

Rüzgâr türbini ve tarla analizlerinde yöntemler ve yazılımlar

Tek rotor aerodinamiğinden büyük tarla etkileşimine, yapısal yüklere ve elektrik şebekesine uzanan karşılaştırmalı araştırma özeti

Bu raporun amacı, araştırma sorusuna uygun fiziksel modeli ve yazılımı seçmektir. Projenin ana adayları OpenFAST ve URANS'tır. Panel yöntemi, danışmanın önerisi doğrultusunda incelenen yardımcı bir seçenektir. Genel sonuç: bütün çıktılar için tek bir üstün yöntem yoktur; güç, yorulma, ayrıntılı akış ve elektrik geçicileri farklı çözüm düzeyleri gerektirir.

Önce dört farklı model seçimini ayırmak gerekir

Düzye	Ne seçilir	Örnek ve anlamı
Rotorun aerodinamik temsili	BEM, lifting line, panel, actuator disk, actuator line, gerçek kanat geometrisi	Kuvvetlerin nasıl üretildiğini ve akışa nasıl aktarıldığını belirler.
Akış ve türbülans çözümü	Potansiyel akış, RANS, URANS, DES, LES	Akış alanında hangi ölçeklerin çözüldüğünü, hangilerinin modellendiğini belirler.
Türbinin sistem dinamiği	Esnek yapı, tahrik hattı, kontrol, deniz ve bağlama modelleri	OpenFAST, Bladed, HAWC2: hareket, güç ve yüklerin etkileşimini hesaplar.
Elektrik ve şebeke	Güç akışı, dinamik fazör/RMS, dq makine modeli, EMT	Jeneratör, dönüştürücü, kablolar ve şebeke tepkisi için kullanılır.

Dolayısıyla “actuator disk mi LES mi?” karşılaştırması aynı düzeyde değildir: LES + actuator disk geçerli bir birleşimdir. OpenFAST da bir türbülans kapanış modeli değildir; seçilen aerodinamik modeli yapı ve kontrolle zaman alanında birleştirir. URANS ise CFD'deki akış çözüm yaklaşımıdır. [1–4]

Hangi yöntemler yaygın bir başlangıç noktasıdır

Türbin tasarımı ve yük hesabında BEM tabanlı aeroelastik modeller; tarla enerji hesabında Jensen/Park ve Gaussian ailesi gibi mühendislik iz modelleri; ortalama saha akışında RANS + disk; türbülanslı iz fiziği araştırmasında LES + disk/çizgi; şebeke etüdünde güç akışı ve RMS/EMT modelleri yaygın yöntem aileleridir. Serbest girdap yöntemleri, rotorun geçici aerodinamiği için aradaki ayrıntı düzeyini sağlar. [1–4, 7–10]

Kapsam ve kanıt sınırı. “Yaygın” ifadesi kullanım senaryolarını ve literatürde tekrar eden yöntem ailelerini anlatır; kullanım payına göre sayısal bir sıralama değildir. Ağırlık yatay eksenli türbinlerdedir; düşey eksen ve yüzer platformlar ayrıca belirtilir. Yazılım bilgileri resmî belge/depolardan derlenmiştir; bu çalışma bir kurulum veya hız testi içermez. Kaynakça sayfa 10'da, yazılım bağlantıları sayfa 7–8'dedir.

1 Rotorun ve aerodinamik kuvvetlerin modellenmesi

Fiziksel temsil, gerçek kanat yüzeyini ne ölçüde sadeleştirdiğimizi gösterir. Daha ayrıntılı geometri tek başına daha doğru sonuç garantisi vermez; profil poları, ayrılma modeli, ağ ve giriş akışı da belirleyicidir. BEM, Blade Element Momentum yani kanat elemanı ve momentum yaklaşımıdır. [1, 2, 5]

Yöntem	Çözülen veya temsil edilen fizik	Kullanım ve temel sınır
Momentum diski ve BEM Düşük maliyet	Disk momentum dengesi; BEM’de kanat kesitlerinden kaldırma/sürüklenme ve indüksiyon hesabı.	Rotor boyutlandırma, güç ve yükler. Profil polarları gerekir; ayrıntılı üç boyutlu akış alanı üretmez.
Dinamik BEM	Dinamik indüksiyon, eğik iz, uç/kök kaybı ve dinamik stall gibi alt modeller.	Geçici aeroelastik hesapların yaygın temeli. Düzeltmelerin geçerlilik aralığı önemlidir.
Lifting line ve serbest girdap izi	Kanatlar bağlı girdap çizgileri; bırakılan girdaplar yerel hızla taşınır.	Yaw, rotor hareketi, uç girdabı ve etkileşim. Viskoz çekirdek, polar ve iz kesme ayarlarına duyarlı.
Vortex lattice ve yüzey paneli	VLM taşıyıcı yüzeyi; panel yöntemi kanat kalınlığını da içeren sınır yüzeyini potansiyel akışla temsil eder.	Basınç ve indüklenmiş hız. Ayrılma, sürüklenme ve türbülanslı karışım ek model ister; birbirleriyle özdeş değildir.
Actuator disk AD veya ADM	CFD ağına disk üzerinde dağıtılmış kuvvet; sabit itki veya kesitsel yükler. Dönen disk teğetsel kuvvet de ekler.	Çok türbinli ortalama akış ve LES. Tek tek kanat geçişini ve yüzey sınır tabakasını çözmez.
Actuator line AL veya ALM	Dönen çizgiler üzerindeki kesitsel kuvvetler CFD ağına yumuşatılarak dağıtılır.	Kanat geçişi ve iz dinamiği; çoğunlukla LES, ayrıca URANS. Kanat sınır tabakası çözülmez; çekirdek/ağ hassasiyeti vardır.
Actuator surface AS veya ASM	Kuvvetler çizgi yerine yaklaşık kanat yüzeyine dağıtılır.	Veter boyunca yük dağılımını daha ayrıntılı temsil eder; gerçek duvar çözümü değildir.
Kanat geometrisini çözen CFD	Kanat yüzeyi, yakın duvar ağı, basınç ve viskoz gerilmeler; gerekirse kule ve nacelle.	Profil/kanat tasarımı, stall, yüzey basıncı. Hareketli ağ ve çok sayıda hücre nedeniyle büyük tarlada maliyetli.

BEM için kritik girdiler: Reynolds sayısına ve hücum açısına uygun kaldırma/sürüklenme polarları, uç/kök kaybı, yüksek indüksiyon ve dönme düzeltmeleri. Dinamik stall ile dinamik indüksiyon aynı olgu değildir: ilki profil ayrılması ve kuvvet gecikmesini, ikincisi izin yük değişimine gecikmeli tepkisini modeller. [1, 2]

Düşey eksenli türbinler için çift çoklu akım tüpü (DMS/DMST), actuator cylinder, serbest girdap ve AL/kanat CFD yöntemleri kullanılır. Çevrimsel hücum açısı, dinamik stall ve kanadın kendi izinden geçişi özellikle önemlidir. Panel yöntemi için DUST ve Vortexje; serbest girdap için OLAF ve QBlade incelenebilir. [6, 11]

Kaynaklar [DMS ve actuator cylinder](#) • [AL yumuşatma düzeltmesi](#) [5]

2 RANS URANS DES ve LES karşılaştırması

RANS ailesi türbülansın etkisini kapanış modelleriyle temsil eder. LES büyük enerji taşıyan girdapları çözer ve küçük ölçekleri modeller. DES ailesi bu yaklaşımları bölgesel olarak birleştirir. Rotor temsili, hesap alanı ve çözülmek istenen zaman ölçeği seçilmeden maliyet sıralaması kurulamaz. [3–5]

Yöntem	Uygun araştırma sorusu	Sınır ve maliyetin kaynağı
Kararlı RANS	Ortalama hız alanı, arazi/topografya, türbin güç kaybı; AD ile tarla hesapları.	Bütün türbülans modellenir. İz yayılması ve toparlanma kapanışa duyarlıdır; anlık salınım yoktur.
URANS	Kanat dönüşü, kule gölgesi, işletme geçişleri, periyodik yük ve yakın iz.	Zamana bağlı ortalama denklemler çözülür. Zamana bağlılık, gerçek türbülans spektrumunun çözüldüğü anlamına gelmez.
DES DDES IDDES	Ayrılmış akış, stall, kanat/kule çevresi ve yakın izde büyük girdaplar.	Duvar çevresi RANS, uygun çözünürlükte LES davranışı. Ağ ile model geçişi ve gri bölge dikkat ister.
LES	İz salınımı, birleşme, türbülans taşınımı, atmosferik kararlılık, tarla kontrolü.	Giriş türbülansı, geniş alan, ince ağ, küçük zaman adımı ve yeterli istatistik süresi gerekir.
DNS	Temel türbülans fiziği ve küçük ölçekli ideal problemler.	Bütün türbülans ölçeklerini çözer. Gerçek boyutlu türbin/tarla için pratik bir mühendislik seçeneği değildir.

Akış modeline ek olarak seçilecek ayrıntılar

$k-\epsilon$ ailesi, özellikle atmosferik ortalama akış ve disk modellerinde; $k-\omega$ SST, kanat sınır tabakası ve ters basınç gradyanında sık kullanılan başlangıç seçenekleridir. Reynolds gerilme modelleri de vardır. Seçim veriyile doğrulanmalıdır; bir türbülans modelinin her iz ve ayrılma koşulunda üstün olduğu varsayılmaz. LES'te alt ağ modeli ve duvar yaklaşımı da ayrı tercihlerdir. [3, 4]

Dönme için MRF veya frozen rotor kararlı bir referans çerçevesi yaklaşımıdır; sliding mesh, overset ya da immersed boundary yöntemleri hareketi/geometriyi ele alır. Bunlar RANS/LES'in alternatifi değildir. Yakın duvar y^+ hedefi, duvar fonksiyonu veya duvara kadar çözüm tercihinin göre belirlenir; her çözücüye aynı y^+ kuralı uygulanmaz.

Kalite ve maliyet sıralaması nasıl okunmalı

Aynı geometri ve benzer çözünürlükte RANS → URANS → hibrit RANS/LES → LES yönünde maliyet çoğunlukla artar. Ancak kanatları çözen URANS, disk kullanan bir LES'ten pahalı olabilir. İnce ağla hesaplanmış bir ortalama güç sonucu, iz spektrumu veya yorulma yükü için doğrulanmış sayılmaz. [3, 4, 7]

Örnek kanıt: Weihing ve arkadaşlarının MEXICO rotorunda stall koşulu karşılaştırmasında URANS ortalama hız kaybını yakalarken uç girdabı boyutunu fazla tahmin eder; DES daha ayrıntılı iz gelişimi verir. Bu bulgu, URANS'ın her koşulda yetersiz olduğunu değil, seçilen çıktıya göre değerlendirilmesi gerektiğini gösterir. [3]

Kaynaklar [URANS ve DES karşılaştırması \[3\]](#) • [RANS ve kararsız atmosfer \[4\]](#)

3 İz akışı ve kalabalık rüzgâr tarlaları

İz akışı (wake), rotorun momentum çekmesiyle oluşan hız kaybını, dönmeyi ve ek türbülansı içerir. Yakın izde kanat/uç girdapları ve nacelle; uzak izde atmosferle karışım ve diğer izlerle birleşme öne çıkar. Bu bölgelerin sınırı sabit bir rotor çapı değildir; yükleme, türbülans ve kararlılıkla değişir. [4, 5, 7]

Model ailesi	Büyük tarlada kullanım	Dikkat edilecek nokta
Jensen veya Park	Hızlı yerleşim, yıllık enerji ve çok sayıda rüzgâr yönü hesabı; idealize yayılma ve hız kaybı.	Top hat profil ve ampirik büyüme; kısmi iz ve karmaşık akış için sınırlar.
Gaussian ve türevleri	Bastankhah/Niayifar türü profiller, yaw sapması ve güç optimizasyonu.	Yakın iz, ek türbülans, iz birleştirme ve sapma modeli sonucu değiştirir.
TurbOPark ve küme modelleri	Uzun mesafeli izler, büyük offshore tarlalar ve tarla kümeleri.	Yayılma/karışım kabulleri ve atmosferik kararlılık kalibrasyonu önemlidir.
Fuga ve doğrusal modeller	Doğrusallaştırılmış RANS tabanlı hızlı saha/tarla hesabı.	Tam doğrusal olmayan RANS çözümüyle aynı değildir; yüksek yaw ve karmaşık durumlarda doğrulama gerekir.
Ainslie türü modeller	Basitleştirilmiş parabolik akış denklemleri ve girdap viskozitesiyle iz toparlanması.	Karışım kapanışı ve yakın iz başlangıcı önemlidir; DWM içinde de kullanılabilir.
DWM ve FAST.Farm	Dynamic Wake Meandering: büyük atmosferik hareketlerle iz salınımı; türbin yükleri ve kontrol.	Salınım ve toparlanma modellenir; tüm türbülans alanını LES gibi çözmez.
RANS veya URANS + AD/AL	Arazi, ortalama etkileşim, kısmi iz ve seçilmiş geçici durumlar.	Hücre sayısı ve kapanış bağımlılığı artar; atmosferik giriş profili tutarlı olmalı.
LES + AD/AL	İz birleşmesi, büyük ölçekli türbülans, blokaj ve kontrol fiziği.	Paralel hesap, yeterli ön akış gelişimi ve uzun örnekleme gerekir.
Mezoölçek ve toplulaştırma	WRF türü tarla parametreleştirmesi; top down modeller ve actuator farm ile küme/bölge etkisi.	Tek kanadın yükünü çözmez. Bölgesel atmosfer ile türbin ölçeği arasındaki aktarım doğrulanmalı.

Kalabalık tarlada pratik iş bölümü: mühendislik modelleriyle çok sayıda yerleşim/yaw senaryosu taranır; kritik yönler RANS veya LES ile, dinamik yükler FAST.Farm gibi araçlarla incelenir. Tek bir yüksek çözünürlüklü hesap, tüm yıllık rüzgâr dağılımının yerini tutmaz. Türbin sayısından başka alan büyüklüğü, iz uzunluğu ve işletme süresi de maliyeti belirler. [7–9]

Belirleyici fizik: rüzgâr kesmesi ve yönün yükseklikle dönmesi, türbülans şiddeti, termal kararlılık, yüzey pürüzlülüğü, arazi, blokaj ve komşu tarlalar. İzlerin doğrusal veya kareler toplamıyla birleştirilmesi farklı sonuç verir. Kontrolde yalnız toplam güç değil, aşağı akım yükleri ve yön belirsizliği de değerlendirilir. [7–9]

Veri tabanlı vekil modeller, POD/DMD, sinir ağları ve hibrit fizik–veri yaklaşımları optimizasyonu hızlandırabilir; CFD veya ölçümle eğitilir. Eğitim dışındaki yerleşim, atmosfer ve kontrol koşulları için doğruluk ayrıca test edilmelidir. Bunlar bağımsız bir fizik doğrulamasının yerine geçmez. [9]

Literatür örneği: 2026’daki IEA 22 MW karşılaştırmasında DWM ile ortalama güç tahmini başarıyla izdeki türbinin kule tabanı yorulma yüklerinde belirgin sapma görülür. Bu sonuç belirli model ve koşullara aittir; güç doğrulamasının yük doğrulamasını tamamlamadığını gösterir. [7]

4 Güç üretimi jeneratör ve elektrik şebekesi

Aerodinamik güç, şaft gücü, jeneratör çıkışı ve şebekeye verilen net güç farklı büyüklüklerdir. Rotor hesabını elektrik üretimine bağlamak için işletme noktası, tahrik kayıpları, jeneratör/dönüştürücü verimi, iç tüketim ve tarla toplama şebekesi kayıpları gerekir. Temel ilişkiler:

$$P_a = \frac{1}{2} \rho A U^3 C_p(\lambda, \beta); \quad \lambda = \frac{\Omega R}{U}$$

$$T = \frac{1}{2} \rho A U^2 C_T; \quad P_a = Q_a \Omega$$

$$P_{\text{net}} \approx \eta_{\text{aktarma}} \eta_{\text{gen}} \eta_{\text{konv}} P_a - P_{\text{diğer kayıplar}}$$

ρ hava yoğunluğu, A süpürme alanı, U referans rüzgâr hızı, Ω rotor açısal hızı, R yarıçap, β pitch açısı, Q_a aerodinamik tork, T itki, C_p güç ve C_t itki katsayısıdır. Hızın ve alanın referansı yöntemler arasında aynı tanımlanmalıdır. Net güç bağıntısı kararlı enerji muhasebesidir; hızlanma sırasında atalet ve kontrol dinamiği de gerekir.

Elektrik sorusuna göre model düzeyi

Düzye	Ne hesaplanır	Tipik araçlar
Güç eğrisi ve AEP	Hız/yön olasılıklarıyla yıllık enerji; iz, kullanılabilirlik, kısıntı ve elektrik kayıpları.	PyWake, FLORIS, WAsP, windPRO, WindFarmer
Tork ve hız sistemi	Rotor–şaft–jeneratör, MPPT, pitch, başlatma/durdurma; güç ve mekanik yük.	OpenFAST + ROSCO, Bladed, HAWC2, Simulink
Güç akışı ve RMS	Gerilim, reaktif güç, kablo/trafo yüklenmesi; şebekenin daha yavaş dinamik kararlılığı.	PowerFactory, PSS®E, OpenIPSL; windPRO eGRID ile şebeke/kayıp hesabı
dq ve EMT	Makine/dönüştürücü kontrolü, arıza geçicileri, koruma ve güç kalitesi; uygun ayrıntıda harmonikler.	PSCAD, Simscape Electrical, PowerFactory EMT
Elektromanyetik ve termal FEM	Jeneratör geometrisi, akı, moment dalgalanması, bakır/demir kayıpları ve sıcaklık.	Ansys Maxwell/Motor CAD ve eşlenik termal/yapısal çözümler

Jeneratör sınıfları: Tip 1 sabit hıza yakın asenkron; Tip 2 değişken rotor dirençli asenkron; Tip 3 kısmi güçlü dönüştürücülü çift beslemeli asenkron (DFIG); Tip 4 tam güçlü dönüştürücü arayüzüdür. Tip 4 sıklıkla kalıcı mıknatıslı senkron jeneratörle (PMSG) kullanılır, fakat yalnız PMSG anlamına gelmez. Şebeke modeli dönüştürücü ve kontrol ayrıntısıyla birlikte seçilir. [10]

Kontrol ve enerji: anma altı bölgede MPPT için tork/hız; anma üstünde pitch ile güç/hız sınırlaması; ayrıca yaw, kısıntı, aktif ve reaktif güç kontrolü incelenir. AEP, rüzgâr hızı ve yönü dağılımına göre net gücün yıllık toplamıdır. C_p artışı, kayıplar ve kullanılabilirlik hesaba katılmadan aynı oranda net enerji artışı sayılmaz. [10, 12]

OpenFAST’ın ServoDyn modülü tork, kontrol ve jeneratörün sadeleştirilmiş temsillerini içerir. Elektrik gücü çıktısı vermesi, ayrıntılı dönüştürücü anahtarlaması veya şebeke arızasını kendiliğinden çözdüğü anlamına gelmez. Arızada şebekede kalma (FRT), zayıf şebeke ve harmonik soruları için uygun elektrik modeliyle eş benzetim gerekebilir.

Kaynaklar [ServoDyn giriş ve jeneratör modelleri](#) • [Şebeke türbin modelleri](#) [10]

5 Yapısal dinamik yükler ve genel türbin analizi

Bir türbin tasarımını değerlendirmek, ortalama gücü hesaplamaktan daha geniştir. Esnek kanat ve kule, kontrol tepkisi, tahrik hattı ve dış yükler birbirini etkiler. Aeroelastik çözüm bu geri beslemeyi taşır; yüzer türbinde dalga, platform ve bağlama sistemi de eklenir. [12–14]

Analiz konusu	Yöntem ve çıktı	Kontrol edilmesi gereken nokta
Statik dayanım ve burkulma	Kiriş/kabuk/katı sonlu elemanlar; gerilme, sehim, kompozit hasar ve burkulma.	Malzeme anizotropisi, bağlantı bölgeleri, yük aktarımı ve yerel ağ.
Modal ve aeroelastik kararlılık	Özdeğer, mod şekli, sönüm ve Campbell diyagramı; lineerleştirme ve zaman simülasyonu.	1P ve kanat geçişi uyarımları, kontrol etkileşimi, rezonans ve flutter riski.
Ekstrem ve yorulma yükleri	Zaman serileri, rainflow sayımı, Miner birikimi ve hasar eşdeğeri yük (DEL).	DEL tek başına ömür değildir; S–N eğrisi, ortalama gerilme ve ömür boyunca olay olasılığı gerekir.
Tahrik hattı ve yataklar	Burulma veya çok cisimli dinamik; dişli/yatak yükleri ve geçici tork.	Basit tek atalet modeli, ayrıntılı diş temasını ve yatak ömrünü temsil etmez.
Deniz üstü ve yüzer türbin	Hidrodinamik, platform hareketleri, bağlama, kule/temel ve zemin etkileşimi.	Dalga–rüzgâr eşzamanlılığı; hareketli rotorun iz ve kontrol tepkisi.
Gürültü ve çevresel etkiler	Yarı ampirik aeroakustik veya CFD akustiği; buzlanma/erozyon, yıldırım ve termal analiz.	Gürültü yayılımı, yüzey pürüzlülüğü ve hasar koşulları için özel modeller/veriler gerekir.

OpenFAST bu bütünün neresindedir

OpenFAST, modülleri eşleyerek zaman alanında aero–hidro–servo–elastik türbin tepkisini hesaplar. AeroDyn aerodinamik kuvvetleri, ElastoDyn/BeamDyn yapısal hareketi, ServoDyn kontrol ve tahrik etkilerini; uygun kurulumda HydroDyn, SubDyn ve MoorDyn hidrodinamik, taşıyıcı yapı ve bağlama etkilerini sağlar. Tipik çıktılar güç, rotor hızı, pitch, kanat kök momentleri, kule yükleri ve platform hareketleridir. [12]

OpenFAST + BEM hızlı yük/işletme çalışmaları için güçlü bir başlangıçtır. AeroDyn’in OLAF serbest girdap seçeneği rotor izi ve geçici aerodinamiğe daha fazla ayrıntı getirir; bunun kullanımı otomatik olarak panel hesabı anlamına gelmez. FAST.Farm ise tek türbin modellerini tarla iz etkileşimiyle birleştirir. Ayrıntılı yerel kanat gerilmesi için ayrı FEM modeli gerekebilir. [2, 12, 13]

Doğrulamada güç kadar yük de ölçülmeli

Profil rüzgâr tüneli verileri, MEXICO/DanAero gibi rotor deneyleri, lidar/PIV/anemometre ölçümleri, SCADA ve gerinim ölçümleri farklı büyüklükleri doğrular. SCADA ortalamaları tek başına hızlı yük dalgalanmalarını doğrulamaz. Tam ölçekli saha ile model deneyinde Reynolds sayısı, giriş türbülansı ve ölçüm belirsizliği karşılaştırılmalıdır. [1, 3]

Yapısal tasarım yük durumları için IEC 61400-1; güç performansının ölçümü için IEC 61400-12-1 temel başvuru çerçeveleridir. Normal işletmeye ek olarak aşırı rüzgâr, başlatma/durdurma, arıza, park ve kontrol olayları amaçla uyumlu seçilmelidir. Tek bir nominal rüzgâr hızı veya kısa örnekleme, tasarım yük değerlendirmesini tamamlamaz. [14, 15]

6 Açık kaynak yazılımlar ve hazır kodlar

Adlar resmî belge veya depoya bağlantıdır. Açık kaynak olması, her modelin hazır doğrulandığı veya her sürümün birbiriyle uyumlu olduğu anlamına gelmez. Aşağıdaki araçlar farklı kapsamları tamamlar; tek bir paketin yerine geçen eşdeğerler değildir.

Araç	Yöntem ve ana kullanım	Kurulum veya kapsam sınırı
OpenFAST	BEM/OLAF + esnek yapı + kontrol; tek türbin güç, dinamik ve yük hesabı.	Referans türbin dosyalarıyla başlanabilir. Şebeke ve ayrıntılı 3B kanat gerilmesi ayrı model ister.
FAST.Farm	OpenFAST türbinleri + dinamik iz modeli; çok türbinli yük, güç ve kontrol.	Giriş rüzgârı, düşük/yüksek çözünürlüklü alanlar ve iz parametreleri hazırlanır.
ROSCO	Referans türbin kontrolörü; pitch, tork, yaw ve ilgili kontrol çalışmaları.	OpenFAST ile doğal başlangıç. Kontrol parametreleri türbin modeline göre ayarlanmalıdır.
WISDEM ve CCBlade	BEM, disiplinler arası türbin tasarımı, boyutlandırma ve maliyet/enerji optimizasyonu.	Ayrıntılı geçici tarla CFD'si değildir; model seviyeleri amaçla eşleştirilmeli.
FLORIS	Mühendislik iz modelleri, tarla gücü ve yaw/işletme optimizasyonu; Python.	Güç/itki eğrileri ve saha koşulları gerekir; kanat yüzeyi veya yorulma alanını çözmez.
PyWake ve TOPFARM	İz modelleri, AEP; TOPFARM ile yerleşim ve tasarım optimizasyonu.	Model kombinasyonu ve iz süperpozisyonu kullanıcı tercihidir; kalibrasyon gerekir.
OpenFOAM ve turbinesFoam	Genel CFD'de RANS/URANS/LES; turbinesFoam actuator line eklentisi.	Ağ, atmosfer, kontrol ve sürüm uyumu kurulmalıdır; hazır sertifikalı tarla paketi değildir.
Kynema SGF	Eski AMR Wind hattı; atmosferik LES ve disk/çizgi rotor temsilleri.	Büyük alan için paralel hesap. Eski yayın/depo adlarıyla güncel kurulum adını eşleştirmek gerekir.
PALM	Atmosferik LES; rüzgâr türbini ve FAST bağlantılı uygulamalar.	Bağlantının FAST sürümü/özellikleri kontrol edilmeli; OpenFAST ile tam uyum varsayılmamalı.
DUST ve Vortexje	Panel/potansiyel akış ve serbest iz araştırmaları; DUST karma temsil ve parçacık izi içerir.	Vortexje genel C++ panel kütüphanesidir. Büyük tarla için kurulum/doğrulama gerekir.
FLOWUnsteady	Julia; parçacık girdap yöntemi ve rotor etkileşimi.	Saf yüzey paneli değildir; atmosferik tarla kullanımının girdileri ayrıca hazırlanır.
WRF	Mezoolçek atmosfer ve tarla parametreleştirilmesi; bölgesel etki.	Rotor/kanat yükünü doğrudan çözmez; mikroölçek modelle eşleme gerekebilir.
OpenIPSL ve OpenModelica	Açık Modelica bileşenleri; fazör alanında güç sistemi dinamiği ve türbin modelleri.	Model/veri hazırlığı gerekir; her şebeke etüdü için hazır doğrulanmış paket sayılmaz.

SOWFA literatürde önemli bir LES aracıdır; eski ana deposu arşivlenmiştir. SOWFA 6 gibi ayrı dalların durumu ayrıca kontrol edilmeli; eski makaledeki kurulum adımları yeni OpenFOAM sürümüne doğrudan taşınmamalıdır. Kaynak kodu açık olan bir aracın bakım durumu da seçim ölçütüdür.

Kaynaklar [SOWFA deposu](#) • [Vortexje deposu](#) • [TOPFARM](#)

7 Ticari ve lisans koşullu yazılımlar

“Ücretli” ile “kapalı kaynak”, “ücretsiz akademik” ile “açık kaynak” aynı şey değildir. Lisans ve modül kapsamı kullanım türüne göre kontrol edilmelidir. Aşağıda fiyat teklifi yerine fiziksel kapsam karşılaştırılmıştır; satın alma bedeli ve akademik koşullar değişebilir.

Yazılım	Ana kullanım	Erişim ve önemli ayırım
Bladed	Aeroelastik türbin yükleri, kontrol, kararlılık ve offshore dinamik.	Ticari DNV ürünü; lisanslı modül kapsamı seçilir. Yük/tasarım iş akışlarına yöneliktir.
HAWC2 ve HAWCStab2	HAWC2 zaman alanında aeroelastik yükler; HAWCStab2 lineer kararlılık ve kontrol.	DTU lisans sözleşmesine bağlı araçlardır; standart açık kaynak paketler gibi değerlendirilmez.
QBlade CE ve EE	BEM, lifting line/free wake, aeroelastik ve yüzer türbin; arayüzlü analiz.	CE akademik lisans koşullu, kaynak erişimli sürümdür. Çoklu türbin kurulumu EE özelliğidir; lisansı ayrıca kontrol edilir.
WAsP	Rüzgâr kaynağı, saha/yerleşim ve enerji; ayrı CFD seçenekleri.	Ticari lisans. Standart WAsP akış modeli, tam CFD çözümü ile aynı değildir.
windPRO	PARK ile enerji/iz; eGRID ile elektrik toplama sistemi ve kayıplar; saha araçları.	Modüler ticari yazılım. eGRID kullanmak ayrıntılı EMT çözümü anlamına gelmez.
WindFarmer Analyst	Tarla yerleşimi, enerji verimi ve iz/blokaj değerlendirmesi.	Ticari DNV ürünü; türbinin ayrıntılı aeroelastik yük çözücüsü değildir.
WindSim	RANS tabanlı CFD rüzgâr alanı, karmaşık arazi, saha ve enerji değerlendirmesi.	Ticari; saha CFD’si ile gerçek kanat yüzeyi CFD’si farklı kapsamlardır.
EllipSys3D	RANS/LES tabanlı türbin ve tarla CFD araştırmaları; PyWakeEllipSys ile bağlantı.	Kapalı kaynak çözücü. PyWake açık kaynak olsa da bu bağlantının çözücüsüne ayrıca erişim gerekir.
Ansys Fluent ve CFX	RANS/URANS, hibrit ve LES seçenekleri; rotor, ayrılma ve akış; Mechanical ile yapı/FSI.	Ticari genel çözücüler. Türbin modeli, ağ ve bağlantılar ayrıca hazırlanır.
Simcenter STAR CCM plus	CFD, hareketli geometri ve akış-yapı etkileşimi; türbin/rotor araştırmaları.	Ticari; hazır çözücü olmak, hazır ve doğrulanmış tarla modeli olmak değildir.
MATLAB Simulink ve Simscape	Kontrol, tahrik, elektrik makinesi/dönüştürücü ve sistem eş benzetimi.	Ticari eklenti lisansları. Basit güç eğrisi örneği, ayrıntılı arıza modeli yerine kullanılamaz.
PowerFactory ve PSS E	Güç akışı ve şebeke dinamiği; PowerFactory’de RMS ve EMT seçenekleri.	Ticari. Kullanılan türbin modeli ve kontrol parametreleri sonuç için belirleyicidir.
PSCAD	EMT, dönüştürücü/şebeke geçicileri, offshore AC/HVDC bağlantıları.	Ticari. Aeroelastik türbin yük hesabını kendi başına karşılamaz.
Ansys Maxwell ve Motor CAD	Jeneratör elektromanyetiği, kayıplar ve termal tasarım.	Ticari. Tarla izinden çok makine tasarımı ve verim/kayıp haritası üretimine uygundur.

Seçimde lisansın yanında hazır örnek/model, dokümantasyon, doğrulama verisi, otomasyon arayüzü, kümeye dağıtım ve ekip deneyimi de değerlendirilmelidir. CFD, aeroelastik ve şebeke yazılımları arasında veri aktarımı çoğu kez ayrı bir mühendislik işidir.

Kaynaklar PSS E • HAWCStab2 • QBlade lisansı • windPRO eGRID

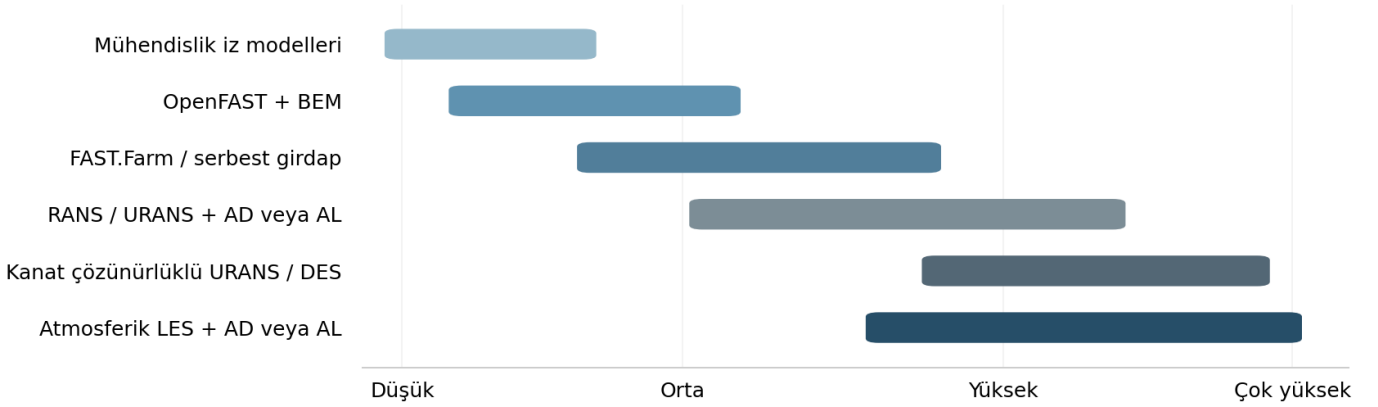
8 Genel karşılaştırma ve proje için yöntem seçimi

Aşağıdaki matriste “güçlü”, yöntemin doğal kullanım alanını; “modele bağlı”, ek alt model veya bağlantı gereksinimini gösterir. Bu bir doğruluk puanı değildir. Elektrik geçicileri için ayrı şebeke modelleri gerekir. Panel, ana proje seçeneği yerine tamamlayıcı karşılaştırma olarak tutulmuştur.

Yaklaşım	Güç ve AEP	Aeroelastik yük	İz fiziği	Yerel yüzey akışı
Mühendislik iz modeli	Güçlü	Sınırlı	Parametrik	Yok
OpenFAST + BEM	Güçlü ¹	Güçlü	İndüksiyon modeli	Polar tabanlı
FAST.Farm	Güçlü ¹	Güçlü	Dinamik model	Polar tabanlı
Lifting line veya panel	Modele bağlı	Bağlantı gerekir	Serbest iz	Temsile bağlı ²
RANS + disk	Güçlü ¹	Sınırlı	Ortalama alan	Kanat yüzeyi yok
URANS + gerçek kanat	Güçlü ¹	FSI’ye bağlı	Geçici ortalama	Güçlü
LES + disk veya çizgi	Güçlü ¹	Bağlantıya bağlı	Güçlü	Kanat yüzeyi yok

¹ AEP için çok sayıda rüzgâr durumu ve olasılık ağırlığı gerekir. ² Panel potansiyel yüzey basıncı verir; lifting line aynı yüzey çözümünü vermez. Ayrılmış viskoz akış için ek yaklaşım gerekir.

Hesap maliyeti için nitel karşılaştırma grafiği



Bantlar ölçülmüş süreleri veya hız oranlarını göstermez. Türbin sayısı, ağ/iz çözünürlüğü, fiziksel süre ve donanımla geniş ölçüde örtüşür. OpenFAST’ın yapısal ayrıntısı, bu grafikteki CFD akış ayrıntısından farklıdır.

OpenFAST ve URANS odaklı önerilen çalışma

Başlangıçta aynı referans türbin için OpenFAST + BEM ile C_p/C_t , güç, rotor hızı ve yükler kurulmalıdır. Aynı işletme noktaları URANS’ta önce rijit rotor ve kontrollü girişle karşılaştırılabilir. Ortalama iz için disk, periyodik kuvvetler için çizgi, ayrılma ve yüzey basıncı için gerçek kanat temsili seçilebilir. Geniş tarla taraması PyWake/FLORES ile, dinamik yük taraması FAST.Farm ile yürütülür; seçilmiş durumlar CFD ile sınanır.

Raporlanacak ölçütler: güç/itki hatası, hız kaybı ve iz genişliği, yük ortalaması ve dalgalanması, DEL, hesap süresi ve bellek. Ağ, zaman adımı, giriş türbülansı, örnekleme süresi ve aynı kontrol ayarları kontrol edilir. OpenFAST–CFD eş benzetimi seçilirse çift sayılan aerodinamik kuvvetlerden kaçınan tutarlı kuvvet/hareket alışverişi kurulmalıdır.

9 Seçilmiş araştırmalar ve başvuru kaynakları

Bu seçki yöntemlerin kapsamını ve sınırlarını izlemek içindir. Yazılım satırları ayrıca resmî belge/depolara bağlıdır. Ürün özellikleri test edilmemiştir. Okuma sırası: rotor modelleri için [1–2], URANS için [3–4], tarla için [7–9], elektrik için [10], uygulama için [12–13].

[1] [Rotor aerodinamik kodlarının saha verisiyle doğrulanması](#) Progress in the validation of rotor aerodynamic codes using field data. Wind Energy Science, 8, 211–230, 2023. BEM, serbest girdap ve CFD karşılaştırma çerçevesi.

[2] [OpenFAST ve QBlade aerodinamik karşılaştırması](#) Is the Blade Element Momentum theory overestimating wind turbine loads? Wind Energy Science, 5, 721–743, 2020. BEM ve lifting line/free wake ile aeroelastik yükler.

[3] [WeiHING ve arkadaşları 2024](#) Near wake development of a wind turbine operating in stalled conditions – Part 1. Wind Energy Science, 9, 933 vd. MEXICO rotorunda URANS ve hibrit yaklaşım karşılaştırması.

[4] [RANS ve atmosferik kararsızlık 2022](#) RANS modeling of a single wind turbine wake in the unstable surface layer. Wind Energy Science, 7, 783 vd. Atmosfer ve rotor kapanışının rolü.

[5] [Actuator line yumuşatma ve uç etkileri 2019](#) A vortex based tip/smearing correction for the actuator line. Wind Energy Science, 4, 369 vd. Kuvvet dağıtım çekirdeği ve indüksiyonun etkisi.

[6] [Ramos García ve arkadaşları 2017](#) Hybrid vortex simulations of wind turbines using a three dimensional viscous inviscid panel method. Wind Energy. DOI 10.1002/we.2126. Panel ve hızlandırılmış iz hesabı.

[7] [Çok düzeyli wake steering karşılaştırması 2026](#) A multi fidelity model intercomparison for wake steering of a large turbine in a conventionally neutral atmospheric boundary layer. Wind Energy Science, 11, 1679 vd.

[8] [Tarla kümeleri için RANS parametreleştirilmesi 2023](#) A new RANS based wind farm parameterization and inflow model for wind farm cluster modeling. Wind Energy Science, 8, 819 vd. Tek tarla ötesindeki ölçekler.

[9] [RANS kalibrasyonlu mühendislik ve vekil modeller 2026](#) Validation of RANS calibrated engineering models and ANN based surrogate for wind farm flow simulation and layout optimization. Wind Energy Science, 11, 2845 vd.

[10] [NREL şebeke modelleme raporu](#) Dynamic Models for Wind Turbines and Wind Power Plants. NREL/SR-5500-52780, 2011. Tip 1–4 türbinler ve sistem düzeyinde dinamik modeller.

[11] [Pinto Ribeiro Casalino ve Ferreira 2023](#) Nonlinear inviscid aerodynamics of a wind turbine rotor in surge, sway, and yaw motions using a free wake panel method. Wind Energy Science, 8, 661 vd.

[12] [OpenFAST ve ROSCO resmî belgeleri](#) Modüler aeroelastik yapı, aerodinamik/servo/yapı modülleri ve kontrol; yazılım tablosundaki ROSCO bağlantısıyla birlikte okunmalı.

[13] [FAST Farm resmî kullanıcı kılavuzu](#) Introduction bölümü: OpenFAST türbin tepkilerinin dinamik iz modeline bağlanması ve tarla çözümünün kapsamı.

[14] [IEC 61400 1](#) 2019 baskısı ve 2025 değişikliği: türbin tasarım gereksinimleri ve yapısal bütünlük çerçevesi. Tam standart metni lisanslıdır.

[15] [IEC 61400 12 1](#) 2022 baskısı: elektrik üreten rüzgâr türbinlerinin güç performansının ölçülmesi. Tam standart metni lisanslıdır.

Değerlendirme: OpenFAST ve URANS rakip paket adları olarak değil, aynı araştırmada farklı soruları yanıtlayan araçlar olarak ele alınmalıdır. İlk yöntem seçimi, hangi büyüklüğün hangi veriyle doğrulanacağına dayanmalıdır.