



RESEARCH ARTICLE

Population Structure of the Tub Gurnard (*Chelidonichthys lucerna* Linnaeus, 1758) in Türkiye Coasts Using Otolith Chemistry and Shape Analysis

Sibel Atak Sanduvaç^{1*}, Ali İşmen²

¹Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Çanakkale, Türkiye

²Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Deniz Bilimleri ve Teknolojisi Fakültesi, Çanakkale, Türkiye

<https://orcid.org/0000-0002-1320-2598>

<https://orcid.org/0000-0003-2456-0232>

Received: 22.05.2024 / Accepted: 03.07.2024 / Published online: 10.07.2024

Key words:

Triglidae
Natural tag
Sagitta
Stock discrimination
Fisheries management

Abstract: *Chelidonichthys lucerna* is an economically important demersal species. It is under excessive fishing pressure and yields from fisheries are in decline in Türkiye. Information about the species' population structure and habitat connections is limited. In this study, otolith chemistry and shape analyses of 160 individuals captured between February 2020 and December 2020, in the four main fishing grounds of Türkiye coasts (Black Sea/Ordu, Marmara Sea/Bandırma, Aegean Sea/Foça, Mediterranean Sea/Mersin) were investigated. Otolith morphology and chemistry (Li:Ca, Na:Ca, Mg:Ca, Mn:Ca, Fe:Ca, Co:Ca, Ni:Ca, Cu:Ca, Zn:Ca, Sr:Ca, Ba:Ca, Pb:Ca, K:Ca, P:Ca) of the individuals with similar length range (19-25 cm, TL) were evaluated by univariate and multivariate statistical analyses. The overall combination of otolith elemental chemistry and morphology techniques revealed the highest re-classification success (75%-90%) of samples to their original location and the existence of significant differences among sampling regions. When otolith shape analysis and otolith chemistry were evaluated together, linear discrimination function analyses fully discriminated *C. lucerna* individuals from the four sampling regions (Black Sea, Marmara, Aegean, Mediterranean). Moreover, the results of the analyses revealed that there were habitat connections among individuals from the Sea of Marmara and Aegean Sea and that the Black Sea and the Mediterranean Sea were isolated regions in terms of *C. lucerna* stocks. The shape and chemical signatures suggest that *C. lucerna* is apparently not a single stock-unit in the Turkish coasts and that these fish stocks should be managed separately for fisheries purposes.

Anahtar kelimeler:

Triglidae
Doğal etiket
Sagitta
Stok ayırımı
Balıkçılık yönetimi

Türkiye Kıyılarında Kırlangıç Balığının (*Chelidonichthys lucerna* Linnaeus, 1758) Otolit Kimyası ve Otolit Şekil Analizi Kullanılarak Populasyon Yapısı

Öz: *Chelidonichthys lucerna* ekonomik öneme sahip demersal bir türdür. Ülkemizde aşırı avcılık baskısı altındadır ve elde edilen miktar azalmaktadır. Türün populasyon yapısı, habitat bağlantıları hakkındaki bilgi sınırlıdır. Bu çalışmada Türkiye kıyılarında dört avlanma bölgesinde (Karadeniz/Ordu, Marmara Denizi/Bandırma, Ege Denizi/Foça ve Akdeniz/Mersin) Şubat 2020-Aralık 2020 tarihleri arasında yakalanan 160 adet bireyin otolit şekli ve kimyası incelenmiştir. Boy aralığı benzer bireylerin TL (19-25 cm, TL) otolit morfolojisi ve kimyası (Li:Ca, Na:Ca, Mg:Ca, Mn:Ca, Fe:Ca, Co:Ca, Ni:Ca, Cu:Ca, Zn:Ca, Sr:Ca, Ba:Ca, Pb:Ca, K:Ca, P:Ca) tek ve çok değişkenli istatistiksel analizlerle değerlendirilmiştir. Otolit morfolojisi ve kimyası tekniklerinin genel kombinasyonu, örneklerin orijinal konumlarına en yüksek yeniden sınıflandırma başarısını (%75-%90) ve örnekleme bölgeleri arasında önemli farklılıkların varlığını ortaya çıkarmıştır. Otolit şekil analizleri ve otolit kimyası birlikte değerlendirildiğinde dört denizden örneklenen (Karadeniz, Marmara, Ege ve Akdeniz) *C. lucerna* bireylerini tam olarak ayırt edebilmiştir. Ayrıca, analiz sonuçları, Marmara ve Ege denizlerindeki bireyler arasında habitat bağlantılarının bulunduğunu, *C. lucerna* stokları açısından Karadeniz ve Akdeniz'in izole bölgeler olduğunu ortaya koymuştur. Elde edilen şekil ve kimyasal bulgular, *C. lucerna*'nın Türkiye kıyılarında tek bir stok birimi olmadığını ve bu balık stoklarının balıkçılık amacıyla ayrı ayrı yönetilmesi gerektiğini göstermiştir.

*Corresponding author: ecologist.sibel@gmail.com

How to cite this article: Atak Sanduvaç, S., & İşmen, A. (2024). Population structure of the tub gurnard (*Chelidonichthys lucerna* Linnaeus, 1758) in Türkiye coasts using otolith chemistry and shape analysis. COMU J. Mar. Sci. Fish, 7(1): 67-85. doi:10.46384/jmsf.1488491

Giriş

Ticari balık türlerinin stok yapısının bilinmesi hem sürdürülebilir avcılık hem de nesli tükenmekte olan türlerin yönetimi için temel bir bilgidir. Balık stoklarının sürdürülebilir üretimi için doğru/etkin balıkçılık yönetim uygulamalarının belirlenmesinde güvenilir stok değerlendirilmeleri oldukça önemli bir gerekliliktir (İşmen vd., 2004, Turan, 2006). Kemikli balıkların otolit kimyası, bireyin ortamının kimyasal ve fiziksel özelliklerindeki farklılıkları yansıtabilen doğal etiketleri temsil etmektedir. Otolitler balığın iç kulaklarında bulunan ve balığın dengesi ve işitme fonksiyonlarında önemli rol oynayan metabolik olarak inert aragonit kalsifiye yapılardır. Otolitler etraftaki sudan sürekli kalsiyum karbonat ve diğer kimyasal elementlerin ilavesiyle balığın ömrü boyunca büyür, bu elementler geri emilmez ve birey için tam bir çevre kaydı sağlar. Kimyasal otolit analizi, bir balığın embriyonik evrelerinden ölene kadar bir yaşam öyküsü profili oluşturulmasına izin verir. Bu da balık yaşam alanlarının çevresel koşulları, özellikleri ve tüm yaşamları boyunca hareket düzenleri hakkında bilgi verir. Otolit şekli türe özgüdür, bölgeler arası çeşitlilik gösterir ve balık popülasyonu çalışmaları için ideal bir belirteç gibi görülmektedir. Ayrıca, otolitlerin kimyasal ve şekil analizlerinin kombinasyonunun balık stoklarını ayırt etmek için iyi bir araç olduğu kanıtlanmıştır (Bouchard vd., 2015; Campana, 1999; Elsdon ve Gillanders, 2002; Martin ve Thorrold, 2005; Secor ve Rooker, 2000; Zorica vd., 2010; Sturrock vd., 2012; Ferreira vd., 2019).

Triglidae familyasına ait ekonomik öneme sahip demersal bir balık olan kırlangıç balığı (*C. lucerna*), Akdeniz ve Karadeniz'de, Doğu Atlantik kıyıları boyunca, Norveç'ten Afrika'nın kuzeybatı kıyılarına da yayılan bir Akdeniz-Atlantik türüdür (Richards ve Saksena 1990; İşmen vd., 2004). ICES, *C. lucerna*'yı potansiyel bir ticari tür ve yeni bir MOU (Mutabakat Muhtırası) türü olarak tanımlamış ve stok değerlendirme amacıyla biyolojik parametreler hakkında bilgi elde etmek için izleme programlarının yapılmasını önermiştir. Ülkemizde Triglidae familyası *Chelidonichthys cuculus*, *Chelidonichthys gurnardus*, *Chelidonichthys lastoviza*, *Chelidonichthys lucernus*, *Chelidonichthys obscurus*, *Lepidotrigla cavillone*, *Lepidotrigla dieuzeidei*, *Trigla lyra* olmak üzere 8 tür ile temsil edilmektedir (Bilecenoğlu vd., 2014). Bu türlerden *C. lucerna* ekonomik öneme sahip demersal bir tür olup, aşırı avcılık baskısı altındadır. Üretim miktarı her geçen yıl azalmaktadır. Türkiye'de otolit morfolojisi ve/veya kimyasal analizi kullanarak stok ayırımıyla ilgili yapılmış çalışmalar az sayıda olup, kalkan balığı, iskarmoz balığı, istavrit, yılan balığı, hamsi, sardalya inci kefali, gümüş balığı, dikenli kırlangıç balığı, türlerinde yapılmıştır (Akyol vd., 1997; Serpin, 2007; Başusta vd., 2013a; Başusta vd., 2013b; Başusta vd., 2013c; Saygın 2019). Türkiye sularında *C. lucerna*'nın biyolojik özellikleri ile ilgili yapılmış çalışmalar bulunmaktadır (İşmen vd., 2004; Çiçek vd., 2008; Uyan 2014; Çiçek vd., 2020; Başusta ve Bıyıklı, 2022). Dünya geneline bakıldığında ise *C. lucerna*'nın otolit morfolojisi ve kimyasal analizi kullanarak stok ayırımıyla ilgili

yapılmış sadece bir çalışma bulunmaktadır (Ferreira vd. 2019).

Bu çalışmada, Türkiye kıyılarında (Karadeniz, Marmara Denizi, Ege Denizi ve Akdeniz), *C. lucerna*'nın otolit morfolojisi ve kimyası incelenerek, habitat kullanım alanlarına bağlı stokların ayrımı ve stoklar arası farklılıklar veya benzerliklerin ilişki düzeylerinin tespit edilmesi hedeflenmiştir.

Materyal ve Yöntem

Örnekleme

Chelidonichthys lucerna bireyleri Karadeniz (Ordu) (n=91), Marmara Denizi (Bandırma) (n=121), Ege Denizi (Foça) (n=155) ve Akdeniz (Mersin) (n=100) olmak üzere Türkiye kıyılarından doğrudan balıkçılardan temin edilmiştir. Trol ve uzatma ağlarla yakalanmış örnekler soğuk zincirde taşınmıştır. Laboratuvara getirilen her bir bireyin total boyu (TL; 0,1 cm), çatal boyu ve vücut ağırlığı (W; 0,01 g) ölçülmüştür. Bireyler disekte edilmiş, iç organları çıkarıldıktan sonra makroskopik gözlem ile gonadlardan cinsiyet tayini yapılmıştır. Sonrasında balığın başı dikkatlice açılmış ve başın iki yanında bulunan 3 çift otolitten en büyüğü olan sagittal otolitler metalik kontaminasyonu önlemek için plastik pens kullanılarak balık kafasından dikkatlice çıkarılmıştır. Otolitler distile su ile kan, doku ve diğer yüzey kontaminantlarından arındırılıp, temizlenmiş, tartılmış ($\pm 0,0001$ g) ve daha ileri analiz yapılmak üzere eppendorf tüplerine aktarılmıştır.

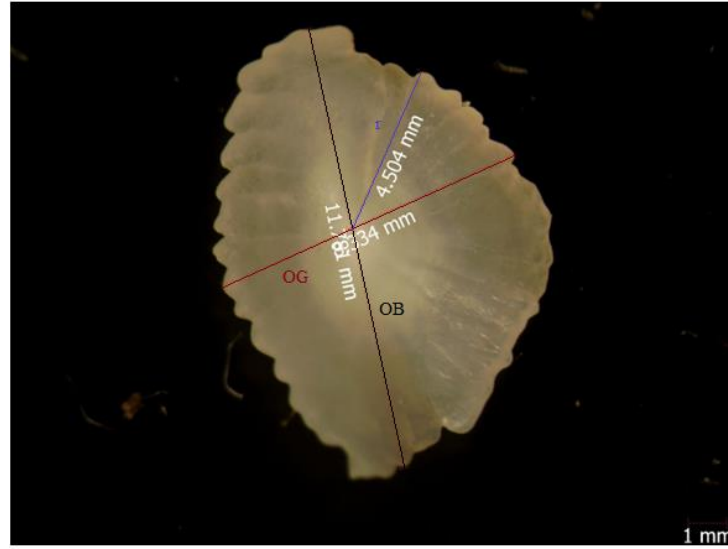
Otolit şekli, bir dizi çevre ve endojen faktörlerden etkilenmektedir ve stoklar arasında farklılık gösterebilmektedir. Ayrıca, aynı stoktaki boy ve yaş sınıfları arasında da farklılık gösterebilmektedir. Bu faktörlerin etkisini ortadan kaldırmak için benzer TL (19-25 cm) aralığında ve 2 yaşında 160 adet birey seçilmiştir (ANOVA; $F_{3,156}=0,119$, $p=0,94$) (Adelir-Alves vd. 2018; Moreira vd., 2018, 2019). Otolit şekil indeksleri ve element analizleri bu bireyler üzerinden yürütülmüştür. Sağ ve sol sagittal otolitlerin uzunluğu, genişliği ve ağırlığını karşılaştırmak için t testi (Zar, 1999) kullanılmıştır. Tür için sağ ve sol otolitler arasında anlamlı bir farklılık tespit edilmemiştir ($p>0,05$). Bu nedenle analizlerde sağ otolit kullanılmıştır.

Otolit şekil analizi

Otolitlerin iki boyutlu dijital görüntüleri, yansıyan ışık ve karanlık alan altında 15x büyütmede binoküler stereo mikroskop (Olympus SZX2-ILLB) üzerine monte edilmiş yüksek çözünürlüklü bir USB kamera kullanılarak kaydedilmiş ve Argenit KameraM 3.3.0.0 dijital görüntü analiz programı kullanılarak analiz edilmiştir. Görüntüleme proximal yüzeyden olacak şekilde 10x23 büyütme ile yapılmıştır. Otolitlerin morfometrik ölçümleri için sağ sagittal otolitlerin rostrumu sağa dönük ve dış bükey taraf yukarı gelecek şekilde yerleştirilip, Sulcus acusticus'u görüntülenmiştir.

Otolit genişliği (mm) için otolitin ventral ile dorsal hat uzunluğu, otolit boyu (mm) için posterior uç ile anterior uç noktalar arası esas alınmıştır. Otolit çevresi ve alan ölçüleri

otolit çevresi üzerinde hat boyunca takip edilerek, stereomikroskop yardımıyla hesaplanmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. *Chelidonichthys lucerna*'ya ait sagittal otolit (OB: Otolit Boyu (mm), OG: otolit genişliği (mm), r: Yarıçap (mm)) (Marmara Denizi)

Otolitlerden ölçüm sonunda elde edilen ham veriler [otolit boyu (OL, mm), otolit genişliği (OWi, mm), otolit alanı (OA, mm²) ve otolit çevresi (OP, mm)] değerlendirilerek, her bir bireyin otolit şekil indeksleri hesaplanmıştır. Otolitlerin şekil indekslerinin belirlenmesinde Tablo 1'de verilen formüller kullanılmıştır (Tuset vd., 2003b; Ponton vd., 2006). Otolit şekli, balıkların ontogenetik gelişimi boyunca değişebildiği, farklı yaş-boy gruplarındaki popülasyonların arasındaki karşılaştırmaları

önyargılı hale getirdiği için otolit uzunluğunun ve otolit ağırlığının her morfometrik indeksin büyüklüğü üzerindeki etkileri ayrı ayrı istatistiksel analiz (ANCOVA) (faktör:bölge, kovaryant: otolit uzunluğu ve faktör:bölge kovaryant: otolit ağırlığı) ile değerlendirilmiştir. Denizlere göre otolit uzunluğu ile otolit şekil indeksleri (eliptiklik, dairesellik, çerçeve oranı, form faktör, yuvarlaklık ve dikdörtgenlik) arasında ilişki olup olmadığı regresyon analizi ile yapılmıştır.

Tablo 1. Türlerin otolitlerinin şekil indeksleri için kullanılan formüller

| Parametreler | Şekil indeksi | Formül |
|-------------------------------------|--------------------|---------------------|
| OP (Otolit Çevresi, mm) | Form Faktör (FF) | $4.\pi.OA/(OP)^2$ |
| OA (Otolit Alanı, mm ²) | Dairesellik (CL) | $(OP)^2/OA$ |
| OL (Otolit Boyu, mm) | Yuvarlaklık (RO) | $4.OA/\pi.(OL)^2$ |
| OWi (Otolit Genişliği, mm) | Eliptiklik (EL) | $(OL-OWi)/(OL+OWi)$ |
| | Dikdörtgenlik (RE) | $OA/(OL.OWi)$ |
| | Çerçeve Oranı (AR) | OL/OWi |

Otolit element analizi

Üzerindeki kan, doku ve diğer yüzey kontaminantlarından arındırılmış ve temizlenerek saklama kaplarına (eppendorf) alınmış olan otolitler, mikrokimyasal analizlere tabi tutulmuştur. Öncelikle, her bir otolitin sabit ağırlığa ulaşması için 120 °C'ye ayarlı etüvde 2 saat süre ile cam tüpler içerisinde kalması sağlanmıştır.

Kuruması tamamlanan otolit örnekleri yaklaşık 0.001 grama duyarlı hassas terazi ile tartılarak, mikrodalga yakma ünitesindeki vessel'lara aktarılmıştır. Daha sonra her bir vessel'ın üzerine %65'lik nitrik asit (HNO₃)'ten 8 ml ve %30'luk hidrojen peroksit (H₂O₂)'den 2 ml ilave edilerek, Ethos marka Easy model cihazda SK-12 rotor kullanılarak, sıcaklık kontrollü mikrodalga ile yakmaya tabi tutulmuştur (Rooker vd., 2001).

Ölçüm sırasında dikkate alınan standartlar: EPA 200.2 (Spektroskopi tekniğiyle toplam geri kazanılabilir element analizi için örnek hazırlama) ve EPA 6020'dir (Çevresel numunelerde Endüktif Olarak Eşleştirilmiş Plazma-Kütle Spektrometresi (ICP-MS) ile çoklu element tayini). Otolit numuneleri 0.0060-0.030 g aralığında ortalama ise 0.015 g olacak şekilde 13 ml hacimli test tüplere yerleştirilmiştir. Üzerlerine 0.4 ml aqua regia; 3:1 oranında hidroklorik asit: nitrik asit (3:1 HCl:HNO₃) eklenmiş sonrasında ise iki gün boyunca oda sıcaklığında bekletilmiştir. İkinci günün sonunda 15 dakika boyunca 40°C ultrasonik banyoda tutulmuştur. Sonrasında üzerlerine 10ml ultra saf su eklenmiştir. Seyreltme faktörleri ortalama 1000 olarak hesaplanmıştır. Elementlerin konsantrasyonları Endüktif Olarak Eşleştirilmiş Plazma Kütle Spektrofotometresi (ICP-MS, Agilent 7700X) ile ölçülmüştür (Patterson vd., 1999; Campana vd., 2000; Campana ve Thorrold 2001; Patterson vd., 2004; Walther ve Limburg, 2012; Thomas vd., 2017; Bal ve Esen, 2021). Kalibrasyon eğrileri için 27 element karışımı standartlar (8500-6940 2A ve 8500-6940 Hg) kullanılarak yapılmıştır. Kalite kontrolü üçlü ölçüm ve sertifikalı referans malzemeler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kontrol numunesi (sertifikalı referans materyali, SRM, CRM) olarak denizel hayvan dokusu olan TORT2 (Lobster hepatopaneas) kullanılmıştır. Tüm elementler %95 ve üzeri doğrulukla ölçülmüştür. Bu çalışmada 1ppm internal standart karışımı ISTD Agilent 5188-6525:Li6, Sc45, Ge72, Rh103, In115,Tb159, Lu175, Bi209 kütleleri numunelerle birlikte sürekli olarak analiz edilmiş ve bağıntılı olarak hesaplamada yer almıştır. Her element için tespit limiti (DL, LOD) kalibrasyon eğrisinin altında listelenmiştir. Nicel tayin sınırı (NTS, Limit of quantification LOQ) ise LOD değerinin 3,3 katı olarak belirlenmiştir (EPA, 2014).

Deniz balıkları otolitlerinde elementlerin stabilitesinin türlere göre değişkenlik göstermesi nedeniyle genellikle kaydedilen iz elementler de dikkate alınarak, *C. lucerna*'nın bütün otolitlerinde bulunan en bol ve olası bilgilendirici unsurları belirlemek için bir ön analiz yapılmıştır. Analizde ilk aşamada elementlerin stabilitesinin türlere göre değişkenlik göstermesi nedeniyle *C. lucerna* türü için otolitlerde fiziksel olarak stabil olan tekrarlanabilir ve kararlı elementler incelenmiş (Silva vd., 2011; Correia vd., 2014; Daros vd., 2016) ve 14 element (Li, Na, Mg, Ca, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Sr, Ba, Pb, K, P) belirlenmiştir. Çalışma, belirlenen elementlerin kalsiyuma oranları (element:Ca) üzerinden yürütülmüştür.

Denizler arasında TL açısından önemli bir farklılık olmamasına rağmen, element konsantrasyonu ile balık büyüklüğü (otolit ağırlığı) arasındaki ilişkiler kovaryans analizi (ANCOVA, ortak değişken: otolit ağırlığı) ile test edilmiştir. Element: Ca oranlarının otolit ağırlığı ile anlamlı düzeyde ilişkili olmadığı tespit edilmiştir (ANCOVA, $p > 0.05$). Numuneler arasındaki balık boyutu farklılıklarının, otolit kimyasında bölgeye özgü herhangi bir farklılığa yol açmamasını sağlamak için, elementlerin konsantrasyonları, ortak grup içi doğrusal eğim çarpımının otolit ağırlığı ile gözlenen konsantrasyondan çıkarılması suretiyle ağırlık açısından azaltılmıştır (Campana vd., 2000).

İstatistiksel analizler

Ham veriler Quinn ve Keough (2002)'ye göre normallik (Shapiro-Wilk testi), varyans homojenliği (Brown-Forsythe testi) ve eşit grup içi kovaryans matrisleri (ayırt edici fonksiyon puanlarının incelenmesi) açısından kontrol edilmiştir. Bu varsayımlar şekil indeksleri ve element:Ca oranlarının bir kısmı için sağlansa da Na:Ca, Mg:Ca, Fe:Ca, Zn:Ca element oranlarında sağlanmamıştır. Bu nedenle bu dört orana Log₁₀ dönüşümü yapılarak, varsayımlar sağlanmıştır.

Denizler arasındaki bireysel elementlerin ve şekil indekslerinin farklılıklarını araştırmak için tek yönlü varyans analizi (ANOVA) kullanılmıştır. Anlamlı farklar bulunduğu ($p < 0.05$) ise Tukey post hoc testi yapılmıştır. Otolit çoklu element (element:Ca) ve şekil indeksleri ve her ikisinin birleşimindeki (element:Ca, şekil indeksi) uzaysal farklılıkları test etmek için çok değişkenli varyans analizi (MANOVA) kullanılmıştır. MANOVA analizinde çok değişkenli istatistiklerin en sağlam testi (Pillai izi) için yaklaşık F oranı istatistiği rapor edilmiştir. Denizler arasında post hoc çok değişkenli ikili karşılaştırmalar, Hotelling T-kare testi kullanılarak yapılmıştır. Örnekler arasındaki benzerlik derecesi ve grup ayrımı için her ölçümün göreceli önemi, öklid mesafesine dayanan ileri adımlı diskriminant fonksiyon analizi (DFA) ile değerlendirilmiştir. Ayrıca, bir jackknifed prosedürünü kullanarak, mekansal farklılıkları görselleştirmek ve balıkların bu orijinal konuma göre yeniden sınıflandırma doğruluk başarısını incelemek için de DFA kullanılmıştır. Sonuçlar iki boyutlu grafiklerde sunulmuştur (Moreira vd., 2018). Tüm istatistiksel analizlerde SPSS v. 21 kullanılmıştır.

Bulgular

Otolit şekil indeksleri

Otolit morfolojisi ve kimyasını test etmek için seçilen 19-25 cm boy aralığındaki tüm bireylerin sağ otolitlerine şekil indeksleri uygulanmıştır. Denizlerdeki *C. lucerna* bireylerinin sagittal otolitlerinin boyu (OL), genişliği (OWi), yarıçapı (Or), ağırlığı (Ow), alanı (A), çevresi (P), form faktörü (FF), yuvarlaklığı (RO), dikdörtgenlik (RE), eliptiklik (EL), daireselliği (CL) ve çerçeve oranı (AR) ölçülmüştür. Tablo 2'de her bir bölgede şekil indekslerinin tanımlayıcı istatistikleri verilmiştir.

Denizler arasında otolit şekil indekslerinin otolit uzunluğu ile olan ilişkisi Şekil 2'de gösterilmiştir. Bu verilere göre otolit uzunluğu artarken; eliptiklik ($EL=0,07OL+0,13$, $R^2=0,415$), çerçeve oranı ($AR=0,19OL+0,62$, $R^2=0,416$) artmakta, dikdörtgenlik ($RE=-0,03OL+0,81$, $R^2=0,082$) ve yuvarlaklık ($RO=-0,14OL+1,18$, $R^2=0,476$) azalmaktadır. Otolit uzunluğu ile otolit şekil dairesellik ($CL=2,19OL+14,11$, $R^2=0,043$) ve form faktör ($FF=-0,05OL+0,75$, $R^2=0,046$) arasında ise doğrusal olmayan ilişki olduğu belirlenmiştir. Otolit şekli balığın ontogenetik gelişimi boyunca değişebildiği için balık boyutunun (yani otolit uzunluğunun) her bir şekil indeksi üzerindeki etkisini ortadan kaldırıp bölgeler arasında şekil indeksleri açısından farklılık olup olmadığını

test etmek için ANCOVA kullanılmıştır (faktör:bölge, kovaryant: otolit uzunluğu). Yapılan istatistiksel analizler sonucunda Karadeniz'deki stokların Marmara Denizi'ndeki stoklardan form faktör şekil indeksi açısından farklı olduğu ve bu farkın anlamlı olduğu saptanmıştır (MANOVA, Pillai's Trace: $F_{3,156} = 1,263$ $p=0,04$). Dairesellik şekil indeksi açısından ise tüm denizlerdeki stokların birbirinden farklı olduğu ve farkın anlamlı olduğu tespit edilmiştir ($p<0,05$) (Tablo 3).

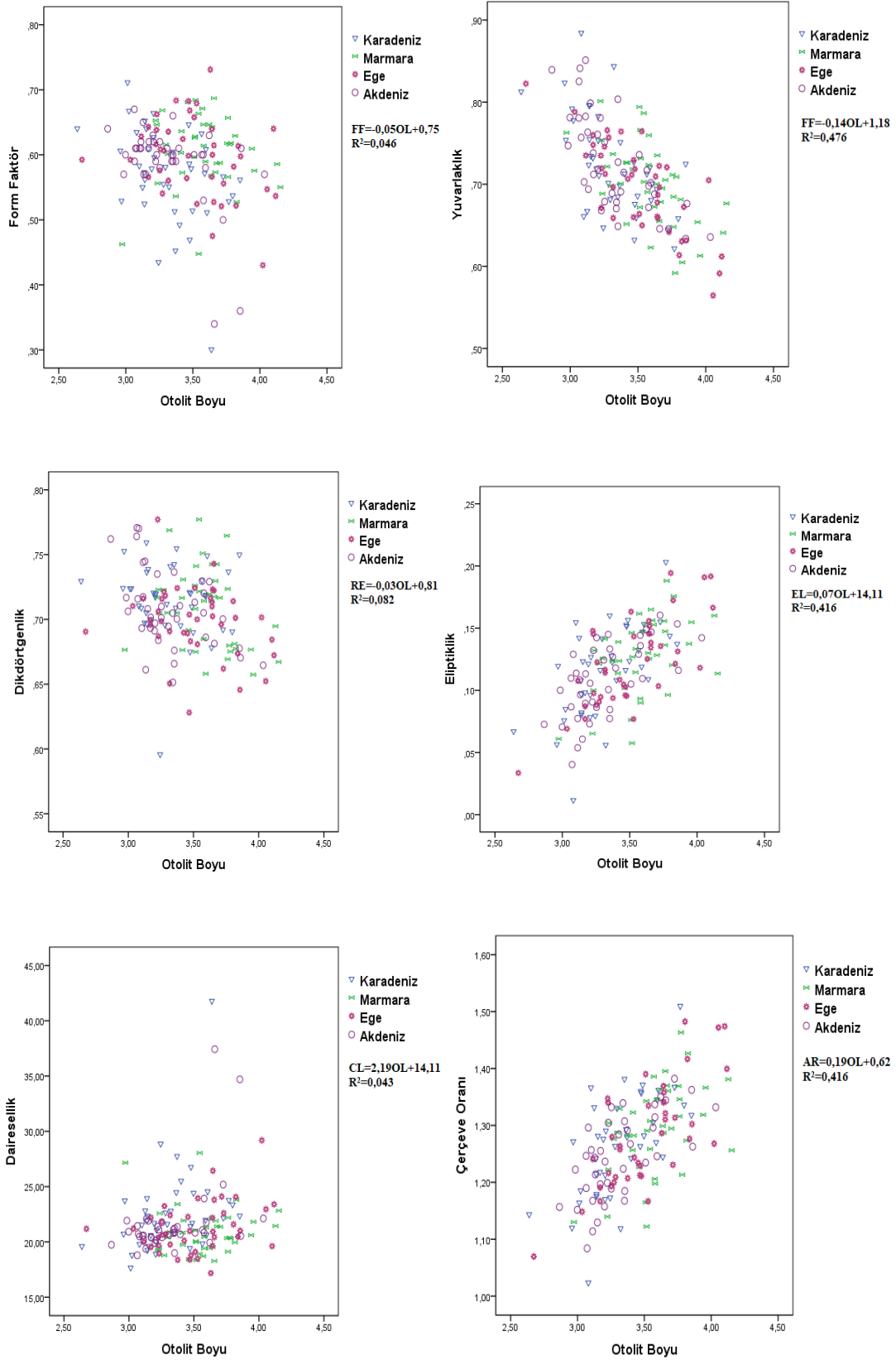
Yapılan istatistiksel analizler sonucunda otolit ağırlığının Marmara Denizi'nde tüm diğer denizlerden anlamlı derecede farklı olduğu saptanmıştır (MANOVA, $F_{3,156}=10,245$, $p=0,00$). Karadeniz'de otolit boyu, genişliği, yarıçapı ve alanı açısından Marmara ve Ege denizlerinde farklı olduğu ve farkın istatistiksel olarak anlamlı olduğu tespit edilmiştir ($p<0,05$). Akdeniz'in otolit boyu ve

yarıçapı açısından Marmara ve Ege denizlerinden anlamlı derecede farklı olduğu belirlenmiştir ($p<0,05$).

Yapılan diskriminant analizi sonucunda üç adet diskriminant fonksiyonu üretilmiş olup birinci ve ikinci diskriminant fonksiyonlarının toplam varyansa %72,6 ve %26,1 oranında katkıda bulunması toplam varyansın çoğunluğunun ilk iki kanonik değişken tarafından açıklandığını gösterir. Analiz sonucunda şekil indeksleri açısından tüm denizlerde örtüşme gözlenmiştir. Birbirinden kısmi olarak ayrılan bölgeler ise Karadeniz ve Marmara denizleri olmuştur (Şekil 3A). Bireylerin orijinal gruplarına göre doğru sınıflandırılması otolit şekline göre yapıldığında %45 ile %47,5 arasında değişim göstermektedir (Tablo 6).

Tablo 2. *Chelidonichthys lucerna* bireylerinin sağ sagittal otolitlerinin denizlerdeki şekil indeksleri

| Bölge | | OL | OWİ | OR | OW | A | P | FF | RO | RE | EL | CL | AR |
|-----------|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
| Karadeniz | Minumum | 2,638 | 2,269 | 2,368 | 0,004 | 4,44 | 9,331 | 0,301 | 0,622 | 0,596 | 0,012 | 17,658 | 1,024 |
| | Maksimum | 3,852 | 3,01 | 3,255 | 0,01 | 8,441 | 17,361 | 0,711 | 0,884 | 0,759 | 0,203 | 41,792 | 1,51 |
| | Ortalama | 3,319 | 2,626 | 2,792 | 0,007 | 6,247 | 11,828 | 0,569 | 0,723 | 0,715 | 0,116 | 22,569 | 1,266 |
| | Standart Sapma | 0,263 | 0,175 | 0,179 | 0,001 | 0,793 | 1,377 | 0,075 | 0,06 | 0,029 | 0,036 | 3,964 | 0,092 |
| Marmara | Minumum | 2,973 | 2,482 | 2,585 | 0,006 | 5,292 | 10,674 | 0,448 | 0,592 | 0,657 | 0,058 | 18,28 | 1,122 |
| | Maksimum | 4,153 | 3,306 | 3,392 | 0,016 | 9,16 | 14,46 | 0,687 | 0,801 | 0,777 | 0,188 | 28,049 | 1,463 |
| | Ortalama | 3,584 | 2,774 | 2,966 | 0,009 | 7,05 | 12,103 | 0,606 | 0,7 | 0,709 | 0,127 | 20,902 | 1,294 |
| | Standart Sapma | 0,247 | 0,189 | 0,167 | 0,002 | 0,793 | 0,848 | 0,054 | 0,05 | 0,031 | 0,031 | 2,092 | 0,079 |
| Ege | Minumum | 2,673 | 2,395 | 2,412 | 0,005 | 4,613 | 9,888 | 0,43 | 0,565 | 0,628 | 0,034 | 17,181 | 1,07 |
| | Maksimum | 4,117 | 3,172 | 3,555 | 0,012 | 8,95 | 16,163 | 0,731 | 0,822 | 0,777 | 0,194 | 29,189 | 1,482 |
| | Ortalama | 3,509 | 2,737 | 2,904 | 0,008 | 6,715 | 11,931 | 0,596 | 0,697 | 0,698 | 0,122 | 21,295 | 1,283 |
| | Standart Sapma | 0,312 | 0,167 | 0,2 | 0,002 | 0,845 | 1,177 | 0,061 | 0,056 | 0,027 | 0,036 | 2,336 | 0,093 |
| Akdeniz | Minumum | 2,865 | 2,377 | 2,565 | 0,006 | 5,221 | 10,332 | 0,336 | 0,634 | 0,651 | 0,04 | 18,794 | 1,084 |
| | Maksimum | 4,034 | 3,058 | 3,194 | 0,015 | 8,12 | 16,007 | 0,668 | 0,851 | 0,771 | 0,16 | 37,429 | 1,382 |
| | Ortalama | 3,324 | 2,668 | 2,801 | 0,008 | 6,279 | 11,642 | 0,589 | 0,726 | 0,708 | 0,109 | 21,709 | 1,247 |
| | Standart Sapma | 0,267 | 0,161 | 0,158 | 0,002 | 0,723 | 1,267 | 0,064 | 0,06 | 0,03 | 0,03 | 3,539 | 0,075 |



Şekil 2. Denizler arasında otolit uzunluğuna göre otolit şekil indeksleri

Tablo 3. Şekil indekslerinin denizler arasındaki farkları (ANOVA)

| Şekil indeksleri | F | p |
|------------------|-------|-------|
| Form faktör | 5,825 | 0,001 |
| Yuvarlaklık | 0,856 | 0,465 |
| Dikdörtgenlik | 1,806 | 0,148 |
| Eliptiklik | 0,948 | 0,419 |
| Dairesellik | 5,137 | 0,020 |
| Çerçeve oranı | 1,012 | 0,389 |

Otolit element analizi

Her bir denizde *C. lucerna* otolitlerinin element konsantrasyonlarının ortalama ve standart sapma değerleri Tablo 4’de verilmiştir. Otolitlerin element konsantrasyonları Şekil 4’de verilmiştir. Bölgesel olarak bakıldığında otolitlerde en çok bulunan element kalsiyumdur. Kalsiyumdan sonra en bol bulunan elementin ise Karadeniz, Ege ve Akdeniz denizlerinde sodyum iken, Marmara Deniz’inde stronsiyum elementi olduğu saptanmıştır.

Tablo 4. *Chelidonichthys lucerna* otolitlerinin denizlerdeki element konsantrasyonlarına ait ortalama \pm standart sapma değerleri ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)

| Element | Bölge | | | |
|-----------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| | Karadeniz | Marmara | Ege | Akdeniz |
| Li | 0,125 \pm 0,199 | 0,190 \pm 0,095 | 0,145 \pm 0,074 | 0,149 \pm 0,056 |
| Na | 2880,506 \pm 774,304 | 1994,501 \pm 652,776 | 2819,171 \pm 514,167 | 3464,755 \pm 350,622 |
| Mg | 37,557 \pm 46,864 | 30,756 \pm 22,627 | 41,514 \pm 28,861 | 45,305 \pm 60,435 |
| Mn | 9,166 \pm 4,407 | 3,893 \pm 2,827 | 6,796 \pm 3,284 | 10,691 \pm 3,688 |
| Fe | 1,669 \pm 2,383 | 2,584 \pm 2,464 | 3,906 \pm 5,217 | 5,247 \pm 3,839 |
| Co | 0,125 \pm 0,182 | 0,245 \pm 0,115 | 0,295 \pm 0,135 | 0,404 \pm 0,128 |
| Ni | 0,089 \pm 0,126 | 0,207 \pm 0,160 | 0,173 \pm 0,086 | 0,383 \pm 0,143 |
| Cu | 0,200 \pm 0,417 | 0,226 \pm 0,201 | 0,352 \pm 0,449 | 0,885 \pm 0,587 |
| Zn | 2,329 \pm 2,875 | 0,852 \pm 1,783 | 2,999 \pm 3,085 | 6,058 \pm 5,247 |
| Sr | 1788,536 \pm 222,610 | 2455,781 \pm 618,544 | 2570,556 \pm 465,945 | 2593,074 \pm 311,311 |
| Ba | 4,031 \pm 1,683 | 2,251 \pm 1,089 | 2,113 \pm 1,133 | 2,517 \pm 1,060 |
| Pb | 0,115 \pm 0,071 | 0,130 \pm 0,051 | 0,147 \pm 0,054 | 0,223 \pm 0,069 |
| K | 891,110 \pm 222,764 | 591,507 \pm 189,985 | 750,438 \pm 228,759 | 1168,619 \pm 217,295 |
| P | 20,382 \pm 9,726 | 16,972 \pm 7,831 | 20,987 \pm 13,770 | 17,309 \pm 10,368 |
| Ca | 282322,123 \pm 72520,386 | 335844,768 \pm 25712,011 | 368453,928 \pm 61253,449 | 405112,887 \pm 34269,534 |

Element:Ca değerlerine normallik testi uygulanmıştır. Normal dağılım şartını taşıyıp taşımadıkları olgusu Shapiro-Wilk testi ve çarpıklık basıklık değerleri olan Skewness ve Kurtosis sonuçlarına göre değerlendirilmiştir. Buna göre Li:Ca, Mn:Ca, Co:Ca, Ni:Ca, Cu:Ca, Sr:Ca, Ba:Ca, Pb:Ca, K:Ca ve P:Ca oranları normal dağılım gösterirken, Na:Ca, Mg:Ca, Fe:Ca, Zn:Ca oranlarının normal dağılım göstermediği tespit edilmiştir. Bu nedenle normal dağılım şartını taşımayan verilere Log₁₀ dönüşümü uygulanmış ve verilerin normal dağılması sağlanmıştır. Varyansların homojenliği varsayımı için Levene testi uygulanmış ve tüm verilerin homojenlik şartını taşıdığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca Element:Ca konsantrasyonu ile otolit ağırlığı arasındaki ilişki kovaryans analizi (ANCOVA, kovaryant: otolit ağırlığı) ile test edilmiş ve Element:Ca oranlarının

otolit ağırlığı ile anlamlı düzeyde ilişkili olmadığı tespit edilmiştir (ANCOVA, $p > 0.05$). Denizler arasında Element:Ca konsantrasyonlarında anlamlı farklılık olup olmadığı Tek Yönlü ANOVA analizi kullanılarak test edilmiştir. Analiz sonucunda Li:Ca, Mn:Ca, Fe:Ca, Co:Ca, Ni:Ca, Cu:Ca, Zn:Ca, Sr:Ca, Ba:Ca ve K:Ca konsantrasyonlarında bölgesel olarak anlamlı farklılıklar olduğu saptanmıştır ($p < 0,05$) (Tablo 5). Birinci ve ikinci diskriminant fonksiyonları için gruplar arasında ayırım yapılmasında birincil öneme sahip elementler sırasıyla Sr, K, Zn, Fe, Cu, Ni, Li, Coolmuştur (Şekil 5).

Tablo 5. Element:Ca konsantrasyonlarının denizler arasındaki farkları (ANOVA)

| Element K. | F | p |
|------------|--------|-------|
| Li:Ca | 3,592 | 0,015 |
| Mn:Ca | 13,152 | 0,000 |
| Fe:Ca | 14,784 | 0,000 |
| Co:Ca | 2,816 | 0,041 |
| Ni:Ca | 12,330 | 0,000 |
| Cu:Ca | 9,061 | 0,000 |
| Zn:Ca | 8,289 | 0,000 |
| Sr:Ca | 8,389 | 0,000 |
| Ba:Ca | 16,765 | 0,000 |
| K:Ca | 7,574 | 0,000 |

Otolitlerin çok elementli konsantrasyonlarında denizler arasında farklılıklar saptanmıştır (MANOVA, Pillai's Trace: $F_{3,156}=9,699$ $p=0,00$). Ayrıca çoklu element karşılaştırmaları da yapılmış ve denizler arasında anlamlı farklılıklar olduğu saptanmıştır (Hotelling T kare testi $p<0,05$). Sr:Ca içeriği denizler arasında farklılık göstermektedir ($p=0,00$), diğer denizlere kıyasla Marmara Denizi'ndeki otolitlerde en yüksek seviyede olduğu tespit edilmiştir. Zn:Ca element oranının Marmara Denizi'nde tüm diğer denizlerden az olduğu, Karadeniz'de Ege Denizi'nden fazla olduğu tespit edilmiştir. Mn:Ca, Ni:Ca, K:Ca ve Cu:Ca konsantrasyonları açısından tüm denizlerin birbirinden anlamlı derecede farklı olduğu saptanmıştır ($p<0,05$). Karadeniz'de Fe:Ca oranının diğer üç denizden fazla olduğu ve bu sonucun da istatistiksel olarak anlamlı olduğu saptanmıştır. Li:Ca konsantrasyonunun Marmara Denizi'nde Ege ve Akdeniz'den farklı olduğu belirlenmiştir. Co:Ca ve Ba:Ca element oranlarının Karadeniz'de Marmara ve Ege denizlerinden anlamlı derecede farklı olduğu diğer denizlere oranla otolitlerde fazla bulunduğu sonucuna ulaşılmıştır (Şekil 4).

Tablo 6. *Chelidonichthys lucerna* bireylerinin otolit şekli, otolit kimyası ve tüm doğal etiketlerine dayalı Jackknifed çapraz doğrulamalı yeniden sıralama matrisi

| Otolit Şekli | Tahmini Lokasyon | | | | | |
|---------------------|------------------|-----------|-----------|-----------|-------|-------------|
| | Karadeniz | Marmara | Ege | Akdeniz | Total | % |
| Orijinal Lokasyon | | | | | | |
| Karadeniz | 19 | 2 | 9 | 10 | 40 | 47,5 |
| Marmara | 4 | 18 | 11 | 7 | 40 | 45 |
| Ege | 10 | 9 | 18 | 3 | 40 | 45 |
| Akdeniz | 9 | 7 | 5 | 19 | 40 | 47,5 |
| Otolit Kimyası | Tahmini Lokasyon | | | | | |
| | Karadeniz | Marmara | Ege | Akdeniz | Total | % |
| Orijinal Lokasyon | | | | | | |
| Karadeniz | 32 | 0 | 5 | 3 | 40 | 80 |
| Marmara | 2 | 28 | 8 | 2 | 40 | 70 |
| Ege | 1 | 4 | 32 | 3 | 40 | 80 |
| Akdeniz | 3 | 1 | 2 | 34 | 40 | 85 |
| Tüm Doğal Etiketler | Tahmini Lokasyon | | | | | |
| | Karadeniz | Marmara | Ege | Akdeniz | Total | % |
| Orijinal Lokasyon | | | | | | |
| Karadeniz | 33 | 0 | 5 | 3 | 40 | 82,5 |
| Marmara | 2 | 30 | 8 | 2 | 40 | 75 |
| Ege | 1 | 4 | 34 | 3 | 40 | 85 |
| Akdeniz | 3 | 1 | 2 | 36 | 40 | 90 |

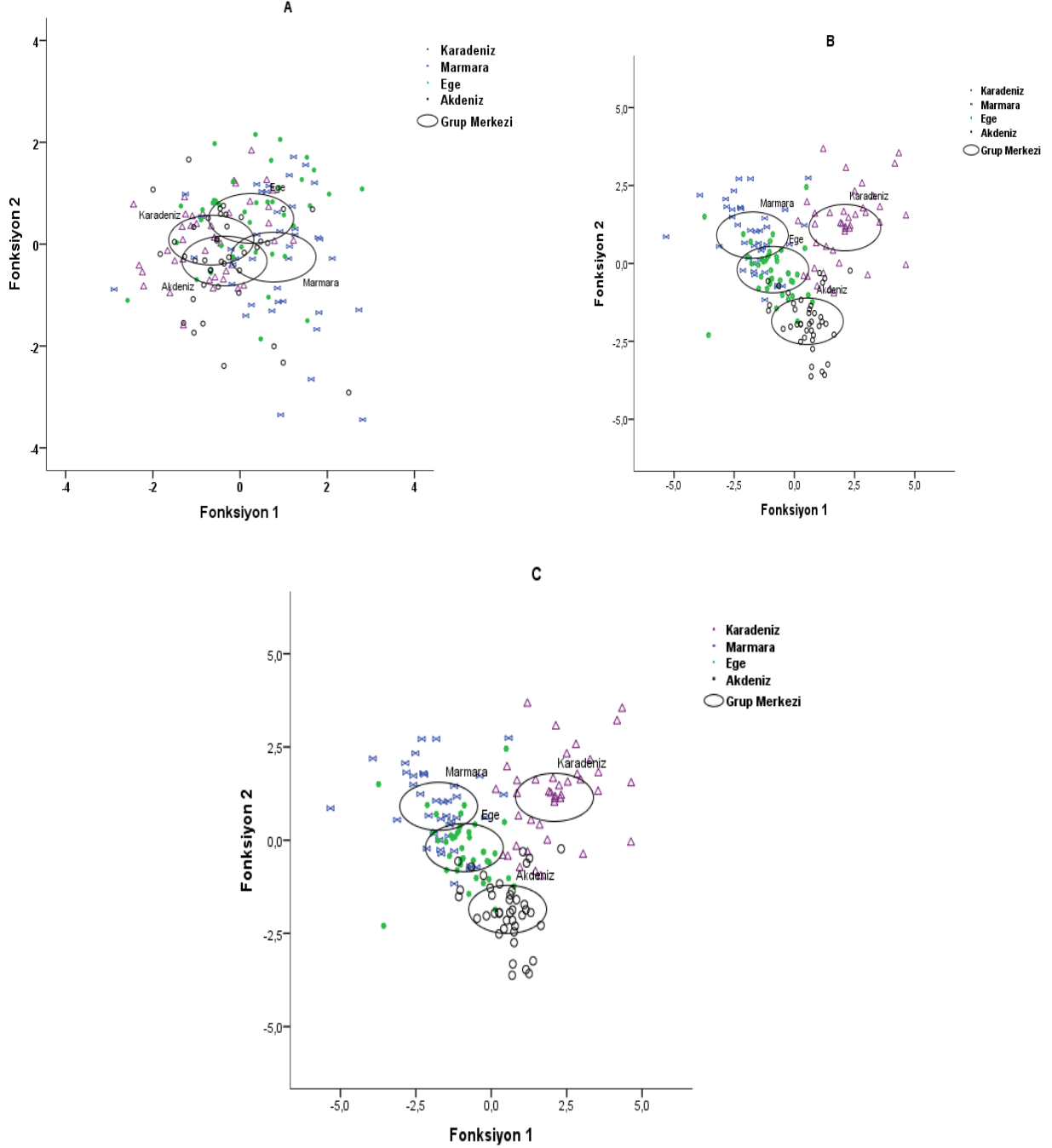
Otolit kimyasına ilişkin diskriminant analiz grafiği Şekil 3B'de verilmiştir. Yapılan analiz sonucunda üç adet fonksiyon üretilmiş olup, ilk iki fonksiyon sırasıyla %54,4 ve %35,2 oranları ile varyansın çoğunluğunu

açıklamaktadır. Grafiğe bakıldığında fonksiyon 1'in Marmara ve Karadeniz, fonksiyon 2'nin ise Marmara ve Akdeniz popülasyonlarını ayırdığı gözlenmektedir.

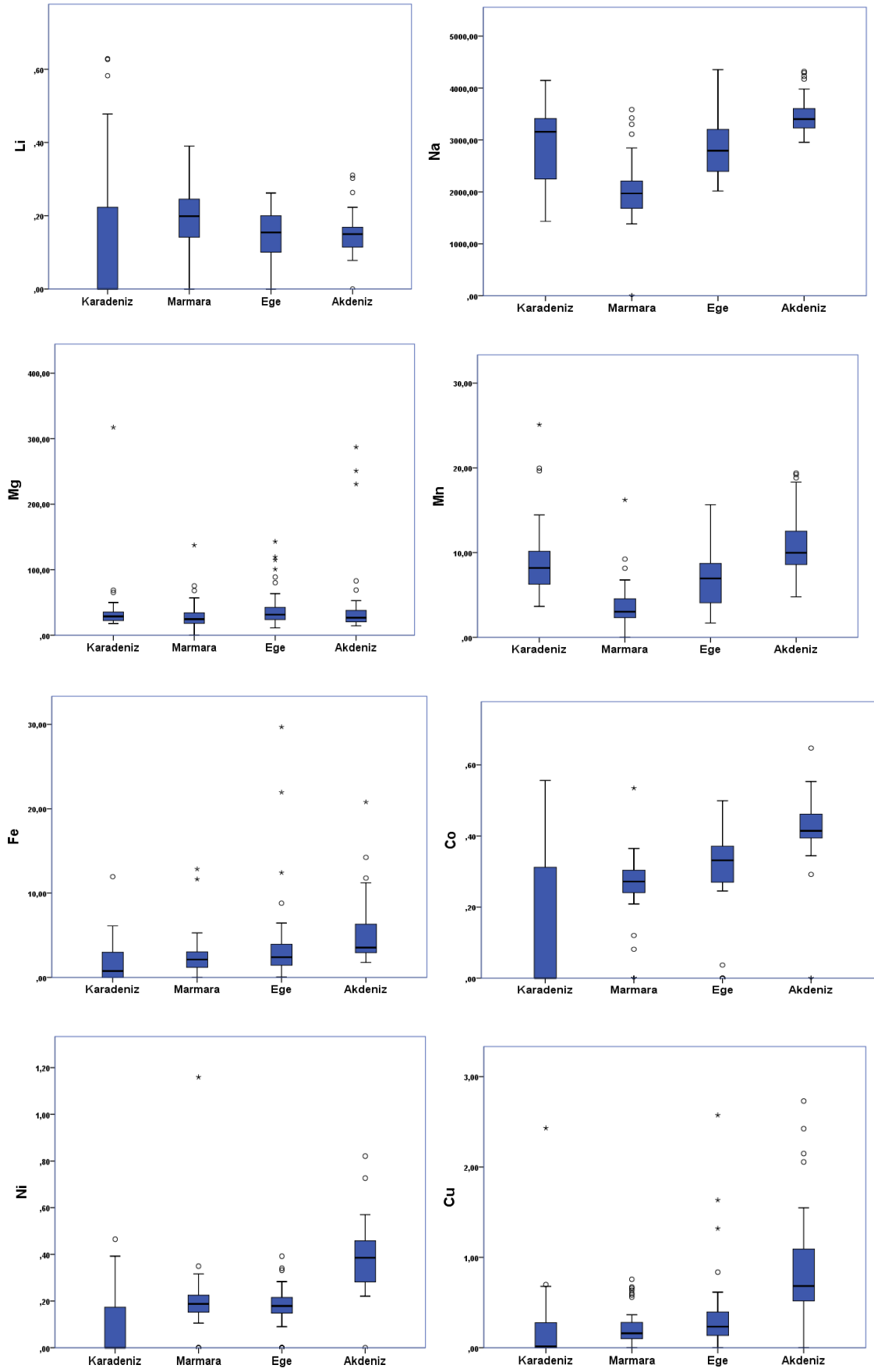
Marmara ve Ege populasyonlarında ise kısmen de olsa örtüşme olduğu sonucuna varılmıştır.

Bireylerin orijinal gruplarına göre doğru sınıflandırılması otolit kimyasına göre yapıldığında ise %70 ile %85 arasında değişim göstermektedir. En yüksek

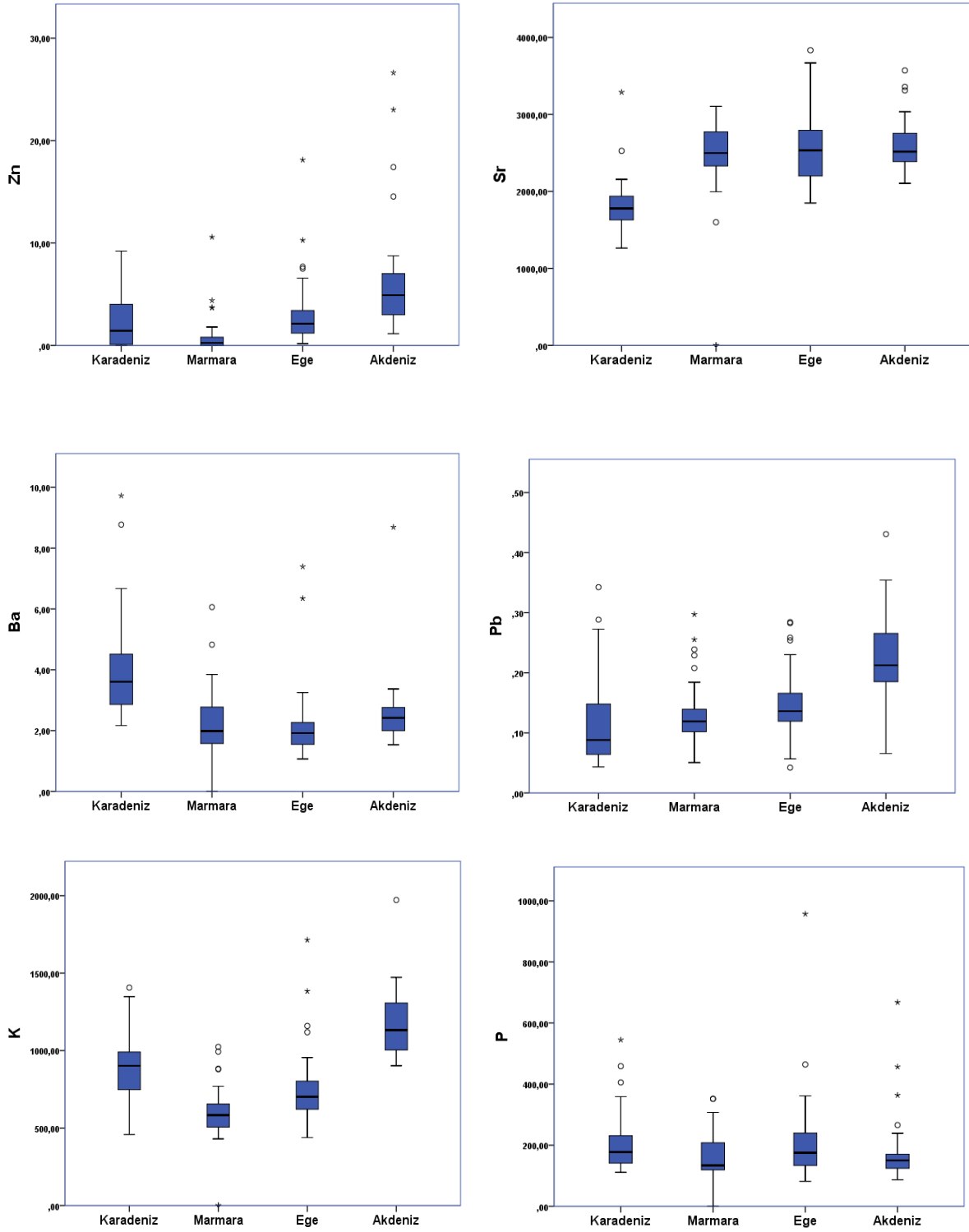
yeniden sınıflandırma oranı açıkça izole olan Akdeniz örneklerinde gözlenmiştir. Otolit kimyası açısından dört denizde de balıklar nispeten yüksek bir doğruluk derecesiyle orijinal konumlarına göre yeniden sınıflandırılabilir (Tablo 6).



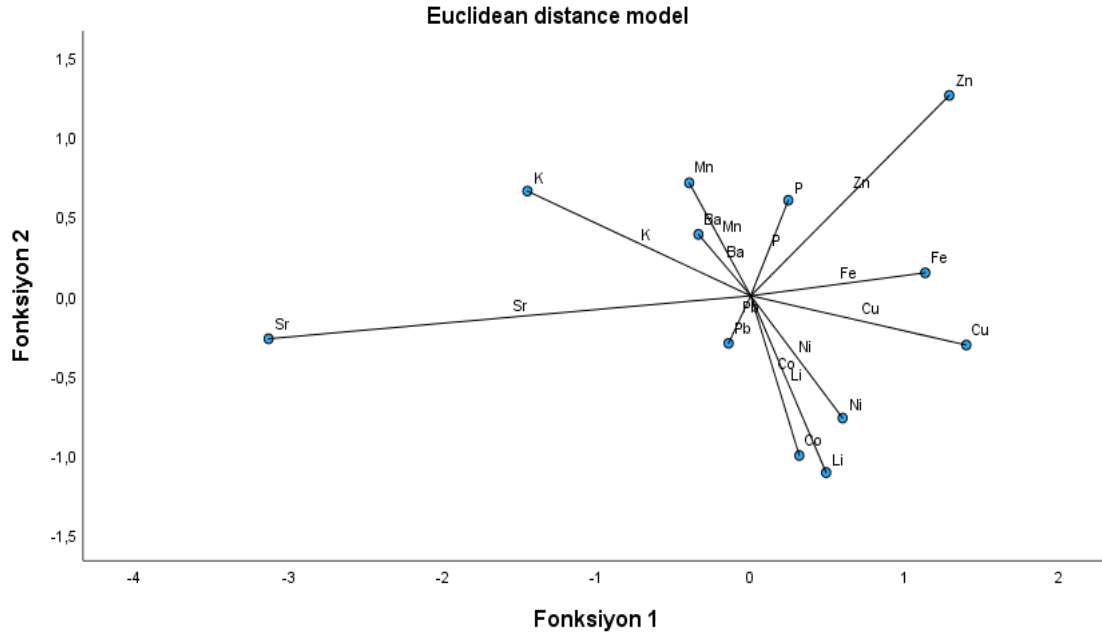
Şekil 3. *Chelidonichthys lucerna* bireylerindeki doğal etiketler için mekansal farklılıkları gösteren doğrusal diskriminant fonksiyon analizleri (LDFA) grafikleri (A) otolit şekil indeksleri, (B) otolit kimyası (C) tüm doğal etiketler (şekil indeksleri ve elementler). Verilerin etrafındaki elipsler %95 güven aralığını temsil eder. Her veri noktası birer balık bireyine tekabül eder. Denizler; Karadeniz, Marmara, Ege ve Akdeniz



Şekil 4. *Chelidonichthys lucerna*'nın sağ otolitlerinde kaydedilen element konsantrasyon grafikleri (µg.g⁻¹)



Şekil 4 devamı. *Chelidonichthys lucerna*'nın sağ otolitlerinde kaydedilen element konsantrasyon grafikleri (µg.g⁻¹)



Şekil 5. *Chelidonichthys lucerna* bireylerine ait otolit element konsantrasyonlarının diskriminant fonksiyonu. Vektörler, her değişkene ilişkin puanların ilk iki diskriminant fonksiyonu üzerindeki yüklerini gösterir.

Otolit element ve şekil analizi

Tüm doğal otolit etiketler bir araya getirildiğinde (otolit şekil indeksleri ve otolit kimyası), denizler arasında istatistiksel olarak anlamlı sonuçlar elde edilmiştir (MANOVA, Pillai's Trace $F_{3,156} = 7,345$, $p=0,00$). Dört denizden gelen balıklar yakalanma konumlarına göre oldukça yüksek bir doğruluk derecesiyle yeniden sınıflandırılmıştır (%75 ile %90 arasında) (Tablo 6). Tüm doğal etiketlere yapılan diskriminant analizi sonucunda üç adet fonksiyon üretilmiş olup, %54,4 ve 35,9 oranında katkıda bulunması, toplam varyansın çoğunluğunun ilk iki kanonik değişken tarafından açıklandığını göstermektedir. Tüm örneklerin ilk iki diskriminant fonksiyonun grafiği Akdeniz ve Karadeniz'in birbirlerinden ve diğer denizlerden önemli ölçüde ayrıldığını ve de Marmara ve Ege denizlerinin kısmen de olsa örtüştüğünü göstermiştir (Şekil 3C).

Tartışma

Balık stoklarının ayırt edilmesi güvenli balıkçılık kaynak yönetimi için gereklidir (Begg ve Waldman, 1999). Stokların tanımlanması populasyonlar arası bağlantıların veya farklılıkların ilişki düzeylerinin belirlenmesine imkân verir (Gillanders ve Kingsford, 1996; Pender ve Griffin 1996; Campana ve Thorrold, 2001; Forrester ve Swearer, 2002). Ticari olarak sömürülen balık stoklarının çoğu, geçici bir karışımla güçlü habitat örtüşmeleri gösterir. Özellikle stoklar üretkenlik bakımından farklılık gösterdiğinde stok karışımlarının dikkate alınmaması, özgünyumurtlayan bireylerin aşırı sömürüsüne yol açabilir (Kerr vd., 2020). Bu nedenle, karışım stoklarındaki bireylerin, yüksek sınıflandırma doğruluğu olan güvenilir

stok ayırma yöntemleri kullanılarak stok orijinlerinin belirlenmesi gerekmektedir (Cadrin vd., 2014).

Balıklarda stok ayırma ile ilgili Türkiye denizlerinde yapılmış çalışmalar bulunmaktadır. Atay (1985), kırlangıç balıklarının Marmara, Ege ve Akdeniz'de bolca bulunduğunu, Karadeniz'de ise nadiren bulduklarını belirtmiştir. Turan vd. (2004) yaptıkları çalışmada Karadeniz, Ege ve Kuzeydoğu Akdeniz'deki hamsinin (*Engraulis encrasicolus* L.) morfometrik yapısını incelemiş, denizler arasında yüksek derecede (%93) farklılık olduğunu, denizlerdeki hamsilerin farklı kümelenmeleri temsil ettiğini, özellikle de Akdeniz'deki hamsi popülasyonlarının Ege ve Karadeniz'den morfolojik olarak farklı olduğunu saptamıştır. Bizim çalışmamızda da *C. lucerna* türünün Akdeniz popülasyonunun diğer denizlerden önemli ölçüde ayrıldığı sonucuna varılmıştır. Turan (2004) yaptığı çalışmada *Trachurus mediterraneus* türünün Karadeniz, Marmara, Ege ve Doğu Akdeniz'deki stokları arasındaki morfolojik farklılıkları incelemiştir. Marmara Denizi örneklerinin hem morfometrik hem de meristik karakterler açısından diğerlerinden en izole örnekler olduğu, Ege Denizi ve Akdeniz'de bir dereceye kadar örtüşme olduğu belirlenmiştir. Ergüden ve Turan (2005) yaptıkları çalışmada *Dicentrarchus labrax* türünün Karadeniz, Marmara, Ege ve Kuzeydoğu Akdeniz'deki populasyonlarının genetik ve morfolojik yapısının incelemiş, populasyonların morfolojik olarak birbirinden ayrıştığını saptamıştır. Turan (2006) yaptıkları çalışmada Karadeniz, Marmara, Ege ve Kuzeydoğu Akdeniz'deki lüfer (*Pomatomus saltatrix*) stokları arasındaki morfometrik ve meristik değişimlerini incelemiştir. Çalışmada hem morfometrik hem de meristik analizlerde en yüksek yeniden

sınıflandırma oranının, en net izole edilen gruplar olan Doğu Karadeniz ve Kuzeydoğu Akdeniz örneklerinde olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmada da *C. lucerna* bireylerinin morfometrik analizler (otolit şekil indeksleri) açısından en yüksek yeniden sınıflandırma oranının Karadeniz ve Akdeniz’de (%47,5) olduğu saptanmıştır. Dürrani ve Seyhan (2024) yaptıkları çalışmada *Trachurus mediterraneus* türünün Marmara ve Karadeniz’deki vücut ve otolit şekil analizlerini kullanarak stoklarının tanımlanmasını amaçlamışlardır. Çalışmada şekil indeksleri ve eliptik fourier analizi kullanılarak yapılan otolit şekil analizi, üç farklı *T. mediterraneus* stokunun varlığını desteklemiş, Doğu Karadeniz, Orta Karadeniz ve Marmara Denizi arasında önemli farklılıklar olduğu belirlenmiştir. Saygın (2024) yaptığı çalışmada Ege, Karadeniz ve Akdeniz’de yaşayan *Mullus barbatus* türünün sagittal otolit morfometrisini incelemiştir. Çalışma sonunda Eliptik Fourier analizinin (%68,6) Karadeniz’i Akdeniz ve Ege Denizlerinden ayırırken, Wavelet analizinin (%69,3) Ege Denizi’ni Akdeniz ve Karadeniz’den ayırdığı saptanmıştır.

Balıkların iç kulağında bulunan kalsiyum karbonat yapıları otolitler yaygın olarak kullanılan stok ayırma tekniklerinden biridir (Campana ve Casselman 1993). Otolit şekil ölçümleri, spesifik ayırım, stok analizi ve otolit morfolojisi çalışmalarıyla şekil farklılıklarının işlevinin ve ekolojik öneminin test edilmesinde bir indeks olarak kabul edilmektedir (Aguirre ve Lombarte, 1999; Cardinale vd., 2004). Otolit şekil analizleri, balık popülasyonları arasında ayırım yapmak için değerli bir araçtır (Stransky vd., 2008; Agüera ve Bronphy 2011; Moreira vd., 2019). Otolit şeklinin bir dizi çevresel (Tuset vd., 2003b; Carvalho vd., 2015; Vignon 2015) ve endojen faktörlerden (Castonguay vd., 1991; Simoneau vd., 2000; Cardinale vd., 2004) etkilenmekte ve bir türün stokları arasında farklılık gösterebildiği gibi, aynı stok içindeki yaş, cinsiyet ve yıl sınıfları arasında da farklılık gösterebilmektedir (Campana ve Casselman 1993; Cardinale vd., 2004; Ladroit vd. 2017). Otolit şekli çoğunlukla çevresel ve genetik faktörlerin bir kombinasyonu tarafından yönlendirilir ve farklı stokların ilgili bir işareti olarak kullanılabilen stoka özgü özellikler içerir (Vieira vd., 2014; Berg vd., 2018)

Otolit ağırlığı, büyüme oranındaki değişikliklere karşı duyarlıdır ve güçlü bir ayırıcıdır (Reznick vd., 1989; Pawson, 1990; Foresberg ve Neal, 1993; Tuset vd, 2006; Ilkyaz vd., 2010; Zorica vd., 2010; Amouei vd., 2014). Bostancı vd. (2015) dört allopatrik *Alburnus* türünün tanımlanması amacıyla yaptıkları çalışmada otolit şekli ve morfometrisini kullanmıştır. Yapılan çalışmada otolit ağırlığının *Alburnus* türleri için güçlü bir ayırıcı olmadığı sonucuna varılmıştır. Bizim çalışmamızda otolit ağırlığının bölgeler arasında anlamlı farklılıklar gösterdiği yapılan istatistiksel analizler sonucunda Marmara Denizi’nde tüm diğer denizlerden anlamlı derecede farklı olduğu saptanmıştır.

Dairesellik (CL) minimum 4π (12.57) değerini alan ve otolit tam bir daireye ne kadar benzediği ile ilgili bilgi veren otolit şekil indeksidir (Tuset vd. 2003b). Tuset vd. (2008) yaptıkları çalışmada *C. lucerna* türü için daireselliğin minimum 15,4 cm maksimum 26,0 olduğunu

belirtmişlerdir. Çiçek vd. (2021) ise *C. lucerna* türü için ortalama daireselliği 17,378 olarak belirlemiştir. Bu çalışmada ortalama dairesellik Karadeniz’de 22,5 cm, Marmara Denizi’nde 20,9 cm, Ege Denizi’nde 21,2 cm, Akdeniz’de 21,7 cm olarak tespit edilmiştir.

Dikdörtgenlik (RE) otolit şekil indeksi uzunluk ve genişliğin alana göre olan değişikliklerini tanımlar, diğer bir deyişle alanın uzunluk ve genişliğin çarpımına oranıdır. Dikdörtgenlik için 1,0 değeri otolit tam bir kare olduğunu ifade eder (Tuset 2003b). *C. lucerna* türü için dikdörtgenlik Tuset vd. (2008)’nin çalışmasında 0,1, Çiçek vd. (2021)’nin çalışmasında ise 0,683 olarak belirtilmiştir. Bu çalışmada Karadeniz’de 0,715, Marmara Denizi’nde 0,709, Ege Denizi’nde 0,698, Akdeniz’de 0,708 olarak saptanmıştır.

Form faktörü (FF); mükemmel bir daire olduğunda 1,0 değerini alan, düzensizleştikçe de 0’a yaklaşan, yüzey alanı düzensizliğini tahmin etmek için kullanılan otolit şekil indeksidir. Yuvarlaklık (RO); daireye benzerlik hakkında bilgi veren otolit şekil indeksidir. Eliptiklik (EL), otolit eksenlerindeki değişikliklerin orantılı olup olmadığını gösterir (Tuset 2003b). Çerçeve oranı (AR) otolit uzunluğu ile otolit genişliği arasındaki orandır, bu faktör otolit şekil eğilimini ifade eder; balığın otoliti ne kadar uzun olursa çerçeve oranı da o kadar büyük olur (Zorica vd., 2010). Çiçek vd. (2021) yaptıkları çalışmada *C. lucerna* türü için ortalama form faktör 0,723, yuvarlaklık 0,630, eliptiklik 0,160, çerçeve oranı ise 1,382 olarak tespit edilmiştir. Bu çalışmada ortalama form faktörü Karadeniz’de 0,568, Marmara Denizi’nde 0,606, Ege Denizi’nde 0,596, Akdeniz’de 0,589 olarak belirlenmiştir. Ortalama yuvarlaklık Karadeniz’de 0,723, Marmara Denizi’nde 0,700, Ege Denizi’nde 0,697, Akdeniz’de 0,726 olarak tespit edilmiştir. Ortalama eliptiklik Karadeniz’de 0,116, Marmara Denizi’nde 0,127, Ege Denizi’nde 0,122, Akdeniz’de 0,109 olarak saptanmıştır. Ortalama çerçeve oranı ise Karadeniz’de 1,266, Marmara Denizi’nde 1,294, Ege Denizi’nde 1,283, Akdeniz’de 1,247 olarak tespit edilmiştir.

Özpiçak vd. (2019) Karadeniz’de lüfer balığının otolit şekil indeksleri üzerine yaptıkları çalışmada otolit uzunluğu artarken çerçeve oranı, eliptiklik ve daireselliğin arttığı, form faktörü, yuvarlaklık ve dikdörtgenlik değerlerinin ise azaldığı sonucuna varmıştır. Bu çalışmada da otolit uzunluğu artarken; çerçeve oranı ve eliptiklik artarken, yuvarlaklık ve dikdörtgenliğin azaldığı tespit edilmiştir. Ferreira vd. (2019) Portekiz’de *C. lucerna* bireylerinin stok ayırımı ile ilgili yaptıkları çalışmada form faktör, dikdörtgenlik ve dairesellik şekil indeksleri açısından bölgelerin birbirinden ayrıştığı sonucuna varmışlardır. Bizim çalışmamızda form faktör ve dairesellik şekil indeksleri stokları ayırmada istatistiksel olarak önemli bulunmuştur. *Chelidonichthys lucerna* otolitlerinin şekil indekslerine yapılan diskriminant analizi, denizlerde örtüşmeler olsa da Karadeniz ve Marmara denizlerinin otolit morfometrisi açısından birbirinden farklı olduğunu ortaya çıkarmıştır. Ayrıca, yapılan istatistiksel analizler dairesellik şekil indeksi açısından tüm denizlerdeki stokların birbirinden farklı olduğunu, form faktör şekil

indeksi açısından ise Karadeniz'deki stokların Marmara Denizi'ndeki stoklardan farklı olduğunu açığa çıkarmıştır.

Literatürde bireylerin otolit şekil indeksleri ile orijinal konumlarına göre doğru sınıflandırılmasıyla ilgili çalışmalar bulunmaktadır. Begg ve Brown (2000), *Melanogrammus aeglefinus* stoklarının tanımlanmasında yıl sınıflarında %56-81 oranında sınıflandırma başarısı bildirmişlerdir. Devries vd. (2002), doğu Meksika Körfezi ile Atlantik Okyanusu arasındaki *Scomberomorus cavalla* stoklarının sınıflandırılmasında %81,6 doğruluk elde etmiştir. Tuset vd. (2003b) *Serranus cabrilla*'da Kanarya Adaları ile Alicante arasında bölgesel farklılıkları %68,8 doğrulukla ortaya koymuştur. Bourehail vd. (2015) Cezayir'de *Sphyræna sphyraena* ve *Sphyræna viridensis* stoklarını ayırmak için otolit şekil indekslerini kullanmış ve çalışmada bireylerin %80'inin otolit şekli ile doğru şekilde sınıflandırılabilceği sonucuna varmışlardır. Ozpıçak vd. (2018) Karadeniz bölgesindeki dört lokaliteden örneklenen kefalın utriküler ve lagenar otolit şekillerinin popülasyon içi ve popülasyonlar arası varyasyonlarını belirledikleri çalışmada, bireylerin otolit şekline göre %65 oranında doğru şekilde sınıflandırıldığını tespit etmişlerdir. Ferreira vd. (2019) Portekiz'de *C. lucerna* bireylerinin stok ayrımı ile ilgili yaptıkları çalışmada otolit şekil indeksleri ile bireylerin orijinal bölgelerine yeniden tahsis başarısının düşük olduğu (%51) sonucuna varmıştır. Bu çalışmada ise *C. lucerna* bireylerinin orijinal denizlerine göre doğru sınıflandırılması otolit şekline göre yapıldığında başarı çok düşük olmuştur (%47,5). Bu nedenle de sadece şekil indeks analizi sonuçlarına bakarak *C. lucerna* popülasyonlarını sınıflandırmanın yeterli olmadığı düşünülmektedir.

Balık otolitlerindeki element konsantrasyonlarının kronolojik kayıtları, bireysel balıkların yaşadığı çevresel koşulları anlamak için yaygın olarak kullanılan bir araçtır (Hüssy vd., 2024). Otolit element bileşiminin balık stoklarının popülasyon yapısını ve popülasyonların bağlantısını belirlemede yararlı bir teknik olduğu kanıtlanmıştır (Silva vd., 2011; Higgins vd., 2013; Moreira vd., 2018). Turan vd. (2006) *Trachurus mediterraneus* türünde yaptıkları çalışmada Na:Ca ve K:Ca oranlarının Karadeniz ve Ege denizlerinin ayrılmasında önemli ölçüde rol aldığını rapor etmişlerdir. Rooker vd. (2001) Atlantik mavi yüzgeçli orkinosun bölgesel stok farklılığını değerlendirmede lityumun (Li) önemli bir element olduğunu, magnezyumun (Mg) ise böyle bir önem arz etmediğini bildirmiştir. Ayrıca Gillanders ve Kingsford (2003) yaptıkları çalışmada benzer habitatlardaki çipura türleri arasında lityum (Li) ve manganez (Mn) elementleri açısından önemli farklılıklar bulunduğunu bildirmiştir. Bal ve Esen (2021) Marmara Denizi'nde iki demersal balık türünün *Merluccius merluccius* ve *Mullus surmuletus*'un otolit kimyası ve otolit morfolojisi üzerine yaptıkları çalışmada otolitlerde Sr:Ca ve Mg:Ca konsantrasyonlarını belirlemişlerdir. Çalışmada iki balık türü için stronsiyum (Sr), magnezyum (Mg) ve kalsiyum (Ca) miktarları arasındaki önemli fark olduğu, Sr ve Mg elementlerinin *Merluccius merluccius* türünde daha fazla olduğu bulunmuştur. Schroeder vd. (2022) Atlantik okyanusunda *Sardinella brasiliensis* ile ilgili yaptıkları çalışmada Ba:Ca,

Cu:Ca, Li:Ca, Mg:Ca, Mn:Ca, Sr:Ca ve Zn:Ca element oranlarının bölgesel olarak farklılıklarını rapor etmişlerdir. Ferreira vd. (2023) Portekiz kıyılarında yaptıkları çalışmada *C. lucerna* türünün otolitlerindeki Sr:Ca ve Ba:Ca oranını kullanarak acı ve deniz suları arasındaki tür hareketini değerlendirmiştir. Çalışmada juvenil bireyler kullanılmış ve çoğu bireyin (%97) nehir ağzına bağlı bir profile sahip olsa da tüm yaşamı boyunca orada olmadığı, %63'ünün yaşamının erken dönemlerinde deniz sularında bulunduğu saptanmıştır. Koochaknejad vd. (2024) otolit element analizi ile Basra Körfezi'nde *Tenualosa ilisha* balığının göç davranışlarını ve stok yapısını belirledikleri çalışmada otolitlerdeki Sr:Ca, Ba:Ca ve Li:Ca oranlarını analiz etmiştir. Bu örneklerden de anlaşıldığı üzere elementlerin stok ayrımı üzerindeki etkisi türlere göre değişim göstermektedir. Çalışmamızda *C. lucerna* otolitlerinin kimyasal analizi sonucunda diğer kıyı deniz türlerinde bulunan genel konsantrasyon aralıkları dahilinde olan 10 elementin (Li, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Sr, Ba, K) bilgilendirici seviyelerde varlığı tespit edilmiştir. Na:Ca, Mg:Ca, Pb:Ca, P:Ca elementlerinin oranları çalışma alanı boyunca bölgesel bir değişiklik göstermemiştir. Türkiye'nin dört denizinden yakalanan türün otolitlerinde hemen hemen tüm element:Ca oranları bölgesel farklılıklar göstermiştir.

Karadeniz, Ege ve Akdeniz'de kalsiyumdan sonra en bol bulunan element sodyum (Na) iken, Marmara Denizi'nde stronsiyum (Sr) elementi olmuştur. Ferreira vd. (2019) Portekiz'de yaptıkları çalışmada da stronsiyum (Sr) elementinin *C. lucerna* otolitlerinde en bol bulunan element olduğunu rapor etmişlerdir. Sr elementinin tuzluluk ile pozitif korelasyona sahip olduğunu ve bu nedenle genellikle yüksek tuzluluk ortamlarıyla ilişkilendirilen bir eser element olduğunu belirten birçok çalışma mevcuttur (Silva vd., 2011; Reis-Santos vd., 2013; Moreira vd., 2018). Ancak, Hüssy vd. (2024) yaptıkları çalışmada beklenenin aksine çevresel kontrol altındaki elementlerden olan Sr elementinin tuzlulukla ilişkili olmadığını belirtmişlerdir. Otolitlerdeki Sr elementinin fazla olması suyun tuzluluk oranıyla ilgili olabilir ya da balık büyümesi ve yumurtlama gibi intogenetik süreçlerden kaynaklanabilmektedir. Ayrıca, Ferreira vd. (2023) Portekiz kıyılarında yaptıkları çalışmada *C. lucerna*'nın yüksek çevresel esneklik ve adaptasyon göstererek farklı tuzluluk derecelerine sahip habitatlara yerleşebildiği ve göç edebildiğini belirlemişlerdir. Diğer denizlerdeki *C. lucerna* otolitlerinde sodyum elementinin fazla çıkması da yine suyun tuzluluk oranı ile ya da balık bireylerinin beslenme, büyüme gibi fizyolojik süreçleri ile ilişkili olabilir (Sturrock vd., 2015; Avigliano vd., 2017; Heimbrand vd., 2020). Sr ve Ba elementleri genellikle zıt yönlerde değişen tuzluluk gradyanlarıyla ilişkilidir. Sr elementi Marmara Denizi'nde fazla iken, Ba elementi ise tuzluluk oranı daha düşük olan Karadeniz'de Marmara Denizi'ne oranla daha fazla olduğu belirlenmiştir. Br konsantrasyonu genellikle karasal tatlı su kaynakları ve kıyıdaki yükselme süreçleriyle ilişkilidir (Bath vd., 2000; Hamer vd., 2006).

Mn:Ca, Ni:Ca, Co:Ca, Cu:Ca, Zn:Ca konsantrasyonlarının tüm bölgelerde anlamlı derecede farklı olduğu saptanmıştır. Balık otolitlerinde Cu, Zn, Co ve

Ni gibi geçiş metallere varlığı, çevresel bir etkiden çok, esas olarak fizyolojik rollerinden kaynaklanmaktadır (Halden vd., 2000; Ranaldi ve Gagnon, 2008; Thomas vd., 2017). Ayrıca, Co, Cu gibi ağır metallerin otolitlerde fazlalığı, balıkların su kirliliğine çevresel olarak maruz kalma geçmişiyle tutarlı olabilir. Co elementi Karadeniz'de Marmara ve Ege denizlerine oranla daha fazla bulunmuştur. Bu da Karadeniz'de su kirliliği olma ihtimalini akıllara getirmektedir. Zn:Ca element oranı Marmara Denizi'nde tüm diğer denizlere oranla daha fazladır. Teleost balıklarında Zn alımının birincil kaynağı beslenmedir (Pentreath 1973; Ranaldi ve Gagnon, 2008; Mathews ve Fisher, 2009). Ayrıca, Thomas vd. (2017) yaptıkları çalışmada dışilerin otolitlerindeki Zn:Ca oranını *Pleuronectes platessa* türünün yumurtlama zamanı ile ilişkili olduğunu saptamışlardır. Hüseyin vd. (2024) ise fizyolojik kontrol altında olan Zn elementinin yumurtlayan bireylerde fazla olduğunu belirtmiştir. Marmara Denizi'nde Zn elementinin fazla çıkması büyük ölçekte suyun kimyası, balıkların beslenme ve üreme gibi fizyolojik süreçleri ile ilişkili olabilir.

Chelidonichthys lucerna populasyon yapısı üzerindeki iki otolit doğal etiketinin sinerjistik bir kombinasyonu, bunların populasyon etkileşimlerini anlama konusundaki faydalarını ve potansiyellerini karşılaştırmak için fırsat sağlamaktadır. Diskriminant analizi sonucunda %95 güven aralığı ile yapılan elipslerden de açıkça görülmektedir ki Marmara ve Karadeniz stokları hem otolit şekli hem de kimyası açısından birbirinden farklıdır. Bu da iki stokun yüksek düzeyde ayrıştığını, populasyonlarının sınırlı miktarda karıştığını ya da hiç karışmadığını düşündürmektedir. Yine Akdeniz tüm diğer denizlerden otolit kimyası açısından ayrılmaktadır. Bu da Akdeniz'deki tür dağılım alanının muhtemelen otolitlerin kimyasını etkileyebilecek çevresel farklılıkların bir sonucu olarak diğer denizlerden izole edildiğini göstermektedir. Marmara ve Ege denizleri stoklarının hem otolit şekli hem de kimyası açısından örtüştüğü belirlenmiştir. Bu durum bitişik denizlerdeki ortam koşullarının benzerliği nedeniyle olabilir. Tüm doğal etiketler (otolit şekil indeksi ve otolit kimyası) birlikte değerlendirildiğinde dört denizde de balıklar nispeten yüksek bir doğruluk derecesiyle (%75-90) orijinal konumlarına göre yeniden sınıflandırılabilir.

Sonuç olarak, otolit şekil analizleri ve otolit kimyası birlikte değerlendirildiğinde Türkiye'nin dört denizindeki (Karadeniz, Marmara, Ege ve Akdeniz) örneklemelerde *C. lucerna* bireylerini yüksek oranda ayırt edebilmiştir. Yapılan analizler sonucunda Marmara ve Ege denizlerinde habitat bağlantıları bulunsa da, Karadeniz ve Akdeniz'in *C. lucerna* stokları açısından izole bölgeler olduğu belirlenmiştir. Bu balık stoklarının balıkçılık amacıyla ayrı ayrı yönetilmesi gerektiğini göstermiştir.

Teşekkür

Bu çalışma Sibel Atak Sanduvaç'ın doktora tezinin bir bölümünü içermektedir. Bu çalışma finansal olarak FDK-2020-3428 nolu BAP projesi tarafından desteklenmiştir. Çalışmamızda balık temininde yardımcı olan Dr. Öğr. Üyesi Esin Yalçın Kaplama, Prof. Dr. Mehmet Aydın, Dr.

Murat Dağtekin'e ve de çalışmanın kimyasal analizlerinde yardımcı olan Öğr. Gör. Dr. Selahattin Erdoğan ve ekibine teşekkürü borç biliriz.

Çıkar Çatışması:

Yazar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Yazar Katkıları

Sibel Atak Sanduvaç ve Prof. Dr. Ali İşmen çalışmayı planlamışlardır. Yazarlar örnekleme, analiz etme, sonuçları tartışma ve makalenin yazımında katkıda bulunmuşlardır.

Etik Onay

Bu çalışma için etik kurul iznine gerek yoktur.

Kaynaklar

- Adelir-Alves, J., Daros, F. A., Spach, H. L., Soeth, M., & Correia, A. T. (2018). Otoliths as a tool to study reef fish population structure from coastal islands of South Brazil. *Marine Biology Research*, 14, 973–988.
- Aguirre, H., & Lombarte, A. (1999). Ecomorphologic comparisons of sagittae in *Mullus barbatus* and *M. surmuletus*. *Journal of Fish Biology*, 55, 105–114.
- Agüera, A., & Brophy, D. (2011). Use of sagittal otolith shape analysis to discriminate Northeast Atlantic and western Mediterranean stocks of Atlantic saury, *Scorpaenopsis scorpaenoides* (Walbaum). *Fisheries Research*, 110, 465–471.
- Akyol, O., Metin, G., & Unsal, S. (1997). Relationship between otolith to fork lengths of sardine (*Sardina pilchardus* Walbaum, 1972) in the Bay of Izmir (Aegean Sea). Mediterranean Fisheries Congress 9–11 April 1997, Izmir, Turkey, pp. 925–929 (in Turkish).
- Amouei, F., Valinassab, T., & Haitov, A. (2014). Aging and morphology of otolith in *Alburnus chalcoides* (Guldenstaedt, 1772) in the southern Caspian Sea. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 12, 205–214.
- Atay, D. (1985). Deniz Balıkları ve Üretim Tekniği. A.Ü. Ziraat Fakültesi Yay. 943 Ders Kitabı No: 268, Ankara, 278s.
- Avigliano, E., Domanico, A., Sánchez, S., & Volpedo, A. V. (2017). Otolith elemental fingerprint and scale and otolith morphometry in *Prochilodus lineatus* provide identification of natal nurseries. *Fisheries Research*, 186, 1–10.
- Bal, H., & Esen, S. (2021). Preliminary study on otolith chemistry and otolith morphology of two demersal fish species, European hake (*Merluccius merluccius* Linnaeus, 1758) and striped red mullet (*Mullus surmuletus* Linnaeus, 1758) in the Sea of Marmara. *Ege Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 38(4), 515–521.

- Başusta, A., Bal, H., & Aslan, E. (2013a). Otolith biometry-total length relationships in the population of Hazar Bleak, *Alburnus heckeli* (Battalgil, 1943) inhabiting Lake Hazar, Elazığ, Turkey. *Pakistan Journal of Zoology*, 45(1), 1180–1182.
- Başusta, A., Özer, E. I., & Girgin, H. (2013ab). Munzur Nehri'ndeki kırmızı benekli alabalığın (*Salmo trutta macrostigma* (Dummeril, 1858)) otolit boyutları- balık boyu arasındaki ilişki. *Journal of Fisheries Sciences.com*, 7(1), 22–29.
- Başusta, A., Özer, E. I., & Girgin, H. (2013bc). Akdeniz'deki *Lepidotrigla dieuzeidei* (Blanc & Hureau, 1973) popülasyonunda otolit biyometrisi-balık boyu uzunluğu arasındaki ilişki. *Yunus Araştırma Bülteni*, 3, 3–9.
- Başusta, A., & Bıyıklı, N. D. (2022). Kuzeydoğu Akdeniz'de Yaşayan *Chelidonichthys lucerna* (Linnaeus, 1758) Türünün Otolit Biyometrisi. *Ecological Life Sciences*, 17(4), 187-202.
- Bath, G. E., Thorrold, S. R., Jones, C. M., Campana, S. E., McLaren, J. W., & Lam, J. W. (2000). Strontium and barium uptake in aragonitic otoliths of marine fish. *Geochimica et cosmochimica acta*, 64(10), 1705-1714.
- Begg, G. A., & Brown, R.W. (2000). Stock identification of Haddock *Melanogrammus aeglefinus* on Georges Bank based on otolith shape analysis. *Transactions of American Fisheries Society*, 129, 335-345.
- Begg, G. A., & Waldman, J. R. (1999). An holistic approach to fish stock identification. *Fisheries research*, 43(1-3), 35-44.
- Berg, F., Almeland, O.W., Skadal, J., Slotte, A., Andersson, L., & Folkvord, A. (2018). Genetic factors have a major effect on growth, number of vertebrae and otolith shape in Atlantic herring (*Clupea harengus*). *PLoS One*, 13, e0190995.
- Bilecenoğlu, M., Kaya, M., Cihangir, B., & Çiçek, E. (2014). An updated checklist of the marine fishes of Turkey. *Turkish Journal of Zoology*, 38(6), 901-929.
- Bouchard, C., Thorrold, S.R., & Fortier, L. (2015). Spatial segregation, dispersion and migration in early stages of polar cod *Boreogadus saida* revealed by otolith chemistry. *Marine Biology*, 162, 855–868.
- Bourehail, N., Morat, F., Lecomte-Finiger, R., & Kara, M. H. (2015). Using otolith shape analysis to distinguish barracudas *Sphyraena sphyraena* and *Sphyraena viridensis* from the Algerian coast. *Cybius* 39(4), 271-278.
- Bostancı, D., Polat, N., Kurucu, G., Yedier, S., Konaş, S., & Darçin, M. (2015). Using otolith shape and morphometry to identify four *Alburnus* species (*A. chalcoides*, *A. escherichii*, *A. mossulensis* and *A. tarichi*) in Turkish inland waters. *Journal of Applied Ichthyology*, 31(6), 1013-1022.
- Cadrin, S. X., Karr, L. A., & Mariani, S. (2014). Stock identification methods: an overview. *Stock identification methods*, 1-5.
- Campana, S.E., & Casselman, J. M. (1993). Stock discrimination using otolith shape analysis. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 50, 1062–1083.
- Campana, S. E., (1999). Chemistry and composition of fish otoliths: pathways, mechanisms and applications. *Marine Ecology Progress Series*, 188, 263–297.
- Campana, S. E., Chouinard, G. A., Hanson, J. M., Frechet, A., & Bratley, J. (2000). Otolith elemental fingerprints as biological tracers of fish stocks. *Fisheries Research*, 46, 343–357.
- Campana, S. E., & Thorrold, S. R. (2001). Otoliths, increments, and elements: keys to a comprehensive understanding of fish populations?. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 58(1), 30-38.
- Cardinale, M., Doering-Arjes, P., Kastowsky, M., & Mosegaard, H. (2004). Effects of sex, stock, and environment on the shape of known-age Atlantic cod (*Gadus morhua*) otoliths. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 61, 158–167.
- Carvalho, B.M., Vaz-dos-Santos, A.M., Spach, H.L., & Volpedo, A.V. (2015). Ontogenetic development of the sagittal otolith of the anchovy, *Anchoa tricolor*, in a subtropical estuary. *Scientia Marina*, 79, 409–418.
- Castonguay, M., Simard, P., & Cagnon, P. (1991). Usefulness of Fourier analysis of otolith shape for Atlantic mackerel (*Scomber scombrus*) stock discrimination. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 48(2), 296-302.
- Correia, A.T., Hamer, P., Carocinho, B., & Silva, A. (2014). Evidence for meta-population structure of *Sardina pilchardus* in the Atlantic Iberian waters from otoliths elemental signatures of a strong cohort. *Fisheries Research*, 149, 76–85.
- Çiçek, E., Avsar, D., Ozyurt, C. E., Yeldan, H., & Manasırlı, M. (2008). Age, growth, reproduction and mortality of tub gurnard (*Chelidonichthys lucernus* (Linnaeus, 1758)) inhabiting in Babadillimani Bight (Northeastern Mediterranean Coast of Turkey). *Journal of Biological Sciences*, 8(1): 155-160.
- Çiçek, E., Avşar, D., Yeldan, H., & Manaşırılı, M. (2020). Comparative morphology of the sagittal otolith of mullet species (Mugilidae) from the Iskenderun Bay, north-eastern Mediterranean. *Acta Biologica Turcica*, 33(4), 219-226.
- Çiçek, E., Avşar, D., Yeldan, H., & Manaşırılı, M. (2021). Otoliths atlas of 77 fish species from the Iskenderun Bay, Northeastern Mediterranean Sea. *Fishtaxa-Journal of Fish Taxonomy*, (19).
- Daros, F. A., Spach, H. L., Sial, A. N., & Correia, A. T. (2016). Otolith fingerprints of the coral reef fish

- Stegastes fuscus in southeast Brazil: a useful tool for population and connectivity studies. *Regional Studies in Marine Science*, 3, 1–20.
- Devries, D. A., Churchill, B. G., & Prager, M. H. (2002). Using otolith shape analysis to distinguish eastern Gulf of Mexico and Atlantic Ocean stocks of King Mackerel. *Fisheries Research*, 57, 51–62.
- Dürrani, Ö., & Seyhan, K. (2024). Stock identification of the Mediterranean horse mackerel (Carangidae: *Trachurus mediterraneus*) in the Marmara and Black Seas using body and otolith shape analyses. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 299, 108687.
- Heimbrand, Y., Limburg, K. E., Hüseyin, K., Casini, M., Sjöberg, R., Palmén Bratt, A. M., & Öhlund, J. (2020). Seeking the true time: Exploring otolith chemistry as an age-determination tool. *Journal of fish biology*, 97(2), 552–565.
- Elsdon, T. S., & Gillanders, B. M. (2002). Interactive effects of temperature and salinity on otolith chemistry: challenges for determining environmental histories of fish. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 59, 1796–1808.
- EPA. (2014). "Method 6020B (SW-846): Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry," Revision 2. Washington, DC.
- Ergüden, D., & Turan, C. (2005). Examination of genetic and morphologic structure of sea-bass (*Dicentrarchus labrax* L., 1758) populations in Turkish coastal waters. *Turkish Journal of Veterinary & Animal Sciences*, 29(3), 727–733.
- Ferreira, I., Santos, D., Moreira, C., Feijó, D., Rocha, A., & Correia, A. T. (2019). Population structure of *Chelidonichthys lucerna* in Portugal mainland using otolith shape and elemental signatures. *Marine Biology Research*, 15(8-9), 500–512.
- Ferreira, I., Daros, F. A., Moreira, C., Feijó, D., Rocha, A., Mendez-Vicente, A., ... & Correia, A. T. (2023). Is *Chelidonichthys lucerna* (Linnaeus, 1758) a Marine Estuarine-Dependent Fish? Insights from Saccular Otolith Microchemistry. *Fishes*, 8(7), 383.
- Foresberg, J. E., & Neal, R. (1993). Estimating sex of Pacific halibut (*Hippoglossus stenolepis*) using Fourier shape analysis of otoliths. *Technical Report-International Pacific Halibut Commission*, 29, 5–23.
- Forrester, G. E., & Swearer, S. E. (2002). Trace elements in otoliths indicate the use of open-coast versus bay nursery habitats by juvenile California halibut. *Marine Ecology Progress Series*, 241, 201–213.
- Gillanders, B. M., & Kingsford, M. J. (1996). Elements in otoliths may elucidate the contribution of estuarine recruitment to sustaining coastal reef populations of a temperate reef fish. *Marine Ecology Progress Series*, 141, 13–20.
- Gillanders, B. M., & Kingsford, M. J. (2003). Spatial variation in elemental composition of otoliths of three species of fish (family Sparidae). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 57(5-6), 1049–1064.
- Halden, N. M., Mejia, S. R., Babaluk, J. A., Reist, J. D., Kristofferson, A. H., Campbell, J. L., & Teesdale, W. J. (2000). Oscillatory zinc distribution in Arctic char (*Salvelinus alpinus*) otoliths: The result of biology or environment? *Fisheries Research*, 46(1-3), 289–298.
- Hamer, P. A., Jenkins, G. P., & Coutin, P. (2006). Barium variation in *Pagrus auratus* (Sparidae) otoliths: a potential indicator of migration between an embayment and ocean waters in south-eastern Australia. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 68(3-4), 686–702.
- Higgins, R., Isidro, E., Menezes, G., & Correia, A. (2013). Otolith elemental signatures indicate population separation in deep-sea rockfish, *Helicolenus dactylopterus* and *Pontinus kuhlii*, from the Azores. *Journal of Sea Research*, 83, 202–208.
- Hüseyin, K., Haase, S., Mion, M., Hilvarsson, A., Radtke, K., Thomsen, T. B., ... & Sturrock, A. M. (2024). Into the wild: coupling otolith and archival tag records to test assumptions underpinning otolith chemistry applications in wild fish. *Frontiers in marine science*, 11, 1365023.
- Ilkyaz, A. T., Metin, G., & Kinacıgil, H. T. (2010). The use of otolith length and weight measurements in age estimations of three Gobiidae species (*Deltentosteus quadrimaculatus*, *Gobius niger*, *Lesueurigobius friesii*). *Turkish Journal of Zoology*, 35, 819–827.
- İşmen, A., İşmen, P., & Başusta, N. (2004). Age, growth and reproduction of Tub Gurnard (*Chelidonichthys lucerna* L. 1758) in the Bay of Iskenderun in the eastern Mediterranean. *Turkish Journal of Veterinary Animal Sciences*, 28(2), 289–295.
- Kerr, L. A., Whitener, Z. T., Cadrin, S. X., Morse, M. R., Secor, D. H., & Golet, W. (2020). Mixed stock origin of Atlantic bluefin tuna in the US rod and reel fishery (Gulf of Maine) and implications for fisheries management. *Fisheries research*, 224, 105461.
- Koochaknejad, E., Closs, G. P., Jarvis, M., Eskandari, G., Savari, A., Safahieh, A., & Reid, M. (2024). Preliminary microchemical analyses of North-western Persian Gulf hilsa shad otolith trace elements: Indications of complex migratory behavior and stock structure. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 571, 151981.
- Ladroit, Y., Maolagain, C. O., & Horn P. L. (2017). An investigation of otolith shape analysis as a tool to determine stock structure of ling (*Genypterus blacodes*). *New Zealand Fisheries Assessment Report 2017/24*, 16.
- Martin, G.B., & Thorrold, S.R. (2005). Temperature and salinity effects on magnesium, manganese, and barium incorporation in otoliths of larval and early juvenile spot

- Leiostomus xanthurus*. *Marine Ecology Progress Series*, 293, 223–232.
- Mathews, T., & Fisher, N. S. (2009). Dominance of dietary intake of metals in marine elasmobranch and teleost fish. *Science of the total environment*, 407(18), 5156–5161.
- Moreira, C., Froufe, E., Sial, A. N., Caeiro, A., Vaz-Pires, P., & Correia, A. T. (2018). Population structure of the blue jack mackerel (*Trachurus picturatus*) in the NE Atlantic inferred from otolith microchemistry. *Fisheries Research*, 197:113–122.
- Moreira, C., Froufe, E., Sial, A.N., Caeiro, A., Vaz-Pires, P., & Correia, A. T. (2019). Otolith shape analysis as a tool to infer the population structure of the blue Jack mackerel, *Trachurus picturatus*, in the NE Atlantic. *Fisheries Research*, 209, 40–48.
- Özpiçak, M., Saygin, S., Aydin, A., Hancer, E., Yilmaz, S., Polat, N. (2018). Otolith shape analyses of *Squalius cephalus* (Linnaeus, 1758)(Actinopterygii: Cyprinidae) inhabiting four inland water bodies of the middle Black Sea region, Turkey. *Iranian Journal of Ichthyology*, 5(4), 293–302.
- Özpiçak, M., Saygin, S., & Polat, N. (2019). Otolith Shape Analysis of Bluefish, *Pomatomus saltatrix* (Linnaeus, 1766) in the Black Sea Region (Samsun, Turkey). *Acta Aquatica Turcica*, 15(4), 507–516.
- Patterson, H. M., Thorrold, S. R., & Shenker, J. M. (1999). Analysis of otolith chemistry in Nassau grouper (*Epinephelus striatus*) from the Bahamas and Belize using solution based ICPMS. *Coral Reefs*, 18, 171–178.
- Patterson, H. M., McBride, R. S., & Julien, N. (2004). Population structure of red drum (*Sciaenops ocellatus*) as determined by otolith chemistry. *Marine Biology*, 144, 855–862.
- Pawson, M. G. (1990). Using otolith weight to age fish. *Journal of Fish Biology*, 36, 521–531.
- Pender, P. J., & Griffin, R. K. (1996). Habitat history of barramundi *Lates calcarifer* in a north Australian river system based on barium and strontium levels in scales. *Transactions of the American Fisheries Society*, 125(5), 679–689.
- Pentreath, R. J. (1973). The accumulation and retention of ⁶⁵Zn and ⁵⁴Mn by the plaice, *Pleuronectes platessa* L. *Journal of experimental marine Biology and Ecology*, 12(1), 1–18.
- Ponton, S., Flanagan, L. B., Alstad, K. P., Johnson, B. G., Morgenstern, K. A. I., Kljun, N., & Barr, A. G. (2006). Comparison of ecosystem water-use efficiency among Douglas-fir forest, aspen forest and grassland using eddy covariance and carbon isotope techniques. *Global Change Biology*, 12(2), 294–310.
- Quinn, G. P., & Keough, M. J. (2002). Experimental design and data analysis for biologists. Cambridge: Cambridge University Press.
- Ranaldi, M. M., & Gagnon, M. M. (2008). Zinc incorporation in the otoliths of juvenile pink snapper (*Pagrus auratus* Forster): The influence of dietary versus waterborne sources. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 360(1), 56–62.
- Reis-Santos, P., Tanner, S. E., Elsdon, T. S., Cabral, H. N., & Gillanders, B. M. (2013). Effects of temperature, salinity and water composition on otolith elemental incorporation of *Dicentrarchus labrax*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 446, 245–252.
- Reznick, D., Lindbeck, E., & Bryga, H. (1989). Slower growth results in larger otoliths: an experimental test with guppies (*Poecilia reticulata*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 46, 108–112.
- Richards, W. J., & Saksena, V. P. (1990). Triglidae. In: Quero, J. C., Hureau, J. C., Karrer, C.A.P., Saldanha, L. (Eds). Check-List of the Fishes of the Eastern Tropical Atlantic (CLOFETA). JNICT, Lisbon: SEI, Paris and UNESCO, Paris, 1990; Vol. 2, 680–684
- Rooker, J. R., Zdanowicz, V. S., & Secor, D. H. (2001). Chemistry of tuna otoliths: assessment of base composition and postmortem handling effects. *Marine Biology*, 139, 35–43.
- Saygin, S. (2019). İnci kefalı (*Alburnus tarichi* (Güldenstädt, 1814)'nin otolit stronsiyum izotop oranlarından (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr) faydalanılarak en uygun doğal üreme alanının belirlenmesi ve türün biyolojik döngüsü.
- Saygin, S. (2024). Otolith shape analysis of red mullet, *Mullus barbatus* (Mullidae) in Turkish Waters of the Aegean, Black, and Mediterranean Seas. *Journal of Ichthyology*, 1–11.
- Schroeder, R., Schwingel, P. R., & Correia, A. T. (2022). Population structure of the Brazilian sardine (*Sardinella brasiliensis*) in the Southwest Atlantic inferred from body morphology and otolith shape signatures. *Hydrobiologia*, 849(6), 1367–1381.
- Secor, D. H., & Rooker, J. R. (2000). Is otolith strontium a useful scalar of life cycles in estuarine fishes? *Fisheries Research*, 46, 359–371.
- Serpin, D. (2007). *İskarmoz balığı (Saurida undosquamis* Richardson, 1848)populasyonlarının morfometrik ve meristik karakterler ile otolit element kompozisyonları arasındaki farklılıklar (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Silva, D. M., Santos, P., & Correia, A. T. (2011). Discrimination of *Trisopterus luscus* stocks in the northern of Portugal using otolith elemental fingerprints. *Aquatic Living Resources*, 24, 85–91.
- Simoneau, M., Casselman, J. M., & Fortin, R. (2000). Determining the effect of negative allometry (length/height relationship) on variation in otolith shape in lake trout (*Salvelinus namaycush*), using Fourier-series analysis. *Canadian Journal of Zoology*, 78, 1597–1603.

- Stransky, C., Murta, A. G., Schlickeisen, J., & Zimmermann, C. (2008). Otolith shape analysis as a tool for stock separation of horse mackerel (*Trachurus trachurus*) in the Northeast Atlantic and Mediterranean. *Fisheries Research*, 89(2), 159-166.
- Sturrock, A. M., Trueman, C. N., Darnaude, A. M., & Hunter, E. (2012). Can otolith elemental chemistry retrospectively track migrations in fully marine fishes? *Journal of Fish Biology*, 81, 766–795.
- Sturrock, A. M., Hunter, E., Milton, J. A., EIMF, Johnson, R. C., Waring, C. P., & Trueman, C. N. (2015). Quantifying physiological influences on otolith microchemistry. *Methods in Ecology and Evolution*, 6(7), 806-816.
- Thomas, O. R., Ganio, K., Roberts, B. R., & Swearer, S. E. (2017). Trace element–protein interactions in endolymph from the inner ear of fish: implications for environmental reconstructions using fish otolith chemistry. *Metallomics*, 9(3), 239-249.
- Turan, C., Ergüden, D., Gürlek, M., Başusta, N., & Turan, F. (2004). Morphometric structuring of the anchovy (*Engraulis encrasicolus* L.) in the Black, Aegean and Northeastern Mediterranean Seas. *Turkish Journal of Veterinary & Animal Sciences*, 28(5), 865-871.
- Turan, C. (2006). The use of otolith shape and chemistry to determine stock structure of Mediterranean horse mackerel *Trachurus mediterraneus* (Steindachner). *Journal of Fish Biology*, 69, 165-180.
- Turan, C., Oral, M., Öztürk, B., & Düzgüneş, E. (2006). Morphometric and meristic variation between stocks of Bluefish (*Pomatomus saltatrix*) in the Black, Marmara, Aegean and northeastern Mediterranean Seas. *Fisheries Research*, 79(1-2), 139-147.
- Tuset V. M., Lozano, I. J., Gonzalez, J. A., Pertusa, J. F., & Garcia-Diaz, M. M. (2003b). Shape indices to identify regional differences in otolith morphology of comber *Serranus cabrilla* (L., 1758). *Journal of Applied Ichthyology*, 19, 88–93.
- Tuset, V. M., Rosin, P. L., & Lombarte, A. (2006) Sagittal otolith shape used in the identification of fishes of the genus *Serranus*. *Fisheries Research*, 81, 316–325.
- Tuset V. M., Lombarte, A., & Assis, C. A. (2008). Otolith atlas for the western Mediterranean, north and central eastern Atlantic. *Scientia Marina*, 72S1, 7-198.
- Uyan, A. (2014). Kırlangıç (*Chelidonichthys lucerna* Linnaeus, 1758) populasyonlarının genetik ve morfolojik yapı analizi (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Vieira, A. R., Neves, A., Sequeira, V., Paiva, R. B., & Gordo, L. S. (2014). Otolith shape analysis as a tool for stock discrimination of forkbeard (*Phycis phycis*) in the Northeast Atlantic. *Hydrobiologia*, 728, 103–110.
- Vignon, M. (2015). Disentangling and quantifying sources of otolith shape variation across multiple scales using a new hierarchical partitioning approach. *Marine Ecology Progress Series*, 534, 163–177.
- Walther, B. D., & Limburg, K. E. (2012). The use of otolith chemistry to characterize diadromous migrations. *Journal of Fish Biology*, 81(2), 796-825.
- Zar, J. H. (1999). Biostatistical analysis. Prentice Hall, Engelwood Cliffs, N.J., USA.
- Zorica, B., Sinovic, G., & Cikes Kec, V. (2010). Preliminary data on the study of otolith morphology of five pelagic fish species from the Adriatic Sea (Croatia). *Acta Adriatica*, 51(1), 89-96.