



**FARKLI DİYETSEL KIRKBATIRAN/KETEN
TOHUMU YAĞI ORANLARININ GÖKKUŞAĞI
ALABALIĞI YAVRULARINDA BÜYÜME VE YAĞ
ASİDİ METABOLİZMASINA ETKİLERİ**

Waheedullah MOHMAND

Danışman: Prof. Dr. Murat ARSLAN
Yüksek Lisans Tezi
Su Ürünleri Mühendisliği Ana Bilim Dalı
2025
(Her hakkı saklıdır)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
SU ÜRÜNLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**FARKLI DİYETSEL KIRKBATIRAN/KETEN TOHUMU YAĞI ORANLARININ
GÖKKUŞAĞI ALABALIĞI YAVRULARINDA BÜYÜME VE YAĞ ASİDİ
METABOLİZMASINA ETKİLERİ**

(Effects of Different Dietary Paterson's Curse/Flaxseed Oil Ratios on Growth and Fatty Acid
Metabolism in Juvenile Rainbow Trout)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Waheedullah MOHMAND

Danışman: Prof. Dr. Murat ARSLAN

Erzurum
Eylül, 2025

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Waheedullah MOHMAND tarafından hazırlanan “**Farklı Diyetset Kırkbatıran/Keten Tohumu Yağı Oranlarının Gökkuşaağı Alabalığı Yavrularında Büyüme ve Yağ Asidi Metabolizmasına Etkileri**” başlıklı çalışması 15/09/2025 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Su Ürünleri Mühendisliğı Ana Bilim Dalı, Su Ürünleri Mühendisliğı Bilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Mustafa YILDIZ <i>İstanbul Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Danışman:	Prof. Dr. Murat ARSLAN <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Abdulkadir BAYI <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğı'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. Alper NUHOĞLU
Enstitü Müdürü

Aslı Islak İmzalıdır

Bu çalışma BAP projeleri kapsamında desteklenmiştir.
Proje No: FYL-2025-15729

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Graduate School of Natural and
Applied Sciences

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ REKTÖRLÜĞÜ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak *Prof. Dr. Murat ARSLAN* danışmanlığında sunulan “*Farklı Diyetsetl Kırkbatıran/Keten Tohumu Yağı Oranlarının Gökkuşaağı Alabalığı Yavrularında Büyüme ve Yağ Asidi Metabolizmasına Etkileri*” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	9	30
Kuramsal Temeller	5	30
Materyal ve Metot	10	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	10	20
Sonuçlar ve Öneriler	2	20
Tezin Geneli	13	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5’den büyük olmaması gerekir.

Sunulan bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ettiğimizi beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Waheedullah MOHMAND	Prof. Dr. Murat ARSLAN
18.9.2025	18.9.2025
İmza: Aslı Islak İmzalıdır	İmza: Aslı Islak İmzalıdır

* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun .../.../... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun .../.../... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Akademik eğitim hayatım boyunca her konuda yanımda olan, bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen sayın Prof. Dr. Murat ARSLAN’a

Çalışmalarım boyunca yardım ve desteklerini esirgemeyen çalışma Hocalarım Dr. Şeyda TACER TANAS’a , Dr.Öğr. Üyesi Fatih KORKMAZ’a

Her zaman bana güç veren ve daha çok gayretle çalışmamı sağlayan değerli aile üyelerime sonsuz teşekkür ve şükranlarımı sunarım.

FYL-2025-15729 numaralı projemiz ile destekleyen Atatürk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi’ne teşekkürlerimi sunarım.

Waheedullah MOHMAND

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FARKLI DİYETSEL KIRKBATIRAN/KETEN TOHUMU YAĞI ORANLARININ GÖKKUŞAĞI ALABALIĞI YAVRULARINDA BÜYÜME VE YAĞ ASİDİ METABOLİZMASINA ETKİLERİ

Waheedullah MOHMAND

Danışman: Prof. Dr. Murat ARSLAN

Amaç: Balık yemlerinde kullanılan bitkisel yağlar balık vücudunda özellikle eikozapentaenoik asit (20:5n-3; EPA) ve dokozahegzaenoik asit (22:6n-3; DHA) gibi n-3 uzun zincirli çoklu doymamış yağ asidi (LC-PUFA) miktarlarının büyük ölçüde düşmesine/azalmasına sebep olmaktadır. Gökkuşaağı alabalığının da içinde bulunduğu tatlısu balıkları, bazı bitkisel yağlarda bol miktarda bulunan 18 karbonlu n-3 yağ asitlerini EPA ve DHA'ya dönüştürme kapasitesine sahiptir. Bu kapasite, yemlerde balık yağı kullanmadan da balıklarda belirli seviyelerde EPA ve DHA elde edilmesine imkân sağlamaktadır. Mevcut çalışmada 18 karbonlu n-3 yağ asitlerinden linolenik asit (18:3n-3; LNA) ve stearidonik asit (18:4n-3; SDA) bakımından zengin iki bitkisel yağ (sırasıyla keten tohumu yağı ve kırkbatıran tohumu yağı) gökkuşaağı alabalığı yemlerinde farklı oranlarda kullanılmıştır. Bu diyetel uygulamaların balıkların büyüme, yem değerlendirme ve yağ asidi metabolizmasını nasıl etkilediği tespit edilmiştir.

Yöntem: Çalışmada, diyetel protein (%50) ve yağ (%20) düzeyleri sabit tutularak balık yağı (BY) ile birlikte keten tohumu yağı (KTY) ve kırkbatıran tohumu yağlarını (KBTY) farklı oranlarda içeren beş farklı yem formüle edilmiştir (BY: %100 balık yağı; KTY: %100 keten tohumu yağı; KBTY: %100 kırkbatıran tohumu yağı; KBTY1: %33 kırkbatıran tohumu yağı, %67 keten tohumu yağı; KBTY2: %67 kırkbatıran tohumu yağı, %33 keten tohumu yağı). Besleme deneyi, yarı kapalı devre yetiştiricilik sistemine entegre edilmiş 30 L'lik tanklarda başlangıç ağırlıkları 2,6 g olan gökkuşaağı alabalığı yavrularında 8 hafta süreyle yürütülmüştür. Her tanka 25 balık konulmuş ve çalışma 2 tekerrülü olarak gerçekleştirilmiştir. Balıklar günlük olarak canlı ağırlıklarının %3-4'ü kadar beslenmişlerdir. Deneme süresince su sıcaklığı 15±1 °C, çözünmüş oksijen >7 mg/L olacak şekilde sabit tutulmuştur.

Bulgular: Deneme sonunda balıklar vücut ağırlıklarını 5,1-6 katına çıkarmışlardır. Diyetel uygulamalar büyümeyi önemli derecede etkilemiştir (p<0,05). KTY yemi ile beslenen balıklar diğer yemlerle beslenenlerden önemli derecede düşük büyüme göstermişler, yem değerlendirme katsayısı ise deneysel gruplar arasında önemli bir değişiklik göstermemiştir. Tüm vücut yağ asidi profilleri deneysel uygulamalardan önemli derecede etkilenmiştir (p<0,05). BY grubunda EPA ve DHA gibi n-3 LC-PUFA miktarı daha yüksek bulunurken, yemdeki KTY'nın artışının balıklarda LNA oranını, KBTY artışının ise SDA oranını arttırdığı görülmüştür. Bununla birlikte gerek KTY ve KBTY, gerekse bu iki yağın farklı oranlarda karışımı ile beslenen balıklarda dikkate değer seviyelerde EPA ve DHA gözlenmiştir. Aynı zamanda, hepatik elongaz ve desaturaz gen ekspresyonlarının bitkisel yağlarla beslenen balıklarda, BY ile beslenen gruba göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Sonuç: Erzurum ilinde doğal olarak yetişen kırkbatıran bitkisinden elde edilecek KBTY'nın gökkuşaağı alabalığı yavrularında büyümeyi olumsuz etkilemediği, elongasyon ve desaturasyon sayesinde EPA ve DHA'nın belli derece korunmasını sağladığı görülmektedir. Dolayısıyla KBTY, gökkuşaağı alabalığı balık yemleri için önemli bir potansiyel vaat etmektedir.

Anahtar Kelimeler: Gökkuşaağı alabalığı, *Echium plantagineum*, *Linum usitatissimum*, Büyüme, Yağ asidi profili, Gen ekspresyonu

Eylül 2025, 67 pages

ABSTRACT

MASTER THESIS

EFFECTS OF DIFFERENT DIETARY PATERSON'S CURSE/FLAXSEED OIL RATIOS ON GROWTH AND FATTY ACID METABOLISM IN JUVENILE RAINBOW TROUT

Waheedullah MOHMAND

Supervisor: Prof. Dr. Murat ARSLAN

Purpose: The replacement of fish oil with plant-derived oils in aquafeeds often results in a significant reduction in the levels of n-3 long-chain polyunsaturated fatty acids (LC-PUFAs), particularly eicosapentaenoic acid (20:5n-3; EPA) and docosahexaenoic acid (22:6n-3; DHA), within fish tissues. Freshwater species such as rainbow trout possess the enzymatic capacity to bioconvert 18C n-3 fatty acids, which are abundant in certain vegetable oils, into EPA and DHA. This metabolic capacity allows for the maintenance of appreciable levels of these essential fatty acids in fish even in the absence of dietary fish oil. In this study, two plant oils rich in 18-carbon n-3 fatty acids—flax seed oil, abundant in linolenic acid (18:3n-3; LNA), and paterson's curse seed oil, rich in stearidonic acid (18:4n-3; SDA)—were incorporated at varying proportions into rainbow trout diets. The effects of these dietary interventions on growth performance, feed utilization efficiency, and fatty acid metabolism were subsequently evaluated.

Method: Five experimental diets were formulated with constant levels of crude protein (50%) and lipid (20%), incorporating fish oil (BY), flaxseed oil (KTY), and Paterson's curse seed oil (KBTY) in different ratios (BY: 100% fish oil; KTY: 100% flaxseed oil; KBTY: 100% paterson's curse seed oil; KBTY1: 33% paterson's curse seed oil and 67% flaxseed oil; KBTY2: 67% paterson's curse seed oil and 33% flaxseed oil). The feeding trial was conducted over an 8-week period using rainbow trout fry (initial weight: 2.6 g) reared in 30 L tanks integrated into a semi-recirculating aquaculture system. Each tank was stocked with 25 fish, and treatments were applied in duplicate. Fish were fed daily at a ration corresponding to 3–4% of their live body weight. Throughout the experimental period, water temperature was maintained at 15 ± 1 °C, and dissolved oxygen concentrations were kept above 7 mg/L.

Findings: At the end of the trial, rainbow trout exhibited a 5.1–6-fold increase in body weight. Growth performance was significantly influenced by dietary treatments ($p < 0.05$). Fish fed the flaxseed oil (KTY) diet significantly lower growth compared to the other dietary groups, although feed conversion ratio remained unaffected across treatments. Whole-body fatty acid composition was significantly modulated by dietary lipid sources ($p < 0.05$). The fish oil group retained higher levels of n-3 LC-PUFAs, particularly EPA and DHA, whereas increasing dietary KTY resulted in elevated LNA level in fish, and higher KBTY inclusion enhanced SDA concentrations. On the other hand, appreciable amounts of EPA and DHA were still detected in fish fed KTY, KBTY, or their combinations. Moreover, hepatic expression levels of elongase and desaturase genes were significantly upregulated in fish receiving plant oil-based diets compared to those fed BY.

Results: The findings indicate that KBTY from Paterson's curse, naturally grown in Erzurum province, did not impair growth performance in rainbow trout fry and contributed to the partial retention of EPA and DHA through elongation and desaturation pathways. Accordingly, KBTY emerges as a promising alternative lipid source for rainbow trout feeds.

Keywords: Rainbow trout, *Echium plantagineum*, *Linum usitatissimum*, Growth, Fatty acid profile, Gene expression

September 2025, 67 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
TABLolar DİZİNİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xi
GİRİŞ.....	1
Gökkuşuğı Alabalığı (<i>Oncorhynchus mykiss</i>).....	2
Yetiştiricilik-Yem ilişkisi.....	4
Lipidlerin Balık Beslenmesindeki Rolü	4
Kırkbatıran (<i>Echium plantagineum</i> L.) Hakkında Genel Bilgiler.....	7
Boraginaceae (Hodangiller) familyası	7
Kırkbatıran	8
KURAMSAL TEMELLER.....	11
MATERYAL ve YÖNTEM	19
Denemenin Yürütüldüğü Yetiştiricilik Sistemi.....	19
Balık Materyali.....	19
Kırkbatıran Yağının Elde Edilmesi	20
DeneySEL Yemler.....	20
Deneme Düzeni ve Yemleme	23
Tüm Vücut Proksimet Analizi İçin Örnekleme Süreci	24
Büyüme Parametrelerinin Hesaplanması	25
Proksimet Analizleri.....	25
Ham yağ	25
Ham protein.....	26
Nem ve kuru madde	27
Ham kül.....	28
Yağ Asidi Analizleri	29
Yağ asidi metil esterlerinin hazırlanması.....	29
Yağ asitlerinin tayini	29

Gen Ekspresyon Analizleri	31
Total RNA izolasyonu.....	31
RNA'nın kalitatif değerlendirilmesi	31
RNA'nın kantitatif belirlenmesi.....	31
DNase uygulaması	32
Reverse transkripsiyon (RT-PCR)	32
Kantitatif PCR (qPCR).....	32
Sonuçların Hesaplanması	32
İstatistiksel Analizler.....	33
ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	34
Büyüme Performansı.....	34
Tüm Vücut Proksimet Değerleri	36
Tüm Vücut Yağ Asidi Profili.....	37
SONUÇ VE ÖNERİLER	45
KAYNAKÇA	47
ÖZGEÇMİŞ.....	53

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Dünya genelinde su ürünleri avcılığı ve yetiştiriciliği üretim miktarları (ton/yıl).....	1
Şekil 2. Türkiye’de su ürünleri avcılığı ve yetiştiriciliği üretim miktarları (ton/yıl)	2
Şekil 3. Türkiye’de su ürünleri üretiminin tür bazında yıllara göre yüzdelik dağılımı.....	2
Şekil 4. Gökkuşaağı alabalığı (<i>Oncorhynchus mykiss</i>).....	3
Şekil 5. Balık yem fiyatları (kg/TL).....	4
Şekil 6. n-6 ve n-3 yağ asitlerinin uzama ve doymamış hale gelme (desatürasyon) yolları ile eikosanoidlerin öncülleri. Tocher (2003a)’dan uyarlanmıştır	6
Şekil 7. <i>E. plantagineum</i> L. türünün sistematik hiyerarşisi	8
Şekil 8. <i>E. plantagineum</i> L. türünün Türkiye’de dağılım haritası.....	9
Şekil 9. Kırkbatıran bitkisi	10
Şekil 10. Denemenin sürdürüldüğü yarı kapalı devre su sistemi.	19
Şekil 11. Filtreler, Oksijen konsantratörü.	19
Şekil 12. Kırkbatıran tohumu yağının elde edilmesi.	20
Şekil 13. Deneysel yemlerin hazırlanma sürecinin şematik gösterimi.....	22
Şekil 14. Deneme düzeni: BY: kontrol (%100 balık yağı), KTY0: %100 keten tohumu yağı, KBTY1: %33 kırkbatıran tohumu yağı + %67 keten tohumu yağı, KBTY2: %67 kırkbatıran tohumu yağı + %33 keten tohumu yağı, KBTY3: %100 kırkbatıran tohumu yağı.	24
Şekil 15. Balıkların tüm vücut proksimat analizine yönelik örnekleme süreci.....	24
Şekil 16. Numunelerden toplam yağın elde edilme süreci.....	26
Şekil 17. Protein analizi işlemi.....	27
Şekil 18. Kuru madde miktarının belirlenmesi	28
Şekil 19. Ham kül tayini aşaması.	28
Şekil 20. Yağ asidi metil esterlerinin hazırlanma süreci	29
Şekil 21. Gaz Kromatografi Cihazı (Agilent 6980 (GC/MS)	30
Şekil 22. Sekiz hafta boyunca farklı oranlarda kırkbatıran yağı içeren yemlerle beslenen gökkuşaağı alabalıklarının ortalama son ağırlıkları (ortalama $\pm$ standart sapma). Farklı harflerle gösterilen sütunlar, gruplar arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılık bulunduğunu ifade etmektedir ($p<0,05$).	34
Şekil 23. Farklı oranlarda keten ve kırkbatıran tohumu yağı içeren yemlerle beslenen gökkuşaağı alabalığında LNA (A) , SDA (B) ve DHA (C) değişimi. Sütunlar	

üzerindeki farklı harfler ilgili değerler arasında istatistik olarak fark olduğunu göstermektedir ($p<0,05$).	40
Şekil 24. Farklı oranlarda kırkbatıran tohumu yağı içeren yemlerle 8 hafta boyunca beslenen gökkuşağı alabalığında <i>fads2a</i> (<i>16</i>) mRNA ekspresyo seviyesi. Sütunlar üzerindeki farklı harfler ilgili değerler arasında istatistik olarak fark olduğunu göstermektedir ($p<0,05$).	42
Şekil 25. Farklı oranlarda kırkbatıran tohumu yağı içeren yemlerle 8 hafta boyunca beslenen gökkuşağı alabalığında <i>fads2b</i> (<i>15</i>) mRNA ekspresyon seviyesi. Sütunlar üzerindeki farklı harfler ilgili değerler arasında istatistik olarak fark olduğunu göstermektedir ($p<0,05$).	42
Şekil 26. Farklı oranlarda kırkbatıran tohumu yağı içeren yemlerle 8 hafta boyunca beslenen gökkuşağı alabalığında <i>elovl5</i> mRNA ekspresyo seviyesi. Sütunlar üzerinde harf olmaması istatistik olarak önemli fark olmadığını göstermektedir....	43
Şekil 27. Farklı oranlarda kırkbatıran tohumu yağı içeren yemlerle 8 hafta boyunca beslenen gökkuşağı alabalığında <i>elovl2</i> mRNA ekspresyo seviyesi. Sütunlar üzerindeki farklı harfler ilgili değerler arasında istatistik olarak fark olduğunu göstermektedir ($p<0,05$).	43

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Yem Formülasyonu ve Proksimet Kompozisyonu (%).	21
Tablo 2. Deneysel Yemlerin Yağ Asidi Kompozisyonu (%).	23
Tablo 3. Sekiz Hafta Boyunca Farklı Oranlarda Kırkbatıran Tohumu Yağı İçeren Yemlerle Beslenen Gökkuşuğu Alabalıklarının Büyüme Performans Değerleri (Ortalama $\pm$ Standart Sapma). Aynı Satırda Yer Alan Farklı Harfler, Gruplar Arasında İstatistiksel Olarak Anlamlı Farklılık Olduğunu Göstermektedir ($p<0,05$).	35
Tablo 4. Farklı Oranlarda Kırkbatıran Tohumu Yağı İçeren Yemlerle 8 Hafta Boyunca Beslenen Gökkuşuğu Alabalığında Tüm Vücut Proksimet İçeriği (%) (Ortalama $\pm$ Std Sapma). Değerler Üzerinde Harf Olmaması İstatistik Olarak Önemli Fark Olmadığını Göstermektedir.	36

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

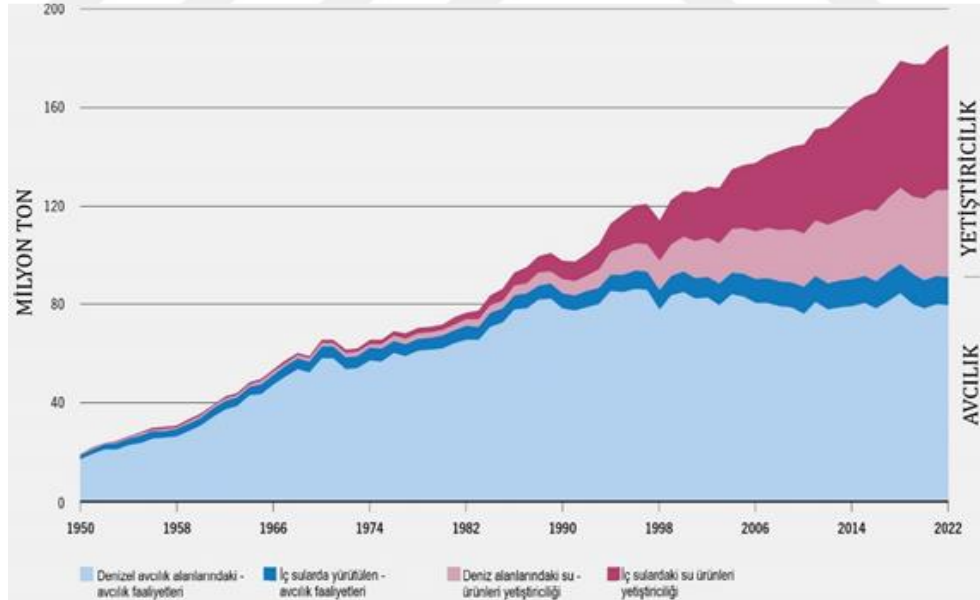
%	Yüzde
°C	Santigrat derece
μ	mikro
BHT	Bütillendirilmiş hidroksi tolüen
DHA	Dokzaheksaenoik asit
dk	Dakika
EPA	Ekozapentaenoik asit
FAME	Yağ asidi metil esteri
FAO	Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü
FID	Alev iyonizasyon dedektörü
GC/MS	Gaz kromatografisi/kütle spektrometresi
Gr	Gram
kg	Kilogram
L	Litre
mg	Miligram
ml	Mililitre
mm	Milimetre
mRNA	Mesajcı RNA
MUFA	Tekli doymamış yağ asidi
n3	Omega 3
n6	Omega 6
NaOH	Sodyum hidroksit
PUFA	Çoklu doymamış yağ asidi
SFA	Doymuş yağ asidi
sn	Saniye
TEPGE	Tarımsal Ekonomi ve Politika Geliştirme Enstitüsü
TK	Tank
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu
~	Yaklaşık
Σ	Toplam
μL	Mikrolitre
14:0	Miristik asit
16:0	Palmitik asit

17:0	Heptadesanoik asit
18:0	Oktadesanoik acit
18:1n-9	Oleik asit
18:2n-6	Linoleik asit
18:3n-3	Linolenik asit
18:4n-3	Stearidonik asit
20:0	Araşidik asit
20:3n-3	Eikosatrienoik asit
20:3n-6	Gama linoleik
20:4n-6	Araşidonik asit
21:0	Heneikosanoik asit
22:0	Dokosanoik asit

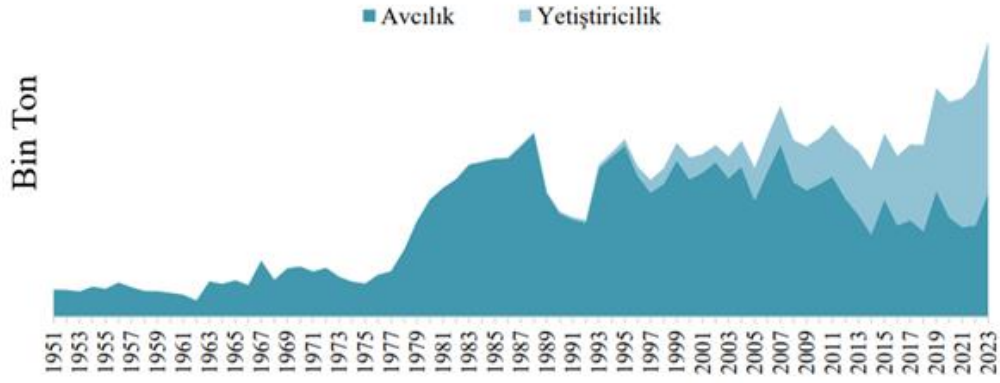
GİRİŞ

Su ürünleri yetiştiriciliği, günümüzde en hızlı gelişen hayvansal gıda üretim alanlarından biri olarak öne çıkmaktadır (Şekil 1). Küresel nüfus artışına bağlı olarak gıda talebinde yaşanan artış, alternatif ve sürdürülebilir üretim yöntemlerinin önemini giderek artırmaktadır. Bu bağlamda akuakültür sektörü, gıda arzının karşılanmasında stratejik bir rol üstlenmiş; sektöre yönelik yatırımlar da belirgin bir şekilde yükselmiştir. Dünya Gıda ve Tarım Örgütü (FAO) raporlarına göre, dünya genelinde akuakültür üretiminin yıllık büyüme oranı ortalama %7-8 düzeyinde seyretmektedir (FAO, 2024).

Dünya genelindeki bu gelişime benzer biçimde, Türkiye’de de su ürünleri yetiştiriciliği dikkate değer bir ivme kazanmıştır (Şekil 2). Ülkemizde akuakültür faaliyetleri hem üretim hacmi hem de teknolojik ilerlemeler açısından istikrarlı bir artış göstermektedir. Mevcut büyüme eğiliminin önümüzdeki yıllarda da sürmesi beklenmekte olup (TÜİK, 2024), bu durum Türkiye’nin su ürünleri sektöründe uluslararası düzeyde rekabet gücünü artırma potansiyeline işaret etmektedir.

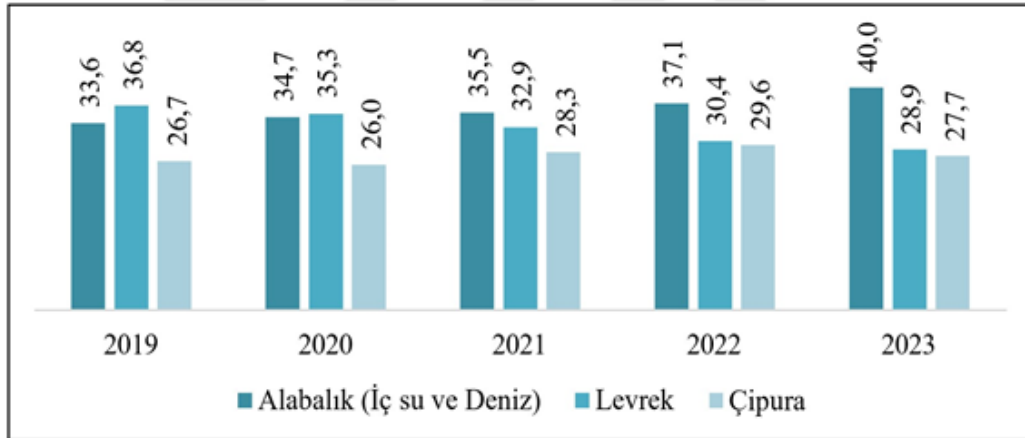


Şekil 1. Dünya genelinde su ürünleri avcılığı ve yetiştiriciliği üretim miktarları (ton/yıl) (FAO, 2024)



Şekil 2. Türkiye’de su ürünleri avcılığı ve yetiştiriciliği üretim miktarları (ton/yıl) (TÜİK, 2024)

Türkiye’de su ürünleri üretiminin yaklaşık %55’i yetiştiricilik faaliyetlerinden sağlanmaktadır. 2023 yılında yetiştiricilik yoluyla elde edilen üretim, bir önceki yıla kıyasla %8,37 artış göstererek 556.287 tona ulaşmıştır. Bu üretimin %72’si denizlerde, %28’i ise iç sularda gerçekleştirilmiştir. Ülkemizde yürütülen yetiştiricilik faaliyetlerinde ise levrek, çipura ve alabalık türleri başlıca üretim kaynaklarını oluşturmaktadır (Şekil 3) (TEPGE, 2024).



Şekil 3. Türkiye’de su ürünleri üretiminin tür bazında yıllara göre yüzdelik dağılımı (TEPGE, 2024)

Gökkuşağı Alabalığı (*Oncorhynchus mykiss*)

Kökeni Kuzey Amerika olan gökkuşağı alabalığı, zamanla yetiştiriciliğinin yaygınlaşmasıyla dünyanın birçok bölgesine adapte olmuş bir türdür. Günümüzde dünya genelinde en fazla kültürü yapılan iç su balıklarından biridir. Terminal tipte bir ağız yapısına sahiptir ve vücudu yanlardan basık bir form gösterir. Damak, çene ve dil bölgelerinde belirgin ve güçlü dişler bulunur. Bu türün ayırt edici morfolojik özelliklerinden biri, ışınsız bir yapı olan adipöz yüzgece sahip olması ve yaşadığı ortama bağlı olarak değişkenlik gösteren beneklerle kaplı olmasıdır (Şekil 4).

Gökkuşağı alabalıkları, bol oksijenli, berrak ve soğuk su kaynakları, akarsular ile göllerde yaşamayı tercih ederler. İç sularda en çok yetiştirilen ve ticari olarak büyük talep gören türler arasında yer alırlar. Etçil (karnivor) bir balık olan bu türün, literatürde cinsel olgunluğa genellikle 2–3 yaşlarında ulaştığı belirtilse de Türkiye koşullarında dişi bireyler ikinci yaşta, erkekler ise birinci yaşta üreme hücreleri üretmeye başlamaktadır. Üreme dönemi genellikle Aralık ile Şubat ayları arasında gerçekleşir. Embriyonik gelişim süreçleri, yaşadıkları suyun sıcaklığına doğrudan bağlıdır. Yumurtalar, 300 gün-sıcaklık derecesi formülüne göre kuluçkadan çıkar (Pennell 1996; Hoitsy vd. 2012).

Bu türün kültür balıkçılığında yaygın olarak tercih edilmesinin başlıca nedenleri şunlardır:

- Çevresel koşullara hızlı uyum sağlayabilmesi ve birçok hastalığa karşı dirençli olması,
- Optimal yaşam sıcaklığı 13–18 °C aralığında olmasına rağmen, 24 °C'ye kadar olan sıcaklıklara ve 5 mg/L üzerindeki düşük oksijen seviyelerine tolerans gösterebilmesi,
- Yumurtadan çıkan yavruların (fry) diğer türlere kıyasla daha iri olması, pelet yeme kolay alışmaları ve yemden verimli şekilde faydalanmaları,
- Dere ve kaynak alabalıklarına kıyasla daha kısa sürede kuluçkadan çıkmaları.

Gökkuşağı Alabalığının Sınıflandırması (Sistematigi):

Şube: Vertebrata (Omurgalılar)

Alt şube: Pisces (Balıklar)

Sınıf: Osteichthyes (Kemikli Balıklar)

Takım: Salmoniformes (Alabalıkgiller)

Aile: Salmonidae (Alabalıklar)

Cins: *Oncorhynchus*

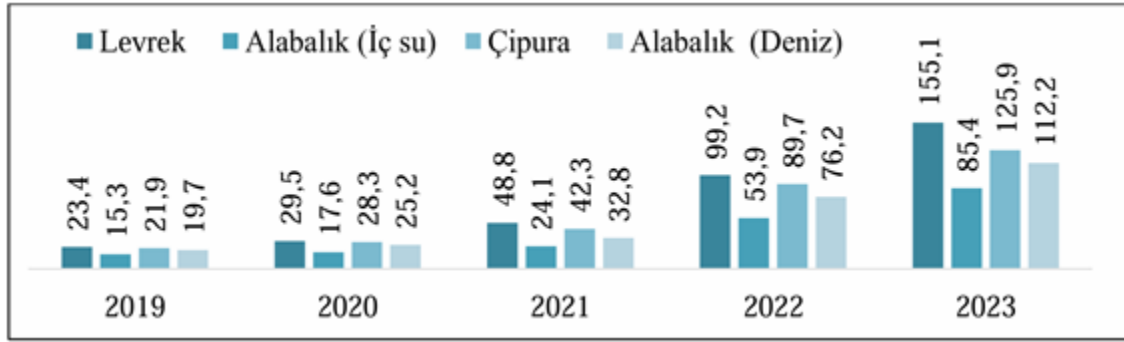
Tür: *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum, 1792)



Şekil 4. Gökkuşağı alabalığı (*Oncorhynchus mykiss*)

Yetiştiricilik-Yem ilişkisi

Su ürünleri yetiştiriciliğinde yaşanan hızlı büyüme, balık yemi sektöründe de benzer şekilde önemli bir gelişmeyi tetiklemiştir. Yetiştiricilikte yem maliyetleri, toplam giderlerin yarısından fazlasını oluşturmakta olup, bu durum yem verimliliğini artırmaya yönelik araştırma ve geliştirme çalışmalarının hız kazanmasına neden olmaktadır. Tarım ve Orman Bakanlığı Gıda ve Kontrol Genel Müdürlüğü'nün 2023 yılına ait verilerine göre, döviz kuru kaynaklı artışlar nedeniyle yem maliyetleri, bir önceki yıla kıyasla alabalık yeminde %64, levrek ve çipura yeminde ise %63 oranında yükselmiştir (Şekil 5). Bu koşullar doğrultusunda, su ürünleri sektörünün yem ihtiyacının sürdürülebilir şekilde karşılanabilmesi ve üretimdeki en büyük maliyet kaleminin daha ekonomik hale getirilmesi açısından, düşük maliyetli ve her zaman temin edilebilecek yem kaynaklarının geliştirilmesi zorunlu hale gelmiştir (Lovell, 1998; TEPGE, 2024).



Şekil 5. Balık yem fiyatları (kg/TL) (TEPGE, 2024)

Balık beslenmede kullanılan yem içerikleri, yalnızca büyüme ve üreme gibi temel yaşamsal süreçleri değil, aynı zamanda balıkentinin kalitesini de doğrudan etkilemektedir. Son yıllarda sağlıklı beslenmeye yönelik farkındalığın artmasıyla birlikte, tüketicilerin balıketine olan ilgisi de artış göstermektedir. Son yıllardaki çalışmalar, balık yemlerine ilave edilen çeşitli bitkisel yağların; büyüme performansı, yemden yararlanma oranı, balık sağlığı üzerinde olumlu etkiler yarattığını ortaya koymaktadır.

Lipidlerin Balık Beslenmesindeki Rolü

Lipitler, tüm canlılarda olduğu gibi, tatlı ve tuzlu sularda yaşayan canlılar için de temel enerji kaynağıdır. Balık yemlerinde yeterli lipid bulunmadığında, enerji ihtiyacının karşılanması için protein kullanılmaktadır. Ancak protein, su ürünleri yemlerinde en maliyetli girdilerden biridir (Higuera, 2001). Lipitlerin yüksek enerji içeriği sayesinde protein kullanımını kısmen azaltmak mümkün olmakta; nitekim salmonidlerin beslenmesinde yağ oranı %15'ten %20'ye

ıkarıldığında büyüme performansında kayıp yaşanmadığı, hatta bu artışla birlikte protein oranının %48'den %35 seviyelerine d ş r lebileceğı bildirilmiştir (Corraze, 2001).

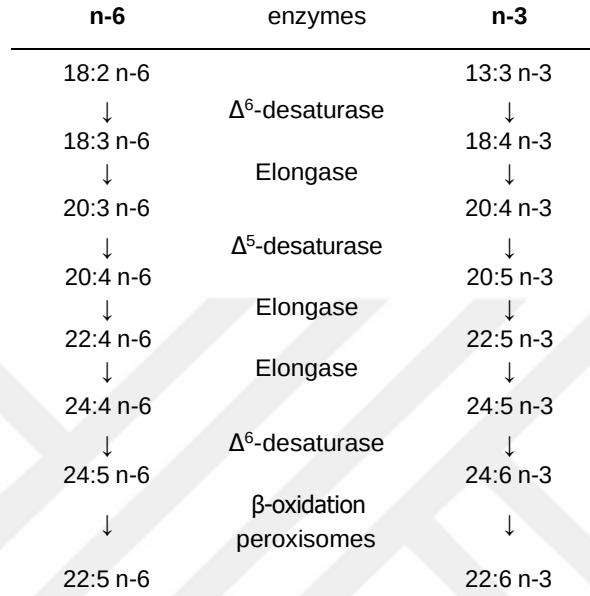
Her ne kadar karbonhidratlar maliyet açısından uygun bir enerji kaynağı gibi görünse de, karnivor balık türlerinin bunları sindirme ve enerjiye dönüştürme kapasiteleri oldukça sınırlıdır (Silva ve Anderson, 1995). Bu nedenle, yağı kaynaklarının etkin kullanımı özellikle etil balıklar için daha uygun bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Benzer bulgular kırmızı levrek (*Sciaenops ocellatus*) ve sarıkuyruk (*Seriola quinqueradiata*) türlerinde de rapor edilmiştir (Serrano vd., 1992; Silva ve Anderson, 1995). Dolayısıyla kültürü yapılan balık türlerinde yem formülasyonu hazırlanırken, enerji ihtiyacının doğıru şekilde karşılanması büyük önem taşımaktadır.

Lipitler, balıklarda büyümenin yanı sıra sağığın korunması ve yaşamsal fonksiyonların sürdürülmesinde de temel rol üstlenir. Yumurta evresinden erişkinliğı kadar gelişim süreçlerinde, üreme, yüzme ve ısı üretimi gibi birçok biyolojik faaliyet için enerji sağılar (Wiegand 1996; Sargent vd. 2002). Ek olarak, yağılar hücre zarının kompozisyonunda ve fonksiyonlarının gerçekleştirilmesinde görev alan esansiyel yağı asitlerinin temel kaynağıdır. Esansiyel olan bu yağı asitleri, eikosanoidlerin sentezlenmesinde ilk basamak olarak görev almaktadırlar (Sargent vd. 1999).

Yağı asitleri, diyetel lipitlerin temel bileşenidir. Balık karaciğer ve kas dokularındaki omega-3 serisine ait çoklu doymamış yağı asitlerinin (PUFA) düzeyleri; tür, yaş, cinsiyet, mevsim, su kalitesi ve en önemlisi tüketilen diyetle bağılı olarak değışkenlik gösterir (Vlieg ve Body. 1988; Regost vd. 2003). Özellikle deniz balıklarında, eikozapentaenoik asit (EPA 20:5 n-3) ve dokosaheksaenoik asit (DHA 22:6 n-3) gibi uzun zincirli çoklu doymamış yağı asitlerini (LC-PUFA) bol miktarda bulunur (Ribeiro vd. 2007). Bu yağı asitlerinin kaynağı deniz algleri olup, besin zinciri yoluyla zooplanktonlar tarafından tüketilerek balıklara geçmektedir (Pike ve Jackson 2010). Bu nedenle, balık dokularındaki yağı asidi kompozisyonu genellikle tükettikleri diyetle örtüşür (Guillou vd. 1995; Izquierdo vd. 2005; Mourente ve Bell 2006). Tatlı su balıklarında ise EPA ve DHA düzeyleri daha düşüktür (Ribeiro vd. 2007).

Denizel orjinli balıklar, yaşamsal fonksiyonlarını gerçekleştirebilmek için çoğunlukla uzun zincirli n-3 doymamış yağı asitlerine ihtiyaç duymaktadırlar. Bitkiler, n-3 ve n-6 serisi yağı asitlerini sentezleyebilen tek canlı grubudur. Bu nedenle, hayvanlar sentezleyemedikleri ancak yaşamları için gerekli olan bu yağı asitlerini beslenme yoluyla dışarıdan almak zorundadır (IFFO, 2008). Öte yandan tatlısu balıkları, dışarıdan aldıkları linoleik asit (LA; 18:2n-6) ve linolenik asit (LNA; 18:3n-3) gibi esansiyel ve  nc  yağı asitlerini kullanarak ihtiyaç duydukları arakidonik asit (ARA; 20:4n-6), EPA ve DHA gibi uzun zincirli yağı asitlerini

sentezleyebilmektedir (Şekil 6) (Tocher, 2003a). Diğer bir deyişle, tatlısu türleri C18 PUFA'ları C20-22 uzun zincirli PUFA'lara dönüştürebilme kapasitesine sahiptir (Turchini vd. 2009). Deniz balıkları da bu dönüşümü yapacak enzimlere sahip olmakla birlikte, doğal olarak LC-PUFA açısından zengin besinlerle beslendiklerinden bu yeteneklerini zamanla kaybetmişlerdir (Sargent vd. 2002; Turchini vd. 2009). Dolayısıyla, deniz balıkları için n-3 LC-PUFA'ların diyetle dışarıdan alınması zorunludur.



Şekil 6. n-6 ve n-3 yağ asitlerinin uzama ve doymamış hale gelme (desatürasyon) yolları ile eikosanoidlerin öncülleri. Tocher (2003a)'dan uyarlanmıştır

Lipitler yalnızca balıkların sağlığı için değil, aynı zamanda insan sağlığı açısından da büyük öneme sahiptir. Balıkta bulunan yağ asitleri, insan sağlığı üzerinde olumlu etkileri olan en yararlı yağ asitleri arasında yer almaktadır (Sahena vd. 2009). Balıklar, özellikle deniz balıkları, zengin miktarda doymamış yağ asitleri içerir ve bu balıklarda bulunan n-3 LC-PUFA'lar, insan sağlığı için esansiyel niteliktedir (Sahena vd. 2009). Bunlardan özellikle EPA ve DHA, insan vücudunda doğal olarak bulunan ve gelişim ile sağlığın korunmasında temel rol oynayan bileşiklerdir. Bu yağ asitleri aynı zamanda kalp-damar sistemi açısından da oldukça kritik öneme sahiptir (Din vd. 2004). Kromann ve Green (1980) tarafından yapılan incelemeler ışığında, çoğunlukla deniz orijinli canlılar ile beslenen eskimolar arasında kalp ve damar hastalıklarının çok düşük oranda görüldüğü bildirilmiştir. Diğer canlılarda olduğu gibi, insanların beslenmesinde de EPA ve DHA tüketiminin gerekli görülmesi ve sıkça önerilmesinin temel nedeni; bu yağ asitlerinin yetersizliği durumunda kanser, inflamatuvar hastalıklar ve otoimmün bozukluklar gibi sağlık sorunlarıyla karşılaşma riskinin artmasıdır (Simopoulos, 2002).

Balık yemlerinde geleneksel olarak lipit kaynağı balık yağı olmuştur; fakat yıllar içinde balık yağı kaynaklarının sınırlı hale gelmesi, maliyetlerin artması ve sürdürülebilirlik kaygıları nedeniyle alternatif bitkisel yağların kullanımı gündeme gelmiştir. Ancak balıkların yağ asidi profili büyük ölçüde tüketilen yemle bağlantılı olduğundan, yem lipidlerinde yapılacak değişiklikler balık ürünlerinin besin değerini ve insan sağlığı açısından taşıdığı olumlu etkileri azaltma riski taşımaktadır. Bu noktada, LA, LNA ve OA gibi temel yağ asitlerince zengin olan bitkisel yağlar ön plana çıkmaktadır. Ayrıca SDA bazı bitkisel yağlarda doğal olarak bulunan ve balıklar tarafından EPA ve DHA'ya dönüştürülebilen bir n-3 yağ asididir. Bu nedenle, bitkisel yağların yem formülasyonuna katılması balıkların n-3 uzun zincirli yağ asitlerini sentezleme kapasitesine katkı sağlayarak hem büyüme hem de besinsel kalite açısından önemli bir fırsat sunmaktadır.

Dolayısıyla mevcut çalışmada, farklı oranlardaki kırkbatıran (*Echium plantagineum*) ve keten (*Linum usitatissimum*) tohumu yağı karışımlarıyla hazırlanan diyetlerin, gökkuşağı alabalığı (*Oncorhynchus mykiss*) yavrularında büyüme performansı, proksimet kompozisyon, yağ asidi profili ile yağ asidi biyosentezine ilişkin desatürasyon (*fads2a*, *fads2b*) ve elongasyon (*elovl5*, *elovl2*) gen ekspresyonları üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Kontrol grubunda kullanılan balık yağı ise geleneksel yağ kaynağı olarak temel referans kabul edilmiştir.

Kırkbatıran (*Echium plantagineum* L.) Hakkında Genel Bilgiler

Boraginaceae (Hodangiller) familyası

Boraginaceae (Hodangiller) familyası, başta Avrupa ve Asya olmak üzere özellikle Akdeniz Bölgesi'nde yaygın olarak temsil edilen; çalı, ağaç ve otsu türleri içeren geniş bir bitki grubudur. Dünya genelinde yaklaşık 148 cins ve 2700'den fazla türü kapsayan bu familya, tür çeşitliliği bakımından oldukça zengindir (Ahmet ve Kordofani, 2012; Özcan ve Süzerer, 2020). Türkiye florasında ise Boraginaceae familyası, yüksek endemizm oranı (%35) ile dikkat çeken 32 cins ve 315 türle temsil edilmekte olup, farklı çevresel koşullara sahip habitatlara yayılmış durumdadır (Özcan, 2008a). Familyanın karakteristik morfolojik özellikleri, "Flora of Turkey and the East Aegean Islands" adlı eserde şu şekilde tanımlanmıştır (Davis 1965–1985; Davis vd. 1988; Güner ve Ekim 2014): Yapraklar basit yapıda, stipulsuz ve alternat dizilimlidir. Bitki gövdesi ve yaprak yüzeyi genellikle sert tüylerle kaplıdır. Çiçekler hermafrodit olup çoğunlukla aktinomorf, nadiren zigomorfur. Kaliks beş serbest veya bileşik sepalden oluşurken; korolla beş bileşik petale sahiptir. Androkeumda beş stamen bulunmakta, bu stamenler korolla ile birleşik yapıdadır ve petallerin karşısında yer alır. Ginekeum ise iki birleşik karpelden oluşur, dört bölmeli (lokuluslu) yapıya sahiptir, stilus ginobaziktir ve ovaryum üst durumdadır. Meyve tipi olarak nuks, drupa ya da şizokarp görülür. Boraginaceae familyası üzerine yapılan

fitokimyasal ve farmakolojik çalışmalar, bu familyaya ait türlerin yüksek biyolojik aktiviteye sahip bileşenler içerdiğini ortaya koymuştur (Guil-Guerrero 2006; zcan 2008; Eruygur vd. 2016). Özellikle alkaloidler, flavonoidler, polifenoller, fitosteroller ve terpenoidler gibi ikincil metabolitler bu familyada yaygın olarak bulunmaktadır. Boraginaceae yelerinin gösterdiği antioksidan, antienflamatuar, antitumorjenik ve antikanserojenik etkiler, büyük ölçüde içerdiği fenolik ve flavonoid bileşiklerle ilişkilendirilmektedir (Gharib ve Godarzee 2016). Ayrıca, bu familyaya ait bazı türlerde nadir olarak rastlanan gama-linolenik asit (GLA) ve SDA gibi çoklu doymamış yağ asitlerinin varlığı, Boraginaceae familyasını hem tıbbi hem de endüstriyel açıdan önemli hale getirmektedir (zcan 2008a; Kiteşsa vd. 2011).

Kırkbatıran

Kırkbatıran L., Boraginaceae (Hodangiller) familyasına ait (şekil 7) ve geniş yayılış alanına sahip önemli bir bitki türüdür. Türkiye florasında bu türe ait bilgiler, P.H. Davis'in klasik eseri olan Flora of Turkey and the East Aegean Islands'ın altıncı cildinde detaylı biçimde ele alınmıştır. Bu esere göre Türkiye'de *Echium* cinsine ait toplam 9 tür bulunmaktadır: *E. angustifolium* Miller, *E. arenarium* Guss., *E. italicum* L., *E. plantagineum* L., *E. parviflorum* Moench, *E. vulgare* L., *E. orientale* L., *E. russicum* J.F.Gmel., ve *E. glomeratum* Poir. *Echium plantagineum* L., halk arasında ‘‘Kırkbatıran’’ olarak da bilinir ve Türkiye’de doğal olarak yayılış gösteren türlerden biridir. Özellikle Adana, Gaziantep, İstanbul, Antalya, Aydın, Çanakkale, Erzurum, Muğla, Sakarya, Samsun, Sinop, Tekirdağ ve Trabzon gibi birçok ilde doğal poplasyonlarına rastlanmaktadır (Bakiş vd. 2011). Bu yayılışın detayları şekil 8'de sunulmuştur.

Alem: Plantae / Bitkiler Alemi

şube: Magnoliophyta / Tohumlu Bitkiler

Altsınıf: Magnoliidae / Manolya Altsınıfı

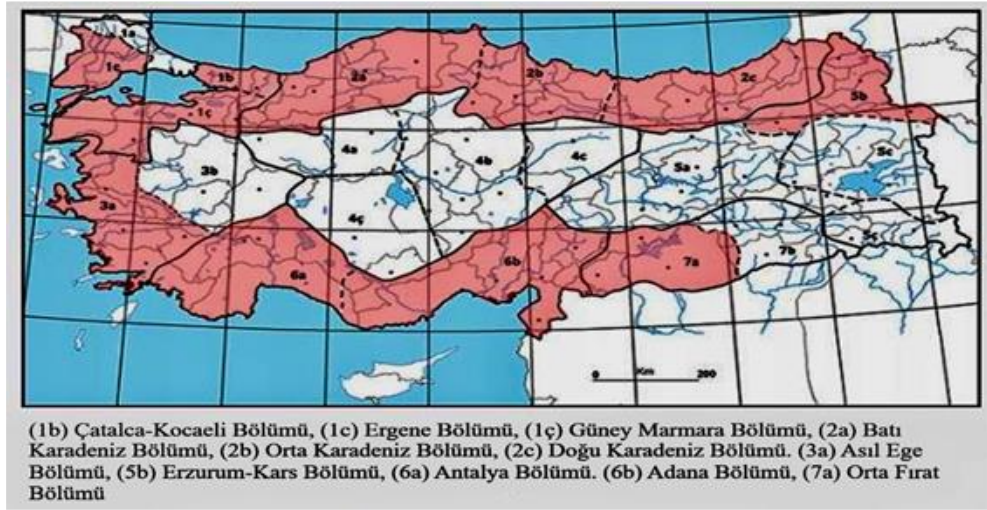
Aile: Boraginaceae/ Hodangiller

Cins: *Echium* / Engerekotu

Tr: *Echium plantagineum*/ Kırkbatıran

şekil 7. *E. plantagineum* L. türünün sistematik hiyerarşisi (Körüklü 2012)

E. plantagineum L., kıyı bölgelerinde yaygın olarak bulunan ve genellikle bir ya da iki yıllık ömür döngüsüne sahip olan otsu bir bitkidir. Geniş bir ekolojik toleransa sahip olup, 0–2400 m rakım aralığında yetişebilmektedir. Doğal yaşam alanları arasında tarım alanları, kıyı kumulları, çayırılık alanlar ve taşlık yamaçlar yer almaktadır (Bakiş vd., 2011).



Şekil 8. *E. plantagineum* L. türünün Türkiye’de dağılım haritası (Körüklü 2012)

Kırkbatıran, yumuşak setiform (kıl şeklinde) tüylerle kaplı, bir veya iki yıllık yaşam döngüsüne sahip, otsu bir bitki türüdür. Gövdesi genellikle tabandan dallanmış yapıdadır ve uzunluğu 17–65 cm arasında değişmektedir. Taban yaprakları, geniş ovalden dar eliptik forma kadar farklılık gösterebilir; 5–28 cm uzunluğunda ve 1–3,5 cm genişliğindedir. Bu yapraklar bıçak biçiminde olup, sıklıkla kısa bir yaprak sapı ile sonlanır. Belirgin yan damar yapıları mevcuttur. Genç bireylerde, yapraklar tabanda bir rozet formasyonu oluşturarak bitkinin karakteristik görünümünü belirler. Gövde üzerindeki (kaulin) yapraklar ise daha küçük boyutludur; genellikle lineer-mızrak biçiminde olup, kalp şeklinde tabanlı (kordat) ve gövdeyi hafifçe saran (ampleksikaul) bir morfolojik yapı sergiler. Çiçeklenme durumu oldukça dallı bir yapı gösterir. Çanak yapraklar (kaliks), çiçeklenme döneminde 7–9 mm, meyve döneminde ise 15 mm uzunluğa kadar büyüyebilir. Taç yapraklar (korolla), genellikle parlak koyu mavi ya da mor renktedir (Şekil 9); nadiren pembe veya koyu kırmızı tonlarında da gözlenebilir. Korolla uzunluğu 19–32 mm olup, beş petalin birleşmesiyle oluşan geniş infundibuliform (huni şeklinde) bir yapı sergiler; bu yapı, hafifçe trompet biçimini andırır. Korolla kenarlarında ve damarlar üzerinde parlak ya da seyrek yerleşimli setiform tüyler bulunur. Meyve yapısı, oval piramidal formda olup, her biri dört adet küçük tohumcuğu içeren nutlet (küçük sert meyve) tipindedir (Davis, 1965–1985; Davis vd. 1988; Güner ve Ekim 2014).



Şekil 9. Kırkbatıran bitkisi

KURAMSAL TEMELLER

Dünyada üretilen balık yağı miktarı, su ürünleri yetiştiriciliğinde balık yemlerinin ihtiyacını karşılamada yetersiz kalmakta ve bu durum, alternatif yağ kaynaklarının geliştirilmesini zorunlu hale getirmektedir. Yüksek üretim potansiyelleri, sürdürülebilir tedarik imkânları ve maliyet avantajları nedeniyle bitkisel yağlar bu soruna uygun bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Turchini vd. (2011) tarafından yapılan kapsamlı derleme çalışmasında, diyetel bitkisel yağların özellikle tatlısu balıklarında büyüme performansı, yemden yararlanma oranı ve genel refah üzerinde olumsuz etki oluşturmadığı; ancak kas ve karaciğer gibi dokulardaki n-3 LC-PUFA, özellikle EPA ve DHA düzeylerini belirgin şekilde azalttığı vurgulanmıştır. Buna karşın tatlısu balıklarının, bitkisel yağlarda bolca bulunan 18 karbonlu PUFA'ları biyosentetik olarak LC-PUFA'lara dönüştürebilme kapasiteleri bulunmaktadır. Cook (1996) tatlısu türlerinin bu biyosentetik kapasitesinin deniz türlerine kıyasla daha yüksek olduğunu ve bu nedenle bitkisel yağ ikamesine daha iyi uyum sağladıklarını bildirmiştir. Buzzi vd. (1997) tatlısu levreklerinde (*Dicentrarchus labrax*) yapılan besleme denemelerinde, diyetteki LNA seviyesinin artmasının EPA ve DHA sentezini artırdığını göstermiştir. Glencross (2009) ise bu dönüşüm kapasitesinin türler arasında farklılık göstermekle birlikte, özellikle salmonidler gibi soğuk su tatlısu türlerinde oldukça etkin olduğunu belirtmiştir. LC-PUFA'ların, 18 karbonlu öncül yağ asitlerinden sentezi; $\Delta 6$ desatürasyon (*fads2a*), zincir uzatma (*elovl5*), $\Delta 5$ desatürasyon (*fads2b*) ve bazı türlerde ek bir *elovl2* basamağı gibi ardışık reaksiyonlarla gerçekleşmektedir (Tocher vd., 2004; Zheng vd. 2004). Bell vd. (2001), gökkuşağı alabalığı yemlerinde balık yağının keten tohumu yağı ile ikamesinin, LC-PUFA biyosentezine aracılık eden genlerin ekspresyonunu artırdığını ve dokulardaki ara metabolitlerin (20:4n-3 ve 20:5n-3) seviyelerini yükselttiğini rapor etmiştir. Tocher vd. (2001, 2003) benzer şekilde, farklı bitkisel yağ kaynakları ile beslenen salmonidlerde desatüraz ve elongaz enzim aktivitelerinde artış gözlemlendiğini, bunun da diyetteki LC-PUFA eksikliğine adaptif bir yanıt olduğunu ortaya koymuştur. Zheng vd. (2005) ise keten tohumu yağı ile beslenen gökkuşağı alabalığında *fads2* gen ekspresyonunun anlamlı şekilde arttığını ve bunun DHA biyosentez yolunun hızını etkileyebileceğini belirtmiştir. Bitkisel yağlar arasında stearidonik asit SDA bakımından zengin kırkbatıran yağı özel bir öneme sahiptir. Tocher (1995), SDA içeriği yüksek diyetlerin tatlısu balıklarında LC-PUFA sentezinde etkili bir ara basamak sağlayabileceğini vurgulamıştır.

Kuah vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada, çizgili yılan balığı (*Channa striata*) türünde yağ asidi metabolizmasında görev alan çift işlevli bir $\Delta 6/\Delta 5$ desaturaz (*fads2*) geni klonlanmış ve işlevsel olarak tanımlanmıştır. Maya sisteminde gerçekleştirilen analizlerde genin özellikle n-3 yağ asitlerinde yüksek aktivite gösterdiği, ALA'nın SDA'ya ve 20:4n-3'ün EPA'ya dönüşümünü etkin biçimde katalize ettiği belirlenmiştir. Gen ekspresyonu beyinde en yüksek, ardından karaciğer ve bağırsakta saptanmıştır. Besleme denemelerinde LC-PUFA açısından zengin diyetlerin *fads2* ekspresyonunu baskıladığı, bitkisel yağ tabanlı diyetlerin ise artırdığı görülmüştür. Bu sonuçlar, türün C18 yağ asitlerinden EPA ve DHA sentezi için gerekli enzimlere sahip olduğunu ve LC-PUFA'nın gen düzeyinde geri besleme ile düzenlendiğini ortaya koymuştur.

Annette Jaya-Ram (2016) tarafından yapılan bir çalışmada, su ürünleri yetiştiriciliğinde balık yağına alternatif olarak kırkbatıran yağının potansiyeli değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, çizgili yılan balığı (*Channa striata*) türü kullanılarak 12 hafta süren bir besleme denemesi gerçekleştirilmiştir. Denemede, balıklara balık yağı, kırkbatıran tohumu yağı (KBTY) ve keten tohumu yağı (KTY) içeren farklı diyetler uygulanmıştır. Araştırma sonuçları, KBTY bazlı diyetlerle beslenen bireylerde, yağ asidi desaturaz (*fads2*) ve elongaz (*elovl5*) genlerinin daha yüksek düzeyde ifade edildiğini ortaya koymuştur. Bu bulgu, KBTY'nın n-3 uzun zincirli çoklu doymamış yağ asitleri (LC-PUFA), özellikle EPA ve DHA biyosentezini teşvik ettiğini göstermektedir. Her ne kadar büyüme performansı ve yem dönüşüm oranı bakımından diyetler arasında anlamlı bir fark gözlemlenmemiş olsa da, KBTY ile beslenen balıklarda kas dokusundaki n-3/n-6 yağ asidi oranında iyileşme tespit edilmiştir. Bu özellik, özellikle yüksek n-6 yağ asidi tüketimine sahip insan popülasyonları açısından önem arz etmektedir. Elde edilen bulgular, KBTY'nın su ürünleri yetiştiriciliğinde balık yağına sürdürülebilir bir alternatif olarak kullanılabileceğini ve bu sayede çiftlik balıklarının besin içeriğinin, dolayısıyla insan sağlığına olan katkısının artırılabilceğini göstermektedir.

Kajbaf vd. (2025) tarafından yapılan bir çalışmada, gökkuşacağı alabalığında balık yağı yerine keten, soya, kanola, kişniş ve alg yağı kullanımının büyüme performansı, yağ asidi profili ve gen ekspresyonu üzerine etkileri araştırılmıştır. On haftalık deneme sonucunda en yüksek büyüme alg yağı grubunda saptanırken, keten ve alg yağı kombinasyonu da büyümeyi desteklemiştir. Kas dokusunda DHA en yüksek alg yağı grubunda, LNA ise KTY grubunda bulunmuş, EPA düzeyi ise balık yağı grubunda öne çıkmıştır. Ayrıca, *pparg*, *srebp2* ve *fads6* genlerinin keten grubunda yüksek düzeyde ifade edildiği, *elovl5* aktivitesinin alg ve keten+alg yağı gruplarında arttığı belirlenmiştir. Keten tohumu yağı ile beslenen balıklarda katalaz (CAT)

ve glutatyon-S-transferaz (GST) gen ekspresyonunun yükselmesi, bu yağın antioksidan kapasiteyi destekleyici etkisini göstermiştir.

Lewis vd. (2013) tarafından yapılan çalışmada gökkuşığı alabalığında balık yağı yerine KTY ve kanola yağı bazlı yemlerle beslenmiş, bu yemlere ise demir, çinko, magnezyum ve B2, B3, B6, B7 vitaminleri ile askorbik asit farklı oranlarda ilave edilmiştir. Deneme 84 gün sürmüş ve balıklar bu süre zarfında yaklaşık sekiz kat büyüme göstermiş, mortalite %1'in altında kalmıştır. Büyüme performansı açısından gruplar arasında anlamlı bir fark bulunmamış, yalnızca en yüksek takviye grubunda yem tüketimi artmıştır. Proksimat kompozisyonunda önemli değişiklikler gözlenmemekle birlikte, yağ asidi profili incelendiğinde özellikle 400% mikro besin takviyesi uygulanan grupta bütün vücut DHA ve toplam n-3 LC-PUFA düzeyleri anlamlı biçimde yükselmiştir. Aynı grupta, biyosentetik yolağı olumsuz etkileyen 22:3n-3 düzeylerinde düşüş görülmüş, fileto dokusunda 18:4n-3 artışı kaydedilmiştir. Enzimatik aktivite değerlendirmeleri, orta düzey takviyelerde (200–300%) $\Delta 5$ -desaturaz ve *Elovl5* elongaz aktivitelerinin arttığını, gen ekspresyonu analizleri ise *Elovl5*'in bu gruplarda anlamlı şekilde yükseldiğini ancak en yüksek takviyede tekrar azaldığını göstermiştir. Buna karşılık $\Delta 6$ -desaturaz ekspresyonu değişmemiştir.

Yuan vd. (2024) tarafından yürütülen çalışmada, *Onychostoma macrolepis*'te balık yağı (BY) yerine KTY, soya yağı (SY) ve %50 KTY–%50 SY karışımının kullanımı değerlendirilmiştir. Yetmiş gün süren denemede büyüme performansı ve yaşama oranı açısından gruplar arasında anlamlı fark bulunmamıştır. Ancak SY ve KTY içeren diyetlerde kondisyon faktörü ve visserosomatik indeks değerleri artmıştır. Kas, karaciğer ve bağırsak yağ asidi profilleri diyetlere göre değişmiş; BY grubunda EPA ve DHA en yüksek düzeylerde, KTY grubunda LNA, SY grubunda ise LA ve ARA daha yüksek bulunmuştur. Gen ekspresyonu analizlerinde, özellikle KTY grubunda $\Delta 5$ ve $\Delta 6$ desaturaz ile elongaz genlerinin karaciğer ve kas dokularında daha yüksek seviyelerde ifade edildiği belirlenmiştir. Çalışma, türün diyetle alınan LNA'yı DHA'ya dönüştürebildiğini ve n-3 LC-PUFA biyosentez kapasitesine sahip olduğunu ortaya koymuştur.

Codabaccus vd. (2011) tarafından yapılan bir çalışmada, Atlantik somonlarının (*Salmo salar*) beslenmesinde alternatif yağ kaynaklarının etkileri araştırılmıştır. Çalışmada balıklar, içerik olarak BY, kolza yağı (KY) ve SDA bakımından zengin KBTY içeren üç farklı diyetle toplam 28 hafta boyunca beslenmişlerdir. Diyetlerin balıkların karaciğer ve beyaz kas dokusundaki n-3 LC-PUFA sentezi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Analizler sonucunda, KBTY ile beslenen grupta karaciğer ve kas dokusunda KY grubuna kıyasla daha yüksek n-3 LC-PUFA düzeyleri elde edilmiştir. Bununla birlikte, en yüksek n-3 LC-PUFA

düzeylerine BY grubunda rastlanmıştır. SDA'nın biyosentez yolunda ilk basamak olan $\Delta 6$ desaturaz enzimini atlaması sayesinde bu artışın meydana geldiği ifade edilmiştir. Ayrıca, gen ekspresyon analizlerinde KY grubu balıklarında $\Delta 6$ ve $\Delta 5$ desaturaz genlerinin daha yüksek seviyelerde ifade edildiği, KBTY grubunda ise orta seviyelerde gen ifadesi gözlemlendiği rapor edilmiştir. Sonuç olarak, çalışmada KBTY'nın n-3 LC-PUFA sentezini destekleyen etkili bir alternatif yağ kaynağı olabileceği vurgulanmıştır.

Dupont-Cyr vd. (2022) tarafından yürütülen çalışmada, BY tamamen KTY ile ikame edilerek Arktik alabalığı (*Salvelinus alpinus*), kaynak alabalığı (*S. fontinalis*) ve bunların melezlerinde büyüme performansı, kas dokusu yağ asidi profili ve oksidatif stres düzeyleri araştırılmıştır. 133 gün süren denemede, KTY grubunda büyüme, yemden yararlanma, kas lipid ve protein içeriklerinde BY grubuna göre anlamlı bir farklılık görülmemiştir. Ancak kas dokusunun yağ asidi profili diyet kaynaklı olarak önemli ölçüde değişmiştir. KTY diyeti, kas dokusunda EPA ve DHA düzeylerini sırasıyla %25 ve %18 oranında azaltırken, LNA düzeylerini yaklaşık %177 oranında artırmıştır. Ayrıca TBARS analizleri, bazı gruplarda KTY tüketiminin oksidatif stres göstergelerini hafifçe yükseltebildiğini göstermiştir. Genel olarak, KTY'nın bu tür salmonidlerde BY'nın yerine kullanılabileceği, büyüme ve besin kullanımı üzerinde olumsuz etki göstermediği ancak EPA ve DHA düzeylerini tam olarak koruyamadığı sonucuna varılmıştır.

Bell vd. (2006) tarafından yapılan çalışmada, Atlantik morina balığında (*Gadus morhua*) BY tamamen KBTY ile ikame edilerek büyüme, yağ asidi profili, LC-PUFA sentezi, prostaglandin üretimi ve bağışıklık parametreleri üzerine etkiler incelenmiştir. On sekiz hafta süren denemede BY ve KBTY diyetleri büyüme, yemden yararlanma, hepatosomatik indeks ve dokulardaki toplam lipid düzeylerini etkilememiştir. KBTY ile beslenen balıkların karaciğer ve kas dokularında 18:3n-6, SDA ve 20:3n-6 düzeyleri artarken, EPA, DHA ve ARA azalmıştır. Hepatositlerde LNA ve EPA'dan elde edilen ürünlere dönüşüm düşük düzeyde gerçekleşmiş ancak KBTY diyeti bu aktiviteyi BY'ya kıyasla artırmıştır. Ayrıca, KBTY grubunda solungaç hücrelerinde prostaglandin F üretimi ile böbrek makrofaj aktivitesi azalmış, fakat serum lizozim aktivitesi etkilenmemiştir. Çalışma, KBTY'nın BY yerine kullanılabileceğini, büyümeyi olumsuz etkilemediğini, ancak LC-PUFA seviyelerini tam olarak koruyamadığını ve bağışıklık parametrelerinde özellikle eikosanoid metabolizması üzerinden değişikliklere yol açtığını ortaya koymuştur.

Miller vd. (2007) tarafından yapılan çalışmada, Atlantik somonu yavrularında BY yerine SDA KBTY, KY ve karışım (MX; KBTY + KY) diyetlerinin büyüme performansı ve kas dokusu yağ asidi profili üzerindeki etkileri incelenmiştir. Kırk iki gün süren denemede

diyetler büyüme, yemden yararlanma ve yaşama oranı üzerinde anlamlı bir farklılık yaratmamıştır. Ancak kas dokusunda önemli değişimler gözlenmiş; SDA, EPA, DHA ve toplam n-3 yağ asitleri KBTY ve BY gruplarında KY grubuna kıyasla daha yüksek bulunmuştur. Özellikle KBTY diyetiyle beslenen balıklarda kas dokusunda EPA ve DHA seviyelerinin BY grubuna yakın düzeyde korunduğu belirlenmiştir. Çalışma, %14 SDA içeren kırkbatıran yağının kısa süreli denemelerde n-3 LC-PUFA düzeylerini sürdürme potansiyeline sahip olduğunu, ancak bu etkinin biyosentez artışı mı yoksa retansiyonla mı sağlandığının netleştirilmesi için daha uzun süreli araştırmalara ihtiyaç duyulduğunu ortaya koymuştur.

Miller vd. (2008) tarafından yapılan başka bir çalışmada, deniz suyunda yetiştirilen Atlantik somonuna SDA açısından zengin KBTY, KY ve BY içeren diyetler 12 hafta süreyle uygulanmış ve yağ asidi metabolizması ile gen ekspresyonu üzerindeki etkiler araştırılmıştır. Sonuçlarda, KBTY ile beslenen balıklarda elongaz ve $\Delta 5$ desaturaz gen ekspresyonunun BY grubuna kıyasla arttığı, karaciğerde EPA düzeylerinin KY grubuna göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Ancak KBTY diyeti, BY grubunda gözlenen yüksek EPA ve DHA düzeylerine ulaşamamıştır. Bu bulgular, SDA'nın biyosentez yolunda $\Delta 6$ desaturaz basamağını atlayarak EPA sentezini kısmen desteklediğini, fakat DHA oluşumunu sınırlı düzeyde etkilediğini göstermiştir.

Alhazzaa vd. (2011) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, barramundi (*Lates calcarifer*) türü balıklarda, BY yerine KBTY ve KY kullanımının büyüme performansı, yağ asidi profili, fenolik benzeri etkiler ve yağ asidi metabolizması üzerine etkileri araştırılmıştır. Deneysel çalışmada balıklar tatlı su ve deniz suyu ortamlarında yetiştirilmiş olup, farklı yağ kaynaklarının sindirilebilirliği, vücut yağ asidi birikimi ve antioksidan etkileri incelenmiştir. KBTY ile beslenen balıklarda, SDA ve LNA gibi kısa zincirli n-3 yağ asitlerinin vücutta yüksek oranda biriktiği, ancak n-3 LC-PUFA olan EPA ve DHA'nın sınırlı düzeyde sentezlendiği tespit edilmiştir. Çalışmada en yüksek toplam n-3 PUFA içeriği KBTY grubunda saptanmıştır. Ayrıca, yağ asidi biyosentezinde görev alan enzim aktivitelerinin diyet kaynaklarına göre farklılık gösterdiği, *fad6* enzim aktivitesinin KBTY grubunda düşük, elongaz ve *fad5* aktivitelerinin ise yüksek olduğu belirlenmiştir. KBTY ile beslenen balıkların dokularında antioksidan kapasiteyi etkileyen SDA ve ALA gibi bileşenlerin yoğun bulunması, bu yağın fonksiyonel yem katkısı olarak değerlendirilebileceğini göstermiştir. Çalışma, KBTY 'nın sürdürülebilir bir BY alternatifi olabileceğini ve özellikle C18 n-3 yağ asitleri yönünden zengin içeriği sayesinde insan tüketimi açısından potansiyel taşıdığını ortaya koymuştur.

Ozel vd. (2018) tarafından Karadeniz alası (*Salmo trutta labrax*) yavrularında BY yerine farklı oranlarda SY ve KTY kullanımının büyüme, doku yağ asidi profili ve gen ekspresyonu

üzerine etkileri araştırılmıştır. Doksan gün süren denemede %100 BY, %67 SY–%33 KTY, %50 SY–%50 KTY ve %33 SY–%67 KTY içeren dört diyet uygulanmıştır. Sonuçlarda, BY ve %50 SY–%50 KTY gruplarında büyüme ve yemden yararlanma değerleri yüksek bulunurken, %33 SY–%67 KTY grubunda büyüme gerilemiştir. Kas ve karaciğer yağ asidi profilleri diyetlere bağlı olarak değişmiş; SY ve KTY kullanımında LA ve LNA artarken, EPA ve DHA seviyeleri azalmıştır. Ayrıca, özellikle %33 SY–%67 KTY grubunda $\Delta 6$ desatüraz ve elongaz gen ekspresyonunun yükseldiği belirlenmiştir.

Díaz-López vd. (2010) tarafından yapılan çalışmada, çipura (*Sparus aurata* L.) beslenmesinde BY %50 oranında KBTY ile ikame edilmesinin enterosit ve hepatosit lipid metabolizması üzerine etkileri araştırılmıştır. Dört ay süren deneme sonunda, KBTY'nın büyüme ve yaşama oranları üzerinde olumsuz bir etkisi gözlenmemiştir. Hücrelerin toplam lipid içerikleri ve lipid sınıf kompozisyonları önemli ölçüde değişmezken, KBTY grubunda SDA, GLA ve bunların elongasyon ürünü olan 20:3n-6 düzeyleri artmış, n-3 LC-PUFA ise sadece sınırlı ölçüde azalmıştır. Radyoaktif işaretli LA ve LNA ile yapılan metabolizma testlerinde, toplam alım, inkorporasyon, β -oksidasyon ve elongasyon–desatürasyon aktivitelerinin KBTY diyetinden etkilenmediği belirlenmiştir.

Díaz-López vd. (2009) tarafından yürütülen yine aynı tür üzerinden farklı bir çalışmada, çipura yavrularında BY yerine %50 oranında KBTY ikamesinin büyüme, plazma parametreleri ve vücut lipid kompozisyonu üzerine etkileri incelenmiştir. Yedi ay süren denemede üç farklı diyet uygulanmıştır: yalnızca BY, yalnızca KBTY (%50 BY + %50 KBTY karışımı) ve ilk dört ay KBTY ile beslenip son üç ay BY'ya geri döndürülen EF grubu. Sonuçlarda, KBTY ile beslenen balıklarda büyüme, yem tüketimi ve yaşama oranı olumsuz etkilenmemiştir. Ancak KBTY grubunda kas ve karaciğer yağ asidi profilleri belirgin şekilde değişmiş; C18 yağ asitleri (LA, GLA, LNA ve SDA) artarken, EPA ve toplam n-3 LC-PUFA azalmıştır. Ayrıca, KBTY grubunda hepatosomatik indeks ve kas toplam lipit düzeylerinde düşüş görülmüştür. Balıkların BY diyetine geri döndürüldüğü EF grubunda dokulardaki n-3 LC-PUFA düzeyleri kısmen toparlanmış, ancak EPA ve DHA seviyeleri BY grubundaki düzeylere tam olarak ulaşmamıştır. Çalışma, KBTY'nın BY ikamesinde büyüme performansını olumsuz etkilemediğini, fakat dokularda n-3 LC-PUFA düzeylerini tam olarak koruyamadığını ortaya koymuştur.

Forster vd. (2011) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Pasifik beyaz karidesi (*Litopenaeus vannamei*) üzerinde, BY yerine SDA içeren genetik olarak modifiye edilmiş soya yağı (SDA-SY) kullanımının büyüme performansı, dokularda n-3 yağ asidi birikimi ve duyuşal özellikler üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışmada, SDA- SY ile BY'nın farklı oranlarda balık unu (FM) yerine geçen soya fasulyesi unu (SBM) ile kombinasyonu değerlendirilmiş ve

üç farklı FM ikame düzeyinde (0%, 50% ve 100%) altı farklı deneysel diyet hazırlanmıştır. Sonuçlar, düşük düzeyde SBM (%0) içeren diyetlerde BY ve SDA- SY arasında büyüme açısından anlamlı bir fark olmadığını; ancak SBM düzeyi arttıkça SDA- içeren diyetlerin büyüme performansını olumsuz etkilediğini göstermiştir. Çalışma süresince SDA- SY ile beslenen karideslerde dokularda SDA düzeylerinin arttığı, ancak EPA ve DHA düzeylerinin BY ile beslenen gruplara kıyasla azaldığı tespit edilmiştir. SDA'nın karidesteki biyotransformasyon kapasitesinin sınırlı olması, özellikle yüksek SBM içeren diyetlerde SDA- SY'nın n-3 LC-PUFA gereksinimini karşılamada yetersiz kaldığını ortaya koymuştur. Bununla birlikte, duyuşal analizler, SDA- SY'nın ürün kalitesi üzerinde olumsuz bir etkisi olmadığını göstermiştir. Elde edilen bulgular, SDA gibi ara ürünlerin metabolik etkilerinin yalnızca substrat düzeyinde rekabetle açıklanamayacağını; tür özgü metabolik kapasite, enzim aktivitesi ve besin maddesi dengesi gibi daha karmaşık biyolojik faktörlerin de bu süreçte belirleyici rol oynadığını ortaya koymuştur.

Nanton vd. (2012) tarafından yapılan bir çalışmada, genetiğı değıştirilmiş soya fasulyesinden elde edilen SDA'nın Atlantik somonunun büyüme performansı ve yağ asidi kompozisyonu üzerindeki etkileri değıerlendirilmiştir. Artan SDA yağı ilavesiyle somonların yem alımı ve kilo alımında kademeli bir azalma gözlemlenmiştir. Diyet ve filetodaki SDA seviyesi artarken, n-3 LC-PUFA seviyesi azalmıştır. Aynı kilo alımına sahip SDA yağı ile beslenen somonların, %50 balık yağı yerine kullanılan kolza yağı ile beslenenlere kıyasla fileto seviyelerinde benzer n-3 LC-PUFA seviyelerine sahip olduğı ve SDA'dan n-3 LC-PUFA sentezinin az olduğı tespit edilmiştir. Ancak, diyetle alınan SDA'nın 20:4n-3'e uzaması, SDA yağı ile beslenen balıkların filetosunda tespit edilmiştir. SDA yağı ile beslenen Atlantik somonunun filetosundaki artan SDA ve 20:4n-3 seviyeleri, insanlarda EPA için LNA'ya kıyasla daha etkili öncüller olabileceğini göstermiştir. Genel olarak, somonidlerin diyetinde minimum n-3 LC-PUFA seviyesi korunması şartıyla, bitkisel yağlarla yüksek oranda balık yağı ikamesi büyüme üzerinde olumsuz bir etki yaratmadan yapılabileceğı belirtilmiştir.

Aksakal vd. (2023) tarafından yapılan bir çalışmada, gökkuşaağı alabalığında balık yağı BY yerine kaz yağı (KZY), SY ve bu yağların karışımının kullanılmasıyla büyüme, yağ asidi profili, mineral içerikleri ve gen ekspresyonu üzerindeki etkiler araştırılmıştır. Sekiz haftalık denemede büyüme ve yaşama oranları etkilenmezken, KZY grubunda vücut lipidleri ve MUFA düzeyi artmış, tüm alternatif yağ gruplarında EPA ve DHA azalmıştır. Gen ekspresyonu analizlerinde $\Delta 6$ -desatürazın SY grubunda, elongazın ise KZY grubunda en yüksek seviyede ifade edildiğı belirlenmiştir. Çalışma, KZY'nin et kalitesine katkısı nedeniyle BY'ya alternatif olarak değıerlendirilebileceğini göstermiştir.

Ghioni vd. (2002) tarafından yapılan bir çalışmada, somonid hücrelerinde SDA ve 20:4n-3 metabolizması ve eikosanoid üretimindeki rolleri araştırılmıştır. 20:4n-3'ün, eikosanoidler için ana öncü AA dönüşümünü engelleyerek ve farklı eikosanoidler üreterek eikosanoid metabolizmasını düzenlediği belirtilmiştir. Araştırmacılar, yüksek saflıkta 20:4n-3 hazırlama yöntemleri geliştirmiş ve bunun Atlantik somonu ve gökkuşağı alabalığı hücrelerindeki metabolizmasını analiz etmişlerdir. Her iki yağ asidinin de öncelikle fosfolipitlere esterlendiği ve SDA'nın 20:4n-3'e dönüştürüldüğü bulunmuştur. 20:4n-3 ile takviye, prostaglandin F2 α seviyelerinde azalmaya yol açarak, AA kaynaklı eikosanoidler üzerindeki engelleyici etkisini göstermiştir. Bu bulgular, su ürünleri yetiştiriciliğinde balık yağlarına ekolojik olarak sürdürülebilir alternatifler için potansiyel olduğunu vurgulamaktadır.

Tocher vd. (2006) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, iki farklı Arktik alabalığında BY ile KBTY içeren diyetlerin büyüme performansı, yağ asidi profili ve LC-PUFA sentezi üzerine etkileri araştırılmıştır. On altı hafta süren denemede her iki diyet de büyüme, yemden yararlanma ve mortalite üzerinde olumsuz bir etki göstermemiştir. KBTY ile beslenen balıklarda karaciğer ve kas dokusunda C18 yağ asitleri (GLA, SDA, ALA) artmış, ancak EPA ve DHA düzeyleri BY grubuna kıyasla azalmıştır. LC-PUFA sentezi Coulin (planktonla beslenen) populasyonda BY grubunda daha yüksek bulunurken, KBTY diyeti Rannoch (piscivor) populasyonda LC-PUFA sentezini kısmen artırmıştır. Bununla birlikte, KBTY dokulardaki n-3 LC-PUFA ve araşidonik asit düzeylerini BY'ya kadar koruyamamıştır. Çalışma, $\Delta 6$ desatüre yağ asitlerince zengin kırkbatıran yağının salmonidlerde BY'nın yerine kullanıldığında doku LC-PUFA seviyelerini yeterince telafi edemediğini ortaya koymuştur.

Villalta vd. (2008) tarafından yapılan bir çalışmada, Senegal dil balığı (*Solea senegalensis*) larvalarında diyetle alınan ARA ve EPA pigmentasyon üzerindeki etkileri incelenmektedir. Larvaları beslemek için farklı ARA ve EPA seviyeleriyle zenginleştirilmiş çeşitli emülsiyonlar kullanılmış ve özellikle SDA içeren KBTY'na odaklanılmıştır. ARA'nın büyüme üzerinde hiçbir etkisi olmadığı, ancak prostaglandin üretimiyle ilişkili olarak pigmentasyonu önemli ölçüde etkilediği bulunmuştur. Aksine, KBTY takviyeleri yüksek ARA seviyelerine rağmen pigmentasyonu artırmış, bu da diyet yağ asidi bileşimi ile pigmentasyon sonuçları arasında bir ilişki olduğunu göstermiştir. Çalışma, ARA/EPA oranının önemini vurgulamakta ve yassı balıklarda ARA kaynaklı malpigmentasyon ile ilgili endişeleri vurgulayarak, su ürünleri yetiştiriciliği uygulamaları ve bitkisel kaynaklı omega-3 kaynaklarının kullanımı için çıkarımlar sunmuştur.

MATERYAL ve YÖNTEM

Denemenin Yürütüldüğü Yetiştiricilik Sistemi

Besleme denemesi, Atatürk Üniversitesi bünyesinde faaliyet gösteren Su Ürünleri Deneysel Araştırmalar Biriminde bulunan kapalı devre su yetiştiricilik sisteminde yürütülmüştür. Deneme, her biri 25 L hacminde olan tanklarda, her tanka 25 adet (2–3 g ağırlığında) balık yerleştirilerek, iki tekerrürlü olarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 10). Sistemde mekanik ve biyolojik filtrasyon ile birlikte sürekli havalandırma ve oksijenlendirme sağlanmıştır (Şekil 11). Su sıcaklığı 15 ± 1 °C, çözülmüş oksijen seviyesi ise >7 mg/L olarak ayarlanmıştır.



Şekil 10. Denemenin sürdürüldüğü yarı kapalı devre su sistemi.



Şekil 11. Filtreler, Oksijen konsantratörü.

Balık Materyali

Çalışma, Atatürk Üniversitesi'ne bağlı olarak faaliyet gösteren alabalık üretim tesisinden temin edilen ortalama 2,6 gram ağırlığındaki gökkuşağı alabalığı yavruları üzerinde yürütülmüştür. Deneme öncesinde, balıklar ilgili tanklara dağıtılmış ve adaptasyon süreçlerini tamamlayabilmeleri amacıyla 7 gün süreyle ticari yemle beslenmiştir.

Kırkbatıran Yağının Elde Edilmesi

Atatürk Üniversitesi kampüs alanından 2024 yaz mevsimi sonunda doğal olarak toplanan kırkbatıran bitkileri laboratuvara getirilmiştir. Bitkiler, üzerlerinde bulunabilecek toprak, sap, taş gibi yabancı materyallerden arındırıldıktan sonra tohumları elde edilmiştir. Oda sıcaklığında kurutulan tohumlar, kilitli poşetler içerisinde -20 °C’de muhafaza edilmiştir. Tohumalardan daha sonra soğuk pres yağ makinesi kullanılarak (EB-1100) yağ elde edilmiştir (Şekil 12). Elde edilen yağ, sıkım sırasında karışabilecek yabancı partiküllerin uzaklaştırılması amacıyla filtreleme işleminden sonra cam şişelere alınarak azot gazı ile yüzeyleri flaşlanmış, kapakları kapatılmış ve kullanılıncaya kadar buzdolabında muhafaza edilmiştir.



Şekil 12. Kırkbatıran tohumu yağının elde edilmesi.

Deneysel Yemler

Çalışmada kullanılan rasyonlar, balıkların fizyolojik ve metabolik ihtiyaçlarını karşılayacak şekilde (~%50 protein, ~%20 yağ) tasarlanmıştır (Tablo 1). Deneysel yemler, farklı oranlarda KBTY ve KTY içerecek şekilde hazırlanmıştır. Kontrol grubunda yalnızca BY kullanılmıştır. Deney grupları aşağıdaki gibi oluşturulmuştur;

- BY: %100 balık yağı,
- KTY: %100 keten tohumu yağı,
- KBTY1: %33 kırkbatıran tohumu yağı, %67 keten tohumu yağı,
- KBTY2: %67 kırkbatıran tohumu yağı, %33 keten tohumu yağı,
- KBTY3: %100 kırkbatıran tohumu yağı.

Tablo 1. Yem Formülasyonu ve Proksimet Kompozisyonu (%).

<i>İçerik</i>	Deneyisel yemler				
	BY	KTY	KBTY1	KBTY2	KBTY3
Balıkunu	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
Tavuk unu	35,15	35,15	35,15	35,15	35,15
Soya protein konsantresi	12,50	12,50	12,50	12,50	12,50
Kan unu	3,65	3,65	3,65	3,65	3,65
Nişasta ¹	17,60	17,60	17,60	17,60	17,60
Karboksimetil selüloz	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Vitamin karması ²	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
Mineral karması ³	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Balık yağı	15,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Kırkbatıran tohumu yağı	0,00	0,00	5,00	10,00	15,00
Keten tohumu yağı	0,00	15,00	10,00	5,00	0,00
Kolin klorid	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
Metiyonin	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Lisin	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
<u>Proksimet kompozisyon</u>					
Protein	50,1	50,4	50,3	50,1	50,6
Yağ	19,2	19,5	19,0	19,4	19,2
Kül	7,1	7,3	7,0	7,2	7,1
Nem	6,1	6,4	6,7	6,5	6,4

^aTrouw Nutrition Premix (Ankara, Turkey), kompozisyon 1g karışım için: vit. A, 2645,50 IU; vit. D3, 220,46 IU; vit. E, 44,09 IU; Vit. B12, 13 mg; riboflavin, 13,23 mg; niyasin, 61,73 mg; D-pantotenik asit, 22,05 mg; menadion, 1,32 mg; folik asit, 1,76 mg; piridoksin, 4,42 mg; tiyamin, 7,95 mg; D-biyotin, 0,31 mg.

^bBernhart Tomarelli salt mixture (ICN Pharmaceuticals, Costa Mesa, CA), kompozisyon (g/100g): CaCO₃, 2,1; CaHPO₄, 73,5; C₆H₈O₇, 0,227; C₆H₄CuNa₂O₇, 0,046; C₁₂H₂₂FeN₃O₁₄ (16-17% Fe), 0,558; MgO, 2,5; C₁₂H₁₀Mn₃O₁₄, 0,835; KI, 0,001; K₂HPO₄, 8,1; K₂O, 6,8; NaCl, 3,06; Na-K, 2,14; ve C₁₂H₁₄O₁₆Zn₃, 0,133. Beş mg Se (sodyum selenit)/kg karışım.

İlk aşamada yemlerin kuru bileşenleri (balık unu, tavuk unu, soya protein konsantresi, kan unu, nişasta ve bağlayıcı maddeler) ön karıştırma işlemine tabi tutulmuştur. Daha sonra homojen bir karışım elde edebilmek amacıyla bu karışım orta kapasiteli endüstriyel mikserde işlenmiştir. Bozulma riski yüksek olan bileşenler, özellikle vitamin ve mineral karışımları ile yağlar, karışımın son aşamasında eklenmiştir. Karışıma ayrıca uygun miktarda su ilave edilerek hamur kıvamı sağlanmıştır (Şekil 13). Peletlenebilir forma getirilen yemler liyofilizatörde - 80°C’de 24 saat boyunca kurutulmuş, ardından balıkların boyutlarına uygun şekilde göz

açıklığına sahip eleklerden geçirilerek sınıflandırılmıştır. Son aşamada yemler, bozulmayı önlemek amacıyla karanlık ortamda, contalı kaplar içerisinde derin dondurucuda muhafaza edilmiştir. Bu şekilde hazırlanan yemler deneme süresi boyunca balıklara düzenli olarak verilmiştir.



Şekil 13. Deneysel yemlerin hazırlanma sürecinin şematik gösterimi.

Balık yağı kullanılan BY grubunda doymuş yağ asitleri (SFA) oranı en yüksek düzeyde bulunmuş (%34,2), bitkisel yağ oranı arttıkça bu değer kademeli olarak düşmüştür. Tekli doymamış yağ asitleri (MUFA) ise gruplar arasında büyük farklılık göstermemiş ve %21–29 aralığında seyretmiştir. Çoklu doymamış yağ asitleri (PUFA) bakımından ise tam tersi bir eğilim gözlenmiştir, balık yağı grubunda %36,7 olan değer bitkisel yağ katkısı ile artarak keten tohumu yağı grubunda %59,7'ye ulaşmıştır. Özellikle n3 yağ asitleri açısından BY grubunda EPA ve DHA oranları yüksek bulunurken, KTY içeren rasyonlarda LNA, KBTY içeren yemlerde ise SDA düzeyinde belirgin bir artış gözlenmiştir. Buna karşı EPA ve DHA değerlerinde dikkate değer bir azalma olmuştur. n6 yağ asitleri miktarı ise bitkisel yağ ilavesi ile yükselmiş, böylece BY grubunda %6,9 olan değer keten tohumu yağı grubunda %16,0'a çıkmıştır. Bu değişim sonucunda n3/n6 oranı balık yağı grubunda en yüksek düzeyde (4,3) tespit edilmiş, kırkbatıran ve keten tohumu yağının farklı oranlarda karışımıyla hazırlanan gruplarda ise bu oran 2,4–2,7 aralığına kadar gerilemiştir (Tablo 2).

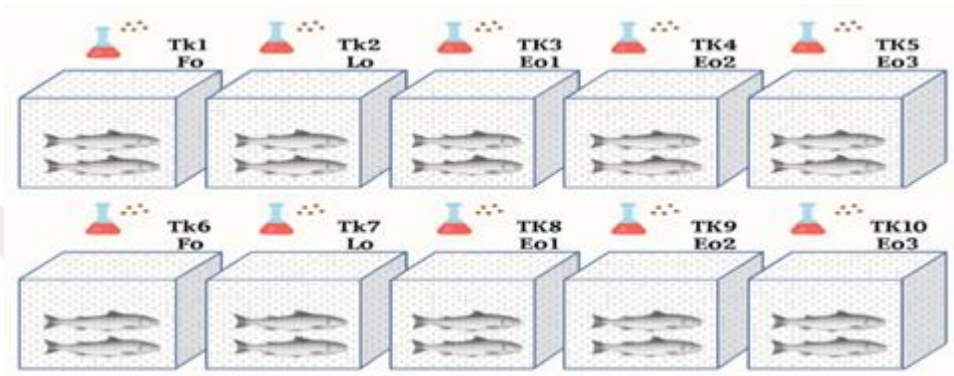
Tablo 2. Deneyisel Yemlerin Yağ Asidi Kompozisyonu (%).

Yağ asidi	Deneyisel yemler				
	BY	KTY	KBTY1	KBTY 2	KBTY 3
14:0	7,4	3,8	3,0	2,8	4,2
14:1	0,9	0,1	0,1	0,1	0,2
16:0	20,1	10,0	9,7	10,3	12,0
16:1	5,1	1,3	1,1	1,1	1,6
17:0	0,8	0,2	0,1	0,2	0,2
17:1	0,1	0,0	0,3	0,0	0,3
18:0	5,3	4,3	4,2	4,4	4,4
18:1n-9	23,0	20,5	20,0	20,2	19,4
18:2n-6	6,1	15,7	16,2	17,3	16,1
20:0	0,5	0,2	0,2	0,2	0,2
18:3n-3	2,7	41,2	39,9	35,3	28,5
18:4n-3	1,9	0,3	3,2	6,1	8,5
21:0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0
20:2n-6	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
20:3n-3	0,5	0,1	0,2	0,2	0,2
20:4n-6	0,6	0,2	0,2	0,2	0,2
20:5n-3	6,8	0,6	0,4	0,4	1,0
22:6n-3	17,8	1,5	1,1	1,0	2,7
ΣSFA	34,2	18,4	17,3	17,9	21,0
ΣMUFA	29,1	21,9	21,5	21,4	21,5
ΣPUFA	36,7	59,7	61,2	60,7	57,5
Σn3	29,8	43,7	44,7	43,0	41,0
Σn6	6,9	16,0	16,5	17,7	16,5
n3/n6	4,3	2,7	2,7	2,4	2,5

Deneme Düzeni ve Yemleme

Deneme, deneyisel yemlere farklı oranlarda eklenen KTY ve KBTY'nin çeşitli parametreler üzerine etkisinin belirlenmesi amacıyla iki tekrarlı ve her tankta 25 balık olacak şekilde tasarlanmıştır (Şekil 14). Deneyisel balıklar 8 hafta süresince hazırlanan yemlerle beslenmiştir. Çalışma başlangıcında, besleme süresince her 15 günde bir olacak şekilde ve çalışma sonunda 0,1 g hassasiyetle balıkların biomas ölçümü gerçekleştirilmiştir.

Balıklar, ağırlıklarının %3-4'ü oranında, günde üç kez (09.00, 13.00 ve 17.00 saatlerinde) yemlenmiştir. Yemleme sırasında tanklardaki balıkların her birinin homojen şekilde yemden alabilmesine dikkat edilmiş, yem tüketimi dikkatlice gözlemlenmiştir. Tanklar her gün sifonlanarak temizlenmiş, ağırlık ölçümlerinde yemleme miktarları yeniden ayarlanmıştır. Sistemdeki su sıcaklığı 15 ± 1 °C, çözünmüş oksijen seviyesi >7 mg/L olacak şekilde sabit tutulmuştur. Denemede kullanılan yemler sabit protein ve yağ içeriğine sahip olup, yalnızca yağ kaynakları farklılaştırılmıştır. Bu kapsamda deneysel gruplarda farklı oranlarda KTY ve KBTY, kontrol grubunda ise BY kullanılmıştır.



Şekil 14. Deneme düzeni: BY: kontrol (%100 balık yağı), KTY0: %100 keten tohumu yağı, KBTY1: %33 kırkbatıran tohumu yağı + %67 keten tohumu yağı, KBTY2: %67 kırkbatıran tohumu yağı + %33 keten tohumu yağı, KBTY3: %100 kırkbatıran tohumu yağı.

Tüm Vücut Proksimet Analizi İçin Örnekleme Süreci

Ham protein, ham yağ, kuru madde ve kül analizleri için seçilen balık örnekleri tartıldıktan sonra sıvı azot içerisinde hızlı bir şekilde (-273 °C) dondurulmuştur. Dondurma işleminin ardından balıklar, etiketlenerek hava ve ışıkla teması önleyecek şekilde ambalajlanmış ve analiz zamanına kadar -80 °C'de muhafaza edilmiştir. Analiz öncesinde, dondurulan örnekler soğutmalı bir kıyma makinesinden iki kez geçirilerek homojen hale getirilmiş ve kullanılabilecek -20 °C'de saklanmıştır (Şekil 15).



Şekil 15. Balıkların tüm vücut proksimat analizine yönelik örnekleme süreci

Büyüme Parametrelerinin Hesaplanması

Çalışmada büyüme ile ilgili parametreler, Arslan vd. (2012) yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır.

%Ağırlık artışı: $([\text{balıkların son ağırlığı} - \text{İlk ağırlık}] * 100) / \text{başlangıç ağırlığı}$

Spesifik büyüme oranı: $([\log_e(\text{son ağırlık}) - \log_e(\text{başlangıç ağırlığı})] * 100) / \text{denemenin gün sayısı}$

Yem değerlendirme katsayısı: $\text{tüketilen yem (g)} / \text{ağırlık kazancı (g)}$

Yaşama oranı: $((\text{başlangıçtaki balık sayısı} - \text{deneme sonundaki balık sayısı})) * 100 / (\text{deneme başındaki balık sayısı})$

Proksimet Analizleri

Ham yağ

Metanol ve kloroform, 1:2 oranında karıştırılarak hazırlanan çözücü karışımına, her bir litreye 0,25 gram BHT (bütillenmiş hidroksitoluen) ilave edilerek ekstraksiyon için gerekli solvent hazırlanmıştır. Toplam yağ miktarının belirlenebilmesi amacıyla, her örnekten yaklaşık 1 gram doku alınarak homojenizasyon tüplerine yerleştirilmiştir. Tüplere 20 ml çözücü solvent eklenmiş ve homojenizatör kullanılarak 60 saniye boyunca doku tamamen parçalanana kadar işlem uygulanmıştır. Bu işlemin ardından, oluşturulan çözelti karışımı vakum altında süzülerek ayrılmıştır. Elde edilen süzüntüler cam tüplere aktarılmış ve her tüpe, hacmin %2'si oranında $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ çözeltisi eklenmiştir. Ardından tüplere 1 dakika süreyle yüksek saflıkta nitrojen gazı verilmiş, sonrasında tüpler vortex cihazında yine 1 dakika karıştırılmıştır. Karıştırma işlemini takiben tüplere tekrar 1 dakika boyunca nitrojen gazı uygulanmış ve contalı kapaklarla hava geçirmeyecek şekilde sıkıca kapatılmıştır. Bu şekilde hazırlanan tüpler, oda sıcaklığında ve ışık almayan bir ortamda yaklaşık 24 saat bekletilerek faz ayrımının gerçekleşmesi sağlanmıştır. Bekleme süresi sonunda tüplerde oluşan alt faz, 3 ml'lik cam pastör pipeti ile dikkatlice çekilerek yeni cam tüplere aktarılmıştır. Alt faz tamamen toplandıktan sonra üzerine bir miktar kloroform ilave edilerek örnekler ısıtmalı evaporatöre yerleştirilmiş ve azot gazı akışıyla solventin buharlaştırılması başlatılmıştır. Solventin buharlaştırılması sırasında kullanılacak 10 ml'lik vida kapaklı cam deney tüpleri numaralandırılmış ve her birinin darası, 0,0001 g hassasiyetindeki terazi ile ölçülüp kaydedilmiştir. Solvent ve kloroformun bir kısmı uçurulduktan sonra kalan çözelti bu tüplere aktarılmış, ısıtma işlemi sonlandırılarak uçurma işlemi azot gazı altında devam ettirilmiştir. Solventin tamamen uçurulmasının ardından tüpler belirli aralıklarla tartılmış, ağırlık sabitleninceye kadar ölçüm tekrarlanmıştır. Son ağırlık değeri

kaydedildikten sonra tüplere yaklaşık 0,5–1 ml kloroform eklenmiş ve contalı kapaklarla kapatılarak azot gazı altında -20°C’de saklanmıştır (Şekil 16) (Folch vd. 1957).



Şekil 16. Numunelerden toplam yağın elde edilme süreci

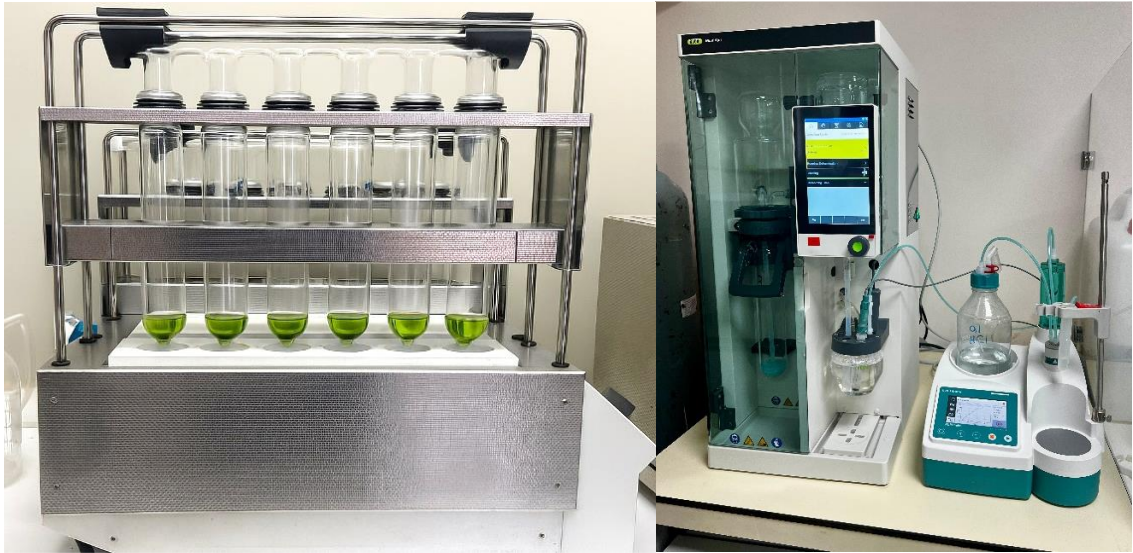
Ham protein

Protein analizi için hazırlanan örneklerden yaklaşık 0,25 g alınarak 300 mL hacimli analiz tüplerine tartılmıştır. Üzerine 2 adet Kjeldahl tableti ve yaklaşık 20 mL %98’lik sülfürik asit (H_2SO_4) eklenmiştir. Numunelerin bulunduğu tüpler, işlemi için yakma ünitesine (Buchi-SpeedDigester K-436) yerleştirilmiştir. İşlem sırasında oluşan asit buharlarının uzaklaştırılması için marka model vakum pompası kullanılmıştır.

Numuneler aşağıdaki sıcaklık ve süre programına göre yakılmıştır:

1. 480 °C’de 10 dakika
2. 550 °C’de 10 dakika
3. 490 °C’de 65 dakika

Yakma işlemi tamamlandıktan sonra tüpler yaklaşık 30 dakika süreyle soğutularak oda sıcaklığına getirilmiştir. Soğutulan örnekler, otomatik distilasyon ve titrasyon işlemleri için BUCHI MultiKjel cihazına yerleştirilmiştir. Distilasyonla elde edilen distilat, Metrohm Eco Titrator cihazında titrasyona tabi tutulmuştur. Son olarak, harcanan HCl miktarı otomatik olarak cihaz tarafından hesaplanarak örneklerdeki ham protein oranı elde edilmiştir (Şekil 17). Uygulanan yöntem, yem ürünlerinde toplam azot ve protein tayini amacıyla (AOAC 1993) standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 17. Protein analizi işlemi

Nem ve kuru madde

Her tanktan iki tekerrür olacak şekilde porselen krozeler numaralandırılarak, genleşme etkisinin ortadan kaldırılması amacıyla 100 °C’de iki saat süreyle etüvde bekletilmiştir. Süre sonunda etüvden çıkarılan krozeler, desikatörde soğutulduktan sonra 0,0001 g hassasiyetle daraları alınarak kaydedilmiştir. Tartım işlemi tamamlanan krozelerin her birine yaklaşık 10 g örnek konulmuş ve 100 °C’de sabit ağırlığa ulaşınca kadar (~18 saat) etüvde kurutma işlemi uygulanmıştır. Kurutma sürecinde, etüvden çıkarılan numuneler ortam neminden etkilenmemesi için desikatörde muhafaza edilmiştir (Şekil 18). Numunelerin kuru madde, Gökalp vd. (2001) tarafından bildirilen aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır. Nem miktarı ise 100-%kuru madde olarak belirlenmiştir.

$$\% \text{ Kuru Madde} = \frac{(\text{Son Ağırlık} - \text{İlk Ağırlık})}{\text{Örnek Ağırlığı}} \times 100$$



Şekil 18. Kuru madde miktarının belirlenmesi

Ham kül

Ham kül tayininde kullanılacak olan kruzeler, 525 °C sıcaklıktaki etüvde 6–8 saat süreyle yakılarak organik kalıntılardan arındırılmıştır. Ardından kruzeler desikatöre alınarak oda sıcaklığına kadar soğutulmuş ve 0,0001 g hassasiyetindeki analitik terazide daraları belirlenmiştir. Her kruzenin içerisine yaklaşık 10 gram numune tartılarak eklenmiş ve örnekli kruzeler 100 °C'deki etüvde 10–12 saat boyunca ön kurutma işlemine tabi tutulmuştur. Kurutmanın ardından, kruzeler yerleştirilmiş ve sıcaklık kontrollü bir şekilde artırılmıştır. Fırın sıcaklığı 525 °C'ye ulaştığında, numuneler bu sıcaklıkta yaklaşık 18 saat süreyle yakılarak tüm organik maddelerin uzaklaştırılması sağlanmıştır. Yakma işlemi tamamlandıktan sonra kruzeler desikatöre alınarak oda sıcaklığına kadar soğutulmuş ve son ağırlıkları hassas terazide ölçülerek kaydedilmiştir. Kül oranı, aşağıda verilen formüle göre % cinsinden hesaplanmıştır (Gökalp vd. 2001) (Şekil 19).



Şekil 19. Ham kül tayini aşaması.

Yağ Asidi Analizleri

Yağ asidi metil esterlerinin hazırlanması

Toplam yağ analizlerinden elde edilen saf yağ örnekleri, yağ asidi profilinin belirlenmesi amacıyla Metcalfe ve Schmitz (1961) tarafından geliştirilen yöntemle hazırlanmıştır. Deney tüplerinde bulunan yağ örneklerine 1,5 ml 2 M NaOH çözeltisi eklenmiş; ardından cam tüplere yüksek saflıkta azot gazı verilerek contalı kapaklarla hava almayacak şekilde kapatılmıştır. Bu tüpler, 80°C'ye ayarlanmış etüvde 60 dakika süreyle inkübasyona bırakılarak sabunlaşma aşaması tamamlanmıştır. İnkübasyon sonrası oda sıcaklığında soğutulan tüplere, %14'lük bor triflorür (BF₃) çözeltisinden 2 ml ilave edilmiş ve tekrar nitrojen gazı ile doldurulmuştur. Numuneler, bu aşamada yarım saat boyunca yeniden 80°C'de inkübe edilmiştir. Soğutma işleminin ardından metil esterlerin hazırlanmasına geçilmiştir. Her tüpe 1 ml hekzan eklenmiş ve vortex cihazı yardımıyla iyice karıştırılmıştır. Sonrasında tüplere 1 ml distile su ilave edilerek tekrar karıştırılmıştır. Bu karışım üzerine tekrar 1 ml hekzan eklenmiş ve metil esterlerin üst fazda toplanmasını sağlayan faz ayrımı gerçekleştirilmiştir. Üstte kalan şeffaf tabaka, cam pastör pipeti ile dikkatlice çekilerek, içinde sodyum sülfat (Na₂SO₄) bulunan yeni tüplere aktarılmış ve kalıntılardan ayrıştırılmıştır. Ardından saf hekzan fazı, cam pastör pipeti ile 2 ml'lik cam vial şişelere alınmış, kapakları nitrojen gazı altında kapatılarak sızdırmaz hale getirilmiştir. Hazırlanan bu örnekler, yağ asidi metil esterlerinin analiz edilmesi amacıyla gaz kromatografi (GC) cihazına yüklenmiştir. Analiz gerçekleşinceye kadar örnekler, -20°C'de, hava ve ışık geçirmeyecek koşullarda saklanmıştır (Şekil 20).



Şekil 20. Yağ asidi metil esterlerinin hazırlanma süreci

Yağ asitlerinin tayini

Yağ asidi metil esterlerinin hazırlanması Metcalfe ve Schmitz (1961) yöntemine göre gerçekleştirilmiştir. Daha önce ekstrakte edilen yağlara 2 M NaOH çözeltisinden 1,5 mL ilave edilmiş, tüpler azot gazı ile hava almayacak şekilde kapatılmış ve 80 °C sıcaklıktaki etüvde

(Binder FD 53) 1 saat süreyle tutulmuştur. Bu aşamada yağların sabunlaşması sağlanmıştır. İnkübasyon süresinin tamamlanmasının ardından tüpler oda sıcaklığına getirilmiş ve soğuması beklenmiştir. Daha sonra her bir örneğe %14'lük BF_3 (boron triflorür metanol) çözeltisinden 2 mL eklenmiş, aynı şekilde azotla kapatılarak tekrar 80 °C'de 30 dakika etüvde bekletilmiştir. İşlem sonrası tüpler yeniden oda sıcaklığına alınmış ve soğutulmuştur. Soğuyan örnekler 1 mL hekzan eklenerek vortekslenmiş, ardından 1 mL ultra distile edilmiş su ilave edilerek tekrar vorteksleme yapılmıştır. Faz ayrımı sonrasında üstteki hekzan tabakası pastör pipeti ile alınarak Na_2SO_4 içeren yeni tüplere aktarılmıştır. Toplanan hekzan fazları, 2 mL hacimli viallere transfer edilmiş, azot ile doldurularak kapatılmıştır. Hazırlanan numuneler, yağ asidi bileşimlerinin belirlenmesi amacıyla Agilent 6980 GC/MS cihazında analiz edilmiştir (Şekil 21). Elde edilen kromatogramlarda yer alan pikler, içeriği bilinen yağ asidi standartları (Supelco Component FAME Mix) ile karşılaştırılmış ve sonuçlar, toplam tespit edilen yağ asitlerinin yüzdesi olarak hesaplanmıştır.

Gaz Kromatografisine ait koşullar:

Cihaz: Kütle Gaz Kromatografisi (GC/MS), Agilent 6980

Dedektör: FID

Kolon: CP-Sil 88, Agilent 6890 N

Dedektör sıcaklığı: 300 °C

Kolon sıcaklığı: 175 °C'de 20 dk bekleme; ardından dakikada 2 °C artışla 205 °C'ye ulaşma ve 24 dk bekleme

Taşıyıcı gaz: Helyum (30 L/dk)



Şekil 21. Gaz Kromatografisi Cihazı (Agilent 6980 (GC/MS))

Gen Ekspresyon Analizleri

Total RNA izolasyonu

-80 °C’de muhafaza edilen karaciğer örnekleri önce buz üzerinde çözdürülmüştür. RNAlater solüsyonu uzaklaştırıldıktan sonra örnekler 2 ml’lik ependorf tüplerine aktarılmış ve üzerine 1 ml TRIzol eklenerek homojenizasyon işlemi blender çubuğu yardımıyla manuel olarak gerçekleştirilmiştir. Oda sıcaklığında (15–30 °C) 5 dakika inkübe edilen homojenata 0,2 ml kloroform ilave edilmiş, 15 saniye kuvvetlice çalkalandıktan sonra tekrar aynı sıcaklık aralığında 2–3 dakika bekletilmiştir. Ardından 12500 rpm’de, +4 °C’de 15 dakika santrifüj edilerek üst faz ayrılmış ve 0,5 ml izopropanol içeren yeni tüplere aktarılmıştır. Hafifçe karıştırılan örnekler oda sıcaklığında 10 dakika inkübasyona bırakıldıktan sonra aynı hız ve sıcaklık koşullarında 10 dakika santrifüj edilmiştir. Süpernatant uzaklaştırıldıktan sonra peletler, önceden -20 °C’de soğutulmuş %75 etanol ile yıkanmış, vortekslenmiş ve 9500 rpm’de 5 dakika santrifüj edilmiştir. Yeniden süpernatant uzaklaştırılarak peletler bir gece steril koşullarda kurumaya bırakılmış, ardından üzerine 40 µl RNaz-free su eklenmiş ve 55–60 °C’de 10 dakika inkübe edilmiştir. Elde edilen RNA örnekleri, kullanılacakları zamana kadar -80 °C’de saklanmıştır (Özdemir 2021).

RNA’nın kalitatif değerlendirilmesi

RNA örneklerinin bütünlüğünü incelemek amacıyla, her bir örnekten 1 µL alınarak 3,5 µL ddH₂O, 0,5 µL 20× MOPS tamponu ve 5 µL formamid içeren karışıma eklenmiştir. Hazırlanan karışım 65 °C’de 15 dakika süreyle etüvde inkübasyona bırakılmıştır. Jel hazırlığı için ise 0,1 g agaroz, 4,38 mL 20× MOPS ve ddH₂O ile 15,6 µL formamid karışımı erlenmayerde çözülerek mikrodalga fırında 3–4 dakika kaynatılmış, ardından musluk suyu altında hafifçe soğutulmuştur. Soğutma işlemi tamamlandıktan sonra, karışıma 12,8 µL etidyum bromür (EtBr) eklenerek jel dökümü gerçekleştirilmiştir. Jel polimerize olduktan sonra elektroforez küvetine yerleştirilmiş ve üzerine 1× MOPS tamponu, jelin yüzeyini kaplayacak şekilde eklenmiştir. RNA örnekleri kuyucuklara yüklendikten sonra elektroforez işlemi 90 V gerilim altında 30 dakika süreyle yürütülmüştür. Çalışma sonunda jel, UV ışığı altında incelenmiş ve RNA bantları görüntülenmiştir.

RNA’nın kantitatif belirlenmesi

RNA izolasyonu sonrası miktar tayini Nanodrop cihazı ile OD260/OD280 nm’de yapılmıştır. Konsantrasyonu 800–1000 ng/µl arasında olmayan örnekler seyreltilmiş ve ölçümlerde OD260/OD280 oranı ~2 bulunmuştur (Özdemir 2021). Bu değer, RNA’nın saflığını doğrulamış ve sonraki analizler için uygun görülmüştür.

DNase uygulaması

Balık dokularından elde edilen toplam RNA örnekleri, olası genomik DNA kalıntılarını uzaklaştırmak amacıyla Amplification Grade DNase I (Deoxiribonuclease I) ile işleminden geçirilmiştir. DNase uygulaması sonrasında örnekler kontaminasyondan korunacak şekilde -20 °C’de saklanmış ve cDNA sentezi yapılncaya kadar muhafaza edilmiştir.

Reverse transkripsiyon (RT-PCR)

cDNA sentezi amacıyla High-Capacity cDNA Reverse Transcription Kit kullanılmıştır. Bu işlem için her doku örneği başına toplam 10 µL hacminde RT master mix hazırlanmıştır. DNase uygulaması yapılmış RNA örnekleri bu karışımla birleştirilerek ters transkripsiyon reaksiyonu gerçekleştirilmiş ve cDNA elde edilmiştir. RT-PCR programı sırasıyla; 25 °C’de 10 dakika başlangıç inkübasyonu, 37 °C’de 120 dakika ters transkripsiyon basamağı, 85 °C’de 5 dakika enzim inaktivasyonu ve 4 °C’de ∞ süreli bekleme aşamalarını içermektedir.

Kantitatif PCR (qPCR)

Biyoenformatik analizlerden elde edilen bulguları doğrulamak amacıyla, gökkuşağı alabalığı dokularında yağ asidi metabolizmasında görev alan desatürasyon (*Fads2a*, *Fads2b*) ve elongasyon (*Elovl5*, *Elovl2*) genlerine ait transkript miktarları (kopya sayısı/µL) qPCR cihazında SYBR Green PCR Kit yöntemi kullanılarak belirlenmiştir (Özdemir 2021). Reaksiyon karışımı; her tüp için 10 µL SYBR Green, 5 µL DNase/RNase free saf su, 2 µL forward primer, 2 µL reverse primer ve 1 µL cDNA olacak şekilde hazırlanmıştır. Tüm örnekler iki tekerrür halinde çalışılmış, ayrıca her analiz için bir negatif kontrol (kör) dahil edilmiştir.

Balıklarda farklı diyet yağ asitlerinin söz konusu genlerin mRNA ekspresyon seviyeleri üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla $2^{-\Delta\Delta Ct}$ metodu kullanılmıştır (Özdemir 2021). qPCR koşulları; 90 °C’de 15 dakika başlangıç denatürasyonu, ardından her döngüde 95 °C’de 20 saniye denatürasyon, genlere özgü optimum bağlanma sıcaklığında 30 saniye annealing ve 72 °C’de 30 saniye uzama basamağından oluşmuştur. Bu döngü toplamda 40 kez tekrarlanmıştır. Referans genler olarak beta-aktin ve elongasyon faktör 1 seçilmiş ve aynı qPCR prosedürü bu genler için de uygulanmıştır (Özdemir 2021).

Sonuçların Hesaplanması

qPCR uygulamalarından elde edilen Ct değerleri, hedef genlerin ekspresyon düzeylerinin değerlendirilmesi için normalize edilmiştir. Diyetlerde kullanılan farklı yağ asidi kaynaklarının gen ekspresyonu üzerindeki etkilerinin belirlenmesinde $2^{-\Delta\Delta Ct}$ metodu kullanılmıştır.

İstatistiksel Analizler

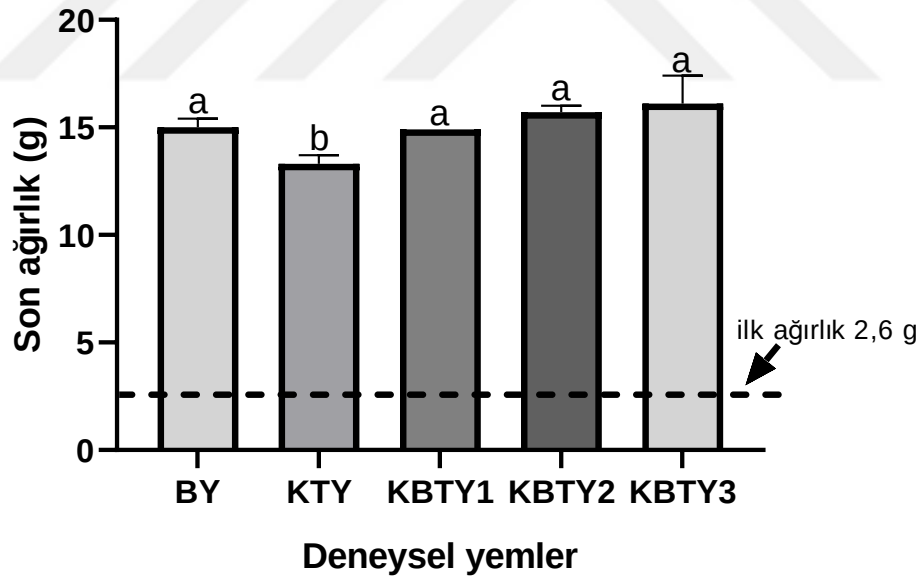
Bu çalışmada, deneysel yem uygulamaları iki tekerrürlü olarak tasarlanmış olup, elde edilen veriler ortalama $\pm$ standart sapma şeklinde sunulmuştur. Diyetel uygulamaların hedef parametreler üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla veriler, tek yönlü varyans analizine (One-Way ANOVA) tabi tutulmuştur. Diyetel uygulamaların herhangi bir parametre üzerinde anlamlı bir etki göstermesi durumunda, gruplar arasındaki farklılıklar Duncan'ın çoklu karşılaştırma testi ile belirlenmiştir. Tüm istatistiksel analizlerde anlamlılık düzeyi $p < 0,05$ olarak kabul edilmiştir.



ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Büyüme Performansı

Sekiz haftalık deneme sonunda başlangıç ağırlığı ortalama 2,6 g olan gökkuşağı alabalıkları, farklı yağ kaynaklarına bağlı olarak 13,3–16,1 g arasında son ağırlıklara ulaşmıştır (Şekil 22; Tablo 3). KTY grubunda büyüme performansı (son ağırlık ve SB) diğer gruplara göre önemli derecede düşük bulunurken ($P<0,05$), kırkbatıran yağı içeren karışımlar (KBTY1–3) kontrol grubu ile istatistiksel olarak benzer büyüme sağlamış ve KBTY3 grubunda ($16,1\pm1,3$ g) en yüksek değer elde edilmiştir. Diğer yandan KTY grubunun % büyüme değeri kontrol grubu ve KBTY1 grubu ile benzer bulunmuştur. Yem değerlendirme katsayısı (YDK) gruplar arasında 1,00–1,09 gibi dar bir aralıkta kalmış, yaşama oranı ise %88–98 arasında gerçekleşmiştir. Büyüme verileri genel anlamda değerlendirildiğinde, tek başına keten yağı kullanımının büyüme üzerinde sınırlayıcı olabileceğini, ancak kırkbatıran yağı ilavesinin bu sınırlamayı giderebildiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 22. Sekiz hafta boyunca farklı oranlarda kırkbatıran yağı içeren yemlerle beslenen gökkuşağı alabalıklarının ortalama son ağırlıkları (ortalama $\pm$ standart sapma). Farklı harflerle gösterilen sütunlar, gruplar arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılık bulunduğunu ifade etmektedir ($p<0,05$).

Tablo 3. Sekiz Hafta Boyunca Farklı Oranlarda Kırkbatıran Tohumu Yağı İçeren Yemlerle Beslenen Gökkuşaağı Alabalıklarının Büyüme Performans Değerleri (Ortalama $\pm$ Standart Sapma). Aynı Satırda Yer Alan Farklı Harfler, Gruplar Arasında İstatistiksel Olarak Anlamlı Farklılık Olduğunu Göstermektedir ($p<0,05$).

Parametre	Deneysel yemler				
	BY	KTY	KBTY1	KBTY2	KBTY3
Son ağırlık (g)	15,0 $\pm$ 0,4 ^a	13,3 $\pm$ 0,4 ^b	14,9 $\pm$ 0,0 ^a	15,7 $\pm$ 0,3 ^a	16,1 $\pm$ 1,3 ^a
Ağırlık kazancı (%) ¹	475,1 $\pm$ 10,9 ^{ab}	408,0 $\pm$ 17,3 ^b	472,2 $\pm$ 0,7 ^{ab}	501,5 $\pm$ 23,8 ^a	521,1 $\pm$ 47,9 ^a
YDK ²	1,07 $\pm$ 0,08	1,09 $\pm$ 0,07	1,07 $\pm$ 0,01	1,00 $\pm$ 0,00	1,07 $\pm$ 0,08
SB ³	3,12 $\pm$ 0,03 ^a	2,90 $\pm$ 0,06 ^b	3,11 $\pm$ 0,00 ^a	3,20 $\pm$ 0,07 ^a	3,26 $\pm$ 0,14 ^a
Yaşama oranı (%) ⁴	90,0 $\pm$ 8,0	98,0 $\pm$ 2,8	88,0 $\pm$ 0,0	94,0 $\pm$ 2,8	90,0 $\pm$ 2,8

¹Ağırlık kazancı (%) = [(son ağırlık – ilk ağırlık) x 100] / ilk ağırlık

²Yem değerlendirme kat sayısı (YDK) = tüketilen yem (g) / ağırlık kazancı (g)

³Spesifik büyüme (SB) = [(ln son ağırlık – ln ilk ağırlık) x 100] / deneme süresi (gün)

⁴Yaşama oranı (%) = 100 - ((Deneme başındaki balık sayısı) - (Deneme sonundaki balık sayısı)) * 100 / (Deneme başındaki balık sayısı)

Çalışmamızda keten yağı ile beslenen grupta büyümenin sınırlı kalması, kırkbatıran yağı karışımı ile beslenen gruplarda ise büyümenin kontrol grubuna benzer hatta en yüksek seviyelere ulaşması, literatürdeki birçok bulguyla örtüşmektedir. Gökkuşaağı alabalığı üzerine yapılan çalışmalar da bu eğilimi destekler niteliktedir. Cleveland vd. (2012), BY, KTY, KBTY ve karışık bitkisel yağ içeren diyetleri karşılaştırdıkları 73 günlük çalışmada, KBTY grubunun KTY'dan daha yüksek büyüme sağladığını ancak BY grubunun gerisinde kaldığını rapor etmiştir. Lewis vd. (2013), gökkuşaağı alabalığında KTY ve kanola yağı bazlı diyetlere farklı düzeylerde mikro besin takviyesi uygulanmasına rağmen Büyüme performansı açısından gruplar arasında anlamlı bir fark bulunmamış, yalnızca en yüksek takviye grubunda yem tüketimi artmıştır. Diğer yandan, Kajbaf vd. (2025), gökkuşaağı alabalığında BY'nın tamamen ikame edilmesine rağmen alg yağı ve KTY gruplarında büyümenin BY'a eşdeğer korunduğunu, fakat soya yağı + kanola yağı + kişniş yağı karışımı içeren bitkisel yağ karışımlarında ise büyümenin sınırlanabildiğini vurgulamıştır.

Diğer salmonid türlerinde de KBTY'nın büyümeyi genellikle koruduğu gözlenmektedir. Tocher vd. (2006), Arktik alabalığında KBTY grubunda büyümenin BY ile benzer olduğunu rapor etmiştir. Miller vd. (2007), Atlantik somonu parrlarında KBTY'nın büyümeyi BY'na eşdeğer düzeyde sürdürdüğünü; Miller vd. (2008) ise deniz aşamasında KBTY ve KY'nın BY ile aynı büyüme performansını sağladığını belirtmiştir. Bununla birlikte Codabaccus vd. (2011), uzun süreli parr-smolt denemesinde KBTY grubunda büyümenin KY ile benzer kaldığını, fakat BY'dan daha düşük olduğunu ifade etmiştir. Nanton vd. (2012) ise büyük boy somonlarda SDA-soya ile BY'nın %50 ikamesinde büyümenin korunduğunu, ancak %100 ikamede yem alımı ve büyümenin belirgin biçimde azaldığını ortaya koymuştur.

Benzer sonuçlar diğer deniz ve tatlısu türlerinde de rapor edilmiştir. Díaz-López vd. (2010) çipura balığında, Bell vd. (2006) Atlantik morinasında, Dupont-Cyr vd. (2022) Arktik/brook charr’da ve Jaya-Ram vd. (2016) çizgili yılanbaşında KBTY ve KTY kullanımının büyümeyi BY’ya eşdeğer şekilde koruduğunu göstermiştir. Buna karşılık, Alhazzaa vd. (2011) barramundi üzerinde yürüttükleri çalışmalarda KBTY grubunda büyümenin balık yağı BY ve KY’na göre daha düşük olduğunu belirtmiştir. Ozel vd. (2018), Karadeniz alabalığında BY’nın %50’ye kadar bitkisel yağı ile ikamesinde büyümenin korunduğunu, ancak KTY oranı arttıkça büyümenin sınırlanabildiğini bildirmiştir. Daha yakın tarihli bir çalışmada Yuan vd. (2024), *Onychostoma macrolepis* üzerinde yürüttükleri denemede KTY ve SY içeren diyetlerde büyümenin BY ile eşdeğer olduğunu rapor etmiştir.

Kabuklular ve larvalar üzerine yapılan çalışmalar ise tür-spesifik farklılıklar ortaya koymaktadır. Forster vd. (2011), Pasifik Beyaz Karides’te yüksek balık unu içeren diyetlerde SDA-soya yağının büyümeyi BY ile eşdeğer koruduğunu, ancak düşük balık unu düzeyinde yetersiz n-3 LC-PUFA arzı nedeniyle büyümenin azaldığını bildirmiştir. Villalta vd. (2008) ise Senegal dil balığı larvalarında KBTY ile zenginleştirilen Artemia’nın büyümeyi anlamlı biçimde artırdığını göstermiştir.

Tüm Vücut Proksimet Değerleri

Farklı yağlar içeren yemlerle 8 hafta boyunca beslenen balıklardan alınan tüm vücut örneklerinden elde edilen proksimet sonuçları Tablo 4’te verilmiştir. Protein, yağ nem ve kül oranları diyetel uygulamalardan önemli derecede etkilenmemiş olup sırasıyla ortalama %15,3, %9,2, %72,4 ve %2,1 olarak kaydedilmiştir.

Tablo 4. Farklı Oranlarda Kırkbatıran Tohumu Yağı İçeren Yemlerle 8 Hafta Boyunca Beslenen Gökkuşluğu Alabalığında Tüm Vücut Proksimet İçeriği (%) (Ortalama±Std Sapma). Değerler Üzerinde Harf Olmaması İstatistik Olarak Önemli Fark Olmadığını Göstermektedir.

Parametre	Deneyisel yemler				
	BY	KTY	KBTY1	KBTY2	KBTY3
Protein	15,4±0,6	15,4±0,5	15,3±0,2	15,1±0,4	15,6±0,4
Yağ	9,6±0,0	9,3±0,0	8,8±0,6	8,8±0,0	9,4±0,2
Nem	72,2±0,1	72,8±0,6	73,0±0,4	72,2±1,2	71,7±0,4
Kül	2,0±0,2	2,0±0,0	2,2±0,0	2,3±0,2	2,1±0,0

Literatürde farklı türlerde yapılan çalışmalar farklı sonuçlar ortaya koymuştur. Tocher vd. (2006), Arktik alabalığında BY ve KBTY temelli yemleri kullanıldığında balıkların tüm vücut nem, protein, yağ ve kül içeriklerinde anlamlı bir fark oluşmadığını bildirmiştir. Benzer

şekilde Díaz-López vd (2009), çipura'da %50 kırkbatıran yağı ikamesinin tüm vücut protein, yağ, kül ve nem değerlerini etkilemediğini rapor etmiştir. Alhazaa vd. (2011), barramundi'de BY, KBTY ve kanola yağı ile beslenen balıklarda kuru madde, protein, yağ ve kül değerleri arasında farklılık olmadığını, diyet faktörünün bu parametreleri değiştirmediğini belirtmiştir.

Diğer yandan Lewis vd. (2013), gökkuşağı alabalığında mikronutrient takviyeli bitkisel yağ bazlı diyetlerde nem oranının hafif arttığını, protein düzeyinin ise en yüksek takviye grubunda azaldığını; yağ ve kül değerlerinin ise diyetlerden etkilenmediğini göstermiştir. Kajbaf vd. (2025) tarafından seçilmiş gökkuşağı alabalığı ailelerinde yapılan çalışmada, protein içeriği tüm gruplarda sabit kalmış, ancak yağ ve nem arasında ters yönlü bir ilişki gözlenmiştir. Balık yağı grubunda yağ oranı yüksek (%6,0) iken nem daha düşük, keten yağı + alg yağı grubunda ise yağ daha düşük (%4,5) ve nem daha yüksek bulunmuştur. Aksakal vd. (2023) da benzer şekilde, kaz yağı kullanılan grupta yağ oranının arttığını, nemin azaldığını; soya ve morina yağı gruplarında ise daha düşük yağ–daha yüksek nem ilişkisi bulunduğunu rapor etmiştir.

Dupont-Cyr vd. (2022), Arktik ve brook alabalıklarında KTY ile beslenen balıkların kas protein ve yağ içeriklerinin BY grubuyla benzer olduğunu bildirmiştir. Yuan vd. (2024) ise *Onychostoma macrolepis*, sazan türü balık üzerinde yaptıkları çalışmada protein ve kül değerlerinin sabit kaldığını, ancak KTY ve SY gruplarında yağ oranlarının BY'na göre daha yüksek, nemin ise daha düşük bulunduğunu belirtmiştir.

Kabuklular üzerinde yapılan bir çalışmada Forster vd. (2011), Pasifik beyaz karidesin (*Litopenaeus vannamei*)'de SDA-soya yağı grubunda tüm vücut yağ oranının balık yağı grubuna kıyasla daha yüksek olduğunu, buna karşın nem, protein ve kül değerlerinde küçük farklılıklar dışında belirgin bir değişim olmadığını göstermiştir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, literatür bulguları tüm vücut proksimet kompozisyonunda protein ve kül içeriklerinin genellikle sabit kaldığını, değişimlerin esasen yağ ve nem arasındaki ters yönlü ilişkiden kaynaklandığını ortaya koymaktadır. Balık yağı içeren gruplarda yağ oranı yüksek ve nem düşük seyrederken, bitkisel yağ ikamelerinde yağ düşmekte ve nem artmaktadır.

Tüm Vücut Yağ Asidi Profili

Sekiz haftalık deneme sonunda gökkuşağı alabalıklarının tüm vücut yağ asidi kompozisyonuna ilişkin sonuçlar Tablo 5 ve Şekil 23'te sunulmuştur. Kullanılan farklı yağ kaynakları yağ asidi profili üzerinde önemli değişikliklere sebep olmuştur ($p<0,05$).

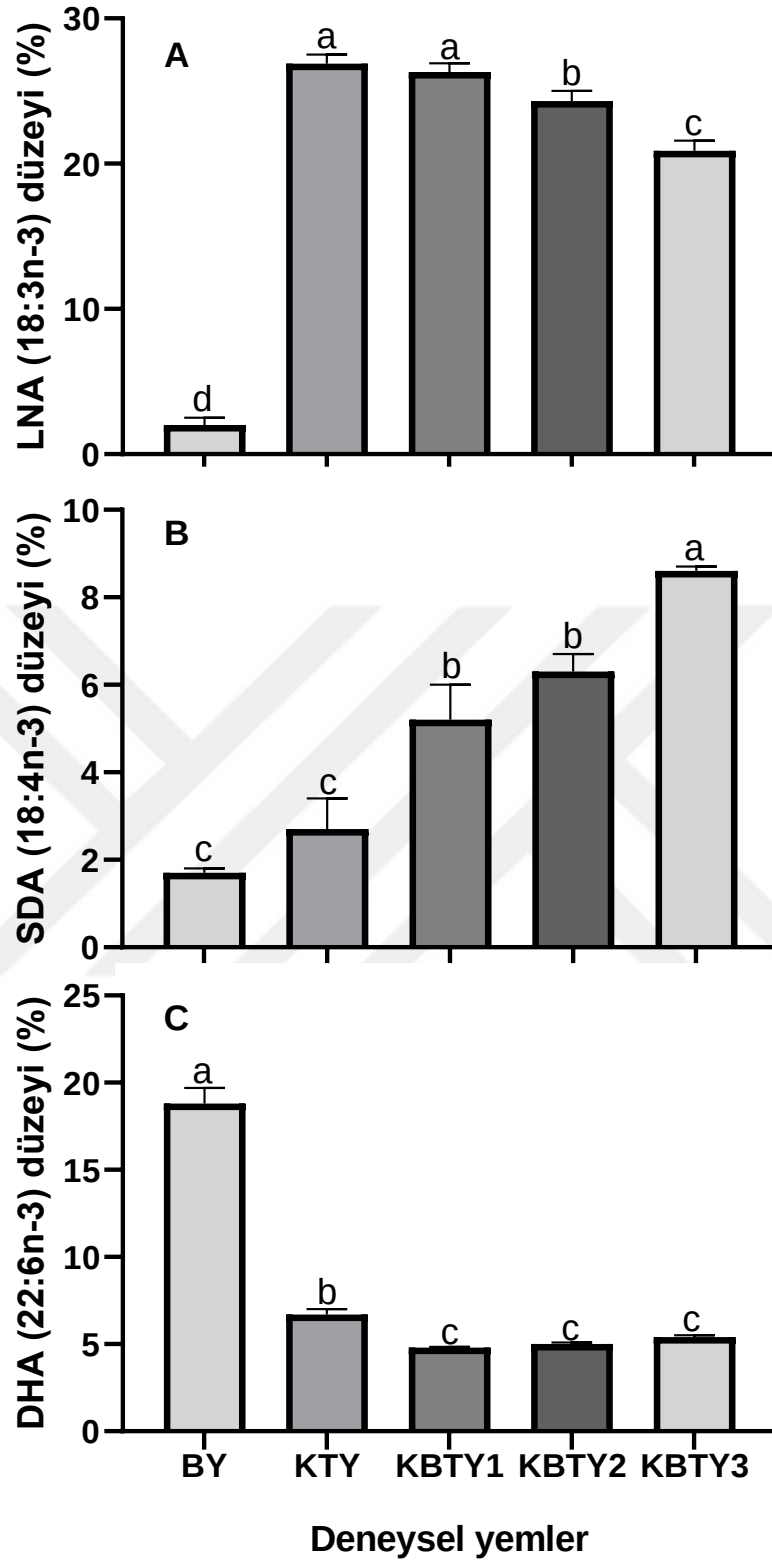
Kontrol grubunda (BY) en yüksek SFA oranı %28,3 olarak tespit edilmiş ve bu değer diğer deneysel gruplardan önemli derecede yüksek bulunmuştur ($p<0,05$). Benzer şekilde MUFA düzeyleri de kontrol grubunda en yüksek değere (%34,0) ulaşmış, diğer yandan yemdeki KBTY'nın artışıyla birlikte düşüş eğilimi göstermiştir. Buna karşılık PUFA oranları, KTY ve KBTY içeren yemlerle beslenen balıklarda kontrol grubuna göre önemli derecede yüksek bulunmuştur. Yemdeki KTY artışı ile balıklarda LNA oranı artarken, diyetsetel KBTY'ndaki artış balıklarda SDA oranındaki artışa sebep olmuştur (Şekil 23). Bununla birlikte EPA ve DHA düzeyleri kontrol grubunda sırasıyla %5,6 ve iken%18,8, bitkisel yağ içeren gruplarda önemli derecede düşüş göstermiştir. Diğer yandan bitkisel yağ içeren yemlerle beslenen balıklarda KTY/KBTY oranı arttıkça özellikle DHA oranında artış görülmüş ve en yüksek değer (%6,7) tamamen KTY içeren yemlerle beslenen balıklarda tespit edilmiştir (Şekil 23).

Tablo 5. Farklı Düzeylerde Kırkbatıran Tohumu Yağı İçeren Yemlerle 8 Hafta Boyunca Beslenen Gökkuşuğu Alabalığında Tüm Vücut Yağ Asidi Kompozisyonu (%) (Ortalama $\pm$ Standart Sapma). Aynı Satırda Yer Alan Farklı Harfler, Gruplar Arasında İstatistiksel Olarak Anlamlı Farklılık Olduğunu Göstermektedir ($p<0,05$).

Yağ asidi	Deneysel yemler				
	BY	KTY	KBTY1	KBTY2	KBTY3
14:0	6,3 $\pm$ 0,6 ^a	4,0 $\pm$ 1,7 ^b	2,8 $\pm$ 0,1 ^b	2,9 $\pm$ 0,1 ^b	3,0 $\pm$ 0,6 ^b
14:1	0,7 $\pm$ 0,0 ^a	0,3 $\pm$ 0,2 ^b	0,1 $\pm$ 0,0 ^b	0,1 $\pm$ 0,0 ^b	0,1 $\pm$ 0,0 ^b
16:0	16,7 $\pm$ 0,3 ^a	11,1 $\pm$ 0,6 ^c	11,5 $\pm$ 0,2 ^{bc}	11,8 $\pm$ 0,1 ^{bc}	12,3 $\pm$ 0,5 ^b
16:1	5,1 $\pm$ 0,1 ^a	2,8 $\pm$ 1,3 ^b	1,6 $\pm$ 0,0 ^b	1,6 $\pm$ 0,0 ^b	1,7 $\pm$ 0,2 ^b
17:0	0,5 $\pm$ 0,2 ^a	0,3 $\pm$ 0,1 ^b	0,1 $\pm$ 0,0 ^b	0,1 $\pm$ 0,0 ^b	0,2 $\pm$ 0,1 ^b
17:1	0,4 $\pm$ 0,1 ^{bc}	0,1 $\pm$ 0,1 ^c	0,6 $\pm$ 0,1 ^{ab}	0,7 $\pm$ 0,1 ^a	0,1 $\pm$ 0,0 ^{bc}
18:0	4,3 $\pm$ 0,2 ^b	4,2 $\pm$ 0,0 ^b	4,5 $\pm$ 0,1 ^a	4,6 $\pm$ 0,0 ^a	4,7 $\pm$ 0,1 ^a
18:1n-9	27,8 $\pm$ 0,1 ^a	23,1 $\pm$ 1,0 ^b	23,2 $\pm$ 0,4 ^b	22,9 $\pm$ 0,6 ^b	22,7 $\pm$ 0,2 ^b
18:2n-6	8,1 $\pm$ 0,1 ^b	12,5 $\pm$ 3,2 ^a	15,3 $\pm$ 0,3 ^a	15,7 $\pm$ 0,3 ^a	16,2 $\pm$ 0,7 ^a
20:0	0,2 $\pm$ 0,0	0,2 $\pm$ 0,0	0,1 $\pm$ 0,1	0,2 $\pm$ 0,0	0,1 $\pm$ 0,0
18:3n-3	2,0 $\pm$ 0,5 ^d	26,9 $\pm$ 0,6 ^a	26,3 $\pm$ 0,6 ^a	24,3 $\pm$ 0,7 ^b	20,9 $\pm$ 0,7 ^c
18:4n-3	1,7 $\pm$ 0,1 ^c	2,7 $\pm$ 0,7 ^c	5,2 $\pm$ 0,8 ^b	6,3 $\pm$ 0,4 ^b	8,6 $\pm$ 0,1 ^a
21:0	0,4 $\pm$ 0,0	0,4 $\pm$ 0,0	0,4 $\pm$ 0,0	0,4 $\pm$ 0,0	0,4 $\pm$ 0,0
20:2n-6	0,3 $\pm$ 0,0 ^c	0,4 $\pm$ 0,1 ^c	0,8 $\pm$ 0,2 ^b	0,9 $\pm$ 0,1 ^{ab}	1,1 $\pm$ 0,0 ^a
20:3n-3	0,1 $\pm$ 0,0	0,4 $\pm$ 0,2	0,5 $\pm$ 0,0	0,5 $\pm$ 0,0	0,3 $\pm$ 0,0
20:4n-6	0,9 $\pm$ 0,5	0,4 $\pm$ 0,1	0,3 $\pm$ 0,0	0,3 $\pm$ 0,0	0,3 $\pm$ 0,0
20:4n-3	0,2 $\pm$ 0,1 ^c	0,7 $\pm$ 0,1 ^{ab}	0,6 $\pm$ 0,1 ^b	0,6 $\pm$ 0,0 ^{ab}	0,8 $\pm$ 0,1 ^a

Tablo 5. (Devamı)

20:5n-3	5,6±0,5 ^a	2,7±1,5 ^b	1,2±0,1 ^b	1,2±0,0 ^b	1,3±0,1 ^b
22:6n-3	18,8±0,9 ^a	6,7±0,3 ^b	4,8±0,0 ^c	5,0±0,1 ^c	5,4±0,1 ^c
SFA	28,3±1,0 ^a	20,3±1,1 ^b	19,5±0,3 ^b	20,0±0,3 ^b	20,6±1,2 ^b
MUFA	34,0±0,2 ^a	26,3±0,5 ^b	25,5±0,3 ^{bc}	25,3±0,6 ^{cd}	24,5±0,1 ^d
PUFA	37,7±1,3 ^b	53,4±1,6 ^a	55,0±0,0 ^a	54,7±0,8 ^a	54,9±1,3 ^a
n3	28,4±0,69 ^c	40,1±1,6 ^a	38,6±0,1 ^{ab}	37,9±0,9 ^{ab}	37,3±0,7 ^b
n6	9,3±0,4 ^c	13,3±3,2 ^b	16,4±0,1 ^{ab}	16,9±0,1 ^{ab}	17,6±0,6 ^a
n3/n6	3,0±0,0	3,1±0,9	2,4±0,0	2,2±0,1	2,1±0,0



Şekil 23. Farklı oranlarda keten ve kırkbatıran tohumu yağı içeren yemlerle beslenen gökkuşuğu alabalığında LNA (A) , SDA (B) ve DHA (C) değişimi. Sütunlar üzerindeki farklı harfler ilgili değerler arasında istatistik olarak fark olduğunu göstermektedir ($p < 0,05$).

Balıkların tüm vücut yağ asidi kompozisyonu, uygulanan diyetin doğrudan bir yansımasıdır. Birçok çalışmada, BY kullanılan gruplarda özellikle EPA ve DHA seviyelerinin

yüksek olduğu; buna karşılık KBTY, KTY ve SY içeren diyetlerle beslenen balıklarda sırasıyla SDA, LNA ve LA düzeylerinin arttığı rapor edilmiştir (Tocher vd. 2006; Díaz-López vd. 2009; Alhazaa vd. 2011). Ancak bu artışlar genellikle EPA ve DHA gibi n-3 LC-PULA'lardaki düşüşü de beraberinde getirmiştir.

Gökkuşığı alabalığı ve Atlantik somonu üzerinde yapılan çalışmalarda, KBTY veya KTY gruplarında SDA ve LNA birikimi belirgin şekilde artarken, EPA ve DHA düzeyleri BY grubuna göre anlamlı olarak düşmüştür (Cleveland vd., 2012; Miller vd. 2007; Nanton vd. 2012; Kajbaf vd. 2025). Benzer şekilde SY katkısı, dokularda LA düzeyini yükseltmiş, fakat n-3/n-6 oranını önemli ölçüde azaltmıştır (Özel vd. 2018; Yuan vd. 2024). Kanola yağı kullanılan denemelerde ise oleik asit (OA; 18:1n-9) artışı gözlenmiş, buna karşın n-3 LC-PUFA birikimi BY'ya göre daha düşük bulunmuştur (Miller vd. 2008; Alhazaa vd. 2011).

Bazı çalışmalarda KBTY'nın diğer bitkisel yağlara göre kısmi avantaj sağladığı ortaya konmuştur. KBTY'nın zengin olduğu SDA, biyosentez yolunda $\Delta 6$ basamağını atlayarak EPA'ya dönüşebilmekte ve bu nedenle KTY veya SY'ya göre daha yüksek EPA seviyelerinin korunmasına katkı sağlamaktadır (Jaya-Ram vd. 2016; Kuah vd. 2016; Ghioni vd. 2002). Ancak çoğu araştırmada DHA düzeyleri BY grubuna kıyasla tüm bitkisel yağlarda daha düşük kalmıştır (Bell vd. 2006; Díaz-López vd. 2010; Codabaccus vd. 2013).

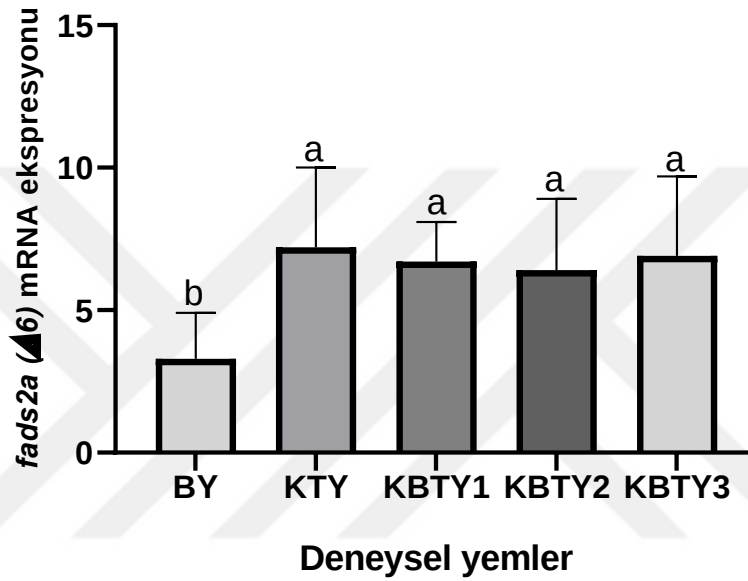
Tatlı su türlerinde de benzer eğilimler gözlenmiştir. Barramundi, yılanbaşı ve Karadeniz alabalığı gibi türlerde, KBTY ve KTY gruplarında LNA ve SDA artışı rapor edilmiş, fakat EPA ve DHA seviyeleri BY grubuna göre düşük kalmıştır (Alhazaa vd. 2011; Jaya-Ram vd. 2016; Özel vd. 2018).

Genel olarak literatür, BY'nın balıkların tüm vücut yağ asidi profilinde en yüksek EPA ve DHA düzeylerini sağladığını; buna karşın bitkisel yağların C18 yağ asitleri (LNA, SDA, LA, GLA) birikimini artırdığını göstermektedir. Özellikle KBTY, içerdiği SDA sayesinde kısmen EPA birikimini desteklese de, DHA'nın korunmasında yetersiz kalmıştır (Villalta vd. 2008; Forster vd. 2011; Lewis vd. 2013; Emery vd. 2013; Miller vd. 2008). Bu durum farklı türlerde yapılan çok sayıda çalışmada ortak bulgu olarak öne çıkmaktadır.

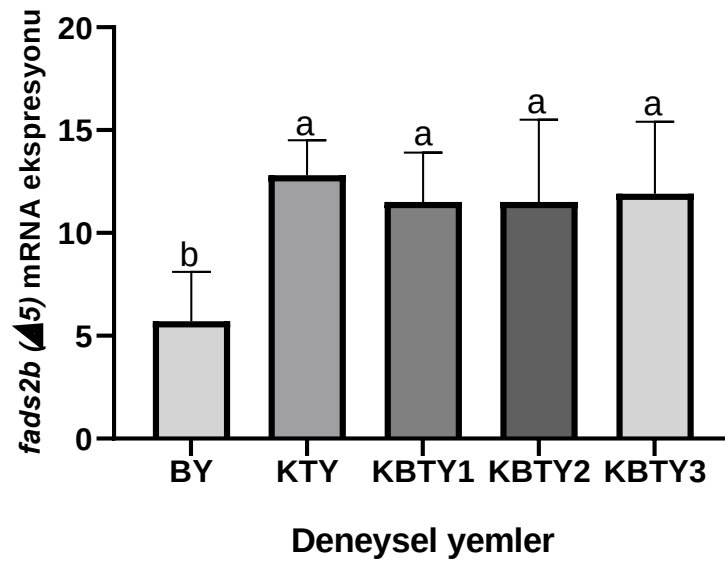
Gen Ekspresyonu

Sekiz haftalık deneme sonunda gökkuşığı alabalığında yağ asidi metabolizmasında görev alan genlerin ekspresyon düzeyleri incelenmiştir. *fads2a* ($\Delta 6$ desatüraz), *fads2b* ($\Delta 5$ desatüraz), *elovl5* ve *elovl2* genlerine ait bulgular Şekil 24–27'de sunulmuştur. Sonuçlara göre, *fads2a* ekspresyonu BY grubunda en düşük seviyelerde ölçülmüş, buna karşın KTY ve KBTY içeren gruplarda daha yüksek düzeylerde bulunmuştur ($P < 0,05$). *fads2b* geninde ise BY ile

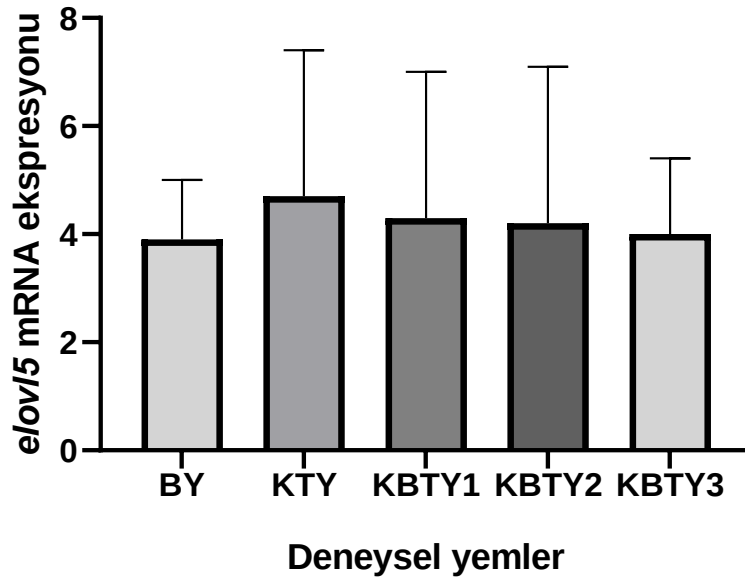
beslenen grup en düşük ekspresyon seviyesine sahip olmuş ve bu grup istatistiksel olarak diğerlerinden anlamlı şekilde ayrılmıştır ($P<0,05$). Buna karşılık, KTY ve KBTY içeren tüm gruplarda (KBTY1, KBTY2, KBTY3) *fads2b* gen ekspresyonu daha yüksek düzeylerde bulunmuş ve bu gruplar arasında anlamlı bir farklılık gözlenmemiştir. *elovl5* gen ekspresyonu bakımından gruplar arasında belirgin bir fark ortaya çıkmamış ve tüm diyetlerde benzer düzeylerde seyretmiştir. Buna karşılık *elovl2* ekspresyonu yağ kaynağına bağlı olarak değişim göstermiş; BY grubunda en düşük seviyede bulunurken, KTY grubunda en yüksek, KBTY gruplarında ise orta seviyelerde tespit edilmiştir ($P<0,05$).



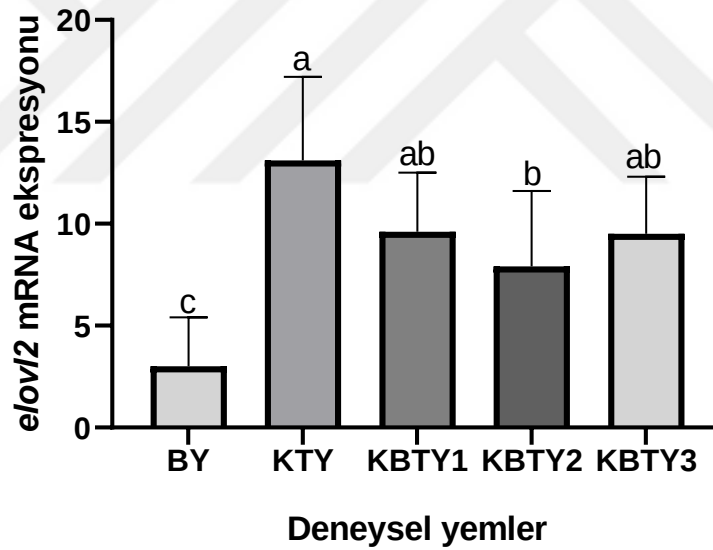
Şekil 24. Farklı oranlarda kırkbatıran tohumu yağı içeren yemlerle 8 hafta boyunca beslenen gökkuşağı alabalığında *fads2a* (Δ6) mRNA ekspresyo seviyesi. Sütunlar üzerindeki farklı harfler ilgili değerler arasında istatistik olarak fark olduğunu göstermektedir ($p<0,05$).



Şekil 25. Farklı oranlarda kırkbatıran tohumu yağı içeren yemlerle 8 hafta boyunca beslenen gökkuşağı alabalığında *fads2b* (Δ5) mRNA ekspresyon seviyesi. Sütunlar üzerindeki farklı harfler ilgili değerler arasında istatistik olarak fark olduğunu göstermektedir ($p<0,05$).



Şekil 26. Farklı oranlarda kırkbatıran tohumu yağı içeren yemlerle 8 hafta boyunca beslenen gökkuşuğu alabalığında *elovl5* mRNA ekspresyo seviyesi. Sütunlar üzerinde harf olmaması istatistik olarak önemli fark olmadığını göstermektedir.



Şekil 27. Farklı oranlarda kırkbatıran tohumu yağı içeren yemlerle 8 hafta boyunca beslenen gökkuşuğu alabalığında *elovl2* mRNA ekspresyo seviyesi. Sütunlar üzerindeki farklı harfler ilgili değerler arasında istatistik olarak fark olduğunu göstermektedir ($p < 0,05$).

Bizim çalışmamızda BY grubunda *fads2a*, *fads2b* ve *elovl2* gen ekspresyonları en düşük seviyelerde kalırken, KTY ve KBTY gruplarında anlamlı şekilde artış göstermiştir. Benzer şekilde Jaya-Ram (2016) çalışmasında KBTY ile beslenen çizgili yılan balığı (*Channa striata*) da *fads2* ve *elovl5* gen ekspresyonlarının arttığı, buna karşın DHA'nın sınırlı düzeyde kaldığı bildirilmiştir. Kuah (2016) da aynı türde KBTY katkısının $\Delta 6$ ve $\Delta 5$ aktivitelerini yükselttiğini rapor etmiştir. Bu sonuçlar, bizim çalışmamızda KBTY diyetleri ile gözlenen desaturaz ve elongaz artışı ile örtüşmektedir.

Bulgularımız ayrıca, Alhazza vd. (2011) tarafından barramundi üzerinde yapılan çalışmayla da benzerlik göstermektedir. Söz konusu araştırmada KBTY kullanımı *fads2* ekspresyonunu artırmış, ancak DHA sentez kapasitesi BY'ya göre sınırlı kalmıştır. Bizim çalışmamızda da KTY ve KBTY gruplarında *elovl2* gen ekspresyonunun BY grubuna kıyasla düşük bulunması, bu sonucu destekler niteliktedir. Yuan vd. (2024) tarafından *Onychostoma macrolepis* üzerinde yaptığı çalışmayla benzerlik göstermektedir. Söz konusu araştırmada, BY içeren yemle beslenen balıklarda gen ekspresyonları en düşük düzeylerde kaydedilirken, KTY içeren diyetlerle beslenenlerde *fads2* ve *elovl5* ekspresyonlarının arttığı, buna karşın *elovl2*'nin balık yağı grubunda yüksek, keten yağı grubunda düşük olduğu rapor edilmiştir.



SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada gökkuşuğu alabalığında farklı yağ kaynaklarının büyüme performansı, tüm vücut bileşimi, yağ asidi profili ve yağ asidi metabolizmasında görevli genlerin ekspresyonları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sekiz haftalık deneme sonucunda, KTY ile beslenen grupta büyümenin sınırlı kaldığı, KBTY içeren karışımların ise kontrol grubuna benzer yüksek performans sağladığını belirlenmiştir. Özellikle tamamen KBTY içeren gruplarında yüksek son ağırlık ve spesifik büyüme oranı elde edilmiş, yem değerlendirme katsayısı ve yaşama oranı ise tüm gruplarda benzer düzeylerde bulunmuştur. Bu sonuçlar, kırkbatıran tohumu yağının gökkuşuğu alabalığı yemlerinde keten yağına göre daha uygun bir ikame olabileceğini ortaya koymaktadır.

Tüm vücut proksimet bileşiminin diyetlerden etkilenmediği belirlenmiştir. Bu durum BY yerine KBTY veya KTY kullanımının besin bileşenleri açısından her hangi olumsuzluğa sebep olmadığını göstermiştir.

Yağ asidi profili açısından, balık yağı grubunda EPA ve DHA yüksek oranda gerçekleşmiştir. Keten ve kırkbatıran tohumu yağı gruplarında ise sırasıyla LNA ve SDA yüksek bulunmuştur. Gökkuşuğu alabalığının elongasyon özelliği sayesinde, balık yağı hiç verilmediği halde (KTY, KBTY1, KBTY2 ve KBTY3 gruplarında) dahi belli seviyede EPA ve DHA birikimi gözlenmiştir. Bu durum, keten tohumu ile birlikte diyetset kırkbatıran yağının da EPA birikimini desteklediğini ve DHA'nın da belirli ölçüde korunabildiğini göstermektedir.

Gen ekspresyon analizleri, balık yağı grubunda düşük seviyeler gözlenirken, keten ve kırkbatıran tohumu yağı katkılı gruplarda anlamlı artışlar ortaya koymuştur. Bu durum, bitkisel yağ katkılarının uzun zincirli n-3 yağ asitlerinin biyosentezinde görevli genleri uyararak metabolik adaptasyonu desteklediğini göstermektedir.

Genel olarak elde edilen bulgular, gökkuşuğu alabalığı yemlerinde kırkbatıran tohumu yağının büyüme performansını desteklediğini, tüm vücut bileşiminde büyük değişikliklere yol açmadığını ve yağ asidi metabolizmasında belirgin adaptif düzenlemeler oluşturduğunu göstermektedir. Bununla birlikte DHA seviyelerindeki düşüş, balık yağı ikamesinde önemli bir kısıtlama olarak dikkate alınmalıdır. Bu nedenle, kırkbatıran tohumu yağının gelecekte balık yağı ile birlikte veya diğer n-3 LC-PUFA kaynaklarıyla kombine edilerek değerlendirilmesi, hem balık sağlığının korunması hem de ürün kalitesinin sürdürülebilmesi açısından yararlı

olacaktır. Ayrıca, farklı gelişim evrelerinde ve daha uzun süreli denemelerde bu yağ kaynağının etkilerinin incelenmesi, ticari ölçekli uygulamalara ışık tutacak önemli veriler sağlayacaktır



KAYNAKÇA

- Ahmed, H.O., Kordofani, M.A. (2012). Leaf and stem anatomy of five species from the genus *Heliotropium* L. (*Boraginaceae*) in Sudan. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 4(10), 4575–4581.
- Aksakal, E., Vural, O., Tunç, A., Kamaszewski, M., Ekinçi, D. (2023). Effects of dietary replacement of fish oil with different lipid sources on growth, fatty acid composition, mineral content and expression levels of desaturase and elongase genes in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture Reports*, 29, 101519.
- Alhazaa, R., Bridle, A.R., Nichols, P.D., Carter, C.G., (2011). Replacing dietary fish oil with Echium oil enriched barramundi with C18 PUFA rather than long-chain PUFA. *Aquaculture*, 312(1–4), 162–171.
- Arslan, M., Sirkecioglu, A.N., Bayır, A., Arslan, H., Aras, M., (2012). The influence of substitution of dietary fish oil with different vegetable oils on performance and fatty acid composition of brown trout, *Salmo trutta*. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 12, 575–583.
- Bell, J.G.; Strachan, F.; Good, J.; Tocher, D.R.; 2006. Effect of dietary Echium oil on growth, fatty acid composition and metabolism, gill prostaglandin production and macrophage activity in Atlantic cod (*Gadus morhua* L.). *Aquaculture Research*, 37, 606–617.
- Bell, M.V., Dick, J.R., Porter, A.E.A., (2001). Biosynthesis and tissue deposition of docosahexaenoic acid (22:6n–3) in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Lipids*, 36, 1153–1159.
- Bicsak, R.C., Collaborators (Boles, R., Cathey, R., Collins, V., Hannasious, K., Haselhorst, J., Henderson, L.; Jann, L.; Meschi, L.; Molloy, R.; Stillions, M.; Swanson, K.; Tate, D.; Webb, J.; Wilkins, G.) (1993). Comparison of Kjeldahl method for determination of crude protein in cereal grains and oilseeds with generic combustion method: Collaborative study. *Journal of AOAC International*, 76(4), 780–786.
- Buzzi, M., Henderson, R.J., Sargent, J.R. (1997). Biosynthesis of docosahexaenoic acid in trout hepatocytes proceeds via 24-carbon intermediates. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B*, 116, 263–267.
- Cleveland, B.J., Francis, D.S., Turchini, G.M., (2012). Echium oil provides no benefit over linseed oil for (n-3) long-chain PUFA biosynthesis in rainbow trout. *The Journal of Nutrition*, 142(8), 1449–1455.
- Codabaccus, B.M., Bridle, A.R., Nichols, P.D., Carter, C.G. (2011). An extended feeding history with a stearidonic acid enriched diet from parr to smolt increases n-3 LC-PUFA biosynthesis in white muscle and liver of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.). *Aquaculture*, 322, 65–73.
- Cook, H.W. (1996). Fatty acid desaturation and chain elongation in eukaryotes. In: Vance, D.E.; Vance, J.E. (eds.), *Biochemistry of Lipids, Lipoproteins and Membranes*. Elsevier, 129–152.
- Corraze, G. (2001). Lipid nutrition. In: Guillaume, J., Kaushik, S., Bergot, P., Métailler, R. (eds.), *Nutrition and Feeding of Fish and Crustaceans*. Springer & Praxis, Chichester, 408 s.
- Davis, P.H. (1965–1985). *Flora of Turkey and the East Aegean Islands* (Vols. 1–9). Edinburgh University Press, Edinburgh.

- Davis, P.H., Tan, K., Mill, R.R. (1988). Flora of Turkey and the East Aegean Islands (Vol. 10). Edinburgh University Press, Edinburgh.
- De la Higuera, M. (2001). Effects of nutritional factors and feed characteristics on feed intake. In: Houlihan, D., Boujard, T., Jobling, M. (eds.), Food Intake in Fish. Blackwell Science, London, 418 s.
- Díaz-López, M., Pérez, M.J., Acosta, N.G., Jerez, S., Dorta-Guerra, R., Tocher, D.R., Lorenzo, A., Rodríguez, C. (2010). Effects of dietary fish oil substitution by Echium oil on enterocyte and hepatocyte lipid metabolism of gilthead seabream (*Sparus aurata* L.). Comparative Biochemistry and Physiology Part B, 155(4), 371–379.
- Díaz-López, M., Pérez, M.J., Acosta, N.G., Tocher, D.R. Jerez, S., Lorenzo, A., Rodríguez, C. (2009). Effect of dietary substitution of fish oil by Echium oil on growth, plasma parameters and body lipid composition in gilthead seabream (*Sparus aurata* L.). Aquaculture Nutrition, 15(5), 500–512.
- Din, J.N., Newby, D.E., Flapan, A.D. (2004). Omega-3 fatty acids and cardiovascular disease—Fishing for a natural treatment. British Medical Journal, 328, 30–35.
- Dupont-Cyr, B.A., Le François, N.R., Christen, F., Desrosiers, V., Savoie, A., Vandenberg, G.W., Blier, P.U. (2022). Linseed oil as a substitute for fish oil in the diet of Arctic charr (*Salvelinus alpinus*), brook charr (*S. fontinalis*) and their reciprocal hybrids. Aquaculture Reports, 22, 100949.
- Eruygur, N., Yılmaz, G., Kutsal, O., Yücel, G., Üstün, O. (2016). Bioassay-guided isolation of wound healing active compounds from Echium species growing in Turkey. Journal of Ethnopharmacology, 185, 370–376.
- FAO (2024). The State of World Fisheries and Aquaculture 2024 – Blue Transformation in Action. FAO, Rome. <https://doi.org/10.4060/cd0683e>
- Folch, J., Lees, M., Stanley, G.H.S. (1957). A simple method for the isolation and purification of total lipids from animal tissues. Journal of Biological Chemistry, 226, 497–509.
- Forster, I.P., Dominy, W.G., Obaldo, L.G., Hartnell, G.F., Sanders, E.F., Hickman, T.C., Ruebels, M.C. (2011). The effect of soybean oil containing stearidonic acid on growth performance, n-3 fatty acid deposition and sensory characteristics of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*). Aquaculture Nutrition, 17(2), 200–213.
- Gharib, A., Godarzee, M. (2016). Determination of secondary metabolites and antioxidant activity of some *Boraginaceae* species growing in Iran. Tropical Journal of Pharmaceutical Research, 15(11), 2459–2465.
- Ghioni, C., Porter, A.E.A., Taylor, G.W., Tocher, D.R. (2002). Metabolism of 18:4n-3 (stearidonic acid) and 20:4n-3 in salmonid cells in culture and inhibition of the production of prostaglandin F2α from arachidonic acid (20:4n-6). Fish Physiology and Biochemistry, 27, 81–96.
- Glencross, B.D. (2009). Exploring the nutritional demand for essential fatty acids by aquaculture species. Reviews in Aquaculture, 1, 71–124.
- Gökalp, H.Y., Kaya, M., Zorba, O. (2012). Et Ürünleri İşleme Mühendisliği (9. Baskı). Atatürk Üniversitesi Yayın No: 786, Ziraat Fakültesi Yayın No: 70, Erzurum.
- Guil-Guerrero, J.L., López-Martínez, J.C., Gómez-Mercado, F., Campra-Madrid, P. (2006). Gamma-linolenic and stearidonic acids from Moroccan *Boraginaceae*. European Journal of Lipid Science and Technology, 108, 43–47.

- Guillou, A., Soucy, P., Khalil, M., Adambounou, L. (1995). Effects of dietary vegetable and marine lipid on growth, muscle fatty acid composition and organoleptic quality of flesh of brook charr (*Salvelinus fontinalis*). *Aquaculture*, 136, 351–362.
- Güner, A., Ekim, T. (2014). Resimli Türkiye Florası, Cilt 1. Nezahat Gökyiğit Botanik Bahçesi Yayınları, Flora Dizisi 2; Flora Araştırmaları Derneği & Türkiye İş Bankası Kültür Yayınları, İstanbul.
- Hoitsy, G., Woynarovich, A., Moth-Poulsen, T. (2012). Guide to the Small Scale Artificial Propagation of Trout. FAO, Budapest.
- IFFO (2008). The importance of dietary EPA & DHA omega-3 fatty acids in the health of both animals and humans. International Fishmeal and Fish Oil Organization, Data Sheet, 12 s.
- Izquierdo, M.S., Montero, D., Robaina, L., Caballero, M.J., Rosenlund, G., Ginés, R. (2005). Alterations in fillet fatty acid profile and flesh quality in gilthead seabream (*Sparus aurata*) fed vegetable oils for long term period; Recovery of fatty acid profiles by fish oil feeding. *Aquaculture*, 250, 431–444.
- Jaya-Ram, A., Shu-Chien, A.C., Kuah, M.K. (2016). Echium oil increased the expression of a Delta-4 Fads2 fatty acyl desaturase and the deposition of n-3 long-chain PUFA in comparison with linseed oil in striped snakehead (*Channa striata*) muscle. *Fish Physiology and Biochemistry*, 42, 1107–1122.
- Kajbaf, K., Overturf, K., Cleveland, B., Kumar, V. (2025). Regulation of the ω -3 fatty acid biosynthetic pathway and fatty acids bioconversion capacity in selected rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) using alternative dietary oils. *Animal Feed Science and Technology*, 320, 116219.
- Kitessa, S.M., Nichols, P.D., Abeywardena, M. (2011). Purple Viper's Bugloss (*Echium plantagineum*) seed oil in human health. In: Preedy, V.R.; Watson, R.R.; Patel, V.B. (eds.), *Nuts and Seeds in Health and Disease Prevention*. Academic Press, 951–958.
- Körüklü, S.T. (2012). Echium. www.bizimbitkiler.org.tr (erişim: 25.06.2021).
- Kromann, N., Green, A. (1980). Epidemiological studies in the Upernavik district, Greenland: Incidence of some chronic diseases 1950–1974. *Acta Medica Scandinavica*, 208, 401–406.
- Kuah, M.K., Jaya-Ram, A., Shu-Chien, A.C. (2016). A fatty acyl desaturase (fads2) with dual $\Delta 6$ and $\Delta 5$ activities from the freshwater carnivorous striped snakehead *Channa striata*. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 201, 146–155.
- Lewis, M.J., Hamid, N.K.A., Alhazaa, R., Hermon, K., Donald, J.A., Sinclair, A.J., Turchini, G.M. (2013). Targeted dietary micronutrient fortification modulates n-3 LC-PUFA pathway activity in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture*, 412, 215–222.
- Lovell, R.T. (1998). *Nutrition and Feeding of Fish*. Auburn University Press, Auburn, USA, 267 s.
- Metcalf, L.D., Schmitz, A.A. (1961). The rapid preparation of fatty acid esters for gas chromatographic analysis. *Analytical Chemistry*, 33, 363–364.
- Miller, M.R., Bridle, A.R., Nichols, P.D., Carter, C.G. (2008). Increased elongase and desaturase gene expression with stearidonic acid enriched diet does not enhance long-chain (n-3) content of seawater Atlantic salmon (*Salmo salar* L.). *The Journal of Nutrition*, 138(11), 2179–2185.

- Miller, M.R., Nichols, P.D., Carter, C.G. (2007). Replacement of dietary fish oil for Atlantic salmon parr (*Salmo salar* L.) with a stearidonic acid containing oil has no effect on omega-3 long-chain PUFA concentrations. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B*, 146, 197–206.
- Mourete, G., Bell, J.G. (2006). Partial replacement of dietary fish oil with blends of vegetable oils (rapeseed, linseed and palm oils) in diets for European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) over a long-term growth study: Effects on muscle and liver fatty acid composition and effectiveness of a fish oil finishing diet. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B*, 145, 389–399.
- Nanton, D.A., Ruohonen, K., Robb, D.H.F., El-Mowafi, A., Hartnell, G.F., (2012). Effect of soy oil containing stearidonic acid on growth performance and fillet fatty acid composition of Atlantic salmon. *Aquaculture Nutrition*, 18(6), 640–650.
- Özcan, T. (2008). Analysis of the total oil and fatty acid composition of seeds of some Boraginaceae taxa from Turkey. *Plant Systematics and Evolution*, 274, 143–153.
- Özcan, T. (2008). Fatty acid profiles of the seed oils in two groups of *Anchusa officinalis* L. *IUFS Journal of Biology*, 67(1), 65–71.
- Özcan, T., Süzerer, V. (2020). Variation of some seed oil components at altitudinal range in a widely distributed species, *Echium italicum* L. (Boraginaceae) from Turkey. *Journal of Materials and Environmental Sciences*, 11(4), 540–550.
- Özdemir, E. (2021). Molecular cloning, characterization and expression analysis of Cu/Zn superoxide dismutase (sod1) gene under acute stress conditions in brown trout (*Salmo trutta*). Master's Thesis, Atatürk University Graduate School of Natural and Applied Sciences, Erzurum. *Animal Biotechnology*, 34(6), 1968–1978. <https://doi.org/10.1080/10495398.2022.2061505>
- Özel, O.T., Cakmak, E., Öztürk, E. (2018). Effects of alternative oil sources on growth performance, lipid metabolism and mRNA level of some genes in juvenile Black Sea trout (*Salmo trutta labrax* Pallas, 1811). *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 18(7), 891–903.
- Pennell, W. (1996). *Principles of Salmonid Culture*. Elsevier, Amsterdam, 1–1039.
- Pike, I.H., JackGFn, A. (2010). Fish oil: Production and use now and in the future. *Lipid Technology*, 22, 59–61.
- Regost, C., Arzel, J., Robin, J., Rosenlund, G., Kaushik, S.J. (2003). Total replacement of fish oil by soybean or linseed oil with a return to fish oil in turbot (*Psetta maxima*): Growth performance, flesh fatty acid profile, and lipid metabolism. *Aquaculture*, 217, 465–482.
- Ribeiro, P.A.P., Bressan, M.C., Logato, P.V.R., Gonçalves, A.C.S. (2007). Nutrição lipídica para peixes. *Revista Eletrônica Nutritime*, 4, 436–455.
- Sahena, F., Zaidul, I.S.M., Jinap, S., Saari, N., Jahurul, H.A., Abbas, K.A., Norulaini, N.A. (2009). PUFAs in fish: Extraction, fractionation, importance in health. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 8, 59–74.
- Sargent, J., Bell, G., McEvoy, L., Tocher, D., Estevez, A. (1999). Recent developments in the essential fatty acid nutrition of fish. *Aquaculture*, 177, 191–199.
- Sargent, J.R., Tocher, D.R., Bell, J.G. (2002). The Lipids. In: Halver, J.E. (ed.), *Fish Nutrition*. Academic Press (Elsevier), Amsterdam, 824 s.
- Serrano, J.A., Nematipour, G.R., Gatlin, D.M. (1992). Dietary protein requirement of the red drum (*Sciaenops ocellatus*) and relative use of dietary carbohydrate and lipid. *Aquaculture*, 101, 283–291.

- Silva, S.S., Anderson, T.A. (1995). Fish Nutrition in Aquaculture. Chapman & Hall, London, 319 s.
- Simopoulos, A.P. (2002). The importance of the ratio omega-6/omega-3 essential fatty acids. Biomed Pharmacother, 56, 365–379.
- TEPGE (2024). Ürün Raporu: Su Ürünleri. Yayın No: 403. ISBN: 978-625-97549-7-0.
- Tocher, D.R. (1995). Glycerophospholipid metabolism. In: Hochachka, P.W.; Mommsen, T.P. (eds.), Biochemistry and Molecular Biology of Fishes, Vol. 4: Metabolic and Adaptational Biochemistry. Elsevier, 119–157.
- Tocher, D.R., (2003). Metabolism and functions of lipids and fatty acids in teleost fish. Reviews in Fisheries Science, 11, 107–184.
- Tocher, D.R., Dick, J.R. (2000). Essential fatty acid deficiency in freshwater fish: The effects of linoleic, α -linolenic, γ -linolenic and stearidonic acids on the metabolism of [1-¹⁴C]18:3n-3 in a carp cell culture model. Fish Physiology and Biochemistry, 22(1), 67–75.
- Tocher, D.R., Dick, J.R., MacGlaughlin, P., Bell, J.G. (2001). Hepatocyte fatty acid desaturation and polyunsaturated fatty acid composition of liver in salmonids: Effects of dietary vegetable oil. Comparative Biochemistry and Physiology Part B, 130, 257–270.
- Tocher, D.R., Dick, J.R., MacGlaughlin, P., Bell, J.G. (2006). Effect of diets enriched in Δ 6-desaturated fatty acids (18:3n-6 and 18:4n-3) on growth, fatty acid composition and HUFA synthesis in two populations of Arctic charr (*Salvelinus alpinus*). Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology, 144(2), 245–253.
- Tocher, D.R., Fonseca-Madrighal, J., Dick, J.R., Ng, W., Bell, J.G., Campbell, P.J. (2003). Effects of dietary lipid level and vegetable oil on fatty acid metabolism in Atlantic salmon (*Salmo salar*) over the entire production cycle. Fish Physiology and Biochemistry, 29, 193–209.
- Tocher, D.R., Fonseca-Madrighal, J., Dick, J.R., Ng, W., Bell, J.G. (2004). Effects of water temperature and diet containing palm oil on fatty acid desaturation and oxidation in hepatocytes and intestinal enterocytes of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). Comparative Biochemistry and Physiology Part B, 137, 49–63.
- Tocher, D.R., Fonseca-Madrighal, J., Dick, J.R., Ng, W., Bell, J.G., Campbell, P.J. (2003). Effects of dietary lipid level and vegetable oil on fatty acid metabolism in Atlantic salmon (*Salmo salar*) over the entire production cycle. Fish Physiology and Biochemistry, 29, 193–209.
- Turchini, G.M., Ng, W.K., Tocher, D.R. (2011). Fish Oil Replacement and Alternative Lipid Sources in Aquaculture Feeds. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
- Turchini, G.M., Torstensen, B.E., Ng, W-K. (2009). Fish oil replacement in finfish nutrition. Reviews in Aquaculture, 1, 10–57.
- Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) (2025). Su Ürünleri İstatistikleri, 2024 [İstatistik Bülteni, 022]. Tarım ve Orman Bakanlığı, Tarım Reformu Genel Müdürlüğü.
- Villalta, M., Estévez, A., Bransden, M.P., Bell, J.G. (2008). Arachidonic acid, arachidonic/eicosapentaenoic acid ratio, stearidonic acid and eicosanoids are involved in dietary-induced albinism in Senegal sole (*Solea senegalensis*). Aquaculture Nutrition, 14(2), 120–128.

- Vlieg, P., Body, D.R. (1988). Lipid contents and fatty acid composition of some New Zealand freshwater finfish and marine finfish, shellfish, and roes. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 22, 151–162.
- Wiegand, M.D. (1996). Composition, accumulation and utilization of yolk lipids in teleost fish. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 6, 259–286.
- Yuan, X., Liu, R., Wei, M., Li, H., Sun, J., Ji, H. (2024). Fish oil replacement with different vegetable oils in *Onychostoma macrolepis*: Effects on fatty acid metabolism based on whole-body fatty acid balance method and genes expression. *Fish Physiology and Biochemistry*, 50(4), 1583–1603.
- Zheng, X., Tocher, D.R., Dickson, C.A., Bell, J.G., Teale, A.J. (2004). Effects of diets containing vegetable oil on expression of genes involved in PUFA biosynthesis in liver of Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Aquaculture*, 236, 467–483.
- Zheng, X., Torstensen, B.E., Tocher, D.R., Dick, J.R., Henderson, R.J., Bell, J.G. (2005). Environmental and dietary influences on HUFA biosynthesis and expression of fatty acyl desaturase and elongase genes in liver of Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Biochimica et Biophysica Acta*, 1734, 13–24.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Waheedullah MOHMAND
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
Tel:	
E-mail:	
Eğitim	
Lisans:	Atatürk Üniversitesi, Su Ürünleri Fakültesi, Su Ürünleri Mühendisliği (2023)
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Su Ürünleri Mühendisliği Ana Bilim Dalı (2025)
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	İyi
Hintçe:	İyi
Urduca:	İyi
Farsça:	İyi
Türkçe:	İyi
Peştuca:	İyi
Tezden Üretilmiş Yayınlar	