

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**RÜZGAR TARLASI VERİSİ KULLANILARAK ANALİTİK RÜZGAR TÜRBİN
İZİ MODELLERİNİN PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tarık KAYTANCI

Meteoroloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Atmosfer Bilimleri Programı

HAZİRAN 2016

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**RÜZGAR TARLASI VERİSİ KULLANILARAK ANALİTİK RÜZGAR TÜRBİN
İZİ MODELLERİNİN PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tarık KAYTANCI

Meteoroloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Atmosfer Bilimleri Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Şükran Sibel MENTEŞ

HAZİRAN 2016

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 511121017 numaralı Yüksek LisansÖğrencisi Tarık KAYTANCI, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “RÜZGAR TARLASI VERİSİ KULLANILARAK ANALİTİK RÜZGAR TÜRBİN İZİ MODELLERİNİN PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ”başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Şükran Sibel MENTEŞ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Ahmet Duran Şahin**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Ferhat Bingöl
İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü

Teslim Tarihi : **2 Mayıs 2016**
Savunma Tarihi : **14 Haziran 2016**

ÖNSÖZ

Tüm tez sürecinde beni sürekli olarak motive eden ve tezim konusunda bana her türlü katkıda bulunan tez danışmanım Prof. Dr. Şükran Sibel Menteş'e teşekkür etmek isterim.

İstanbul Teknik Üniversitesi Meteoroloji Gözlem Parkı rüzgar ölçüm verisi konusunda yardımlarda bulunan Prof. Dr. Ahmet Duran Şahin'e ve Arş. Gör. Bihter Yerli'e ve Yılmaz'a WindSim yazılımını öğrenmemde yardımda bulunan Atmosfer Bilimleri programı yüksek lisans öğrencisi ve arkadaşım Erkan Yılmaz'a teşekkür etmek isterim.

Son olarak, beni, tüm hayatım boyunca aldığım kararlarda destekleyen aileme de teşekkür etmek isterim.

Mayıs 2016

Tarık Kaytancı
(Enerji Sistemleri Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
SEMBOLLER	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
2. TEORİ.....	11
2.1 Atmosferik Sınır Tabaka	11
2.1.1 Atmosferik kararlılık	15
2.1.2 Türbülans	16
2.2 Aktüatör Disk Kavramı	17
2.2.1 Momentum teorisi	19
2.2.1.1 Güç katsayısı	20
2.2.1.2 İtki katsayısı	20
2.3 İz Teorisi	21
2.3.1 Yakın iz ve uzak iz	21
2.3.2 İz menderesi	24
2.3.3 Rota sapması	25
3. VERİ, ANALİTİK RÜZGAR TÜRBİN İZİ MODELLERİ VE WINDSIM .	27
3.1 Veri.....	27
3.1.1 İstanbul teknik üniversitesi meteoroloji gözlem parkı verisi	27
3.1.2 Çatalca rüzgar enerji santrali verisi	30
3.2 Analitik Rüzgar Türbin İzi Modelleri ve WindSim	33
3.2.1 Standard Jensen iz modeli	33
3.2.2 Larsen iz modeli	35
3.2.3 Frandsen iz modeli	36
3.2.4 Yeni Jensen iz modeli	37
3.2.5 WindSim	41
4. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	47
4.1 Atmosferik, Topografik ve Aerodinamik Parametrelerin Değişimlerine Bağlı Rüzgar Türbini İzi Modellerinin Öngörülleri	49
4.2 İstanbul Teknik Üniversitesi Meteoroloji Gözlem Parkı Sonuçları	60
4.3 Çatalca Rüzgar Enerji Santrali Sonuçları	63
5. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER	69
5.1 Sonuçlar	69
5.2 Öneriler	70
KAYNAKLAR	73
EKLER.....	77

ÖZGEÇMİŞ.....	85
----------------------	-----------

KISALTMALAR

CFD	: Computational Fluid Dynamics
EWTS-II	:European Wind Turbine Standards-II
GH	: Garrad Hassan
GW	: Giga Watt
GWEC	: Global Wind Energy Council
GWR	: Global Wind Repor
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
İTÜ	: İstanbul Teknik Üniversitesi
LDA	: Laser Dopler Anomemetresi
MW	: Mega Watt
OH	: Ortalama Hata
OMH	:Ortalama Mutlak Hata
OpenFOAM-LES	: Open source Field Operation And Manipulation- Large Eddy Simulation
TREİR	: Türkiye Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporu
WAsP	:Wind Atlas Analysis and Application Program

SEMBOLLER

A_r	: Türbin rotorunun süpürme alanı
A_w	: İz alanı
α	: Eksensel akış indüksiyonu faktörü
C_P	: Güç katsayısı
C_{Pmax}	: Maksimum güç katsayısı
C_T	: İtme katsayısı
c_1	: Prandtl karışım uzunluğu ile ilişkili bir sabit
D, D_r	: Türbin rotorunun çapı
D_w	: İz çapı
D_{eff}	: Efektif rotor çapı
F	: Hava üzerindeki kuvvet
f	: Coriolis parametresi
H	: Isı akısı
I, I_0, I_a	: Atmosferik türbülans yoğunluğu
I_{wake}	: Efektif türbülans yoğunluğu
K_n	: Yeni Jensen modelinde kullanılan bir sabit
k_w, k_0	: İz sönüm katsayısı
k_{wake}	: İz sönüm parametresi
k	: Türbülanslı kinetik enerji
L	: Monin-Obukhov uzunluğu
p_∞	: Çevre basıncı
p_d^+, p_d^-	: Rotor (disk) eksenindeki basınç
$R_{9.5}$	: 9.5 rotor çapı mesafedeki iz yarıçapı
r	: İz ekseninden olan yanal mesafe
r_r, r_d	: Türbin rotorunun yarıçapı
r_w	: İz yarıçapı
r_1	: Karakteristik rüzgar-altı rotor yarıçapı
T	: Hava parçası sıcaklığı
U	: Rüzgar şiddeti
$\bar{U}$	: Ortalama Rüzgar şiddeti
U_d	: Disk (rotor) düzlemindeki rüzgar şiddeti
U_∞	: Serbest akıştaki rüzgar şiddeti
U_w, U^*	: İzdeki rüzgar şiddeti
u^*	: Sürtünme hızı
$\overline{u_i u_j}$	: Reynolds gerilimi
x	: Rüzgar-altı mesafesi
x_0	: Atmosferik türbülans yoğunluğu
z	: Yükseklik
z_h, H	: Türbin gövde yüksekliği
z_0	: Pürüzlülük uzunluğu
α	: Kayma (gradyen) üstü

α^*	: İz genişleme faktörü
β	: İtke katsayısına bağlı bir fonksiyon
δ_{ij}	: Krocnecker delta fonksiyonu
ν_T	: Türbülanslı viskozite
ΔU	: İz ile çevre arasındaki rüzgar şiddeti farkı
κ	: Von Karman sabiti
λ	: Enlem
ρ	: Hava yoğunluğu
σ	: Ortalama rüzgar şiddetinin standart sapması
Γ	: Adiyabatik düşme oranı
ψ_m	: Atmosferik kararlılığa bağlı bir fonksiyon
Ω	: Yeryüzünün rotasyonel hızı
Φ_m	:Logaritmik profil için genel düzeltme fonksiyonu

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1: İTÜ meteoroloji gözlem parkında kurulu olan Unitron E15 rüzgar türbininin bazı özellikleri (Kaymak ve diğ., 2011).....	28
Çizelge 3.2: Seçilmiş rüzgar yönleri için atmosferik, topografik ve aerodinamik veriler	29
Çizelge 3.3: Tekli iz durumu testi için seçilmiş rüzgar türbin çiftleri arasındaki mesafe ve merkez eksen açısı	32
Çizelge 4.1: Modellerin (tek başlarına) her tekli iz testindeki ve toplamdaki ortalama mutlak hatası ve ortalama hatası	67
Çizelge 4.2: HADdestekli modellerin (sadece standart Jensen ve Larsen modelleri) her tekli iz testindeki ve toplamdaki ortalama mutlak hatası ve ortalama hatası	68

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Bir rüzgar türbininin aktüatör disk modeli (Burton ve diğ., 2001)	17
Şekil 2.2: Güç ve itki katsayısının eksensel akış indüksiyon faktörü, a , ile değişimi (Burton ve diğ., 2001)	21
Şekil 2.3: Rüzgar türbinin iz gelişimi ve izdeki rüzgar profili (Sanderse, 2009)	22
Şekil 2.4: İz menderesi (Larsen ve diğ., 2007)	24
Şekil 2.3: İz şeklinin deformasyonunun görsel gösterimi (Howland ve diğ., 2016) .	26
Şekil 3.1: İTÜ meteoroloji parkında 2009 ve 2010 yılları rüzgar dağılımı.	28
Şekil 3.2: Çatalca rüzgar enerji santralindeki türbinlerin koordinatları.	30
Şekil 3.3: 2010 yılı ve 2010 yılı Ocak ayı için rüzgar dağılımı.	31
Şekil 3.4: Vestas V90 rüzgar türbininin itki katsayısı ve güç eldesi eğrisi.	33
Şekil 3.5: Çatalca Rüzgar Enerjisi Santrali için oluşturulan dijital arazi modeli - düşey yöndeki hesaplama ağı.	44
Şekil 3.6: Çatalca Rüzgar Enerjisi Santrali için oluşturulan dijital arazi modeli - yatay yöndeki hesaplama ağı.	44
Şekil 3.7: Çatalca Rüzgar Enerjisi Santrali için oluşturulan dijital arazi modeli - pürüzlülük yüksekliği (metre).	45
Şekil 3.8: Çatalca Rüzgar Enerjisi Santrali için oluşturulan dijital arazi modeli - yükselti haritası (metre).	45
Şekil 4.1: Türbülans yoğunluğu değişiminin iz çapı gelişimi üzerindeki etkisi (a) $I_a=0.05$. (b) $I_a=0.1$. (c) $I_a=0.2$. (d) $I_a=0.3$	50
Şekil 4.2: Türbülans yoğunluğu değişiminin iz hızı gelişimi üzerindeki etkisi (a) $I_a=0.05$. (b) $I_a=0.1$. (c) $I_a=0.2$. (d) $I_a=0.3$	52
Şekil 4.3: İtke katsayısı değişiminin iz çapı gelişimi üzerindeki etkisi (a) $C_T=0.8$ (b) $C_T=0.6$ (c) $C_T=0.7$ (d) $C_T=0.8$	54
Şekil 4.4: İtke katsayısı değişiminin iz hızı gelişimi üzerindeki etkisi. (a) $C_T=0.8$ (b) $C_T=0.6$ (c) $C_T=0.7$ (d) $C_T=0.8$	55
Şekil 4.5: Pürüzlülük uzunluğu değişiminin iz çapı gelişimi üzerindeki etkisi (a) $z_0=0.0001$ m. (b) $z_0=0.01$ m. (c) $z_0=0.15$ m. (d) $z_0=0.3$ m.	57
Şekil 4.6: Pürüzlülük uzunluğu değişiminin iz hızı gelişimi üzerindeki etkisi (a) $z_0=0.0001$ m. (b) $z_0=0.01$ m. (c) $z_0=0.15$ m. (d) $z_0=0.3$ m.	58
Şekil 4.7: İz çapının mesafe ile gelişimi.	60
Şekil 4.8: Normalleştirilmiş iz hızının mesafe ile gelişimi	61
Şekil 4.9: Hipotetik bir rüzgar-altı türbininin farklı mesafelerdeki varsayımında iz türbin etkileşiminin rüzgar yönü ile değişimi.	63
Şekil 4.10: Tekli iz testlerinde modellerin hem tek başlarına hem de hesaplamalı akışkan dinamiği yardımıyla performansları: (a) Türbin - Türbin 2 testi. (b) Türbin 1- Türbin 9 testi. (c) Türbin 11 - Türbin 17 testi. (d) Türbin 11 - Türbin 14-a testi (5-7 m/s gelen rüzgar girdisi için). (e) Türbin 11 - Türbin 14-b testi (8-10 m/s gelen rüzgar girdisi için).	64

Şekil A.1: İTÜ meteoroloji gözlem parkındaki türbine ve türbinin bulunduğu lokasyona ait fotoğraflar: (a) kuzeyden görünüm (en sağda Akom marka ölçüm direği bulunmaktadır). (b) kuzeyden başka bir görünüm. (c) kuzeyinde bulunan bir yapı (d) kuzey-doğusuna ait bir görüntü. (e) kuzey-doğusuna ait bir başka görüntü.....	78
Şekil B.1: İz çapının mesafe ile gelişimi (a) 37 derece (rüzgar yönü) durumu için. (b) 24.8 derece durumu için. (c) 39.7 derece durumu için. (d) 49.3 derece durumu için.....	81
Şekil C.1: İz hızının mesafe ile gelişimi (a) 37 derece (rüzgar yönü) durumu için. (b) 24.8 derece durumu için. (c) 39.7 derece durumu için. (d) 49.3 derece durumu için.....	83

RÜZGAR TARLASI VERİSİ KULLANILARAK ANALİTİK RÜZGAR TÜRBİN İZİ MODELLERİN PERFORMANSLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

ÖZET

Kısıtlı uygun alan ve daha düşük nakliye, kurulum ve bakım maliyeti gibi ekonomik nedenlerden dolayı rüzgar türbinleri rüzgar tarlası olarak adlandırılan birçok türbinin kısıtlı bir alanın sınırları içerisinde bulunabileceği bir arazi üzerinde gruplandırılır. Rüzgar tarlasındaki rüzgar türbinleri, toplamda her birinin tek başına üreteceği durumdaki toplam güç üretimden daha düşük güç üretir. Bu durumun nedeni iz etkisidir. İz etkisindeki rüzgar-altı türbinleri daha düşük rüzgar şiddetine ve daha yüksek türbülans seviyesine maruz kalacaktır. Daha düşük rüzgar şiddeti rüzgar türbinin daha düşük güç üretimine neden olurken daha yüksek türbülans seviyesi rüzgar türbinin kullanım ömrünü azaltmaktadır. İz etkisinden dolayı güç kayıpları %20 mertebelerinde olabilir. Güç üretimindeki kayıplar lokal rüzgar rejimi, topografik karakteristikler ve türbinin aerodinamik karakteristikleri gibi bir çok faktöre bağlıdır. Bir rüzgar tarlasında iz etkisini minimize ederek güç üretimini maksimize edebilmek için rüzgar tarlası sınırları içerisinde, türbinler arası en iyi düzende konuşlandırılmalıdır. Bunun için analitik ve hesaplamalı olmak üzere iki farklı iz modelleri geliştirilmiştir.

Bu tez çalışması iki adımdan oluşmaktadır. İlk adımda, tüm tez boyunca kullanılacak analitik rüzgar türbin izi modellerinden standart Jensen modelinin, geliştirilmiş yeni Jensen modelinin, Frandsen modelinin ve Larsen modelinin, İstanbul Teknik Üniversitesi Meteoroloji Gözlem Parkında kurulu olan küçük ölçekli rüzgar türbini ve ölçüm direğinden elde edilen ölçüm verileri kullanılarak başlangıç iz çapı, mesafeyle iz çapının gelişimi, ve mesafeyle izle serbest akış arasındaki rüzgar şiddet farkının azalma hızı gibi karakteristikleri sunulmuştur. Ayrıca rüzgar yönü türbini ekseninde sırayla farklı rüzgar-altı mesafelerde hizalanmış bir rüzgar-altı türbini varsayımında, modellerin farklı rüzgar yönlerinde tam iz, kısmi iz ve sıfır iz öngörüsü sunulmuştur. Bu adımda, Larsen ve Frandsen modeli başlangıçta diğer iki modelden daha büyük iz çapına sahiptir ancak en büyük iz çapı ve en büyük iz çapı gelişimi Larsen modelinde görülmüştür. Ancak, her iki Jensen modeli, belirli bir mesafeden Frandsen modelinden daha büyük iz çapı öngördüsüne sahiptir. Mesafeyle izle serbest akış arasındaki rüzgar şiddet farkının azalma en hızlı yeni Jensen modelinde gözlenmesine rağmen tüm mesafeler boyunca izdeki rüzgar şiddetinin serbest akıştakine oranı (normalleştirilmiş iz hızı) en yüksek Larsen modelinde gözlenmiştir. Bir rüzgar yönü türbinin türbin ekseninde sırayla farklı mesafelerde hizalanmış bir rüzgar-altı türbini varsayımı ile değişen rüzgar yönü durumunda, Larsen modeli uzak iz başlangıcının ötesindeki bir mesafeye kadar sadece tam iz etkisine sahip olduğu bulunmuştur ve tam iz etkisi açısından her mesafede en büyük öngörüye sahiptir. Yeni Jensen modeli standart Jensen modeline göre her mesafede hem tam hem de kısmi iz etkisi açısından daha geniş bir etki alanına sahiptir. Frandsen modeli her iki Jensen modelinden başlangıçta daha büyük

tam ve kısmi iz etki açısı öngörmesine rağmen belirli bir mesafeden sonra her iki Jensen modeli de daha büyük tam ve kısmi iz etki açısına sahiptir.

Bu tezin asıl amacı olan bir sonraki adımda kompleks bir arazide üzerinde kurulu olan Çatalca Rüzgar Enerji Santralinden alınan ölçüm verileri kullanılarak tekli iz durumu için modellerin hem Hesaplamalı Akışkan Dinamiği (HAD) teknolojisine dayalı WindSim yazılımı yardımıyla hem de HAD desteği olmadan tek başlarına ölçüm verileri ile uyumu test edilip modeller arasında kıyaslama yapılmıştır. Buradaki amaç HAD desteği olduğunda ve olmadığında (tek başına uygulandığında) modellerin kompleks bir arazi üzerindeki performansını test etmektir. Beş farklı tekli iz durumu test edilmiştir. WindSim analitik rüzgar türbin izi modeli standart Jensen, Larsen ve Ishihara modellerini içermektedir. Ancak, HAD destekli analitik rüzgar türbin izi olarak sadece standart Jensen ve Larsen modelleri kullanılmıştır. Türbinler kompleks bir arazi üzerinde bulunduğundan ölçüm verisinde rüzgar altı türbinindeki ölçülen rüzgar şiddeti ile rüzgar yönü türbinindeki ölçülen rüzgar şiddeti arasındaki oranın 1'den daha büyük olduğu veriler bulunmaktadır. Bu durumun özellikle modellerin tek başlarına uygulandığında gözlem verileriyle olan uyumunda zorluklar oluşturduğu gözlenmiştir. Test sonuçlarına göre, tek başına uygulanan hiçbir analitik rüzgar türbin izi modeli diğerlerine göre belirgin bir üstlük sağlayamamıştır. Modeller birbirine yakın sonuç vermiştir. Her tekli iz durumu testinde tek başlarına uygulanan modeller bazı testlerde ölçüm verileriyle uyum sağlayamazken bazı testlerde iyi uyum sağlamıştır. Toplam durum göz önünde bulundurulduğu yeni Jensen modeli % 9.7 ortalama mutlak hata, standart Jensen modeli % 9.9 ortalama mutlak hata, Frandsen modeli % 9.4 ortalama mutlak hata ve Larsen modeli en iyi sonuçla % 9.1 ortalama mutlak hata sergilemiştir. Frandsen modeli Larsen modelinden sonra en iyi ikinci mutlak ortalama hata sonucuna sahip olmasına rağmen, modelin kara ve özellikle kompleks araziler için uygun olmadığı gözlenmiştir. HAD destekli analitik iz rüzgar türbin izi modellerinden standart Jensen modeli ve Larsen modeli tüm türbin çiftleri testleri için ayrı ayrı değerlendirildiğinde, genelde hem HAD desteği olmayan standart Jensen ve Larsen modellerine göre hem de diğer HAD-desteği olmayan modellere (yeni Jensen ve Frandsen modelleri) göre daha düşük bir performans sergilemiştir. Eğer HAD destekli standart Jensen ve Larsen modelleri, sırasıyla, standart Jensen- WindSim modeli ve Larsen-WindSim modeli olarak adlandıırırsak, toplam durum göz önünde bulundurulduğunda standart Jensen-WindSim modeli % 14.3 modelinin ortalama mutlak hata ve Larsen-WindSim modeli % 12.7 ortalama mutlak hata sergilemiştir. Bu kötü performansın nedeni HAD destekli modellerin rüzgar altı rüzgar türbinin kabul edeceği rüzgar yönü için rüzgar yönü ölçüm verilerine kıyasla oldukça farklı öngörmesi olabilir. HAD destekli modeller uygulanırken rüzgar üstü türbinleri rüzgar yönü ve şiddeti verisi için ölçüm verilerinden yararlanılmıştır. Modeller rüzgar altı türbinleri öngördüğü rüzgar yön değerleri rüzgar üstü türbinlerinde ölçülen rüzgar yön değerlerine yakın değerlerine yakın değerdedir. Modeller tek başlarına uygulanırken hem rüzgar üstü türbini hem de rüzgar altı türbini için ölçüm verisinden yararlanılmıştır.

EVALUATION OF PERFORMANCES OF ANALYTICAL WIND TURBINE WAKE MODELS USING WIND FARM DATA

SUMMARY

Due to limited suitable area and economical reasons such as lower transportation, installation and maintenance costs, wind turbines are grouped into wind farms with a limited areas. Wind turbines in a wind farm produce less power than their standalone power productions. The reason of less power production is wake effect. Downwind turbines in the wake effect of upwind turbines experience lower wind speed and higher turbulence intensity. Lower wind speed and higher turbulence intensity cause less power production and shorter turbine lifetime, respectively. Power loss due to wake effect can be in the order of 20 %. Loss of power production are based on many reasons such as local wind regime, topographical characteristics and turbine aerodynamics. The best wind farm layout should be optimized to maximize the power production of wind farm. For wind farm layout optimization, two different wake models, analytical and computational, have been developed. Due to computational efficiency, analytical wake models are preferred for wind farm layout optimization. However, these analytical wake models still must be validated with measurement data from wind-tunnel experiments or wind farms to ensure that their predictions are correlated well with measurement data. There are many analytical wind turbine wake models used in the wind power industry such as Jensen model, Frandsen model, Larsen model, Ishihara model and etc.

In the first step of this thesis, basic four different analytical wake models, standard Jensen, new Jensen, Frandsen and Larsen models, were used to obtain their characteristics such as initial wake diameter prediction, its development with distance and recovery speed of wake velocity deficit with distance using the data of small-scale wind turbine and wind measurement mast from Meteorological Park at Istanbul Technical University. In the first step of this thesis, these models were also used to obtain three different wake effect condition (full wake, partial wake and no wake condition) for varied wind direction in the case of hypothetical downwind wind turbine in wake of upwind turbine. In the second step of thesis, both these basic analytical models and analytical models assisted with WindSim software based on Computational Fluid Dynamics (CFD) technology were tested to evaluate their performances in a complex terrain. WindSim include three different wake models which are standart Jensen, Larsen and Ishihara models. In this thesis, only standard Jensen and Larsen models were selected as analytical model assisted by CFD. For this performance evaluation, wind data from Çatalca Wind Farm on complex terrain were used. Secondstep is the primary objective of this thesis. In this step five different single wake cases were tested.

Standard Jensen analytical wake model is one of the oldest analytical wake models. This model assumes that wake behind the turbine expands linearly with distance and velocity deficit is only function of downwind distance of upwind turbine and has

uniform profile. Standard Jensen model neglects contribution from tip vortex and assumes fully turbulent wake, and thus, this model is not usable for near wake predictions. Equation of wake velocity is as follows

$$U_w = U_\infty \left(1 - \frac{2a}{\left(1 + k_w \frac{x}{r_1}\right)^2}\right)$$

Here, x is downwind distance, U_∞ unperturbed free stream velocity, r_1 is characteristic downwind rotor radius that represents expanding wake diameter immediately behind the turbine, and a is axial flow induction factor. Equation of axial flow induction factor, depends on thrust coefficient C_T , and characteristic downwind rotor radius are, respectively, as follows

$$a = \frac{(1 - \sqrt{1 - C_T})}{2}$$

$$r_1 = r_r \sqrt{(1 - a)(1 - 2a)}$$

Here, r_r is rotor radius of turbine. Wake expands linearly with a coefficient called wake decay constant, k_w . Wake decay constant and the spread wake radius are, respectively, as follows

$$k_w = \frac{1}{2 \ln\left(\frac{z_h}{z_0}\right)}$$

$$r_w = k_w x + r_r$$

Here, z is wind turbine hub height and z_0 is roughness length of interested terrain.

New Jensen analytical wake model was developed based on standard Jensen model. This model uses cosine-shape wake velocity profile instead of uniform profile in standard Jensen model. Also, this model uses a wake decay parameter, that depends on both atmospheric turbulence and turbine-generated turbulence, instead of a wake decay constant, that depends only on atmospheric turbulence, in standard Jensen model. In new Jensen model, wake velocity profile is as follows

$$U_w = (U_\infty - U^*) \cos\left(\frac{\pi}{r_x} r + \pi\right) + U^*$$

Here, U^* is wake velocity profile in standard Jensen model, U_∞ is unperturbed free stream velocity. r is radial distance from wake centerline. This model represent a new effective turbulence model, that includes contributions of both atmospheric (ambient) and turbine-generated turbulences, and equation of that model is as follows

$$I_{wake} = K_n \frac{C_T}{x/D} + I_0$$

Here constant K_n is assumed to be 0.4. D is rotor diameter and I_0 is ambient turbulent intensity. Equation of wake decay parameter is as follows

$$k_{wake} = k_0 \frac{I_{wake}}{I_0}$$

Here, as subscript 'wake' indicates wake flow area, subscript '0' indicates free stream area. The parameters that have subscript '0', is estimated from standard Jensen model. Finally, estimated wake decay parameter is put into standard Jensen model instead of original wake decay constant.

Third model used in this thesis is Frandsen model. Frandsen model was developed to analyze wake behavior for entire wind farm rather than wake behavior in individual turbines. In this model, there are three different wake regimes. First regime assumes no mutual interaction of single or multiple wakes with neighbor wakes. Second regime assumes two neighbor wakes interacts and wake expansion is limited only in vertical direction. Third regime assumes wake flow is balanced with planetary boundary layer. This last regime is seen for infinitely large wind farms. This model has uniform wake velocity profile. For single wake case, wake velocity is as follows

$$U_w = \frac{1}{2}U_\infty \pm \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{1}{2}U_\infty \frac{A_r}{A_w} C_T}$$

Here, A_r is swept area of rotor and A_w is area of wake. Wake diameter is

$$D_w = D_r (\beta^{\frac{k}{2}} + \alpha^* x)^{\frac{1}{k}}$$

Here, wake expansion parameter β , is as follows

$$\beta = \frac{1 + \sqrt{1 - C_T}}{2\sqrt{1 - C_T}} = \left(\frac{D_{eff}}{D} \right)^2$$

where coefficients k and α^* are, respectively, 2 and order of $10k_w$. k_w is the wake decay constant used in standard Jensen model.

Last analytical wake model used in the thesis is Larsen model. This model is based on Prandtl's turbulent boundary layer equations. A self-similar wind profile is assumed and Prandtl's mixing length theory is used to obtain closed-form solution. Flow is axisymmetric due to assumptions of incompressible and steady flow and no-slip condition.

Both first order and second order approximate solutions were represented by Larsen. Second order approximate solution can solve double dips in the near wake wind profile. Equation of wake deficit $(\Delta U)_1$ and wake radius r_w are, respectively, represented below

$$(\Delta U)_1 = -\frac{U_\infty}{9} (C_T A (x + x_0)^{-2})^{\frac{1}{3}} \left[r^{\frac{3}{2}} (3c_1^2 C_T A (x + x_0))^{-\frac{1}{2}} - \left(\frac{35}{2\pi} \right)^{\frac{2}{10}} (3c_1^2)^{\frac{1}{5}} \right]^2$$

$$r_w = \left(\frac{35}{2\pi}\right)^{\frac{1}{5}} (3c_1^2)^{\frac{1}{5}} (C_T A(x + x_0))^{\frac{1}{3}}$$

where c_1 is related to Prandtl's mixing length and x_0 is position of rotor according to applied coordinate system. These constants are, respectively, represented below

$$c_1 = \left(\frac{D_{eff}}{2}\right)^{\frac{5}{2}} \left(\frac{105}{2\pi}\right)^{\frac{-1}{2}} (C_T A x_0)^{\frac{5}{6}}$$

$$x_0 = \frac{9.5D}{\left(\frac{2R_{9.5}}{D_{eff}}\right)^3 - 1}$$

Here, D_{eff} is effective rotor radius and its formula is as follows

$$D_{eff} = D \sqrt{\frac{1 + \sqrt{1 - C_T}}{2\sqrt{1 - C_T}}}$$

Wake radius of upwind turbine at distance of 9.5 rotor diameter $R_{9.5}$ is estimated in following equation

$$R_{9.5} = 0.5[R_{nb} + \min(z_h, R_{nb})]$$

Here, R_{nb} is

$$R_{nb} = \max(1.08D, 1.08D + 21.7D(I_a - 0.05))$$

Here, I_a represents ambient turbulent intensity.

In this thesis analytical wind turbine models were applied with aid of WindSim software based on CFD technology. WindSim is a modern and developed wind farm design tool supported with CFD technology. In simulation of wind field in WindSim, Reynolds-averaged Navier-Stokes equations is solved with finite volume method using Phoenix solver that is a general purpose CFD code. RANS equations are given below :

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0$$

$$U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \overline{u_i u_j} \right)$$

Here, first equation and second equation represent continuity equation and momentum equation, respectively. U , x , p , ρ , ν represent velocity, pressure, density and kinematic viscosity. Subscripts i and j represent unit vectors. The term $\overline{u_i u_j}$ represent Reynolds stresses and its formula is given below.

$$\overline{u_i u_j} = -\nu_T \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \delta_{ij} k$$

Here, ν_T , k and δ represent turbulent viscosity, turbulent kinetic energy and Kronecker delta function.

WindSim include 6 different modules that are terrain, wind field, objects, results, wind resources and energy. Terrain module allows to establish the numerical model based on height and roughness data. Wind field module provides calculation of numerical wind fields. In the objects module wind turbines and climatology data are placed. Results module provides to analyze wind fields. Wind Resources module allows to couple the numerical wind fields with climatology data by statistical means to provide wind resource map. Energy module calculates annual energy production of a wind farm, including wake losses.

For results in the first step of the thesis which is to represent characteristics of five different basic analytical wind turbine wake models, Larsen and Frandsen models predicted larger wake diameter than other two wake models initially, but the largest wake diameter prediction and the largest wake diameter increase with distance were predicted by Larsen model. After a specific downwind distance, both Jensen models predicted larger wake diameter than Frandsen model. Although, recovery of wake was predicted faster by new Jensen model, lowest normalized wake velocity deficit for all downwind distance was predicted by Larsen model. In the case of model predictions of three different wake effect conditions for varied wind direction, Larsen model predicted only full wake till a specific downwind distance beyond far wake, and also predicted largest full wake width for all downwind distances. New Jensen model predicted larger full and partial wake width for all downwind distance than standard Jensen model. Although Frandsen model predicted larger full and partial wake width than both Jensen models, both Jensen model predicted larger full and partial wake diameter than Frandsen model after some downwind distance.

For results in the second step which is primary objective of thesis and evaluations of performances of both basic and CFD assisted analytical wind turbine wake models in complex terrain using measurement data, some measured normalized downwind turbine wake velocity data is greater than 1 due to complex terrain. This situation causes complications for validation of wake models especially basic analytical wake models. As a result of all tests for basic analytical wake models, no clear-cut result which model has the best accuracy to predict normalized wake velocity. All model results were close each other. For consideration of every single wake tests separately, while models have poor performance for some single wake cases, they have good performances for others. For consideration of cumulative performance of each model, new Jensen model, standard Jensen model, Frandsen model and Larsen model had mean absolute error of 9.7 %, 9.9 %, 9.4 % and 9.1 %, respectively. Although Frandsen model had second best performance. If Analytical wake models assisted by CFD, that are standard Jensen and Larsen models are evaluated separately with both basic standard Jensen and Larsen models and other basic analytical wake models (new Jensen and Frandsen models) for each single wake case, these models assisted by CFD generally exhibited more poor performance. For consideration of cumulative performance of each model assisted by CFD, standard Jensen and Larsen models assisted by CFD had mean absolute error of 14.3 % and 12.7 %, respectively.

Although CFD has better accuracy to solve wind field in a complex terrain, the reason of poor performance of analytical wake models assisted by CFD by comparing with basic analytical wake models in the complex terrain may be differences between wind direction prediction of analytical wake model assisted by CFD and measurement data of wind direction for downwind turbine. In the application of analytical wake models assisted by CFD for each single wake case, wind measurement data of upwind turbine was used for wind input data for upwind turbine inserted in WindSim. These models predicted wind directions close to input data given for upwind turbine. Therefore differences of 10-20 degree in wind direction occurred between analytical wake models assisted by CFD and measurement for downwind turbine. This means that downwind turbine experiences lower wind speed due to larger wake effect, especially for full wake condition. For basic analytical wake models, measurement data of wind direction and measurement data of both wind direction and wind speed were used for downwind turbine and upwind turbine, respectively.

1.GİRİŞ

Dünyadaki fosil yakıt kaynaklarının sınırlı olması, ve çevre ve iklim üzerine olan olumsuz etkilerinden dolayı, temiz, sürdürülebilir ve ucuz yenilenebilir enerji kaynaklarına büyüyen bir yönelim gerçekleşmektedir. Yenilenebilir enerji kaynağı olan rüzgar enerjisi dünyadaki en hızlı büyüyen elektrik üretim kaynağıdır ve en hızlı büyüyen piyasalardan biridir.

GWEC 2016 yılı küresel rüzgar raporunda, 2015 yılı sonu itibariyle rüzgar enerjisindeki toplam kurulu güç 432.9 GW. Kümülatif piyasa büyümesi % 17'den daha büyük ve en büyük katkı 30753 MW'lık kurulu güç katkısı ile Çin'den gelmektedir. Geçen yılın sonu itibariyle 8 ülke 10000 MW'tan daha büyük kurulu güce sahip olmuştur. Bu ülkeler 145362 MW ile Çin, 74471 MW ile Amerika Birleşik Devletleri, 44947 MW ile Almanya, 25088 MW ile Hindistan, 23025 MW ile İspanya, 13603 MW ile Birleşik Krallık, 11025 MW ile Kanada ve 10358 MW ile Fransa (GWR, 2016).

Türkiye de dünyada en hızlı büyüyen rüzgar güç (wind power) piyasalarından biri olmasına rağmen kurulu güç bakımından birçok ülkenin gerisinde kalmaktadır. Türkiye'de rüzgar enerji kaynağı (potansiyeli) 48 GW'tır. Bu hesaplanan değer 50 metre yükseklikte, 7 m/s'den büyük rüzgar şiddetine sahip alanlardan gelen değerdir. Bu 48 GW'lık rüzgar enerji potansiyelinin 38 GW'su karadan 10 GW'su denizden gelmektedir. Türkiye 2015 yılı boyunca şebekeye 956.2 MW'lık rüzgar gücü eklemiştir ve Türkiye'nin rüzgar gücündeki kümülatif kurulum gücü 2015 yılı sonu itibariyle %25.42'lik artışla 4718.30 MW olmuştur. Bu, Türkiye'de 2015 yılındaki elektrik enerji tüketiminin % 6'sını karşılamaktadır. Bu oranın 2023 yılında % 30'a arttırılması planlanmaktadır (GWR, 2016; TREİR, 2016)

Rüzgar türbinleri, kısıtlı uygun alan ve daha düşük nakliye, kurulum ve bakım maliyeti gibi ekonomik nedenlerden dolayı, rüzgar tarlası (wind farm) olarak adlandırılan birçok türbinin kısıtlı bir alanın sınırları içersinde bulunabileceği bir arazi üzerinde gruplandırılır. Rüzgar tarlasında bir arada bulunan türbinler toplamda,

her birinin tek başına üreteceği durumdaki toplam güç üretiminden daha düşük güç üretirler. Güç üretimindeki bu düşüşün nedeni türbinlerin iz etkisidir (wake effect). Bir rüzgar türbini rüzgardan enerjiyi elde ettiğinde türbin arkasında daha düşük rüzgar şiddetinin ve daha yüksek türbülans seviyesinin olduğu bir iz bölgesi oluşturur. Bu türbinin arkasına yerleştirilen bir rüzgar-altı türbini (downwind turbine) daha düşük rüzgar şiddetine ve daha yüksek türbülans seviyesine maruz kalacağından dolayı muhtemelen daha düşük enerji üretecektir. Barthelmie ve diğ. (2009) çalışmalarında iz etkisinden dolayı rüzgar tarlasındaki güç kayıplarının %10 - 20 mertebelerinde olabileceğini göstermiştir. Türbülans seviyesindeki artış türbin üzerindeki yorulma yükünde (fatigue load) artışa neden olmakta ve bu yükteki artış türbinin kullanım ömrünü azaltmaktadır. Politis ve diğ. (2012) çalışmalarında enerji kayıplarının lokal rüzgar rejimi, topografik karakteristikler ve türbinin aerodinamik karakteristikleri gibi bir çok faktöre bağlı olduğunu ifade etmiştir.

Rüzgar tarlasında iz etkisinden dolayı güç kayıplarını minimize edebilmek için, rüzgar tarlasında konuşlandırılacak türbinlerin tarladaki düzenini eniyileyecek iz modelleri geliştirilmiştir. Bunlar türbin izinin davranışını matematiksel olarak açıklayan analitik iz modelleri ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğini (HAD) kullanarak akışı daha doğru bir biçimde çözümleyen hesaplamalı iz modelleridir. En iyi rüzgar tarla düzenini elde edebilmek için iz modellerinin binlerce olası durumun benzetimini yapması gerekiyor. Hesaplamalı iz modellerinin hesaplama zamanları çok yüksek olduğundan dolayı, rüzgar tarlası düzeni eniyilemesindeki hesaplama zamanı verimliliği açısından halen analitik iz modelleri tercih edilmektedir (Messac vd, 2012). Ancak, bu modellerin yeterli düzeyde olduklarından emin olabilmek için geçerleme (validation) testinden geçmeleri gerekiyor. Geçerleme testi rüzgar tüneli veya rüzgar tarlası olmak üzere iki durumdan elde edilecek gerçek verilerle modellerin öngörüsü arasındaki uyumun analizi ile gerçekleşir. Analitik iz modelleriyle yapılan çalışmaların büyük bir bölümü açık deniz üzerindeki rüzgar tarlalarında yapılmıştır. Kara üzerinde yapılan çalışma sayısı azdır. Hansen ve diğ. (2012) çalışmalarında analitik iz modelleriyle yapılan çalışmaların büyük bir bölümünün açık deniz rüzgar tarlalarında yapılmasının nedeninin açık deniz üzerinde daha düşük türbülans yoğunluğundan dolayı iz kayıplarının daha büyük olmasından kaynaklandığını ifade etmiştir.

Kara üzerindeki kompleks arazilerin hem rüzgar şiddeti hem de rüzgar yönü olmak üzere lokal rüzgar üzerinde önemli etkileri vardır (Politis ve diğ. 2012). Dolayısıyla kompleks araziler üzerinde analitik iz modellerinin geçerlemesi oldukça zordur. Hesaplamalı iz modelleri ise bu bölgelerdeki akışı daha doğru (accurate) çözmektedir.

Bundan sonra, tezin amacını belirten paragrafa kadar olan tüm paragraflarda iz konusunda yapılmış teorik, deneysel ve numerik diğer çalışmalar kronolojik olarak sunulacaktır.

Bu bölümde iz ile yapılmış teorik, deneysel ve numerik çalışmalar diğer çalışmalar kronolojik olarak sunulacaktır.

Jensen (1983) ve ayrıca Katic ve diğ. (1986) çalışmalarında türbin arkasındaki türbülanslı iz alanının rüzgar altı mesafe ile lineer olarak genişlediği ve şapka şeklinde bir rüzgar şiddeti fark dağılımına sahip olduğu varsayımına dayalı bir analitik model geliştirmiştir. Bu model sadece kütle korunumundan türetilmiştir (Bastankhah ve Porte-Agel, 2014).

Crespo ve Hernandez (1996) çalışmalarında deney ve nümerik sonuçlara dayalı, rüzgar türbini iz alanlarındaki türbülanslı kinetik enerjinin ve bu enerjinin yitiminin hesaplanması için analitik bir model önermiştir.

Magnusson ve Smedman (1999) rüzgar türbinin iz karakteristiklerini incelemiştir. Bu çalışmada itki katsayısının türbin karakteristiklerini tanımlamak açısından rüzgar şiddeti değişkeninden daha iyi bir değişken olduğu; rüzgarın rüzgar altı taraftaki hareket süresini kullanımının türbin iz karakteristiklerini açıklamak için mesafe değişkeninin kullanımdan daha fiziksel bir yol olduğu gösterilmiştir. Yakın girdap bölgesindeki fark piklerinin kademi olarak rotor merkez hattında tek pik olarak birleşmeleri için gereken zamanın civar atmosferik türbülans yoğunluğu ve türbinin rotasyonel frekansı ile ters orantılı ve iz yarıçapının gövde yüksekliğine oranı ile doğru orantılı olduğu gösterilmiştir. O anda ise merkez hattındaki normalize hız farkı itki katsayısına eşittir. Ayrıca kararlılık incelenmiştir. Kararsız tabakalaşmada merkez hattı normalize hız farkı kararlı tabakalaşmaya göre daha hızlı azalmaktadır. Son birleşik iki iz alanındaki normalize hız farkı tekli iz alanındakinden daha az olduğu bulunmuştur.

Frandsen ve diğ. (2006) her bir türbinden ziyade daha çok tüm rüzgar tarlası boyunca iz davranışını incelemek için analitik bir iz modeli geliştirmiştir. Model izdeki momentum fark korunumuna dayanmaktadır. Bu modelde üç farklı iz rejimi bulunmaktadır: İlk rejim tekli veya çoklu izli akışın komşu izlerle etkileşimde olmadığını temsil etmektedir. İkinci rejim iki komşu izli akışın etkileşime girmesiyle başlar, ve izin genişlemesi sadece düşey yönde sınırlandırılmıştır. Üçüncü rejim, izli akışın sınır tabaka ile dengede olduğunu temsil etmektedir. Bu durum rüzgar tarlası sonsuz büyüklükte olduğunda görüldüğü gösterilmiştir.

Chamorro ve Porte-Agel (2009) nötr kararlılık koşulu altında sınır tabakasının hem pürüzlü hem de düz bir yüzeyine konuşturılan bir model türbinin rüzgar altı iz gelişiminin sınır tabaka türbülansı etkisi ve yüzey pürüzlülük etkisi ile ilişkisini incelemek için bir rüzgar tünel deneyi gerçekleştirmiştir. Belirli rüzgar altı mesafelerdeki rüzgar hızı, türbülans yoğunluğu ve kinematik gerilimin yan dağılım profilini sağlamak için ısı anemometre kullanılmıştır. Çalışmadaki özel vurgu gelen sınır tabaka akışına bağlı türbin izindeki türbin güç üretimini ve türbin üzerindeki yorulma yükünü etkileyen hız farkı ve türbülans yoğunluğunun gelişiminin büyüklüğüne ve uzaysal dağılımına ilişkindir. Gelen akışın tekdüze olmayan dağılımı türbülans karakteristiklerinin eksensel simetrik yapısını bozduğu gözlemlenmiştir. Eksensel simetriden sapma pürüzlülüğün artışıyla arttığı gözlemlenmiştir. Hız farkının ve türbülans gelişiminin mesafe ile azaldığı ancak bu parametrelerin uzak iz bölgesinin 15 rotor çapı mesafesinde dahi ihmal edilemeyecek mertebelerde seyrettiği gösterilmiştir. İzdeki rüzgar şiddeti dağılımını eksensel simetrik olmamasına rağmen serbest akıştaki rüzgar şiddeti ile olan farkının, izin yerle etkileşimde olduğu rüzgar altı mesafeleri dışında, hemen hemen eksensel simetrik olduğu gösterilmiştir. Yakın iz bölgesinde, türbülans yoğunluğundaki gelişim kuvvetli kaymanın ve helikoidal vortekslerin olduğu izin üst kısmında (türbin üst ucuna yakın bir yerde) meydana geldiği gösterilmiştir. Türbülans yoğunluğundaki düşüş ise izin alt kısmında gelen akışa bağlı ortalama kaymadaki ve türbülanslı kinetik enerjinin üretimindeki düşüşe bağlanmıştır. Bu düşüş daha pürüzlü yüzeyler için daha belirgin olduğu gösterilmiştir. Uzak iz bölgesinde eklenen türbülans yoğunluğunun mesafe ile azalışı pürüzlü yüzey durumu için güç kanunu ile belirlenir. Sonuçların daha önceki çalışmalarla da serbest akıştaki türbinlerin durumu için uyumlu olduğu gösterilmiştir. Türbülans yoğunluğunun eksensel simetrik

olmayan dağılımının rüzgar altı bölgede konuşlandırılmış bir türbinin üzerindeki yorulma yükü üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Gonzalez-Longatt ve diğ. (2011) çalışmalarında rüzgar tarlasındaki türbinlerin düzeninin ve gelen rüzgarın yönünün etkisi dahilinde, Jensen (1986) iz modelini kullanarak, türbin iz etkisinin bir rüzgar tarlası üzerinde uzun ve kısa dönemli etkisini incelemiştir.

Chamorro ve Porte-Agel (2011) rüzgar tüneli deneyi ile bir model rüzgar tarlasının içerisindeki ve üzerindeki akış karakteristiklerini incelemiştir. Bu çalışmada türbülanslı akışın iki ana bölge ile karakterize edildiği gösterilmiştir. Bu bölgelerden biri türbin rotor üst uç noktasının alt kısmı olan bölgedir. Bu bölge türbinlerin üzerinde direkt bir etkiye sahip olmasıyla birlikte türbülans istatistikleri üçüncü veya dördüncü rüzgar altı türbin sırasında denge ulaştığı gösterilmiştir. Diğer bölge ise bu bölgenin hemen üstünde kalan ve akış istatistiklerin yavaşça ayarlandığı bölge. Bu bölgede iki ayrı tabaka bulunmuştur (İç sınır tabaka ve denge tabakası). Türbülans karakteristiklerinin gelen akış ve türbinler tarafından ilk tabakada ayarlandığı bulunurken, akış istatistiklerinin rüzgar tarlası tarafından ikinci tabakada belirlendiği bulunmuştur. Bu iki tabakanın varlığında da, büyük rüzgar tarlalarının yüzey pürüzlülük geçişinin özel bir durumu olarak işlenebileceği gösterilmiştir. Ayrıca çalışmada, momentum gelişiminin ve türbülans yoğunluğunun rüzgar tarla düzeninden etkilendiği gösterilmiştir.

Wu ve Porte-Agel (2012) atmosferik türbülansın rüzgar türbin izleri etkisini büyük girdap benzetimi aracılığıyla incelenmiştir. Çalışmada civar akıştaki farklı kayma ve türbülans yoğunluğu seviyelerinin türbin izlerindeki hız farkı, türbülans yoğunluğu ve türbülanslı kayma gerilimlerinin mekansal dağılımı üzerinde önemli farklılıklar yarattığı gösterilmiştir. Pürüzlü yüzey üzerindeki gelen akışın yüksek türbülans seviyelerinden dolayı iz alanına yüksek türbülanslı akıların girişi ile beraber daha az pürüzlü yüzeylere göre iz alanın daha hızlı gelişeceğini gösterilmiştir. En yüksek türbülans yoğunluğu iz alanının üst sınırında, özellikle rotorun üst uç seviyesinde, maksimum kaymanın olduğu yerde bulunmuştur. Bu lokasyonun pürüzlülük seviyesine göre değiştiği; yüksek pürüzlülük seviyelerinde düşük pürüzlülük seviyelerine göre türbine daha yakın bir yerde olduğu gösterilmiştir. Ayrıca yüksek pürüzlülük seviyelerinde izin eksenel simetrik olmama seviyesi azaldığı bulunmuştur. Efektif türbülans yoğunluğunun gelen akışın türbülans yoğunluğuna

göre, eklenen türbülans yoğunluğunun türbin gövde yüksekliğinin altında negatif, üstünde pozitif olduğundan dolayı, gövde yüksekliğinin alt kısmında daha düşük, üst kısmında daha yüksek olduğu bulunmuştur. Ayrıca türbülans kinetik enerjinin detaylı analizinde türbülanslı kinetik enerjinin iz alanının üst sınırı civarında, yüksek kaymanın ve türbülanslı akıların bulunduğu yerde en üst mertebeye ulaştığı bulunmuştur.

Messac ve diğ. (2012) dört farklı analitik iz modelinin rüzgar tarlasının toplam güç çıkışı üzerindeki etkisini incelemiştir. Modeller türbin başına düşen kara alanının ve gelen rüzgar etkisini kapasite faktörü üzerindeki etkisi kapsamında karşılaştırılmıştır.

Choi ve Shan (2013) çalışmalarında Jensen iz modelini, kısmi gölgeleme, rota sapması ve sabit olmayan hız koşulları için geliştirmiştir.

Porte-Agel ve diğ. (2013) büyük girdap simülasyonu aracılığıyla rüzgar yönünün türbin izleri ve güç kayıpları üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışmada ayrıca rüzgar yönünün rüzgar şiddeti farkı ve türbülans yoğunluğu gibi türbin iz karakteristiklerinin mekansal dağılımı üzerinde güçlü etkisi olduğu gösterilmiştir.

Stevens ve diğ. (2013) türbin yerleşiminin rüzgar tarlalarının ortalama güç çıkışı üzerindeki etkisini incelemiştir. Rüzgar tarla düzeni gelen akış yönüne göre bir açı ile parametrize edilmiştir. Rüzgar tarlası ve atmosferik sınır tabaka arasındaki etkileşim büyük girdap simülasyonu aracılığı ile incelenmiştir. Bu çalışmadaki ilginç sonuç ise en yüksek ortamla güç çıkışını elde etmek için en iyi çapraz düzeni oluşturmanın gerekmediğidir. En yüksek güç çıkışı eldesi orta derece hizalı rüzgar tarla düzeninden elde edilmiştir.

Abkar ve Porte-Agel (2014) termal tabakalaşmanın türbin izleri üzerindeki etkisini büyük girdap benzetimi ile incelemiştir. Aynı gövde rüzgar şiddeti varsayımıyla konvektif sınır tabaka için daha güçlü bir düşey karışımın daha yüksek bir türbülans yoğunluğu meydana getirdiği gösterilmiştir. Benzer şekilde kinematik kayma gerilimleri konvektif sınır tabaka durumunda daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Daha yüksek türbülans seviyesiyle konvektif sınır tabakada, artan momentum taşınım hızının ve daha güçlü türbülanslı karışımın, izin daha çabuk toplanıp serbest akış seviyesine dönmesine sebebiyet verdiği gösterilmiştir. Bu daha kısa iz alanı anlamına gelmektedir. Türbin arkasındaki rüzgar altı noktalarda civar rüzgar ile iz alanındaki rüzgar şiddet farkının atmosferik kararlılık arttıkça çevre hava ile türbülanslı iz

arasındaki karışımın daha az etkili olmasından dolayı, özellikle kararlı tabakalaşma durumu için, arttığı gösterilmiştir. Türbülanslı kayma ve türbülans yoğunluğunun konumunun ve büyüklüğünün termal tabakalaşma tarafından açık bir şekilde etkilendiği gösterilmiştir. İz alanına düşey kinetik enerji girişinden sorumlu olan düşey kinematik kayma geriliminin izin üst sınır çevresinde pozitif alt sınır çevresinde ise negatif olduğu gösterilmiştir. Ayrıca momentum akı büyüklüğü kaymanın en kuvvetli olduğu iz alanının üst kısmında bulunmuştur.

Bastankhah ve Porte-Agel (2014) çalışmalarında türbin iz alanlarındaki rüzgar şiddetinin tahmini için yeni bir analitik model ileri sürmüştür. Bu modeli türetmek için kütle ve momentum korunumu uygulanmıştır. İz alanındaki rüzgar şiddeti farkı için normal dağılım varsayılmıştır ve iz alanı için lineer genişleme varsayılmıştır. Ancak bir parametre olarak, genişleme oranı için deneysel değerlendirmeye ihtiyaç vardır. Bu parametre, bu çalışmada, rüzgar altı yönde normal rüzgar şiddeti farkı dağılımının rüzgar altı mesafe ile değişimi olarak ifade edilmiştir. Model sonuçları rüzgar tünel ölçümleri ve büyük girdap simülasyonları karşılaştırılmış. Sonuçlar her ikisi ile de iyi uyum göstermiştir.

Niayifar ve Porte-Agel (2015) çalışmalarında Bastankhah ve Porte-Agel'in (2014) çalışmasındaki genişleme oranı tanımını genişleterek rüzgar tarlasındaki yerel türbülans yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak yeniden tanımlamıştır. Lokal türbülans yoğunluğu hesaplanmasında farklı ampirik modeller karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada, çoklu iz alanların üstdüşümü için farkı üstdüşüm modelleri karşılaştırılmıştır.

Tian ve diğ. (2015) çalışmalarında rüzgar türbininin iz alanındaki türbülans ve rüzgar şiddet dağılımını öngörebilmek için yeni bir analitik iz modeli geliştirmiştir. Jensen iz modeline (Jensen, 1983; Katic ve diğ., 1986) dayanan bu modelde şapka şeklindeki rüzgar dağılımı yerine kosinüs şekil fonksiyonu kullanılarak rüzgar altı rüzgar dağılımı kosinüs şeklinde varsayılmıştır. Jensen iz modelindeki sadece çevre türbülansa bağlı sabit bir iz zayıflama oranı yerine hem çevre türbülansın hem de türbin rotoru tarafından üretilen türbülansın hesaba katıldığı yeni bir iz zayıflama oranı tanımlanmıştır. Model sonuçları rüzgar tünel deneyleri, ileri $k-\omega$ türbülans modeli sonuçları ve büyük girdap simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu yeni model özellikle uzak iz bölgesinde hem hız farkı genliği hem de profili açısından deney ve modellerle iyi uyum göstermiştir.

Jha ve diğ. (2015) farklı türbin düzeni ve farkı termal tabakalaşmadaki türbin izindeki türbülansı incelemiştir. Bu çalışmada OpenFOAM-LES çözücüsünde Aktüatör Çizgi Modeli (Actuator Line Method) kullanılmıştır. Çalışmada, türbin güç zaman serisi ve spektrası, iz momentum farkı, Reynold gerilimleri, iz türbülansını ve iz menderesini belirten türbülanslı kinetik enerjisi, yüzey akıları analiz edilmiştir. Termal tabakalaşmanın, iz gelişimi ve türbinlerin güç üretimi üzerinde ciddi etkisi olduğu gösterilmiştir. Orta derece kararsız tabakalaşmanın nötr tabakalaşmaya göre iz momentum fark azalmasında daha güçlü bir etkiye sahip olduğu gösterilmiştir. Orta derece kararsız tabakalaşmada nötr tabakalaşmaya göre daha yüksek türbülans seviyeleri gözlemlendiğinden özellikle rüzgar altı taraftaki türbin üzerinde daha fazla yorulma yükü olacağı gösterilmiştir. Dağınık düzendeki rüzgar tarlası için ve hatta sıfır rota sapması durumunda, rüzgar altı taraftaki türbinin önündeki türbinden etkilendiği ve bundan dolayı rüzgar altı taraftaki türbinde küçük bir güç kaybı ile beraber güç kaybına nazaran güçteki standart sapmanın daha yüksek oranda düştüğü gösterilmiştir.

Okulov ve diğ. (2015) başlangıçta düşük türbülans seviyenin ve sabit bir hız dağılımının olduğu, ve uzak girdap bölgesinin gelişiminde dış bozucu etkilerin sınırlandırıldığı bir su kanalında bir model rüzgar türbini ile türbin arkasındaki izin akış üzerindeki etkisini türbinin farklı rotor uç hız oran değerleri altında incelenmiştir. Ölçüm verileri yakın iz bölgesinden 50 rotor çapı mertebesine kadar Laser Dopler Anomemetresiyle (LDA) elde edilmiş olup üç farklı analitik iz modelin, sırasıyla Jensen (1983), Bastankhah ve Porte- Agel (2014), George (1989), sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Üçüncü analitik model ölçüm sonuçlarıyla uzak iz bölgesinde, güç açısından uyumlu ve modelin kabul edilebilir bir şekilde doğru olduğu gözlenmiştir. İlk iki model üçüncü modele göre daha az hatasız sonuçlar vermiştir.

Machefaux ve diğ. (2015) 4 farklı iz birleşme mühendislik modeli, sırasıyla lineer üstdüşüm modeli, karesel yaklaşım, dinamik iz menderesi yaklaşımı, G.C. Larsen iz üstdüşüm modeli, farklı ortalama rüzgar şiddeti, türbin-türbin mesafesi ve türbülans yoğunluğu değerleri için hesaplamalı akışkanlar dinamiği benzetimlerine karşı değerlendirmiştir. Çalışmada iz etkileşimlerinin kuvvetli bir şekilde normalize hız farkı büyüklüğüne bağlı olduğu gösterilmiştir. Çalışmada ayrıca, zamana bağlı olan son iki model birleşmiş iz akışındaki mevcut gücü öngörmede iyi bir doğruluk

gösterdiği ve ilk iki modelin iyi bir performans göstermesine rağmen son iki modele kıyasla daha yüksek belirsizlik ihtiva ettiği gösterilmiştir.

De-Prada-Gil ve diğ. (2015) rüzgar tarlasının güç üretimini azami seviyeye iz etkisini azaltarak çıkarmak için her bir türbinin ayrı ayrı eniyilemesine dayanan konvansiyonel kontrol yaklaşımı yerine iz etkisini düşürmek için tüm sistemi eniyilemek için bazı türbinlerin ideal olmayan konumlarda çalıştırmaya dayanan yeni bir kontrol yaklaşımı önermiştir. Bu yeni yaklaşım ile rüzgar tarlasındaki rüzgar gülüne bağlı olarak rüzgar tarlasında elde edilen yıllık enerjide % 1.86'dan % 6.24'e kadar bir artış sağlandığı gösterilmiştir. Bu çalışmada yeterli doğruluğundan ve hesaplama süresinin düşük olmasından dolayı iz modeli olarak Jensen modeli kullanılmıştır.

Hamedi ve diğ. (2015) kanat elemanı momentum yöntemini kullanarak türbin arkası iz bölgesi için yarı-analitik yan rüzgar profili geliştirmiştir. Çalışmada türbinin hemen arkasındaki rüzgar şiddet profili rotor alanını geçen kütle akış oranının hesaplanması aracılığıyla elde edilebileceği gösterilirken farklı rüzgar altı mesafeleri için izdeki rüzgar şiddetinin genel profilinin bir eksponensiyel fonksiyonun iki bilinmeyenli bir parabolik fonksiyon ile çarpıldığı bir eşitlikle elde edilebileceği gösterilmiştir. Sonuçlar Højstrup'ta elde edilen deney verileriyle karşılaştırılmış ve geliştirilen yarı-analitik modelin deney sonuçlarıyla oldukça uyumlu olduğu gözlenmiştir.

Seim ve diğ. (2015) üç farklı kinematik iz modelinin sonuçlarını (Jensen, Larsen ve Ishihara) kuzey Norveç'te bulunan Nygardsfjellet rüzgar tarlası ölçüm verileriyle karşılaştırmıştır. Larsen modeli üç model arasında en iyi performansı gösterdiği ancak iz genişliği için sürekli fazla tahminlerde bulunduğu gösterilirken Jensen modelinin makul doğruluk derecesi sağladığı ve Ishihara modelinin iz genişliği tahmini haricinde en kötü performansa sahip olduğu gösterilmiştir. Çalışma ayrıca ölçümdeki belirsizlikten ve arazi ile ilişkili durumlardan dolayı hangi iz modelinin en doğru sonuç verdiğine dair açık bir sonuç olmadığını ifade etmiştir.

Bu tez çalışmasında ilk olarak analitik iz modellerinden, Standart Jensen modeli, tez çalışma boyunca yeni Jensen modeli veya iki boyutlu Jensen modeli olarak adlandırılacak Tian ve diğ.'nin (2015) çalışmalarında geliştirdikleri Jensen modeli, Frandsen modeli ve Larsen modeli kullanılarak, ilk olarak modellerin iz şekli, iz ile

serbest akış arasındaki rüzgar şiddeti farkının azalma hızı, iz çapı ve iz çapının mesafeyle gelişimi gibi modellerin karakteristikleri sunulacaktır. Sonraki tezin asıl amacı olan bir sonraki adımda, kompleks bir arazi üzerinde bulunan ticari bir rüzgar çiftliğinden alınan rüzgar ölçüm verisi ile modellerin (hem tek başlarına hem de Hesaplamalı Akışkan Dinamiği (HAD) teknolojisi tabanlı WindSim yazılımı yardımıyla) performans değerlendirmesi sunulacaktır.

2. TEORİ

Tezin bu bölümünde izi etkileyen önemli konulara ve izi tanımına yer verilmiştir. Bölüm 2.1’de Atmosferik sınır tabaka ve bu tabakadaki düşey rüzgar profilini belirlemek için kullanılan logaritmik kanun ve güç kanunu tanıtılmıştır. Bölüm 2.1.1’de atmosferik sınır tabakadaki kararlı, kararsız ve nötr atmosfer koşullarının hangi durumlarda gerçekleştiği hem parsel hem de gradyan yöntemi ile gösterilmiştir. Bölüm 2.1.2’de türbülansın tanımına ve türbülansın istatistiksel özelliklerinden biri olan türbülans yoğunluğunun tanımına yer verilmiştir. Bölüm 2.2’de aktüatör disk kavramı tanıtılıp hava akışının yani rüzgarın, sırasıyla rüzgar üstü, disk veya rotor düzlemi ve rüzgar altı bölgelerinden geçerken havada akışında gerçekleşen, rüzgar şiddetindek ve basınçtaki değişimlere yer verilmiştir. Bölüm 2.2.1’de, momentum teorisine yer verilmiştir. Bu bölümde Betz limiti, güç katsayısı, itki katsayısı gibi türbin aerodinamiğine ait kavramlara ve bu kavramların matematiksel bağıntılarına yer verilmiştir. Bölüm 2.3’te izi tanımı yapılmıştır. Bu bölümde izi oluşturan bölgeler, bu bölgelere ait özellikler ve süreçlere, ve izi etkileyen faktörlere yer verilmiştir.

2.1 Atmosferik Sınır Tabaka

Atmosferik sınır tabaka (AST), atmosferin yeryüzü yakınında bulunan termik ve dinamik etkisinin doğrudan hissedildiği kesimdir. İkinci bir tanım yapacak olursak, AST yer yüzeyinden direkt olarak etkilenen ve yaklaşık 1 saat veya daha az bir zaman ölçeği ile, yüzeyin etkisine cevap veren troposfer parçası olarak tanımlanabilir. Bu etkiler; sürtünme, buharlaşma ve terleme, ısı transferi, kirlilik emisyonu, düşey türbülans taşınımlarını içerir. Sınır tabakanın kalınlığı zamana ve yere bağlı olarak birkaç yüz metreden birkaç kilometreye varan oldukça geniş bir değişim gösterir.(Menteş, 1996, ss. 17-17)

Rüzgar türbinleri de yatay basınç gradyanları, kayma gerilmeleri ve Coriolis kuvvetinin etkisi altında olan atmosferik sınır tabakanın en alt kesimi yüzey tabakada çalışmaktadır (Menteş, 1996). Yüzey tabakadaki düşey rüzgar gradyanı denklem 2.1 ile verilmektedir.

$$\partial_z U = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \frac{1}{\kappa z} = \frac{u^*}{\kappa z} \quad (2.1)$$

Burada τ_w kayma gerilimi, ρ hava yoğunluğu, κ von Karman sabitidir ve değeri 0.4'tür. u^* ise sürtünme hızıdır ve

$$u^* = \sqrt{\tau_w / \rho} \quad (2.2)$$

ile tanımlanmaktadır. Denklem 2.1'in integrasyonu ile

$$U(z) = \frac{u^*}{\kappa} \left(\ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \right) \quad (2.3)$$

elde edilmektedir. Denklem 2.3 düşey rüzgar profilinin belirlenmesinde iyi bilinen bir yöntem olan logaritmik rüzgar profilidir. Denklem 2.3'te bir integral sabiti olan z_0 yüzeyin pürüzlülüğüne ilişkin pürüzlülük uzunluğunu temsil etmektedir. Yüzey pürüzlülük uzunluğunun 0.001 m'den (durgun deniz) 0.03 m'e (birkaç ağacın bulunduğu açık bir tarım arazisinin) ve kentsel alanlar için onlarca metreye değişen bir aralığı vardır (Sanderse, 2009).

Denklem 2.3 nötr atmosfer için geçerlidir. Termal etkiler göz önünde bulundurulmamıştır. Termal etkilerin düşey rüzgar profilinin belirlenmesinde önemli bir etkiye sahiptir (Lange ve Focken, 2005).

Atmosferik kararlılığı logaritmik rüzgar profili hesabına katabilmek için, logaritmik rüzgar profili değiştirilmelidir (Lange ve Focken, 2005). Bunun için Monin-Obukhov denklem 2.1'i bir genel düzeltme fonksiyonu Φ_m ile yeniden düzeltilmiştir.

$$\partial_z U = \frac{u^*}{\kappa z} \Phi_m(H, u^*, z) \quad (2.4)$$

Burada Φ_m ısı akısına, H , sürtünme hızına, u^* , ve yüksekliğe, z , bağlı boyutsuz bir fonksiyondur. $\Phi_m(H, u^*, z)$ 'in 1 olması durumunda nötr atmosfer koşulu için olan denklem 2.3 elde edilir. Diğer atmosferik kararlılık koşulları için uygun fonksiyonlar türetilmelidir (Lange ve Focken, 2005). Logaritmik profilin termal düzeltme fonksiyonu z/L 'nin fonksiyonudur. Burada L Monin-Obukhov uzunluğudur ve denklem 2.5 ile temsil edilmektedir.

$$L = -\frac{u^{*3} \Theta c_p \rho}{\kappa g H} \quad (2.5)$$

Monin-Obukhov uzunluğu atmosferin kararlılığını öngören bir kararlılık parametresidir. L'nin alabileceği değer aralığı $-\infty$ ile $+\infty$ arasındadır. L, eğer yüzey havayı soğutuyorsa pozitif, ısıtıyorsa negatiftir.

Φ_m z/L'nin fonksiyonu olarak da tanımlanabilir. z/L Monin-Obukhov uzunluğu ile ölçeklendirilmiş yüksekliktir, ve kaldırma ve kayma etkilerinin göreceli önemini belirler. Kaldırma etkileri $z \gg |L|$ durumu için, kayma etkileri ise $z \ll |L|$ durumu için baskındır (Lange ve Focken, 2005).

Yalnızca deneylerle belirlenebilen Φ_m 'i ilk kez 1966 yılında Businger ve 1974 yılında Dyer birbirlerinden bağımsız bir şekilde formülize etti ().

Fonksiyonlar, kararsız ($z/L < 0$) , nötr ($z/L=0$) ve kararlı ($z/L > 0$) atmosfer için sırasıyla,

$$\Phi_m \left(\frac{z}{L} \right) = \frac{1}{1 - 16 \frac{z}{L}} \quad (2.6)$$

$$\Phi_m = 1 \quad (2.7)$$

$$\Phi_m = 1 + 5 \frac{z}{L} \quad (2.8)$$

Denklem 2.4'teki düşey rüzgar gradyanı denkleminin integrasyonunu 2.6 – 2.8'teki Φ_m 'i kullanarak alınır ve

$$U(z) = \frac{u^*}{\kappa} \left(\ln \left(\frac{z}{z_0} \right) - \psi_m \left(\frac{z}{L} \right) \right) \quad (2.9)$$

şeklinde bulunur. Burada $\psi_m \left(\frac{z}{L} \right)$, $z/L < 0$, $z/L=0$ ve $z/L > 0$ için, sırasıyla,

$$\psi_m \left(\frac{z}{L} \right) = 2 \ln \left(\frac{1+x}{2} \right) + \ln \left(\frac{1+x^2}{2} \right) - 2 \tan^{-1}(x) + \frac{\pi}{2} \quad (2.10)$$

$$\psi_m\left(\frac{z}{L}\right) = 0 \quad (2.11)$$

$$\psi_m\left(\frac{z}{L}\right) = -5\frac{z}{L} \quad (2.12)$$

Denklem 2.10'da

$$x = \left(1 - 16\frac{z}{L}\right)^{1/4} \quad (2.13)$$

Logaritmik rüzgar profili ya da logaritmik kanun sıklıkla referans bir yükseklikte bir rüzgar şiddeti verisini başka bir seviye taşıyarak o seviyedeki rüzgar şiddetini hesaplamak için kullanılır (Manwell ve diğ., 2002). Bu durumda denklem 2.3'ten yola çıkılarak

$$\frac{U(z)}{U(z_{ref})} = \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right)} \quad (2.14)$$

Burada z_{ref} referans yüksekliktir. Atmosferik sınır tabakadaki düşey rüzgar profilini belirlemede logaritmik yaklaşıma (logaritmik rüzgar profili) alternatif olarak Güç kanunu olarak bilinen başka bir yaklaşım daha vardır. Bu yaklaşım logaritmik yaklaşımın aksine teorik bir tabana sahip değildir (Sanderse, 2009). Bir güç kanunu yaklaşımı sıklıkla denklem 2.6'deki gibi kullanılmaktadır :

$$\overline{U}(z) \propto z^\alpha \quad (2.15)$$

Burada α kayma veya gradyen üssüdür, ve bu parametrenin değişkenliği ciddi ölçüde arazinin yapısına bağlıdır ancak gün süresi, mevsim, rüzgar şiddeti ve sıcaklık gibi diğer değişkenlerle de küçük ölçüde değişiklik gösterir (Sanderse, 2009). Ayrıca, Justus (1978), Counihan (1975) ve Spera (1994) çalışmalarında bu parametreyi belirlemek için farklı ampirik yöntemler geliştirmişlerdir. Türbin gövde yüksekliğinde ortalama rüzgar şiddeti verilerek düşey rüzgar profili güç kanunu ile aşağıdaki denklem 2.7 ile belirlenmektedir:

$$\bar{U}(z) = \bar{U}(H) \left(\frac{z}{H} \right)^\alpha \quad (2.16)$$

Sınır tabakanın yüksekliği yüz metrelerden birkaç kilometrelere kadar değişen bir aralıktadır. Türbülansın yok olduğu yükseklik bazen sınır tabaka üst sınırının tanımı olarak alınır. Bu tabakanın üstünde basınç gradyanı ile coriolis kuvvetinin denge bulunduğu ortaya çıkan ve yer yüzeyi ile etkileşmeyen teorik bir rüzgar olan jeostrofik rüzgar hakimiyeti vardır (Sanderse, 2009).

2.1.1. Atmosferik karalılık

Atmosferik sınır tabakanın yüksekliği, türbin arkasındaki izin gelişimi, türbülans yoğunluğu atmosferik kararlılıktan (termal tabakalaşma) etkilenmektedir. Atmosferik kararlılık kavramını anlayabilmek için hava parçası kavramını kullanmak gerekir. Hava parçası atmosfer havasının herhangi bir veya tüm temel dinamik ve termodinamik özelliğini barındıran hayali bir hava hacmidir. Bu hayali hava parçası, çevresindeki havadan tamamen yalıtılmış durumdadır. Diğer bir deyişle hava parçasının çevre hava ile aralarında ne ısı ne de kütle alışverişi gerçekleştirilir. Bu duruma adiyabatik süreç denir. Dolayısıyla hava parçası düşey hareketini adiyabatik olarak gerçekleştirir. Bu durumda hava parçası adiyabatik olarak yükseltirise (alçaltılırsa) kendisinden tamamen yalıtılmış çevre havanın sıcaklığına bağlı olarak, eğer hava parçasının sıcaklığı çevre havanın sıcaklığından daha yüksekse hava parçası yükselmeye (alçalmaya) devam eder. Bu durum kararsız atmosferi temsil etmektedir. Eğer hava parçasının sıcaklığı çevre havanın sıcaklığından daha düşük ise hava parçasın yükselmeden önceki konumuna geri dönme eğilimi gösterir. Bu durum karalı atmosferi temsil etmektedir. Eğer yükselttiğiniz noktada hava parçasının sıcaklığı ile çevre havanın sıcaklığı aynı ise hava parçası yükseltildiği (alçaltıldığı) konumda kalacaktır. Bu durum ise nötr atmosferi temsil etmektedir. Bu yöntem parsel metodu olarak bilinmektedir.

Havanın sıcaklığının yükseklikle değişim oranı, adiyabatik düşme oranı ile belirlenmektedir. Adiyabatik düşme oranı (kuru hava için)

$$\Gamma = -\frac{dT}{dz} = 9.8 \text{ Kkm}^{-1} \quad (2.17)$$

denklemleri ile verilmektedir. Buna bağılı olarak, ayrıca, atmosferi adiyabatik düşme oranı ile kıyaslayarak atmosferik kararlılık (stabilite) belirlenebilir. Kararsız, kararlı ve nötr atmosfer, sırasıyla

$$-\left(\frac{dT}{dz}\right)_{\text{çevre}} > \Gamma \quad (2.18)$$

$$-\left(\frac{dT}{dz}\right)_{\text{çevre}} < \Gamma \quad (2.19)$$

$$-\left(\frac{dT}{dz}\right)_{\text{çevre}} = \Gamma \quad (2.20)$$

Kararlı atmosfer gece boyunca yerin, üzerindeki havadana daha soğuk olduğu zamanlarda gerçekleşir. Kararlı atmosferde atmosferik sınır tabaka yüksekliği oldukça sığdır. Kararsız atmosferde büyük ölçekli türbülanslı girdaplar, daha kalın bir atmosferik sınır tabaka oluşmaktadır. Ayrıca büyük konvektif hücreler bu atmosferik kararsızlık koşulunda oluşmaktadır. Nötr atmosferde çok az düşey hareket mevcuttur. Nötr atmosfer sıklıkla güçlü rüzgarların ve iyi karışmış atmosferik sınır tabakanın olduğu zamanlar meydana gelmektedir. Rüzga enerjisi benzetimlerinde çoğu kez nötr atmosfer koşulu kullanılmaktadır (Nygaard, 2011; Sanderse, 2009).

2.1.2. Türbülans

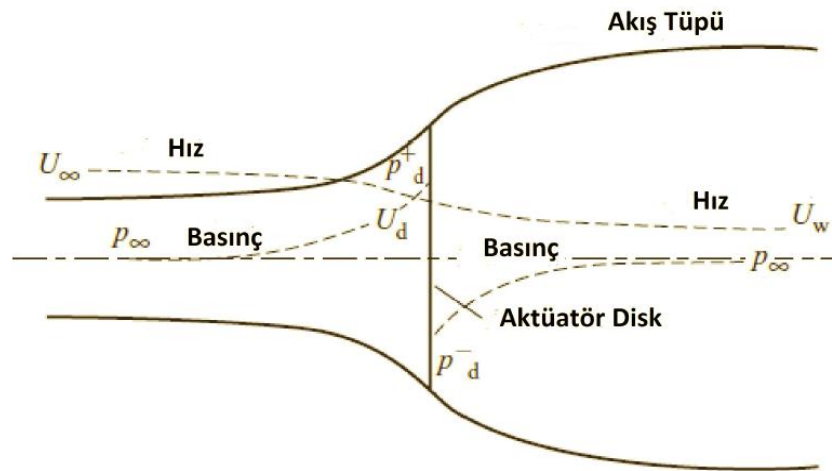
Atmosferik türbülans rüzgar şiddeti spektrumundaki göreceli olarak daha küçük zaman ölçeğindeki (10 dakikadan daha küçük) dalgalanmaları temsil etmektedir. İzotropik değildir ve yüzey pürüzlülüğü, atmosferik kararlılık ve yerden olan yükseklikle değişmektedir. Türbülans iki ana nedenden dolayı oluşmaktadır. Bunlar yer yüzeyinin sürtünme etkisi ve ısı etkileridir. Türbülans kaotiktir ve bundan dolayı deterministik denklemlerle ifade edilemez. Ancak belirli bir başlangıç ve sınır şartının atanmasıyla türbülanslı süreci tanımlayacak bir diferansiyel denklemler kümesi ile formüle etmek mümkündür ancak atanan başlangıç ve sınır şartındaki ufak değişiklikler öngörülen akış ile gerçek akış arasındaki hata farkının gelişmesine sebebiyet vermektedir. Bundan dolayı türbülansı tanımlarken istatistiksel özelliklerini kullanmak daha anlamlıdır. Türbülansın istatistiksel özelliklerinden biri olan türbülans yoğunluğu akıştaki toplam türbülans seviyesini göstermekte ve aşağıdaki denklem 2.21 ile tanımlanmaktadır :

$$I = \frac{\sigma}{U} \quad (2.21)$$

Burada σ rüzgar şiddetinin standart sapmasıdır. $\bar{U}$ ise 10 dakika veya 1 saat üzerinden tanımlanan ortalama rüzgar şiddetidir. Türbülans yoğunluğu her rüzgar yönünde farklı olup I_u , I_v , I_w , sırasıyla, u (eksenel), v (yanal) ve w (düşey) yönleri için tanımlanmaktadır (Nygaard, 2011; Burton ve diğ., 2001).

2.2 Aktüatör Disk Kavramı

Şekil 2.1'de türbinin varlığında rüzgar üstü tarafındaki yaklaşan hava kademeli olarak yavaşlar. Rotor diskine ulaşan havanın rüzgar şiddeti serbest akışın rüzgar şiddetinden daha düşüktür. Şekil 2.1'de görüleceği üzere hava diske yaklaşırken havadaki akış hızının azalmasından dolayı genişler ve havadaki statik basınç artar. Hava diski geçerken statik basınçta bir düşüş meydana gelir. Hava atmosferik basınç seviyesinin altında kalır. Hava daha sonra rüzgar altı tarafta azaltılmış akış hızı ve statik basıncı ile ilerler. Bu akış bölgesi *iz* olarak adlandırılır. Nihayetinde, uzak rüzgar altı tarafta, izdeki durağan basınç erişilen denge için atmosferik seviyeye döner. Statik basınçtaki artış kinetik enerjinin harcanmasındadır ve rüzgarın daha da yavaşlamasına neden olur. Bundan dolayı uzak rüzgar üstü tarafı ve uzak iz (uzak rüzgar altı tarafı) durumları arasında, statik basınçta değişim gözlenmez ama kinetik enerjide bir düşüş gözlenir (Burton ve diğ., 2001).



Şekil 2.1: Bir rüzgar türbininin aktüatör disk modeli (Burton ve diğ., 2001).

Diskin rüzgar tarafındaki akış borusunun kesit alanı diskin alanından küçüktür ve rüzgar altı tarafta daha büyüktür. Akış borusunun genişlemesi kütle debisinin her yerde aynı olmasından dolayıdır (Burton ve diğ., 2001). Birim zaman uzunluğunda akış borusunun verilen kesiti boyunca geçen havanın kütlesi ρAU 'dur. ρ burada hava yoğunluğudur, A kesit alanıdır ve U ise akış hızıdır. Kütle debisi akış borusu boyunca her yerde aynı olmalıdır ve bu yüzden

$$\rho A_{\infty} U_{\infty} = \rho A_d U_d = \rho A_w U_w \quad (2.22)$$

Denklem 2.22'de, alt indislerden ∞ sembolü rüzgar üstü tarafını (upwind), d disk düzlemindeki durumu, ve w ise uzak izdeki durumu ima etmektedir.

Genelde aktüatör diskin serbest akış hızının üzerine eklenen hız değişimini indüklediği göz önünde bulundurulur (Burton ve diğ., 2001). Bu diskte indüklenen akışın akış doğrultusundaki bileşeni $-aU_{\infty}$ ile verilir. Burada a eksensel akış indüksiyon faktörü olarak adlandırılır. Diskte, bundan dolayı, net akış doğrultusundaki hız

$$U_d = U_{\infty}(1-a) \quad (2.23)$$

2.2.1. Momentum teorisi

Disk üzerinden geçen hava (rüzgar), $U_{\infty} - U_w$ kadar bir değişime uğrar. Momentumdaki değişim oranı denklem 2.24'de gösterildiği gibi hızdaki değişim ile kütle debisi çarpımına eşittir :

$$\text{Momentumdaki değişim oranı} = (U_{\infty} - U_w) \rho A_d U_d \quad (2.24)$$

Momentumdaki bu değişime neden olan kuvvet tamamen aktüatör disk boyunca olan basınç farkında meydana gelmektedir çünkü akış borusu aksi halde tamamen net sıfır kuvvet veren atmosferik basınçtaki hava ile çevrelenirdi (Burton ve diğ., 2001). Bundan dolayı

$$(p_d^+ - p_d^-) A_d = (U_{\infty} - U_w) \rho A_d U_{\infty}(1-a) \quad (2.25)$$

Basınç farkını elde etmek için Bernoulli denklemi akış borusunun rüzgar tarafı ve rüzgar altı tarafına ayrı ayrı uygulanır. Ayrık denklemler gerekli çünkü toplam enerji

her iki tarafta farklıdır. Bernoulli denklemine göre, durağan koşullar altında, akıştaki kinetik enerji, statik basınç enerjisi ve yerçekimsel potansiyel enerjiyi kapsayan toplam enerji sabit kalır. Akışkan tarafından yapılan ya da akışkana yapılan bir iş yoktur. Bundan dolayı, birim hava hacmi için

$$\frac{1}{2}\rho U^2 + p + \rho gh = \text{sabit} \quad (2.26)$$

Denklem 2.26'dan yola çıkarak, rüzgar üstü tarafındaki denklem

$$\frac{1}{2}\rho_{\infty}U_{\infty}^2 + p_{\infty} + \rho_{\infty}gh_{\infty} = \frac{1}{2}\rho_d U_d^2 + p_d^+ + \rho_d gh_d \quad (2.27)$$

Akışın yatay ($h_{\infty} = h_d$) ve sıkıştırılmaz ($\rho_{\infty} = \rho_d$) olduğu varsayılarak, denklem 2.27

$$\frac{1}{2}\rho U_{\infty}^2 + p_{\infty} = \frac{1}{2}\rho U_d^2 + p_d^+ \quad (2.28)$$

halini alır. Benzer şekilde, rüzgar altı taraftaki denklem,

$$\frac{1}{2}\rho U_w^2 + p_{\infty} = \frac{1}{2}\rho U_d^2 + p_d^- \quad (2.29)$$

şeklindedir. Denklem 2.28 ve 2.29 birbirilerinden çıkartılarak

$$(p_d^+ - p_d^-) = \frac{1}{2}\rho(U_{\infty}^2 - U_w^2) \quad (2.30)$$

denklemini elde edilir. Son denklem 2.27' konularak

$$\frac{1}{2}\rho(U_{\infty}^2 - U_w^2) A_d = (U_{\infty} - U_w) \rho A_d U_{\infty} (1-a) \quad (2.31)$$

elde edilir ve böylece,

$$U_w = U_{\infty} (1-2a) \quad (2.32)$$

olur.

2.2.1.1 Güç Katsayısı

Denklem 2.25'den hava üzerindeki kuvvet

$$F = (p_d^+ - p_d^-) A_d = 2\rho A_d U_{\infty}^2 a(1-a) \quad (2.33)$$

Bu kuvvet aktüatör diskte toplanırken kuvvet tarafından yapılan işin oranı FU_d ve bundan dolayı rüzgardan elde edilen güç

$$\text{Güç} = FU_d = 2\rho A_d U_\infty^3 a(1-a)^2 \quad (2.34)$$

denklemini ile verilir. Güç katsayısı ise

$$C_p = \frac{\text{Güç}}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^3 A_d} \quad (2.35)$$

ile tanımlanır. Burada payda, aktüatör diskin yokluğunda havadaki mevcut gücü temsil etmektedir.

$$C_p = 4a(1-a)^2 \quad (2.36)$$

olarak tanımlanabilir. C_p 'nin alabileceği maksimum değeri,

$$\frac{dC}{da} = 4(1-a)(1-3a) = 0 \quad (2.37)$$

eşitliği sağlanarak gözlemlenir. Maksimum değer için $a = \frac{1}{3}$ olur. Bundan dolayı,

$$C_{p_{\max}} = \frac{16}{27} = 0.593 \quad (2.38)$$

olur. Güç katsayısının maksimum erişilebilir değerine *Betz limiti* denir.

2.2.2.1 İtki Katsayısı

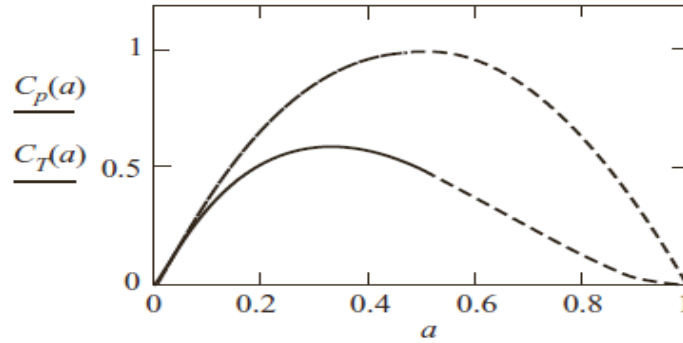
Denklem 2.34 ile verilen basınç düşüşünün neden olduğu disk üzerindeki itki kuvveti bir itki katsayısını, C_T , vermesi için aşağıdaki gibi boyutsuzlaştırılabilir (Burton ve diğ., 2001) :

$$C_T = \frac{F}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 A_d} \quad (2.39)$$

$$C_T = 4a(1-a) \quad (2.40)$$

$a \geq 0.5$ değerleri için bir sorun ortaya çıkmaktadır, çünkü izdeki hız, $U_\infty(1-2a)$ sıfır ve hatta negatif değerlerde olur. Bu durumlarda momentum teorisi artık uygulanmaz ve ampirik değişiklikler yapılır.

Güç ve itki katsayısının eksensel akış indüksiyon faktörüne, a , göre değişimi şekil 2.2’te gösterilmiştir.



Şekil 2.2: Güç ve itki katsayısının eksensel akış indüksiyon faktörü, a , ile değişimi (Burton ve diğ., 2001).

2.3 İz Teorisi

2.3.1 Yakın iz ve uzak iz

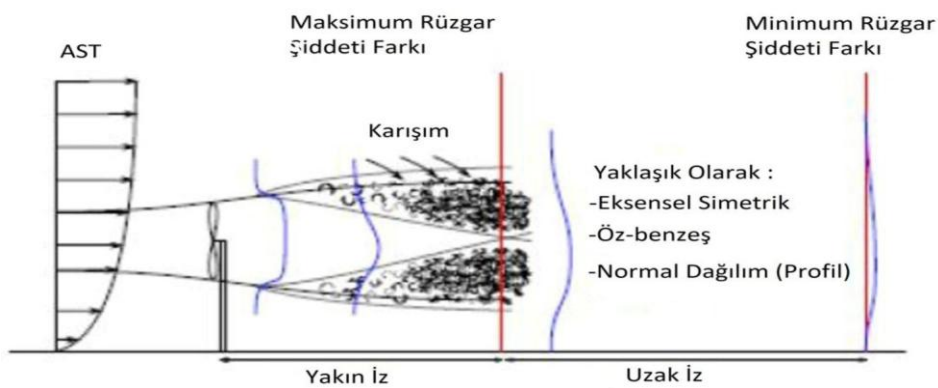
Bir türbinin iz alanı genellikle yakın ve uzak iz olmak üzere iki bölgeye ayrılır (Vermeer, 2003) ancak bazen ara bölge (intermediate region) adında yakın ve uzak iz arasında kalan başka bir iz bölgesi daha tanımlanır (Moskalenko, 2010). Yakın iz bölgesi yaklaşık bir rotor çapı mertebesinde, türbin geometrisinin (kanat aerodinamiği, kanat sayısı, tip vorteksleri) akış alanının şeklini belirleyerek, türbin performansının belirlendiği bölge olarak tanımlanır. Burada eksensel basınç gradyanı, iz fark (wake deficit) gelişimi için önemlidir. Uzak iz bölgesi, rotor şeklinin öneminin azaldığı ancak iz modelleme, iz etkileşimleri, türbülans modelleme ve topografik etkiler üzerinde önemini sürdürdüğü bir bölge olarak tanımlanır (Sanderse, 2009).

İzdeki akış ile iz sınırları dışındaki akış arasındaki hız farkı bir kayma (veya karışım) tabakası oluşturmaktadır ve bu tabaka daha ileri rüzgar-altı mesafelerde kalınlaşır (Şekil 2.3). Bu kayma tabakasında türbülanslı girdaplar oluşur. Gradyanlı çevre akışından dolayı, karışım tabakasındaki türbülans eşdağılımlı (uniform) değildir. Türbin rotorunun üst yarısındaki türbülans yoğunluğunun alt yarısındaki türbülans yoğunluğundan daha yüksek olmasının sebebi budur. Yakın iz bölgesinde türbülans yoğunluğu için rotor yüksekliği mertebesinde iki tepe (peak) noktası oluşur ancak bu tepe noktaları uzak iz bölgelerinde varlığını sürdüremez (Sanderse, 2009). Karışım tabakası hem içeri, iz eksenine, hem de dışa doğru yayılarak izin genişlemesine

yardımcı olacaktır. Karışım tabakasının iz eksenine ile kesiştiği nokta yakın izin sonudur (2-5 rotor çapı) (Crespo vd, 1999). Momentum transferi için akış yönü ve radyal yön ele alındığında, karışım tabakasındaki yayılım biçiminden dolayı momentum transferine en büyük katkı radyal yönden gelmektedir (Lynum, 2013).

Ainslie (1988) çalışmasında maksimum hız farkı 1-2 rotor çapı mertebesinde sonra gerçekleştiğini ancak daha düşük türbülans yoğunluğunda bu mertebenin daha da büyük olabileceğini göstermiştir.

Yüksek itki seviyelerinde iz alanındaki rüzgâr şiddeti ile iz dışında rüzgâr şiddeti farkı daha büyük olduğundan karışım tabakası daha büyük olacaktır. Burada, izdeki türbülans, momentum transferini sağlamaktadır. Bu sayede iz genişler ve hız farkı azalır (Sanderse, 2009). Barthelmie (2010) çalışmasında türbülanslı izin genişlemesini çevre türbülansın, türbin üretimli türbülansın, rüzgâr şiddetinin ve yönünün, termal tabakalaşmanın ve izin yer ile etkileştiği noktanın fonksiyonu olarak tanımlamıştır. Yüksek türbülans seviyesinde ize olan momentum transferi artacağından, izin gelişimi yani izdeki rüzgar şiddetinin serbest akış seviyesine yakınsaması, hızlandırmaktadır. Aksine düşük türbülans seviyesinde momentum transferi daha düşük olacağından serbest akış ile iz arasında daha büyük rüzgar şiddeti farkları ve izin serbest akış seviyesine yakınmasının daha uzun mesafelerde gerçekleştiği gözlemlenir. Maksimum güç farkı yüksek itki katsayısı (düşük rüzgar şiddeti) ve düşük türbülans seviyesi koşullarında meydana gelir. (Sanderse, 2009).



Şekil 2.3: Rüzgar türbinin iz gelişimi ve izdeki rüzgar profili (Sanderse, 2009).

Yakın iz bitiminden sonra basınç gradyanı daha az etkili olur ve izdeki türbülans seviyesine son derece bağlı olarak izdeki rüzgar şiddetinin bozulmamış (undisturbed) gelen akışa oranı kademeli olarak azalır. Uzak iz bölgesinde iz tamamen gelişmiştir.

Yerin ve çevrenin kaymalı akışının varlığından dolayı tamamen geçerli olmasa bile, eksensel simetri ve akış doğrultusunda sabit basınç gibi varsayımlar yapılarak hız farkı ve türbülans yoğunluğu için özbenzeş çözümler (normal profiller) üretilebilir. Gerçekte maksimum hız farkı ve türbülans yoğunluğu türbin eksenlerinde değil, sırasıyla kulenin varlığından dolayı türbin eksenin altındadır ve büyük kaymanın görüldüğü yer olan türbin ekseninin üzerindedir (Sanderse, 2009).

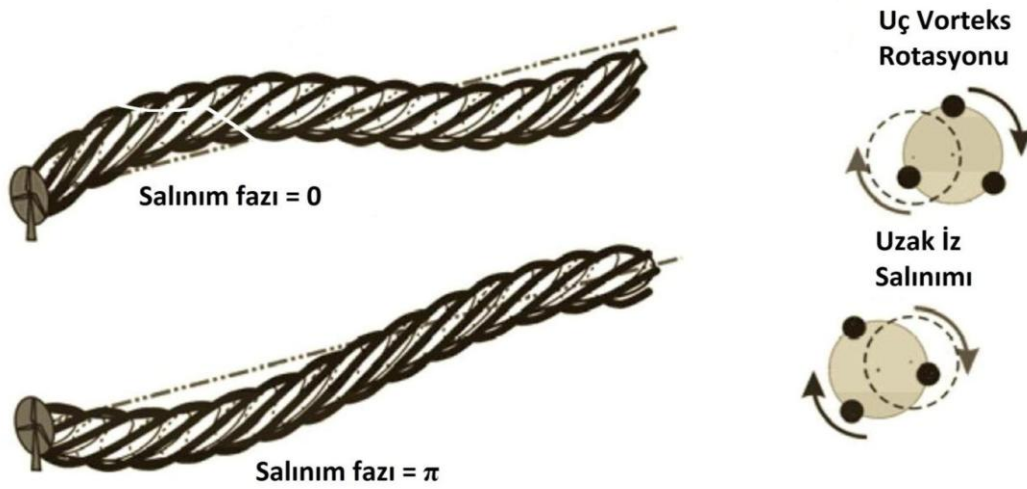
Mesafe ile rüzgar şiddeti farkındaki azalma türbülans yoğunluğundaki azalmadan daha hızlı gerçekleşir. Dolayısıyla daha uzak iz bölgelerinde türbülans yoğunluğu varlığını sürdürebilir. Türbülans türbin üzerinde yorulma yüküne neden olmaktadır. Tam iz koşullarında yani iki türbin arka arkaya rüzgara paralel yönde konuşlandırıldığında rüzgar altı mesafelerde kısmi iz koşuluna kıyasla yorulma yüklerinde artışa neden olur (Sanderse, 2009).

Rüzgar tarlalarında tarla verimliliği arazinin topografik özelliklerine, çevre (atmosferik) türbülansına, tarladaki türbinlerin düzenine, rüzgar frekans dağılımına ve itki katsayısı gibi türbinin çalışma ayarına bağlıdır. Yüksek türbülans seviyesi izdeki türbülanslı karışımı hızlandırarak izdeki akışın serbest akış seviyesine dönüşünü hızlandırır. Diğer bir örnek, açık deniz türbin tarlalarında çevre türbülansı daha düşük olduğundan daha kalıcı izlere neden olur. Açık deniz türbin tarlalarında türbin üretimli türbülansın etkileri daha önemli hale gelir. Atmosferik türbülansın haricinde türbin-üretimli türbülans da ayrıca önemlidir. Genelde daha yüksek türbülans seviyeleri karışımı daha da hızlandırmalarına ve rüzgar-altı türbinleri için daha büyük yorulma yüküne neden olmasına rağmen bazen kısmi iz etkisinde kalan rüzgar altı türbini, türbin rotor alanındaki rüzgar alanının standart sapması daha yüksek olduğundan, daha yüksek yorulma yüklerine maruz kalabilmektedir (Sanderse, 2009).

Bir türbin dizisinde her rüzgar altı türbini kendinden bir önceki rüzgar üstü türbinine göre daha az güç üretmesine rağmen artan türbülans seviyesinin daha iyi bir türbülanslı karışım sağlamasından dolayı, art arda gelen türbinler arasındaki güç kayıplarında azalma meydana gelir. Bu süreç bir doyma değere kadar devam eder. Dizideki belli bir türbin sırasından sonra rüzgar altı türbinlerin güç üretimlerinin yaklaşık sabit olmasının nedeni birkaç türbin sırasından sonra türbülansın denge (doyma) seviyesine ulaşmasıdır (Sanders, 2009).

2.3.2 İz menderesi

İz menderesi izin yan rüzgar eksenindeki stokastik hareketi olarak tanımlanabilir (Şekil 2.4). İz menderesinin rotordan daha büyük ebatlara sahip büyük ölçekli türbülanslı girdaplardan meydana gelmektedir. İz menderesinin rolü çok önemlidir çünkü iz menderesi rüzgar çiftliklerindeki rüzgar türbini yüklerinde (yorulma yükü ve özellikle sapma yükü) atışa neden olabilir ama aynı zamanda serbest akıştaki rüzgar şiddeti ile izdeki rüzgar şiddeti arasındaki farkın azalmasında yardımcı olup böylece güç kayıplarını azaltmaktadır (Sanderse, 2009; Larsen ve diğ., 2007).



Şekil 2.4: İz menderesi (Larsen ve diğ., 2007).

Ainslie (1988) iz menderesinin serbest akıştaki rüzgar şiddeti ile izdeki rüzgar şiddeti arasındaki farkı üzerindeki etkisini, iz menderesini rüzgar yönündeki değişkenliğe ilişkilendirerek modelleyen ilk kişidir.

Larsen ve diğ. (2007) iz menderesini hem nümerik modelle hem de deneylerle kapsamlı olarak incelemiştir. Deneyler LiDAR ölçümleriyle yapılmış. İzin taşınımının, izin atmosferik sınır tabakadaki büyük ölçekli türbülans yapılarıyla sürülen pasif izleyici (passive tracer) olarak davranıyormuş gibi modellenebileceğini varsaymışlardır.

Espana vd. (2012) çalışmalarında büyük atmosferik türbülans ölçeklerinin rüzgar türbin izlerinde gözlenen iz menderesi olgusu üzerindeki rolünü ispatlamayı amaçlamıştır. Gözenekli bir disk kullanılarak modellenmiş bir rüzgar türbini, rüzgar tüneline orta derece pürüzlü AST üretimi, Modellenen AST disk çapının 10 katı

türbülans integral uzunluk ölçeğine sahip, burada iz menderesleri kaydedilmiş. Ayrıca daha düşük türbülans yoğunluklu homojen ve izotropik türbülans koşullarında da testler yapılmış (diskten 10 ve 3 kat daha küçük türbülans uzunluk ölçekler). Bu koşulda iz menderesi gözlenmemiş. Dolayısıyla iz menderesinin oluşumunda büyük türbülans ölçekleri sorumlu. Dahası iz menderesini periodik vorteks saçıntısından ayırmak için yanı akış koşullarıyla katı disk üzerinde deneyler yapılmış ve periodik vorteks saçıntılarının iz menderesinden sorumlu olmadığı gözlenmiş. Çalışma nötr atmosfer koşulu altında gerçekleştirilmiştir.

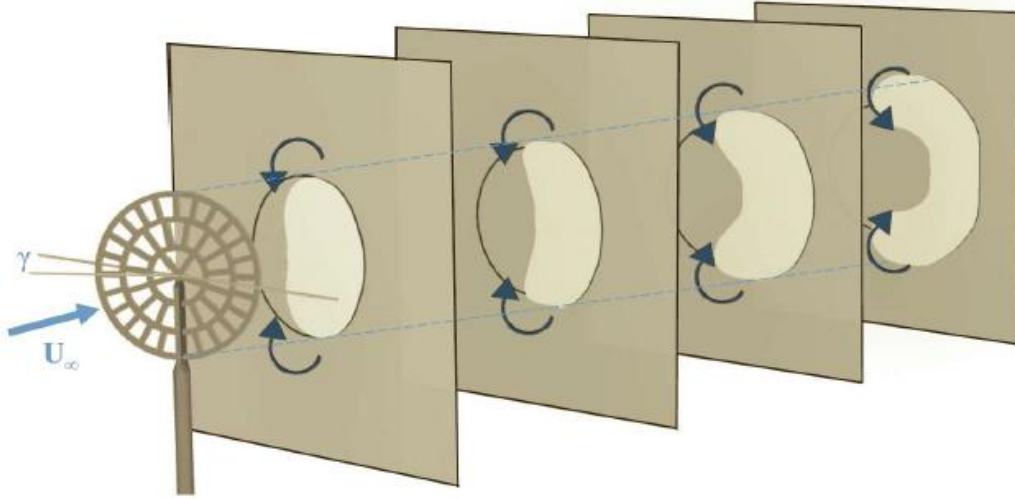
Larsen ve diğ. (2015) çalışmalarında hem Sonic ölçümlere hem de LiDAR ölçümlerine dayalı büyük miktarda tam ölçekli verinin analizi ile, Dinamik İz Menderesi modellemesi kapsamında, atmosferik kararlılığın sadece iz menderesini meydana getiren büyük türbülans ölçeklerini etkilediği ortaya koymuştur. İzdeki difüzif etkilerden sorumlu küçük ölçekli türbülans rejiminin ise menderes referans çerçevesinde atmosferik kararlılık koşullarına göre değişmez olduğu kabul edilebileceği gösterilmiştir.

Bingöl ve diğ. (2010) ve bu çalışmanın ikinci kısmı olarak Trujillo ve diğ. (2011) geliştirdikleri yeni deneysel teknik ile hem direkt olarak anlık serbest akıştaki rüzgar şiddeti ile izdeki rüzgar şiddeti arasındaki farkının ölçümünü hem de iz menderesi referans çerçevesindeki anlık iz genişlemesinin ölçümünü, sırasıyla, hem bir boyutta hem de iki boyutta sağlamıştır. Bunların sağlanmasıyla izin rotordan büyük ebatlardaki girdaplarla pasif olarak taşındığını varsayan dinamik iz modellemenin temel varsayımların doğrulanmıştır (Bingöl ve diğ., 2010).

2.3.3 Rota sapması

Rüzgar yönündeki değişkenlikten dolayı bir rüzgar türbini genellikle belli bir sapma açısıyla rüzgara yönelir (Sanderse, 2009). Sapma rüzgar üstü türbinin izini saptırır, bundan dolayı da serbest akıştaki rüzgar şiddeti ile izdeki rüzgar şiddeti arasındaki farkı azaltır. Bu rüzgar altı türbini için bir avantajdır. Diğer yandan rüzgar üstü türbini gelen rüzgarın bir kısmından yararlanabileceğinden dolayı, sapma, rüzgar üstü türbinin güç üretiminin düşüşüne neden olur. Rüzgarı bir sapma açısıyla alan rüzgar türbinin arkasındaki akış, momentum korunumundan dolayı türbin rotorunun dönüş yönünün tersi yönünde sapar. Rüzgar türbini sapmanın olduğu durumda sapmanın olmadığı teorik duruma göre gelen rüzgarın daha azından

yararlanacağından, serbest akıştaki rüzgar şiddeti ile izdeki rüzgar şiddeti arasındaki fark daha az olur. Bu rüzgar altı türbinin daha yüksek rüzgar şiddetine maruz kalacağı anlamına gelmektedir. Sapmanın olmadığı durumda daha yüksek mekanik türbülans üretiminden dolayı, iz serbest akışa daha hızlı yakınsar Rüzgarı bir sapma açısıyla alan bir rüzgar üstü türbinin güç üretimi, sapma açısının kosinüsünün karesiyle orantılı olarak azalır. Rüzgar altı türbinin güç üretimi ise artar. Ancak rüzgar tarlasındaki üretilecek toplam güç artmaz aksine azalır. Ancak optimum bir sapma açısıyla rüzgar tarlasındaki güç üretimi artırılabilir (Barlas, 2014). Dahlberg ve Medici (2003) altı türbinli bir düzen için güç üretiminde % 4 artış yakalamıştır. Howland ve diğ. (2016) sapmanın verimliliğinin ya da etkililiğinin sadece izin sapma derecesine değil aynı zamanda izin şekline bağlı olduğunu rüzgar tüneli deneyi ile göstermiştir. İki boyutlu bir bakış açısıyla izin yaklaşık dairesel şekli kademeli olarak kıvrımlı bir hal alır (Şekil 2.5). Sonuçlar aktüatör disk ve aktüatör çizgi modellerinin kullanımıyla büyük girdap benzetimlerinde tekrar üretilmiştir. Rüzgarı bir sapma açısıyla alan rüzgar türbinin arkasında oluşan izin kıvrımlı hale gelme olgusu daha önceki çalışmalarda hiç açıklanmamıştı (Howland ve diğ., 2016).



Şekil 2.5: İz şeklinin deformasyonunun görsel gösterimi (Howland ve diğ., 2016).

3 VERİ VE ANALİTİK RÜZGAR TÜRBİNİ İZ MODELLERİ

Bu bölümde performans değerlendirmesinde kullanılacak gözlem verileri ve iz modelleri sunulacaktır. Bölüm 3.1'de kullanılacak farklı analitik rüzgar türbin izi modellerinde kullanılacak veri kümeleri ile ilgi ayrıntılar verilecektir. Bölüm 3.2'de ise bu tez kullanılacak dört farklı analitik rüzgar türbin izi modeli ve WindSim yazılımı ile ilgili ayrıntılar verilecektir.

3.1 Veri

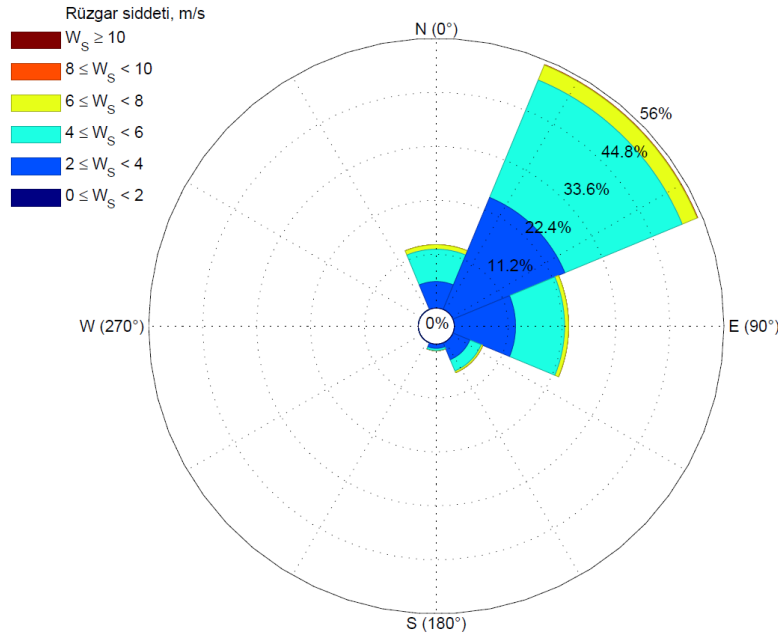
3.1.1 İstanbul teknik üniversitesi meteoroloji gözlem parkı verisi

Bu bölümdeki çalışmada analitik iz modelleri olan, standart Jensen, yeni Jensen, Frandsen ve Larsen iz modellerinin karakteristiklerini ortaya koymaktır. Bunun için İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) Ayazağa Kampüsü Meteoroloji Gözlem Park'ında TÜBİTAK 107M331 numaralı proje kapsamında kurulan gövde yüksekliği 17 metre, kurulu gücü 1.5 kW ve modeli E15 olan Unitron marka küçük ölçekli rüzgar türbinin 2009 ve 2010 yıllarına ait rüzgar verisi kullanılmıştır. Türbin ve türbinin bulunduğu lokasyona ait fotoğraflar Ek-A'da verilmiştir. Türbin rotorunun önünde ve arkasında, türbine bağlı ve türbin rotoruna oldukça yakın 2 adet anemometre kuruludur. Türbin rotorunun arkasında kurulu olan anemometre ölçümleri türbin rotoru tarafından oldukça müdahaleli olduğundan, Meteoroloji Gözlem Park'ında 6 metre yüksekliğe sahip Akom marka ölçüm direği rotor arkasındaki türbin arkası rüzgar ölçüm verisi olarak kullanılmıştır. Türbin rotor merkezinin önündeki ve arkasındaki ölçüm verileri ile türbinin rüzgar şiddeti ile değişen türbin itki ve güç katsayısı eğrileri oluşturulmuştur. Türbin'e ait diğer özellikler (Nominal güç, nominal güce ulaşma hızı, pik üretim, kanats sayısı, devreye girme hızı, devreden çıkış hızı, türbin rotorunun taradığı alan, rotor çapı ve maksimum hız) Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1: İTÜ meteoroloji parkında kurulu olan Unitron E15 rüzgar türbinin bazı özellikleri (Kaymak ve diğ.,2011).

Açıklama	Özellik
Nominal Güç	1500 W
Nominal Güce Ulaşım Hızı m/s / mph	10.5 / 25
Pik Üretim	1750W
Kanat Sayısı	3
Devreye Girme Hızı m/s / mph	2.7 / 6
Taranan Alan	9.2 / 95 Sq.m /sq.feet
Devreden Çıkış Hızı	27 mph
Rotor Çapı	3.2m / 11 ft
Maksimum Rüzgar	55 m/s

Ölçüm veri kümesi seçiminde, veri kümesi olarak 2009 ve 2010 yılları seçilmiştir. Bu yıllara ait rüzgar dağılımı aşağıdaki şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1: İTÜ meteoroloji parkında 2009 ve 2010 yılları için rüzgar dağılımı.

Yukarıdaki şekil 3.1'de görüldüğü üzere hakim rüzgar yönü kuzeydoğuludur. Verinin yaklaşık % 56'ı bu yöndedir. Tüm dağılımda, yoğunlukla 4-6 m/s aralığındaki düşük şiddetli rüzgarlar mevcuttur.

Analitik iz modellerini bu aşamada uygulayabilmek için rüzgar veri kümesinden hakim rüzgar yönünde en sık esen rüzgar yönleri seçilmiştir. Bu yönler 24.8, 37, 39.7, 40.1 ve 49.3 derecedir. Bu yönlerdeki serbest akış rüzgar şiddeti, u_0 , türbülans yoğunluğu, I_a , ve pürüzlülük uzunluğu, z_0 , gibi atmosferik ve topografik parametrelerin ve indüksiyon faktörü, a , itki katsayısı, C_T , ve güç katsayısı, C_P , gibi

türbinin aerodinamik parametrelerin yukarıdaki yönlerde esen her rüzgar kümesinden bir tane seçilerek seçilen her yönün o tarihteki değerleri aşağıdaki çizelge 3.2'de sunulmuştur.

Çizelge 3.2: Seçilmiş rüzgar yönleri için atmosferik, topografik ve aerodinamik veriler.

	Rüzgar Yönleri (derece)				
Parametreler	24.8	37	39.7	40.1	49.3
U_{∞} (m/s)	4.1000	4.0000	4.6000	5.6000	4.3000
I_a (-)	0.2754	0.2754	0.2754	0.2754	0.2667
z_0 (m)	0.4500	0.4500	0.4500	0.4500	0.4000
a (-)	0.2439	0.3125	0.2065	0.2857	0.3140
C_T (-)	0.7377	0.8594	0.6555	0.8163	0.8615
C_P (-)	0.2439	0.5908	0.5201	0.5831	0.5911

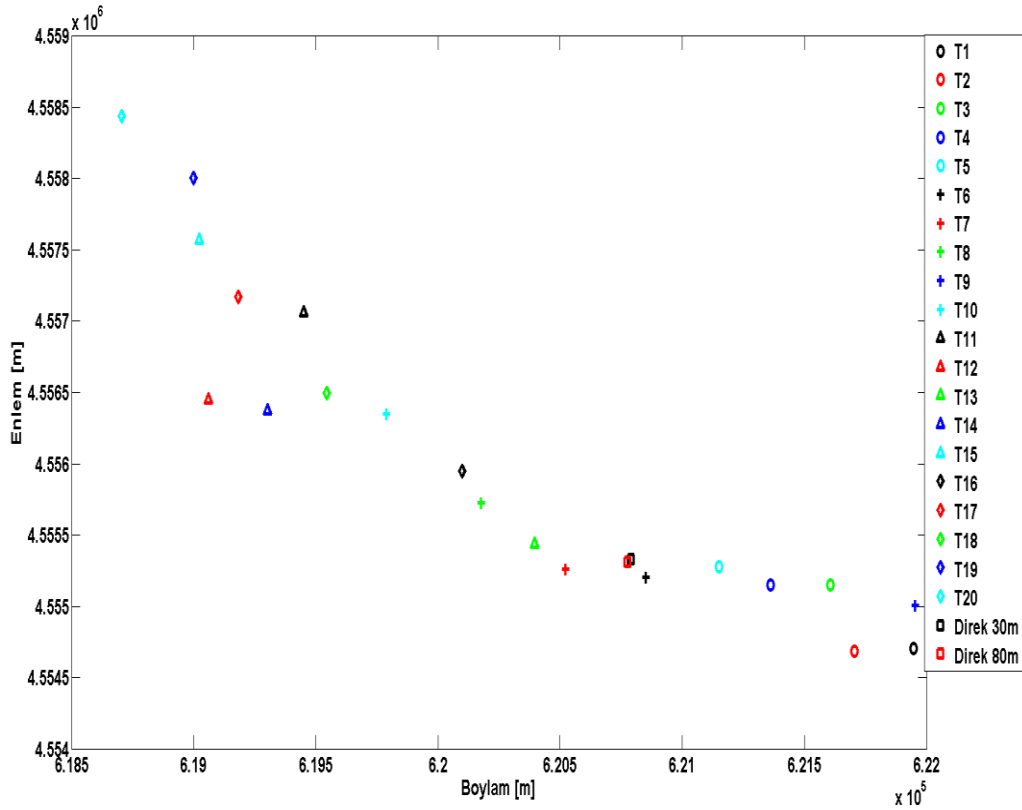
Bu çalışmada kullanılacak analitik iz modellerinin, mesafeyle iz ile serbest akış arasındaki rüzgar şiddeti farkının azalma hızı, başlangıç iz çapı ve mesafe ile iz çapının gelişimi gibi karakteristikleri ortaya konulmuştur. Ayrıca belirli rüzgar altı (downwind) mesafelerde, rüzgar üstü türbinin (upwind turbine) rotor ekseninde ($r/D = 0$) konumlandırılacak bir hipotetik türbin için, yukarıdaki tabloda belirtilen seçilmiş her rüzgar yönü için rüzgar yönü değişimlerinde, rüzgar altı türbin rotor alanı ile rüzgar üstü türbinin iz alanı arasındaki değişen etkileşimleri ve bunun sonucu olarak rüzgar altı türbin rotor merkezindeki değişen ortalama rüzgar şiddetindeki değişimler ortaya konulmuştur. Bu bölümdeki çalışma modellerin performanslarının değerlendirilmesini amaçlanmamaktadır. Bu çalışmada sadece tekli iz (single wake) durumu için modellerin karakteristiklerinin ortaya konulması amaçlanmıştır. Tezde, çizelge 3.2'deki gösterimde 40.1 derece rüzgar yönü durumu Sonuçlar bölümünde yer alacaktır. Ancak diğer rüzgar yönü durumlarının sonuçları Ek-A ve Ek-B bölümlerinde yer verilmiştir.

Mesafeyle, iz ile serbest akış arasındaki rüzgar şiddet farkının azalma hızı, iz ile serbest akış arasındaki rüzgar şiddeti oranının büyümesi anlamına gelmektedir. Bu oran aynı zamanda literatürde normalleştirilmiş iz hızı (normalized wake speed) olarak bilinmektedir. Aynı zamanda iz ile serbest akış arasındaki rüzgar şiddeti farkının serbest akıştaki rüzgar şiddetine oranı iz farkı (normalized wake deficit)

olarak bilinmektedir. Tezin bazı kısımlarda, literatürde kullanılan yukarıdaki ilk ifade kullanılmıştır.

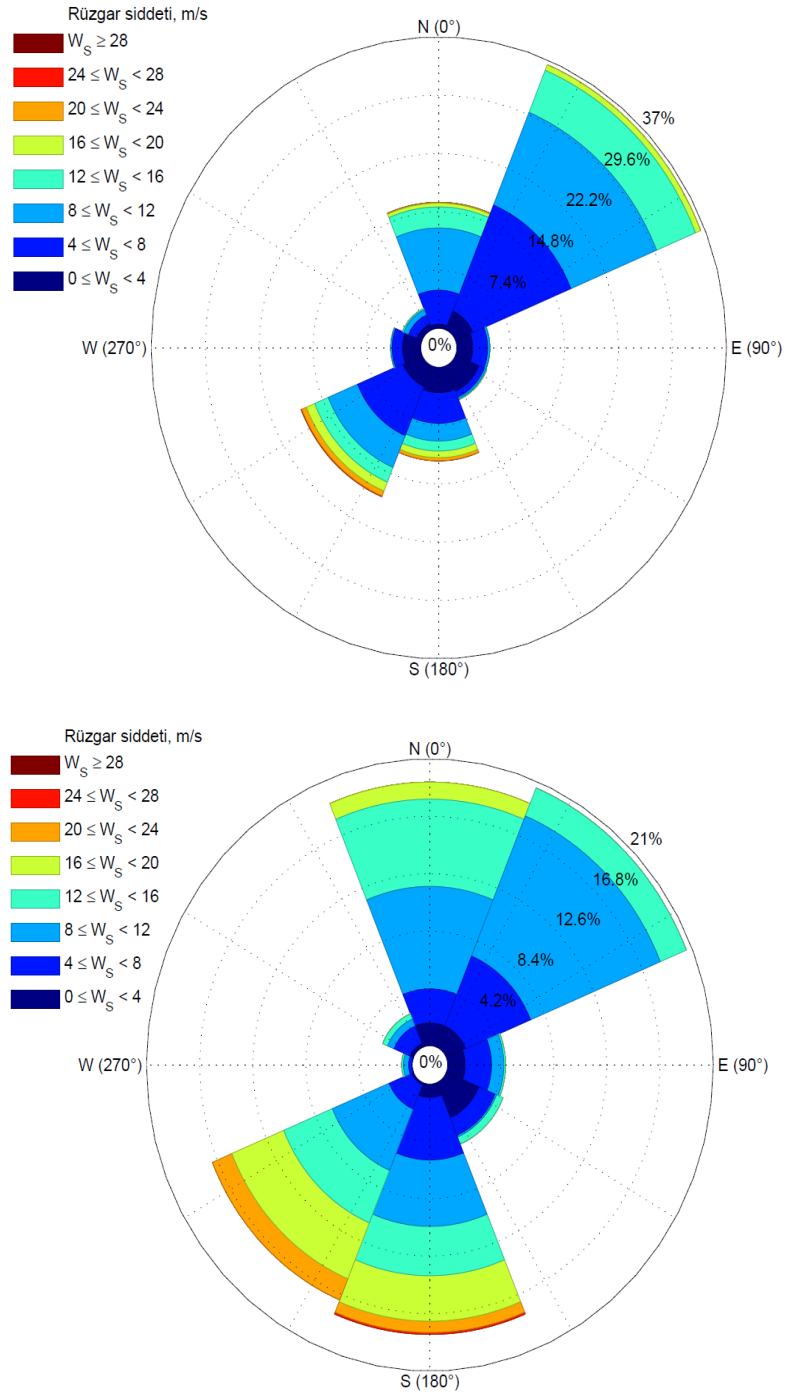
3.1.2 Çatalca rüzgar enerji santrali verisi

Bu bölümde dört farklı analitik iz modelinin kompleks arazideki performansları test edebilmek için Çatalca Rüzgar Enerji Santrali rüzgar ölçüm verisi kullanılmıştır. Çatalca Rüzgar Enerji Santrali, İstanbul ilinin Çatalca ilçesindedir. Santral 20 adet, gücü 3 MW olan, Vestas V90 rüzgar türbini içermektedir. Türbinlerin gövde yüksekliği 80 metre ve rotor çapı 90 metredir. Türbinler büyük eğimlerin olduğu kompleks bir arazide kuzeydoğuya bakacak şekilde konuşlandırılmıştır. Çatalca Rüzgar Enerji Santralindeki türbin koordinatları şekil 3.2' de görülebilir.



Şekil 3.2: Çatalca rüzgar enerji santralindeki türbinlerin koordinatları.

Ölçüm verisi kümesi olarak 2010 yılının Ocak ayı seçilmiştir. 2010 yılı ve 2010 yılı Ocak ayı için rüzgar dağılımı şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3: 2010 yılı (üstte) ve 2010 yılı Ocak ayı (altta) için rüzgar dağılımı.

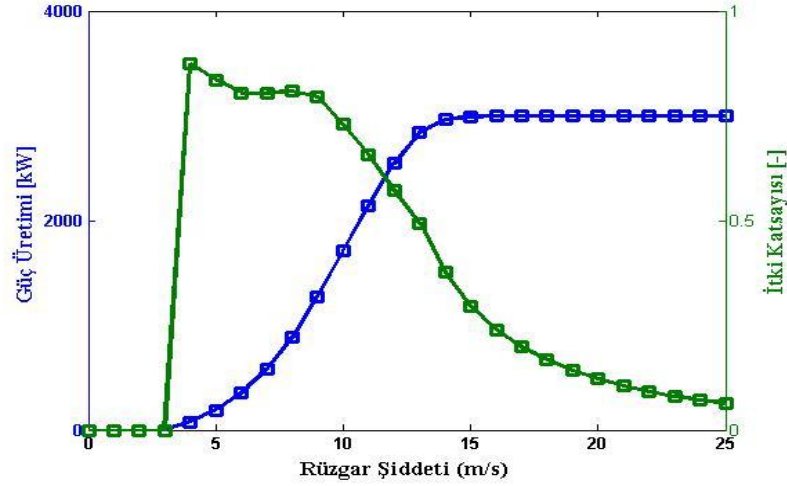
Yukarıdaki şekilde görülebileceği üzere hakim rüzgar yönü kuzeydoğuludur. Ayrıca, ocak ayında kuzey ve güneybatı yönlerinden de sıklıkla esmektedir. Rüzgar şiddeti, neredeyse tüm sektörlerde (45 derecelik 8 sektör), 8-12 m/s aralığında en büyük orana sahiptir. Akışı büyük oranda arazi yönlendirdiğinden, arazinin çoklu iz durumunu yakalamak için uygun olmadığı gözlenmiştir. Bu sebeplerden dolayı bu bölümde farklı tekli iz durumları için dört farklı analitik iz modelinin

performansları test edilmiştir. Test için Türbin 1 - Türbin 2 etkileşimi (Türbin 1'in iz etkisindeki Türbin 2), Türbin 1 - Türbin 9 etkileşimi, Türbin 11 - Türbin 14 etkileşimi ve Türbin 11 - Türbin 17 etkileşimi incelenmiştir. Türbin çiftleri arasındaki mesafe ve merkez eksen açısı aşağıdaki çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3: Tekli iz durumu testi için seçilmiş türbin çiftleri arasındaki mesafe ve merkez eksen açısı.

	Mesafe (metre, m / rotor çapı mesafesi, D)	Merkez eksen açısı (derece)
Türbin 1 - Türbin 2 çifti	242.7447 / 2.6972	85.5
Türbin 1 - Türbin 9 çifti	302.0811 / 3.3565	181.5
Türbin 11 - Türbin 14 çifti	701.7834 / 7.7976	12
Türbin 11 - Türbin 17 çifti	288.9429 / 3.2105	112

Yukarıdaki çizelge 3.3'te görüleceği üzere Türbin 1 - Türbin 2 çifti arasındaki mesafe yaklaşık 2.7 rotor çapı kadardır. Tian ve diğ. (2015) çalışmalarında, Jensen iz modellerinin 3 rotor çapına eşit veya daha büyük mesafe için uygun olduğunu belirtmiştir ancak yine de bu tez çalışmasında Jensen modellerinin yakın izdeki (near wake) öngörü kabiliyeti test edilmiştir. Türbin çiftleri arasındaki merkez eksen açısı belirlendikten sonra merkez açısının ± 20 derece değişimi sonucunda modellerin gözlem verileriyle uyumu incelenmiştir. Buradaki amaç modellerin tam iz, kısmi iz ve sıfır etkisini yakalama kabiliyetini test etmektir. İz gelişimini (wake recovery) iyi bir şekilde görebilmek için itki katsayısının yüksek olduğu rüzgar şiddeti seçilmelidir. Vestas V90 türbinin itki katsayısı eğrisi şekil 3.4'te verilmiştir. Şekil 3.4'e göre maksimum iz rüzgar yönü türbini (upstream turbine) 4 m/s rüzgar şiddetine maruz kaldığında meydana gelir. Ancak rüzgar şiddeti olarak, bu tez çalışmasında test edilen rüzgar yön aralığı için 5-7 m/s rüzgar şiddet aralığı kullanılmıştır. Bu rüzgar şiddet aralığında itki katsayısı aralığı 0.8360 - 0.8050'dir. 6 - 7 m/s rüzgar şiddet aralığında itki katsayısı sabittir.



Şekil 3.4: Vestas V90 rüzgar türbininin itli katsayısı ve güç eldesi eğrisi.

Türbin 11 - Türbin 14 testi haricinde modellerin diğer türbin çiftleri testinde sadece 5-7 m/s rüzgar şiddet aralığı kullanılmıştır. Türbin 11 - Türbin 14 testi için 5-7 m/s ve 8-10 m/s olmak üzere iki farklı rüzgar şiddet aralığı kullanılmıştır. Türbin11 - Türbin 14 haricindeki testlerde, her 10 dakikalık ortalama veri için incelenmiştir. Türbin11 - Türbin 14 aralığında ise merkez eksen açısı hakim rüzgar yönünde ve bu yönde oldukça fazla veri bulunduğundan, bu yöndeki rüzgar verisi 1 derecelik aralıklarda gruplandırılmıştır.

3.2. Analitik İz Modelleri ve WindSim

3.2.1 Standart Jensen iz modeli

Standart Jensen iz modeli (Jensen, 1983; Katic ve diğ., 1986) en eski ve en basit iz modellerinden biridir. Bu model, ayrıca, WAsP, GH WindFarmer, WindPro ve Open-Wind gibi ticari kodlarda da yaygın biçimde kullanılan analitik iz modellerden biridir. Standart Jensen iz modeli, izi tamamen türbülansı varsaymaktadır ve uç vortekslerden gelen kaktıyı ihmal etmektedir. Bundan dolayı bu model yakın iz bölgesi için oluşturulmamıştır (Tian ve diğ., 2015). Model momentum korunumundan türetilmiştir. Ancak, Bastankhah ve Porte-Agel (2014) çalışmalarında, bu modelinin herhangi bir momentum dengesini göz önünde bulundurmaksızın sadece kütle korunumundan türetilbileceğini göstermiştir. Bu modelde, türbin izinin rüzgar altı bölgede ampirik olarak belirlenen bir iz sönüm katsayısı, k , ile lineer olarak genişlediği varsayılmaktadır. İz sönüm katsayısı literatürde kara olan türbinler için 0.075 ve denizde olan türbinler için 0.05 olarak

atanmıştır. Ancak bu katsayısı pürüzlülük uzunluğunun bir fonksiyonu olduğundan, literatürde kullanılan değerler her zaman için geçerli değildir. Standart Jensen modelinde izdeki rüzgar şiddeti rüzgar altı mesafenin bir fonksiyonu olduğundan, belirli bir rüzgar mesafesindeki yan rüzgar profili uniformdur. Bu uniform dağılım gerçekçi olmamasına rağmen, Katic ve diğ. (1986) çalışmalarında, modelin amacının rüzgar alanındaki akışı tam ve doğru olarak açıklamaktan ziyade daha çok rüzgar alanındaki enerji kapasitesini hesaplamaya çalıştığını ifade etmiştir. Standart Jensen modelinde, izdeki rüzgar şiddeti

$$U_w = U_\infty \left(1 - \frac{2a}{\left(1 + k_w \frac{x}{r_1}\right)^2}\right) \quad (3.1)$$

denklemleri ile verilmektedir. Burada, x rüzgar altı mesafesini, U_∞ rüzgar tarafındaki rotor tarafından bozulmamış gelen rüzgar hızını (unperturbed incoming velocity), a ise aksensel akış indüksiyon faktörünü temsil etmektedir. a , burada, itki katsayısı C_T 'e bağlı ifadesi aşağıdaki denklem 3.2 ile tanımlanmaktadır..

$$a = \frac{(1 - \sqrt{1 - C_T})}{2} \quad (3.2)$$

Denklem 3.3'de r_1 türbinin hemen arkasındaki genişleyen izin yarıçapını temsil eden karakteristik rüzgar altı rotor yarıçapı ve

$$r_1 = r_r \sqrt{(1 - a)(1 - 2a)} \quad (3.3)$$

denklemleri ile hesaplanmaktadır. Burada r_r türbinin rotor yarıçapını temsil etmektedir. Jensen modeli, türbin izinin, rüzgar altı bölgede ampirik olarak belirlenen bir iz sönüm katsayısı, k_w , ile lineer olarak genişlediğini varsaymaktadır. İz sönüm katsayısı, k_w , ve iz yayılma yarıçapı, r_w , sırasıyla,

$$k_w = \frac{1}{2 \ln\left(\frac{z_h}{z_0}\right)} \quad (3.4)$$

$$r_w = k_w x + r_r \quad (3.5)$$

denklemleri ile hesaplanmaktadır. Burada z rüzgar türbinin gövde yüksekliği, z_0 ise ilgili arazinin pürüzlülük uzunluğudur.

3.2.2 Larsen iz modeli

G. C. Larsen tarafından geliştirilen (Larsen ve diğ., 2003), ve ayrıca WindPro'da kullanılan ve EWTS-II modeli olarak da bilinen bu model Prandtl türbülanslı sınır tabaka denklemlerine dayanmaktadır. Öz benzeş bir rüzgar profili varsayılmaktadır. Kapalı form çözümü elde etmek için Prandtl'ın karışım uzunluğu teorisi kullanılmaktadır. Akışın sıkıştırılamaz, durağan olduğu ve kaymanın olmadığı varsayılmaktadır ve bundan dolayı akış eksensel simetrik.

Larsen, sınır tabaka denklemlerine hem birinci dereceden hem de ikinci dereceden yaklaşık çözümü göstermiştir. Bunlardan ikincisi yakın izde, rüzgar fark (velocity deficit) profilinde oluşan iki maksimum bölgeyi çözme kabiliyetindedir. Rotor iz yarıçapı, r_w , ve izdeki eksensel rüzgar şiddet farkı, $(\Delta U)_1$, sırasıyla,

$$r_w = \left(\frac{35}{2\pi}\right)^{\frac{1}{5}} (3c_1^2)^{\frac{1}{5}} (C_T A(x + x_0))^{\frac{1}{3}} \quad (3.6)$$

$$(\Delta U)_1 = -\frac{U_\infty}{9} (C_T A(x + x_0))^{-2} \left[r^{\frac{3}{2}} (3c_1^2 C_T A(x + x_0))^{\frac{-1}{2}} - \left(\frac{35}{2\pi}\right)^{\frac{3}{10}} (3c_1^2)^{\frac{-1}{5}} \right]^2 \quad (3.7)$$

denklemleri ile verilmektedir. Bilinmeyen iki sabitten biri olan c_1 Prandtl karışım uzunluğu ile ilişkilidir. Diğer sabit x_0 ise uygulanan koordinat sistemine göre olan rotorun pozisyonudur. Sabit c_1 ve x_0 aşağıdaki denklem 3.8'te ve 3.9'da sunulmuştur.

$$c_1 = \left(\frac{D_{eff}}{2}\right)^{\frac{5}{2}} \left(\frac{105}{2\pi}\right)^{\frac{-1}{2}} (C_T A x_0)^{\frac{5}{6}} \quad (3.8)$$

$$x_0 = \frac{9.5D}{\left(\frac{2R_{9.5}}{D_{eff}}\right)^3 - 1} \quad (3.9)$$

Burada D_{eff} efektif rotor yarıçapıdır ve

$$D_{eff} = D \sqrt{\frac{1 + \sqrt{1 - C_T}}{2\sqrt{1 - C_T}}} \quad (3.10)$$

denklemleri ile verilmektedir. $R_{9.5}$, türbinin 9.5 rotor çapı rüzgar altı mesafesindeki iz yarıçapıdır ve

$$R_{9.5} = 0.5[R_{nb} + \min(z_h, R_{nb})] \quad (3.11)$$

ile verilmektedir. Burada R_{nb} ise

$$R_{nb} = \max(1.08D, 1.08D + 21.7D(I_a - 0.05)) \quad (3.12)$$

ile verilmektedir. Burada I_a çevre türbülans yoğunluğunu temsil etmektedir. Sonuç olarak, Larsen modeli x ve r koordinatlarının yanı sıra itki katsayısına da bağlıdır.

Larsen (2009) daha sonra modeli geliştirmiştir. Geliştirdiği modelde R_{nb} fonksiyonuna yer verilmemiştir. Bu modelde ayrıca ampirik olarak hesaplanan 9.5 rotor çapı mesafesindeki iz yarı çapı parametresi, $R_{9.5}$ yerine gene ampirik olarak hesaplanmış 9.6 rotor yarıçapı mesafesindeki iz yarı çapı parametresi, $R_{9.6}$ kullanılmıştır. Bu parametre Vindeby açık deniz rüzgar tarlası için yapılan analiz kullanılarak hesaplanmıştır. 9.6 rotor yarıçapı mesafesindeki iz yarı çapı parametresi, $R_{9.6}$, aşağıdaki denklem ile verilmiştir.

$$R_{9.6} = a_1 \exp(a_2 C_T + a_3 C_T + a_4)(b_1 I_a + 1)D \quad (3.13)$$

Burada ampirik olarak belirlenen katsayıların (a_1, a_2, a_3, a_4 ve b_1) değerleri sırasıyla 0.435449861, 0.797853685, -0.124807893, 0.136821858 ve 15.6298.

Daha önceki çalışmalarda, ve WindSim ve WindPro gibi rüzgar tarlası dizaynı yazılımlarında Larsen ve diğ. (2003) çalışmasındaki model kullanıldığından bu tez çalışmasında da bu model kullanılmıştır.

3.2.3 Frandsen iz modeli

Diğer adı Riso analitik modeli olan bu analitik iz modeli, her bir türbinden ziyade daha çok tüm rüzgar tarlası boyunca iz davranışını incelemek için oluşturulmuştur. Model izdeki momentum fark korunumuna dayanmaktadır. Bu modelde üç farklı iz

rejimi bulunmaktadır: İlk rejim tekli veya çoklu izli akışın, komşu izlerle etkileşimde olmadığını varsaymaktadır. İkinci rejim iki komşu izli akışın etkileşime girmesiyle başlar ve izin genişlemesi sadece düşey yönde sınırlandırılmıştır. Üçüncü rejim izli akışın sınır tabaka ile dengede olduğunu varsaymaktadır. Bu durum rüzgar tarlası sonsuz büyüklükte olduğunda görülmektedir.

Bu modelde de Jensen modelinde olduğu gibi yan rüzgar profili uniformdur. Tekli iz durumunda, hız farkı

$$U_w = \frac{1}{2}U_\infty \pm \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{1}{2}U_\infty \frac{A_r}{A_w} C_T} \quad (3.14)$$

denklemleri ile hesaplanmaktadır. Burada A_r türbinin rotor süpürme alanını ve A_w ise izin alanını temsil etmektedir. İz çapı,

$$D_w = D_r (\beta^{\frac{k}{2}} + \alpha^* x)^{\frac{1}{k}} \quad (3.15)$$

ile hesaplanmaktadır. Burada itki katsayısına bağlı bir fonksiyon olan β ,

$$\beta = \frac{1 + \sqrt{1 - C_T}}{2\sqrt{1 - C_T}} = \left(\frac{D_{eff}}{D_r} \right)^2 \quad (3.16)$$

denklemleri ile verilmektedir. β ayrıca iz genişleme parametresi olarak da bilinmektedir. k bir sabittir ve 2 değerini almaktadır. Sabit α^* ise iz genişleme faktörünü temsil etmektedir ve Jensen modelindeki (Katic ve diğ., 1986) iz sönüm katsayısı k_w 'a bağlı olup k_w 'nin 10 katına eşittir.

Çoklu iz durumunda, izler, her birinin bir sabite ama farklı hız farkına sahip olduğu birçok kesite bölünür. Rotor alanındaki ortalama rüzgar şiddetini hesaplayabilmek için, yarı lineer bir yöntem kullanılır (Rathmann ve diğ., 2006).

3.2.4 Yeni Jensen iz modeli

Tian ve diğ. (2015) tarafından oluşturulan bu model, standart Jensen modeline dayanarak geliştirilmiştir analitik bir iz modelidir. Bu modelde ilk olarak Jensen modelinde herhangi bir rüzgar-altı mesafesindeki uniform yan rüzgar şiddet farkı

profilini yerine kosinüs şeklinde bir yan rüzgar şiddet farkı profili kullanılmıştır. Bu kosinüs şeklindeki profil, Jensen'in (1983) çalışmasındaki Nibe iz projesinden elde edilen ölçümlerle nümerik tahminler arasındaki uyumun hem yakın hem de uzak iz bölgesinde, tatmin edici derecede sağlanmasıyla doğrulanmıştır. Bu profilin normal (gaussian) profilinin yerine tercih edilmesinin sebebi ise normal profilin yakın iz bölgesinde oldukça fazla hata göstermesidir (Rethore, 2006). Bu modelde standart Jensen modelindenki uniform yan rüzgar şiddet farkı profilinin kosinüs şeklinde bir yan profil ile değiştirilmesinin yanı sıra standart Jensen modelindeki sadece atmosferik türbülansa bağlı olan bir iz sönüm katsayısı yerine hem atmosferik türbülansa hem de rotor üretimli türbülansa bağlı bir iz sönüm parametresi kullanılmıştır. Bu parametre mesafe ile değişmektedir. Model efektif türbülans (effective turbulence) hesabında yeni bir türbülans modeli sunmuştur. Standart Jensen modelindeki iz hesabında kullanılan denklemler yeniden aşağıda verilmiştir :

$$U^* = U_{\infty} \left[1 - \frac{2a}{\left(1 + \frac{k_w x}{r_1}\right)^2} \right] \quad (3.17)$$

Burada U^* herhangi bir rüzgar altı mesafesindeki iz rüzgar şiddeti, U_{∞} gelen rüzgar şiddeti, a itki katsayısına, C_T , bağlı eksensel indüksiyon faktörüdür ve aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır :

$$a = \frac{(1 - \sqrt{1 - C_T})}{2} \quad (3.18)$$

Türbinin hemen ardındaki rüzgar-altı mesafedeki genişleyen iz yarıçapının temsil eden karakteristik rüzgar-altı rotor yarıçapı

$$r_1 = r_d \sqrt{\frac{1 - a}{1 - 2a}} \quad (3.19)$$

denklemleri ifade edilmektedir. Burada r_d türbin rotor yarıçapını temsil etmektedir. Sırasıyla, iz sönüm katsayısı, k , ve iz yarıçapı, r_x , sırasıyla aşağıdaki denklem 3.19 ve 3.20 ile tanımlanmaktadır :

$$k_w = \frac{1}{2 \ln\left(\frac{z_h}{z_0}\right)} \quad (3.20)$$

$$r_w = k_w x + r_d \quad (3.21)$$

Burada z türbin gövde yüksekliği z_0 yüzey pürüzlülüğü, x belirli bir rüzgar-altı mesafesidir. Burada açıklanan standart Jensen modeli daha önce yukarıda açıklanan standart Jensen iz modeli ile aynıdır. Tüm denklemlerin yeniden yazılıp tüm parametrelerin açıklanmasının nedeni yukarıdaki modelde kullanılan denklemlerdeki indis notasyonları ile bu modelde standart Jensen modeli için kullanılan denklemlerdeki indis notasyonlarının farklı olmasından dolayıdır.

Yeni modelde kullanılan denklemin çıkış denklemi aşağıdaki denklem 3.21'de tanımlanmaktadır.

$$U_w = A \cos(Kr\pi) + B \quad (3.22)$$

Burada A , K ve B birer sabit ve r iz merkezinden olan radyal mesafedir. Bu model orijinal Jensen modelini baz aldığından basitleştirme adına aşağıdaki verilen üç varsayımda bulunmuştur :

- Varsayım 1: Yeni modeldeki iz yarıçapı orijinal modeldeki ile aynıdır.

$$\frac{2\pi}{K} = 2r_x \quad (3.23)$$

- Varsayım 2: Eğer iz merkezinden olan radyal mesafe, r , iz alanın sınırına eşitse veya sınırı aşmışsa ortalama rüzgar şiddeti serbest akış rüzgar şiddetine eşit olur.

$$A \cos(Kr_x\pi) + B = U_\infty \quad (3.24)$$

- Varsayım 3: Bu modelde hesaplanan kütle akısı orijinal modelde hesaplanan kütle akısına eşit olduğu göz önünde bulundurulur.

$$\int_{-r_x}^{r_x} [A \cos(Kr\pi) + B] dr = 2r_x U^* \quad (3.25)$$

Yukarıdaki varsayımlarda verilen denklem sistemi çözülerek daha önce yukarıda belirtilen sabitler aşağıdaki gibidir :

$$A = U_{\infty} - U^* \quad (3.26)$$

$$K = \frac{\pi}{r_x} \quad (3.27)$$

$$B = U^* \quad (3.28)$$

Belirlenen sabitler denklem 'e yerleştirilerek yeni modelin izdeki rüzgar şiddet fark profili aşağıdaki denklem ile elde edilir :

$$U_w = (U_{\infty} - U^*) \cos\left(\frac{\pi}{r_x} r + \pi\right) + U^* \quad (3.29)$$

Bu modelde kullanın izdeki efektif türbülans yoğunluğu aşağıdaki denklem 3.29 ile temsil edilmektedir :

$$I_{wake} = K_n \frac{C_T}{x/D} + I_0 \quad (3.30)$$

Burada K_n bir sabittir ve 0.4'e eşittir. D rotor çapı ve I_0 ise serbest akışdaki çevre türbülans yoğunluğudur. Konu hakkında daha fazla bilgi için Tian ve diğ (2005) çalışmasını okuyunuz.

İz sönüm parametresi ise aşağıdaki denklemle ifade edilmektedir :

$$k_{wake} = k_0 \frac{I_{wake}}{I_0} \quad (3.31)$$

Burada 'wake' alt indisli ifadeler iz akış alanını temsile ederken '0' alt indisli ifadeler serbest akış alanını temsil etmektedir. '0' alt indisli ifadeler orijinal Jensen modelinden elde edilebilir (Katic ve diğ., 1986).

Son olarak hesaplama prosedürü aşağıdaki adımlarla açıklanmıştır :

- Verilen bir rüzgar-altı mesafe için I_{wake} hesaplanır.
- Sonra k_{wake} hesaplanır.

- Son olarak yeni iz modelinde U^* parametresinin için yer alan k parametresi yerine k_{wake} kullanılır ve U_w hesaplanır.

3.2.5 WindSim

WindSim Hesaplamalı Akışkan Dinamiği (HAD) teknolojisiyle desteklenmiş modern ve gelişmiş bir rüzgar tarlası dizaynı yazılımıdır. WindSim’de rüzgar alanı benzetimi için, genel amaçlı ticari bir HAD kodu olan Phoenics çözücüsü kullanılarak RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) denklemleri sonlu hacimler yöntemi ile çözülür (Fallo, 2006; Wallbank, 2008).

RANS denklemleri zamana göre ortalaması alınmış Navier-Stokes denklemleridir. Bu denklemler öncelikli olarak türbülanslı akışı modellemek için kullanılır. Denklemin ismi Navier-Stokes denklemlerine uygulana Reynolds ayrışımı (Reynolds decomposition) kavramından gelmektedir. Reynolds ayrışımı bir akış değişkeninin ortalama ve kararsız veya dalgalı (fluctuating) bileşenlerine ayrılabilceğini açıklar (Wallbank, 2008).

$$u(x,t) = \bar{u}(x) + u'(x,t) \quad (3.32)$$

Denklem 3.31’de $\bar{u}$ zamanda ortalaması alınmış bileşeni, u' ise dalgalı bileşeni temsil etmektedir. RANS denklemlerinin çözümünde, kullanıcı tarafından başlangıç sınır koşulları belirlenir. RANS denklemleri aşağıdaki denklem 3.32’de ve denklem 3.33’te verilmiştir.

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.33)$$

$$U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \overline{u_i u_j} \right) \quad (3.34)$$

Denklem 3.32 süreklilik denklemini, denklem 3.33 ise momentum denklemini temsil etmektedir. Burada U hızı, x konumsal bileşeni, p basıncı, ρ yoğunluğu, ν kinematik viskoziteyi, alt indis i ve j birim vektörleri temsil etmektedir. $\overline{u_i u_j}$ terimi Reynolds gerilimini temsil etmekte olup aşağıdaki denklem 3.34 ile gösterilmektedir.

$$\overline{u_i u_j} = -\nu_T \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \delta_{ij} k \quad (3.35)$$

Burada ν_T türbülanslı viskoziteyi, k türbülanslı kinetik enerjiyi δ ise Kronecker delta fonksiyonunu temsil etmektedir (Wallbank, 2008).

WindSim içerisinde arazi, akış alanı, objeler, sonuçlar, rüzgar kaynakları ve enerji olmak üzere 6 modül içermektedir.

Arazi modülü arazi modelinin yüklendiği, modifiye edildiği ve kontrol edildiği modüldür. Bu modülde .gws formatındaki arazi grid verisi kabul edilmektedir. Bu veriler yükseklik ve pürüzlülük verisidir. Oluşturulacak arazi modeli WAsP'ın .map formatından .gws formatına dönüştürülmüş yükseklik kontur ve pürüzlülük haritasının birleşimi olabilir. Bu modülde ayrıca ilgili arazi üzerinde ilgili alan için hesaplama ağında iyileştirme yapılabilmektedir. Bu ilgili alan üzerindeki çözüm ağının x ve y yönlerindeki çözünürlüğünü yani çözüm ağındaki düğüm noktaları arasındaki mesafenin küçültülmesi anlamına gelmektedir. Arazi üzerinde oluşturulacak hücre sayısı da kullanıcı tarafından belirlenmektedir (Wallbank, 2008).

Rüzgar alanı modülünde kullanıcı tarafından belirlenen sınır şartlarına bağlı olarak ilgili arazi üzerindeki rüzgar alanını hesaplar ve iterasyon yoluyla her rüzgar yön sektörü ve her grid noktası için rüzgarın hızının üç bileşinini (u , v , w), türbülanslı kinetik enerjiyi, yitim oranını (dissipation rate) çözer. Sınır koşulları kullanıcı tarafından belirlenir. Kullanıcı sınır tabaka yüksekliğinde bir rüzgar hızı tanımlar. Böylece Sınır tabakanın altında logaritmik yaklaşım ile bir düşey rüzgar profili oluşturulur. Sınır tabaka yüksekliğinde tanımlanan rüzgar jeostrofik rüzgardır. Sınır şartlar belirlendikten sonra bir türbülans modeli ve çözücü (solver) belirlenir. WindSim'de varsayılan model standart k- ϵ türbülans modelidir. Ancak modifiye edilmiş ve RNG k- ϵ türbülans modelleri de mevcuttur. Çözücü olarak model iki farklı çözücü içermektedir: Segregated ve Coupled (Wallbank 2008; Fallo, 2006).

Objeler modülünde ilgili arazi üzerinde türbinlerin ve ölçüm noktasının ilgili koordinatlara yerleşimi gerçekleştirilir. Bu modülün sonunda rüzgar alanı modülünde hesaplanan arazideki yükseltiler nedeniyle oluşan rüzgar şiddetinde artış ve rüzgar yönündeki sapmalara bağlı olarak bir rüzgar frekansı tablosu oluşturulur (WindSim, 2008).

Sonuçlar modülünde rüzgar modülünde hesaplanan ısı-akışkan dinamiği değişkenlerine ait bilgileri elde edilmektedir. Elde edilen tüm değişkenler direkt HAD sonuçlarını içeren Phoneics veritabanına sevk edilmektedir (Fallo, 2006).

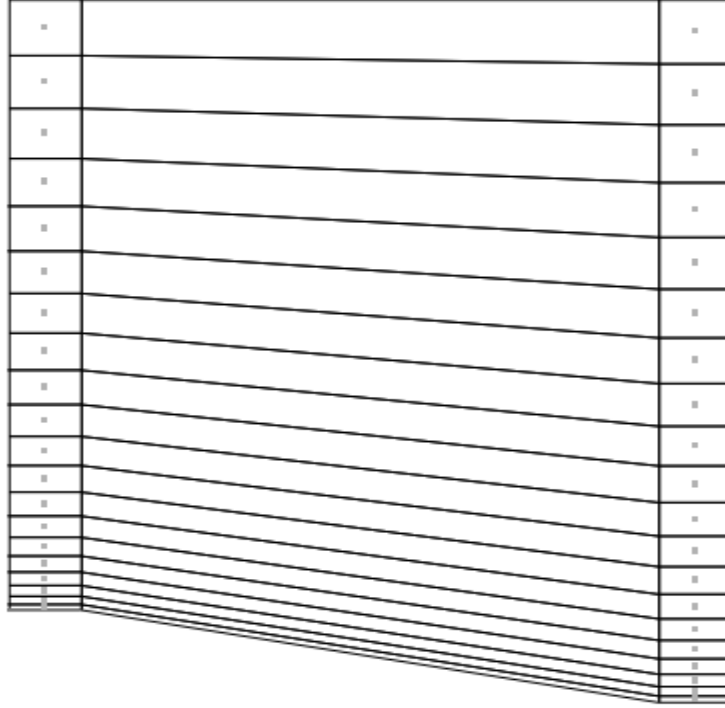
Rüzgar kaynakları modülü aracılığı ile rüzgar alanı modülünde gerçekleştirilen çözümlerle ölçüm verileri ölçeklendirilerek rüzgar kaynak haritasının oluşturulmasına olanak sağlar. Rüzgar kaynak haritaların oluşturulması temelde transfer edilen klimatoloji hesabıyla aynıdır. Bu modülde standart Jensen modeli, Larsen modeli ve Ishihara modeli olmak üzere üç farklı analitik rüzgar türbin izi modeli mevcuttur. (Fallo, 2006).

Son modül olan enerji modülünde ise iz kayıplarını hesaba katarak rüzgar tarlasının yıllık enerji üretimi hesaplanır.

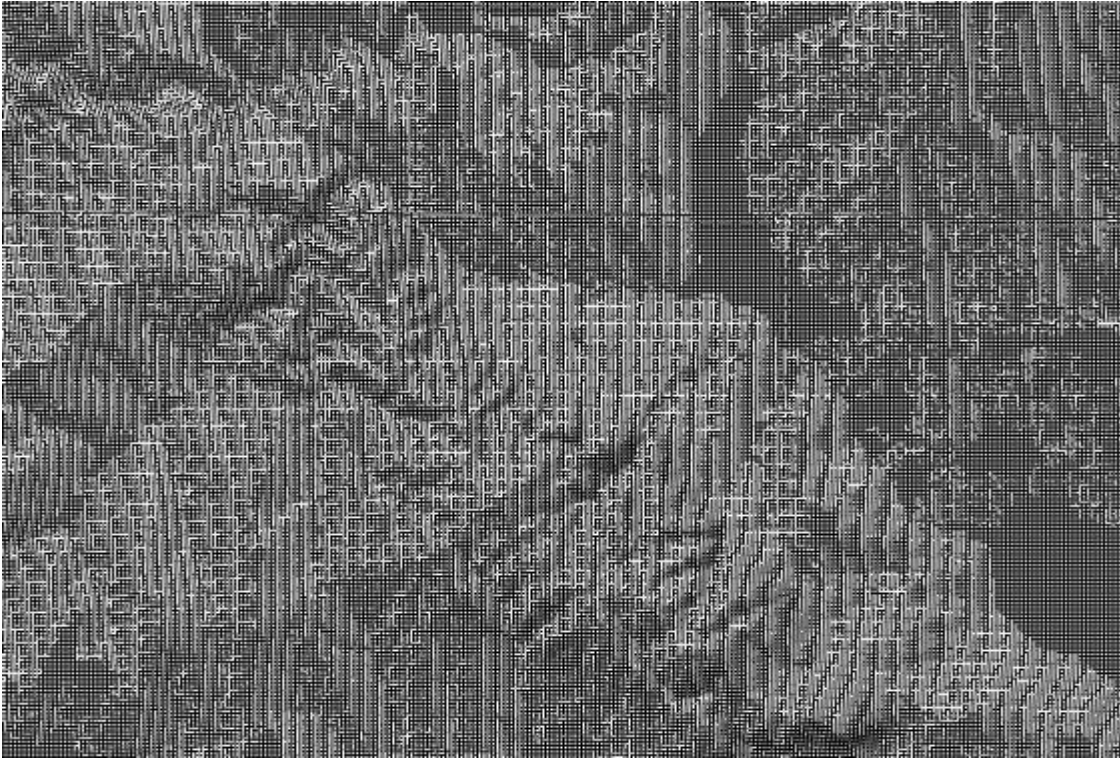
WindSim modeli bu tez çalışmasında kompleks arazi üzerinde kurulu Çatalca Rüzgar Enerji Santralindeki bölüm 3.2’de belirtilen türbin çiftleri için uygulanmıştır. Burada, analitik rüzgar türbin izi modellerinin HAD teknolojisi tabanlı WindSim yardımıyla kompleks bir arazi üzerindeki performanslarının değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda sadece standart Jensen ve Larsen modelleri test edilecektir. Modeller test edilmeden önce WASP’ta oluşturulmuş .map formatındaki arazi modeli WindSim’de geçerli olan .gws formatına dönüştürülmüştür. Yatay yönde 907200 hücre kullanılmıştır. Düşey yönde 20 hücre kullanılmıştır ve yükseklik dağılım faktörü 0.1 olarak belirlenmiştir. Çözüm ağında iyileştirme yapılmamıştır. x (boylam) yönünde 180 grid noktası, y (enlem) yönünde 252 grid noktası oluşturulmuştur. Bu durumda x ve y yönündeki çözünürlükler 42 metredir.

Formata uygun arazi modeli oluşturulduktan sonra rüzgar arazi modülünde sınır ve başlangıç koşulu için 12 rüzgar yönü sektörü, 500 m sınır tabaka yüksekliği ve 10 m/s jeostrofik rüzgar şiddeti, türbülans modeli için standart k-ε türbülans modeli, nümerik hesaplamalar için Segregated çözücüsü ve 1200 iterasyon sayısı belirlenmiştir.

Çatalca Rüzgar Enerjisi Santrali arazisi için arazi modülünden elde edilen yatay ve düşey yöndeki hesaplama ağına, yükselti ve pürüzlülük haritasına ait görseller sırasıyla aşağıdaki şekil 3.5’te, şekil 3.6’te şekil 3.7’de ve şekil 3.8’de verilmiştir.



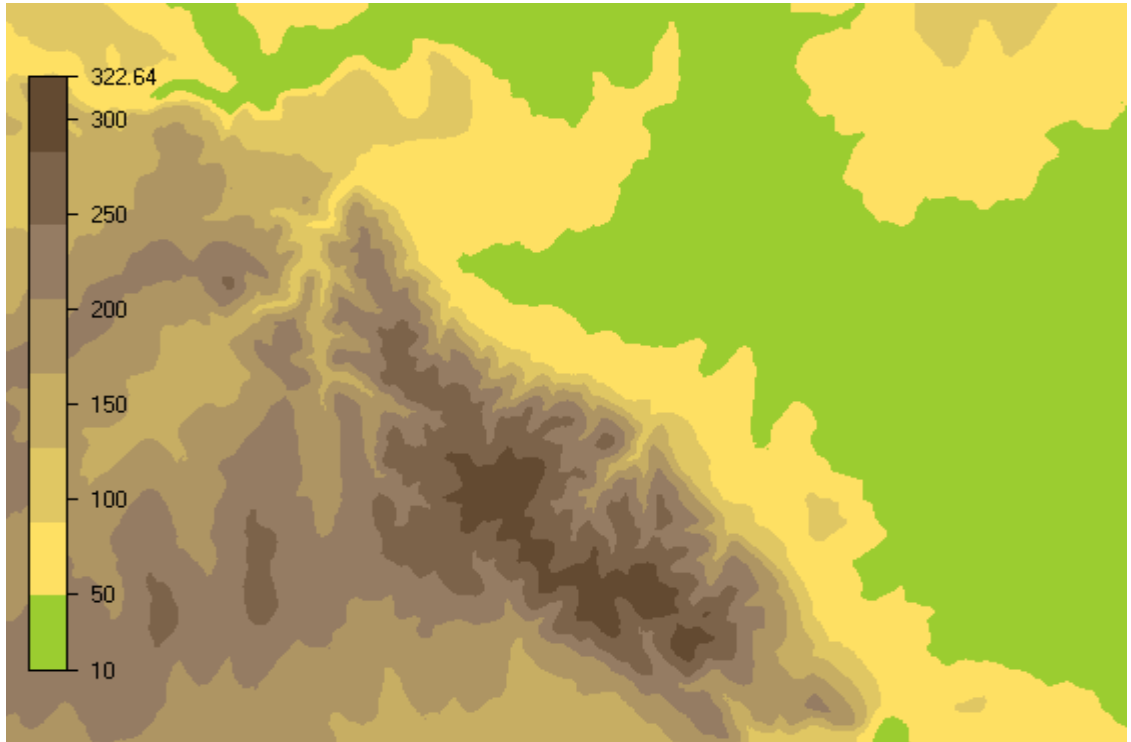
Şekil 3.5: Çatalca Rüzgar Enerjisi Santrali için oluşturulan dijital arazi modeli - düşey yöndeki hesaplama ağı.



Şekil 3.6: Çatalca Rüzgar Enerjisi Santrali için oluşturulan dijital arazi modeli - yatay yöndeki hesaplama ağı.



Şekil 3.7: Çatalca Rüzgar Enerjisi Santrali için oluşturulan dijital arazi modeli – pürüzlülük yüksekliği (metre).



Şekil 3.8: Çatalca Rüzgar Enerjisi Santrali için oluşturulan dijital arazi modeli - yükselti haritası (metre).

4. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Ekonomik ve kısıtlı uygun alan nedenlerinden dolayı onlarca hatta yüzlerce rüzgar türbini rüzgar tarlası olarak bilinen kısıtlı bir alana sahip arazi üzerinde gruplandırılır. Ancak rüzgar türbinleri rüzgar tarlasında tek başlarına üreteceği güçten daha az güç üretirler. Bunun nedeni iz etkisidir. Rüzgar tarlası dizaynında iz etkisi hesaba katılması gereken en önemli konudur. Bir rüzgar üstü türbinin iz etkisinde olan bir rüzgar altı türbini daha düşük rüzgar şiddetine maruz kalacağından daha düşük güç üretecektir. Bunun yanı sıra izde türbülans seviyesi artacağından, rüzgar altı türbininin rotoru üzerinde artan bir yorulma yükü oluşturacaktır ve bundan dolayı türbinin işletim süresi azalacaktır. Bu olumsuz etkilerden kaçınmak için türbinlerin birbirlerinden etkilenmeyeceği veya minimum seviyede etkileneceği koordinatlara yerleştirilmelidir. Bu şekilde iz etkisi minimize edilip rüzgar tarlası verimliliği maksimize edilmiş olur. Bunun için iz etkisini içeren rüzgar tarlası optimizasyonu modelleri geliştirilmiştir. Bu modellerde analitik veya hesaplamalı olmak üzere iki farklı iz modeli kullanılmaktadır. En iyi rüzgar tarlası düzenini elde etmek için iz modellerinin binlerce olası durumun benzetimini yapması gerekiyor. Bu durumda hesaplamalı akışkanlar dinamiğine dayanan hesaplamalı iz modellerinin hesaplama zamanları yüksek olduğundan, zaman verimliliği açısından halen analitik iz modelleri tercih edilmektedir. Farklı zamanlarda geliştirilen birçok analitik iz modeli vardır. Standart Jensen modeli (Katic ve diğ., 1986), Larsen modeli (Larsen ve diğ., 2003), Frandsen modeli (Frandsen vd., 2006), yeni Jensen modeli (Tian ve diğ., 2015), Bastankhah ve Porte-Agel'in (2014) ve Paolo Luzatto-Fegiz'in (2015) geliştirdikleri analitik iz modelleri, mevcut analitik iz modellerine verilebilecek örneklerden bazılarıdır. Bu modeller iz karakteristikleri (izdeki rüzgar şiddeti farkı profili, izdeki rüzgar şiddetinin serbest akış seviyesine yakınsama hızı, başlangıç iz genişliği ve izin genişleme hızı, vs.) açısından farklı davranışlar göstermektedir. Ancak bu modellerin, yeterli doğruluğu sağlayabildiklerinden yani ölçüm verileriyle yeterli uyumu sağlayabildiklerinden emin olabilmek için çeşitli arazi koşullarında test edilmeleri gerekir.

Bu tez çalışmasında standart Jensen modeli (Katic ve diğ., 1986), Larsen modeli (Larsen ve diğ., 2003), Frandsen modeli (Frandsen vd., 2006), yeni Jensen modeli (Tian ve diğ., 2015), olmak üzere dört farklı analitik rüzgar türbin izi modeli kullanılmıştır. Bu modellerden standart Jensen ve Larsen modellerinin seçilmesinin nedeni ticari kodlarda oldukça yaygın bir biçimde kullanılmasıdır. Özellikle standart Jensen modeli en eski ve en basit iz modeli olmasına rağmen birçok çalışmada ölçümlerle, özellikle uzak izde, iyi uyum göstermektedir. Frandsen modelinin seçilmesinin nedeni, bu modelin açık deniz rüzgar tarlalarından elde edilen rüzgar verileriyle oluşturulmuş bir model olmasıdır ve gerçekte kara üzerindeki rüzgar tarlaları için oluşturulmamıştır. Ancak, Jeon ve diğ. (2015), Bastankhah ve Porte-Agel (2014) ve Messac ve diğ. (2012) çalışmalarında Frandsen modelini kara şartları için uygulamış ve modelin ne kadar kötü bir performans sergilediğini göstermişlerdir. Bu modelin bu tezde kullanılmasının asıl nedeni bir kez daha kara şartında, özellikle kompleks bir arazi üzerindeki performansını test etmektir. Yeni Jensen modelinin kullanılmasının nedenleri ise yeni oluşturulmuş bir analitik model olması, daha önce hiçbir tez çalışmasında kullanılmaması ve modelin tanıtıldığı çalışma (Tian ve diğ., 2015) haricinde hiçbir makale çalışmasında kullanılmaması ve modelin ölçüm verileriyle ve hesaplamalı model sonuçlarıyla oldukça uyum sağlaması ve ayrıca çalışmadaki her testte standart Jensen modelinden daha iyi sonuç vermesidir (Tian ve diğ., 2015).

Bu modellerin iz karakteristiklerini ortaya koymak ve kompleks bir arazi üzerindeki performansını test etmek amaçlanmıştır. İz karakteristiklerini belirlemede, İstanbul Teknik Üniversitesi Meteoroloji Gözlem Parkı'nda bulunan küçük ölçekli bir rüzgar türbinindeki ve yakınında bulunan bir ölçüm direğindeki rüzgar verilerinden yararlanılmıştır. Tezin asıl amacını ve dolayısıyla tezin tez konu başlığını belirleyen analitik rüzgar türbin izi modellerinin hem tek başlarına hem de HAD yardımıyla kompleks bir arazideki performansının test edilmesi için İstanbul ilinin Çatalca ilçesinde bulunan bir rüzgar tarlasındaki rüzgar verisinden yararlanılmıştır.

Bu tez çalışmasının bu bölümünde modellerin iz karakteristiklerine ve kompleks arazi üzerindeki performansına dair sonuçlara yer verilmiştir. Bölüm 4.1 Atmosferik, Topografik ve Aerodinamik Parametrelerin değişimlerine bağlı Rüzgar Türbini İzi Modellerinin Öngörü sonuçlarına yer verilmiştir. Bu bölümde İstanbul Teknik Üniversitesi Meteoroloji Gözlem Parkında arazi koşullarına bağlı modellerin iz

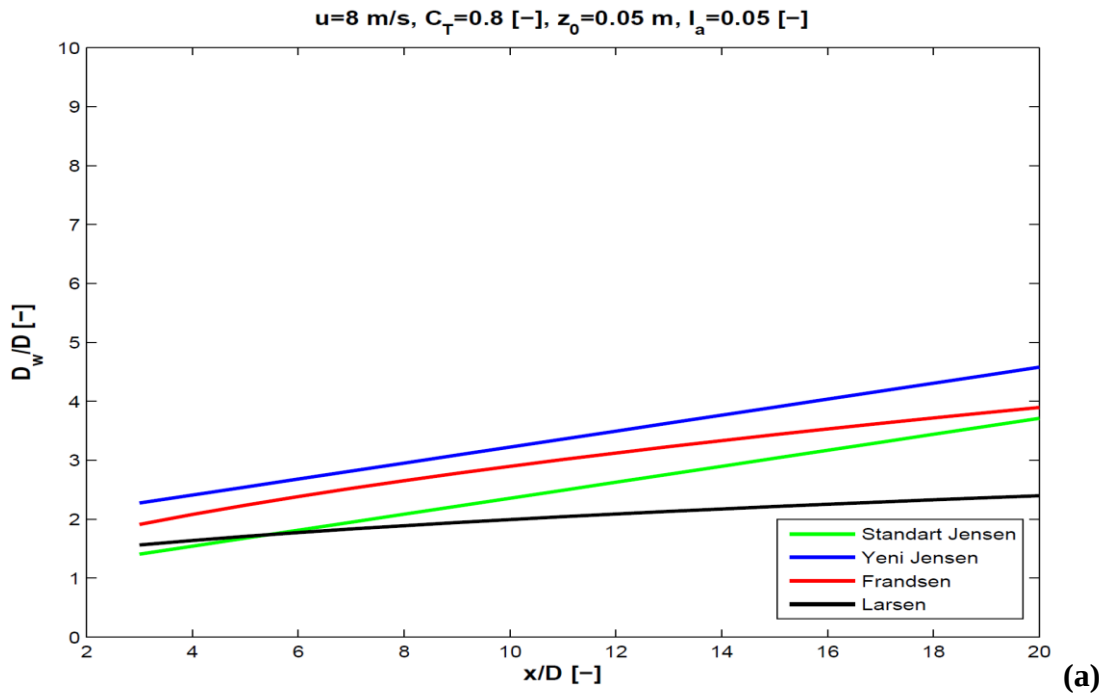
karakteristiklerini ortaya koymadan önce (Bölüm 4.2) itki katsayısı, pürüzlülük uzunluğu ve türbülans yoğunluğu değişimlerinin modellerin iz karakteristiklerini üzerindeki etkiyi ortaya koymak amaçlamaktadır. Bölüm 4.2’de İstanbul Teknik Üniversitesi Meteoroloji Gözlem Parkı’ndaki rüzgar verilerinden yararlanılarak modellerin iz karakteristiklerine dair sonuçlar verilmiştir. Bölüm 4.3’de Çatalca Rüzgar Enerji Santrali rüzgar verilerinden yararlanılarak modellerin kompleks arazi üzerindeki performanslarına dair sonuçlar verilmiştir.

4.1 Atmosferik, Topografik ve Aerodinamik Parametrelerin değişimlerine bağlı Rüzgar Türbini İzi Modellerinin Öngörülleri

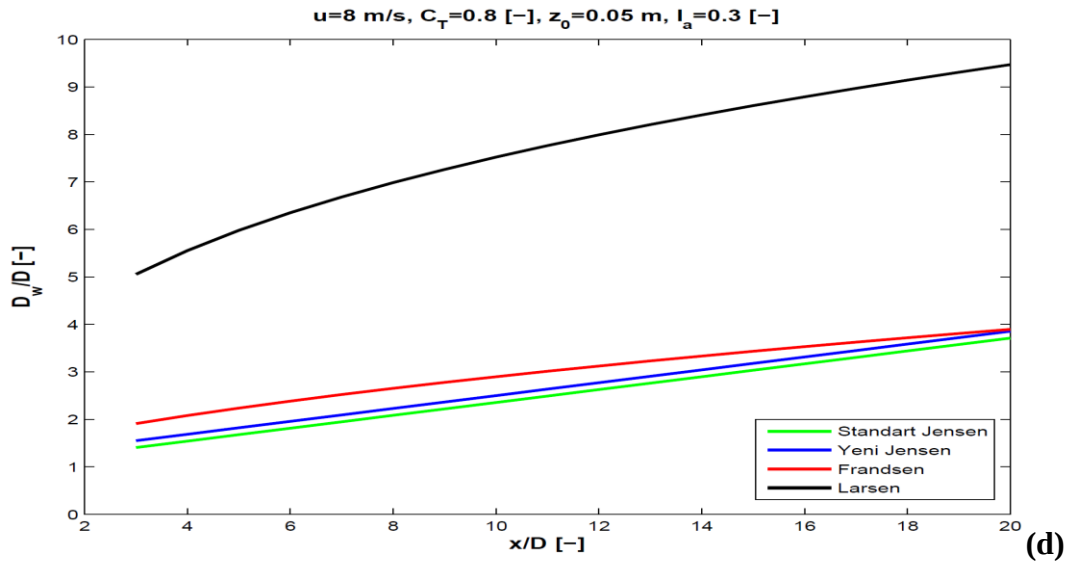
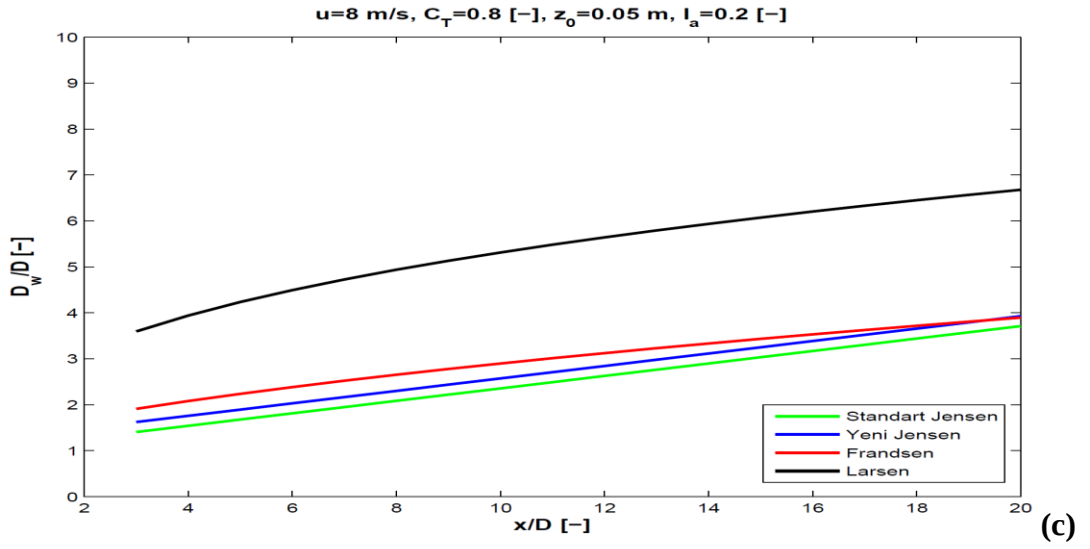
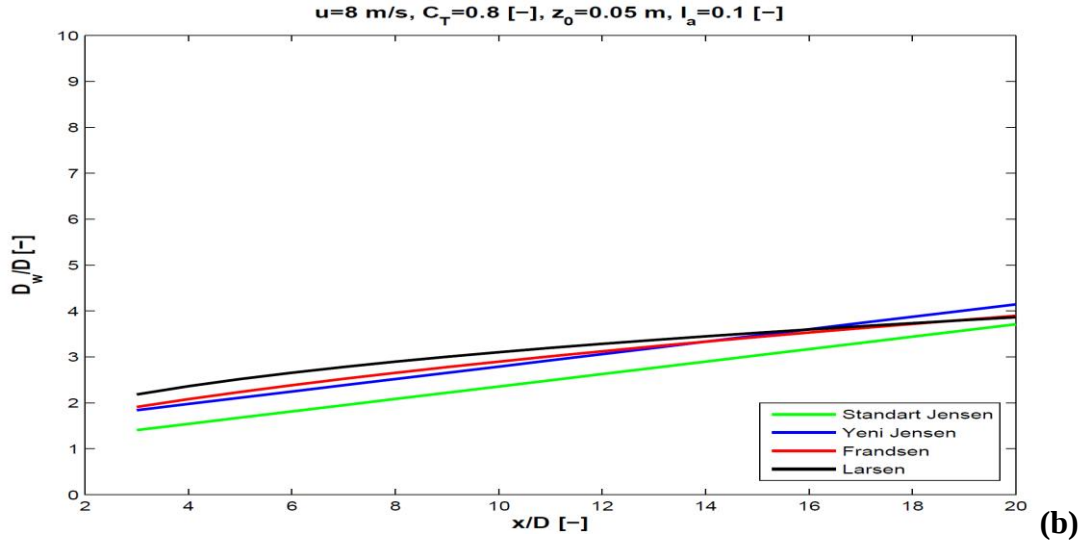
Bu bölümde İstanbul Teknik Üniversitesi Meteoroloji Gözlem Parkında arazi koşullarına bağlı modellerin iz karakteristiklerini ortaya koymadan itki katsayısı, pürüzlülük uzunluğu ve türbülans yoğunluğu değişimlerinin modellerin iz karakteristiklerini üzerindeki etkiyi ortaya koymak amaçlanmıştır. Bu bölüm İstanbul Teknik Üniversitesi Meteoroloji Gözlem Parkındaki gerçek koşullar atında modellerin davranışına ait bir açıklama getirmek için oluşturulmuştur. Bunun için, rüzgar şiddeti, itki katsayısı, pürüzlülük uzunluğu ve türbülans yoğunluğunu içeren bir temel durum oluşturulup her birinin değişiminin modellerin iz karakteristiklerini ortaya koymak için temel durum parametrelerinden üçünün sabit tutulup diğer parametre birkaç durum için değiştirilmiştir. Rüzgar şiddeti bu bölümde değiştirilmemiştir. Temel durum için rüzgar şiddeti 8 m/s, itki katsayısı 0.8, pürüzlülük uzunluğu 0.05 m ve türbülans yoğunluğu türbülans yoğunluğu ise 0.1 olarak belirlenmiştir. Değiştirilecek parametrelerde her biri için temel durum dahil olmak üzere dört farklı durum ele alınmıştır. Sadece pürüzlülük uzunluğu için dört farklı durumun değerlendirilmesinde temel durumdaki değeri ele alınmamıştır. Türbülans yoğunluğu için 0.05, 0.1, 0.2 ve 0.3 ele alınmıştır. İtki katsayısı için 0.5, 0.6, 0.7 ve 0.8 ele alınmıştır. Pürüzlülük uzunluğu için 0.0001 m, 0.01 m, 0.15 m, ve 0.3 m ele alınmıştır.

Şekil 4.1’de ve Şekil 4.2’de görüleceğe üzere Larsen modeli iz çapı ve normalleştirilmiş iz hızı öngörüsü açısından türbülans yoğunluğu değişimlerine çok hassas. Düşük çevre türbülans seviyelerinde iz çapı öngörüsü diğer modellere kıysala küçük ancak yüksek türbülans seviyelerinde iz çapı öngörüsü diğer modellere kıysala oldukça büyük. Normalleştirilmiş iz hızı öngörüsü için düşük çevre türbülans

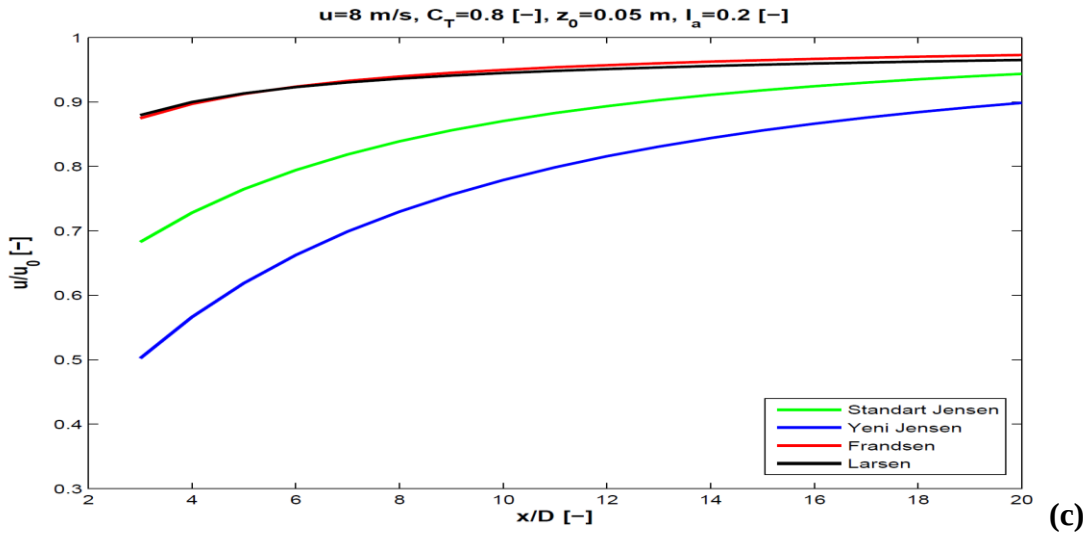
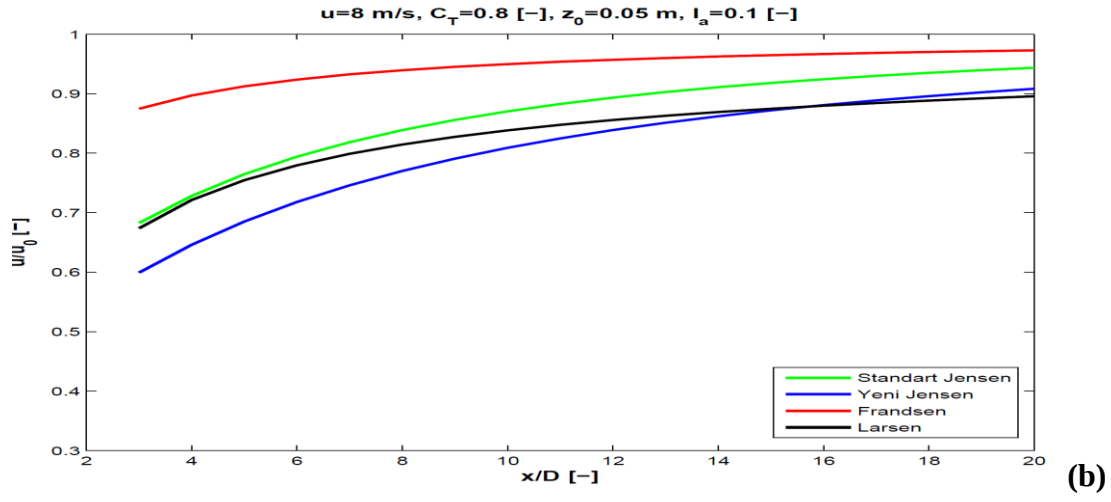
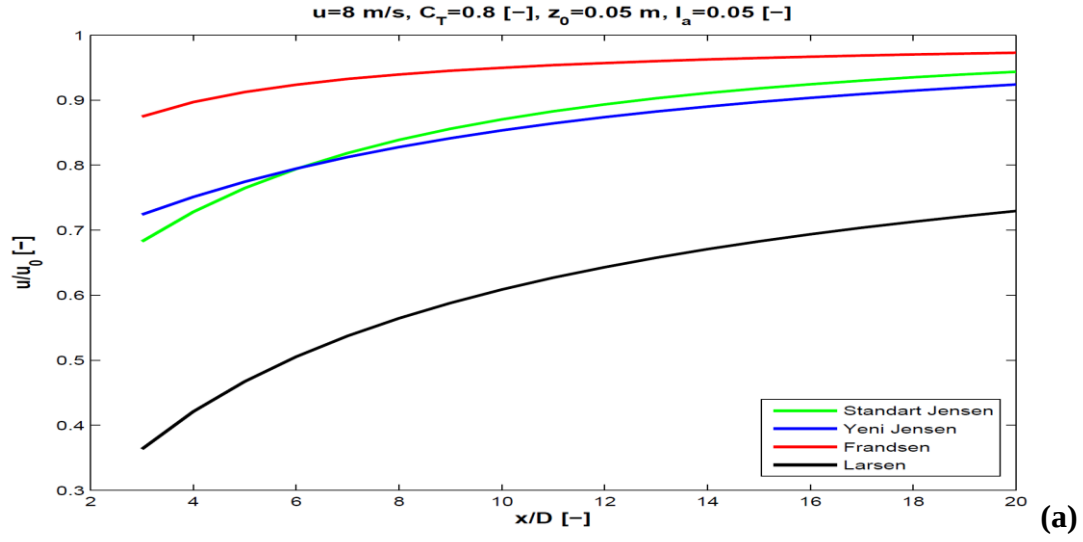
seviyelerinde yüksek itki katsayısının yarattığı etki açık şekilde gözlenmektedir. Standart Jensen modeli modeli iz hızı ve iz çapı hesabında türbülans yoğunluğu bilgisi içermemektedir. Dolayısıyla standart Jensen modelinde türbülans yoğunluğu değişimleri için normalleştirilmiş iz hızı ve iz çapı öngörülerinde değişim gözlenmemektedir. Yeni Jensen modelinde, türbülans yoğunluğu artarken iz çapı öngörüsünde düşüş gözlenmektedir. Bu durum yeni Jensen modelinde iz yarıçapı hesabında kullanılan iz sönüm katsayısından kaynaklanmaktadır. Ancak, modelde türbülans yoğunluğu artışlarında normalleştirilmiş iz hızı serbest akış seviyesi daha hızlı yakınsamaktadır. Bunun nedeni yüksek çevre türbülans yoğunluğunda karışımın daha kuvvetli olmasıdır. Ayrıca, yeni Jensen modeli efektif türbülans yoğunluğu bilgisi içerdiğinden, temel durum senaryoda, yüksek itki katsayısı yüksek türbin-üretimli türbülans seviyesine neden olması bu hızlı yakınsamanın bir diğer nedenidir. Frandsen modelinde de standart Jensen modelinde olduğu gibi iz hızı ve iz çapı hesabında türbülans yoğunluğu bilgisi içermediğinden çevre türbülans yoğunluğu değişimleri için normalleştirilmiş iz hızı ve iz çapı öngörülerinde değişim gözlenmemektedir.



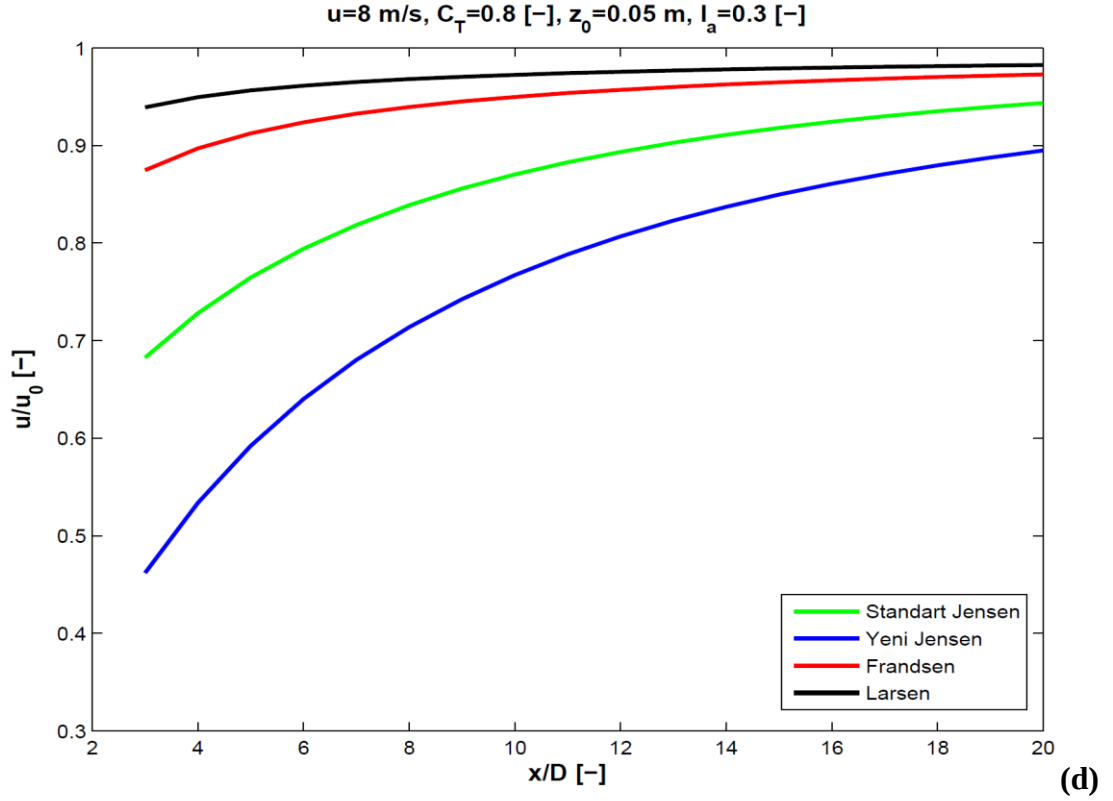
Şekil 4.1: Türbülans yoğunluğu değişiminin iz çapı gelişimi üzerindeki etkisi: (a) $I_a=0.05$. (b) $I_a=0.1$. (c) $I_a=0.2$. (d) $I_a=0.3$.



Şekil 4.1 (devam): Türbülans yoğunluğu değişiminin iz çapı gelişimi üzerindeki etkisi: (a) $I_a=0.05$. (b) $I_a=0.1$. (c) $I_a=0.2$. (d) $I_a=0.3$.

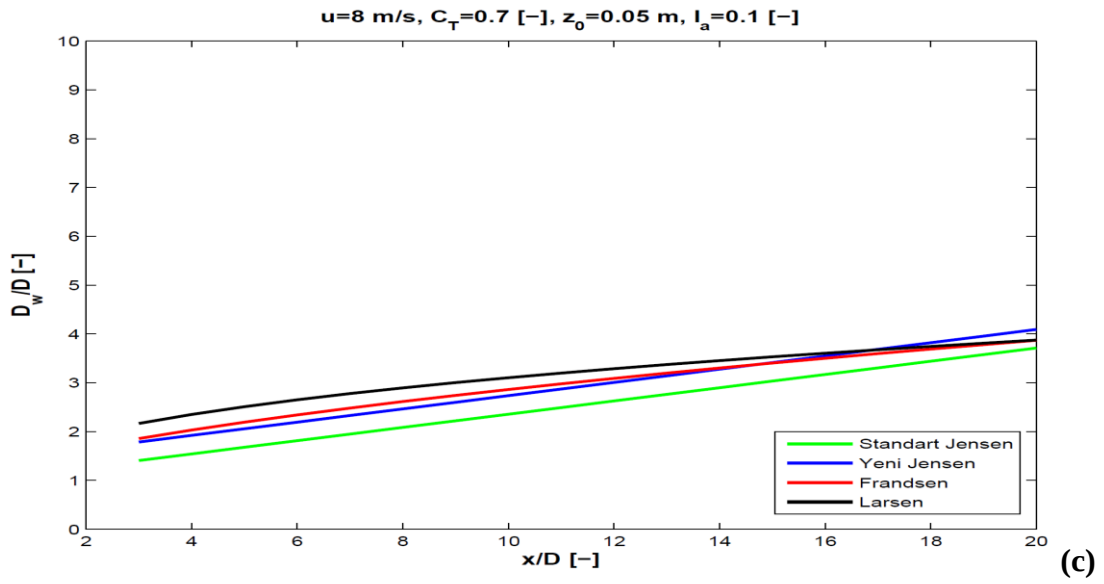
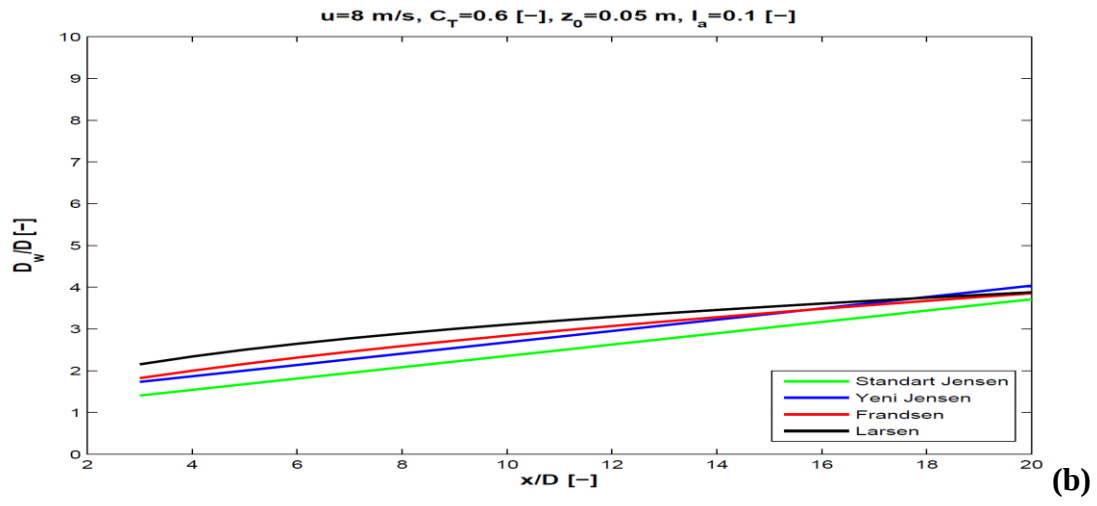
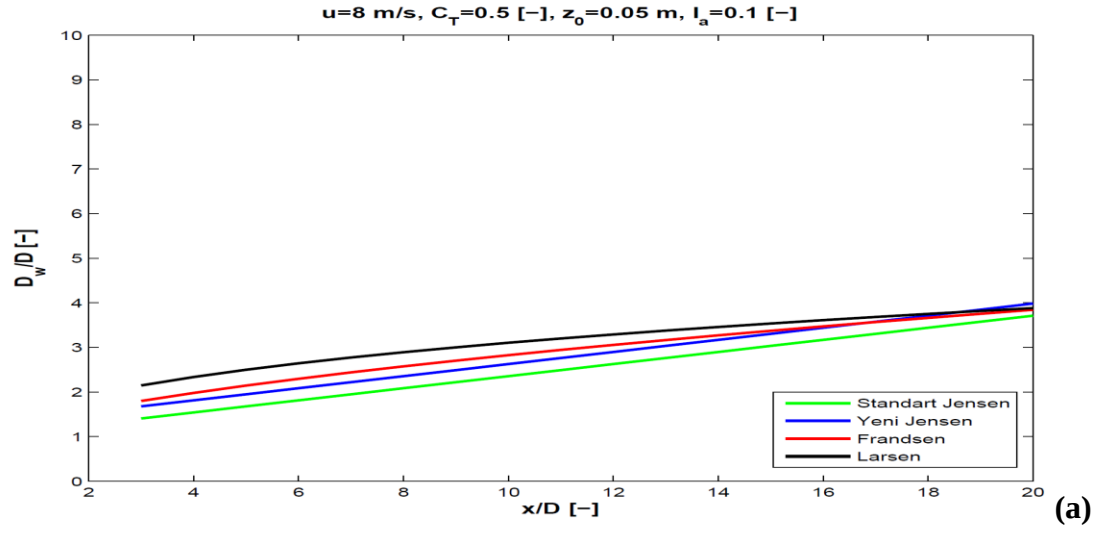


Şekil 4.2: Türbülans yoğunluğu değişiminin iz hızı gelişimi üzerindeki etkisi: (a) $I_a=0.05$. (b) $I_a=0.1$. (c) $I_a=0.2$. (d) $I_a=0.3$.

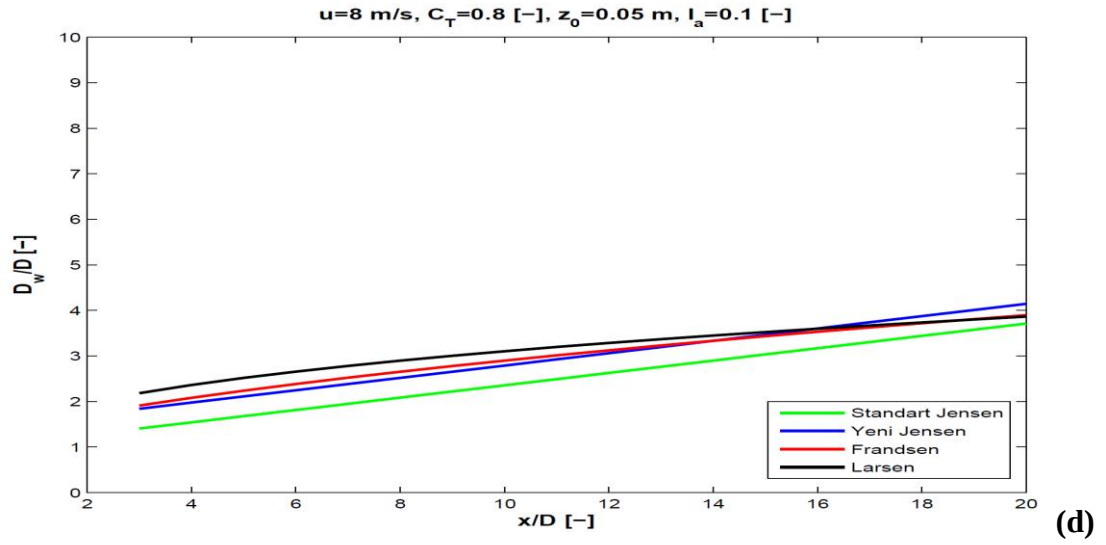


Şekil 4.2 (devam): Türbülans yoğunluğu değişiminin iz hızı gelişimi üzerindeki etkisi: (a) $I_a=0.05$. (b) $I_a=0.1$. (c) $I_a=0.2$. (d) $I_a=0.3$.

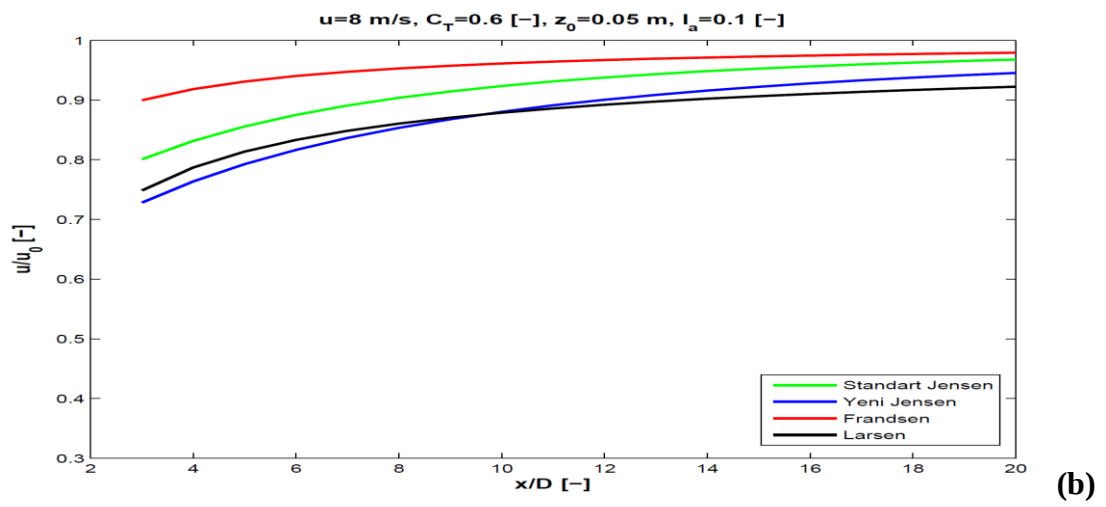
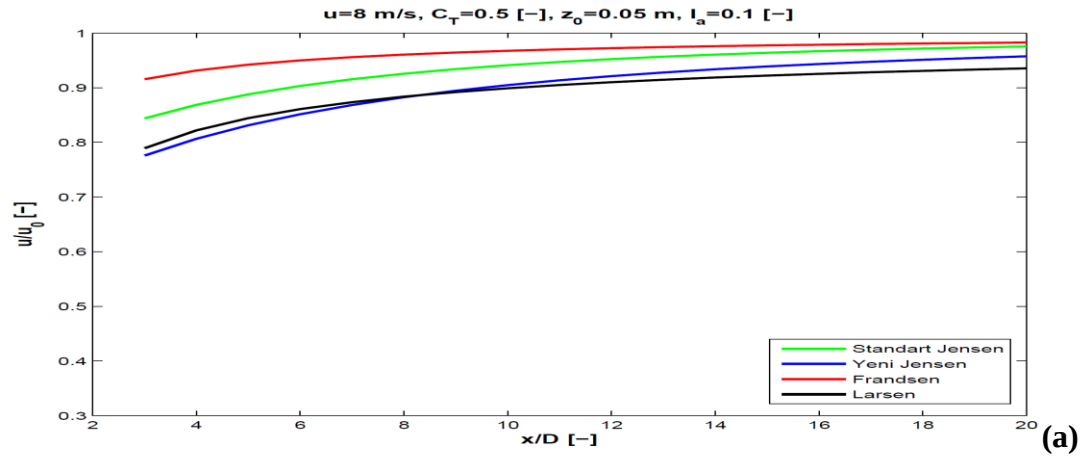
Şekil 4.3'te ve Şekil 4.4'de itki katsayısı artışında modellerin iz hızı öngörüsündeki düşüş ve izdeki akış hızının serbest akış seviyesine yakınsama hızındaki artış açıkça gözlenmektedir. İtki katsayısında için standart Jensen modeli ile yeni Jensen modelinin iz hızı öngörüsündeki fark artmaktadır. Bunun nedeni itki katsayısının lineer bir fonksiyonu olan iz sönüm parametresidir. Bu durum iz hızı öngörüsü için de geçerlidir. Bunun nedeni ise hem yeni Jensen modelinde iz sönüm parametresinin etkisi hem de standart Jensen modelinin iz çapı hesabında itki katsayısı bilgisi içermemesidir. Dolayısıyla itki katsayısı arttıkça yeni Jensen modeli hem iz çapı hem de izdeki akış hızının serbest akış seviyesine yakınsama hızı açısından standart Jensen modeline göre daha büyük gelişim gösterecektir. Larsen modeli iz çapı öngörüsünde itki katsayısı değişimlerinden pek etkilenmemektedir. Bu tamamen iz çapı formülasyonundan kaynaklanmaktadır. Larsen ve Frandsen modeli, itki katsayısı artışında diğer iki modele kıyasla normalleştirilmiş iz hızında daha düşük bir gelişim sergilemektedir.



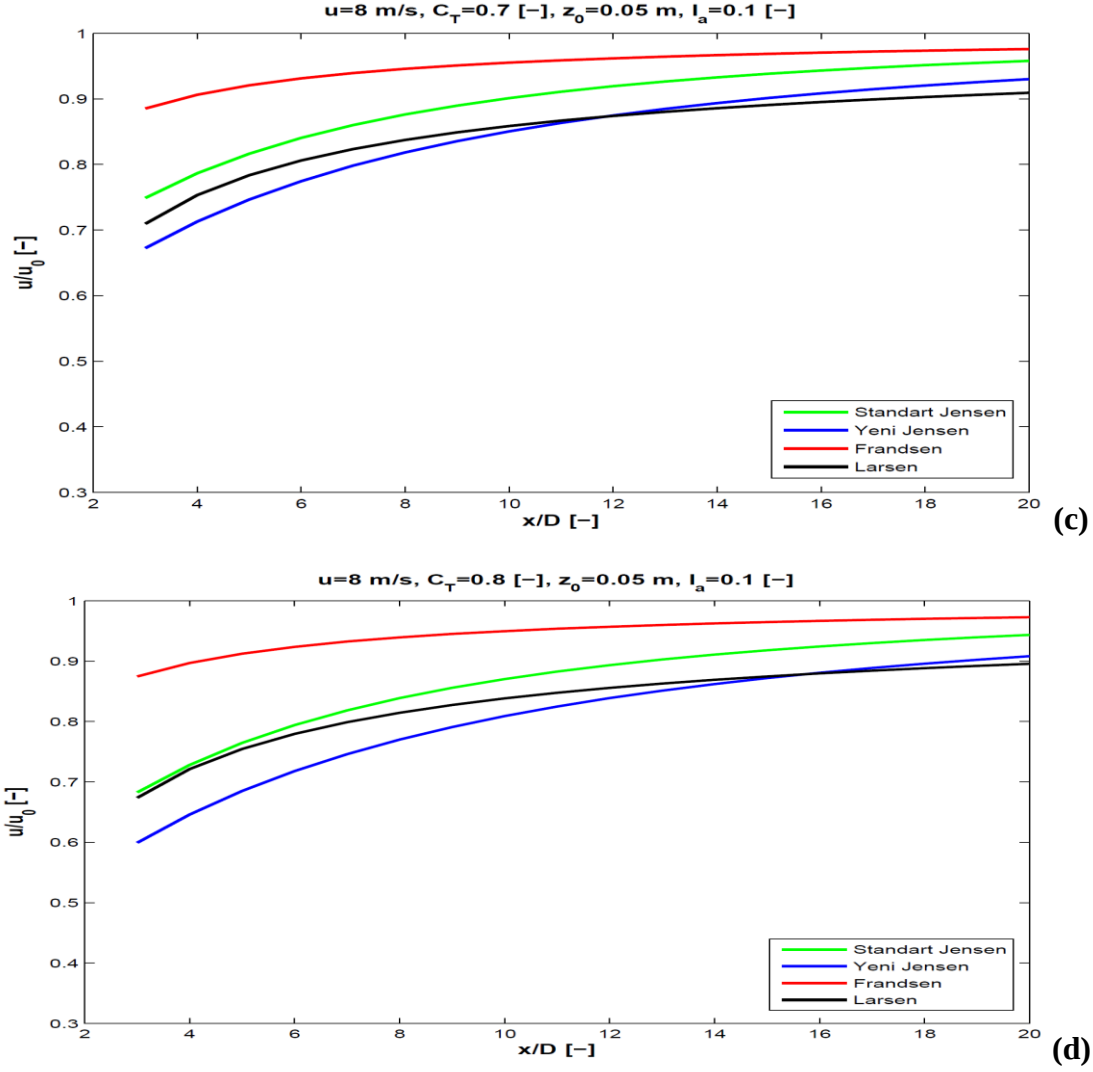
Şekil 4.3: İtki katsayısı değişiminin iz çapı gelişimi üzerindeki etkisi:
 (a) $C_T=0.5$. (b) $C_T=0.6$. (c) $C_T=0.7$. (d) $C_T=0.8$.



Şekil 4.3 (devam): İtki katsayısı değişiminin iz çapı gelişimi üzerindeki etkisi:
(a) $C_T=0.5$. (b) $C_T=0.6$. (c) $C_T=0.7$. (d) $C_T=0.8$.



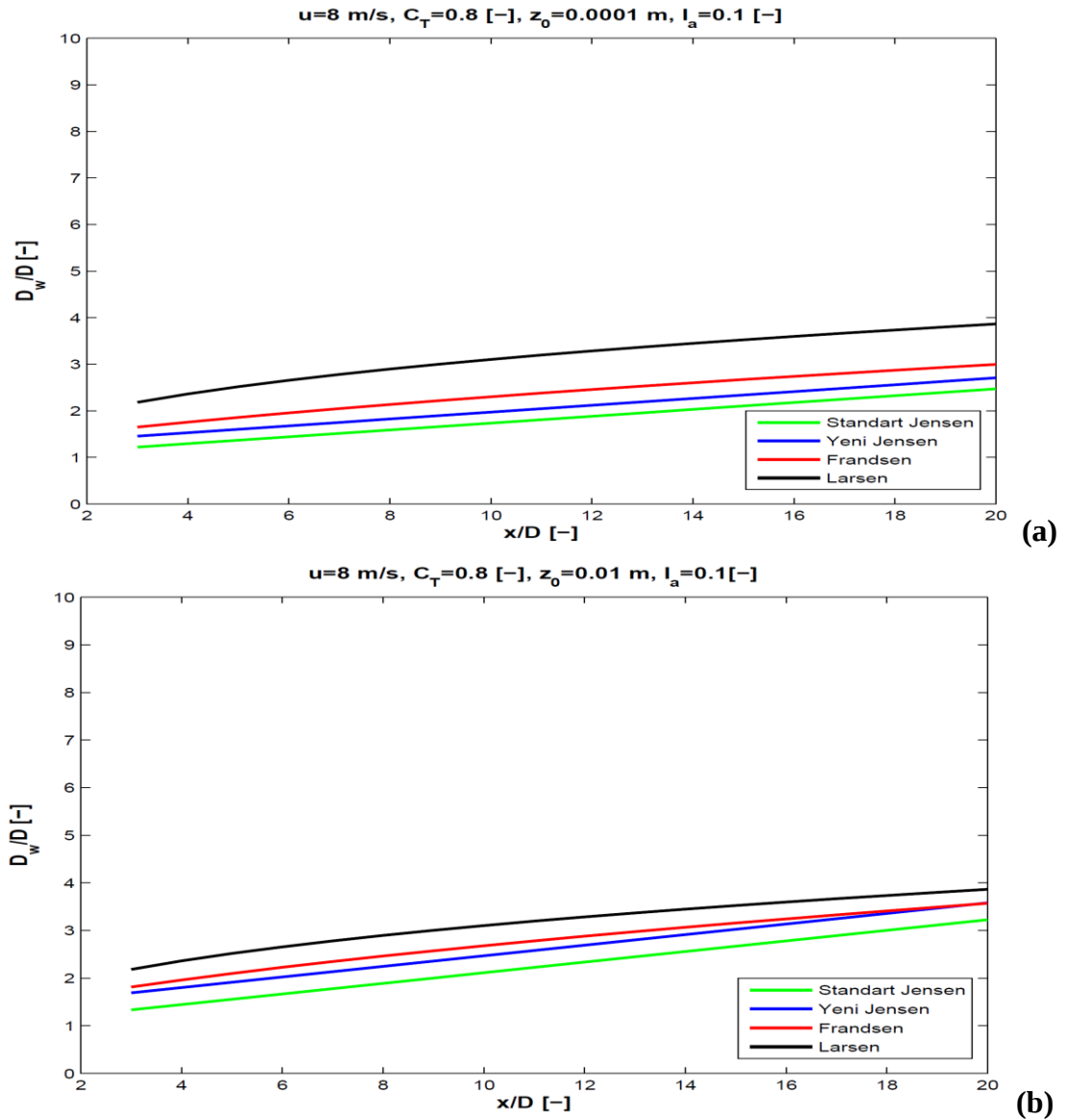
Şekil 4.4: İtki katsayısı değişiminin iz hızının gelişimi üzerindeki etkisi:
(a) $C_T=0.5$. (b) $C_T=0.6$. (c) $C_T=0.7$. (d) $C_T=0.8$.



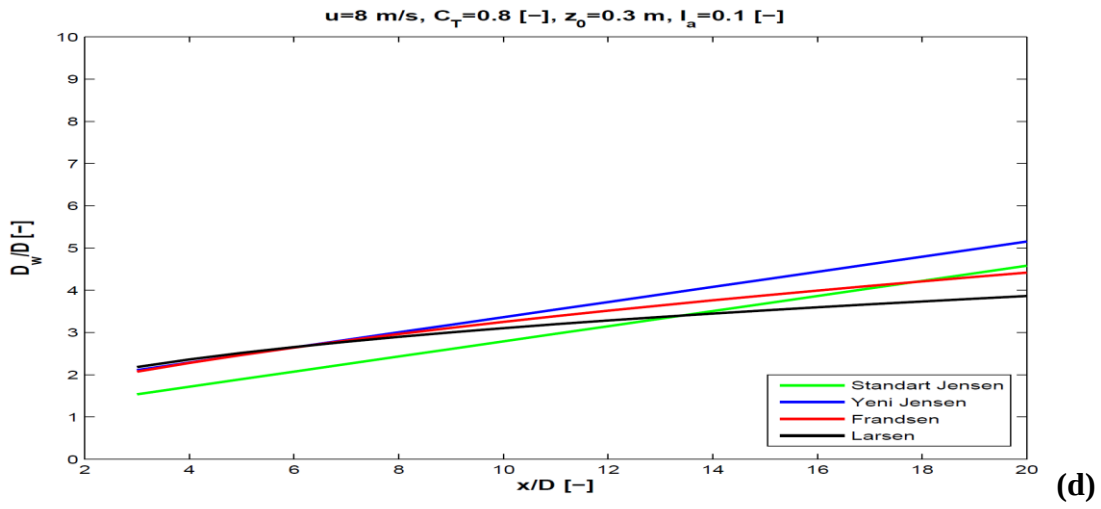
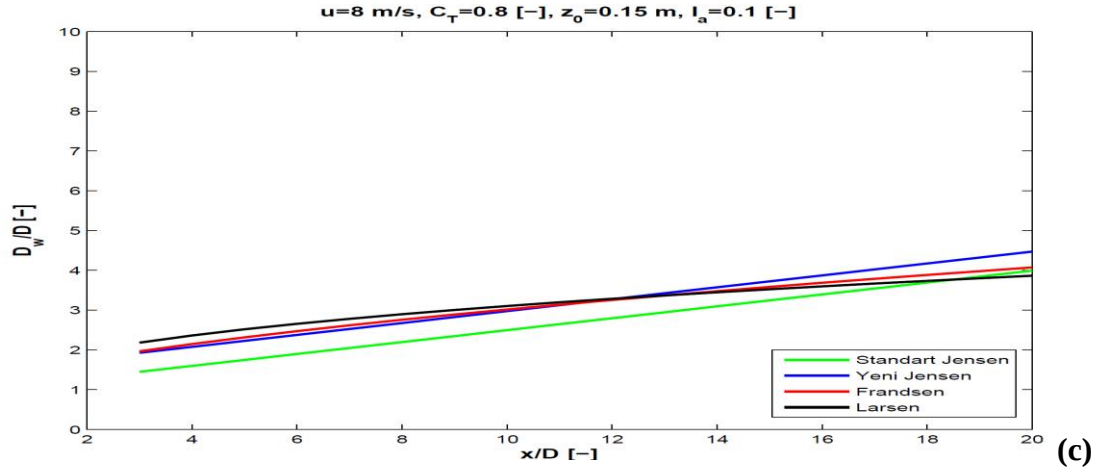
Şekil 4.4 (devam): İtki katsayısı değişiminin iz hızının gelişimi üzerindeki etkisi: (a) $C_T=0.5$. (b) $C_T=0.6$. (c) $C_T=0.7$. (d) $C_T=0.8$.

Şekil 4.5'te ve Şekil 4.6'da görüleceğe üzere Larsen modeli hem iz hızı hem de iz çapı hesabında pürüzlülük uzunluğu bilgisi içermediğinden, pürüzlülük uzunluğu değişimlerinde modeli iz hızı ve çapı öngörüsü değişmemektedir. Frandsen modeli pürüzlülük uzunluğu artışında daha yüksek iz çapı öngörmektedir. Ancak, düşük pürüzlülük uzunluğu değerlerinde başlangıç itki katsayısı hem başlangıçtaki iz çapı öngörüsü hem de iz çapı gelişiminde daha etkin. Yüksek pürüzlülük uzunluğu değerlerin de ise durum tam tersidir. Frandsen modeli pürüzlülük uzunluğu artışlarında başlangıçta daha büyük iz hızı öngörüyor ancak izdeki akış hızının serbest akış seviyesine yakınsaması daha yavaş oluyor. Hem standart Jensen hem de yeni Jensen modeli frandsen modelin de olduğu gibi pürüzlülük uzunluğu artışlarında başlangıçta daha büyük iz hızı öngörüyor ancak izdeki akış hızının serbest akış seviyesine yakınsaması daha yavaş oluyor. Yeni Jensen modelinde açısından

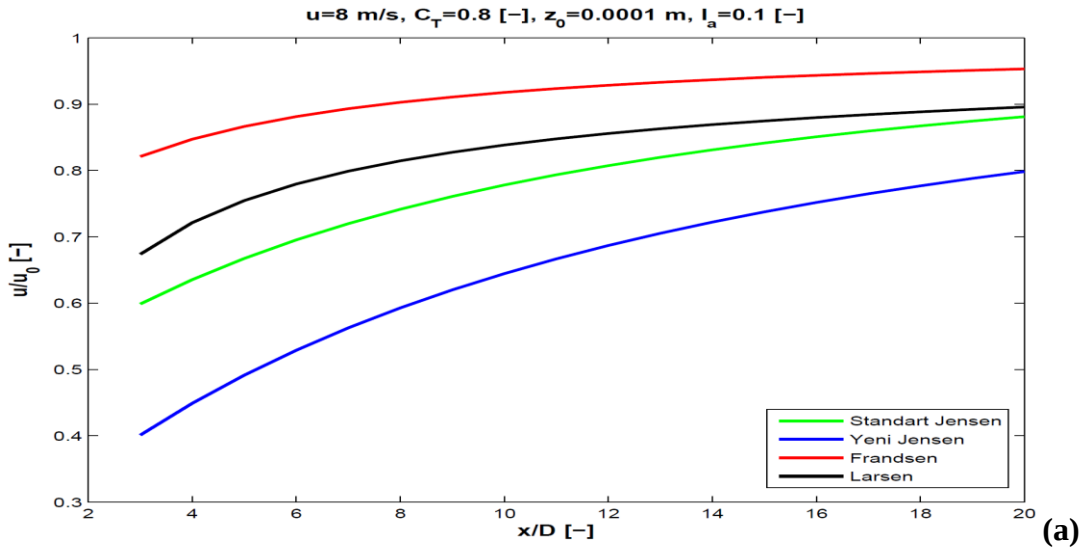
pürüzlülük uzunluğunun yarattığı etkinin aksine çevre türbülans yoğunluğu artışlarında başlangıçta iz hızı öngörüsü düşmesine rağmen izdeki akış hızının serbest akış seviyesine yakınsaması hızlanmaktadır. Her iki Jensen modeli de iz çapı öngörüsü hesabında pürüzlülük uzunluğundan etkilenmesine rağmen yeni Jensen modelinin standart Jensen modelinden daha büyük iz çapı öngörmesinin nedeni yeni Jensen modelinin iz çapı hesabında modifiye edilmiş iz sönüm parametresinin pürüzlülük uzunluğu bilgisinin dışında efektif türbülans yoğunluğu bilgisi içermesidir.



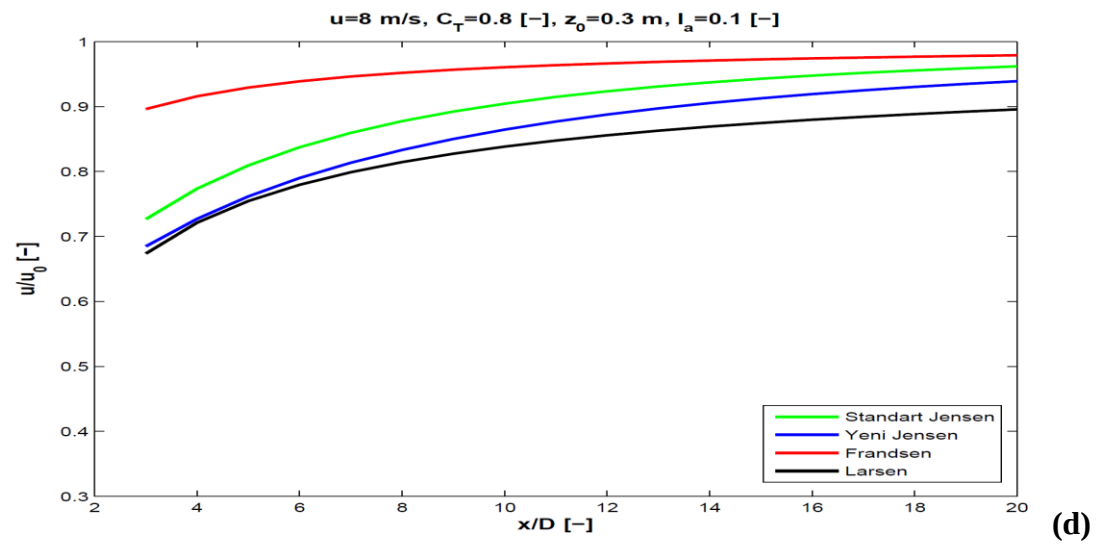
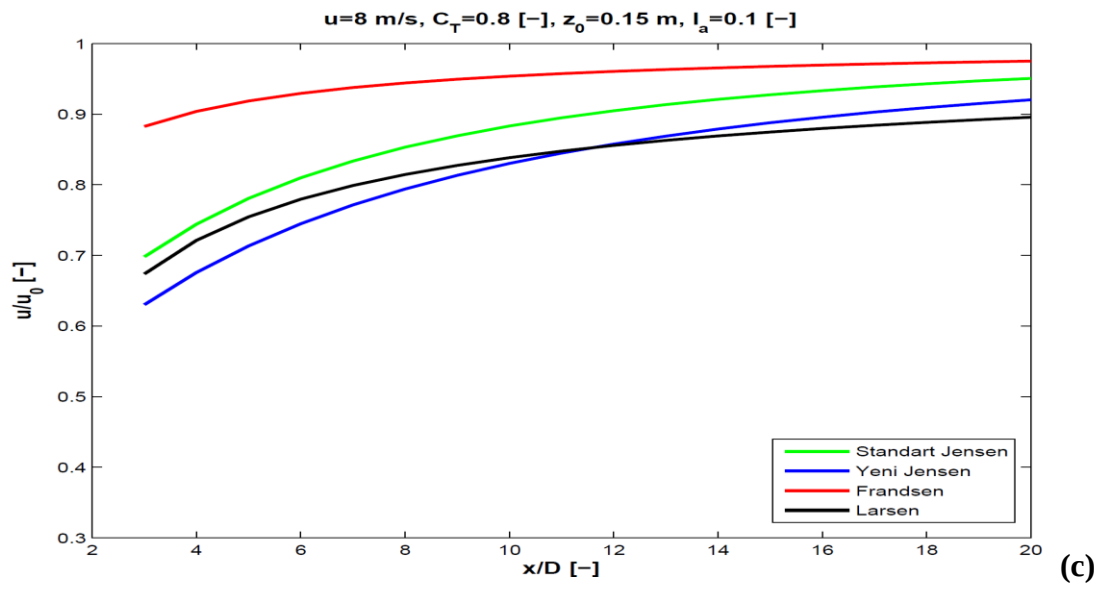
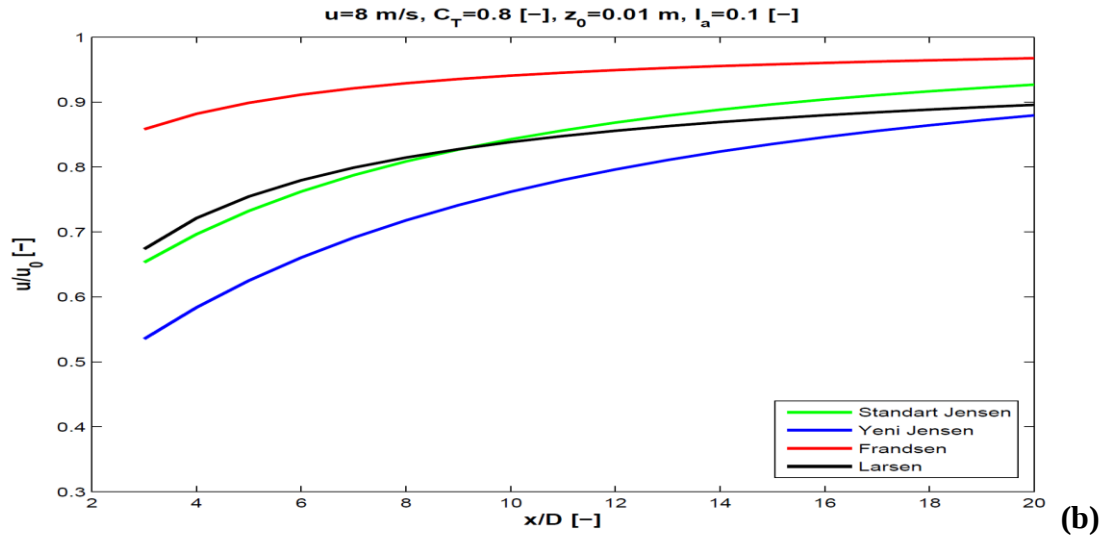
Şekil 4.5: Pürüzlülük uzunluğu değişiminin iz çapı gelişimi üzerindeki etkisi: (a) $z_0=0.0001$ m. (b) $z_0=0.01$ m. (c) $z_0=0.15$ m. (d) $z_0=0.3$ m.



Şekil 4.5 (devam): Pürüzlülük uzunluğu değişiminin iz çapı gelişimi üzerindeki etkisi: (a) $z_0=0.0001 \text{ m}$ (b) $z_0=0.01 \text{ m}$ (c) $z_0=0.15 \text{ m}$ (d) $z_0=0.3 \text{ m}$.



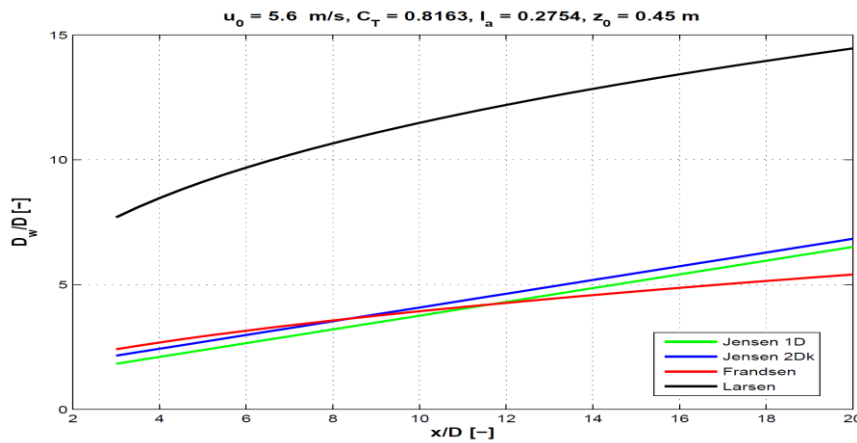
Şekil 4.6: Pürüzlülük uzunluğu değişiminin iz hızının gelişimi üzerindeki etkisi: (a) $z_0=0.0001 \text{ m}$. (b) $z_0=0.01 \text{ m}$. (c) $z_0=0.15 \text{ m}$. (d) $z_0=0.3 \text{ m}$.



Şekil 4.6 (devam): Pürüzlülük uzunluğu değişiminin iz hızının gelişimi üzerindeki etkisi: (a) $z_0=0.0001 \text{ m}$ (b) $z_0=0.01 \text{ m}$ (c) $z_0=0.15 \text{ m}$ (d) $z_0=0.3 \text{ m}$.

4.1 İstanbul Teknik Üniversitesi Meteoroloji Gözlem Parkı Sonuçları

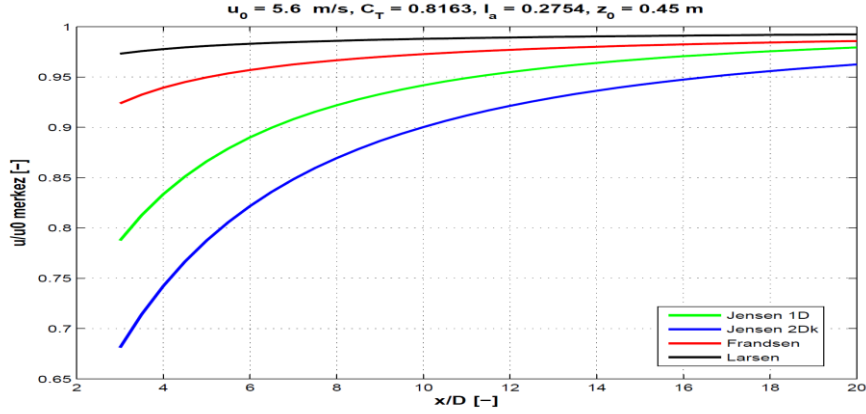
Şekil 4.7'de görüleceği üzere Larsen modeli her rüzgar altı mesafesinde en büyük iz çapını öngörmektedir. Bunun nedeni Larsen modelinde iz yarıçapı formülünün çevre türbülans yoğunluğuna hassas olmasından kaynaklanmaktadır. Larsen ve Frandsen modelleri başlangıçta diğer iki modele göre daha büyük rotor çapı öngörmektedir. Bunun nedeni her iki modelde de efektif rotor çapı varsayılmaktadır. Yeni Jensen modeli (veya Jensen 2Dk) ise tüm mesafelerde Standart Jensen modelinden (veya Jensen 1D) olan daha büyük iz çapı öngörmektedir. Bunun nedeni ise yeni Jensen modelinin, sadece atmosferik türbülansı içeren standart Jensen modelinin aksine, ayrıca türbi-üretimli türbülansı içermesinden kaynaklanmaktadır. Türbülans seviyesinin artmasıyla karışım daha etkili olacaktır. Dolayısıyla iz daha hızlı genişleyecektir. Frandsen modeli başlangıçta her iki Jensen modelinden daha büyük bir çapı öngörmesine rağmen belirli bir mesafeden sonra her iki Jensen modeli de Frandsen modelinden daha büyük iz çapı öngörmektedir. Bu, her iki Jensen modelinin de Frandsen modelinden daha büyük bir iz genişleme hızına veya gelişimine sahip olduğu anlamına gelmektedir. Ancak en büyük genişleme hızı Larsen modelinde görülmektedir. İz çapının büyüklüğü açısından, bu rüzgar altı türbinleri açısından arzu edilen bir durum değildir, çünkü daha büyük bir iz etki alanı rüzgar altı türbini için daha düşük bir rüzgar şiddeti ve dolayısıyla daha düşük bir güç üretimi anlamına gelmektedir.



Şekil 4.7: İz çapının mesafe ile gelişimi

Şekil 4.8'de analitik modeller tarafından öngörülen iz eksenindeki akış hızının rüzgar serbest akıştaki akış hızına oranının mesafe ile değişimi gösterilmektedir. Şekil

4.8'de, Larsen modeli her mesafede, en büyük oranı vermesine rağmen yeni Jensen modeli serbest akışa en hızlı yakınsamayı öngörmektedir. Larsen ve Frandsen modeli başlangıçta çok büyük bir oranla başlamasına rağmen her iki Jensen modeli de serbest akışa daha hızlı yakınsamaktadır.



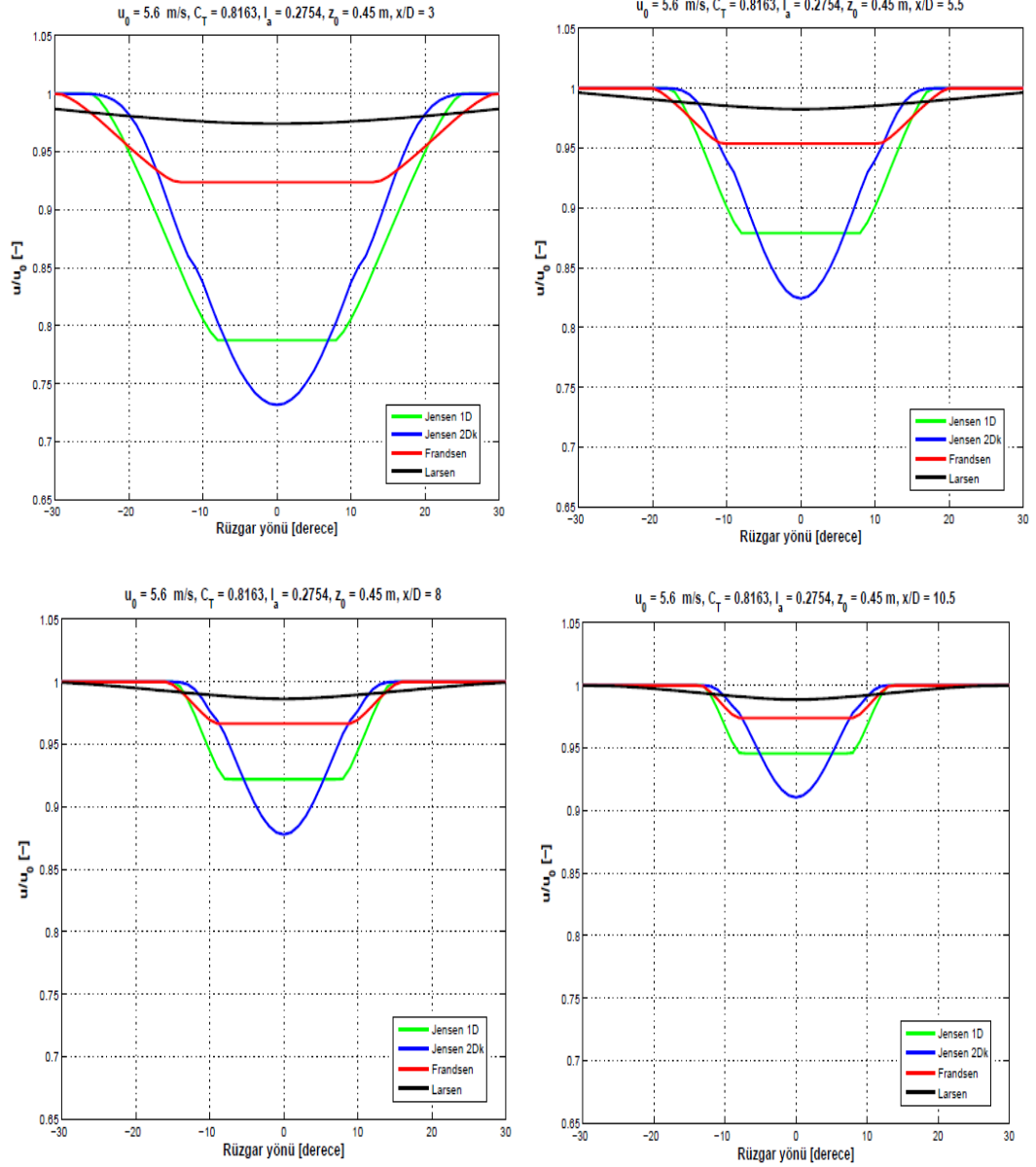
Şekil 4.8: Normalleştirilmiş iz hızının mesafe ile gelişimi

Şekil 4.9'te rüzgar altı tarafta rüzgar üstü türbinin türbin rotor ekseninde yerleştirilecek bir rüzgar altı türbin varsayımı yapılmıştır. Bu hipotetik türbin, sırasıyla 3, 5.5, 8 ve 10.5 rotor çapı mesafelerine yerleştirilmiştir. Rüzgar yönü değişimiyle birlikte rüzgar yönü türbinin iz etki alanı ile hipotetik türbin rotor alanının etkileşim oranının değişimi gösterilmektedir. Bunun sonucunda, normalleştirilmiş iz hızının (normalized wake speed) modeller tarafından öngörüsü gösterilmiştir. 60 derecelik bir açı değişimi uygulanmıştır. Modellerde yanal rüzgar profili eksensel simetrik olduğundan dolayı, negatif yöndeki 30 derecelik açı değişimi için gözlenen durumlar diğer pozitif yöndeki 30 derecelik açı değişimi için gözlenen durumlarla aynıdır. Rüzgar yönü için pozitif veya negatif açı değişimi, ele alınan farklı rüzgar yönlerinin türbinler arasındaki merkez açısı arasındaki farkı temsil etmektedir. Eğer ele alınan farklı rüzgar yönleri merkez eksen açısından daha küçükse, negatif açı değişimi söz konusudur. Tersisi durum için pozitif açı değişimi söz konusudur.

Türbin-Türbin etkileşiminde veya rüzgar üstü türbininin iz alanının rüzgar altı türbinin rotor alanı ile etkileşimde tam iz etkisi, kısmi etkisi ve iz etkisinin olmama (sıfır iz etkisi) durumu olmak üzere üç farklı durum vardır. Tam iz etkisi rüzgar altı türbin rotorunun tamamını rüzgar üstü türbinin iz alanının etkisinde kalmasıdır. Kısmi iz etkisi rüzgar altı türbin rotorunun bir kısmının rüzgar üstü türbinin iz alanının etkisinde kalmasıdır. İz etkisinin olmaması durumunda ise rüzgar altı türbin

rotorunun ile rüzgar üstü türbinin iz alanı arasında bir etkileşimin olmamasıdır. Şekil 4.3'te görüleceği üzere standart Jensen ve Frandsen modeli için açı değişimlerinde tam iz etkisi normalleştirilmiş iz hızının 1 olmadığı durumlardaki sabit doğruyu temsil ederken, kısmi iz etkisi ve sıfır iz etkisi için, sırasıyla, bir eğime sahip doğruyu ve normalleştirilmiş iz hızının 1 olduğu sabit doğruyu temsil etmektedir. Sıfır iz etkisi tüm modellerde normalleştirilmiş iz hızının 1 olduğu durumlardaki sabit doğruyu temsil etmektedir. Yeni Jensen modelinde ise tam iz etkisi kosinüs fonksiyonun oluşturduğu şekle sahip dağılımın olduğu açı değişim aralığını temsil ederken, kısmi iz etkisi bu dağılımdan sonra dışa doğru belirgin bir değişim ile beraber sıfır iz etkisine kadar olan eğriyi temsil etmektedir. Larsen modelinde ise yakın mesafelerde sadece tam iz etkisi gözlenmektedir. Bunun nedeni ise Larsen modelinin çok büyük iz çapı öngörmesidir. Larsen modelinde, ancak, belirli bir mesafe (9 rotor çapı) ile beraber tam iz etkisinin dışında diğer iki durum gözlenebilmektedir. Standart Jensen ve Frandsen modellerinde tam iz etkisinin normalleştirilmiş iz hızının 1 olmadığı sabit doğruyu temsil etmesinin nedeni bu iki modelin yanal rüzgar profili uniform dağılıma sahip olmasıdır. Tüm modellerde kısmi iz etkisinde normalleştirilmiş iz hızının negatif veya pozitif yönde artan açı değişimlerinde artmasının nedeni, ele alınan açı türbinler arasındaki merkez eksen açısından ne kadar saparsa, rüzgar üstü türbinin iz alanı rüzgar altı türbininin rotor alanını o kadar daha az etkileyecektir. Dolayısıyla rüzga altı türbininin türbin gövde yüksekliğinde rotor üzerindeki yanal rüzgar dağılımı göz önüne alındığında bu dağılıma en büyük katkı daha yüksek rüzgar şiddetine sahip serbest akıştan gelecektir

Yeni Jensen modeli, standart Jensen modelinden daha büyük iz çapı öngördüğünden dolayı hem tam hem de kısmi iz etkisi daha büyük bir açı değişiminde etkili olduğu gözlenmektedir ve dolayısıyla sıfır iz etkisi standart Jensen modelinde yeni Jensen modeline kıyasla daha büyük açı değişiminde etkilidir. Şekil 4.3'te Frandsen modeli başlangıçta her iki Jensen modeline kıyasla hem tam hem de kısmi iz etkisi açısından, daha büyük bir açı değişiminde etkilidir. Ancak, belirli bir mesafeden sonra, her iki Jensen modeli de Frandsen modeline kıyasla hem tam hem de kısmi iz etkisi açısından, daha büyük bir açı değişiminde etkilidir. Larsen modeli ise her mesafede en büyük tam iz etki açısını öngörmüştür. Buna rağmen Larsen modeli diğer modellere kıyasla en büyük normalleştirilmiş iz hızını öngörmektedir.

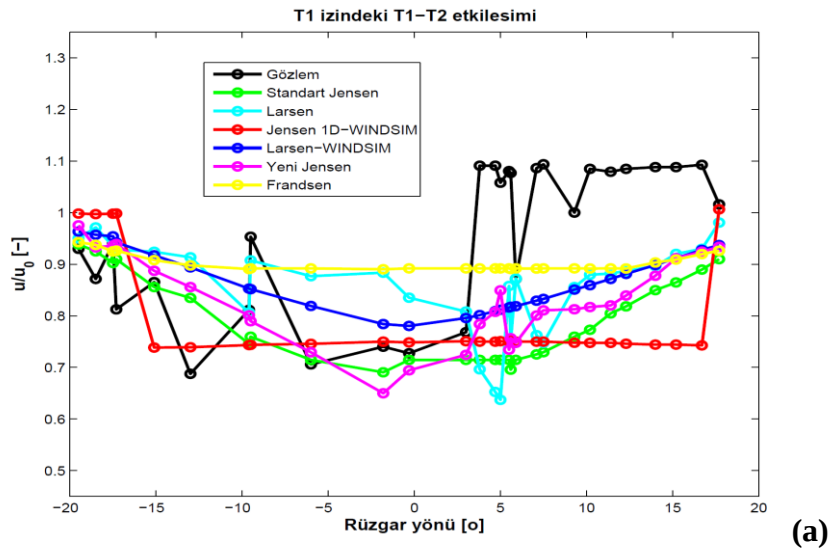


Şekil 4.9: Hipotetik bir rüzgar-altı türbinin farklı mesafelerdeki varsayımında iz-türbin etkileşiminin rüzgar yönü ile değişimi

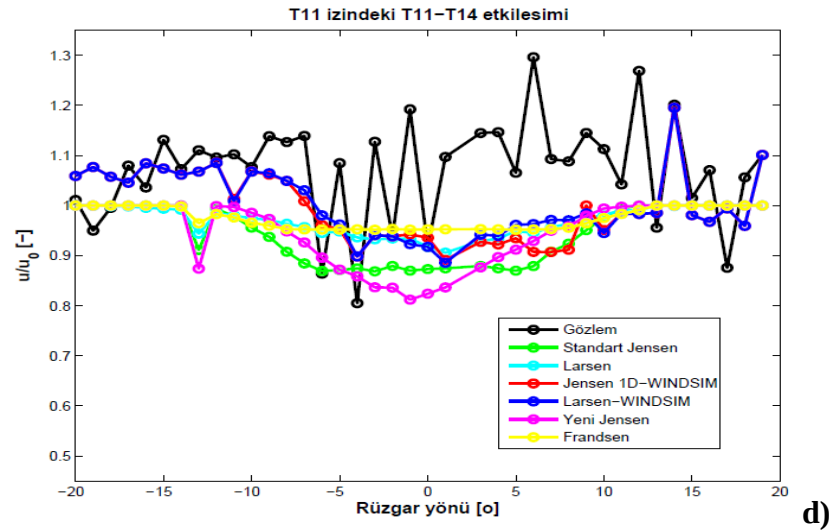
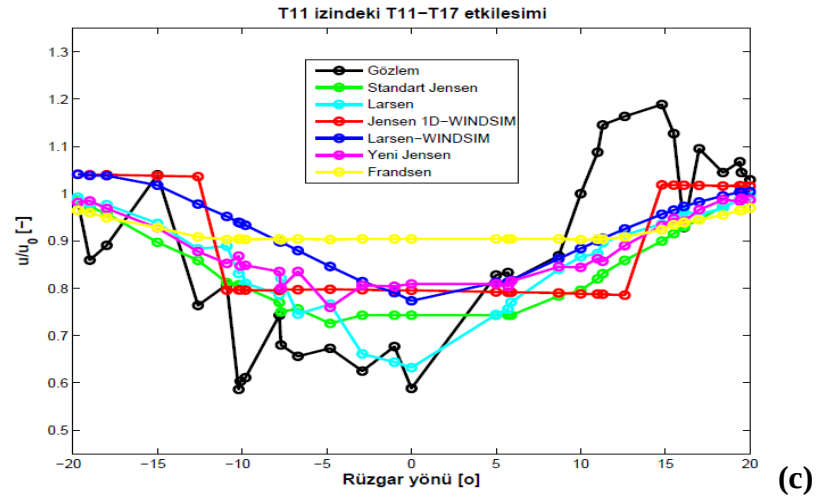
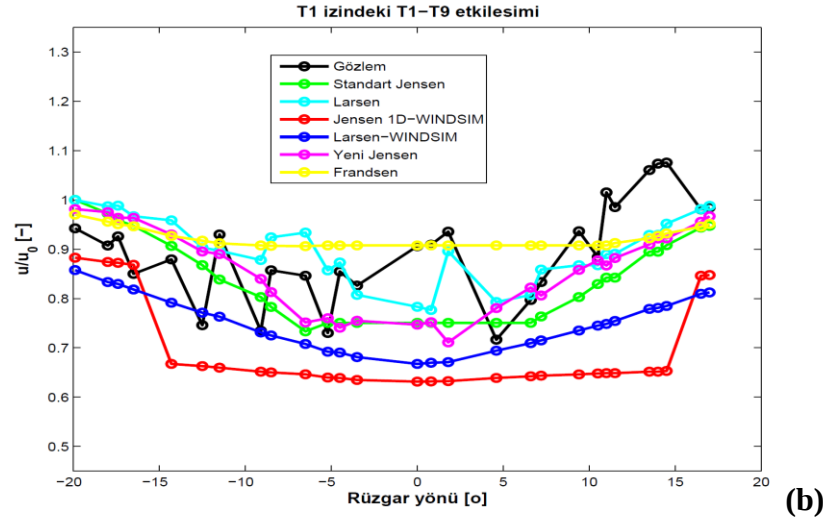
4.2 Çatalca Rüzgar Enerji Santrali Sonuçları

Şekil 4.10'te görüleceği üzere türbinler kompleks bir arazi üzerinde bulunduğundan ölçüm verisi için rüzgar altı türbinindeki ölçülen rüzgar şiddeti ile rüzgar yönü türbinindeki ölçülen rüzgar şiddeti arasındaki oranın 1'den daha büyük olduğu veriler bulunmaktadır. Şekil 4.10a - 4.10c'de Frandsen ve Larsen modeli tüm negatif yön değişimleriyle birlikte bazı testlerde pozitif yönde yaklaşık ilk 5 derecelik bir yön değişimine kadar çoğu kez ölçüm değerlerine göre daha yüksek değerler öngörmüştür ancak diğer pozitif yön değişimlerinde her iki Jensen modeli gibi ölçüm

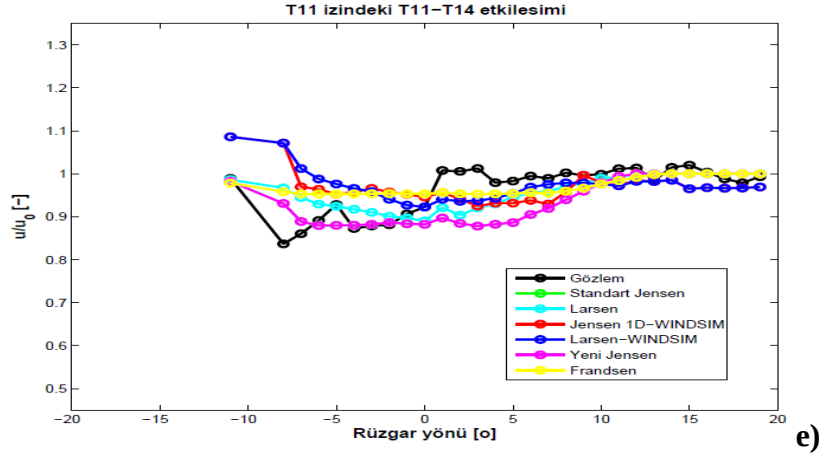
değerlerine göre daha düşük değerler öngörmüştür. Frandsen modeli şekil 4.10a - şekil 4.10c'deki tüm testlerde öngördüğü normalleştirilmiş rüzgar şiddeti değer aralığı 0.95 - 1 olan neredeyse sabit bir profil sergilemiştir. Bundan dolayı bazı testlerde (Şekil 4.10a ve 4.10d) normalleştirilmiş ölçüm verilerinin daha büyük bir bölümünün pozitif yön değişimde bulunmasından ve/veya çoğu kez 1'den daha büyük olmasından dolayı, özellikle ortalama hata için, iyi sonuçlar vermiştir (Çizelge 4.1). Her iki Jensen modeli birbirine yakın öngörüler sergilemektedir. Beş testin dördünde her iki Jensen modeli diğer modellere göre daha düşük değerler öngörmüştür. Sadece Türbin 11 - Türbin 17 testinde (şekil 4.10c) -5 ile 5 derecelik yön değişim aralığında Larsen modelinden daha büyük değerler öngörmüştür, ancak Türbin 11- Türbin 17 testinin (şekil 4.10c) negatif yön değişimini temsil eden kısım hariç tüm testlerde Jensen modelleri ölçüme göre çoğunlukla daha düşük değerler öngörmüştür. Şekil 4.10a-Şekil 4.10c'teki tüm testler için, sadece Frandsen modeli tüm testlerde beklenen karakteristik iz profili şeklini (sabit dağılım profilil) sergileyebilmiştir. Standart Jensen modeli ise Türbin 1 - Türbin 9 ve Türbin 11 - Türbin 17 testlerinde (sırasıyla şekil 4.10b ve şekil 4.10c) beklenen karakteristik sabit dağılım profilini yaklaşık olarak sergileyebilmiştir. Yeni Jensen modeli beklenen profili sağlayamazken ve Larsen modeli ise sadece Türbin 11 - Türbin 17 (şekil 4.10c) testinde sağlayabilmiştir.



Şekil 4.10: Tekli iz testlerinde modellerin hem tek başlarına hem de hesaplamalı akışkan dinamiği yardımıyla olan performansları: (a) Türbin 1 - Türbin 2 testi. (b) Türbin1 - Türbin 9 testi. (c) Türbin 11 - Türbin 17 testi. (d) Türbin 11 -Türbin 14-a testi (5-7 m/s gelen rüzgar girdisi için). (e) Türbin 11 -Türbin 14-b testi (8-10 m/s gelen rüzgar girdisi için).



Şekil 4.10 (devam): Tekli iz testlerinde modellerin hem tek başlarına hem de hesaplamalı akışkan dinamiği yardımıyla olan performansları: (a) Türbin 1 - Türbin 2 testi. (b) Türbin1 - Türbin 9 testi. (c) Türbin 11 - Türbin 17 testi. (d) Türbin 11 -Türbin 14-a testi (5-7 m/s gelen rüzgar girdisi için). (e) Türbin 11 -Türbin 14-b testi (8-10 m/s gelen rüzgar girdisi için).



Şekil 4.10 (devam): Tekli iz testlerinde modellerin hem tek başlarına hem de hesaplamalı akışkan dinamiği yardımıyla olan performansları: (a) Türbin 1 - Türbin 2 testi. (b) Türbin1 - Türbin 9 testi. (c) Türbin 11 - Türbin 17 testi. (d) Türbin 11 -Türbin 14-a testi (5-7 m/s gelen rüzgar girdisi için). (e) Türbin 11 -Türbin 14-b testi (8-10 m/s gelen rüzgar girdisi için).

Şekil 4.10d'de ve şekil 4.10e'de tek başlarına uygulanan tüm modeller beklenen karakteristik iz profillerini sergileyebilmiştir. Şekil 4.10d'de içintüm modeller (WindSim dahil) oldukça uyumsuz bir performans sergilemiştir ve ölçüme göre oldukça daha düşük değerler öngörmüştür. Şekil 4.10e'de ise tüm modeller (WindSim dahil), özellikle pozitif yön değişimini temsil eden kısım olmak üzere genelinde gözlemle iyi bir uyum sergilemektedir.

Her bir modelin, gözlemle uyumunu sayısal olarak incelemek için mutlak ortalama ve mutlak hata hesaplanmıştır. Modellerin mutlak ortalama ve mutlak hatası çizelge 4.1'de verilmiştir.

Yukarıdaki çizelge 4.1'de modeller bazı testlerde ölçüm verileriyle uyum gösterirken bazı testlerde ölçüm verileriyle uyum gösterememiştir. Türbin çiftleri arasındaki mesafe bu durumu oluşturan nedenlerden biridir. Bu, modellerin yakın izdeki akış için doğru (accurate) öngöründe bulunamadıkları anlamına gelmektedir. Toplamda, standart Jensen modeli % 9.99 ortalama mutlak hata, yeni Jensen modeli % 9.72 ortalama mutlak hata, Frandsen modeli % 9.42 ortalama mutlak ve Larsen modeli ise % 9.09 ortalama mutlak hata sergilemiştir. Larsen en iyi sonucu göstermesine rağmen hiçbir modelin açık bir şekilde diğer modellere kıyasla daha doğru öngöründe bulunduğunu gözlenmemektedir. Toplamda, tüm modeller birbirine yakın sonuçlar sergilemiştir. Frandsen modeli, toplamda en düşük ikinci ortalama mutlak hata ve en düşük ortalama hata sergilemesine rağmen, model şekil 4.4'teki ve şekil 4.5'deki tüm testlerde ölçüm verilerini takip edememiştir. Bunun nedeni, bu modelin kara ve

özellikle kompleks araziler gibi pürüzlülüğün ve türbülans seviyesinin yüksek olduğu koşullar için uygun olmamasıdır.

Çizelge 4.1: Modellerin (tek başlarına) her tekli iz testindeki ve toplamdaki ortalama mutlak hatası (OMH) ve ortalama hatası (OH).

		S. Jensen	Y. Jensen	Frandsen	Larsen
Türbin 1 - Türbin 2	OMH	0.1858	0.1608	0.1462	0.1732
	OH	0.1561	0.1196	0.0347	0.0802
Türbin 1 - Türbin 9	OMH	0.1049	0.0969	0.0904	0.0875
	OH	0.0588	0.0359	-0.0381	-0.0112
Türbin 11 - Türbin14 Durum 1	OMH	0.1279	0.1252	0.1113	0.1117
	OH	0.1106	0.1073	0.0814	0.0860
Türbin 11 - Türbin14 Durum 2	OMH	0.0439	0.0459	0.0425	0.0374
	OH	0.0287	0.0244	-0.0090	0.0057
Türbin 11 - Türbin 17	OMH	0.1434	0.1557	0.2045	0.1308
	OH	0.0003	-0.0486	-0.1031	-0.0145
Toplam	OMH	0.0991	0.0972	0.0942	0.0909
	OH	0.0405	0.0486	0.0149	0.0296

HAD teknolojisi tabanlı WindSim yazılımı ile uygulanan analitik iz modelleri (sadece standart Jensen ve Larsen modeli) şekil 4.10a-4.10e’de modellerin izdeki rüzgar şiddeti fark profillerini oldukça iyi sergileyebilmiştir. Özellikle standart Jensen modeline ait tam, kısmi ve sıfır iz etkisi kolayca gözlenebilmektedir. Şekil 4.10d-4.10e ise standart Jensen-WindSim modeli ve Larsen-WindSim iz modeli kendilerine ait izdeki rüzgar şiddeti fark profili karakteristiklerini sergileyememiştir. Şekil 4.10d haricinde Şekil 4.10a-4.10e’de akış alanını daha doğru biçimde çözme sağlayarak hesaplamalı akışkan dinamiği ile desteklenen analitik rüzgar türbin izi modelleri (standart Jensen-WindSim ve Larsen-WindSim) arazinin katılmadığı (süreklilik taşıyan yükselti ve pürüzlülük değişimi) ve akış alanının daha iyi çözülmesini sağlayan herhangi bir yöntem desteği olmadan tek başlarına uygulanan analitik rüzgar türbin izi modellerine (standart Jensen, yeni Jensen, Larsen ve Frandsen) göre ölçüm verileri ile daha iyi bir uyum sergileyememiştir (Larsen-WindSim modeli için şekil 4.10a hariç). Sadece şekil 4.10d’te WindSim destekli modellerin ölçüm verileri ile uyumu tek başına uygulanan iz modellerine kıyasla daha iyi durumdadır. Özellikle şekil 4.10d haricinde şekil 4.10a - şekil 4.10e’de

WindSim (HAD) destekli ve tek başlarına uygulanan standart Jensen ve Larsen modelleri kendi içlerinde kıyasladığında çizelge 4.2’de görüleceği üzere HAD destekli modellerin ortalama mutlak hatasında artış gerçekleştiği gözlenmektedir (Larsen-WindSim modeli için şekil 4.10a hariç). HAD destekli modellerin HAD desteği olmayan (tek başlarına uygulanan) diğer modellere göre daha düşük bir performans sergilemesinin nedeni HAD destekli modellerin rüzgar altı türbinleri için öngördüğü rüzgar yönü ile rüzgar yönü ölçüm verisi arasındaki fark olabilir. HAD destekli modeller uygulanırken rüzgar üstü türbinleri rüzgar yönü ve şiddeti verisi için ölçüm verilerinden yararlanılmıştır. Modeller rüzgar altı türbinleri öngördüğü rüzgar yön değerleri rüzgar üstü türbinlerinde ölçülen rüzgar yön değerlerine yakın değerlerine yakın değerdedir. Modeller tek başlarına uygulanırken hem rüzgar üstü türbini hem de rüzgar altı türbini için ölçüm verisinden yararlanılmıştır. Dolayısıyla HAD destekli ve HAD desteği olmayan modeller arasında, rüzgar altı türbinin kabul edeceği rüzgar yönü açısından, 10-20 derecelik farklar oluşmuştur. Bunda dolayı HAD destekli modellerde özellikle tam iz etkisi daha büyük açılarda etkili olacağından modeller rüzgar altı türbini için daha düşük rüzgar şiddeti değerleri öngörecektir. HAD-destekli modellere ait tekli iz testlerindeki ortalama mutlak hata ve ortalama hataya ait bilgiler çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.2: HAD destekli modellerin (sadece standart Jensen ve Larsen modelleri) her tekli iz testindeki ve toplamdaki ortalama mutlak hatası (OMH) ve ortalama hatası (OH).

		S. Jensen - WINDSIM	Larsen - WINDSIM
Türbin 1 - Türbin 2	OMH	0.1995	0.1513
	OH	0.1508	0.0764
Türbin 1 - Türbin 9	OMH	0.2219	0.1603
	OH	0.2204	0.1579
Türbin 11 - Türbin14 Durum 1	OMH	0.0972	0.0922
	OH	0.0610	0.0560
Türbin 11 - Türbin14 Durum 2	OMH	0.0586	0.0563
	OH	-0.0083	-0.0128
Türbin 11 - Türbin 17	OMH	0.1811	0.1540
	OH	-0.0996	-0.0490
Toplam	OMH	0.1426	0.1266
	OH	0.0703	0.0332

5. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasının bu bölümde modellerin iz karakteristiklerine ve modellerin tek başlarına ve bir hesaplamalı akışkan dinamiği yardımıyla komplek arazi üzerindeki performanslarına dair sonuçların özetine, ve bu sonuçlara bağlı olarak modellere ve ölçüm verisine ait eksikler ve bu eksiklerin giderilmesine yönelik önerilere yer verilmiştir. Bölüm 5.1’de İTÜ Meteoroloji Gözlem Parkı’ndaki küçük ölçekli rüzgar türbini ve türbin yakınında bulunan ölçüm direğine ait rüzgar verisi kullanılarak standart Jensen modeli, yeni Jensen modeli, Larsen modeli ve Frandsen modeli olmak üzere dört farklı analitik rüzgar türbin izi modellerinin iz karakteristiklerine ait sonuçların özeti verilmiştir. Bölüm 5.1’de ayrıca, tezin asıl amacı olan ve tezin tez konu başlığını belirleyen, bu analitik rüzgar türbin iz modellerinin, kompleks bir arazide bulunan Çatalca rüzgar enerji santralinden alınan rüzgar verileri kullanılarak hem tek başlarına hem de Hesaplamalı Akışkan Dinamiği (HAD) tabanlı WINDSIM yazılımının yardımıyla olan performanlarına ait sonuçların genel özeti verilmiştir. Bölüm 5.2’de bölüm 5.1’deki sonuçlara bağlı olarak modellere ve ölçüm verisine ait eksikler ve bu eksiklerin giderilmesine yönelik önerilere yer verilmiştir.

5.1 Sonuçlar

Bu tez çalışmasında analitik iz modellerinin (hem tek başlarına hem de HAD destekli), kompleks arazi koşulunda ölçüm verileriyle olan uyumu belirlenmeye çalışılmıştır. Bu kapsamda ilk olarak HAD desteği olmayan (tek başlarına uygulanan) modellerin, izdeki yanal rüzgar profili, başlangıç iz çapı, iz çapının mesafeyle gelişimi ve mesafeyle iz ile serbest akış arasındaki rüzgar şiddeti oranının büyüme hızı gibi karakteristiklerini göstermek amaçlanmıştır. Bunun için, İstanbul Teknik Üniversitesi Meteoroloji Gözlem Parkı’ndaki küçük ölçekli rüzgar türbininden ve ölçüm direğinden elde edilen rüzgar ölçüm verileri kullanılmıştır. Larsen modeli, başlangıç iz çapı, iz çapının gelişimi, normalleştirilmiş iz hızı, tam iz etki açısı için tüm modeller arasında en büyük öngörüye sahiptir. Yeni Jensen modeli başlangıçta en düşük iz hızına sahip olmasına rağmen serbest akışa en hızlı

gelişimine sahiptir. Standart Jensen modeli, yeni Jensen modeline, iz ile serbest akış arasındaki rüzgar şiddet farkının azalma hızı açısından benzer öngörüye sahiptir. Aradaki fark ise yeni Jensen modelinin sadece atmosferik türbülansı değil aynı zamanda türbin-üretimli türbülansı da göz önünde bulundurmasından kaynaklanmaktadır. Yeni Jensen modeli tam ve kısmi iz açısından standard Jensen modeline göre daha büyük etki açısına sahiptir. Frandsen modeli, Larsen modelinden sonra, en büyük iz hızı ve başlangıç iz çapı öngörüsüne sahiptir. Ancak, Frandsen modeli belirli rüzgar-altı mesafesinden sonra hem iz çapı gelişimi açısından hem de tam ve kısmi iz etkisi açısından her iki Jensen modelinden de daha düşük öngörüye sahiptir.

Bu tezin asıl hedefi olan bir sonraki adımda, kompleks bir arazi üzerinde kurulu olan Çatalca Rüzgar Enerji Santralinden alınan ölçüm verileri kullanılarak beş farklı tekli iz durumu için modellerin (hem HAD desteği olmayan hem de HAD destekli) ölçüm verileri ile uyumu test edilip modeller arasında kıyaslama yapılmıştır. Genel olarak, HAD desteği olmayan Larsen modeli modeli en iyi sonucu vermesine rağmen HAD desteği olmayan herhangi bir model için HAD desteği olmayan diğer modellere kıyasla açık bir üstün performansa sahip olduğu gözlenmemiştir. Modeller toplamda benzer performans sergilemiştir. HAD destekli standart Jensen ve Larsen analitik iz modelleri tek başlarına uygulanan analitik iz modellerine kıyasla (standart Jensen, yeni Jensen, Larsen ve Frandsen) genelde daha kötü bir performans sergilemiştir. Bunun nedeni HAD destekli modellerin rüzgar altı rüzgar türbinin kabul edeceği rüzgar yönü için rüzgar yönü ölçüm verilerine kıyasla oldukça farklı öngörmesi olabilir. HAD destekli modeller uygulanırken rüzgar üstü türbinleri rüzgar yönü ve şiddeti verisi için ölçüm verilerinden yararlanılmıştır. Modeller rüzgar altı türbinleri öngördüğü rüzgar yön değerleri rüzgar üstü türbinlerinde ölçülen rüzgar yön değerlerine yakın değerlerine yakın değerdedir. Modeller tek başlarına uygulanırken hem rüzgar üstü türbini hem de rüzgar altı türbini için ölçüm verisinden yararlanılmıştır.

5.2 Öneriler

Tek başlarına kullanılan hiçbir analitik izi modeli akışın doğrultusunu, hızını etkileyen arazi özelliklerini içermemektedir. Ayrıca tüm bu sözü geçen modeller arazi yüzeyinin homojen olduğu ve bu homojen yüzey üzerinde akışın araziye paralel

ve sadece gelen akış doğrultusunda olabileceği varsayımlarından dolayı modeller daha düz bir arazi üzerinde ölçüm verileriyle daha uyumlu sonuçlar verebilir. Frandsen modeli, Lasen modelinden sonra ikinci en iyi sonucu sergilemesine rağmen hemen hemen her testte yaklaşık sabit bir profil sergilemiştir, ve ölçüm verilerinin oluşturduğu profili takip edememiştir. Bunun nedeni Frandsen modelinin açık deniz rüzgar tarlaları için geliştirilmiş olması ve kara yüzeyi gibi deniz yüzeyinden daha pürüzlü yüzeyler için uygun olmamasıdır. Frandsen modeli karada olan rüzgar tarlaları için ayrıca geliştirilebilir.

Bu tez çalışmasında modellerin performansının test edildiği Çatalca Rüzgar Rüzgar Santralinde türbin yüksekliğinde tek bir ölçüm direği mevcuttur. Rüzgar tarlalarında birden çok noktada ölçüm verisi alınarak hesaplamalarda daha doğru sonuçlar elde edilebilir.

KAYNAKLAR

- Ainslie, J. F.** (1988). Calculating the flowfield in the wake of wind turbines, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 27, 213-224.
- Akbar, M. & Porte-Agel, F.** (2014). The effect of atmospheric stability on wind turbine wakes : A large-eddy simulation study, *The Science of Making Torque from Wind 2014 (TORQUE 2014)*, Copenhagen, Denmark, 2014.
- Barlas, E.** (2014). *Experimental investigation of wind turbine / farm wakes in a boundary layer wind tunnel* (Project Report). von Karman Institute for Fluid Dynamics, Belgium.
- Barthelmie, R.J., Hansen, K.S., Frandsen, S.T., Rathmanen, O., Schepers, J.G., Schepers, J.G., Phillips, J., Rados, K., Zervos, A., Politis, E.S., Chaviaropoulos, P.K.** (2009). Modelling and measuring flow and wind turbine wakes in large wind farms offshore, *Wind Energy*, 12, 431-444.
- Barthelmie, R.J., Pryor, S.C., Frandsen, S.T., Hansen, K.S., Schepers, J.G., Rodos, K., Schlez, W., et al.** (2010). Quantifying the impact of wind turbine wakes on power output at offshore wind farm, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 27(8), 1302-1317.
- Bastankhah, M. & Porte-Agel, F.** (2015). A new analytical model for wind-turbine wakes, *Renewable Energy*, 70, 116-123.
- Bingöl F., Mann, J., Larsen G. C.** (2010). Light detection and ranging measurements of wake dynamics part I: One-dimensional scanning, *Wind Energy*, 13, 51-61
- Burton, T., Shape, D., Jenkins, N., Bossanyi, E.** (2001). *Wind Energy Handbook*, Wiley, 2001.
- Chamorro, L.P. & Porte-Agel, F.** (2009). A wind-tunnel investigation of wind-turbine wakes : Boundary-layer turbulence effects, *Boundary Layer Meteorology*, 132, 129-149.
- Chamorro, L.P. & Porte-Agel, F.** (2011). Turbulent flow inside and above a wind farm : A wind-tunnel study, *Energies*, 4, 1916-1936.
- Choi, J. & Shan, M.** (2013). Advancement of Jensen (Park) wake model, *Europe's Premier Wind Energy Event 2013 (EWEA 2013)*, Vienna, Austria, February, 2010.
- Counihan, J.** (1975). Adiabatic atmospheric boundary layers : A review and analysis of data collected from the period 1880-1972, *Atmospheric Environment*, 9, 871-905.

- Crespo, A. & Hernandez, J.** (1996). Turbulence characteristics in wind-turbine wakes, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 61, 77-85.
- Crespo, A., Hernandez, J., Frandsen, S.** (1999). Survey of modelling methods for wind turbine wakes and wind farms, *Wind Energy*, 2, 1-24.
- Dahlberg, J. A., Medici, D.** (2003). Potential improvement of wind turbine array efficiency by active wake control (AWC), *Proc. European Wind Energy Conference*, Madrid, 2003
- De-Prada-Gil, M., Alias, C.G., Gomis-Bellmunt, O., Sumper, A.** (2015). Maximum wind power plant generation by reducing the wake effect, *Energy Conversion and Management*, 101, 73-84.
- Espana, G., Auburn, S., Loyer S., Devinant P.** (2012). Wind tunnel study of the wake meandering downstream of a modeled wind turbine as an effect of large scale turbulent eddies, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 101, 24-33
- Fallon, D.** (2006). *Wind Energy Resource evaluation in a site of central Italy by cfd simulations* (Master Thesis). University of Cagliari, Department of Mechanical Engineering.
- Frandsen, S., Barthelmie, R., Pryor, S., Rathmann, O., Larsen, S., Hojstrup, J.** (2006). Analytical modelling of wind speed deficit in large offshore wind farms, *Wind Energy*, 9, 39-53.
- Gonzalez-Longatt, F., Wall, P., Terzija, V.** (2011), Wake effect in wind farm performance : Steady-state and dynamic behavior, *Renewable Energy*, xxx, 1-10.
- GWR.** (2016). *GWEC*, annual market update 2015.
- Hamed, R., Javaheri, A., Dehghan, O., Torabi, F.** (2015). A semi-analytical model for velocity profile at wind turbine wake using blade element momentum, *Energy Equipment and Systems*, 3, 13-24
- Hansen, K. S., Barthelmie, R. J., Jensen, L. E., Sommer, A.** (2012). The impact of turbulence intensity and atmospheric stability on power deficit due to wind turbine wakes at Horns Rev wind farm, *Wind Energy*, 15 (1), 183-196.
- Howland, M. F., Bossuyt J., Martinez-Tossas, L. A., Meyers J., Meneveau, C.** (2016). Wake structure of wind turbines in yaw under uniform inflow conditions, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, January 2016.
- Jensen, N. O.** (1983). A note on wind generator interaction, *Riso National Laboratory*.
- Jeon, S., Kim, B., Huh, J.** (2015). Comparison and verification of wake models in an onshore wind farm considering single wake condition of the 2 MW wind turbine, *Energy*, 93, 1769-1777
- Jha, P. K., Duque, E. P. N., Bashioum, J. L., Schmitz, S.** (2015). Unraveling the mysteries of turbulence transport in a wind farm, *Energies*, 8, 6468-6496.

- Justus, C. G.** (1978). Winds and wind system performance, *Franklin Institute Press*, Philadelphia, PA.
- Katic, I., Hojstrup, J., Jensen, N. O.** (1986). A simple cluster efficiency, European Wind Energy Conference and Exhibition, Rome, Italy, 1986, 407-410.
- Kaymak, M. K., Yerli, B., İzgi, E., Öztopal, A., Şahin, A. D.** (2011). 1.5 kW'lık rüzgar türbininin İstanbul iklim şartlarında enerji ve ekserji analizi, 5. Atmosfer Bilimi Sempozyumu, 27-29 Nisan 2011, İstanbul, Türkiye.
- Lange, M. & Focken U.** (2005). Physical Approach to Short-Term Wind Power Prediction, *Springer*.
- Larsen, G., C.** (2009). A simple stationary semi-analytic wake model, *Riso National Laboratory*, Technical University of Denmark, Roskilde, August 2009.
- Larsen, G.C., Machefaux, E., Chougule, A.** (2015). Wake meandering under non-neutral atmospheric stability conditions – theory and facts, *Journal of Physics : Conference Series* 625, 2015
- Larsen, G. C., Madsen, H. A., Niels, N.** (2003). Mean wake deficit in the near field, European Wind Conference and Exhibition, Madrid, Spain, 2003.
- Larsen, G. C., Madsen, H. A., Bingöl, F., Mann, J., Ott, S., Sorensen, S. N., Okulov, V., Trodborg, N., Nielsen, M., Thomsen, K., Larsen, T. J., Mikkelsen, R.** (2007). Dynamic wake meandering modeling, *Technical Report R-1607 (EN)*, Riso National Laboratory for Sustainable Energy, Technical University of Denmark, June 2007.
- Lynum, S.** (2013). *Wind Turbine wake meandering* (Master's Thesis). Retrieved from <https://www.diva-portal.org/>
- Machefaux, E., Larsen, G. C., Leon, J. P. M.** (2015). Engineering models for merging wakes in wind farm optimization applications, *Journal of Physics : Conference Series*, 625, 012039.
- Magnusson, M., Smedman, A. S.,** (1999). Air flow behind win turbines, *Journal of Wind Engineering*, 80, 169-189.
- Manwell, J. F., McGowan, J. G., Rogers, A. L.** (2002). Wind Energy Explained : Theory, Design and Application, *Wiley*.
- Menteş, Ş. S.** (1996). *Atmosferik sınır tabakanın yüksek mertebe kapama yöntemi ile bir boyutlu modellenmesi* (Doktora Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Meteoroloji Mühendisliği.
- Messac, A., Tong, W., Chowdhury, S., Zhang, J.** (2012). Impact of different wake models on the estimation of wind farm power generation, *12th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) and 14th AIAA/ISSM*, 17-19 September 2012, Indianapolis, Indiana, USA.
- Moskalenko, N., Rudion, K., Orths, A.** (2010). Study of wake effects for offshore wind farm planning, *Modern Electric Power Systems*.
- Niayifar, A. & Porte-Agel, F.** (2015). A new analytical model for wind farm power prediction, *Journal of Physics : Conference Series*, 625, 012039.

- Nygaard, O. V.** (2011). *Wake behind a horizontal-axis wind turbine* (Master's Thesis). Retrieved from <https://www.diva-portal.org/>
- Okulov, V. L., Naumov, I. V., Mikkelsen, R. F., Sorensen, J. N.** (2015). Wake effect on a uniform flow behind wind-turbine model, *Journal of Physics: Conference Series*, 625, 012011.
- Porte-Agel, F., Wu, Y. -T., Chen, C. -H.** (2013). A numerical study of effects of wind direction on turbine wakes and power losses in a large wind farm, *Energies*, 6, 5297-5313.
- Politis, E. S., Prospathopoulos, J., Cabezon, D., Hansen, K. S., Chaviaropoulos, P.K., Barthelmie, R. J.** (2012). Modeling wake effects in large wind farms in complex terrain : the problem, the methods and the issues, *Wind Energy*, 15 (1), 161-182.
- Rethore, P. E.** (2006). *Thrust and wake of a wind turbine : Relationship and measurements* (Master Thesis). Technical University of Denmark, Riso National Laboratory, Roskilde, Denmark.
- Sanderse, B.** (2009). Aerodynamics of wind turbine wakes, *Energy Research Center of the Netherlands (ECN)*, ECN-E-09-016, Petten, The Netherlands.
- Seim, F., Gravdahl, A. R., Adaramola, M. S.** (2015). Validating kinematic wake models in complex terrain, *The European Wind Energy Association (EWEA) 2015*, Paris, France, November 2015.
- Spera, D. A.** (1994). Wind turbine technology : Fundamental concepts of wind turbine engineering, *ASME Press*, New York.
- Stevens, R. J. A. M., Gayme, D. F., Meneveau, C.** (2013). Effect of turbine alignment on the average power output of wind farms, *ICOWES 2013 Conference*, Lyngby, Denmark, June 2013.
- Tian, L., Zhu, W., Shen, W., Zhao, N., Shen, Z.** (2015). Development and validation of a new two-dimensional wake model for wind turbine wakes, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 137, 90-99.
- TREİR.** (2016). *Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği*, Ocak 2016
- Trujillo, J.-J., Bingöl, F., Larsen, G. C., Mann J., Kühn, M.** (2011). Light detection and ranging measurements of wake Dynamics part II: Two-dimensional scanning, *Wind Energy*, 14, 61-75.
- Vermeer, L. J., Sorensen, J. N., Crespo, A.** (2003). Wind turbine wake aerodynamics, *Progress in Aerospace*, 39, 467-510.
- Wallbank, T.** (2008). *WindSim validation study – cfd validation in complex terrain*.
- Wu, Y. -T., Porte-Agel, F.** (2012). Atmospheric turbulence effects on wind-turbine wakes : An les study, *Energies*, 5, 5340-5362.

EKLER

EK A : İTÜ’deki türbine ve türbinin bulunduğu lokasyona ait fotoğraflar

EK B : İz çapının mesafe ile gelişimi

EK C: İz hızının mesafe ile gelişimi

EK A



(a)



(b)

Şekil A.1 : İTÜ meteoroloji gözlem parkındaki türbine ve türbinin bulunduğu lokasyona ait fotoğraflar: (a) kuzeyden görünüm (en sağda Akom marka ölçüm direği bulunmaktadır). (b) kuzeyden başka bir görünüm. (c) kuzeyinde bulunan bir yapı. (d) kuzey-doğusuna ait bir görüntü. (e) kuzey-doğusuna ait bir başka görüntü.



(c)



(d)

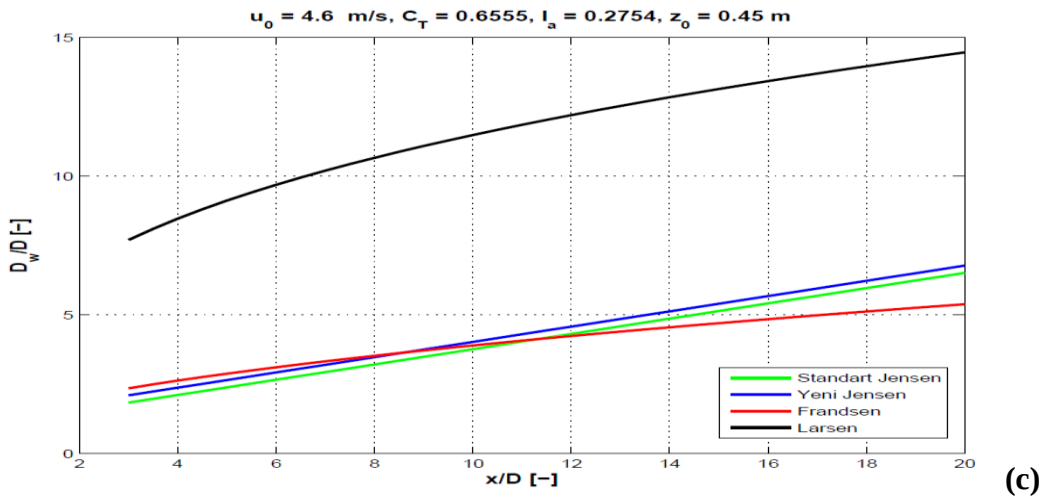
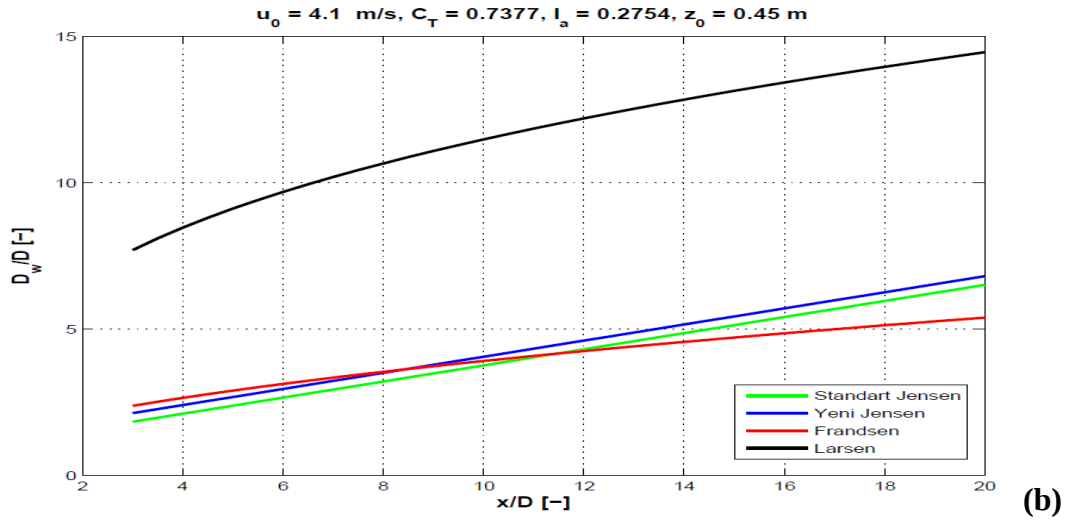
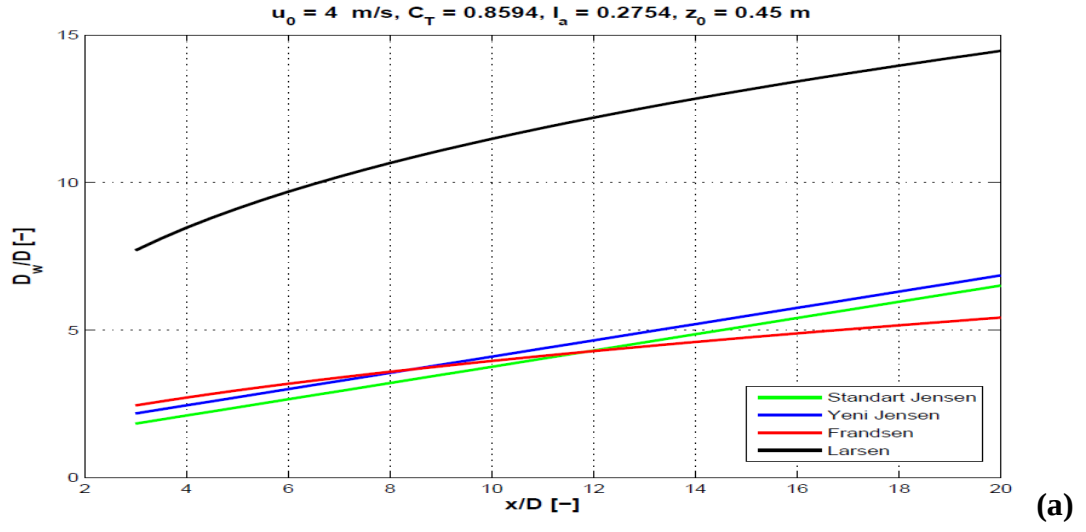
Şekil A.1 (devam): İTÜ meteoroloji gözlem parkındaki türbine ve türbinin bulunduğu lokasyona ait fotoğraflar: (a) kuzeyden görünüm, (en sağda Akom marka ölçüm direği bulunmaktadır) (b) kuzeyden başka bir görünüm. (c) kuzeyinde bulunan bir yapı. (d) kuzey-doğusuna ait bir görüntü. (e) kuzey-doğusuna ait bir başka görüntü.



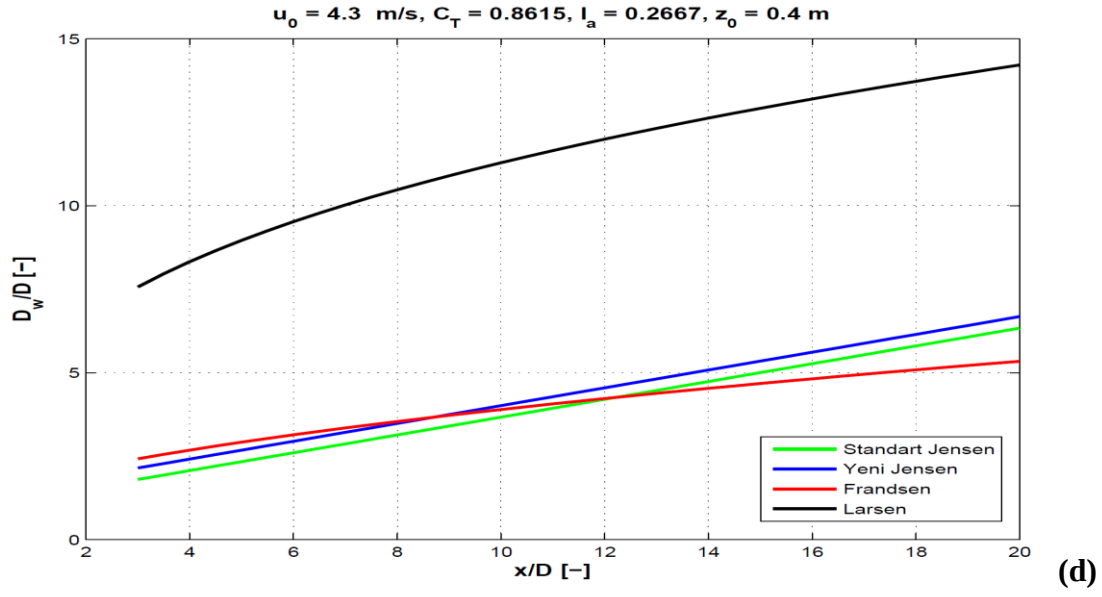
(e)

Şekil A.1 (devam): İTÜ meteoroloji gözlem parkındaki türbine ve türbinin bulunduğu lokasyona ait fotoğraflar (a) kuzeyden görünüm (en sağda Akom marka ölçüm direği bulunmaktadır). (b) kuzeyden başka bir görünüm. (c) kuzeyinde bulunan bir yapı. d) kuzey-doğusuna ait bir görüntü (e) kuzey-doğusuna ait bir başka görüntü.

EK B

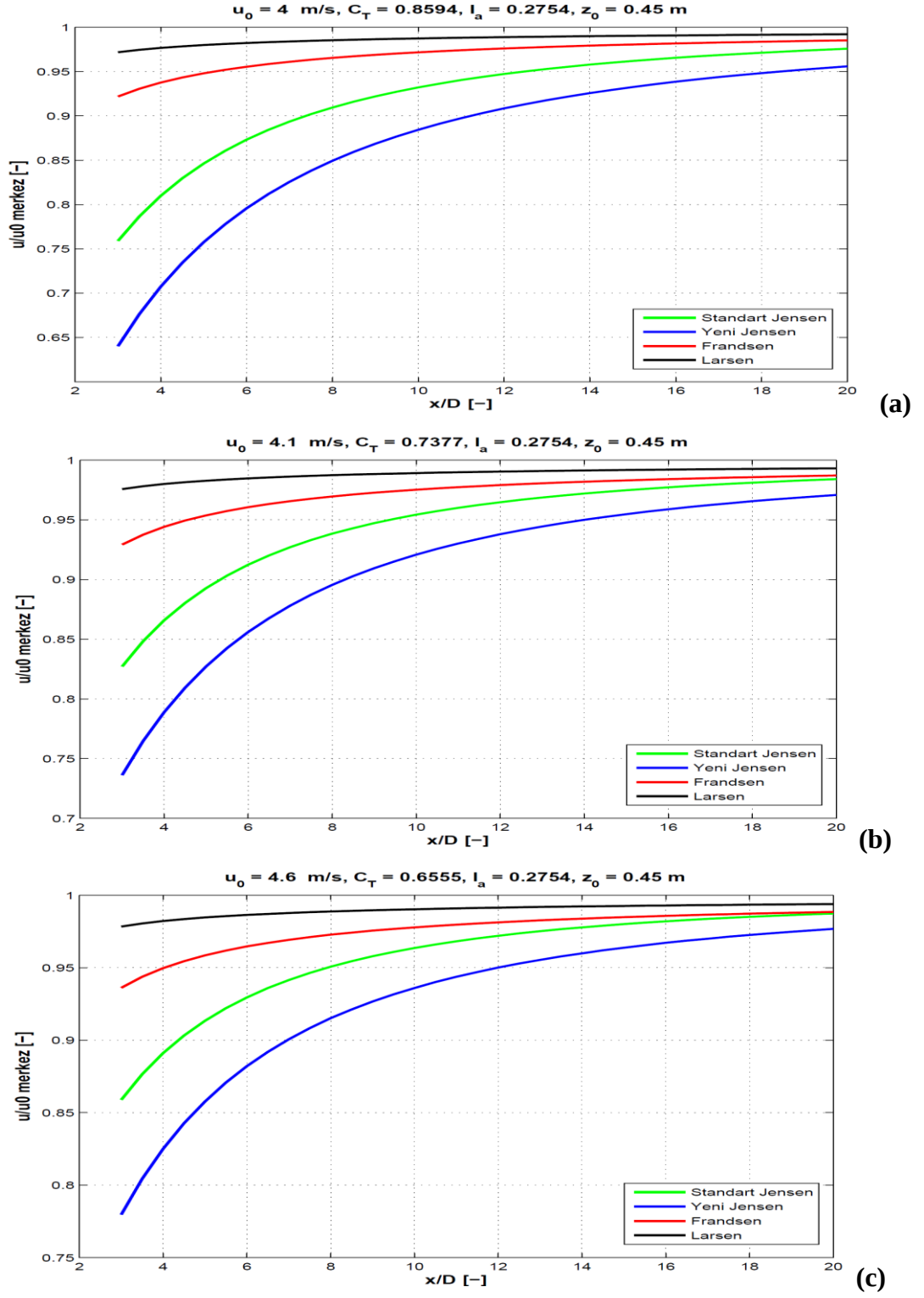


Şekil B.1: İz çapının mesafe ile gelişimi: (a) 37 derece (rüzgar yönü) durumu için. (b) 24.8 derece durumu için. (c) 39.7 derece durumu için. (d) 49.3 derece durumu için.

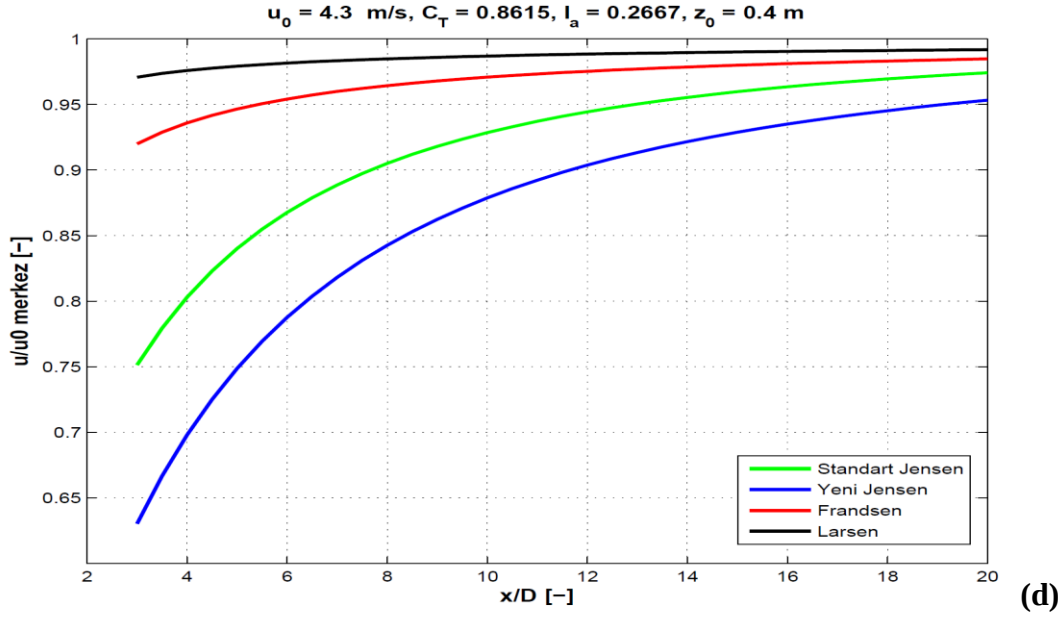


Şekil B.1 (devam): İz çapının mesafe ile gelişimi (a) 37 derece (rüzgar yönü) durumu için. (b) 24.8 derece durumu için. (c) 39.7 derece durumu için. (d) 49.3 derece durumu için.

EK C



Şekil C.1: İz hızının mesafe ile gelişimi: (a) 37 derece (rüzgar yönü) durumu için. (b) 24.8 derece durumu için. (c) 39.7 derece durumu için. (d) 49.3 derece durumu için.



Şekil C.1 (devam): İz hızının mesafe ile gelişimi (a) 37 derece (rüzgar yönü) durumu için. (b) 24.8 derece durumu için. (c) 39.7 derece durumu için. (d) 49.3 derece durumu için.

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Tarık KAYTANCI
Doğum Tarihi ve Yeri : 25.12.1987, İstanbul
E-posta : kaytanci[at]itu.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2012, Bahçeşehir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2013 - 2015 yılları arasında "Rüzgar Tarlalarında Kısa Süreli Rüzgar Enerjisi Tahmini için Numerik Rüzgar Tahmin Modelinin Geliştirilmesi" başlıklı TÜBİTAK projesinde bursiyer olarak çalıştı.