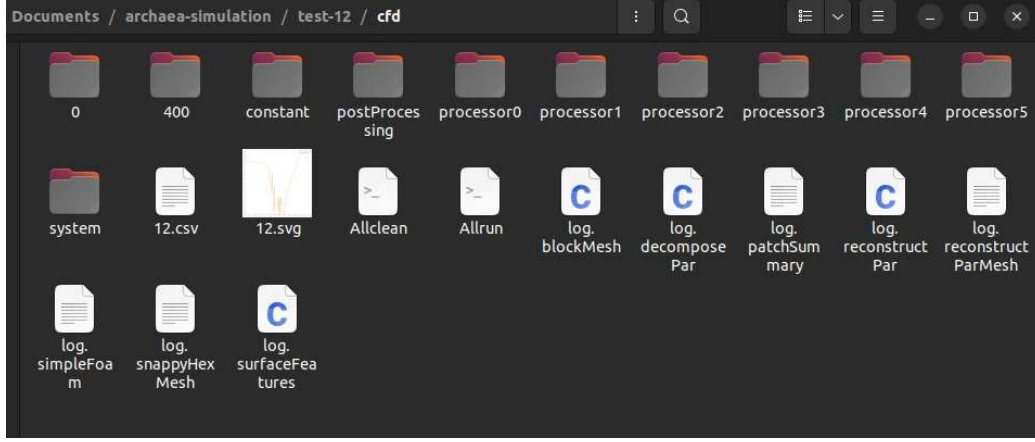
EnergyPlus girdi olarak .idf formatında bir girdi dosyasını çözer. LadybugTools kütüphanesi yardımıyla oluşturulan .hbjson dosyası yine bu kütüphane yardımıyla in.idf dosyasına dönüştürülür ve bu dosya “bes” klasörü altında bulunan “run” klasörüne kaydedilir (Şekil. 5.15).



Şekil 5.15 : Enerji simülasyonu için gerekli olan .idf dosyasının yeri

5.4.2. Binalarda rüzgâr simülasyonlarının parametrik model ile oluşturulması

Parametrik model, rüzgâr simülasyonu için zorunlu olan değişkenleri girdi olarak aldıktan sonra ilgili senaryoyu “cfd” klasörü altında üretir (Şekil 5.16).



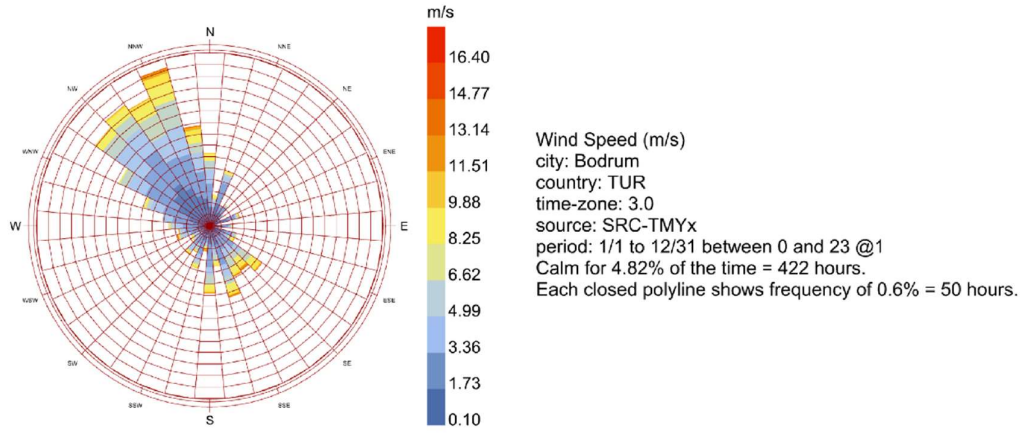
Şekil 5.16 : Rüzgâr simülasyonu senaryo dosyası

5.4.2.1. Çözücünün seçilmesi

Bu çalışmada OpenFOAM simülasyonunda simpleFoam çözücüsüne uygun olacak şekilde parametrik model geliştirilmiştir.

5.4.2.2. İklim verilerinin belirlenmesi

Rüzgâr simülasyonu için gerekli olan iklim verisi climate.onebuilding.org internet sitesindeki bodrum havalimanından 2007-2021 yılları için ölçülen değerlerden derlenen TMY dosyasından elde edilmiştir. Bu veriye göre çizilen rüzgâr gülünde (Şekil 5.17) hâkim rüzgârın 340 derece ve maksimum hızın 16 m/s'ye ulaştığını göstermektedir.

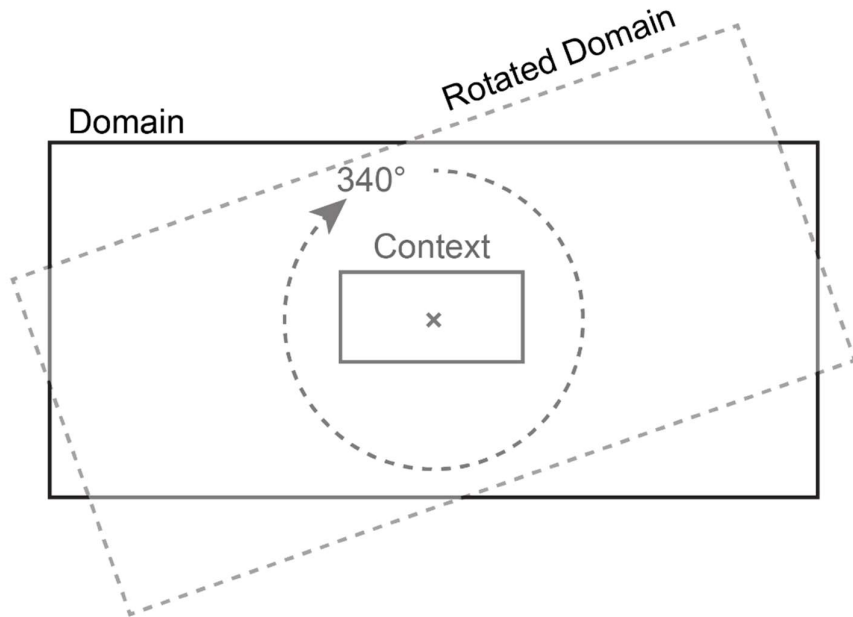


Şekil 5.17 : Muğla-Bodrum havalimanında 2007-2021 yılları arasında ölçüler rüzgâr verisi

```
>> python3 run.py -wd 340 -ws 16
```

Şekil 5.18 : 340 derece rüzgar yönü ve 16 m/s rüzgar hızı verilerine göre senaryo oluşturmak için kullanılan komut

Girilen rüzgâr yönü değeri Domain'in döndürülmesi ile hizalanır (Şekil 5.19). Bir diğer deyişle domain içerisindeki geometriler döndürülmez.



Şekil 5.19 : Domain'i rüzgâr yönüne göre hizalama

Bu döndürme işleminin yanı sıra inlet U vektörünün de girilen hız değeri ile hesaplanarak 0 klasörü altındaki U dosyasına yazılması gerekmektedir. 340 derece 16 m/s rüzgar hızının tanımlanış biçimi aşağıdaki örnekteki gibidir.

```
FoamFile
{
    format      ascii;
    class       volVectorField;
    object      U;
}
Uinlet (5.472322293210698 -15.035081932574535 0); // hız vektörü
dimensions    [0 1 -1 0 0 0 0]; // m/s tanımı
internalField  uniform (0 0 0);

boundaryField
{
    inlet
    {
        type      fixedValue;
        value      uniform $Uinlet;
    }

    outlet
    {
        type      pressureInletOutletVelocity;
        value      uniform (0 0 0);
    }

    wall
    {
        type      noSlip;
    }

    #includeEtc "caseDicts/setConstraintTypes"
}
```

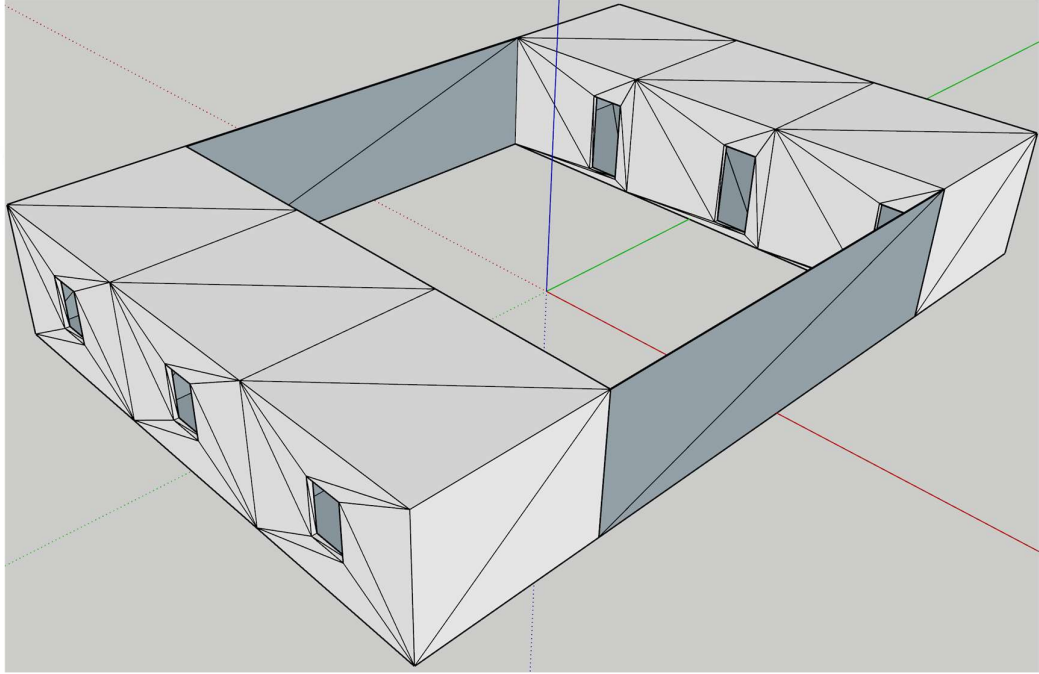
Şekil 5.20 : Çalışırılan komuttan (Şekil 5.18) sonra 0 klasörü altındaki oluşturulan U dosyasının örneği

5.4.2.3. Geometrik modelin oluşturulması

Parametrik modele girdi olan geometrik değişkenler, archaea kütüphanesine aktarıldıktan sonra temel geometrik nesneleri ve temel geometrik fonksiyonlar yardımıyla Domain, Zone ve Wall gibi temel simülasyon nesneleri oluşturulur. Rüzgar simülasyonu için gerekli olan geometriler Zone nesnelerinin önce Mesh nesnesine daha sonra da bu Mesh nesnesinin .stl formatında dışarı aktarılmasıyla elde edilir. Domain içersinde hiçbir Zone nesnesine ait olmayan Wall nesneleri de eklenebilir. Bu nesneler .stl formatında dışarıya aktarılıp simülasyona dahil edilebilir. Avlu bahçe duvarlarının geometrik olarak dışa aktarımı bu şekilde yapılmaktadır.

```
>> python3 run.py -nor 3 -nos 1 -cw 10
```

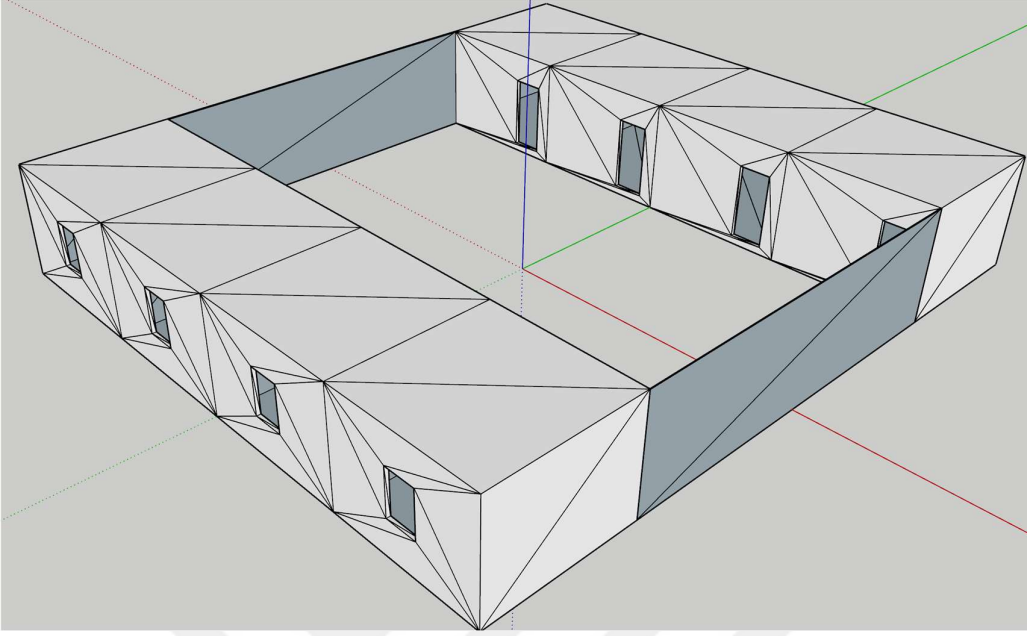
Şekil 5.21 : 3 odalı, 1 katlı ve avlu genişliği 10 metre olan senaryo için rüzgâr modeli geometrisini (Şekil 5.22) üretmek için kullanılan komut örneği



Şekil 5.22 : 3 odalı, 1 katlı, 10 metre avlu genişliğine sahip rüzgâr modeli geometrisi

```
>> python3 run.py -nor 4 -nos 1 -cw 10
```

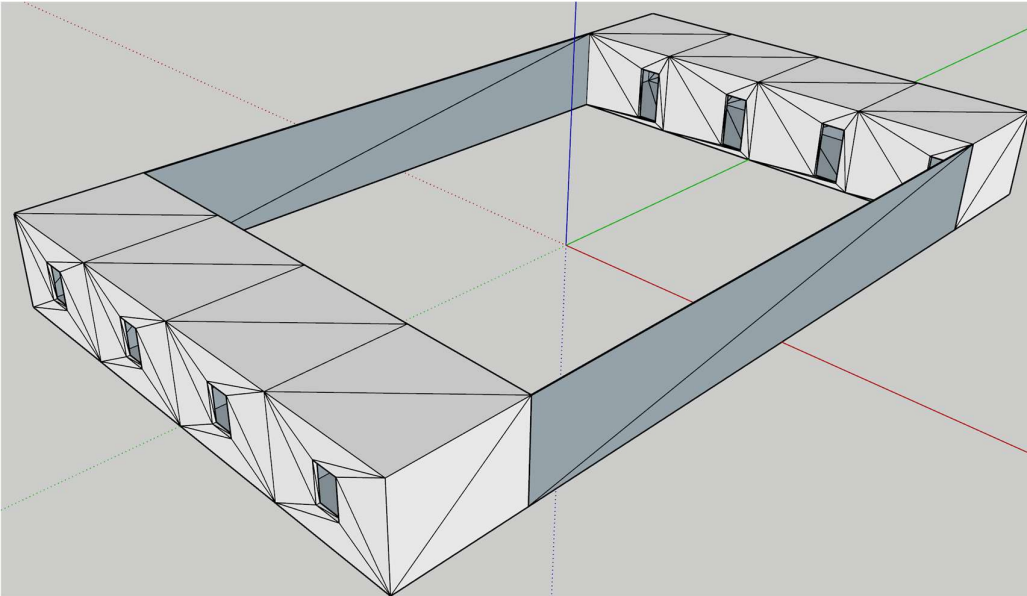
Şekil 5.23 : 4 odalı, 1 katlı ve avlu genişliği 10 metre olan senaryo için rüzgâr modeli geometrisini (Şekil 5.24) üretmek için kullanılan komut örneği



Şekil 5.24 : 4 odalı, 1 katlı, 10 metre avlu genişliğine sahip enerji modeli geometrisi

```
>> python3 run.py -nor 4 -nos 1 -cw 20
```

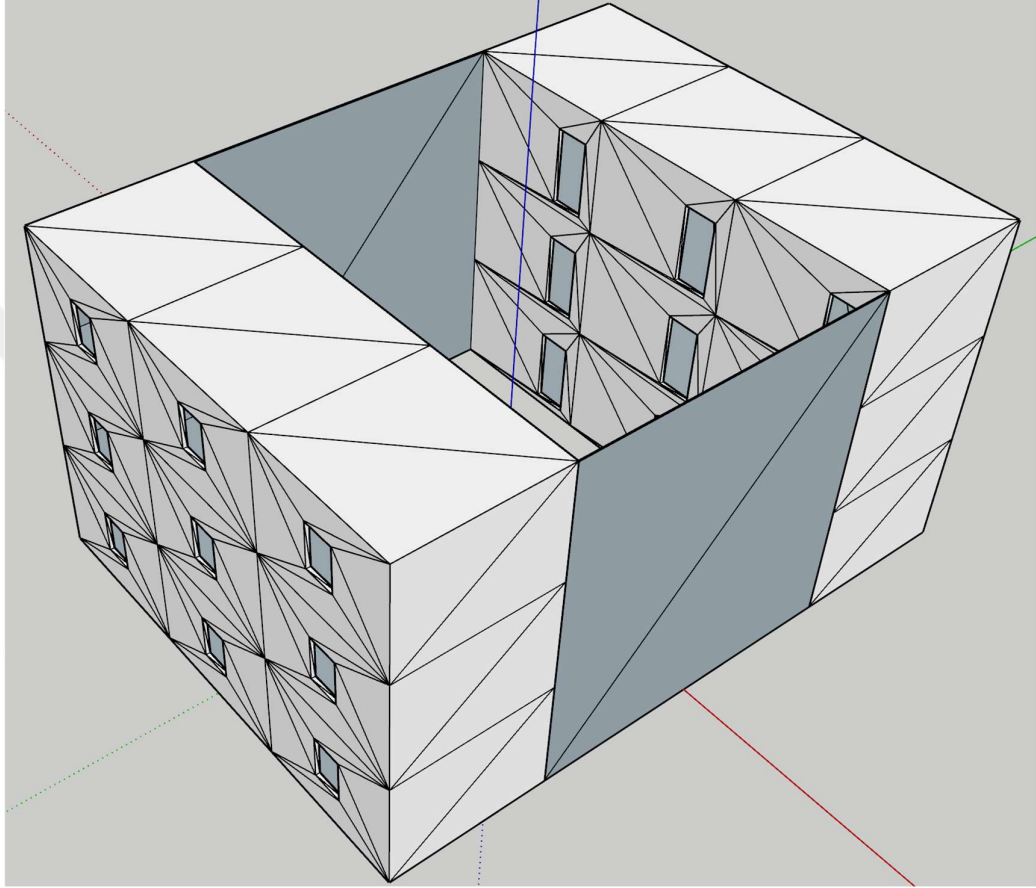
Şekil 5.25 : 4 odalı, 1 katlı ve avlu genişliği 20 metre olan senaryo için geometri
(Şekil 5.26) üretmek için kullanılan komut örneği



Şekil 5.26 : 4 odalı, 1 katlı, 20 metre avlu genişliğine sahip rüzgâr modeli geometrisi

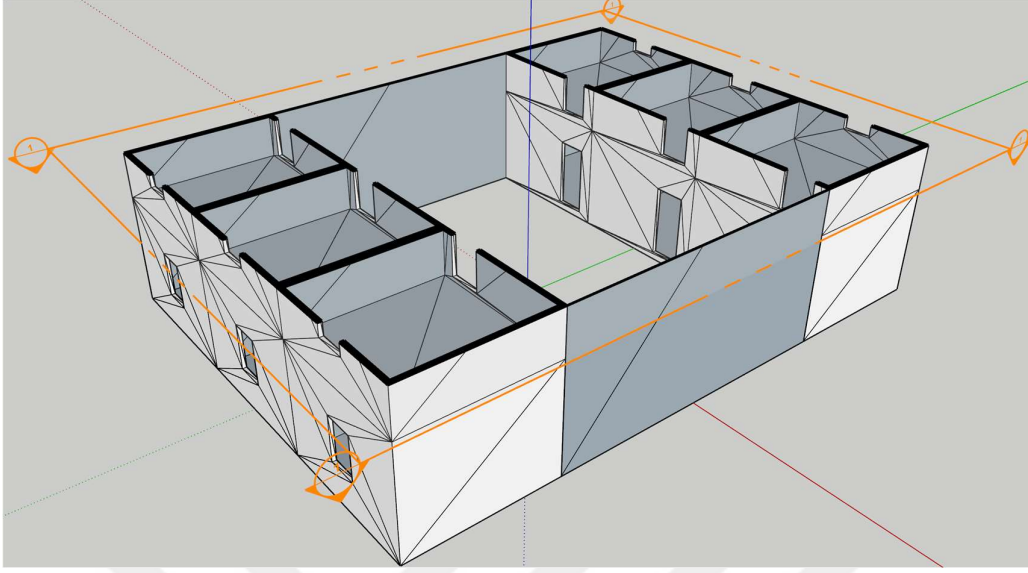
```
>> python3 run.py -nor 3 -nos 3 -cw 8
```

Şekil 5.27 : 3 odalı, 3 katlı ve avlu genişliği 8 metre olan senaryo için rüzgâr modeli geometrisini (Şekil 5.28) üretmek için kullanılan komut örneği



Şekil 5.28 : 3 odalı, 3 katlı, 8 metre avlu genişliğine sahip rüzgâr modeli geometrisi

Rüzgâr modeli geometrisi enerji modelinin geometrisinden yapısal olarak farklıdır. Kesit modelinden (Şekil 5.29) anlaşılacağı üzere rüzgârın odaların içine girebileceği boşluklar mevcuttur.



Şekil 5.29 : Rüzgâr modeli geometrisinin plan kesiti

5.4.2.4. Akış hacminin oluşturulması

Akış hacmi “inlet”, “outlet” ve “sides” olmak üzere 3 farklı .stl dosyasından oluşmaktadır. Bu geometrilerin sınırları “blockMeshDict” dosyasında da tanımlanmaktadır ve ağ yapısı bu tanımlı hacmin içine örülür. Akış hacminin ebatları senaryolar üretilirken tanımlanabilmektedir.

```
>> python3 run.py -dw 125 -dd 125 -dh 30
```

Şekil 5.30 : Domain genişliği 50 m, derinliği 50 m ve yüksekliği 25 m olarak senaryo için çalıştırılan komut örneği

Burada tanımlanan değerler ile Domain’i oluşturan 8 köşenin koordinatları hesaplanarak “blockMeshDict” dosyası içindeki “vertices” listesine aktarılır (Şekil 5.31).

```

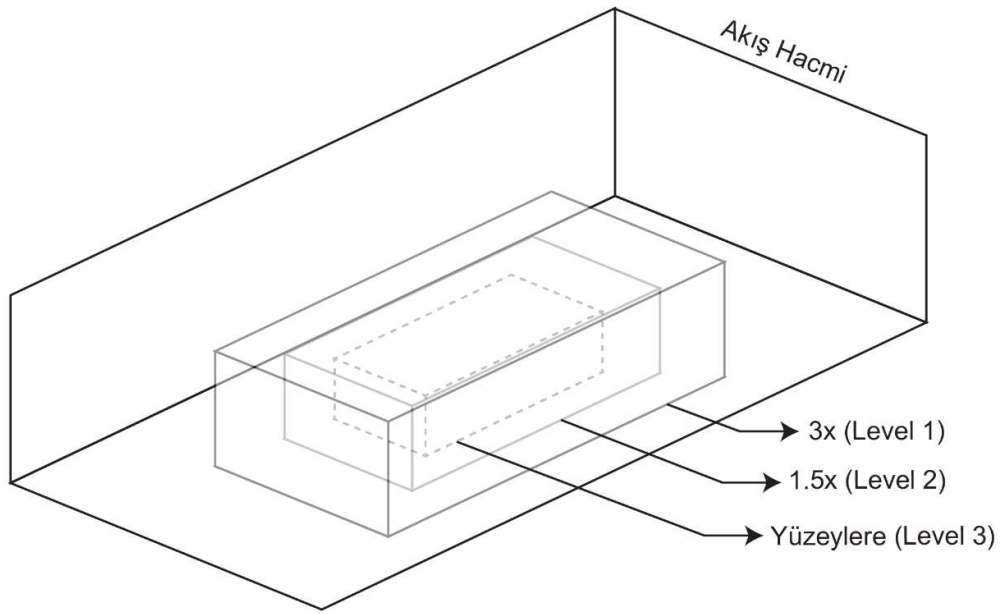
FoamFile
{
    version 2.0;
    format      ascii;
    class       dictionary;
    object      blockMeshDict;
}
Cell // x, y ve z doğrultusunda kaç blok ağı yapısına bölüneceği
{
    x 62;
    y 62;
    z 15;
};
convertToMeters 1;
vertices // blok ağı yapısının sınırları
(
    (-62.5 -62.5 0.0)
    (62.5 -62.5 0.0)
    (62.5 62.5 0.0)
    (-62.5 62.5 0.0)
    (-62.5 -62.5 30.0)
    (62.5 -62.5 30.0)
    (62.5 62.5 30.0)
    (-62.5 62.5 30.0)
);
blocks
(
    hex (0 1 2 3 4 5 6 7)
    (
        $!cell/x
        $!cell/y
        $!cell/z
    )
    simpleGrading (1 1 1)
);

```

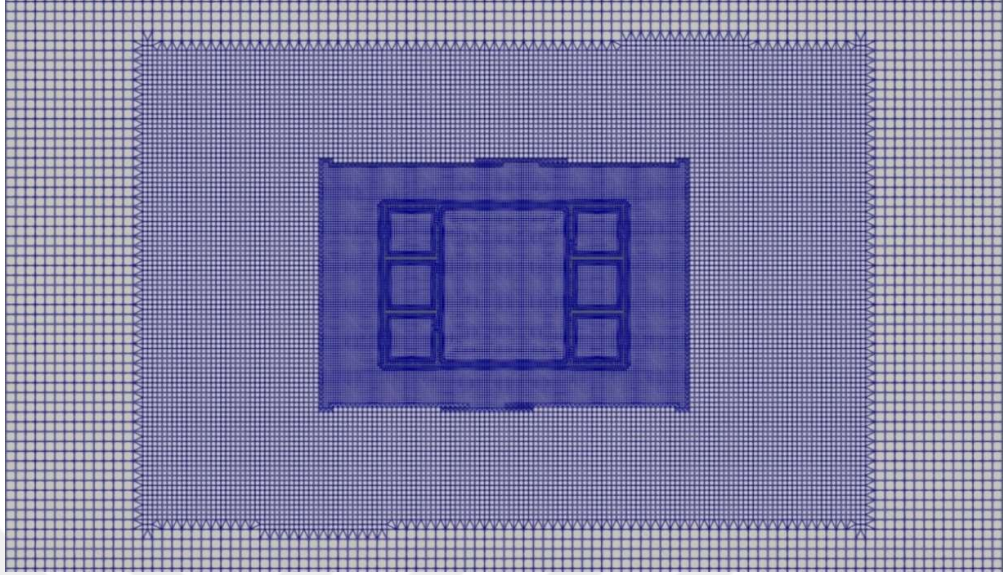
Şekil 5.31 : Domain genişliği 50 m, derinliği 50 m ve yüksekliği 25 m olarak senaryo için çalıştırılan komut sonrası oluşan blockMeshDict dosyası

5.4.2.5. Ağ yapısının örülmesi

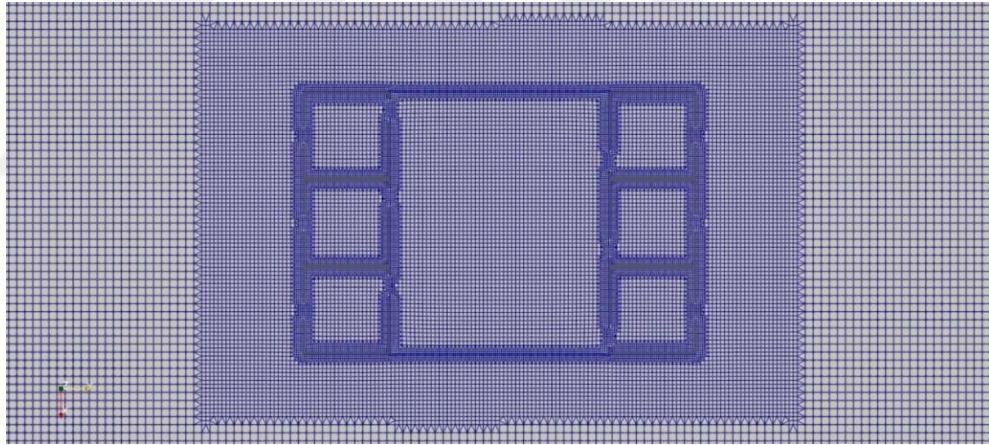
Oluşturulan akış hacminin içerisine ağ yapısı “snappyHexMesh” aracı kullanılarak her bir senaryo için örülür. Ağ yapısının sıklığı çözüm süresinin uzamasına neden olsa da sonuçların doğruluğunu etkilemektedir. Bu nedenle ağ yapısının sıklaştırılması dışarıdan içeriye doğru adım adım yapılmaktadır. Avlulu yapıyı içine alan hacmin 3 katı ile ölçeklenmiş hacmi ilk iyileştirme (level 1) hacmini (refinement box) oluşturmaktadır. 1.5 katı ile ölçeklenmiş hacmi ise ikinci iyileştirme (level 2) hacmini oluşturmaktadır. Avlulu yapıyı oluşturan yüzeylere ise üçüncü iyileştirme (level 3) yapılmıştır.



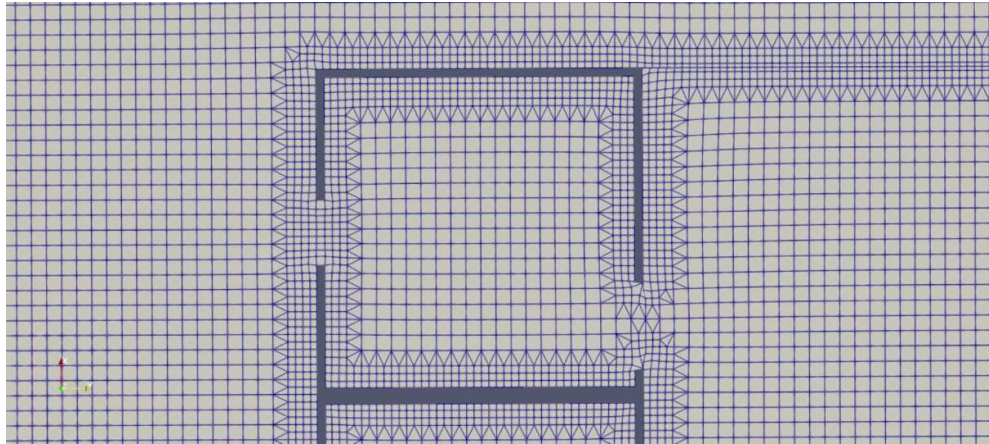
Şekil 5.32 : Ağ yapısı iyileştirme aşamaları



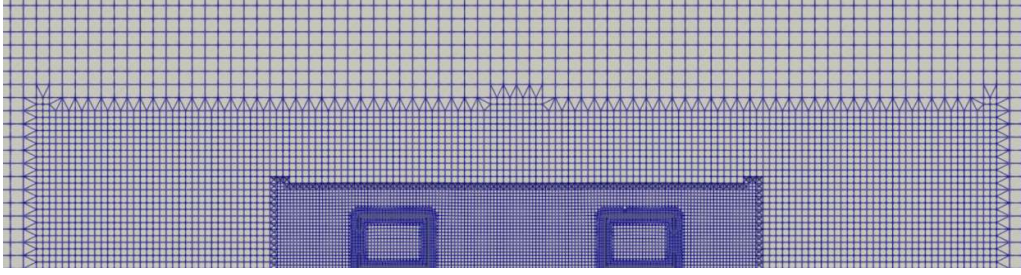
Şekil 5.33 : Ağ yapısının level 1, 2 ve 3 iyileştirme aşamaları ile plan görünümü



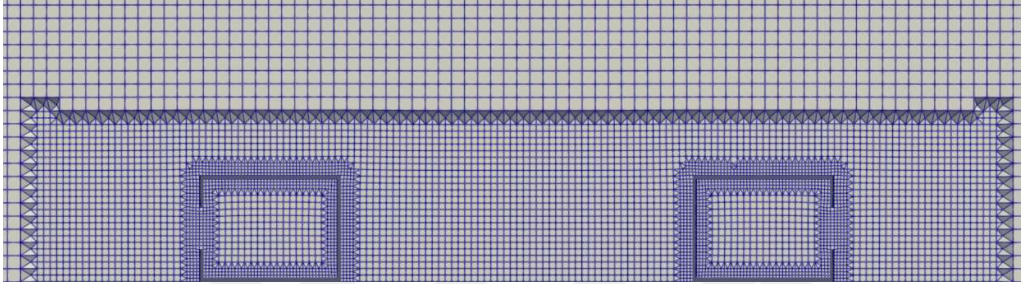
Şekil 5.34 : Ağ yapısının level 2 ve 3 iyileştirme aşamaları ile plan görünümü



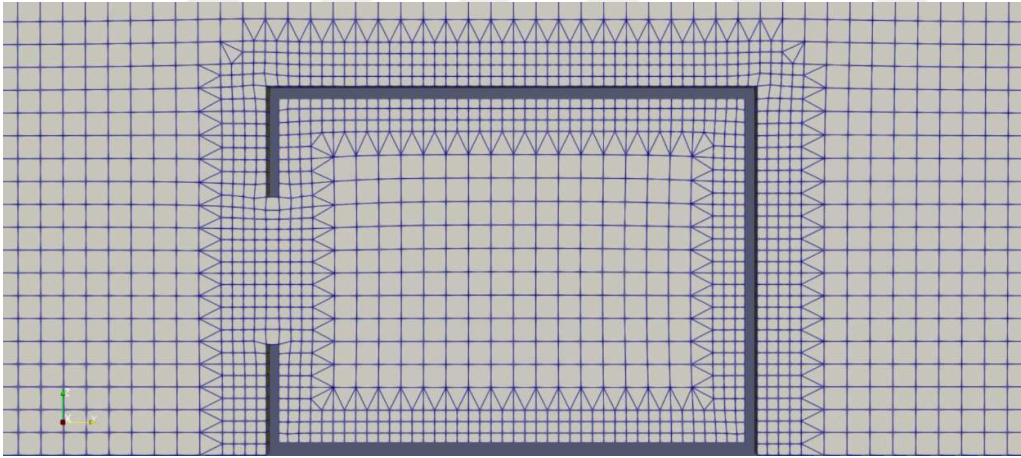
Şekil 5.35 : Ağ yapısının level 3 iyileştirme aşaması ile plan görünümü



Şekil 5.36 : Ağ yapısının level 1, 2 ve 3 iyileştirme aşaması ile kesit görünümü



Şekil 5.37 : Ağ yapısının level 2 ve 3 iyileştirme aşaması ile kesit görünümü



Şekil 5.38 : Ağ yapısının level 3 iyileştirme aşaması ile kesit görünümü

5.4.2.6. Reynolds sayısının hesaplanması

Karakteristik hız (U) olarak belirlenen ortalama rüzgâr hızı 3 m/s ve karakteristik uzunluk (L) olarak alınan 1,2 metre değerleri göz önünde bulundurulduğunda, standart atmosfer koşulları altında; hava yoğunluğunun (ρ) yaklaşık olarak 1.225 kg/m^3 ve hava dinamik viskozitesinin (μ) yaklaşık olarak $1.81 \times 10^{-5} \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$ olduğu durumda, Formül 5.1'ye göre yapılan hesaplama sonucunda elde edilen Reynolds sayısı,

yaklaşık olarak 243.646 olarak bulunmuştur. Bu değer, akışın türbülanslı rejimde olduğunu göstermektedir.

$$Re = \frac{\rho u L}{\mu} \quad (5.1)$$

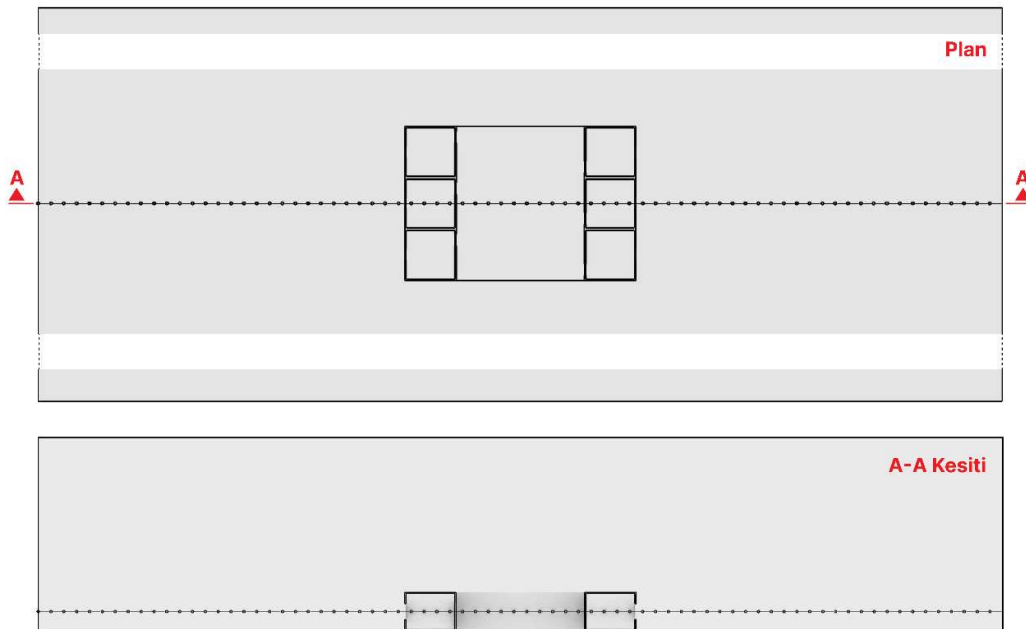
$$Re = \frac{(1.225 \text{ kg/m}^3) (3 \text{ m/s}) (1.2 \text{ m})}{(1.81 \times 10^{-5} \text{ kg/m} \times \text{s})} = 243.646$$

5.4.2.7. Senaryo dosyalarının oluşturulması

Senaryo dosyaları 4.4.2.7 adımıyla açıklandığı üzere girilen değişkenlerin ilgili dosyalarda güncellenmesiyle senaryoya uygun olacak şekilde oluşturulmaktadır.

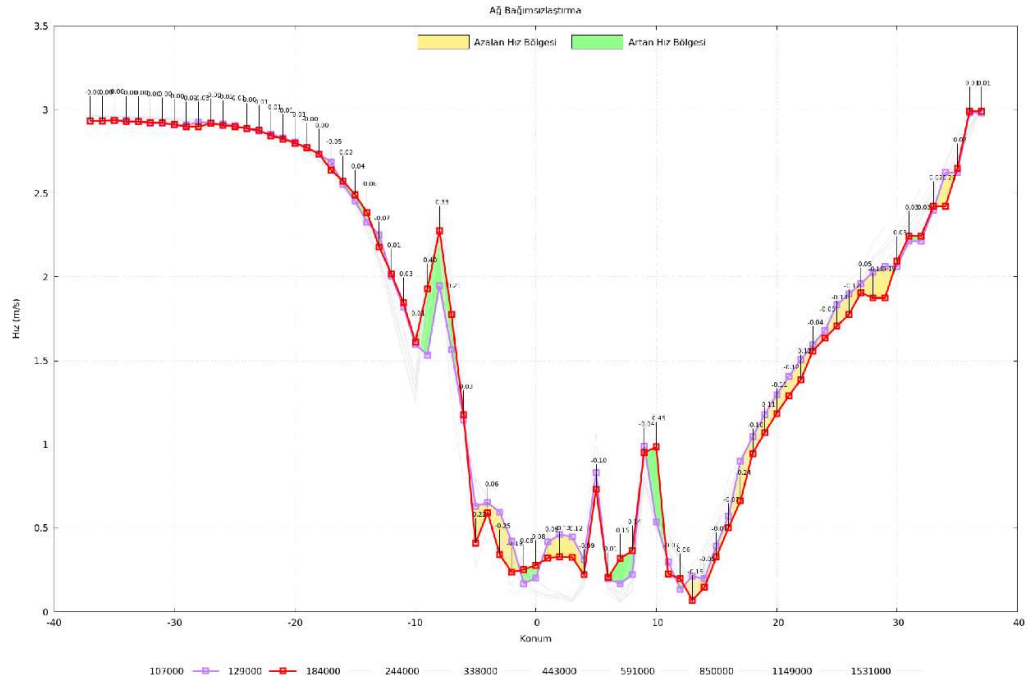
5.4.2.8. Ağ bağımsızlaştırma (Mesh independency) analizinin yapılması

Ağ bağımsızlaştırma analizleri yaklaşık 107.000 kaba ağ yapısı ile başlatılmıştır. Simülasyonların en etkin ağ yapısı sayısı ile yapıldığından emin olmak için bir sonraki simülasyon için ağ yapısı sayısını yaklaşık %40 artırarak 10 farklı çözümleme yapılmıştır. Bu 10 farklı çözümdeki hız değerleri çözüm hacmine yerden 1.5 metre yüksekliğinde tanımlanan (Şekil 5.39) probe aracı ile elde edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

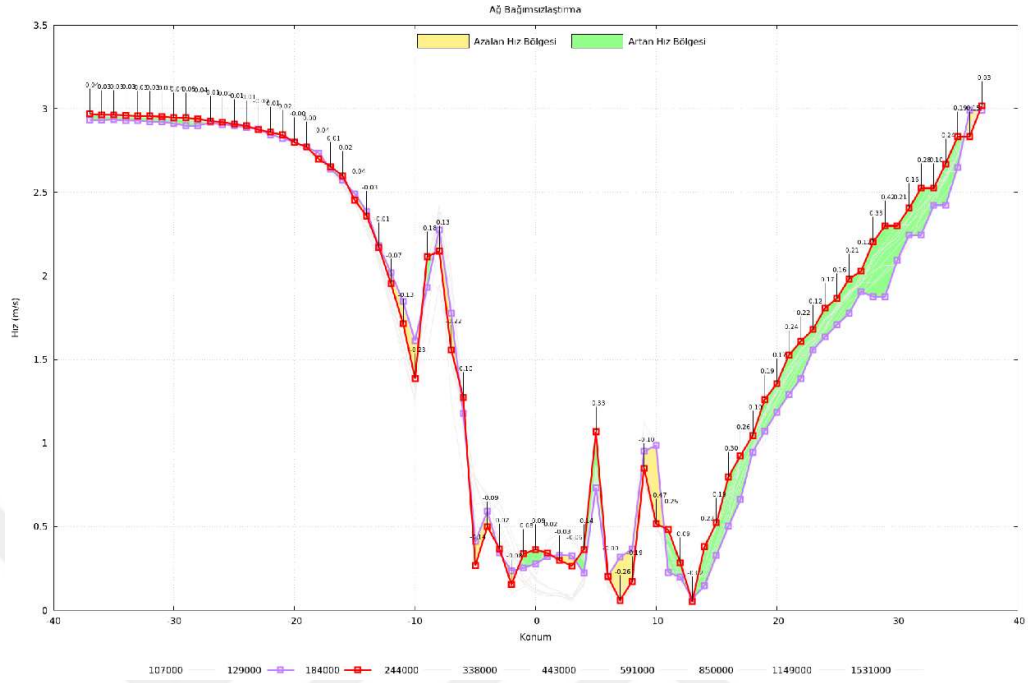


Şekil 5.39 : Ölçüm noktalarının plan ve kesitteki görünümü

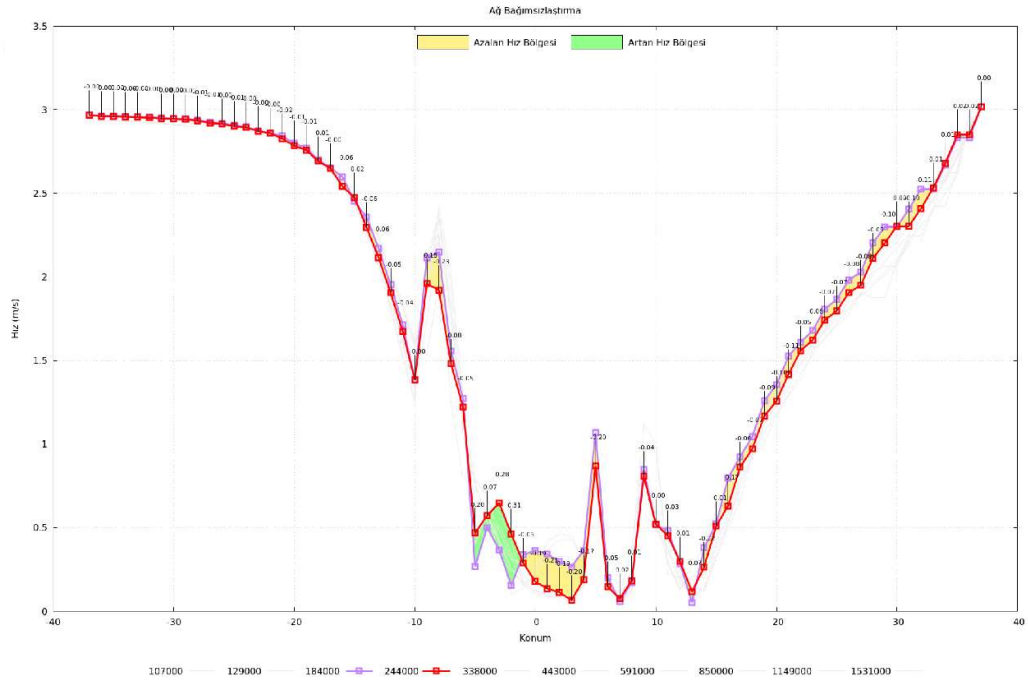
Plan ve kesitte gösterilen ölçüm noktalarında 10 farklı ağ yapısı sayısı için alınan değerlerin bir sonraki ile karşılaştırıldığı grafikler aşağıda gösterilmiştir. Şekil 5.40, Şekil 5.41, Şekil 5.42, Şekil 5.43'deki karşılaştırmalardaki ağ yapısındaki iyileşme sonuçları önemli ölçüde değiştirmiştir. Şekil 5.44, Şekil 5.45, Şekil 5.46, Şekil 5.47 ve 5.48'deki grafiklerde sonuçların birbirine benzer olduğu gözlemlenmiştir. 443.000 ağ yapısının bu çözümleme hacmi için ideal sayı olduğu saptanmıştır.



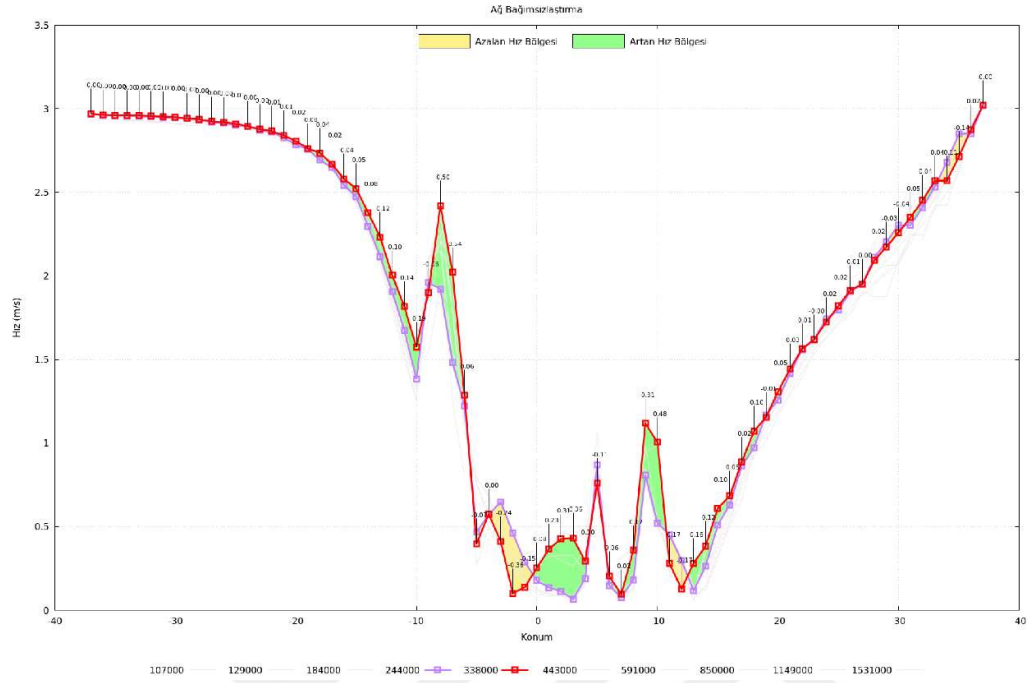
Şekil 5.40 : 107.000 ve 129.000 ağ yapısı simülasyon sonuç farkları



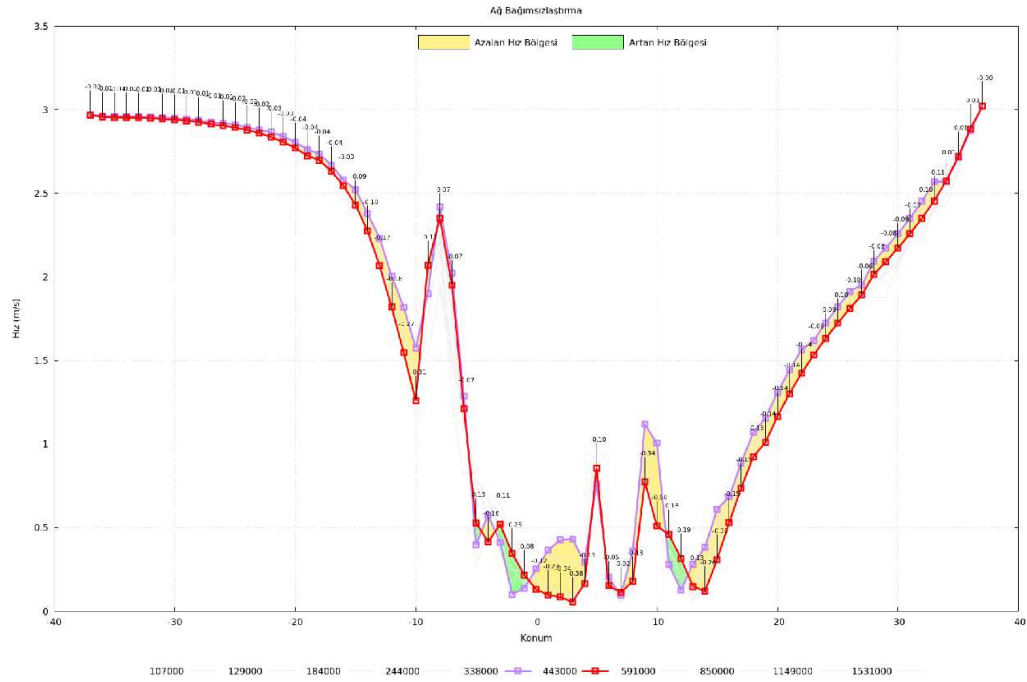
Şekil 5.41 : 129.000 ve 184.000 ağ yapısı simülasyon sonuç farkları



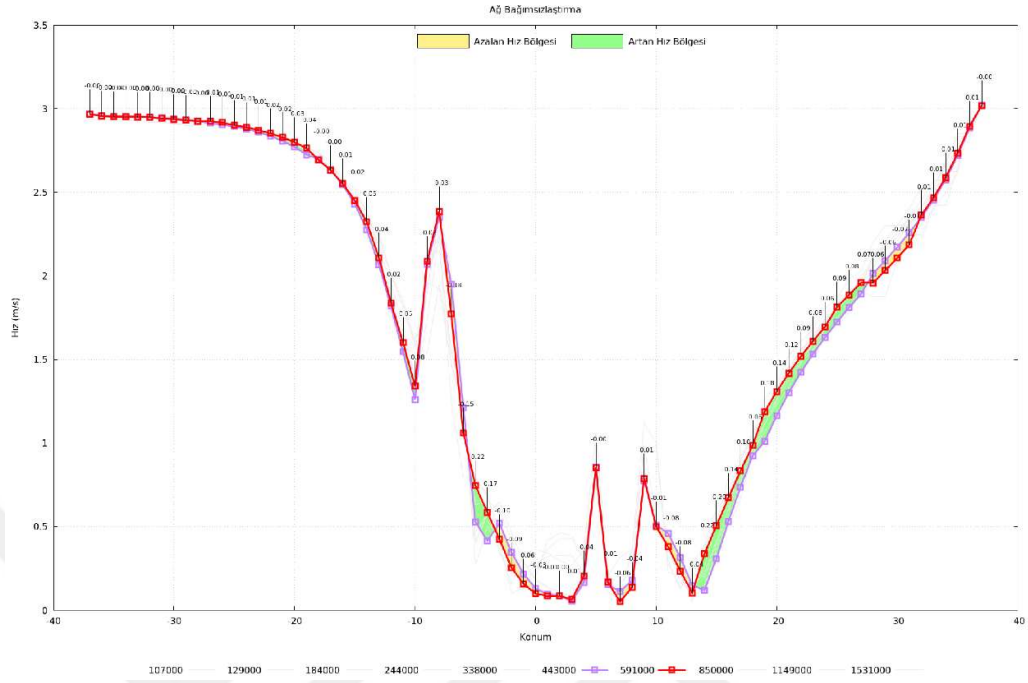
Şekil 5.42 : 184.000 ve 244.000 ağ yapısı simülasyon sonuç farkları



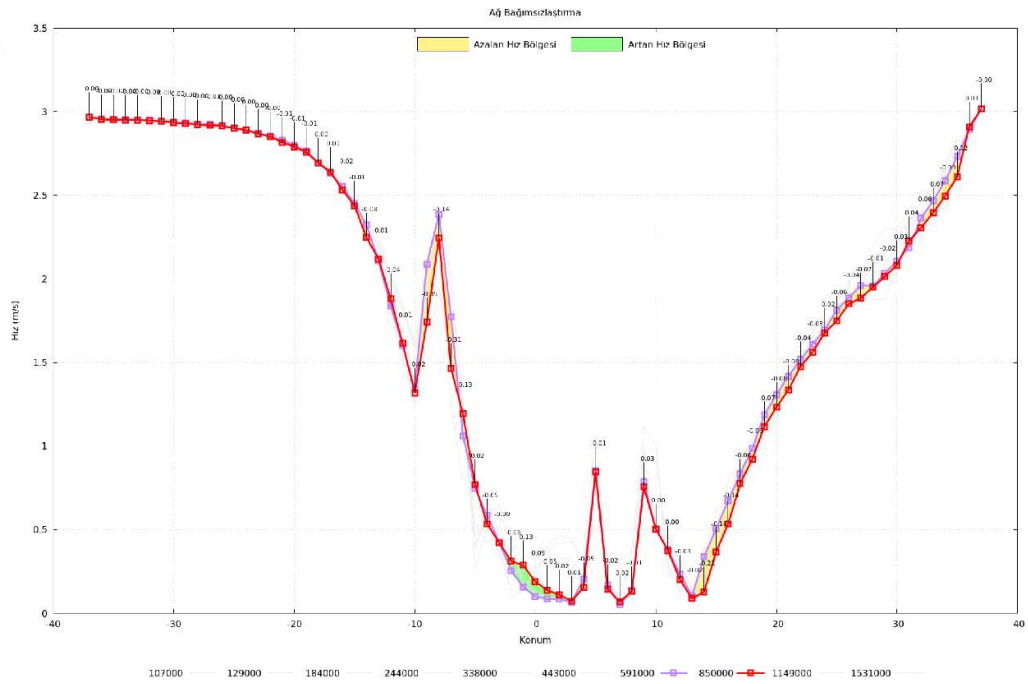
Şekil 5.43 : 244.000 ve 338.000 ağ yapısı simülasyon sonuç farkları



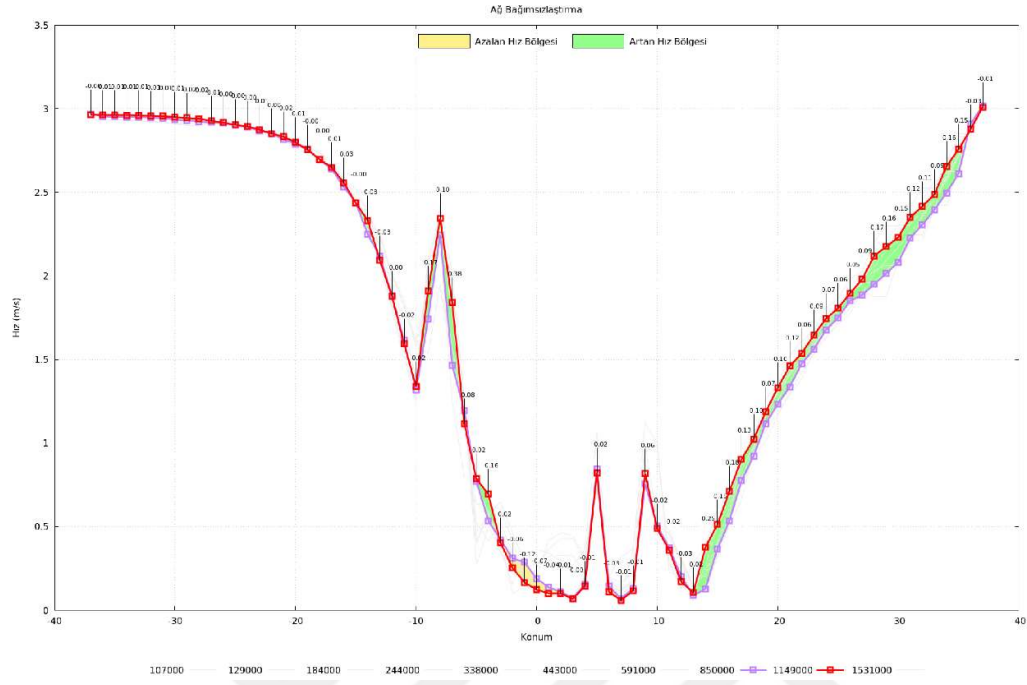
Şekil 5.44 : 338.000 ve 443.000 ağ yapısı simülasyon sonuç farkları



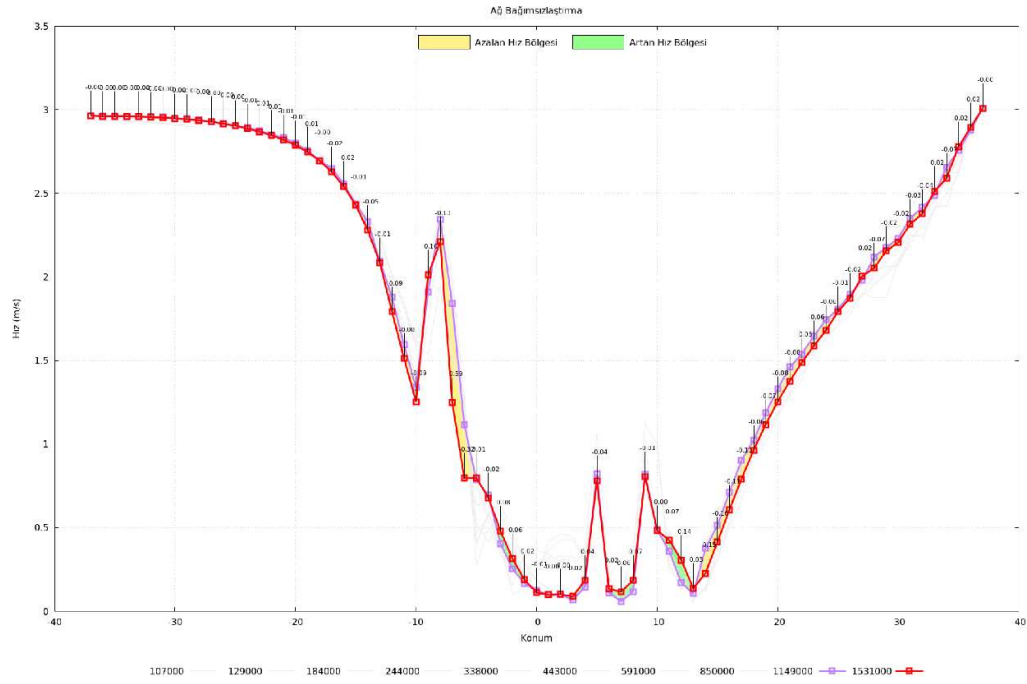
Şekil 5.45 : 443.000 ve 591.000 ağ yapısı simülasyon sonuç farkları



Şekil 5.46 : 591.000 ve 850.000 ağ yapısı simülasyon sonuç farkları



Şekil 5.47 : 850.000 ve 1.149.000 ağ yapısı simülasyon sonuç farkları

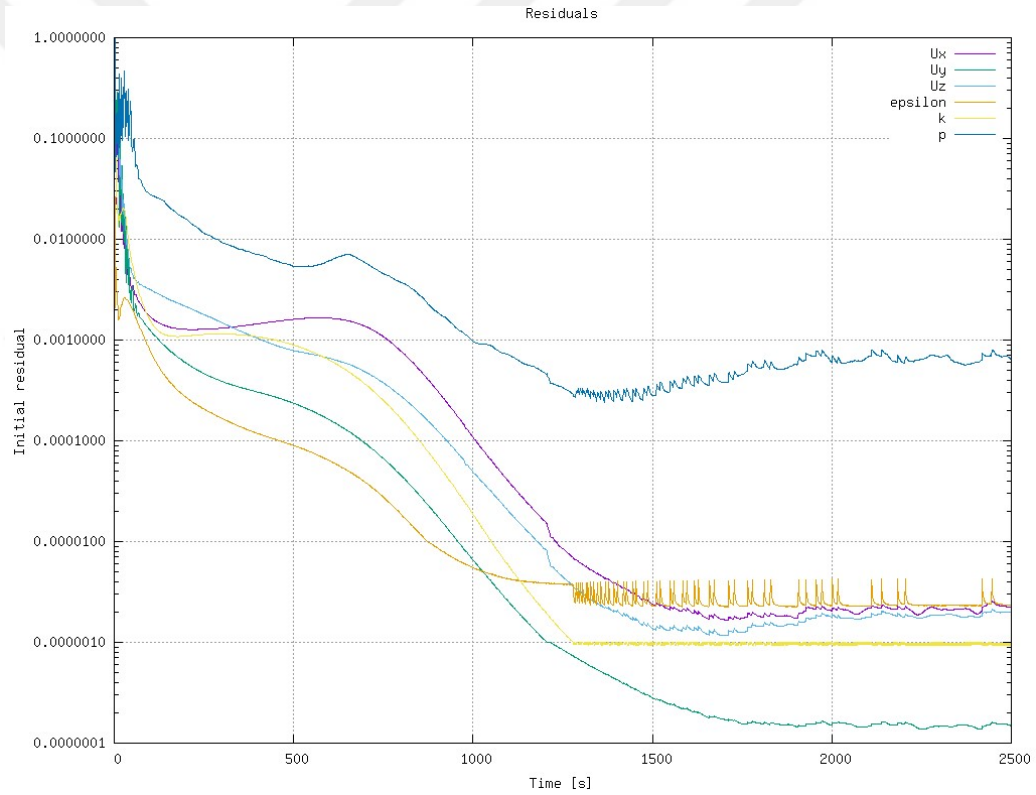


Şekil 5.48 : 1.149.000 ve 1.531.000 ağ yapısı simülasyon sonuç farkları

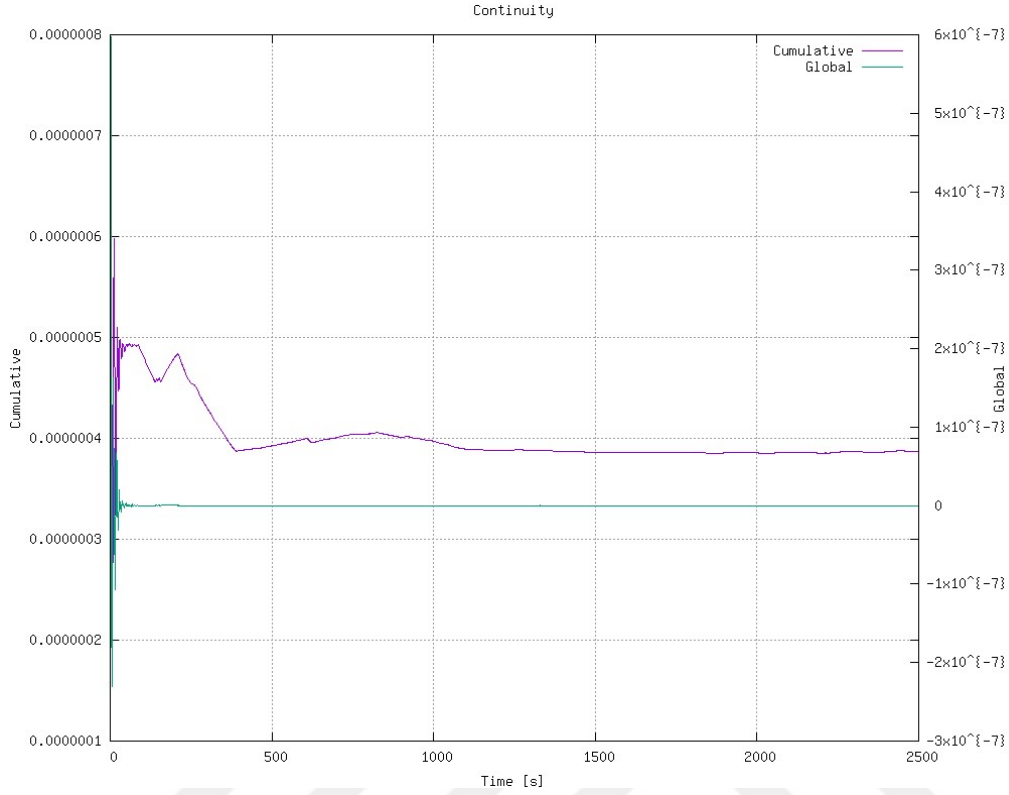
5.4.2.9. Artık değer (Residual) analizinin yapılması

Artık değer analizi için simülasyonun 443.000 ağ yapısı sayısı ile iterasyonu maksimum 10.000 ayarlanarak yakınsama değerleri gözlemlenmiştir. Simülasyon artık değerlerinin 2500 iterasyondan sonra değişmediği saptanmıştır. Şekil 5.49'daki artık değer analizlerine göre x, y ve z yönlerindeki hız değerleri ve eplison, k değerleri $10e-6$ 'ya kadar, basınç değeri ise $10e-3$ 'e kadar inmektedir.

Şekil 5.50'deki süreklilik analizlerine göre kümülatif ve global değerler $10e-7$ 'ye kadar inmektedir. Sonuçlar beklenen düzeylerdedir.



Şekil 5.49 : Artık değer analizi



Şekil 5.50 : Süreklilik (continuity) değerleri

5.4.2.10. Simülasyonun parametrik çözümlemeye hazır hale getirilmesi

Ağ bağımsızlaştırma analizi sonucunda belirlenen ideal ağ yapısı sayısı 443.000 olarak bulunmuştur. Parametrik simülasyonlara geçilmeden önce her bir senaryonun 443.000'e yakın değerinde ağ sayısı üretecek şekilde "blockMeshDict" dosyasındaki blok hücre sayıları ideal ağ sayısı üretecek şekilde ayarlanmıştır.

5.5. Senaryoların Eş Zamanlı Çalıştırılması

Senaryoların çalıştırılması Python'ın "subprocess" modülü kullanılarak yapılır. Bu modül bir işlemi çalıştırmak için gerekli olan komut dizinine ihtiyaç duyar. Enerji simülasyonu için OpenStudio içerisinde bulunan energyplus dosyası -w, -d be -i değişkenleri ile çalıştırılır. Rüzgâr simülasyonu ise her bir senaryo dosyası içinde bulunan Allrun betiği ile çalıştırılır. Bu betiğin içeriği 4.5 adımı ifade edilmiştir.

```
# Enerji simülasyonu komut dizini
cmd_bes_osw = [
    "/usr/local/openstudio-3.6.1/EnergyPlus/energyplus",
    "-w", arg_epw_path,
    "-d", out_path,
    "-i", "/usr/local/openstudio-3.6.1/EnergyPlus/Energy+.idd",
    "-x", idf_file_path
]
completed_process_bes = subprocess.run(cmd_bes_osw, shell=False)

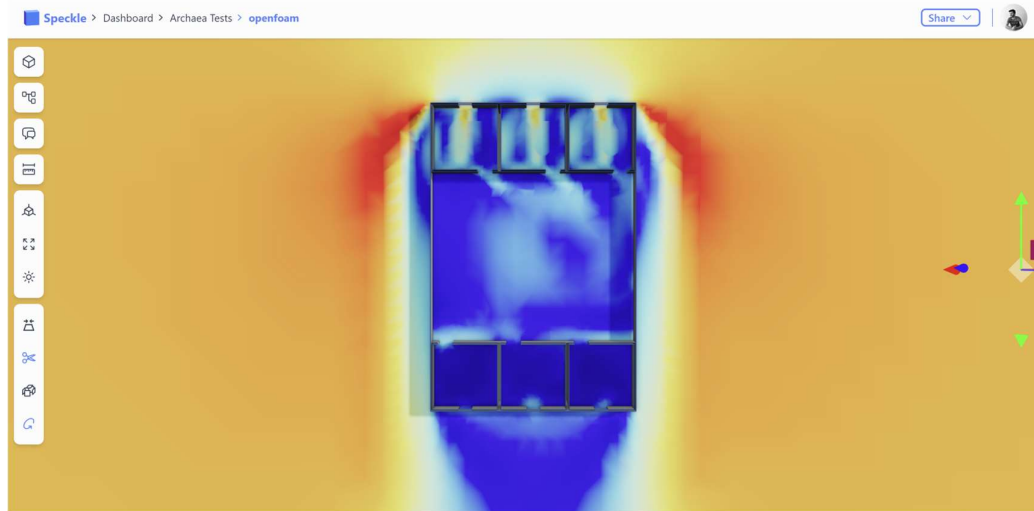
# Rüzgâr simülasyonu komutu
cmd_cfd = os.path.join(cfd_case_folder, './Allrun')
completed_process_cfd = subprocess.run(cmd_cfd, shell=False)
```

Şekil 5.51 : Senaryoların python subprocess kütüphanesi ile eş zamanlı çalıştırılması

5.6. Sonuçların Dosyalardan Okunması

Enerji simülasyon sonuçları EnergyPlus tarafından “bes/run” klasörü içerisine yazılmaktadır. Sonuçların okunabileceği .csv ve .html dosyaları mevcuttur.

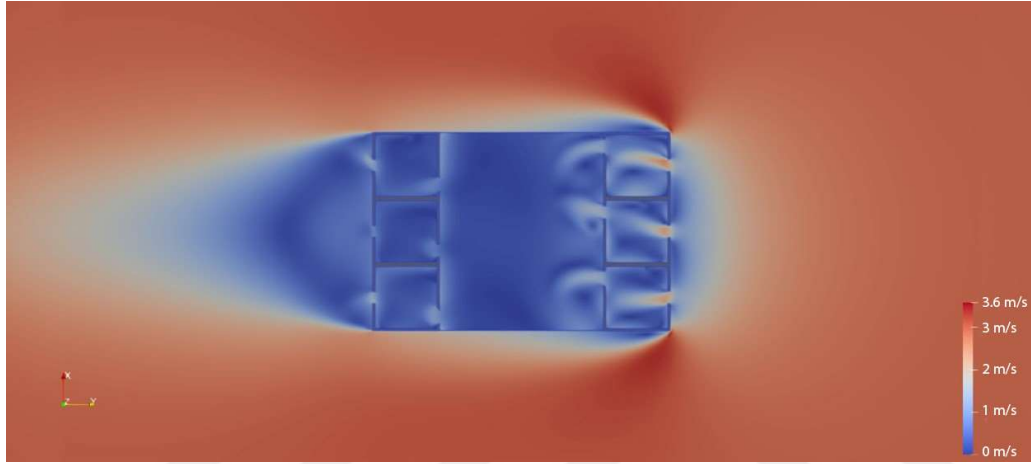
Rüzgâr simülasyon sonuçları OpenFOAM tarafından postProcessing klasörü içerisine yazılmaktadır. cutPlaneSurface modülünün ürettiği .vtk uzantılı sonuç dosyası Speckle formatına aktarılarak internet ortamında görselleştirilebilir bir formata dönüştürülür (Şekil 5.52).



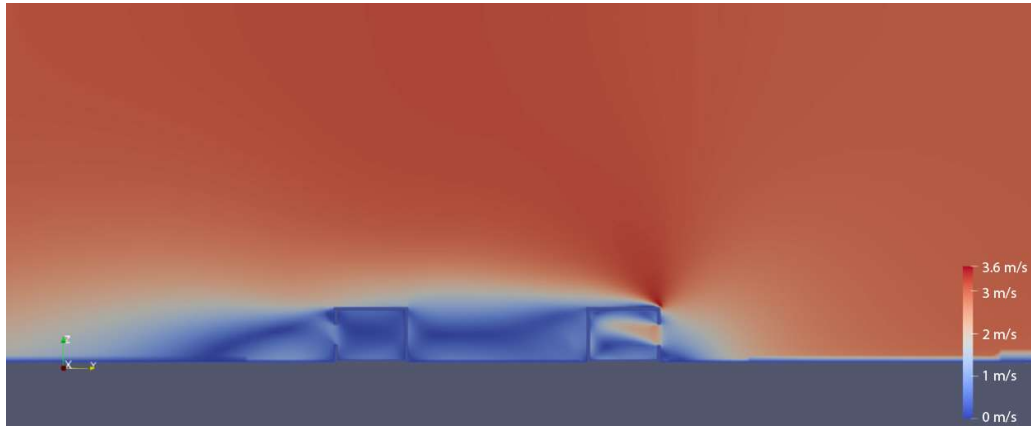
Şekil 5.52 : Sonuçların Speckle platformunda ölçekten bağımsız görünümü

Bu dönüşüm sonuçların Linux ortamından internet ortama aktarılmasını sağlar. Bu sayede rüzgar sonuçlarını görmek isteyen diğer paydaşların Linux işletim sistemi yüklü olan bir bilgisayar olmadan erişmesini sağlar.

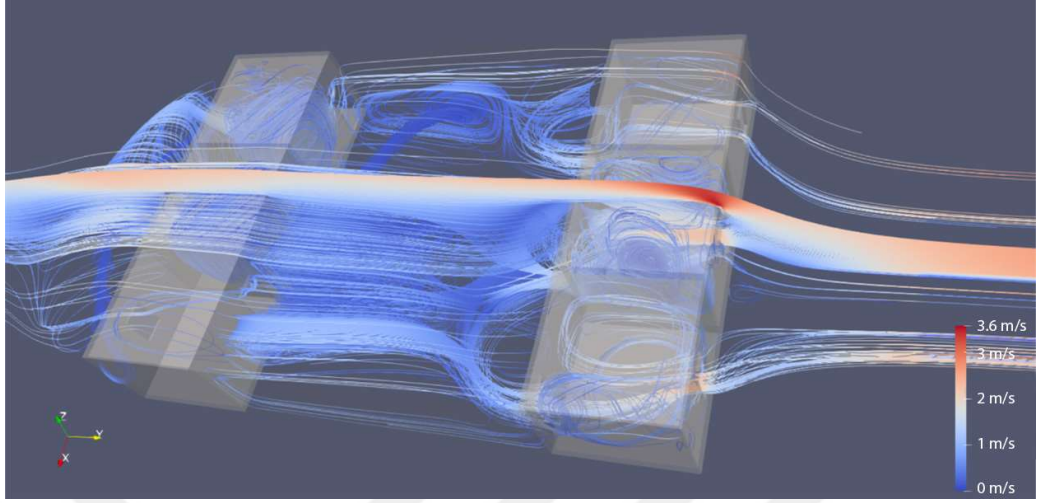
Rüzgar simülasyon sonuçları geleneksel olarak Linux ortamında ParaView aracı kullanılarak görselleştirilir. Örnek simülasyon sonuçları Şekil 5.53, Şekil 5.54, Şekil 5.55, Şekil 5.56 ve Şekil 5.57'deki gibidir.



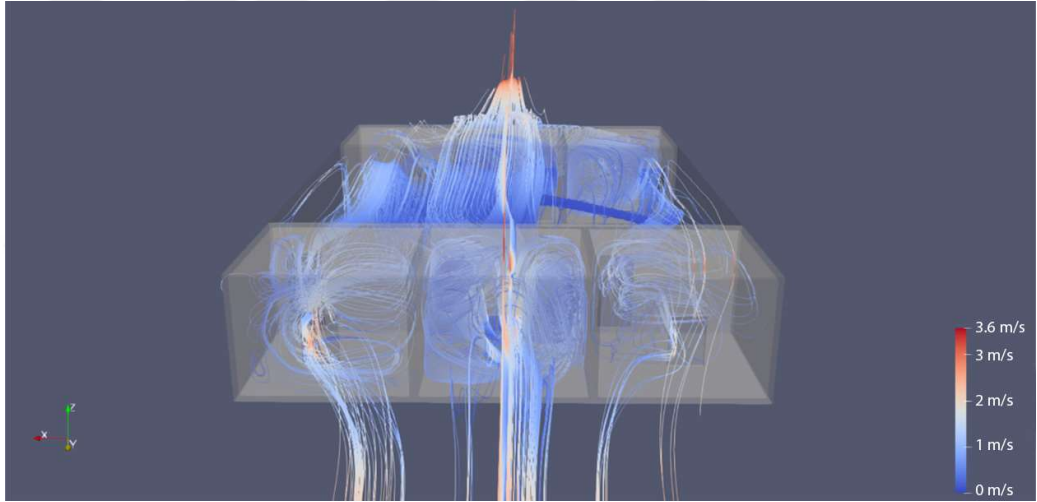
Şekil 5.53 : Sonuçların ParaView aracındaki plan görünümü



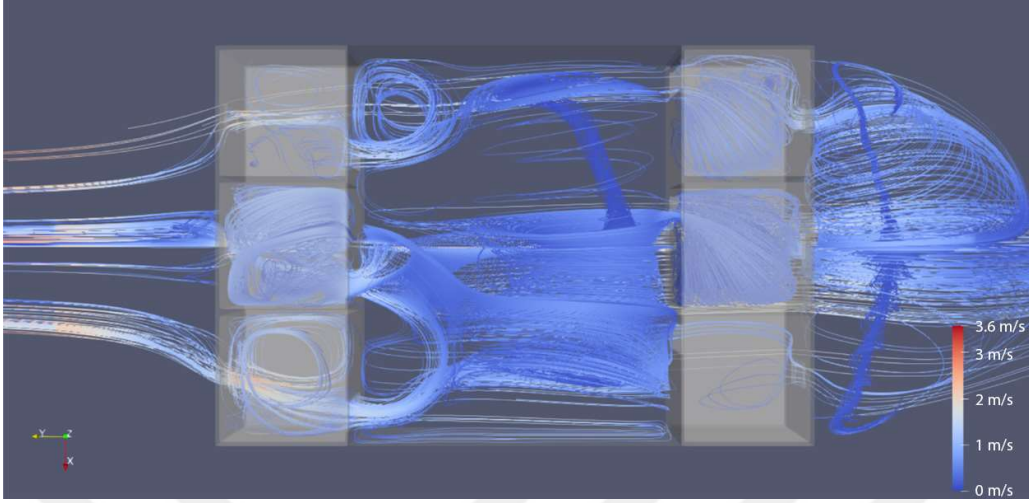
Şekil 5.54 : Sonuçların ParaView aracındaki kesit görünümü



Şekil 5.55 : Sonuçların ParaView aracındaki streamline görünümü – 1



Şekil 5.56 : Sonuçların ParaView aracındaki streamline görünümü – 2



Şekil 5.57 : Sonuçların ParaView aracındaki streamline görünümü – 3

6. SONUÇLAR

Günümüzde, binaların ısı, görsel ve işitsel konfor koşullarını sağlayacak şekilde tasarlanması, pasif tasarım ilkeleri ve yapma sistemler yardımıyla mümkün olmaktadır. Binaların ısı, görsel ve işitsel performanslarının binanın inşasından önce simülasyonlarla değerlendirilmesi ise artık tasarım sürecinin bir parçası haline gelmiştir. Günümüz yapılarında enerji tüketimini iklimsel, çevresel ve tasarıma ilişkin faktörler ile kullanıcı konforu gibi temel değişkenler etkilemektedir. Dünya enerjisinin yaklaşık %40'ının binalar tarafından tüketildiği göz önüne alındığında, enerji simülasyonları ve ısı performans analizleri, enerji etkin ve konforlu yapıların tasarımında büyük önem taşımaktadır. Doğal havalandırma, mekanik sistemler kullanılmadan binalarda havalandırma ve soğutma sağlamanın en etkili yollarından biridir. Bu yöntem, özellikle sıcak ve nemli iklimlerde yüksek nemi azaltarak kullanıcı konforunu artırır ve enerji tüketimini önemli ölçüde düşürür. Bu nedenle rüzgar simülasyonları da enerji etkin bina tasarım sürecinin bir parçası haline gelmiştir. Enerji ve rüzgar simülasyonlarının yapılabilmesi için binaların farklı simülasyon programlarında ayrı ayrı modellenmesi gerekmektedir. Bu süreç; çok sayıda senaryonun test edildiği durumlarda farklı modellerin oluşturulması ve çok fazla simülasyon gerektirmesi nedeniyle çok fazla zaman kaybına yol açmaktadır. Ancak, geliştirilen parametrik modeller sayesinde enerji ve rüzgar simülasyonlarının aynı model üzerinde bağımsız olarak gerçekleştirilebilmesi olanaklıdır. Bu durum tasarım sürecini hızlandırarak mimarların ve mühendislerin zaman kaybını ve iş yükünü azaltır. Bu çalışma kapsamında mimari tasarım sürecinde enerji ve rüzgâr simülasyonlarının aynı algoritma üzerinden parametrik bir model üretilerek gerçekleştirilebilmesi amaçlanmış, çalışmanın adımları tanımlanmış ve avlulu bir bina örneği üzerinden uygulaması gerçekleştirilmiştir.

Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir.

- Çalışmada kapsamında, enerji ve rüzgâr simülasyonları için iki farklı model üretilmesi yerine aynı algoritma üzerinden üretilen ortak bir parametrik model ile simülasyonların yapılması olanaklı olmuştur. Bu durum binanın ısı

performansının belirlenmesi süresini kısaltmakta, dolayısıyla tasarım süresini hızlandırmaktadır.

- Çalışmada geliştirilen ortak parametrik model yardımıyla, bina ısıl performansının belirlenmesi/iyileştirilmesi için analiz edilecek olan olası tüm senaryoların aynı model üzerinde üretilmesi ve test edilmesi de olanaklıdır. Böylece çok sayıda tasarım senaryosu farklı modeller üretilerek değil, aynı modelin modifikasyonu ile elde edilebilmiştir.
- Geliştirilen modelin kullanımında kullanıcılar basitleştirilmiş ve otomatize edilmiş iş adımları sayesinde zamandan büyük oranda tasarruf edeceklerdir.
- Çalışma kapsamında geliştirilen geometrik kütüphane, temel geometrik nesneleri bu nesneler üzerinde yapılan çeşitli operasyonları ve üretilen geometrinin gerekli formatlar ile üretilmesi veya dönüştürülmesini sağlamaktadır. Aynı zamanda bu kütüphanede belirlenen değişkenler doğrudan enerji ve rüzgâr simülasyonunu oluşturacak olan geometriyi üretebilmektedir. Bu nedenle bu kütüphane, ısıl performans değerlendirmesi için gerekli olan modeli temel alarak daha çok sayıda senaryo üretilmesini ve böylece oluşan senaryo havuzları yardımıyla çok sayıda simülasyonun yapılabilmesini sağlamaktadır. Kullanıcıların çok sayıda senaryoyu kolayca oluşturup simülasyonlarda test edebilmesi geometrik kütüphanenin özelliklerine bağlı olduğundan bu kütüphanenin çalışmanın gereksinimleri doğrultusunda güncellenmesi çalışmaya özgü analizlerin yapılabilmesi için önceliklidir.
- Geometrik kütüphanenin farklı konfor gereksinimleri, dolayısıyla farklı simülasyon araçları için genişletilebilir olması, kullanıcıların çeşitli ihtiyaçlarına göre özelleştirilebilir simülasyonlar yapabilmelerini sağlar. Bu esneklik, farklı projelerde kullanılabilirlik açısından büyük bir avantaj sunar.
- Parametrik modelin doğru oluşturulması, çalışmanın gereksinimleri doğrultusunda kullanılan değişkenlerin alt ve üst sınır değerlerinin ve değerler aralıklarının doğru tanımlanmasıyla olanaklıdır. Böylece; çoklu senaryolar paralel hesaplama yöntemleri ile çözümlenerek daha fazla senaryonun kısa sürede analiz edilmesi olanaklı hale gelir.
- Parametrik model yardımıyla oluşturulan çok sayıda senaryo, performans değerlendirmesinde olası tüm senaryo seçeneklerinin üretilmesini sağladığından, çok sayıda sonuç elde etmek ve elde edilen tüm sonuçların

optimizasyon araçları ile değerlendirilmesi kolaylaşır. Bu durum simülasyonların daha kapsamlı ve detaylı bir şekilde incelenebilmesini sağlar. Böylece, en uygun çözümler hızlı ve etkili bir şekilde belirlenebilir.

- Rüzgâr simülasyon sonuçlarının Speckle yardımıyla Linux ortamından bağımsız hale getirilmesi, son kullanıcıların sonuçlara kolaylıkla erişebilmesini sağlar. Böylece, çalışmada üretilen kullanıcı dostu model yardımıyla kullanıcıların simülasyon sonuçlarına erişimi kolaylaşmakta ve model kullanışlı hale gelmektedir.
- Çalışmada üretilen model yardımıyla mimari tasarım sürecinde üretilen tasarım senaryolarının hem enerji hem de rüzgâr simülasyonlarını hızlıca yapmak ve senaryoların ısı performansını değerlendirmek olanaklı hale gelmiştir. Özellikle uzun modelleme ve hesaplama süresi gerektiren rüzgâr simülasyonlarının pratik bir biçimde tasarımcıya veri sağlayacak hale gelmesi kolaylaşmaktadır. Bu durum, tasarım sürecinde çok sayıda senaryo arasından optimum çözümün üretilmesi aşamasında tasarımcının daha hızlı, etkin ve doğru kararlar almasına yardımcı olmaktadır.

İleride yapılacak çalışmalarda ise;

- Model akışının değiştirilerek, önce rüzgâr simülasyonlarının sonra enerji simülasyonlarının yapılması özellikle soğutma öncelikli çalışmalarda daha etkin sonuçların elde edilmesini sağlayacaktır. Bu sayede rüzgar simülasyonunda elde edilen sonuçların enerji simülasyonlarında kullanılabilmesine olanak sağlayabilecektir.
- Rüzgâr simülasyonlarının atmosferik sınır tabakası ile çözümlenmesi, daha gerçekçi ve doğru sonuçlar elde edilmesini sağlayacaktır. Böylece, simülasyonların atmosferik koşullara daha uygun bir şekilde yapılması olanaklı olabilecektir.
- Çözümlemelerin bulut ortamında çözülebilecek bir iş akışına dahil edilmesi, daha hızlı ve verimli simülasyonlar yapılmasını sağlayarak, kullanıcıların simülasyonları daha geniş ölçeklerde ve daha kısa sürede gerçekleştirmesine olanak tanıyacaktır.
- Girdi olan geometrilerin CAD araçlarından Speckle yardımıyla alınıp, Speckle Automate yardımıyla herkesin kolayca kullanabileceği bir iş akışına entegre edilmesi, kullanıcıların geometrik verileri hızlı ve etkili bir şekilde

paylaşmasını sağlayacaktır. Bu entegrasyon, farklı kullanıcıların aynı veriler üzerinde çalışabilmesine olanak tanıyarak iş birliğinin artmasını ve sürecin daha verimli hale gelmesini sağlayacaktır.

- Geliştirilen kütüphaneler, enerji modelleri için idf veya rüzgar simülasyonları için gerekli stl dosyaları üretilbildiği gibi farklı simülasyon araçları için gerekli girdi dosyalarını da üretecek şekilde genişleyebilir. Örneğin aydınlatma simülasyonları için Radiance çözücüsünün ihtiyaç duyduğu dosyalar da ilgili geliştirmeler yapılarak dışarıya aktarılabilir.
- Farklı kullanıcıların da tüm bu kütüphaneleri ve araçları kullanılabileceği arayüzler geliştirilerek daha iyi bir kullanıcı deneyimi hedeflenebilir.

KAYNAKÇA

- Allard, F. & Santamouris, M.** (1998). *Natural ventilation in buildings-a design handbook*. Earthscan Publications Ltd, United Kingdom.
- Almohammadi, K. M., Ingham, D. B., Ma, L., & Pourkashan, M.** (2013). Computational fluid dynamics (CFD) mesh independency techniques for a straight blade vertical axis wind turbine. *Energy*, 58, 483-493.
- Anderson, J.** (2015). *The NACA/NASA Full Scale Wind Tunnel*. National Air and Space Museum. Retrieved from <https://airandspace.si.edu/stories/editorial/nacanasas-full-scale-wind-tunnel>
- ASHRAE.** (2022). *ASHRAE Standard 90.1: Energy standard for buildings except low-rise residential buildings*. <https://www.ashrae.org>
- Baker, T. J.** (2005). Mesh generation: Art or science?. *Progress in Aerospace Sciences*, 41(1), 29-63.
- Balafas, G.** (2014). Polyhedral mesh generation for CFD-analysis of complex structures. Technical University of Munich, Diploma thesis.
- Bekar, M.** (2018). *Sıcak-nemli iklim bölgelerinde avlu boyutlarının binalardaki konfor koşullarına etkisinin değerlendirilmesi*. (Yüksek Lisans Tezi) İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı, İstanbul.
- Berköz, E. Yılmaz, Z., Kocaaslan, G. vd.** (1995). *Enerji etkin konut ve yerleşme tasarımı*, TÜBİTAK Araştırma Raporu, Proje No: İNTAG 201.
- Blocken, B., Janssen, W. D., & van Hooff, T.** (2012). CFD simulation for pedestrian wind comfort and wind safety in urban areas: General decision framework and case study for the Eindhoven University campus. *Environmental Modelling & Software*, 30, 15-34.
- Boccalatte, A., Fossa, M., Gaillard, L., & Menezo, C.** (2020). Microclimate and urban morphology effects on building energy demand in different European cities. *Energy and Buildings*, 224, 110129.

- Bouris, D., Triantafyllou, A. G., Krestou, A., Leivaditou, E., Skordas, J., Konstantinidis, E., ... & Wang, Q.** (2021). Urban-scale computational fluid dynamics simulations with boundary conditions from similarity theory and a mesoscale model. *Energies*, 14(18), 5624.
- Buckner, C., & Garson, J.** (2019). Connectionism. *Stanford Encyclopedia of Philosophy*
- Carlander, J., Moshfegh, B., Akander, J., & Karlsson, F.** (2020). Effects on energy demand in an office building considering location, orientation, façade design and internal heat gains—A parametric study. *Energies*, 13(23), 6170.
- Cavcar, M.** (2000). The international standard atmosphere (ISA). *Anadolu University, Turkey*, 30(9), 1-6.
- Chan A.,L.,S., Chow T.,T., Fong S.,K.,F., Lin J.,Z.** (2006). Generation of a typical meteorological year for Hong Kong. *Energy Conversion Management*,47,87-96.
- Chrobak, P., Skovajsa, J., & Zalesak, M.** (2016). *Effect of cloudiness on the production of electricity by photovoltaic panels*. In MATEC Web of Conferences (76, 02010). EDP Sciences.
- Çengel, Y., & Ghajar, A. J.** (2015). *Isı ve Kütle Transferi*. Palme Yayınları.
- de la Flor, F. J. S., Cebolla, R. O., Félix, J. L. M., & Domínguez, S. Á.** (2005). Solar radiation calculation methodology for building exterior surfaces. *Solar Energy*, 79(5), 513-522.
- Desideri, U., & Asdrubali, F. (Eds.).** (2018). *Handbook of energy efficiency in buildings: a life cycle approach*. Butterworth-Heinemann.
- Ding, F., & Kareem, A.** (2020). Tall buildings with dynamic facade under winds. *Engineering*, 6(12), 1443-1453.
- DOE-2** (1991) *Basics*. <https://doe2.com/Download/DOE-21E/DOE-2BasicsVersion21E.pdf>
- EnergyPlus** (2022). *Engineering Reference*. https://energyplus.net/assets/nrel_custom/pdfs/pdfs_v22.1.0/EngineeringReference.pdf

- Feuermann, D., Gordon, J.M., Zarmi, Y.** (1985). A typical meteorological day (TMD) approach for predicting the long-term performance of solar energy systems, *Solar Energy*, 35(1), 63-69.
- Franke, J.** (2006, July). Recommendations of the COST action C14 on the use of CFD in predicting pedestrian wind environment. In *The Fourth International Symposium On Computational Wind Engineering* (pp. 529-532). Citeseer Yokohama, Japan.
- Franke, J., Hellsten, A., Schlunzen, K. H., & Carissimo, B.** (2011). The COST 732 Best Practice Guideline for CFD simulation of flows in the urban environment: a summary. *International Journal of Environment and Pollution*, 44(1-4), 419-427.
- Hågbo, T. O., & Giljarhus, K. E. T.** (2024). Sensitivity of urban morphology and the number of CFD simulated wind directions on pedestrian wind comfort and safety assessments. *Building and Environment*, 111310.
- Hall I., J., Prairie R., R., Anderson H., E., Boes E., C.** (1978). Generation of a typical meteorological year. In: *Proceedings of the 1978 annual meeting of the American society of the international solar energy society*, p. 641-5.
- Hall, R. C.** (1997). *Evaluation of modelling uncertainty-CFD modelling of nearfield atmospheric dispersion*. EU Project EV5V-CT94-0531, Final Report. WS Atkins Consultants Ltd., Woodcote Grove, Ashley Road, Epsom, Surrey KT18 5BW, UK.
- IEA.** (2023), *World Energy Outlook 2023*, IEA, Paris. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>, License: CC BY 4.0 (report); CC BY NC SA 4.0 (Annex A)
- Irwin, P., Denoon, R., & Scott, D.** (2013). *Wind tunnel testing of high-rise buildings*. Routledge.
- Jameson, A., Martinelli, L., & Pierce, N. A.** (1998). Optimum aerodynamic design using the Navier–Stokes equations. *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, 10(1), 213-237.

- Kadivar, M., Tormey, D., & McGranaghan, G.** (2021). A review on turbulent flow over rough surfaces: Fundamentals and theories. *International Journal of Thermofluids*, 10, 100077.
- Kang, G., Kim, J. J., & Choi, W.** (2020). Computational fluid dynamics simulation of tree effects on pedestrian wind comfort in an urban area. *Sustainable Cities and Society*, 56, 102086.
- Kleiven, T.** (2003). *Natural ventilation in buildings: architectural concepts, consequences and possibilities*. Institutt for byggekunst, historie og teknologi.
- Ko, J., & Steinfeld, K.** (2018). *Geometric Computation: foundations for design*. Routledge.
- Koçlar Oral, G., Erdemir Kocagil, İ., Manioglu, G., Sözen, İ. & Mangan, S.D.** (2019). *Sürdürülebilir, enerji ve maliyet etkin konut ve yerleşme tasarım rehberi*. İstanbul Teknik Üniversitesi BAP Projesi, Proje No: 39965.
- Kortelainen, J.** (2009). *Meshing Tools for Open Source CFD: A Practical Point of View*. VTT Technical Research Centre of Finland
- Li, D. H., & Wong, S. L.** (2007). Daylighting and energy implications due to shading effects from nearby buildings. *Applied Energy*, 84(12), 1199-1209.
- Lin, Y., Hang, J., Yang, H., Chen, L., Chen, G., Ling, H., ... & Lam, C. K. C.** (2021). Investigation of the Reynolds number independence of cavity flow in 2D street canyons by wind tunnel experiments and numerical simulations. *Building and Environment*, 201, 107965.
- Liu, S., Pan, W., Zhang, H., Cheng, X., Long, Z., & Chen, Q.** (2017). CFD simulations of wind distribution in an urban community with a full-scale geometrical model. *Building and Environment*, 117, 11-23.
- Medina, H., Beechok, A., Saul, J., Porter, S., Aleksandrova, S., & Benjamin, S.** (2015). *Open source computational fluid dynamics using OpenFOAM*. In *Royal Aeronautical Society, General Aviation Conference*, 16 November 2015, London.
- Montazeri, H., & Montazeri, F.** (2018). CFD simulation of cross-ventilation in buildings using rooftop wind-catchers: Impact of outlet openings. *Renewable Energy*, 118, 502-520.

- Office of the Historian, Bureau of Public Affairs. (t.y.).** *The oil embargo, 1973-1974. U.S. Department of State.* <https://history.state.gov/milestones/1969-1976/oil-embargo>
- Ok, V. (2005).** Yapma çevre tasarımında rüzgâr etkileri. *Tasarım*, 157, 70-74
- Perén, J. I., Van Hooff, T., Leite, B. C. C., & Blocken, B. (2016).** CFD simulation of wind-driven upward cross ventilation and its enhancement in long buildings: Impact of single-span versus double-span leeward sawtooth roof and opening ratio. *Building and Environment*, 96, 142-156.
- Pusat, S., Ekmekçi, İ., & Akkoyunlu, M. T. (2015).** Generation of typical meteorological year for different climates of Turkey. *Renewable Energy*, 75, 144-151.
- Ramponi, R., & Blocken, B. (2012).** CFD simulation of cross-ventilation flow for different isolated building configurations: validation with wind tunnel measurements and analysis of physical and numerical diffusion effects. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 104, 408-418.
- Ramponi, R., & Blocken, B. (2012).** CFD simulation of cross-ventilation for a generic isolated building: Impact of computational parameters. *Building and environment*, 53, 34-48.
- Som, S., Senecal, P. K., & Pomraning, E. (2012, May).** Comparison of RANS and LES turbulence models against constant volume diesel experiments. *In 24th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, ILASS Americas, San Antonio, TX.* 5, 15.
- Stefanescu, Dimitrie A; (2020)** *Alternate Means of Digital Design Communication.* (Doktora tezi), University College London.
- Temam, R. (2001).** *Navier-Stokes equations: theory and numerical analysis.* Elsevier Science Publishers B.V.
- TS EN ISO 7730. (2006).** *Isıl çevrenin ergonomisi – PMV ve PPD indislerinin hesabını ve bölgesel ısı konfor kriterlerini kullanarak ısı konforun analitik olarak belirlenmesi ve yorumu,* Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TSE. (2013).** *TS 825: Binalarda ısı yalıtım kuralları.* Türk Standartları Enstitüsü.

- Wang, C., Pattawi, K., & Lee, H. (2020).** Energy saving impact of occupancy-driven thermostat for residential buildings. *Energy and Buildings*, 211, 109791.
- Woodbury R. (2010).** *Elements of Parametric Design*. Routledge.
- Yang, L., & Ye, M. (2014).** CFD simulation research on residential indoor air quality. *Science of the Total Environment*, 472, 1137-1144.
- Zevenhoven, R., Erlund, R., & Tveit, T. M. (2019).** Energy efficiency of exhaust air heat recovery while controlling building air humidity: A case study. *Energy Conversion and Management*, 195, 1238-1243.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Oğuzhan Koral

ÖĞRENİM

Lisans : 2018, İstanbul Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi,
Mimarlık Bölümü

DENEYİM

2018-2019 : Mimar - Alkazar Mühendislik, İstanbul, Türkiye

2019-2022 : Yazılım Mühendisi - AgiliCity d.o.o., Ljubljana, Slovenya

2022-2024 (Halen) : Yazılım Mühendisi – Speckle, Londra, Birleşik Krallık

ÖDÜLLER

2015 - Design Now Autodesk Fusion 360 Ürün tasarım yarışması – 2.lık

2016 - Betonik Fikirler Öğrenci Yarışması – 1.lık

2019 - Cemer Düşten Gerçeğe Uluslararası Proje Yarışması – 1.lık

2020 - Sürdürülebilir Geleceği Tasarla – En iyi uygulama ödülü