

4. İzmir Rüzgâr Sempozyumu
28-30 Eylül 2017 - İzmir

**Türbin Kanatlarında Eğilme-Burulma Etkileşimi
Kullanarak Rüzgâr Türbinlerinde Yük Azalımı
Sağlanması**

Özgün Şener, Touraj Farsadi ve Altan Kayran

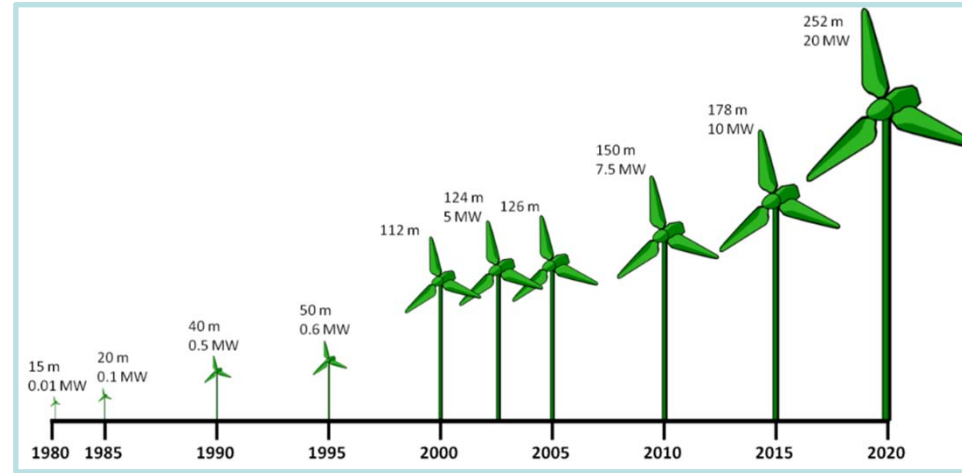
*Rüzgâr Enerjisi Teknolojileri Araştırma ve
Uygulama Merkezi (RÜZGEM)
ODTÜ Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü,
06800, Çankaya
Ankara/Türkiye*

Özet

- Motivasyon
- Giriş
- Rüzgâr türbin modelleri (SWT & PHATAS)
- Rüzgâr türbin kanatlarında eğilme-burulma etkileşimi kullanımının;
 - Türbin sisteminde yük azaltımı
 - Kanattaki azami gerilme
 - Jeneratör gücüüzerindeki etkilerinin incelenmesi
- Sonuç

Motivasyon

- Rüzgâr türbin kanatları, türbin sisteminin en önemli alt yapı elemanlarından biridir
- Yeni jenerasyon türbin kanatları 100 m sınırına yaklaşmıştır



Rüzgâr türbin rotor çaplarının yıllar içindeki artışı

- Kanatların esnemesi nedeni ile meydana gelen yüklerin azaltılması, türbin sistem elemanlarının
 - Yorulma ömrü
 - Güvenilirlik
 - Katılıkhususlarında önem arz etmektedir

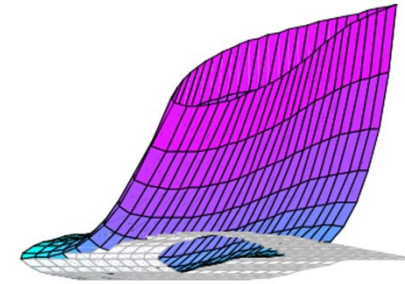


Giriş

- Türbin kanatlarında eğilme ve burulma deplasmanları arasında oluşan etkileşim
- Eğilme-burulma etkileşimi, kompozit malzemelerin anizotropik davranışından faydalanarak meydana getirilir
- Artan rüzgâr hızı ile birlikte, kanat hücum açısını azaltır
- Eğilme-burulma etkileşimi, rüzgâr türbin kanatlarında pasif kontrol mekanizması olarak kullanılır



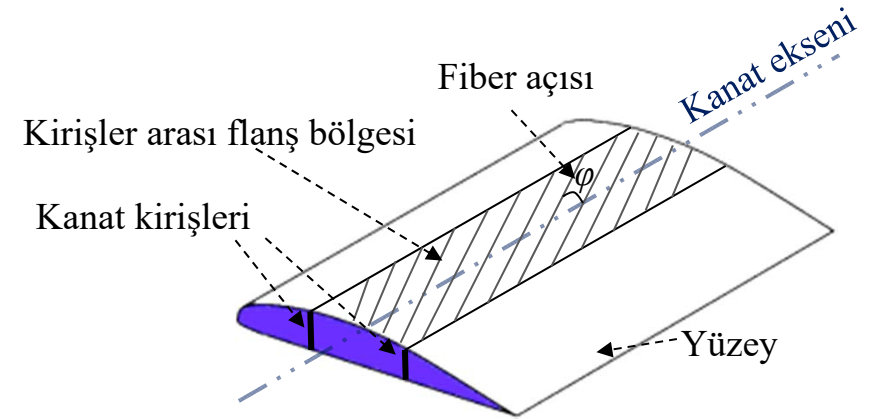
Eğilmeden dolayı oluşan burulma



*Eğilme-burulma etkileşimi –
hücum açısının azalımı*

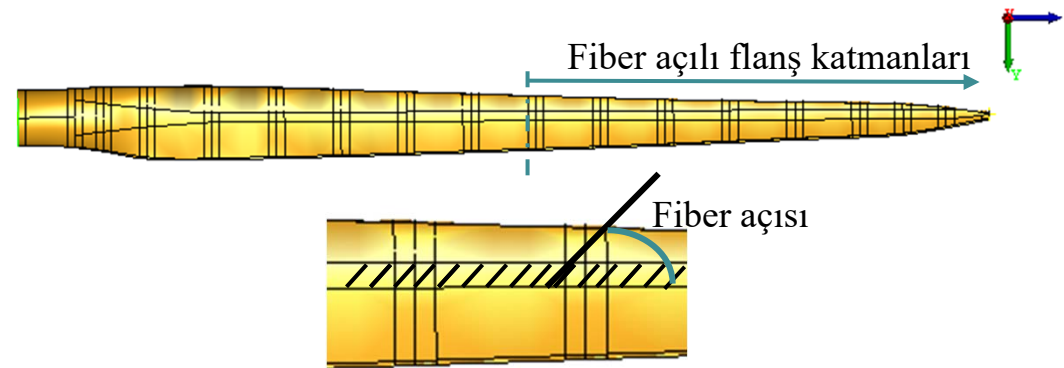
Giriş

- Kompozit katmanların, kanat kirişlerinin arasındaki flanş bölgelerine **tek yönlü** ve **kanat eksenine göre açılı** yerleştirilmesiyle elde edilir
- Dinamik yükler altında çalışan rüzgâr türbin sisteminin yorulma ömrü arttırılabilir ve dolayısı ile önemli bir ekonomik değer elde edilebilir
- Özellikle uzun kanatlara sahip, yüksek güç üreten rüzgâr türbin sistemlerinde pasif yük kontrolü çok önemlidir



Giriş

- Bu çalışmada, **malzeme seçimi** ve **fiber açi konfigürasyonunun**;
 - o Bütün rüzgâr türbinindeki yorulma yükü
 - o Kanatlardaki azami gerilmeler
 - o Jeneratör güç üretimiüzerindeki etkileri incelenmiştir
- Sonuçların güvenilirliği için, rüzgâr türbinleri, **2 farklı çok-kütleli simülasyon kodu** (SWT & PHATAS) ile modellenmiştir



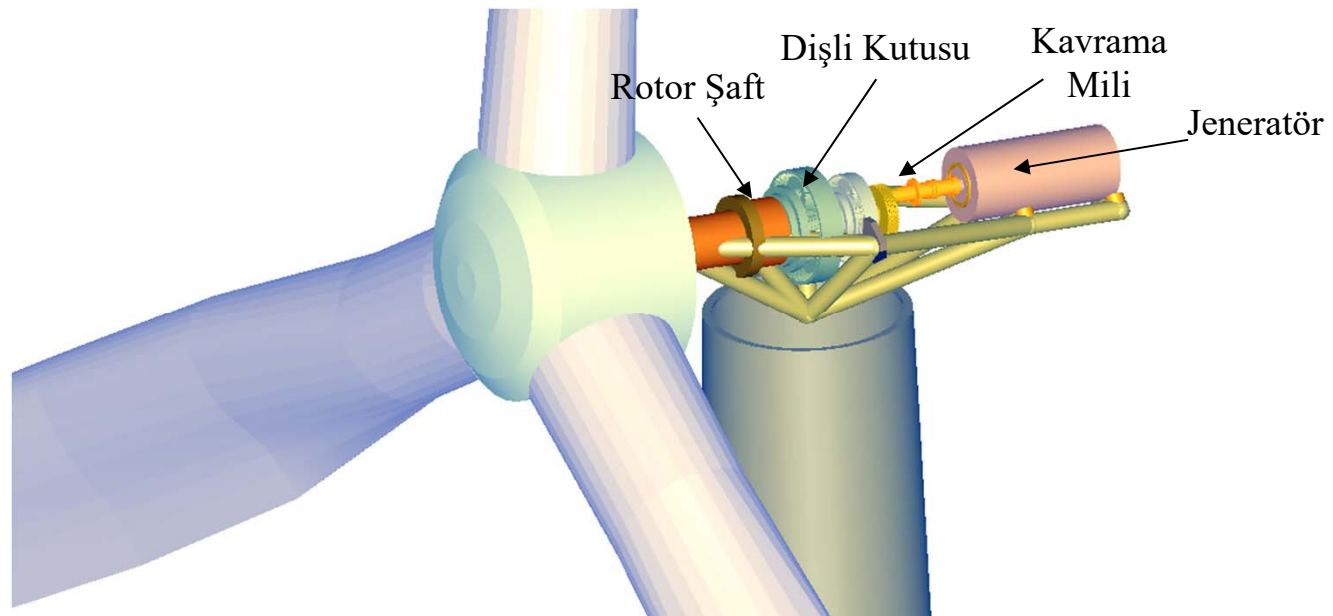
SWT Modeli

- İçeriği:
 - Öneğilmeli süpereleman kanatları (5° rotor eğim açısı)
 - Aktarma organları
 - Kule



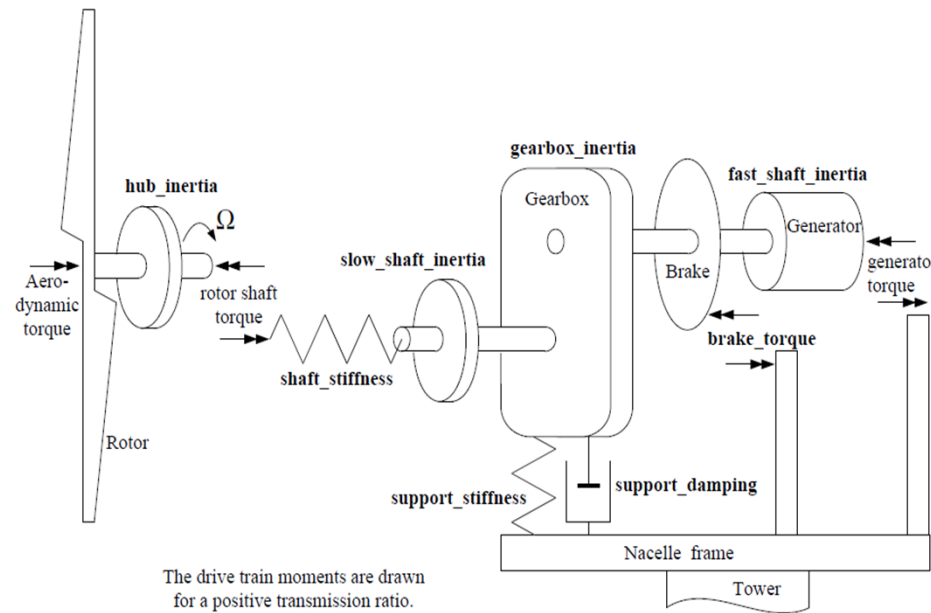
SWT Modeli

- Rotor Şaft
- Dişli Kutusu
- Kavrama Mili (Coupling Shaft)
- Jeneratör



PHATAS Modeli

- Aktarma organı parametrelerinden değiştirilebilir olanlar, kalın karakterlerle belirtilmiştir
- Altyapı eleman tanımlarındaki farklılıklardan dolayı birebir aynı modeli yaratmak imkansızdır



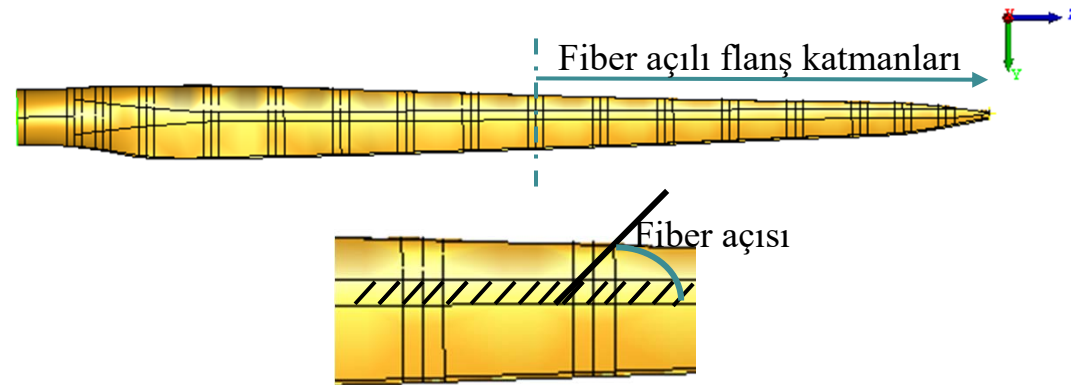
Rüzgâr Türbin Sisteminin Ana Özellikleri

- Esnek çok-kütleli simülasyonlar;
 - 15 m/s ortalama hıza sahip türbülanslı rüzgâr
 - IEC 61400-1’de belirtilen Kaimal türbülans modeli
 - 600 saniyelik analiz koşulları altında gerçekleştirilmiştir

Türbinin ana gücü	5 MW
Kanat sayısı	3
SWT ve PHATAS’taki kanat eleman sayısı	17
Kanadın ucunda verilen ön eğilme	4m
Nominal rotor dönme hızı	12 RPM
Talep edilen jeneratör torku	37880 Nm
Rotor yüksekliğindeki rüzgar hızı	15 m/s
SWT’de türbülanslı rüzgar yaratan kod	TURBSIM
PHATAS’ta türbülanslı rüzgar yaratan kod	SWIFT
Dişli oranı	105
Rotor/Rotor göbek çapı	126 m/4 m
Rotor göbek uzunluğu	4 m
Kanat uzunluğu	61.5 m
Rotor konikliği	0°
Rotor eğim açısı	5°
Kule yüksekliği	98.2 m

Rüzgâr Türbin Kanat Tasarım & Modifikasyonları

- NREL 5MW'lık rüzgâr türbin kanadı yeniden tasarlanmıştır
- **Karbon** ve **cam-elyaf** kompozit malzemeleri, kanat eksenine göre 5° ila 20° arasında değişen açılarla yerleştirilmiştir
- Kanatların kökten itibaren 31.5 metrelik kısmında 0° fiber açılı cam-elyaf kompozit malzeme uygulanmıştır
- Kanatların son 30 metrelik kısımlarında açılı yerleştirilen karbon ve cam-elyaf malzemeleri ile eğilme-burulma etkileşimleri sağlanmıştır



Rüzgâr Türbin Kanat Tasarım & Modifikasyonları

- Tasarlanan 10 adet kanattan, 5 tanesi seçilmiştir
- Referans GFRP_1 kanadı: Ters tasarlanan NREL'in 5MW türbin kanadı

		Kanat İsmi	Tanım
Referans Kanat	Eğilme-Burulma Etkileşimli Kanat	GFRP_1	Kanadın son 30 metresinde ana kanat kirişleri arasındaki flanş bölgesindeki kompozit katmanlardaki elyaf lar kanat eksen i boyunca (0°) yerleştirilmiştir.
		GFRP_2	Kanadın son 30 metresinde ana kanat kirişleri arasındaki flanş bölgesindeki kompozit katmanlardaki elyaf lar kanat eksenine açılı (θ derece) yerleştirilmiştir.
		HGCFRP_2	Referans hibrit cam-karbon elyaf epoksi kanadın (HGCFRP_1) 0° katmanları θ derece yapılmıştır.
		HGCFRP_3	Kanadın son 30 metresinde kanat kirişleri arasındaki flanş bölgesindeki kompozit katman sayıları ayarlanarak, bu kesitlerin kelebekleme eğilme katılıklarının cam elyaf epoksi eğilme-burulma etkileşimli kanadın (GFRP_2) aynı kesitlerinin kelebekleme eğilme katılıkları ile çok yakın olması sağlanmıştır.
		HGCFRP_5	Cam elyaf epoksi referans kanadın (GFRP_1) 0° katmanlarının $2/3$ 'ünün elyaf açıları θ derece yapılmıştır. Cam elyaf epoksi referans kanadın (GFRP_1) 0° katmanlarının $1/3$ 'ü ise karbon epoksi katmanlar ile değiştirilmiş ve katmanların elyaf açıları θ derece yapılmıştır.

Yapısal Performans Değerlendirmesi

- Yorulma Hasarına Eşdeğer Yükler
 - o Kanat kökü
 - o Şaft-dişli kutusu bağlantı noktası
 - o Ana rulmanlar
 - Güç Üretimi
 - Kanatlardaki Azami Gerilmeler
-
- 4 farklı fiber açısı konfigürasyonuna sahip 5 tasarım kanat
 - 6 farklı türbülanslı rüzgâr altında 600 saniyelik zamana bağlı aeroelastik analizler
 - Esnek çoklu kütleli türbin modelinin zamana bağlı aeroelastik analizleri sonuçlarının ortalaması IEC 61400-1 standartlarına uygun olması amacı ile alınmıştır

Yorulma Hasarına Eşdeğer Yük – Tanım

$$P_{ref} = \left(\sum_{j=1}^n \frac{P_j^q m_j}{M_{ref}} \right)^{1/q}$$

P_{ref} = Yorulma hasarına eşdeğer yük

P_j = iç yük

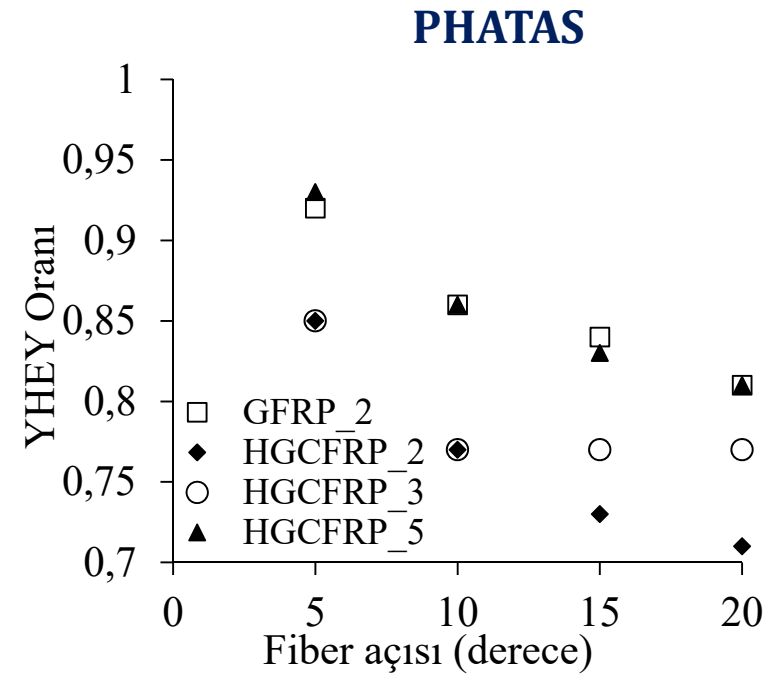
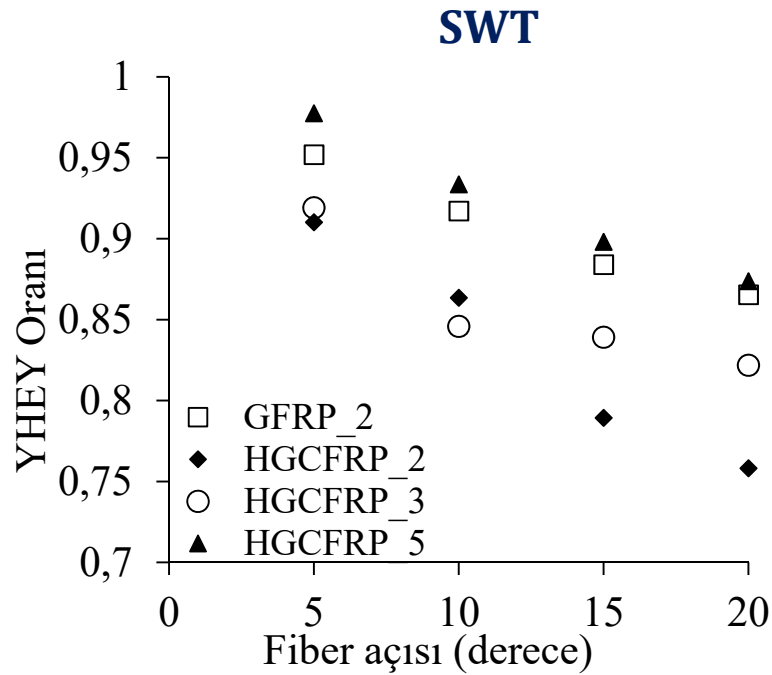
m_j = yorulma çevrim sayısı

M_{ref} = referans çevrim sayısı

q = yorulma üssü

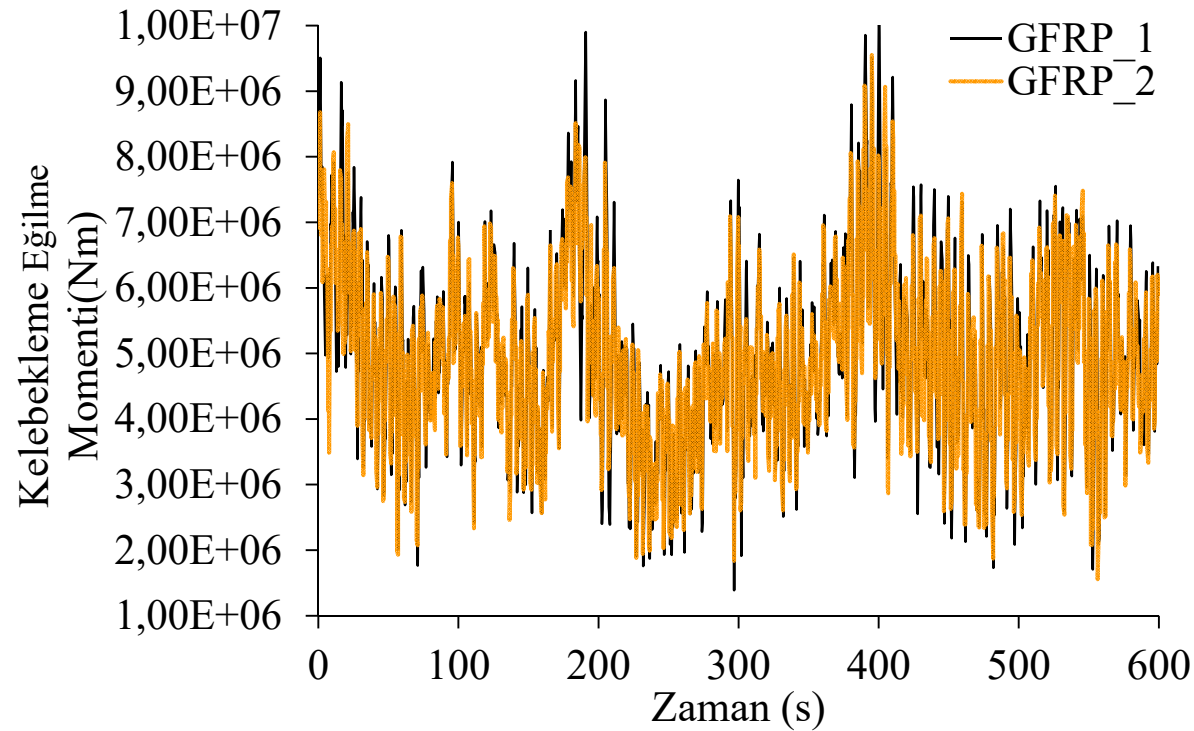
- Yorulma hasarına eşdeğer yük (*Fatigue Damage Equivalent Load*), rüzgâr türbin sistemindeki alt yapı elemanlarının dinamik çevrimsel yükler altında maruz kalacağı malzeme yorulması kaynaklı bozulmasının göstergesidir
- **Yorulma hasarına eşdeğer yüklerde azalma sağlanması yapısal elemanların yorulma ömrünün artması anlamına gelmektedir**

Yorulma Hasarına Eşdeğer Yük – Kanat Kökü



- Oranlar, referans GFRP_1 kanadına sahip rüzgâr türbinine göre sunulmuştur
- Fiber açısı arttıkça YHEY azalmaktadır
- Flanş bölgesinde **karbon malzeme** kullanımı, cam-elyafa göre **daha düşük yorulma yük değerleri** sağlamaktadır

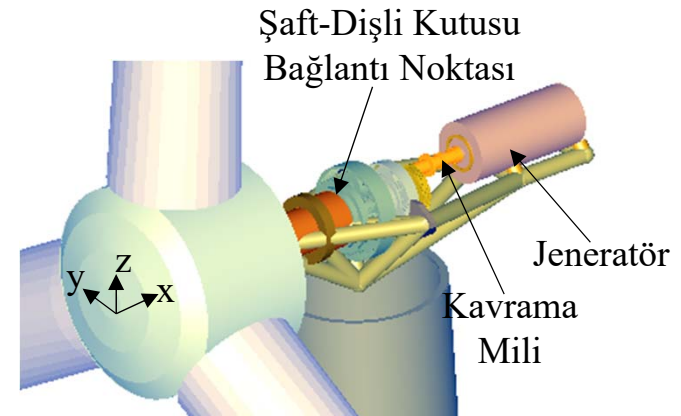
Yorulma Hasarına Eşdeğer Yük – Kanat Kökü



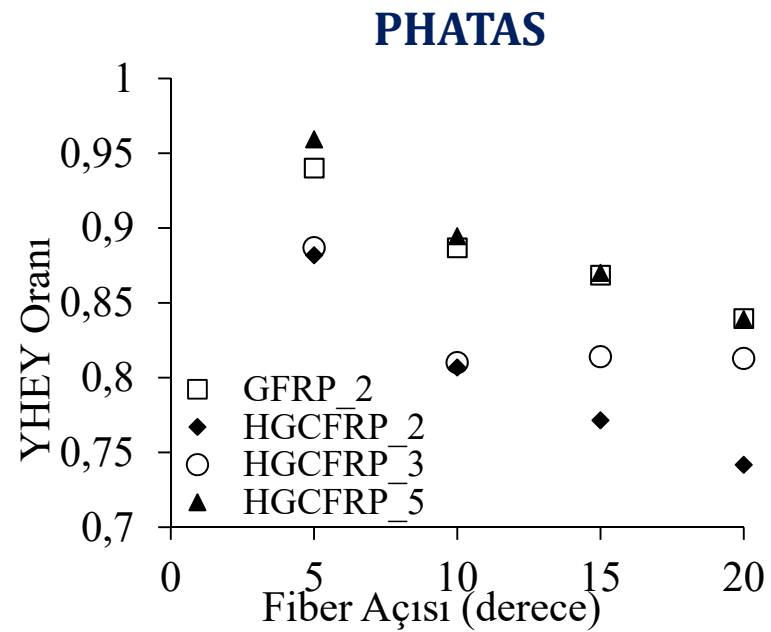
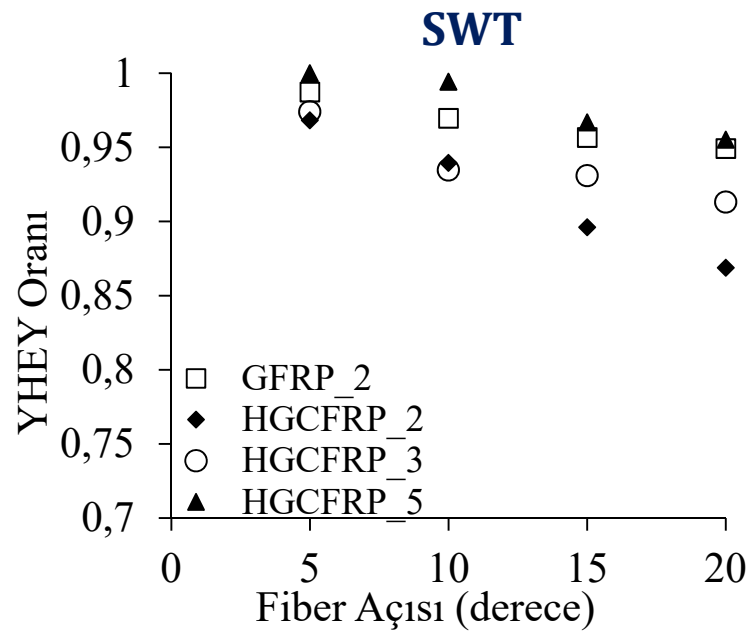
- Benzer zaman serisi
- GFRP_2 kanatlı rüzgâr türbin sisteminde daha küçük lokal maksimum değerleri
 - Daha düşük YHEY değerleri

Yorulma Hasarına Eşdeğer Yük – Şaft-Dişli Kutusu

- Rüzgâr türbinlerinde, dişli kutuları 5 ila 7 yıl arasında değiştirilir
- Kompleks imalat süreci dolayısıyla dişli kutuları yüksek maliyetlidir
- Rüzgâr türbinlerinde başarısızlıkların çoğu dişli kutusunda oluşur
 - Bu noktadaki yorulma yükünü azaltarak, dişli kutusunun ömrü arttırılabilir



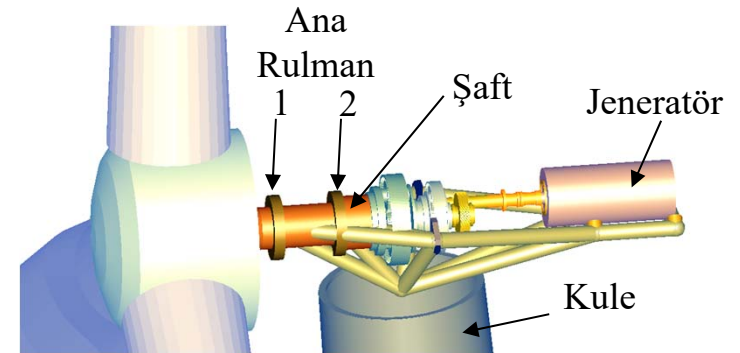
Yorulma Hasarına Eşdeğer Yük – Şaft-Dişli Kutusu



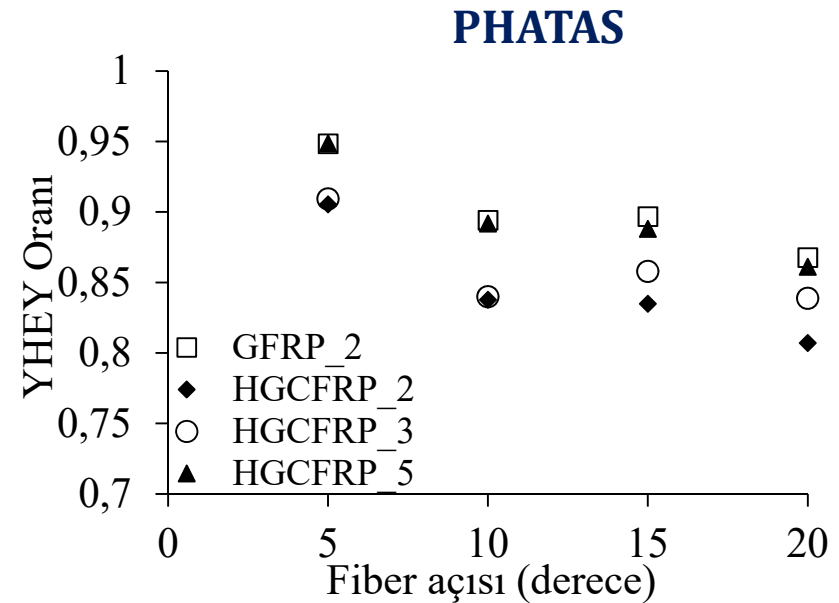
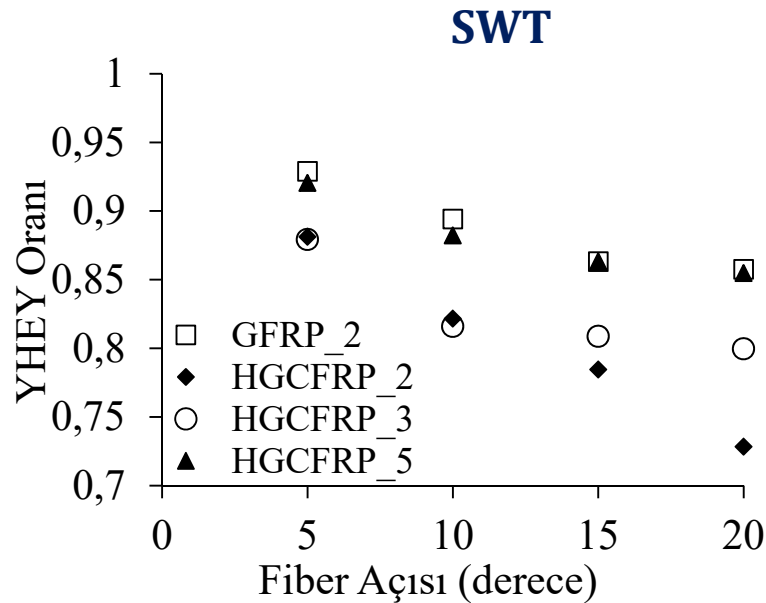
- Artan fiber açısı ile yorulma yükü azalmaktadır
- **Karbon kompozit** kullanımı daha **daha düşük yorulma yük değerleri** sağlamıştır

Yorulma Hasarına Eşdeğer Yük – Ana Rulmanlar

- Dişli kutusu başarısızlıklarının %76'sı rulmanlarda meydana gelen eksenel çatlaklardan dolayı oluşur
- SWT'de tasarlanan türbin modelinde, Ana Rulman 1 eksenel kuvvetleri, Ana Rulman 2 ise yanal kuvvetleri taşır
- PHATAS modelinde ise rulman modellemesi bulunmamaktadır
 - Şafttaki yorulma hasarına eşdeğer yük, dişli kutusunun yorulma ömrünün göstergesidir

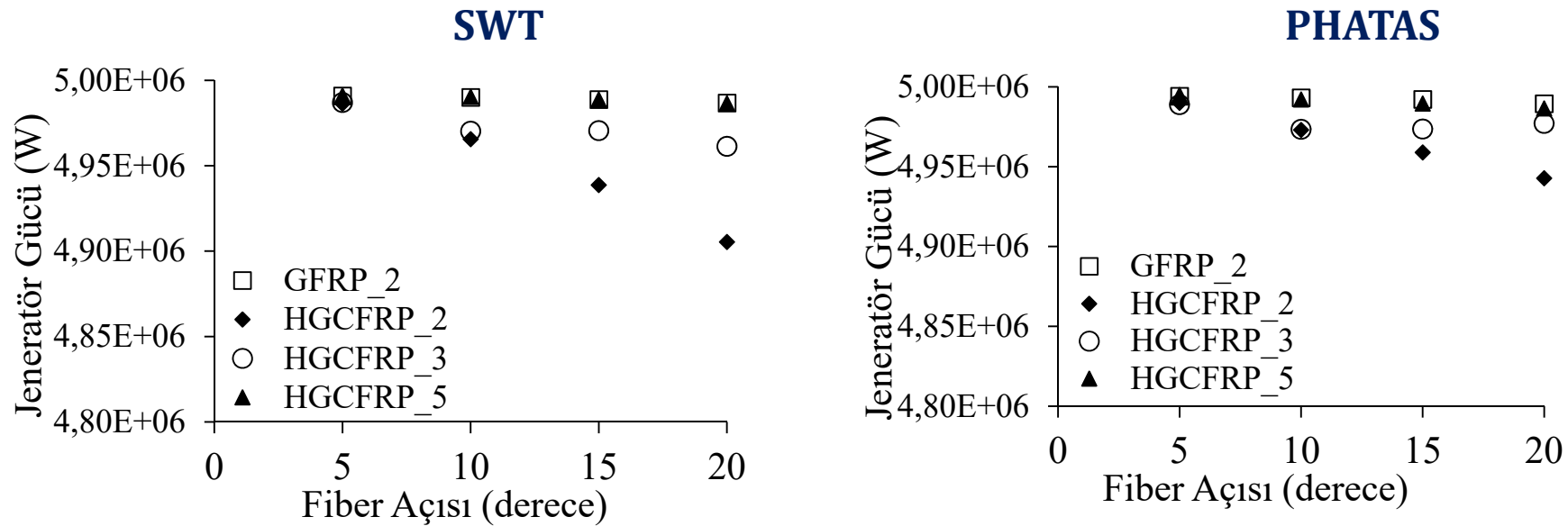


Yorulma Hasarına Eşdeğer Yük – Ana Rulmanlar



- Eğilme-burulma etkileşiminden dolayı, kaldırma kuvvetinde azalma meydana gelmektedir
 - Bu azalmadan dolayı, şaftta ve rulmanlarda aksenal kuvvet düşmüştür
- Karbon malzeme kullanımı ile yorulma yükünde %20-%30 arası düşüş sağlanabilir

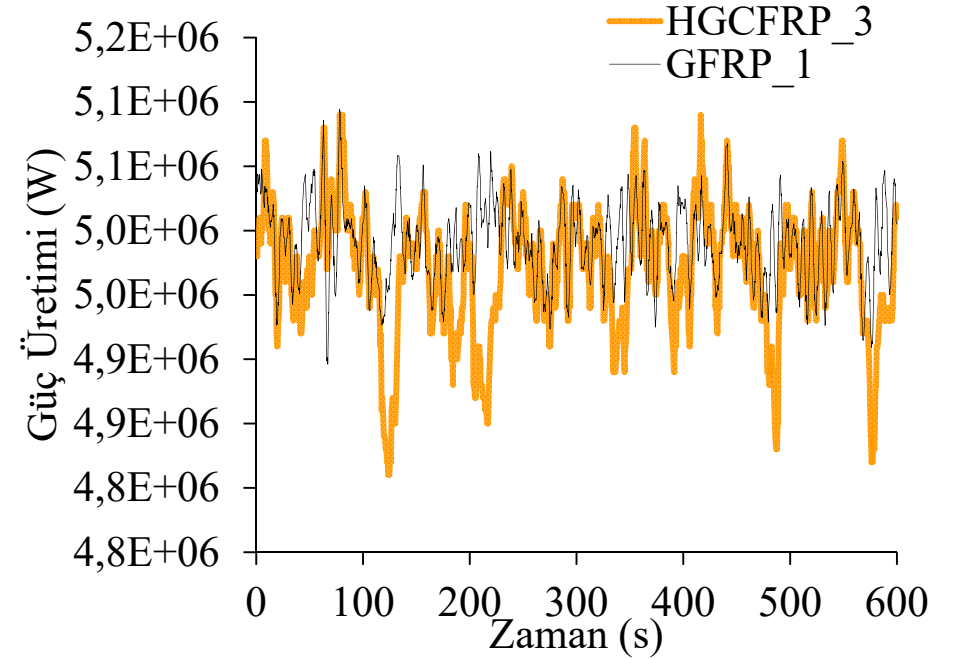
Eğilme-Burulma Etkileşiminin Jeneratör Güç Üretimi Üzerindeki Etkisi



- Fiber açısı arttıkça güç üretimi azalmaktadır
- Kanatlarda **cam-elyaf kullanımı** ile **güç üretiminde azalmanın önüne geçilmiştir**
- **Karbon elyaf** kullanılan kanatlarda güç üretiminde **düşüş daha fazladır**
 - Bu nedenle **düşük fiber açıları** kullanımı tavsiye edilir

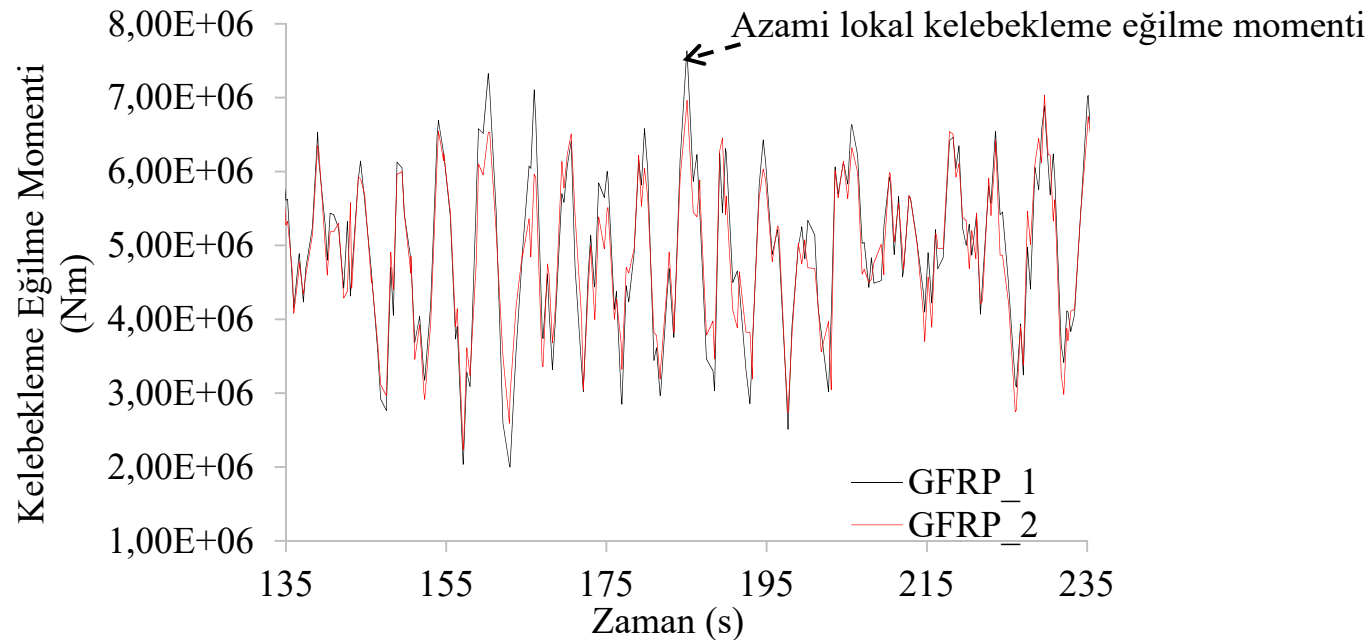
Eğilme-Burulma Etkileşiminin Jeneratör Güç Üretimi Üzerindeki Etkisi

- Türbin sisteminin kontrolcüsü, kanat hatve açısını, 5 MW enerji üretebilecek şekilde kontrol eder
- İki türbin sisteminde de, güç üretimi zaman serisi, HGCFRP_3 kanatlı türbin sistemindeki anlık düşüşler dışında örtüşmektedir
- Bu anlık güç düşüşleri, ortalama güç üretim değerlerinde bir miktar azalmaya yol açmaktadır



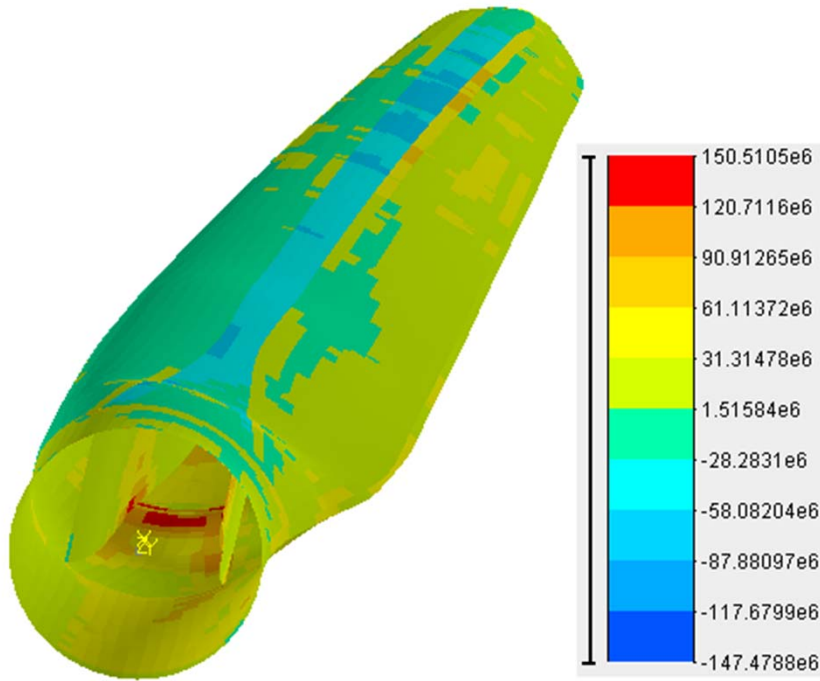
Eğilme-Burulma Etkileşiminin Türbin Kanatlardaki Gerilmeler Üzerindeki Etkisi

- Gerilmeler, Samcef Field yazılımı kullanarak, «Superelement Restitution» ile hesaplanmıştır
 - Bu sayede, orijinal sonlu elemanlar modelinde, gerilmeler hesaplanabilir
- Hesaplamalar, her bir rüzgâr türbin sistemi için azami lokal kelebekleme eğilme momentinin meydana geldiği noktada yapılmıştır

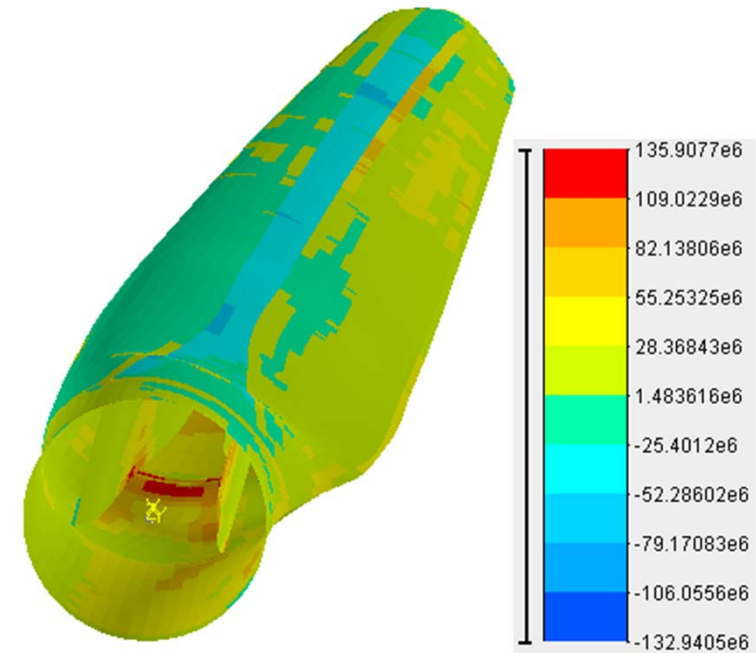


Eğilme-Burulma Etkileşiminin Türbin Kanatlardaki Gerilmeler Üzerindeki Etkisi

GFRP_1 (Referans Kanat)



GFRP_2 (15° Fiber Açısı)



- %9.7 Azalma – DU40 kanat kesidi geçiş bölgesi (Kanat kökünden 8.2 metre uzakta)

Sonuç

- Bu çalışmada, eğilme-burulma etkileşiminin bütün rüzgâr türbin sistemi üzerindeki etkileri incelenmiştir
- Çalışma kapsamında **iki farklı rüzgâr türbin analiz programı** ve **altı farklı rüzgâr profili** altında gerçekleştirilen analizler sonucunda, yorulma hasarına eşdeğer yüklerin güvenilir olduğu değerlendirilmiştir
- Kanatlarda uygulanan eğilme-burulma etkileşiminin, rüzgâr türbini **aktarma organlarında** ve **kanatlarda yük azaltımı** sağlaması ile beraber kanatlardaki **elyaf yönündeki gerilimde düşüşe** yol açtığı görülmüştür

Sonuç

- Tasarlanan etkileşimli kanatlı türbin sistemlerinde, ortalama güç üretiminde bir miktar azalma meydana geldiği görülmüştür
 - Azalmayı önlemek için düşük fiber açılı kompozitlerin uygulanması tavsiye edilir
- Bu çalışmadan çıkartılabilecek sonuç, eğilme-burulma etkileşimi uygulamasının
 - o Bütün rüzgâr türbinindeki yorulma yükü
 - o Kanatlardaki azami gerilmeler
 - o Jeneratör güç üretimihususlarında önemli bir dezavantajı gözlemlenmemiştir