

T.C.
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
GIDA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

SICAK HAVA FRİTÖZÜ (AIR FRYER) İLE PİŞİRME YÖNTEMİNİN
HAMBURGER KÖFTESİNDE POLİSİKLIK AROMATİK HİDROKARBON (PAH)
OLUŞUMU ÜZERİNE ETKİSİ

Zeynep GÜNYEL

Danışman: Dr. Öğretim Üyesi Zeynep AKŞİT

TEZ JÜRİ ÜYELERİ
Dr. Öğretim Üyesi M. Çağlar FIRAT
Dr. Öğretim Üyesi Hakiye ASLAN
Dr. Öğretim Üyesi Zeynep AKŞİT

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ERZİNCAN, 2025

© 2025 [Zeynep GÜNYEL]. Tüm hakları saklıdır.

ÖZET

SICAK HAVA FRİTÖZÜ (AIR FRYER) İLE PİŞİRME YÖNTEMİNİN HAMBURGER KÖFTESİNDE POLİSİKLIK AROMATİK HİDROKARBON (PAH) OLUŞUMU ÜZERİNE ETKİSİ

Zeynep GÜNYEL

Yüksek Lisans Tezi, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,

Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğretim Üyesi Zeynep AKŞİT

2025, 59 sayfa

Son teknolojik ilerlemeler ile insanların, daha kolay hazırlanabilen lezzetli gıdalara eğilim göstermesi yeni pişirme tekniklerini de beraberinde getirmiştir. Bu yöntemler arasında yaygın olarak kullanılan sıcak hava fritözü (air fryer) son yıllarda ortaya çıkan, tüketiciler tarafından kabul görmüş bir pişirme cihazıdır. Bununla birlikte farklı bir dizi çalışma air fryer ile gıdaların hazırlanması sırasında PAH gibi toksik bileşiklerin azaltılabileceğini göstermiştir. Ancak air fryer ile pişirmenin et ve et ürünlerindeki potansiyel kanserojenlerin oluşumu üzerindeki etkisini inceleyen az sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu tez çalışmasında 5 farklı markaya ait dondurulmuş hamburger köfteleri yerel marketlerden temin edilmiştir. Köfte numunelerinin air fryer, ızgara ve tava ile pişirilmesinin PAH (16'lı mix) oluşumuna etkisi araştırılmıştır. Çiğ hamburger köfte örneklerinde nem, kül, ham yağ, ham protein ve pH analizleri gerçekleştirilmiş olup, 3 farklı yöntemle pişirildikten sonra pişirme kaybı, TBARS ve PAH içerik analizleri yapılmıştır. Örneklerin toplam PAH 16 içeriği HPLC-UV'de analiz edilmiştir. Tüm PAH grupları içerisinde en yüksek değerler sırasıyla Acenaphthene, Phenanthrene, Anthracene, Acenaphthylene ve Naphthalene bileşikleri en düşük değerler ise Pyrene bileşiğinde tespit edilmiştir. Benzo[a]Pyrene pişirilen hamburger köftelerinin hiçbirinde tespit edilmemiştir. Genel olarak köfte örneklerinde PAH 16 içerisinde 13 tane PAH tespit edilebilmiştir. Sonuçlarımız, Air fryer'ın yüksek molekül ağırlıklı PAH oluşumunu azaltmasına rağmen, düşük molekül ağırlıklı PAH'lar üzerinde olumsuz etkilerinin olabileceğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Hamburger köftesi, PAH, Sıcak hava fritözü (air fryer), Pişirme yöntemleri

ABSTRACT

EFFECT OF HOT AIR FRYER COOKING METHOD ON POLYCYCLIC AROMATIC HYDROCARBON (PAH) FORMATION IN HAMBURGER PATTIES

Zeynep GÜNYEL

Master's Thesis , Erzincan Binali Yıldırım University, Institute of Science and

Technology,

Department of Food Engineering

Advisor: Asst. Prof. Dr. Zeynep AKŞİT

2025, 59 pages

Recent technological advances have led to new cooking techniques, driven by a growing interest in more easily prepared, flavorful foods. Among these methods, the hot air fryer (APF) is a widely used cooking appliance that has emerged in recent years and gained widespread consumer acceptance. Furthermore, a number of studies have shown that air fryer preparation can reduce toxic compounds such as PAHs. However, few studies have examined the effects of air fryer cooking on the formation of potential carcinogens in meat and meat products. In this thesis, five different brands of frozen hamburger patties were obtained from local markets. The effects of air fryer, grill, and pan-frying on the formation of PAHs (mixed 16) were investigated. Moisture, ash, crude fat, crude protein, and pH analyses were performed on raw hamburger patties. Cooking loss, TBARS, and PAH content were also analyzed after cooking using three different methods. The total PAH 16 content of the samples was analyzed by HPLC-UV. Among all PAH groups, the highest values were detected in Acenaphthene, Phenanthrene, Anthracene, Acenaphtylene, and Napthalene, respectively, while the lowest values were detected in Pyrene. Benzo[a]Pyrene was not detected in any of the cooked hamburger patties. Overall, 13 PAHs out of 16 were detected in the patty samples. Our results suggest that although air fryer reduces the formation of high-molecular-weight PAHs, it may have adverse effects on low-molecular-weight PAHs.

Keywords: Hamburger patties, PAH, Air fryer, Cooking methods.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının gerçekleştirilmesinde bana rehberlik eden ve destek olan sayın danışman hocam Dr. Öğretim Üyesi Zeynep AKŞİT'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez sürecim boyunca moral ve motivasyon kaynağım, her türlü desteğini esirgemeyen sevgili eşime teşekkür ederim.

Zeynep GÜNYEL

Ağustos, 2025



İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
TABLolar DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Amacı	2
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE İLGİLİ ÇALIŞMALAR	4
2.1. PAH'ların Özellikleri, Sınıflandırılması ve Oluşum Mekanizmaları	4
2.2. PAH'lar ile İlgili Yasal Düzenlenmeler	6
2.3. Gıdalarda PAH	8
2.3.1. Bitkisel yağlarda PAH	10
2.3.2. Meyve ve sebzelerde PAH	10
2.3.3. Süt ve süt ürünlerinde PAH	11
2.3.4. Et ve et ürünlerinde PAH	12
2.4. Hazır Köfte Tüketimi ve Air Fryer (Sıcak Hava Fritözü)	15
3. YÖNTEM	22
3.1. Cihazlar ve Kullanılan Kimyasallar	22
3.2. Metot	22
3.2.1. Hamburger köftelerinin pişirilmesi	22
3.2.2. Pişirme kaybı analizi	23
3.2.3. Nem miktarı tayini	24
3.2.4. TBARS tayini	24
3.2.5. Yağ tayini	26
3.2.6. Protein tayini	27
3.2.7. Kül miktarı tayini	27
3.2.8. pH tayini	27
3.2.9. Köfte numunelerinden PAH ekstraksiyonu	28
3.2.10. Örneklerin kartuşlarda temizlenmesi	28
3.2.11. HPLC ile ekstrakte edilen PAH'ların analizi	29
3.2.11.1. Kalibrasyon	30
3.2.11.2. PAH standartlarının HPLC'de analizi	31
4. BULGULAR	32

4.1. Hamburger Köfte Örneklerinin İçerikleri.....	32
4.2. Nem Miktarı Tayini Sonuçları.....	33
4.3. pH Değeri Sonuçları.....	33
4.4. Yağ Tayini Sonuçları.....	33
4.5. Protein Analiz Sonuçları.....	34
4.6. Kül Miktarı Tayini Sonuçları	34
4.7. Pişirme Kaybı Sonuçları.....	34
4.8. TBARS Tayini Sonuçları	36
4.9. HPLC ile PAH Analizi Sonuçları.....	37
5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	44
KAYNAKÇA	49
EKLER	60
ÖZGEÇMİŞ.....	61

TABLÖLER DİZİNİ

Tablo 1. EFSA tarafından indikatör olarak kullanılan PAH4, PAH8, PAH15+1 türleri ve grubu.....	6
Tablo 2. Farklı ürün gruplarına göre gıdalardaki maksimum PAH konsantrasyonları	8
Tablo 3. Et ve et ürünlerinde PAH oluşumunun azaltılması veya engellemesine yönelik yapılan çalışmalar	14
Tablo 4. Pişirme koşulları.....	22
Tablo 5. Pişirme işlemi uygulanan hamburger köfte örneklerine ait kodlamalar	23
Tablo 6. PAH bileşiklerinin kalibrasyon verileri.....	30
Tablo 7. HPLC Gradient koşulları.....	31
Tablo 8. Hamburger köfte markalarının içindekiler tablosu	32
Tablo 9. Hamburger köftelerinin içerik analizi	32
Tablo 10. Hamburger köfte numunelerinin % pişirme kaybı sonuçları	35
Tablo 11. Hamburger köfte örneklerinin TBARS değerleri (µmol MA/kg)	37
Tablo 12. Naphthalene (µg/kg).....	38
Tablo 13. Acenaphthylene (µg/kg).....	39
Tablo 14. Acenaphthene (µg/kg).....	39
Tablo 15. Fluorene (µg/kg).....	39
Tablo 16. Phenanthrene (µg/kg)	40
Tablo 17. Anthracene (µg/kg)	40
Tablo 18. Benzo[a]anthracene+chrysene (µg/kg)	40
Tablo 19. Fluoranthene (µg/kg).....	41
Tablo 20. Pyrene (µg/kg).....	41
Tablo 21. Benzo[b]fluoranthene+benzo[k]fluoranthene (µg/kg)	41
Tablo 22. Dibenz[a,h]anthracene (µg/kg).....	42
Tablo 23. Indeno [1,2,3-cd] pyrene (µg/kg)	42
Tablo 24. Benzo[a]pyrene (µg/kg)	43

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. PAH’ların doğadaki döngüsü	4
Şekil 2. Sıcak hava fritözünün (air fryer) çalışma prensibinin şematik gösterimi	17
Şekil 3. Hamburger köftelerinin pişirilmesi işleminin yapıldığı Air fryer	23
Şekil 4. TCA solüsyonu eklenmiş köfte karışımı	24
Şekil 5. TCA ile hazırlanan köfte numunelerinin homojenize edilmesi.....	25
Şekil 6. Su banyosundan çıkarılan numuneler	25
Şekil 7. Numunelerin Elisa okuyucu ile okunması	26
Şekil 8. Soxhlet ekstraksiyon yöntemi ile yağın ayrılması ve çözücünün evaporasyonda uçurulması işlemi.....	26
Şekil 9. Numunelerin kül fırınında yakılması	27
Şekil 10. Numunelerin pH metre ile ölçümlerinin yapılması.....	28
Şekil 11. Kartuşlardan çözelti ile karıştırılmış numunenin süzülmesi	29
Şekil 12. Kartuşlardaki metanol ve asetonitrilin çeker ocak altında uzaklaştırılması	29

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

g	Gram
mg	Miligram
µg	Mikrogram
L	Litre
mL	Mililitre
µL	Mikrolitre
nm	Nano metre
%	Yüzde
°C	Santigrat derece
Ss	Standart sapma
Ort.	Ortalama
AB	Avrupa Birliği
EFSA	Avrupa Gıda Güvenliği Otoritesi
HPLC	Yüksek performanslı sıvı kromatografisi
IARC	Uluslararası Kanser Araştırmaları Ajansı
JECFA	Gıda Katkı Maddeleri Uzman Komitesi
PAH	Poliaromatik hidrokarbonlar
WHO	Dünya Sağlık Örgütü

1. GİRİŞ

Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından mutajen ve kanserojen olarak tanımlanan PAH (Poliaromatik hidrokarbonlar) bileşikleri; hava, su, toprak ve gıda maddelerinde kompleks karışımlar halinde bulunmaktadır (Kılıç vd., 2017). PAH'lar, iki veya daha fazla benzen halkasından oluşan güçlü kanserojenik bileşiklerdir (Serpe vd., 2010). Bu bileşikler genellikle kömür, petrol, odun, çöp, tütün, et veya diğer gıdalar gibi organik maddelerin eksik yanmasından veya yüksek sıcaklıktaki pirolizinden kaynaklı oluşabilir (Shi vd., 2016). Isıl işlem süreci sırasında, karbon ve hidrojen atomlarının tek veya çift bağlar yoluyla birleşerek aromatik halkalar oluşturduğu ve bu halkaların da siklik bileşikler oluşturduğu piroliz ve piro-sentez reaksiyonları meydana gelir (Onopiuk vd., 2022).

Isıl ve yanma işlemleri sırasında üretilen dumanın, PAH'lar, fenoller, karboniller, asitler, alkoller ve esterler, furanlar ve laktonlar dahil olmak üzere 300'den fazla saptanabilir kimyasal bileşik içerdiği bildirilmiştir (Olatunji vd., 2014). Duman oluşumu sırasındaki sıcaklık PAH içeriği üzerinde belirleyici bir rol oynar çünkü dumanın içerdiği (piroliz sırasında oluşan) PAH'ların miktarı, 400 – 1000°C aralığında duman oluşumunun sıcaklığıyla doğrusal olarak artar (Šimko, 2002).

Son yıllarda, çevresel su kütleleri, endüstriyel ve belediye atık su arıtma tesislerinin atık bertarafından, yağmur suyu akışlarından, petrol sızıntılarından, atmosferik serpintiden ve doğrudan su çıkışlarından büyük miktarda PAH çevreye salınmaktadır. Bu sorun, ortaya çıkan çok sayıda sağlık sorunu nedeniyle kamuoyunda büyük endişeye yol açmıştır. Bazı kaynaklar, atmosferin dünya okyanuslarına PAH girişinin %80'ine kadar katkıda bulunduğunu tahmin etmektedir (Manoli ve Samara, 1999; Zainal vd., 2022). Dünya Sağlık Örgütü'ne (WHO, 1997) göre, yüzey ve kıyı sularında 0,05 µg/L'nin üzerindeki bireysel bir PAH konsantrasyonu ciddi kirlenmenin önemli bir göstergesidir.

İnsan sağlığı için büyük önem taşıyan gıdalar bir başka PAH bulaşma kaynaklarından biridir. PAH'lar sıvı ve katı yağlar, et ve et ürünleri, yapraklı ve yapraksız sebzeler, meyveler, tahıllar ve yumru köklerin yanı sıra tatlılar, şekerlemeler ve çikolatalar gibi işlenmiş ürünler de dahil olmak üzere çeşitli gıda ürünlerinde mevcut olabilir. İşleme sırasında gıda ürünlerinde oluşan PAH'ın çeşitliliği ve miktarı, ısı kaynağından uzaklık, kullanılan yakıt türü, pişirme süresi gibi çeşitli faktörlere ve yeniden kullanım ve depolama gibi yöntemlere bağlıdır (Chen vd., 2022).

PAH'lar yaygın olarak uçucu olduklarından dolayı gıdalara bulaşmaktadır. Odun, kömür vb. yöntemlerle etlerin pişirilmesi yoluyla; etin yağlılık durumu, pişirme sıcaklığı ve süresine bağlı olarak PAH'lar oluşabilir, oluşan PAH miktarları değişebilir. PAH miktarları etin pişirme tekniğine göre de değişebilmektedir. Ayrıca pişirme konumunun da etteki PAH oluşumunu etkilediği düşünülmektedir. Yatay konumda pişirilen etlerde dikey konumda pişirilen etlere oranla 10 kattan fazla PAH oluşabilmektedir. Bunun nedeninin yatay konumdaki ette yağın doğrudan ateş kaynağına damlamasının dikey konumdakine oranla fazla olduğu düşünülmektedir (Günç Ergönül ve Kaya, 2015). PAH bileşiklerinin lipofilik özelliğinden dolayı gıdaların yağ ve su içeriği PAH oluşum riskini arttırmaktadır. Ayrıca et yapısı itibarıyla yüksek yağ içeriğine sahip olmasından dolayı daha yüksek yanma gösterir. Avrupa Birliği Gıda Güvenliği (EFSA); sağlık üzerindeki ciddi etkileri bulunan PAH'ların, gıdalar arasında en yüksek konsantrasyonların tüketicilerin günlük diyetle sıklıkla aldığı et ve et ürünlerinde olduğu bildirilmiştir (Kılıç vd., 2017).

Günümüzde insanlar, kısa sürede pişmiş, az yağlı ve lezzetli ürünler elde etmek için sıcak hava fritözü teknolojisi gibi alternatif pişirme teknikleri kullanılarak hazırlanabilen yiyeceklere yoğun ilgi duymaktadır. Ancak sıcak hava ile kızartmanın gıda maddelerindeki potansiyel kanserojenlerin oluşumu üzerindeki etkisini inceleyen az sayıda çalışma bulunmaktadır. Et ürünlerinin pişirilmesi için yüksek sıcaklıklara ihtiyaç vardır. Yaygın kullanılan kızartma, mangal, ızgara, tütsüleme, kavurma gibi yöntemlerle et ve et ürünlerinin pişirilmesi ile PAH oluşumu arasındaki ilişkiyi açıklayan çokça çalışma vardır ancak sıcak hava ile pişirmede et ve et ürünlerinde PAH bileşiklerinin oluşma riski arasındaki ilişki üzerine birkaç çalışma görülmüştür. Üzerinde araştırma yapılan ürün çeşitliliği de göz önünde bulundurularak kullanımı gün geçtikçe artan sıcak hava ile pişirme yönteminin PAH oluşumu üzerine etkisini açıklamakta yetersiz kalmıştır.

1.1. Çalışmanın Amacı

Air fryer teknolojisi, et ve et ürünlerinin ev ortamında daha sağlıklı, pratik ve güvenli şekilde pişirilmesine olanak sağlayan modern bir pişirme yöntemidir. Köfte gibi kıyma temelli et ürünlerinin pişirilmesi sırasında, özellikle yüksek sıcaklıkta ve uzun süreli ısı işlem uygulandığında, PAH oluşumu önemli bir gıda güvenliği sorunu hâline gelmektedir. PAH bileşikleri, genellikle yağın yanması, doğrudan alevle temas veya pişirme yüzeyinde karbonlaşma sonucu ortaya çıkar. Ev tipi kullanımda, air fryer cihazları sayesinde et ve et ürünleri, hem besin değerlerini daha iyi koruyarak hem de hijyenik koşullarda kısa sürede

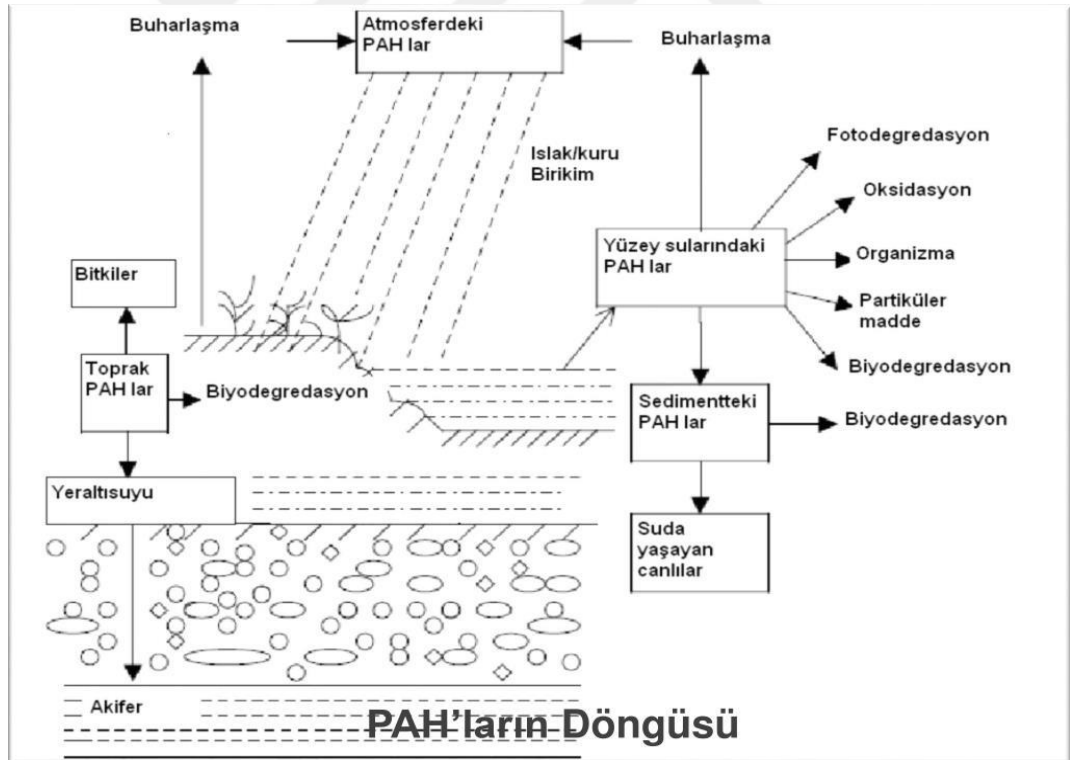
pişirilebilmektedir. Çalışmalar, geleneksel pişirme yöntemlerine kıyasla air fryerde yağsız pişirme kullandığı için daha az kimyasal ve kanserojen ürettiğini bildirmiştir. Bu yönüyle air fryer, günümüz yoğun yaşam koşullarında sağlıklı beslenme arayışına güçlü bir alternatif sunmaktadır. Ancak literatürde air fryer kullanımı ile ilgili görüşler çelişkilidir. Bazı araştırmalar, air fryerin PAH ve akrilamid gibi zararlı bileşiklerin oluşumunu anlamlı düzeyde azalttığını ortaya koyarken; bazı çalışmalar ise yüksek sıcaklık ve uzun süreli pişirme gibi kullanım hatalarının bu tür bileşiklerin oluşumuna neden olabileceğini ileri sürmektedir. Bununla beraber yeni çalışmalardan bazıları air fryer pişirme yönteminin kanserojen oluşumu riski açısından güvenilir olmadığı aksine kızartma sırasında kullanılan yüksek sıcaklıklardaki sıcak havanın farklı zararlı bileşiklerin oluşmasına neden olabileceğini sıklıkla kullanılmasının sağlık sorunlarını beraberinde getireceğini öne sürmektedir. Bu nedenle air fryer pişirme yönteminin pişmiş etlerdeki kanserojen konsantrasyonunu etkili bir şekilde azaltıp azaltamayacağına dair doğrudan bir kanıt bulunmamaktadır. Bu çalışmanın temel amacı, Hamburger köftesi örneklerinin air fryer ve geleneksel pişirme yöntemleri ile hazırlanması sonucunda PAH düzeylerini karşılaştırmalı olarak analiz ederek, daha güvenli ve sağlıklı pişirme stratejilerine bilimsel bir temel sunmaktır.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

2.1. PAH'ların Özellikleri, Sınıflandırılması ve Oluşum Mekanizmaları

PAH'lar, doğrusal, küme veya açısıl bir konumda bağlanmış birden fazla benzen halkasına sahip zararlı ve kalıcı organik bileşiklerdir (Broniatowski vd., 2017; Zainal vd., 2022). Genellikle renksiz olan bu bileşikler beyaz veya soluk sarı renklere de bulunabilir. Ayrıca PAH'lar nispeten düşük sulu çözünürlüğe, yüksek erime ve kaynama noktalarına sahiptir. PAH'lardaki halka sayısı arttıkça kaynama noktası artarken, sulu çözünürlük azalır (Achten and Andersson, 2015).

Şekil 1'de görüldüğü PAH'lar doğadaki döngüsünü mevcut doğa olayları yoluyla tamamlamaktadır. PAH bileşikleri atmosfere salındıktan sonra atmosferdeki partiküler maddelere tutunurlar. Bu bileşiklerin atmosferde bulunma süreleri ve farklı yerlere taşınmaları partikül çapına, meteorolojik koşullara ve atmosfer fizikine bağlı olarak değişmektedir (Köseler, 2008)



Şekil 1. PAH'ların doğadaki döngüsü (Köseler, 2008)

PAH'lar doğada bitkiler, toprak, yeraltı suları vb. yollarla oluşan yeryüzündeki kuru ve ıslak birikimin atmosfere oradan tekrar yeryüzüne geri dönmesiyle yayılmaktadır. Yüzey sularına

taşınan PAH'ların bir kısmı buharlaşarak tekrar atmosfere geri döner, diğer kısmı fotodegradasyon, oksidasyon ve biyodegradasyona uğrar, bir kısmı canlı bünyesine alınır, düşük molekül ağırlıklı olanlar suda askıda kalır, yüksek molekül ağırlıklı kısmı ise sedimentte birikir. Sedimentte biriken yüksek molekül ağırlığa sahip PAH'ların bir kısmı biyolojik olarak bozunur, kalan kısmı da suda yaşayan canlıların bünyesine alınır (Köseler, 2008).

PAH'lar, yapılarında bulunan aromatik halkaların sayısına göre hafif veya ağır fraksiyonlar olarak sınıflandırılır. Hafif PAH'lar 4'ten az üyeli aromatik halka içerirken, ağır PAH'lar 4'ten fazla üyeli aromatik halka içerir. Hafif PAH (L-PAH) fraksiyonları uçucudur ve yapılarındaki aromatik halkaların sayısı arttıkça uçuculuk azalır. Ancak ağır PAH (H-PAH) (benz[a] antrasen, benzo[ghi]perilen, benzo[a]piren, benzo[b]floranten, benzo[k]floranten, krizen, dibenz[a,h]antrasen ve indeno[1,2,3-cd] piren) fraksiyonları daha stabildir ve birçok çevresel matriste bulunur (Olatunji vd., 2014).

PAH'lar, organik materyalin eksik yanması veya pirolizi sırasında ve enerji üretiminde dünya çapında petrol, gaz, kömür ve odun kullanımıyla bağlantılı olarak oluşur. Atmosfer, PAH'ların taşınması ve birikmesi için önemli bir yoldur. Atmosferik birikim, havadaki toksik maddelerin kaderini ve atmosferden doğal yüzeylere transferini kontrol eden önemli bir mekanizmadır (Bae vd., 2002; Fang vd., 2006). PAH'lar atmosferde uçucu veya partikül madde olarak asılı kalabilirler. Atmosferde 2-4 benzen halkasına sahip PAH'lar buhar veya partikül madde formunu alırken, 4-6 benzen halkasına sahip PAH'lar çoğunlukla ince partikül madde olarak bulunur (Fang vd., 2006).

IARC (Uluslararası Kanser Araştırmaları Ajansı), 60 ayrı PAH için deneysel verileri incelemiştir (IARC, 2010). Bu 60 PAH'tan biri olan benzo[a] piren, insanlar için kanserojen olarak sınıflandırılmıştır (Grup 1). IARC tarafından incelenen diğer PAH'lar arasında, insanlar için muhtemelen kanserojen olarak sınıflandırılan siklopenta[cd]piren, dibenz[a,h] antrasen ve dibenzo[a,l] piren (Grup 2A) ve insanlar için şüpheli kanserojen bileşikler olarak sınıflandırılan benz[j]aseantrilen, benz[a]antrasen, benzo[b]fluoranten, benzo[j]fluoranten, benzo[k]fluoranten, benzo[c] fenantren, krizen, dibenzo [a,h]piren, dibenzo[a,i]piren, indeno[1,2,3-cd]piren ve 5-metil krizen (Grup 2B) yer almaktadır. Benz[j]aceanthrylene, benzo[c]phenanthrene, benzo[a]pyrene, cyclopenta[cd]pyrene, dibenzo[a,h]anthracene ve dibenzo[a,l]pyrene değerlendirmelerinde, bu bileşikler için mevcut çalışılan verilerin her biri için genel değerlendirmeyi belirlemek açısından kritik öneme sahip olduğu bildirilmektedir (IARC, 2010).

2.2. PAH'lar ile İlgili Yasal Düzenlenmeler

PAH'lar canlı organizmalara yönelik zararlı etkilerinden dolayı bazı ülkelerde tükülenmiş gıdalardaki içeriği yasal limitlerle sınırlandırılmıştır (Şimko, 2002). PAH'ların genotoksik, mutajenik ve kanserojen etkileri nedeniyle IARC, FAO/WHO Gıda Katkı Maddeleri Ortak Uzman Komitesi (JECFA), Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı (USEPA) ve Avrupa Birliği gibi çeşitli uluslararası kuruluşlar (AB) 16 öncelikli PAH'tan oluşan bir liste önermiştir. Tablo 1'de PAH2, PAH4, PAH8 ve PAH15+1 bileşikleri ve bunların karsinojenik aktivitelerine göre bulunduğu grubu gösterilmiştir.

Tablo 1. EFSA tarafından indikatör olarak kullanılan PAH4, PAH8, PAH15+1 türleri ve grubu (European Food Safety Authority (EFSA), 2008)

PAH Bileşikleri	PAH2	PAH4	PAH8	PAH15+1	Grubu
Naphthalene				☑	2B
Phenanthrene					3
Anthracene					3
Fluoranthene					3
Pyrene					3
Chrysene	☑	☑	☑	☑	2B
Benzo(a)anthracene		☑	☑	☑	2B
Benzo(b)fluoranthene		☑	☑	☑	2B
Benzo(k)fluoranthene			☑	☑	2B
Benzo(a)pyrene	☑	☑	☑	☑	1
Benzo(ghi)perylene			☑	☑	3
Benzo[j]fluoranthene				☑	2B
Cyclopenta[cd]pyrene				☑	2A
Dibenz[a,h]anthracene			☑	☑	2A
Dibenzo[a,e]pyrene				☑	3
Dibenzo[a,i]pyrene				☑	2B
Dibenzo[a,l]pyrene				☑	2A
Dibenzo[a,h]pyrene				☑	2B
Indeno[1,2,3-cd]pyrene			☑	☑	2B
5-methylchrysene				☑	2B

2008 yılında Dünya Sağlık Örgütü'nün Uluslararası Kimyasal Güvenlik Programı (IPCS) ve Avrupa Birliği Gıda Güvenliği Bilimsel Komitesi (SCF), 15 PAH'ın, yani, benzo(a)anthracene

(BaA), fluoranthene (F), krizen (Chr), benzo(b)floranten (BbF), dibenzo(a,h)piren (DhP), dibenzo(a,h)antrasen ((DhA), naphthalene, benzo(k)floranten (BkF), benzo(g,h,i)perilen (BgP), anthracene, acenaphthene, indeno (1,2,3 cd)piren (IcP), phenanthrene, fluorene, acenaphthylene kanserojen, mutajenik ve teratojenik özelliklere sahip olduğunu bildirmiştir (European Food Safety Authority (EFSA), 2008). BaP, BaA, Chr ve BbF'nin toplamını ifade eden PAH4 seviyeleri, PAH'ların yüksek karsinojenik gücü olan PAH'ları ifade etmekte ve gıdalardaki PAH oluşumunun değerlendirilmesinde indikatör olarak kullanılmaktadırlar (Öz, 2021; Rose vd., 2015).

PAH'lar arasında en önemlisi benzo[a]pirendir. IARC 1987'de bunun insanlar için en kuvvetli kanserojen olduğu sonucuna varmıştır (IARC, 1987). PAH bileşiklerinin hem çok çeşitlilik göstermesi hem de örneklerdeki miktarlarının değişkenlik göstermesi sebebiyle kantitatif olarak belirlenmesi oldukça güçtür. Avrupa Birliği Komisyonu'na (EC) göre, benzo[a]piren gıdalarda kanserojen PAH'ın oluşumu ve etkisi için bir belirteç olarak kullanılabilir, ancak (EC) 2005/108/EC sayılı Komisyon Tavsiyesi birden fazla PAH'ın analizini zorunlu kılmıştır (Serpe vd., 2010). BaP'lar düşük konsantrasyonlarda bile ciddi toksik etkiler gösterdikleri için önemli ölçüde daha fazla ilgi çekmiştir (Lai vd., 2004). BaP vücutta emildikten sonra, nihai kanserojen metabolitler olan ve prokarsinojen olarak hareket eden BaP diol epoksitleri gibi reaktif ara maddelere metabolize edilir. Bu moleküller kovalent bağ yoluyla DNA'ya güçlü bir şekilde bağlanır (Çorman vd., 2017). Böylece kromozomlarda mutasyonlara neden olabilir, füzyon ve bağlantı süreçlerini etkileyebilir ve potansiyel olarak kromozomal kırılmalara neden olabilir. Sonuç olarak, bu hücrelerde depolanan genetik materyal dengesiz hale gelir. DNA onarım mekanizmaları oluşmazsa, genotoksik ajan transkripsiyon sürecinin başlangıç aşamasında hücrenin DNA'sını kalıcı olarak etkileyecek ve önlenemez bir mutasyon oluşturarak pre-neoplastik bir hücre oluşumunu tetikler, DNA'nın modifikasyonu, DNA ve gen transkripsiyonunun bozulmasından sorumlu olarak, tümörlere ve kansere neden olur (Sampaio vd., 2021).

Avrupa Komisyonu'nun 1881/2006 (2006) sayılı Yönetmeliği'ne göre dumana maruz kalmış et ürünlerindeki B[a]P içeriği 5 µg/kg olarak sınırlandırılmıştır. PAH4 içeriği ise 30 µg/kg olarak belirlenmiştir. 1 Eylül 2014'ten bu yana PAH maksimum seviyelerine ilişkin 1881/2006 sayılı Tüzüğü değiştiren 12 Aralık 2014 tarihli (AB) No 1327/2014 sayılı Komisyon Tüzüğü'ne göre dumana maruz kalmış et ürünlerindeki maksimum B[a]P içeriği sınırı 2 µg/kg ve izin verilen PAH4 içeriği 12 µg/kg'a düşürülmüştür. EFSA (Avrupa Gıda Güvenliği Otoritesi)

tarafından bir gıdanın PAH içeriğinin belirlenmesi için BaP analizlerinin tek başına yeterli olmadığı, bunun yerine ya dörtlü PAH (PAH4) sisteminin (BaA, BaP, BbF ve Chr) ya da sekizli PAH (PAH8) sisteminin (BaA, BaP, Chr, BkF, BbF, IcdP, Dah ve BgIP) kullanılması gerektiği belirtilmiştir (European Food Safety Authority (EFSA), 2008).

2.3. Gıdalarda PAH

İnsanlar PAH'lara öncelikle solunum, yutma ve cilt emilimi yoluyla maruz kalırlar (Chen vd., 2022; Farhadian vd., 2011; Linares vd., 2010). Bazı PAH'lar oldukça kanserojendir ve meme, akciğer ve kolon kanserleri de dahil olmak üzere çeşitli insan kanser türlerinde rol oynadığı düşünülmektedir. Birçok çalışma, diyetin en önemli PAH kaynağı olduğunu ((Falcó vd., 2003; Martorell vd., 2010) ve toplam maruziyetlerinin %70'inden fazlasına katkıda bulunduğunu göstermiştir (Hao vd., 2016; McGrath vd., 2007). Dünya Sağlık Örgütü'nün (WHO) tahminlerine göre, tehlikeli gıda tüketmek, her yıl dünya çapında 33 milyon sağlıklı bireyin sağlıklı yaşam tarzını kaybetmesine neden olmaktadır (WHO, 2022). Seçili gıda ürünleri için maksimum PAH konsantrasyonlar Tablo 2'de özetlenmiştir.

Tablo 2. Farklı ürün gruplarına göre gıdalardaki maksimum PAH konsantrasyonları ((EU) Commission Regulation (EU), 2023)

Ürün Grubu	Benzo (a)piren için sınır	PAH4 için sınır
Kakao çekirdekleri ve türev ürünleri	5 µg/kg	30 µg/kg
Hindistan cevizi yağı	2 µg/kg	20 µg/kg
Diğer yağlar ve yağlar	2 µg/kg	10 µg/kg
Füme etler ve et ürünleri	2 µg/kg	12 µg/kg
Füme balık ve balıkçılık ürünleri	2 µg/kg	12 µg/kg
Tütsülenmiş yumuşakçalar	6 µg/kg	35 µg/kg
Bebek maması bebek devam sütü	1 µg/kg	1 µg/kg
Geleneksel olarak tütsülenmiş et ve balık ürünleri*	5 µg/kg	30 µg/kg
Kurutulmuş otlar ve baharatlar, içecek hazırlamada kullanılan bitki tozları	10 µg/kg	50 µg/kg
Muz cipsi	2 µg/kg	20 µg/kg

*Bu yüksek limitler İrlanda, Hırvatistan, Kıbrıs, İspanya, Polonya, Portekiz, Letonya, Slovakya, Finlandiya ve İsveç'te geleneksel olarak tütsülenen belirli ürün türleri için geçerlidir.

Farklı gıda maddelerindeki PAH ve diğer gıda kirleticilerinin maksimum seviyeleri Avrupa Birliği'nin 2023/915 sayılı yönetmeliği ile belirlenmiştir. Söz konusu yönetmelik ile tüm PAH bileşiklerinin ayrı ayrı tespiti yerine, benzo(a)piren, benz(a)antrasen, benzo(b)floranten ve krizen 4'lü kombinasyonunun varlığına sınırlamalar getirir ve bunlar birlikte PAH4 grubu olarak belirlenmiştir.

PAH'lar sıvı ve katı yağlar, et ve et ürünleri, yapraklı ve yapraksız sebzeler, meyveler, tahıllar ve yumru köklerin yanı sıra tatlılar, şekerlemeler ve çikolatalar, bebek mamaları, çeşitli baharatlar, kakao çekirdekleri gibi işlenmiş ürünler de dahil olmak üzere çeşitli gıda ürünlerinde mevcut olabilir. İşleme sırasında gıda ürünlerinde oluşan PAH'ın; çeşitliliği ve miktarı ısı kaynağından uzaklık kullanılan yakıt türü, işleme koşulu pişirme süresi gibi çeşitli faktörlere ve yeniden kullanım ve depolama gibi yöntemlere bağlıdır (Chen vd., 2022).

PAH bileşiklerinin üç farklı mekanizma ile gıdalarda oluştuğu öne sürülmüştür. Birinci mekanizma; yağ, protein ve karbonhidrat gibi organik maddelerin yüksek sıcaklıklarda (500-900 °C) pirolize olmasıyla PAH bileşiklerinin oluşmasıdır. İkinci mekanizma; kömür ateşi üzerinde pişirilen gıdalardan ayrılan yağ damlalarının sıcak kömür üzerine düşmesi ve yoğun ateşle karşılaşması sonucu uçucu PAH bileşiklerine dönüşmesidir. Bu uçucu PAH bileşikleri dumanlanma arttıkça gıdanın yüzeyine daha çok bulaşmaktadır. Üçüncü mekanizma ise; kömürün tam olarak yanmaması sonucu PAH bileşiklerinin oluşması ve bunların gıda yüzeyine kontamine olmasıdır (Kılıç vd., 2017).

Gıda güvenliğinin sağlanması ve raf ömrünü uzatmak için yapılan yanlış işlemler de PAH bileşiklerinin oluşumuna neden olabilmektedir (Kılıç vd., 2017). PAH'a maruz kalmanın ana yolları yiyecekler ve havadır. PAH'lar gıdalara farklı yollardan bulaşabilir:

- (i) havada, toprakta veya suda bulunan çevresel PAH'lar,
- (ii) endüstriyel gıda işleme yöntemleri,
- (iii) evde yemek hazırlama vb. yöntemlerle gıdalara bulaşabilir.

Et ve et ürünleri gibi ısı işlem görmüş yüksek protein içerikli gıdalarının kimyasal bileşimi üzerine yapılan çalışmalar, PAH'lar gibi çeşitli mutajenik maddelerin varlığını göstermiştir (Öz, 2021). PAH'lar, havada birikmeleri sonucu başta sebzeler olmak üzere çeşitli gıdalarda ve kirlenmiş sulardaki balık ve midyelerde tespit edilmiştir (Edwards, 1983). Sebze ve meyvelerin mumsu yüzeyi, düşük moleküler kütleli PAH'ları yüzey adsorpsiyonu yoluyla yüzeyde yoğunlaştırabilir ve partiküle bağlı yüksek moleküler kütleli PAH'lar, atmosferde bulunmaları nedeniyle yüzeyi kirletebilir. Tahılların ve bitkisel yağların PAH ile kontaminasyonu genellikle

yanma ürünlerinin tahlil, yağlı tohumlar veya yağ ile temas edebileceği doğrudan ateşle kurutma gibi teknolojik işlemler sırasında meydana gelir (Speer vd., 1990).

2.3.1. Bitkisel yağlarda PAH

Yenilebilir bitkisel yağlar insan beslenmesinin en önemli bileşenlerinden biridir. Farklı bitkisel yağ çıkarma işlemleri PAH gibi kirleticilerin ürünlerdeki konsantrasyonunu arttırabilir. İlk olarak, yağ bitkileri çevreden kirleticileri emer büyüme süreci sırasında bunları bitkisel yağ ürünlerine aktarır. İkinci olarak, yağ üretimi ve işlenmesi sırasında yüksek sıcaklıkta pişirme ve organik çözücü işlemi ürünlerdeki çevre kirleticilerinin konsantrasyonunu artırabilir. Üçüncüsü, gıda ile temas eden paketleme, depolama ve taşıma, özellikle plastik kapların kullanımı, paketleme malzemeleri ile temas süresine bağlı olarak kirleticilerin yağ ürünlerine sızmasına izin verebilir (Zhou vd., 2016). Yaygın yenilebilir yağlardaki PAH konsantrasyonu üzerine yakın zamanda yapılan bir araştırma, numunelerin %35'inin BaP ve PAH4 toplamı için sırasıyla 2 ve 10 µg/kg'lık AB sınırlama standardını aştığını göstermiştir (Yousefi vd., 2018). Benzer şekilde, Brezilya pazarında izlenen kolza tohumu, ayçiçeği ve mısır yağı numunelerinin yaklaşık yarısı da AB standartlarını aşan konsantrasyonlarda PAH içerdiği tespit edilmiştir (Molle vd., 2017). Hao ve diğerlerinin sonuçları da derin yağda kızartmadan elde edilen bitkisel yağların diğer pişirme yöntemlerinden elde edilen yağlara göre daha yüksek konsantrasyonlarda toksik PAH içerdiğini göstermiştir (Hao vd., 2016).

2.3.2. Meyve ve sebzelerde PAH

Bitkilerin PAH'larla kirlenmesi PAH'ların uzun mesafelerde atmosferik taşınması nedeniyle yaygın bir durumdur. PAH'ların sebze ve meyvelere bulaşması yetiştirme sırasında havadan ve topraktan bulaşması ile gerçekleşebilir. Ayrıca depolama, taşıma veya pişirme süreçleri sırasında tüketimden önce de ortaya çıkabilirler. Konsantrasyonlar genellikle sağlık uyarı sınırlarını aşmaz, ancak bitkilerdeki PAH seviyeleri ekolojik ve sağlık açısından tehdit oluşturabilir. PAH'ların bitkilerde birikme mekanizmalarını bilmek ve hangi mekanizmaların en önemli olduğunu anlamak, PAH'ların besin zinciri boyunca yayılmasını en aza indirmenin anahtarıdır (Schwab ve Dermody, 2021). ABD Çevre Koruma Ajansı (EPA) tarafından öncelikli kirleticiler olarak sınıflandırılan bileşikler için miktarlar 0,01 ile 0,5 µg/kg (ıslak ağırlık) arasındadır. Ancak, birkaç çalışma, bazı PAH konsantrasyonlarının çeşitli meyve ve sebzelerde 0,5 µg/kg ıslak ağırlığı aşabileceğini ve hatta 5 µg/kg'e ulaşabileceğini belirtmektedir. Miktarlar, mahsulün çevresindeki alana, aromatik hidrokarbona veya hatta

ürünün kendisine bağlı olarak çok farklı olabilir. PAH içeriği genellikle yolların yakınında veya kentsel bölgelerde yetiştirilen ürünlerde kırsal alanlardaki ürünlere göre daha yüksektir. Fenantren , floranten ve piren gibi bileşiklerin eser seviyeleri hemen hemen her çiğ meyve ve sebzede bulunmuştur. Naftalin , asenaftilen ve asenaften gibi daha hafif PAH'ların nispeten yüksek miktarları bazılarında bulunmuştur (Paris vd., 2018).

2.3.3. Süt ve süt ürünlerinde PAH

Süt, insan beslenmesinde orijinal haliyle ve çeşitli süt ürünleri olarak tüketilir. Farklı hayvan sütleri, üretim şekli ve yağ içeriği açısından farklıdır. Sütün PAH kontaminasyonu, hayvan yetiştirme sistemiyle ilgili çevresel faktörlere (yem ve potansiyel olarak kirlenmiş toprak, laktasyon aşaması ve sürünün tıbbi durumu) ve laktasyondaki geviş getirenin maruz kalma kaynağına (otlatma sırasında yutma, kirlenmiş havanın solunması veya deri temasıyla emilim) bağlıdır (Naccari vd., 2011). Piyasada çeşitli yağ içeriklerine sahip çeşitli süt ve süt ürünleri bulunmaktadır.

PAH'lar lipofil yapıya sahip olduğundan, gıda zincirinde, özellikle yüksek yağ içeriğine sahip gıdalarda birikebilirler. Öte yandan, süt ve süt ürünleri gibi hayvansal kaynaklı gıdalar, ana PAH kaynaklarından biri olarak bilinmektedir. Sanayileşmiş bölgelerin yakınlarında kirlenmiş yem ve otların tüketilmesi ve ota birlikte tüketilen kirlenmiş toprak, geviş getiren hayvanların sütünde yüksek düzeyde PAH'lara yol açmaktadır (Amirdivani vd., 2019; Kishikawa vd., 2003). Süt, çevre kirliliği için ilginç bir biyobelirteç olarak kabul edilebilir (Chahin vd., 2008), aslında ksenobiyotik kalıntı ksenobiyotikler (pestisitler, ilaçlar, metaller, PAH'lar ve PCB'ler) düzeylerinin varlığı, süt ve süt ürünleri kalitesinin doğrudan bir göstergesi ve sütün üretildiği çevrenin kirliliğinin dolaylı bir göstergesidir (Naccari vd., 2006).

Sütteki PAH'larla ilgili yapılan çalışmaların birinde, İspanya'nın Kanarya Adaları bölgesindeki pazarlardan rastgele alınan 117 süt ürünündeki PAH oranları değerlendirilmesinde, en yüksek PAH seviyeleri süt ve peynir örneklerinde belirlenmiştir. 16 PAH'ın toplamı için tahmini gıda alımı; süt için çocuklar için 65,6 ng/kg vücut ağırlığı, yetişkinler için 35,2 ng/kg vücut ağırlığı ve peynirler için çocuklar için 16,7 ng/kg vücut ağırlığı, yetişkinler için 8,8 ng/kg vücut ağırlığı olarak bulunmuştur. PAH alımlarının kanserojen potansiyeli göz önüne alındığında, hesaplanan değerler yetişkinlerde kanser geliştirme riskini 1,6/106 oranında artırırken, çocuklarda 1,9/106 oranında artırdığı rapor edilmiştir. Süt ürünlerinin kabul edilebilir günlük PAH alımının

neredeyse iki katını oluşturabileceği ve kanser riskinin artmasından sorumlu tutulabileceği belirtilmiştir (Luzardo vd., 2014).

2.3.4. Et ve et ürünlerinde PAH

İnsan beslenmesinde sağlık için önemli bir yeri olan et; mineral maddeleri, vitaminleri ve özellikle elzem amino asitleri ve yağ asitlerini yeterli miktarda yapısında bulundurmaktadır. Ancak et, beslenme için elzem bir gıda maddesi olmakla birlikte, kanser gibi hastalıkların kaynağı da olabilmektedir (Karslioğlu, 2022). Son yıllarda yapılan birçok epidemiyolojik çalışmalarda et tüketimi ile kanser oluşum riski arasında pozitif bir korelasyonun söz konusu olduğu vurgulanmaktadır (Cheng vd. 2021; Jägerstad ve Skog, 2005; Lourenço vd. 2019; Zhao vd. 2017).

Et ve et ürünleri, yaygın olarak diyetlerde yer alması ve tüketilmeleri için ısıtılma ihtiyacı duyulması nedeniyle, vücuda PAH alımında etkin taşıyıcılardan biri olarak kabul edilmektedir (Aydın ve Şahan, 2018). İşleme, et ürünlerinin değerini artırır ve raf ömrü uzatılabilir. Ancak etin bileşimi, nitrozaminler, polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAH), heterosiklik aminler, biyogenik aminler ve lipid oksidasyon ürünleri gibi istenmeyen maddeler tarafından bozulabilir (Ledesma vd., 2016).

PAH bileşiklerinin oluşumunu önlemek veya azaltmak için, bu bileşiklerin oluşum mekanizmalarının tam olarak anlaşılması gerekmektedir. PAH oluşumu ile ilgili pek çok varsayım içerisinde piro-sentez ve pirolizin PAH oluşumuna neden olan iki baskın mekanizma olduğu düşünülmektedir (Karslioğlu, 2022; Onopiuk vd., 2022). Araştırmacılar tütülenmiş ve ızgara et ürünlerinde PAH oluşumunun üç farklı mekanizmasından bahsetmişlerdir. (Karslioğlu, 2022; Onopiuk vd., 2021). Birincisi yağ ve proteinler başta olmak üzere organik maddelerin pirolizi veya pirosentezi, ikincisi pişirilen etteki suyun ve/veya yağın ısı kaynağı üzerine düşmesi, üçüncüsü kullanılan yakıtın (odun, kömür) tam yanmaması olarak açıklanmıştır. PAH oluşum mekanizması odun veya kömürün bileşimindeki yüksek değişkenlik nedeniyle, dolayısıyla sıcaklık değişimlerine verilen tepki nedeniyle değişebilir (Kim vd., 2021; Stumpe-Viksna vd., 2008; Viegas vd., 2012).

PAH'lar yanma ürünlerinin gıdayla doğrudan temas etmesine izin veren endüstriyel tütüleme, ısıtma ve kurutma işlemleri sırasında da gıdaları kirletebilir (Chen vd., 2022). PAH'lar uçuculukları sayesinde gıdalara bulaşmaktadırlar. Kömür alevinde pişirilen etlerde; etin içeriğindeki yağ miktarı, pişirme sıcaklığı ve süresine bağlı olarak PAH'lar oluşabilir veya

oluşan PAH miktarları değişebilir (Öz, 2021). Etin pişirilme tekniği, PAH oluşumu açısından farklılık meydana getirmektedir. Yatay konumda pişirilen ette yağın doğrudan ateş kaynağına damlaması sonucu oluşan PAH miktarı, dikey konumda pişirilene göre 10-30 kez daha fazladır (Günç Ergönül ve Kaya, 2015). Ayrıca et yapısı itibarıyla yüksek yağ oranına sahip olmasından dolayı daha yüksek yanma gösterir ve PAH bileşikleri lipofilik özelliğinden dolayı gıdanın yağ ve su içeriği PAH oluşum riskini arttırmaktadır.

PAH'ların sağlık üzerindeki ciddi etkileri ve gıdalarda her yerde bulunmaları ile en yüksek konsantrasyonların EFSA; tüketicilerin günlük diyetle PAH bileşikleri alımına neden olan en önemli gıda kaynaklarından birinin et ve et ürünleri olduğunu bildirmiştir (Kılıç vd., 2017). Doğrudan kömürde ızgaralama, dolaylı kömürde ızgaralama karşılaştırıldığında tavuk, sığır eti ve domuz etinde BaP konsantrasyonlarının ve diğer PAH'ların beş kat veya daha fazla arttığı bulunmuştur (Alomirah vd., 2011).

2005'ten bu yana, tütülenmiş et ve et ürünleri ile tütülenmiş balık ve tütülenmiş balıkçılık ürünlerinin kas etinde benzo[a]piren (BaP) için AB'deki maksimum seviye 5,0 µg/kg olarak belirlenmiştir (Yönetmelik (EC) No 208/2005). O tarihten itibaren tütülenmiş et ürünlerinde BaP ve toplam PAH içerikleri üzerine yapılan araştırmalar artış göstermiştir (Wretling vd., 2010). Ülkemizde ise halen balık ve et, odunun yanması sonucu ortaya çıkan duman kullanılarak tatlandırılmaktadır. Odun dumanı toksisitesiyle ilgili endişelerin ana nedeni kayda değer miktarda kanserojen PAH içermesidir (Basak vd., 2010).

Et, süt ürünleri ve sebzeler gibi yaygın gıda ürünleri, gıda bileşenlerinin birincil kaynaklarıdır. Bu nedenle, bu ürünlerdeki gıda kirleticileri için azaltma stratejilerinin net bir şekilde anlaşılması esastır. Etkili azaltma, her bir kirleticiye göre uyarlanmış özel müdahalelerin ve genel gıda güvenliğini artırmak için genel uygulamaların bir kombinasyonunu içerir. Bu stratejiler arasında alternatif kimyasallar ve süreçler kullanmak, pişirme yöntemlerini optimize etmek, temiz üretim ortamları sağlamak ve uygun testler yapmak yer alır. Bu mekanizmaları anlamak ve öncülleri kontrol etmek, gıda kirliliği ve kimyasal tehlikelerle ilişkili riskleri azaltmaya yardımcı olabilir (Vignesh vd., 2024). Et ve et ürünlerinde PAH oluşumunu azaltıcı veya engelleyici yaklaşımlar ile ilgili çeşitli çalışmalar Tablo 3'te özetlenmiştir.

Tablo 3. Et ve et ürünlerinde PAH oluşumunun azaltılması veya engellemesine yönelik yapılan çalışmalar (Karslıoğlu, 2022) (yeniden düzenlenmiştir)

Et ve et ürünleri	Uygulanan strateji	Elde edilen bulgular	Kaynak
Izgarada pişirilmiş tavuk ve dana eti	-Mikrodalga ve buhar ile ön pişirme işlemi -Muz yaprağı ve alüminyum filme sarma	Her iki et ürünü için; -buharla ve mikrodalgayla ön pişirme -alüminyum ve muz kabuğuna sarmanın PAH bileşiklerini azaltmada etkili olmuştur.	Farhadian vd. 2011
Izgarada pişirilmiş dana eti	7 farklı marinasyon işleminin ve 4 farklı marinasyon süresinin kullanılması	%1,2 konsantrasyonunda asidik marinasyon sosu ile marinasyonun PAH oluşumunu %70'e kadar düşürdüğü, PAH azaltılmasında marinasyon süresinin etkili olmadığı sonucuna varılmıştır	Farhadian vd. 2012
Dana köfte	Ohmik ön pişirme ve farklı sıcaklıklarda infrared pişirme	Ohmik ön pişirme ve ardından infrared pişirmenin PAH4 oluşumunu azalttığını belirtmişlerdir.	Kendirci vd. 2014
Kömürde ızgara edilmiş tavuk kanat eti	Fenolik asit kullanımı (protokateşik asit, gallik asit ve ferulik asit) ve farklı pişirme sıcaklıkları uygulaması (210°C, 240°C, 270 °C)	Marinasyon işleminin PAH oluşumuna inhibitör etkisinin farklı sıcaklık uygulamasından daha etkili olduğu bulunmuştur.	Wang vd. 2019
Izgarada pişirilmiş domuz eti	Çeşitli bitki ekstraktlarının (yaprak, karabiber, zerdeçal, jalapeno biberi ve demirhindi) ile marinasyon yapılması	Bitki ekstraktı hazırlanan marinasyonun PAH seviyeleri üzerinde önemli bir azaltıcı etki göstermiştir.	Onopiuk vd. 2022
Domuz eti, sığır eti ve tavuk eti	Üç kömür türü (beyaz, siyah ve ekstrüde kömür) kullanılarak ızgara yapılması	Beyaz ve siyah kömüre kıyasla ekstrüde kömürde daha fazla ağır PAH tespit edilmiştir.	Kim vd. 2021
Füme et sosisleri	Polietilen ambalaj kullanılması	Uygulanan ambalajlama yöntemi ile paketli sosislerde raf ömrü süresince PAH4 oranlarında azalma görülmüştür.	Semanová vd. 2016
Tavuk eti	Air fryer ve derin yağda pişirme	Air fryerde pişirmenin derin yağda kızartmaya kıyasla tavuk etinde PAH oluşumunu azaltabileceğini göstermiştir.	Lee vd. 2020
Kömürde ızgara edilmiş domuz eti	5 farklı sirke (kara mürver, beyaz şarap, kırmızı şarap, elma, ahududulu elma sirkesi) ile marinasyon uygulaması	Pişirmeden önce püskürtülen sirke çeşitlerinden en fazla inhibisyon sağlayan kara mürver sirkesi olduğu ve ete sirke püskürtmenin inhibisyon açısından doğru bir strateji olduğu görülmüştür.	Cordeiro vd. 2020
Domuz ve dana eti	Farklı ızgara prosedürlerinin uygulanması	Klasik ızgaraya göre, et damlalarını ve dumanı ızgara aparatıyla gideren işlemler PAH4 oranlarında %40'ın üzerinde azalmalar gözlemlenmiştir.	Lee vd. 2016

Et ve et ürünlerinin önemli bir PAH kaynağı olduğu düşünüldüğünde, bu bileşiklerin azaltılması veya önlenmesi konusu son yıllarda önem arz eden konuların başında gelmektedir. Bu bileşiklerin oluşumunun azaltılması için uygulanacak işlemlerin PAH içeriğini minimize edecek veya engelleyecek şekilde modifiye edilmesi gerekmektedir.

Piştirme koşulları PAH oluşumunu etkileyen en önemli parametrelerden biri olmasından dolayı, doğru piştirme yönteminin seçimi, kontrollü piştirme işleminin yapılması, doğrudan alev üzerinde piştirmemek ve oluşan dumandan kaçınmak, damlayan yağın uzaklaştırılması veya yağın yanmasını önlemek, çok yüksek sıcaklıklarda piştirmemek, ateşi tutuşturmak için çıra vb. ürünlerinin kullanılmaması, ısı kaynağı ile olan mesafe seçimi ile PAH oluşumunun azaltılabileceği araştırmalarda gösterilmiştir. Ayrıca yapılan çalışmalarda; piştirme işlemi öncesi buharda veya mikrodalgada bir ön ısıtma uygulamasının, daha az yağlı ürün seçiminin, ürünün alevle direkt temasının engellenmesinin, gıdanın direk ısı kaynağına temasının engellenmesinin, gıdanın bir film ile veya herhangi bir malzeme ile kaplanmasının/sarılmasının, marinasyon uygulamasının, marinat (baharat, soğan, sarımsak, yeşil çay vb.) veya doğal/yapay antioksidan ilavesinin de PAH oluşumunu azaltıcı yönde etkisinin olduğu gösterilmiştir (Karslıoğlu, 2022) .

2.4. Hazır Köfte Tüketimi ve Air Fryer (Sıcak Hava Fritözü)

Yaşam şekilleri ve yaşam standartlarının değişmesi, hızlı kentleşme ve iş yoğunluğu, çalışan kadın sayısının her geçen gün artması vb. nedenler, insanların geleneksel beslenme alışkanlıklarını değiştirmiştir. Bu değişimin sonucunda fazla zaman ve uğraş gerektirmeyecek, sağlıklı, istenilen miktar ve çeşitlilikte ürün bulma seçeneği, hazır ve işlenmiş gıdaların pazar payını arttırmıştır (Kayışoğlu ve İcöz, 2012).

Diğer yandan sınırlı zaman, tüketicilerin gıda tüketim davranışlarının değişmesine yol açmaktadır. Uzun çalışma saatleri, çekirdek ve tek ebeveynli ailelerin sayısındaki artış, iş gücüne kadın katılımındaki artış, boş zamanlarını en üst düzeye çıkarma isteği ve çoklu sorumluluklar, tüketicileri dünya çapında hazır gıda aramaya motive etmektedir (Contini vd., 2018; İmtiyaz vd., 2023). Kolaylığın yanı sıra, yemek piştirme becerileri, motivasyon, mutfak eğitimi ve malzeme satın alma, yemek hazırlama, temizlik ve atık yönetimi için harcanan fiziksel ve zihinsel çabalar, kolay hazırlanan yiyecek seçimini etkileyen önemli faktörlerdir (Tani vd., 2020).

Büyüyen küresel nüfus, beslenme ihtiyaçlarını karşılamak için yüksek kaliteli protein kaynaklarına, özellikle gelişmiş ülkelerde tüketiminin pratik olması nedeniyle de yarı-hazır işlenmiş et ürünlerine olan talep giderek artmıştır. Ülkemizde de bu tip gıda maddelerinin tüketimi büyük oranda artış göstermiştir. Hamburger; taze ve/veya dondurulmuş sığır kıymasına sığır yağı ve/veya baharat ve tuz katılarak ya da katılmaksızın hazırlanan ve

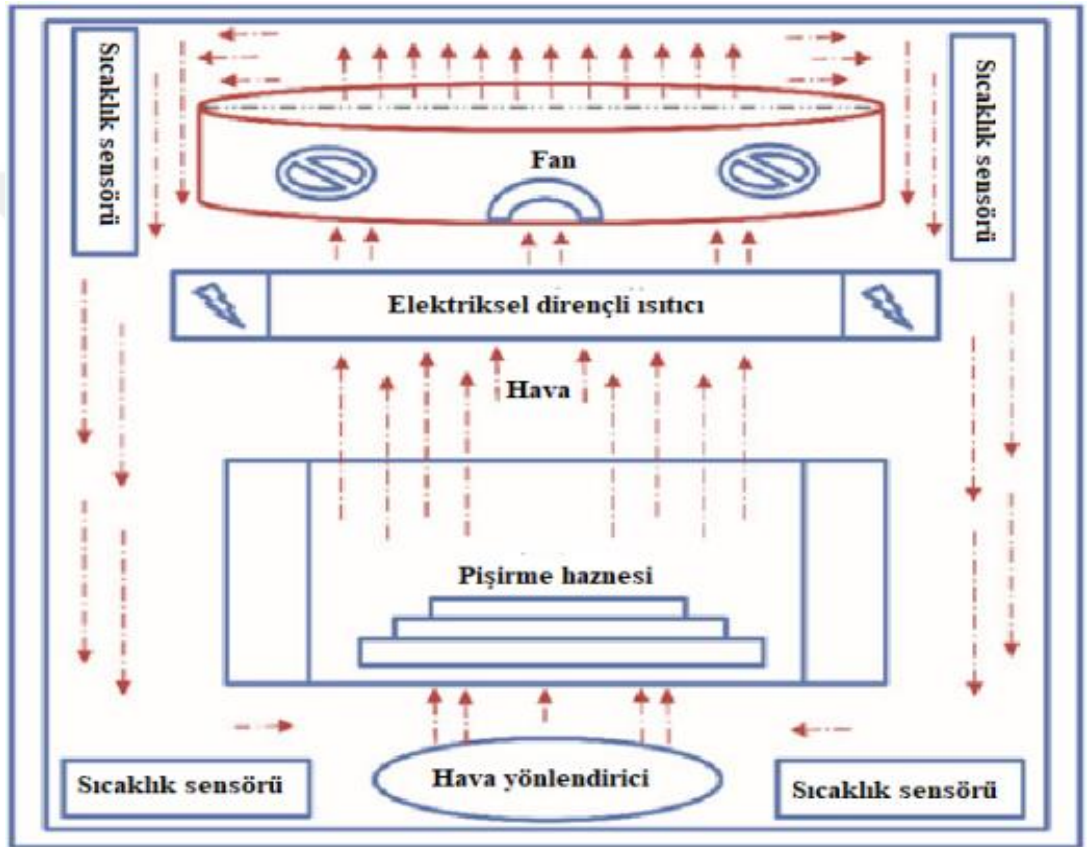
pişirilerek tüketilen bir et ürünüdür (Ağaoğlu vd. 2000). Kolay hazırlanabilmesi bakımından, hazır hamburger köftesi pratik hazırlanması, zengin besin içeriği ve lezzetiyle en çok tercih edilen gıdalar arasında sayılmaktadır. Hamburger köftesi, muhtemelen kolaylık ve fiyat nedeniyle dünyanın en popüler işlenmiş et ürününü temsil etmektedir (Scheeder vd., 2001).

Çoğunlukla sığır kıyma etinden yapılan hamburger, fastfood restoranlarının ve toplu tüketim yerlerinin en popüler ürünü olmuştur ve talebin artmasına paralel olarak da tüketiciye sağlıklı ürün sunmak önem kazanmıştır. Hem lezzetli hem de güvenilir hamburger köftelerinin hazırlanmasında pişirme yöntemleri oldukça önem kazanmaktadır. Son zamanlarda, yiyecekleri pişirmek için hızlı hava akışı teknolojisi olarak ifade edilen sıcak havada kızartma yöntemi kek gibi unlu mamuller de dâhil olmak üzere çeşitli yiyecek türlerini pişirmek için yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Fastfood zincirleri, restoranlar gibi ticari kuruluşlarda ve ev içi kullanım için sıcak hava ile kızartma ekipmanları günümüzde bir yatırım trendi haline gelmiştir. Bu teknoloji ile aşırı ısıtılmış havanın pişirme haznesinde dolaştırılması sayesinde pişirme sırasında potansiyel olarak zaman ve enerji tüketimi azaltılabilmektedir. Hava akışının varlığı, pişirme haznesi içerisinde sıcaklığın daha eşit dağılımını sağlamaktadır (Boz, 2022). Böylece kısa sürede son derece pratik ve lezzetli yemekler hazırlanabilmektedir. Bu avantajı göz önünde bulundurulduğunda hızlandırılmış hayat akışı içerisinde dışarıda hazır tüketim gıdaları yerine evde pratik ve sağlıklı gıdalar tüketilebilmektedir.

Sıcak hava fritözünün ilk piyasaya sürülmesi Hollandalı şirket Philips tarafından 2010 yılında gerçekleştirilmiştir. Ürünün piyasaya tanıtımı yapılırken geleneksel kızartmaların daha sağlıklı şekilde pişirmek olarak açıklansa da yıllar içerisinde bu ürünler birçok kullanım amacına hizmet eder hale gelmiştir. Daha sonralarda ise kızartmanın yanı sıra hamur işi, sulu yemek, börek, ızgara, közleme vb. dahil olmak üzere çeşitli yiyecek türlerini pişirmek için kullanılmaya başlanmıştır. İngiltere’de 2022 yılında yapılan bir çalışmada son iki yılda ülke genelinde 25 milyondan fazla sıcak hava fritözü satışı gerçekleştiği belirtilmiştir. Yine aynı çalışmada bu pazarın 5 yıl içinde %66 büyümesinin beklendiğine dikkat çekilmiştir (Bal ve Küçüköner, 2023).

Air fryer yiyecek ve yağ damlacıkları arasındaki eşit teması teşvik etmek için ürünlerin etrafında sıcak hava dolaştırılarak pişirme işlemi gerçekleştiren daha hassas pişirmeye izin veren ayarlanabilir sıcaklık ve zamanlayıcı özellikleri olan cihazlar olarak da bilinmektedir. Bu yöntemle pişirme ile genel olarak %80 daha az yağ ile kızartma işleminin gerçekleştirildiği ifade edilmektedir (Boz, 2022). Yağ damlacıklarının sıcak havadaki dağılımı ile kapalı bir

hazne içindeki ürün arasındaki doğrudan temas, hava ile pişirilen yiyecek arasında sabit ısı transfer oranları sağlar (Lee vd., 2020). Sıcak havada kızartma cihazı genel olarak elektrikle çalışır, elektrikli fan, pişirme haznesi, hava yönlendirici ve sıcaklık sensörleri olmak üzere beş ayrı bölümden oluşur (Şekil 2). Isıtıcının üzerindeki büyük elektrikli fan, havayı pişirme haznesinden yukarı doğru çekerek güçlü bir dikey hava akışı oluşturur. Elektrikli ısıtıcıdan geçerken hava ısı enerjisi ile yüklenir ve minimum hız ve enerji kaybı ile pişirme haznesine taşınır. Hava altta bulunan, hava akışını dikey yönde yönlendiren ve ısıyı eşit olarak dağıtan hava yönlendiricisi tarafından yönlendirilir (Arslan vd. 2018; Boz, 2022).



Şekil 2. Sıcak hava fritözünün (air fryer) çalışma prensibinin şematik gösterimi (Arslan vd., 2018)

Air fryer ile hamburger köftelerinin pişirilmesi, tüketiciler tarafından pratiklik ve sağlık açısından tercih edilmektedir. Bu yöntemle hazırlanan köfteler, özellikle yoğun iş temposuna sahip bireyler için hızlı ve sağlıklı bir alternatif sunar. Air fryer ile pişirme süresi ve sıcaklığı, hamburger köftesinin iç sıcaklığı, dış yüzey rengi ve su kaybı gibi kalite özelliklerini etkiler. Air fryer ile pişirilen hamburger köfteleri, daha düşük yağ içeriğiyle daha sağlıklı bir alternatif sunar. Bu yöntemle pişirilen köfteler, geleneksel kızartma yöntemlerine göre daha az kalori ve

doymuş yağ içerir. Uygun pişirme süresi ve sıcaklık kombinasyonu, köftenin hem güvenli hem de lezzetli olmasını sağlar.

Aşağıda pişirme yönteminin gıdalar üzerindeki etkisinin araştırılması üzerine yapılan bazı çalışmalardan özetle bahsedilmiştir.

Hava fritözü ve derin yağda kızartılan tavuk göğsü, but ve kanatlarda Akrilamid ve dörtlü PAH oluşumunu araştıran bir çalışmada; Akrilamid ve PAH'lar sırasıyla yüksek performanslı sıvı kromatografisi-tandem kütle spektrometrisi (HPLC-MS/MS) ve gaz kromatografisi-kütle spektrometrisi (GC-MS) ile analiz edilmiştir. Derin yağda kızartılmış tavuk eti, hava kızartılmış tavuk etine (3,49 µg/kg ve 1,96–2,71 µg/kg) göre daha yüksek akrilamid (6.19 µg/kg) ve toplam PAH (2.64–3.17 µg/kg) içeriğine sahip olduğu bulunmuştur. Tavuk eti parçaları arasında akrilamid içerikleri arasında önemli bir fark gözlenmezken, en yüksek PAH içeriği tavuk kanatlarında bulunduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla, çalışma ile hava kızartmanın derin yağda kızartmaya kıyasla tavuk etinde akrilamid ve PAH oluşumunu azaltabileceğini göstermiştir (Lee vd., 2020).

Hava fritözü ve fırın kullanılarak pişirilen dana köftelerindeki kanserojen olan Benzo[a]piren (BaP) konsantrasyonunu araştıran çalışmada; farklı pişirme koşulları altında, sıcaklıklar (140 °C, 160 °C, 180 °C ve 200 °C), süreler (9, 14 ve 19 dakika) ve yağ eklenip eklenmediği gibi durumlar karşılaştırılmıştır. Ayarlanmış doğrusal regresyon analizi ile, hava fritözünde pişirilen dana etindeki BaP konsantrasyonunun fırında pişirilen dana etinden 22,667 ng/kg (95% CI: 15,984, 29,349) daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Hava fritözü ile ilgili olarak, yağ fırçalama olmadan pişirilen sığır etindeki BaP konsantrasyonu tespit sınırının altında ve yağ fırçalama ile pişirilen sığır etinden önemli ölçüde daha düşük olduğu bildirilmiştir (p<0,001). Bu çalışma ile sığır etini hava fritözünde pişirmek, özellikle yağsız pişirme avantajı nedeniyle BaP konsantrasyonunu etkili bir şekilde azaltabileceği ve hava fritözünün yüksek sıcaklıklarda et hazırlayan kişiler için üstün bir seçenek tespit edilmiştir (Chen vd., 2024).

Kızarmış tilapia derilerinin üç kızartma yöntemi altında fizikokimyasal özelliklerini ve uçucu aromasını araştıran çalışmada; 180 °C'de 6 ve 12 dakika hava fritözünde kızartma (AF6 ve AF12) ve 120 °C'de 8 ve 24 dakika 0,085 MPa'da vakumda kızartma (VF8 ve VF24) gibi alternatif kızartma yöntemleri, tilapia derisi için 180 °C'de 2 ve 8 dakika geleneksel kızartmayla (CF2 ve CF8) karşılaştırmıştır. Kızarmış derinin nem içeriği, su aktivitesi, L* değerleri ve kopma kuvveti gibi fiziksel özellikleri tüm kızartma yöntemleri altında azalırken, lipid

oksidasyonu ve a*, b* değerleri kızartma süresindeki artışla arttığı bildirilmiştir. Ürün içindeki yağ kalitesini, AF ve VF, konjuge dienlerin oluşumunu azalttığı ve oksidasyonu CF ile karşılaştırıldığında geciktirdiği tespit edilmiştir. Katı faz mikroekstraksiyon (SPME) ile gaz kromatografisi kütle spektrometrisi (GC/MS) kullanılarak ölçülen balık derisinin lezzet kompozisyonlarının sonuçları, CF'nin daha yüksek hoş olmayan yağlı koku (nonanal, 2,4-dekadienal, vb.) elde ettiğini, AF'nin ise daha fazla ızgara aroması (pirazin türevleri) sunduğunu bildirmiştir. AF tarafından kızartılan balık derisi sadece sıcak havaya dayandığından, metilpirazin, 2,5-dimetilpirazin ve benzaldehit gibi Maillard reaksiyonundan türetilen bileşikler önde gelen aromalar olduğu tespit edilmiştir. Bu, AF'nin aroma profillerini VF ve CF'den çok farklı hale getirdi. Tüm yaklaşımlar arasında AF ve VF, daha düşük yağ içeriği, hafif yağ oksidasyonu ve daha iyi lezzet özellikleri geliştirdiği bildirilmiştir (Fang vd., 2006).

Kızartma, ızgara, mangalda pişirme, hava fritözü ve kavurma işlemlerinin gıdalardaki PAH (27 farklı) oluşumuna olan etkileri araştırılan çalışmada; pişirme işlemi için kullanılan hammaddelerle yapılan karşılaştırmada, ısı kaynağına olan mesafe, pişirme ortamı ve pişirme koşullardan bağımsız olarak tüm örnek tipleri için PAH konsantrasyonlarında çok az veya hiç artış olmadığını bildirmiştir. Ancak kömür ve odun yongalarıyla mangal yapmak çoğu gıdada benzo[a]piren oluşumuna neden olduğu; sadece dana burgerler için, kömür üzerinde mangal yapmak (odun yongası kullanmadan) en yüksek seviyeleri gösterdiğini tespit etmiştir. Çalışmada mangal ile pişirmede PAH seviyelerinin ısı kaynağına daha yakın yerde arttığını bildirmiştir. Briket üzerinde pişirilen sosisler ve kömür üzerinde pişirilen dana burgerler, dana eti ve somon için, gıda ısı kaynağına daha yakın olduğunda PAH konsantrasyonu daha düşük olduğu görülmüştür (Rose vd., 2015).

Çin'de pazarlanan geleneksel olarak tütülenmiş tavuk ürünlerindeki benzo[a]piren (BaP), krizen (Chr), benzo[a]antrasen (BaA) ve benzo[b]floranten (BbF) olmak üzere dört öncelikli polisiklik aromatik hidrokarbonun (PAH) seviyesini analiz etmek için yürütülen çalışmada; tütülenmiş tavuk ürünlerinin derisinde ve etinde ΣPAH4 miktarının (dört farklı PAH'ın toplamı: BaP, Chr, BaA ve BbF) sırasıyla 30,43-225,17 ve 18,75-129,54 µg/kg olduğunu göstermiştir. Tütülenmiş derideki ΣPAH4 içeriği, tütülenmiş ete kıyasla önemli ölçüde daha yüksek olduğu bildirilmiştir (p <0,05) (Li vd. 2023).

Heterosiklik aminler (HCA'ler), tavuk ve domuz eti gibi etlerin pişirilmesi sırasında oluşan mutajenik ve kanserojen bileşiklerdir. Çalışma farklı pişirme yöntemlerinin (hava fritözü, kızılötesi pişirici, tavada kızartma ve elektrikli fırın) ve baharatların (biberiye, zerdeçal ve

sarımsak) tavuk kanadı ve domuz karnındaki 11 HCA'nın (IQ, MeIQ, MeIQx, 4,8-DiMeIQx, PhIP, AαC, MeAαC, Trp-P-1, Trp-P-2, Harman ve Norharman) oluşumuna etkisi, HPLC ile belirlendi ve pişmiş etlerin fizikokimyasal özellikleri karşılaştırılmıştır. Hava fritözü sıcaklıklarının ve sürelerinin 11 HCA oluşumuna etkisi de incelenmiştir. Et türünden bağımsız olarak, hava fritözünde kızartma, tavada kızartma, elektrikli fırında pişirme ve kızılötesi pişirme ile karşılaştırıldığında, hava fritözünde pişirme en düşük 11 HCA içeriğine neden olduğu tespit edilmiştir. Örneğin, hava fritözünde kızartılan tavuk kanatlarındaki 11 HCA seviyesi 4,35 µg/kg iken, inhibisyon oranı %75,29'du ve tavada kızartılan tavuk kanatlarına (17,61 µg/kg) kıyasla daha düşük olduğu görülmüştür. HCA oluşumu hava fritözü sıcaklıklarına ve sürelerine göre de incelenmiş ve 200 °C'de 20 dakika boyunca hava fritözünde kızartılan tavuk kanadındaki HCA içeriği (2,98 µg/kg), 140 °C'de 50 dakika boyunca hava fritözünde kızartılan tavuk kanadına (1,08 µg/kg) kıyasla 2,8 kat arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, tüm baharatlar HCA oluşumu üzerinde inhibitör etki gösterdiği bildirilmiştir. Bu sonuçlar, hava fritözü ve baharatların etlerin termal hazırlanması sırasında HCA oluşumunu engelleyebileceğini belirtmiştir (Kwon vd., 2023).

Patates kızartmasının kızartılması sırasında akrilamid (AA) ve hidroksimetilfurfural (HMF) oluşumunu azaltmak için derin yağda kızartma, mikrodalgada kızartma, hava fritözü ve vakumlu kızartma işlemleri kullanılan çalışmada; AA ve HMF aralığındaki en yüksek azalma, derin yağda kızartma ve mikrodalgada kızartmaya kıyasla vakumlu kızartmada (%61,42-81,14), ardından hava fritözü ile kızartmada (%59,2-78,7) bulunduğu bildirilmiştir. Vakumlu kızartma ve havada fritözü ile kızartma, patates kızartmasında AA ve HMF içeriğini en aza indirmek için alternatif kızartma teknolojileri olarak kullanılabileceği bildirilmiştir (Verma vd. 2023).

İki ticari hava fritözü ekipmanı ve dört yaygın kızartma yağı (ayçiçeği, soya fasulyesi, kanola ve zeytinyağı) kullanılarak derin kızartma ve havada kızartma ile ilgili karşılaştırma yapılan çalışmada; kızarmış patatesler renk, nem, lipid bileşimi ve bozunma göstergeleri, tokoferoller, toplam askorbik asit, β-karoten, antioksidan aktivite, akrilamid ve duyu analizi açısından karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, hava fritözü kızartma işlemleriyle elde edilen kızarmış patateslerin ortalama %70 daha az yağ sunduğunu ve bunun da 100 g'da 45 kcal'lik bir azalmaya yol açtığını tespit etmiştir. Çoğu kimyasal parametre, akrilamid içeriği de dahil olmak üzere her iki kızartma işleminde de benzer olduğu bildirilmiştir. Bununla birlikte, derin yağda kızartılmış patateslerde ilave edilen yağ daha fazla hasar görerek ve hem p-anisidin hem de polar bileşiklerde önemli

bir artış olduğu görülmüştür. Test edilen iki hava fritözü kızartma ekipmanında gözlemlenen daha az önemli farklılıklara rağmen, lipid oksidasyonu, yağ türünden bağımsız olarak, özellikle Airfryerin, Actifry'den daha yüksek olan p-anisidin olmak üzere ayrımlarına izin verdiği bildirilmiştir (Santos vd. 2017).

Dondurarak kurutma, soteleme, buharda pişirme ve hava fritözü dahil olmak üzere dört farklı ısıtma işlem yöntemi, lahana, brokoli filizi, Brüksel lahanası, kırmızı lahana ve yeşil lahana dahil olmak üzere beş farklı Brassica sebzesi için kullanılmış ve ürünlerin antioksidan özelliklerinin son durumu hakkında karşılaştırma yapılan çalışmada; toplam fenolik içerik (TPC), toplam flavonoid içerik (TFC) ve antioksidan aktiviteler, radikal temizleme aktivitesi (DPPH ve ABTS•+), indirgeyici güç (FRAP) ve metal iyonlarının şelat oluşturma yeteneği kullanılarak değerlendirilmiştir. Test edilen yöntemler arasında, 160 °C'de 10 dakika boyunca hava fritözünde pişirme, Brassica sebzelerinin en yüksek TPC, TFC ve antioksidan aktivitesini gösterirken, sotelemenin en düşük aktiviteyi gösterdiği bildirilmiştir. Sonuçlar TPC, TFC ve antioksidan aktivite arasında güçlü bir korelasyon olduğunu göstermiştir ($p < 0,05$). Bu çalışma, hava fritözünün Brassica sebzelerindeki biyomolekülleri iyileştirmek için sürdürülebilir bir termal işleme yöntemi olarak kullanılabileceğini göstermiştir (Nandasiri vd. 2023).

Meksika'da pazarlanan bir markanın dondurulmuş patatesleri, kanola yağı ile geleneksel kızartma ve hava fritözünde kızartılmaya tabi tutularak karşılaştırılan çalışmada; SEM ile uzaklaştırılan nem içeriğindeki değişim, su aktivitesi, renk profili, sertlik, kırılabilirlik ve yüzey hasarı, MDSC ile termal analiz ve FTIR-ATR spektroskopisi ile kimyasal analiz yoluyla değerlendirilmiştir. Hava fritözünde kızartılan patates kızartmalarının, geleneksel olarak kızartılana kıyasla yaklaşık %48 daha az nem, daha az algılanabilir renk değişimi ve daha az yüzey hasarı içerdiği ve daha iyi çıtırılığa dönüştüğünü tespit etmiştir. Ayrıca kimyasal düzeydeki değişimlerin daha küçük olduğu, bunun da esas olarak kanola yağının bulunmamasından kaynaklandığı ve termal geçişlerin sıcaklık ve entalpiler açısından daha kararlı olduğu bulunmuş, bu da hava fritözünün, bazı kalite özelliklerinden ödün vermeden pazardaki çeşitliliğin artırılmasına olanak tanıyan yeni kızarmış ürünler geliştirmek için iyi bir alternatif olduğunu bildirmiştir (Hernández vd. 2023).

3. YÖNTEM

3.1. Cihazlar ve Kullanılan Kimyasallar

Kullanılan cihazlar analiz metotlarının açıklandığı bölümde yer verilmiştir. Kullanılan kimyasallar analitik saflıkta olup, Merck ve Aldrich Sigma firmaları tarafından üretilmişlerdir.

3.2. Metot

Her bir PAH bileşiği için marka ve pişirme yöntemlerinin etkisini değerlendirmek amacıyla iki faktörlü varyans analizi (iki yönlü ANOVA) uygulanmıştır. Marka ve pişirme tekniği sabit faktörler olarak kabul edilmiştir. Anlamlı farkların belirlenmesi için Tukey HSD çoklu karşılaştırma testi ($p < 0,05$) kullanılmıştır.

Sonuçlar, her marka-pişirme yöntemi kombinasyonu için ortalama $\pm$ standart sapma şeklinde tablo halinde sunulmuştur. Satır içindeki büyük harfler, aynı marka için pişirme yöntemleri arasındaki istatistiksel farkları, sütun içindeki küçük harfler ise aynı pişirme yöntemi için markalar arasındaki farkları göstermektedir. Aynı harfi paylaşan değerler arasında anlamlı fark bulunmamaktadır ($p < 0,05$).

3.2.1. Hamburger köftelerinin pişirilmesi

Hamburger köfteleri yerel marketlerden 5 farklı markadan hazır donuk hamburger köftesi olarak temin edildi. Köfteler soğuk zincir prensipleri dikkate alınarak analizlerde kullanıldı. Köfteler ızgara, tava ve air fryer (Şekil 3) olmak üzere 3 farklı pişirme yöntemiyle pişirildi. Tablo 4’ de pişirme koşulları verilmiştir.

Tablo 4. Pişirme koşulları

<i>Pişirme yöntemi</i>	<i>Süre (dk)</i>	<i>Pişirme koşulları</i>
Air fryer	8 dk	180 °C
Izgara	3 dk	İç sıcaklık 72 °C
Tava	3 dk	İç sıcaklık 72 °C



Şekil 3. Hamburger köftelerinin pişirilmesi işleminin yapıldığı Air fryer cihazı

Her köfte numunesinden aynı pişirme yöntemi 2 tekrarlı uygulandı. Pişirme işlemi tüm örnekler için eşit sürelerde olmasına dikkat edildi. Tablo 5’ de hamburger köfte markalarına ait kodlamalar verilmiştir. Pişirilen köfte örnekleri HPLC’de PAH analizleri yapılmak üzere - 18 °C’de muhafaza edildi.

Tablo 5. Pişirme işlemi uygulanan hamburger köfte örneklerine ait kodlamalar

Pişirme yöntemleri			
Numune Kodu	Izgara	Tava	Airfryer
XA	XA 1	XA 2	XA 3
XB	XB 1	XB 2	XB 3
XC	XC 1	XC 2	XC 3
XD	XD 1	XD 2	XD 3
XE	XE 1	XE 2	XE 3

3.2.2. Pişirme kaybı analizi

Pişirme kaybı için çiğ hamburger köftesi numuneleri tartıldı. Tartılan köfteler 3 farklı pişirme yöntemiyle her iki tarafı pişirilerek son tartımları yapıldı. Pişirme işlemleri 2 tekrarlı yapıldı. Pişirme kaybı, köftelerin pişirilme öncesi ve pişirildikten sonra meydana gelen ağırlık kaybından % olarak belirlenmiştir (Scheeder vd., 2001).

$$\text{Pişirme Kaybı (\%)} = (\text{Pişmiş köftenin ağırlığı} / \text{Çiğ köftenin ağırlığı}) \times 100$$

3.2.3. Nem miktarı tayini

Nem miktarı tayini için 4-5 g köfte örneği, sabit tartıma getirilmiş alüminyum kurutma kaplarına tartılarak 105 °C’de, nemi tamamen uzaklaşana dek, yaklaşık 18 saat kurutuldu. Örneklerin nem miktarları, kurutma öncesi ve sonrası örnek ağırlıkları arasındaki farkın örnek bölümünün 100 ile çarpımı ile hesaplanmıştır.

$$\text{Nem (\%)} = (B-A) / m \cdot 100$$

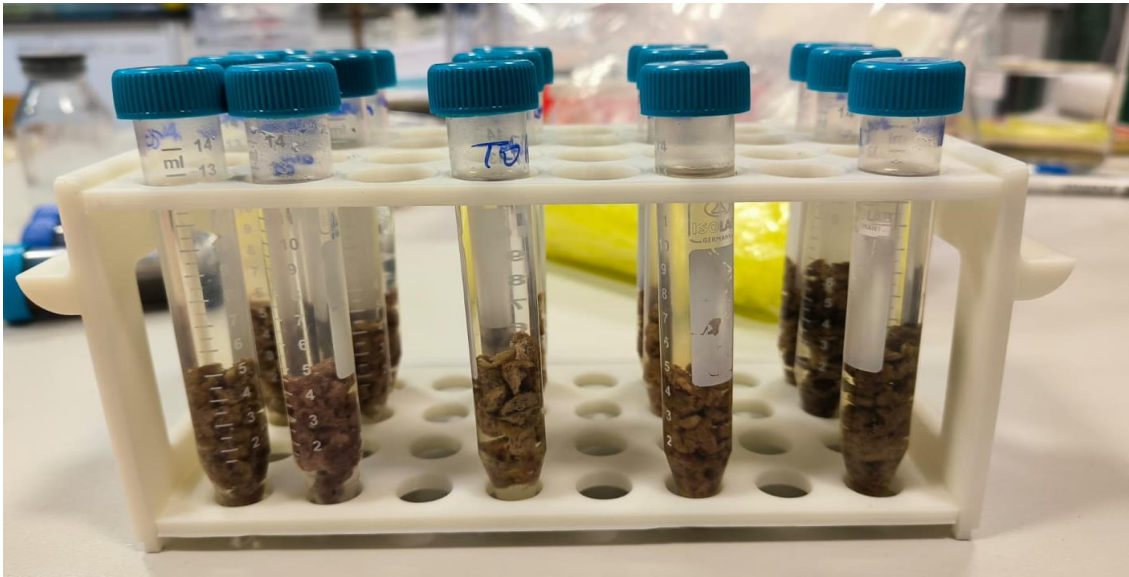
A: İlk tartım

B: Son tartım

m: Analizde kullanılan numunenin kütlesi

3.2.4. TBARS tayini

TBARS analizi için TCA, EDTA, askorbik asit, saf su kullanıldı. Hamburger köftelerinin 2-tiyobarbitürik asit reaktif bileşikleri (TBARS) değerlerini belirlemek için, homojen hale getirilen köfte örneklerinden 2 g tartıldı üzerine 12 ml TCA (%7,5 TCA, %0.01 EDTA, %0,1 askorbik asit) çözeltisi katıldı (Şekil 4) ve homojenizer (HG-15A WiseTis, Kore) yardımıyla parçalandı (Şekil 5). Sonra filtre kâğıdı yardımıyla süzüldü. Süzüntü ve TBA 1:1 oranında tüplerde karıştırıldı. Bu karışım su banyosunda 90 °C’de 40 dk bekletildi. Su banyosundan çıkarılan numunelerin (Şekil 6) berrak kısmı alınarak Elisa okuyucu (Biotek Epoch Reader) kuyucuklarına konuldu ve 532 nm dalga boyunda okuma yapıldı (Şekil 7). Örneklerin TBARS değerleri $\mu\text{mol MAD/kg et}$ olarak hesaplanmıştır.



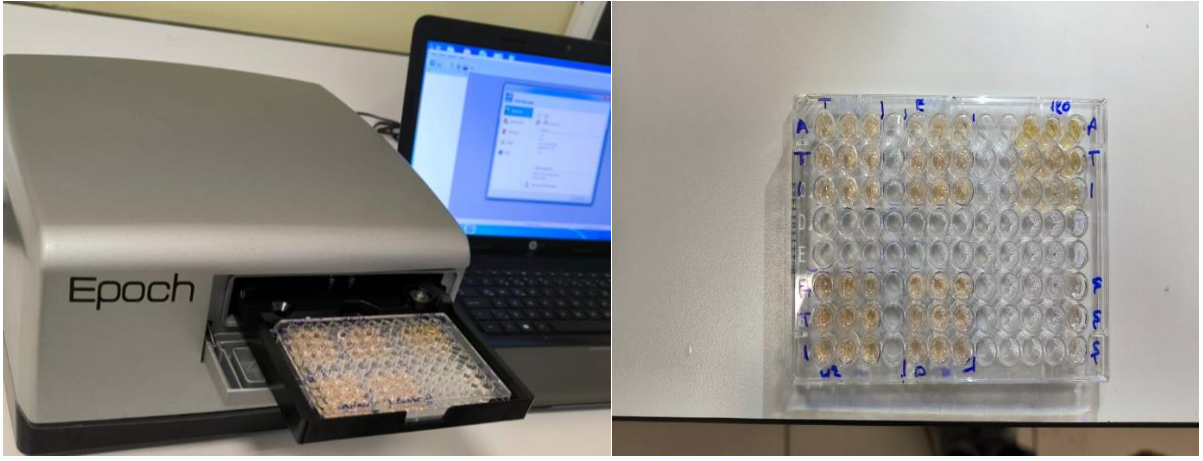
Şekil 4. TCA solüsyonu eklenmiş köfte karışımı



Şekil 5. TCA ile hazırlanan köfte numunelerinin homojenize edilmesi



Şekil 6. Su banyosundan çıkarılan numuneler



Şekil 7. Numunelerin Elisa okuyucu ile okunması

3.2.5. Yağ tayini

Hamburger köftelerinin yağ içeriği Soxhlet ekstraksiyon yöntemi kullanılarak belirlendi. Köfte örneklerinden 3 gr numune kartuş içerisine tartıldı. Kartuşa konulan numune içindeki yağ hekzan ile ayrıldı. Hekzanın (Sigma Aldrich) tamamen uçması için evaporasyonda evapore edildi (Şekil 8). Balonda kalan yağ tartıldı. Balonun darası çıkarılarak yağ oranı hesaplandı.



Şekil 8. Soxhlet ekstraksiyon yöntemi ile yağın ayrılması ve çözücünün evaporasyonda uçurulması işlemi

3.2.6. Protein tayini

Köfte örnek gruplarının protein miktarını belirlemek için, Kjeldahl yönteminden yararlanıldı. Laboratuvar şartları uygun olmadığından protein analizi Erzincan İl Kontrol Laboratuvar Müdürlüğü'nde yaptırıldı.

3.2.7. Kül miktarı tayini

Köfte örneklerinden yaklaşık 3 g alınarak darası alınan porselen krozelere tartıldı ve 550 °C'de 4 saat kül fırınında (Protherm, Mos-B 160/1) yakıldı (Şekil 9). Sonra toplam kül miktarları (%) belirlenmiştir.



Şekil 9. Numunelerin kül fırınında yakılması

3.2.8. pH tayini

Köftelerinin pH değerleri 1/10 oranında köfte/su karışımı homojenize edildikten sonra pH 4.01 ve 7.00 tampon çözeltileri ile kalibre edilen dijital pH-metre (Hanna, HI2002-02, USA) (Şekil 10) ile doğrudan ölçüldü (Gökalp, 1993).



Şekil 10. Numunelerin pH metre ile ölçümlerinin yapılması

3.2.9. Köfte numunelerinden PAH ekstraksiyonu

PAH ekstraksiyonu için öncelikle gerekli çözeltiler hazırlandı. Bunun için;

Çözelti 1: %60-40 ACN-Aseton karışımı hazırlandı.

Çözelti 2: %80-20 ACN-Aseton karışımı hazırlandı.

2 gr köfte numunesi tartıldı ve 50 mL falcon tüpüne alındı. Üzerine 10 mL çözelti bir eklendi. 30 sn vortekslendi ve 4500 rpm de 10 dk santrifüjlendi. Sonra üst kısımda kalan berrak sıvıdan 5 ml alınarak kartuşlara konuldu.

3.2.10. Örneklerin kartuşlarda temizlenmesi

Kartuşun şartlandırılması işlemi, sırasıyla 20 mL metanol ve 20 mL asetonitril ile yıkandı. Akışın kendiliğinden olmasına izin verildi.

- Kartuşun altına 15 mL'lik falcon tüpü konuldu.
- Çözelti 1 ile ekstrakte edilen numunenin 5 mL'si kartuştan geçirildi (Şekil 11).
- Akış durduktan sonra 10 mL çözelti 2 eklendi ve tamamen akması bekledi.
- 15 mL'lik falcon tüpünde toplanan solventin uzaklaştırılması için çeker ocak altında 1 gece bekletildi (Şekil 12).
- Falcon tüpündeki kuru analit 1 ml ACN ile tekrar çözüldü.
- 0.22 µm çaplı filtreden süzülerek viale alındı ve HPLC cihazında analize hazır hale getirildi.



Şekil 11. Kartuşlardan numunenin süzülmesi



Şekil 12. Kartuşlardaki metanol ve asetonitrilin çeker ocak altında uzaklaştırılması

3.2.11. HPLC ile ekstrakte edilen PAH'ların analizi

Çalışmada laboratuvarında PAH analizlerinde kullanılan alet, ekipman ve cihazlar; Thermo Scientific Dionex Ultimate 3000 model HPLC cihazı, Dionex C18 kolonu (4,6 x 150 mm, 3 μ m), Thermo Scientific Dionex Ultimate 3000 UV dedektör, hassas terazi (0,1 mg hassasiyette), pistonlu Pipetler (10 μ L-100 μ L, 100 μ L-1000 μ L, 1000 μ L- 5000 μ L), vial (2mL'lik), enjektör, enjektör filtresi (0.22 μ m çaplı), falcon tüpler (15 mL'lik), vortex, balon joje (10 mL) ve mezür (250 mL). Laboratuvarında PAH analizlerinde kullanılan kimyasallar;

Asetonitril (HPLC grade), metanol, aseton, bond elut SPE kartuş, PAH karışımı standart çözeltisi ve saf su.

3.2.11.1. Kalibrasyon

PAH karışımı standardı olarak Supelco PAH Calibration Mix CRM 47940 (Merck) kullanılmıştır. 10 µg/mL konsantrasyona sahip olan ve 16'lı mix halinde bulunan standart çözeltisinden; 1, 0.75, 0.50, 0.25, 0.125, 0.0625 ve 0.00315 µg/mL olmak üzere farklı derişimler hazırlanarak 7 noktalı kalibrasyon eğrisi çizilmiştir. Standard içindeki her PAH bileşeni için alıkonma süreleri belirlenerek pikler tanımlanmış, kalibrasyon eğrileri çizilerek denklemleri bulunmuş ve R^2 değerleri hesaplanmıştır. Çalışmada tespit edilen PAH16 bileşiklerine ait tespit limiti (LOD), tayin limiti (LOQ), R^2 (regresyon katsayısı) ve geri kazanım (%) değerleri Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. PAH bileşiklerinin kalibrasyon verileri

	A	b	R^2	LOQ (µg/kg)	LOD (µg/kg)	% Geri Kazanım
Napthalene	1,4493	0,0035	0,9987	0,125070687	0,041273327	90-110
Acenaphtylene	6,5101	0,0444	0,9999	0,141607372	0,046730433	90-110
Acenaphthene	1,7998	0,0439	0,9999	0,037711206	0,012444698	90-110
Fluorene	5,6521	0,0175	0,9995	0,382231515	0,1261364	90-110
Phenanthrene	1,1037	0,0162	0,9982	0,13742923	0,045351646	90-110
Anthracene	1,8918	0,0027	0,9991	0,16107065	0,053153315	90-110
Flouranthene	3,7977	0,0327	0,9997	0,193966188	0,064008842	90-110
Pyrene	3,8099	0,0071	1	0,048763147	0,016091838	90-110
Benzo[a]anthracene+	4,8097	0,0302	0,9998	0,210673805	0,069522356	90-110
Chrysene						
Benzo[b]flouranthene	7,2773	0,0681	0,9999	0,231161835	0,076283406	90-110
+ benzo[k]flouranthene						
Benzo[a]pyrene	3,9307	0,0357	0,9996	0,233192005	0,076953362	90-110
Dibenz[a,h]athracene	1,6615	0,0372	0,999	0,156481249	0,051638812	90-110
Indeno[1,2,3-cd]pyrene	0,5385	0,0027	0,9891	0,360267923	0,118888415	90-110

* LOD (Limit of detection): Tespit limiti *LOQ (Limit of quantification): Tayin limiti

PAH bileşenleri arasında benzo[b]fluoranthene ve benzo[k]fluoranthene pikleri birleşik geldiği için örneklerdeki miktarları ikisinin toplamı olarak verilmiştir. Aynı şekilde benzo[a]anthracene ve chrysene pikleri de çakıştığı için örneklerdeki miktarları toplam olarak verilmiştir. 16'lı karışımın içindeki bileşenler; Acenaphthene, Acenaphthylene, Anthracene, Benz[a]anthracene, Benzo[a]pyrene, Benzo[b]fluoranthene, Benzo[ghi]perylene,

Benzo[k]fluoranthene, Chrysene, Dibenzo[a,h]anthracene, Fluoranthene, Fluorene, Indeno[1,2,3-cd] pyrene, Naphthalene, Pyrene ve Phenanthrene şeklindedir.

3.2.11.2. PAH standartlarının HPLC’de analizi

HPLC çalışma koşulları; 1 mL/dk akış hızında, 20 µL enjeksiyon hacmi ile 230 nm-250 nm dalga boyunda UV dedektör ile çalışıldı. 25 °C’de sabit faz olarak Dionex C18 kolonu (4,6 x 150 mm, 3 µm) kolonu kullanıldı. Çalışmada mobil faz olarak asetonitril-su karışımı uygulandı. HPLC’de PAH bileşiklerinin analizi gradient koşullar altında yapıldı. Tablo 7’de gradient koşulları verilmiştir.

Tablo 7. HPLC gradient koşulları

Dakika	% A	% B
0-2	50	50
2-16	0	100
16-20	0	100
20-24	50	50

4. BULGULAR

Araştırma sonucu saptanan verilerin istatistiksel değerlendirilmesi, SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) 29.0.2.0 istatistik paket programı kullanılarak yapılmıştır. Verilerin istatistiksel analizinde tek yönlü ANOVA (One-Way ANOVA) testi kullanılmıştır. Gruplar arası farklılıkların tespiti ise Duncan testi ile saptanmıştır. Sonuçların istatistiksel olarak anlamlılığının belirlenmesinde ise $p<0,05$ anlamlılık düzeyi esas alınmıştır.

4.1. Hamburger Köfte Örneklerinin İçerikleri

Örneklerin ambalajları üzerinde belirtilmiş olan içindekiler tablosu aşağıda verilmiştir. Tablo 8’de görüldüğü gibi farklı markalara ait hamburger köfte örneklerinin içeriklerindeki protein, doymuş yağ, karbonhidrat, şeker, tuz ve lif miktarları farklılık göstermektedir.

Tablo 8. Hamburger köfte markalarının içindekiler tablosu

Markalar	Protein	Doymuş Yağ	Karbonhidrat	Şeker	Tuz	Lif
XA	13,9	12	8,5	0	2	Miktar belirtilmemiş
XB	13	11	5	0,6	1,6	-
XC	17	8,6	1,4	1,3	1	0,7
XD	13,5	12,4	4,8	0	1,4	-
XE	10	12	5	0	2	Miktar belirtilmemiş

Piyasadan temin edilen köfte örneklerinde yapılmış olan pH, kül, yağ, nem, protein ve kuru madde analizi sonuçları Tablo 9’da verilmiştir.

Tablo 9. Hamburger köftelerinin içerik analizi

Numune	pH Değeri	% Kül	% Ham Yağ	% Ham Protein	% Nem	Kuru Madde (%)
XA	6,99±0,02 ^a	5,96±0,30 ^a	32,88±2,51 ^a	13,07±0,08 ^c	42,39±1,06 ^b	57,61±1,06 ^b
XD	6,67±0,05 ^b	5,05±0,06 ^b	22,88±2,92 ^b	13,11±0,11 ^c	41,81±0,91 ^b	58,19±0,09 ^b
XC	6,41±0,03 ^d	5,41±0,09 ^{ab}	17,02±0,41 ^c	17,25±0,07 ^a	33,32±0,06 ^c	66,68±0,06 ^a
XB	6,49±0,03 ^c	6,00±0,40 ^a	16,37±0,55 ^c	14,27±0,12 ^b	46,18±0,52 ^a	53,82±0,52 ^c
XE	6,43±0,01 ^d	5,89±0,25 ^a	12,69±2,36 ^c	10,40±0,05 ^d	42,40±0,06 ^b	57,60±1,04 ^b

*Değerler ortalama±standart sapmadır. Aynı sütunda farklı küçük harfler ile gösterilen üst simgelerle takip edilen ortalamalar, istatistiksel olarak önemli ölçüde farklıdır ($p<0,05$)

4.2. Nem Miktarı Tayini Sonuçları

5 farklı ticari markaya ait hamburger köftesi örneklerinin % nem içeriklerine ait sonuçlar Tablo 9'da verilmiştir. Örnekler içinde nem içeriği en düşük %33,31 ile XC numunesi ve en yüksek %46,18 ile XB numunesi olmuştur. Hamburger köftelerine ait nem değerleri incelendiğinde, lif miktarı arttıkça nem değeri de artmaktadır. Hamburger köftelerinde lif kullanımı üzerine yapılan tez çalışmasında limon lifi ilave edilmemiş gruba ait nem değeri ortalama %52,73 iken, %6 limon lifi ilave edilmiş gruba ait nem değeri %63,77'e çıkmıştır. Yani ilave edilen limon lifi miktarı arttıkça pişirme sırasında üründen uzaklaşacak su miktarının da azaldığı belirtilmiş (Salman, 2012). Hamburger köftesinin kimyasal özellikleri üzerine yapılan bir çalışmada nem içeriklerinin sırasıyla %40,50 ve %60,25 arasında değişim gösterdiği, ortalama nem içeriğinin ise %51,46 olduğu rapor edilmiştir (İçöz ve Kayışoğlu, 2012). Bu değer, TS 10581'e göre hamburger standardında belirtilen en çok %65 nem değeri ile uyumludur.

4.3. pH Değeri Sonuçları

Çalışma kapsamında hazır hamburger köftelerin pH değerleri Tablo 9'da sunulmuştur. Hazır alınan tüm hamburger köfte örneklerinin pH değerinin 6,4-6,9 arasında olduğu belirlenmiştir. Tabloda gösterilen veriler incelendiğinde, XC ve XE örneklerine ait köftelerin pH değerleri en düşük değerler olup aralarında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık yoktur. XA, XB ve XD markalarına ait köftelerin pH değerleri arasındaki farklılık istatistiksel olarak anlamlıdır. En yüksek pH değeri ise 6,99 ile XA örneğinde ölçülmüştür ($p < 0,05$).

4.4. Yağ Tayini Sonuçları

Örneklerin % yağ içeriklerine ait sonuçlar Tablo 9'da verilmiştir. Hamburger köftesi örneklerinin yağ miktarlarının %11,02 ile %34,64 arasında değiştiği ve ortalama %20,94 olduğu tespit edilmiştir. TS 10580 Köfte (Pişmemiş) Standardına (Anonim, 2010) göre köftelerde en fazla % 25 yağ bulunabileceği belirtilmiştir. Sonuçlara göre XD marka hamburger köftesi hariç diğer köfte örnekleri belirlenen sınır değerlere uygundur. Bir başka çalışma hamburger köftelerinin ortalama yağ oranını %17,45 olarak bulmuştur (İçöz ve Kayışoğlu, 2012).

4.5. Protein Analiz Sonuçları

5 farklı köfte örneklerine ait % protein analiz sonuçları Tablo 9’da verilmiştir. Örneklerin protein içeriklerinin %10,39 ile %17,25 arasında değişim gösterdiği tespit edilmiştir. XE numunesine ait % protein oranı TS 10581’de belirtilen %12 oranının altında kalmıştır. Diğer numuneler belirtilen oranın üstündedir. İçöz ve Kayışoğlu (2012) çalışmalarında hamburger köftesinin ortalama protein içeriğini %12,10 olarak belirlemiştir (İçöz ve Kayışoğlu, 2012). Başka bir çalışma marketlerde ve kasap dükkânlarında satışa sunulan farklı köfte örneklerinin ortalama protein miktarlarını sırasıyla %14,80, %16,76, %16,69, %16,47 ve %13,95 olarak belirlemiştir (Soyutemiz, 2000). Bir diğer çalışma Tokat ili merkezinde satışa sunulan tüketime hazır dana hamburger köfte örneklerinin %12,56 ile %25,26 arasında protein içerdiğini tespit etmiştir (Çimen ve Çiçek, 2021).

4.6. Kül Miktarı Tayini Sonuçları

Hamburger köfte örneklerinin % kül içeriklerine ait sonuçlar Tablo 9’da gösterilmiştir. Pişmemiş Köfte Standardı TS 10580’de (Anonim, 2010) köftelerde bulunabilecek kül miktarı ile ilgili herhangi bir sınırlandırma bulunmamaktadır. Markalara ait kül değerleri istatistiksel olarak değerlendirilmiştir.

Hamburger köftesi örneklerinin kül içerikleri %5,04 ile %6,00 arasında olduğu tespit edilmiştir. Tabloya göre markalar arası kül oranlarında anlamlı fark olmadığı tespit edilmiştir. Bir tez çalışmasında hazırladığı köftelerin kül içeriklerini pişmemiş örneklerde %2,36 ve pişmiş örneklerde %2,88 olarak ölçmüştür (Çelik, 2012). Akçaabat köftesi üzerine yapılan bir tez çalışmasında kül oranları %1,12 ile %2,37 arasında olduğu tespit edilmiştir (Bostan, 2021). Köfte örneklerinin kül oranları literatürdeki çalışmalara kıyaslandığında daha yüksek tespit edildi. Aradaki farklılık köfte hamuruna ilave edilen tuz ve diğer bağlayıcı maddelerin miktarları arasındaki farklılık göstermesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

4.7. Pişirme Kaybı Sonuçları

Örneklerin % pişme kaybı içeriklerine ait sonuçlar ve istatistiki değerlendirmesi Tablo 15’ de verilmiştir. 5 farklıörneğin pişirme kaybı içeriklerinin %9,48 ile %45,33 arasında değişim gösterdiği tespit edilmiştir. Pişirme kaybı sonuçlarına göre, örnek çeşidinin ve pişirme yönteminin pişirme kaybı üzerine etkili olduğu tespit edilmiştir ($p<0.05$). Tablo 10’a göre en düşük % pişme kaybı, ızgara ile pişirilen XA örneğinde 9,48 olarak tespit edilirken; en yüksek % pişirme kaybı ise ızgara ile pişirilen XB örneğinde 45,33 olarak tespit edilmiştir.

Tablo 10. Hamburger köfte numunelerinin % pişirme kaybı sonuçları

Markalar	Izgara	Tava	Airfryer
XA	9,49±1,63 ^{cB}	12,70±0,48 ^{cA}	13,84±0,28 ^{cA}
XD	41,45±4,23 ^{aA}	27,08±2,95 ^{bB}	32,86±4,03 ^{bAB}
XC	20,70±6,09 ^{bB}	29,40±2,47 ^{bAB}	33,07±0,37 ^{bA}
XB	45,33±0,18 ^{aA}	39,36±0,91 ^{aB}	39,44±0,79 ^{abB}
XE	39,57±0,61 ^{aA}	37,05±1,48 ^{aA}	41,45±4,23 ^{aA}

*Değerler ortalama±standart sapmadır. Aynı sütunda farklı küçük harfler ile gösterilen üst simgelerle takip edilen ortalamalar, istatistiksel olarak önemli ölçüde farklıdır ($p<0,05$), aynı satırda farklı büyük harfler ile gösterilen üst simgelerle takip edilen ortalamalar istatistiksel olarak önemli ölçüde farklıdır ($p<0,05$)

Air fryer yöntemi ile pişirilen köftelerde en düşük pişirme kaybı XA örneğinde, tava yöntemi ile pişirilen örneklerde XA örneklerinde, ızgara yöntemi ile pişirilen örneklerde ise XA örneğinde tespit edilmiştir. XA örneğinde air fryer ve tava yöntemleri ile pişirme ızgara ile pişirmeden daha yüksek pişirme kaybına neden olmuştur. XC örneğinde en yüksek pişirme kaybı air fryer yönteminde, en düşük kayıp ise ızgara yönteminde tespit edilmiştir. XB ve XD örneklerinde en düşük kayıp sırasıyla air fryer ve tava yönteminde tespit edilmiştir. XE örneğinde ise en yüksek kayıp air fryer yönteminde en düşük kayıp ise tava ile pişirme yönteminde tespit edilmiştir.

Bütün tablo incelendiğinde XA örneği üç pişirme yönteminde de en az pişirme kaybına uğrayan örnek olmuştur. Pişirme kaybı verileri ile köftelerde kullanılan bağlayıcılar ve yağ oranları arasında bir ilişki vardır. Hamburger köftelerinde kullanılan lif, ekmek, galeta unu gibi maddelerin pişirme kaybına doğrudan etkisi söz konusudur. Köftelerde bu maddelerin bulunması pişirme kaybını azaltıcı etki gösterir. Hamburger köftelerinin etiket bilgilerinde verilmiş olan içerik tablosuna bakıldığında (Tablo 9) XA örneği en yüksek ikinci karbonhidrat miktarına sahip olduğu ve lif içerdiği görülmekte iken; XB örneğinin karbonhidrat miktarının düşük olduğu ve lif içermediği görülmektedir. Bu bilgiler XA örneğinin düşük pişirme kaybına uğramasını ve XB örneğinde yüksek pişirme kaybının tespit edilmesi arasında ilişki olduğunu göstermektedir. Yine tabloya göre lif oranı belirtilen XC markası da düşük pişirme kaybı sergilemiştir. Köftelerde lif ilavesinin pişirme kayıplarını azaltma eğiliminin sebebi, su ve yağ tutma kapasitesinin yüksek olmasıdır. Lif kullanımının pişirme kaybı üzerine etkisini araştıran bir çalışma, farklı oranlarda bezelye lifi kullanılan hamburgerlerdeki pişirme kaybı değerlerine baktıklarında, kontrol grubunda meydana gelen pişirme kayıplarının, lif ilaveli gruplarda

meydana gelen pişirme kayıplarından daha yüksek olduğunu tespit etmiştir (Anderson and Berry, 2001).

Hamburger köftelerinde lif kullanımını araştıran bir çalışmada köfteye ilave edilen limon lifi miktarı arttıkça pişirme sırasında üründen uzaklaşan su miktarının da azaldığı rapor edilmiştir (Salman, 2012). Farklı pişirme tekniklerinin kıyaslandığı bir çalışmada, en yüksek pişirme kaybının %42,60 ile mikrodalga ile pişirmede, en düşük kaybın %33,93 ile ızgara ile pişirmede tespit edildiği bildirilmiştir (Şimşek, 2020). Yapılan başka bir çalışmada köftelerin pişirme kaybı değerleri %19.0 ile %42.6 arasında belirlemişlerdir (Galanakis vd. 2010). Elde ettiğimiz sonuçlar daha önce literatürde yapılan çalışmalarla kıyaslandığında benzerlik göstermektedir. Pişirme kayıplarının oluşmasında köfte çeşitlerinin farklılığı yanında, üretimde kullanılan yağ ve bağlayıcı madde miktarlarının, pişirme sıcaklık ve sürelerinin etkili olduğu düşünülmektedir. Air fryer ile pişirme tekniğinde ısıнын homojen bir şekilde et içerisine transfer edildiği ve sıcaklığın içeriden dışarıya doğru iletilmesinden dolayı daha fazla pişirme kaybına neden olabileceği düşünülmektedir.

4.8. TBARS Tayini Sonuçları

Lipid oksidasyonu, et ve et ürünlerinin kalitesini ve kabul edilebilirliğini sınırlayan en önemli faktörlerden biridir. Lipid oksidasyonu genellikle çoklu doymamış yağ asitlerinin parçalanmasını ve karboniller ve hidrokarbon bileşikler de dahil olmak üzere ikincil ayrışma ürünlerinin üretimini içerir; bu süreçler renk, aroma, lezzet ve dokuda değişikliklere neden olur. Etteki malondialdehit (MDA) içeriğini lipid oksidasyonunun bir belirteci olarak değerlendirmek için birçok yöntem önerilmiştir. Kromotografik yöntemler, malondialdehit tespitinde daha iyi özgüllük ve hassasiyet sunar. Ancak, büyük örneklerin rutin analizleri sırasında basitlikleri ve düşük maliyetleri nedeniyle spektrofotometrik yöntemler tercih edilir ve tiyobarbitürik asit (TBA) testi, malondialdehit tayini yoluyla lipid oksidasyon ürünlerini ölçmek için kullanılan en yaygın yöntemdir (Grotta vd.2017). TBARS testi kullanılarak değerlendirilen etin oksidatif durumu, çeşitli faktörlere bağlı olarak büyük ölçüde değişiklik gösterir ve bu nedenle diğer çalışmalarla karşılaştırılamaz.

Tablo 11’de 5 farklı markaya ait hamburger köftelerin, farklı pişirme teknikleri ile pişirilmesi sonucu elde edilen TBARS sonuçları gösterilmektedir. Pişmiş hamburger köfte örneklerinde TBARS değerleri ortalaması ızgara örneklerinde 0.051 $\mu\text{mol MA/kg}$, tava örneklerinde 0.067 $\mu\text{mol MA/kg}$ ve airfryer örneklerinde 0.069 $\mu\text{mol MA/kg}$ olarak belirlenmiştir.

Tablo 11. Hamburger köfte örneklerinin TBARS değerleri (μmol MA/kg)

Marka	Pişirme Tekniği		
	Airfry	Tava	Izgara
XA	1,275±0,06 ^{bA}	1,307±0,01 ^{abA}	1,076±0,02 ^{bB}
XC	1,381±0,02 ^{bAB}	1,498±0,10 ^{aA}	1,303±0,02 ^{aB}
XD	0,979±0,05 ^{cB}	1,178±0,02 ^{bA}	1,199±0,02 ^{abA}
XB	1,287±0,11 ^{bA}	1,050±0,07 ^{bB}	1,131±0,03 ^{abB}
XE	1,778±0,17 ^{aB}	1,578±0,30 ^{aAB}	1,295±0,19 ^{aA}

*Değerler ortalama±standart sapmadır. Aynı sütun ve satırdaki farklı küçük harfler ile gösterilen üst simgelerle takip edilen ortalamalar, istatistiksel olarak önemli ölçüde farklıdır ($p<0,05$), aynı sütun ve satırdaki benzer harfler ile gösterilen üst simgelerle takip edilen ortalamalar istatistiksel olarak anlamlı farklılık olmadığını göstermektedir ($p>0,05$)

En düşük TBARS değeri ortalaması ızgara yöntemi ile pişirilen köftelerde tespit edilmiştir. En yüksek değerler ise air fryerde gözlemlenmiştir. Bunun nedeni air fryerde pişirmenin süresi ve pişirme sıcaklığı diğer pişirme yöntemlerine kıyasla yüksek olduğu düşünülmektedir. Tablo 16'deki verilere göre air fryer ve tava ile pişirilen köftelerin TBARS değerleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık olmadığı ($p>0,05$), ızgara ile pişirilen köftelerin ise air fryer ve tava ile pişirilen örneklerin TBARS değerlerinden istatistiksel olarak farklı olduğu ($p<0,05$) gözlenmektedir. Yine farklı teknikler ile pişirilen XD ve XB markalarına sahip köftelerin TBARS değerleri arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılık yokken ($p>0,05$), diğer markalara ait köfterin TBARS değerleri arasındaki farklılık istatistiksel olarak anlamlıdır ($p<0,05$). En düşük TBARS değeri air fryer ile pişirilen XD markasına ait köftede tespit edilirken en yüksek değer ise yine air fryer ile pişirilen XE markasına ait köftede tespit edilmiştir.

4.9. HPLC ile PAH Analizi Sonuçları

PAH analizlerine ait sonuçlar her PAH bileşiği için ayrı olarak verilmiştir. PAH sonuçları tüm pişirme gruplarında farklılık göstermiştir. Köfte örneklerine ait PAH sonuçlarının kromatogramı Ek Şekil 1'de verilmiştir. Kullanılan pişirme yöntemlerinde tava ve ızgarada pişirme için yüzey sıcaklığı ve hamburger köfte örneklerinin pişirme süresi dikkate alınmayıp iç sıcaklığın 72 °C olmasına dikkat edilmiştir. Air fryer ile pişirme yönteminde hamburger köfteleri 180 °C'de 8 dk pişirme koşulu uygulanmıştır.

Pişirme yöntemleri içerisinde tava ile pişirmedeki PAH konsantrasyonları genel olarak daha düşük kaldı. Tüm PAH'lar içerisinde Acenaphthene 13,302-16-071 μg/kg arasında en yüksek

konsantrasyonda ölçüldü. Yine pişirme yöntemleri kıyaslandığında beş farklı örnekte en yüksek değer Acenaphthene XD numunesinde air fryer ile pişirme yönteminde ölçüldü. 5 örnek arasında tava ile pişirme yönteminin XE ve XB numunesi hariç Acenaphthene değerleri düşük ölçüldü. Tespit edilen PAH bileşikleri içinde en düşük değerler Pyrene’de ölçüldü. XD ve XE numunesinde Piren tespit edilmedi diğer örneklerde de düşük değerlerde ölçüldü. 3 pişirme yöntemi ile pişirilen hamburger köftesi örneklerinde PAH grupları arasında Grup 1’i ifade eden ve en kansorejen bileşik olan Benzo(a)piren tespit edilemedi. Kansorejen PAH grubu içerisinde bulunan dibenz[a,h]anthracene en yüksek XD numunesinde air fryer tekniğinde ölçüldü. Diğer örneklerde düşük konsantrasyonlarda kaldı, XE ve XA numunelerinde ise tespit edilemedi. PAH4 grubunda bulunan bileşiklerinin hiçbirisi tek başına örneklerde tespit edilemedi.

Tablo 12’te farklı pişirme teknikleri sonucu elde edilen Naphthalene sonuçları verilmiştir. Naphthalene düzeyleri incelendiğinde hem marka hem de pişirme yönteminin istatistiksel olarak anlamlı etkisi olduğu belirlenmiştir ($p < 0,05$).

Tablo 12. Naphthalene ($\mu\text{g/kg}$)

Marka	Pişirme Tekniği		
	Air fryer	Izgara	Tava
XB	0,905 $\pm$ 0,050 ^{aA}	0,771 $\pm$ 0,010 ^{aB}	0,721 $\pm$ 0,001 ^{bB}
XE	0,783 $\pm$ 0,002 ^{bA}	0,679 $\pm$ 0,004 ^{cC}	0,776 $\pm$ 0,036 ^{aB}
XA	0,748 $\pm$ 0,004 ^{bA}	0,730 $\pm$ 0,003 ^{bA}	0,656 $\pm$ 0,013 ^{cB}
XC	0,735 $\pm$ 0,053 ^{bA}	0,796 $\pm$ 0,016 ^{aA}	0,664 $\pm$ 0,030 ^{cB}
XD	0,816 $\pm$ 0,004 ^{aA}	0,471 $\pm$ 0,013 ^{dC}	0,750 $\pm$ 0,003 ^{aB}

*Değerler ortalama $\pm$ standart sapmadır. a-d: Aynı sütundaki küçük harfler markalar arasındaki farklılıkları; A-C: aynı satırdaki büyük harfler pişirme tekniklerine göre farklılıkları belirtir ($p < 0,05$)

Özellikle air fryer yöntemi, bazı markalarda diğer pişirme tekniklerine kıyasla daha yüksek Naphthalene oluşumuna neden olmuştur. Örneğin, XB ve XD markalarında air fryer ile elde edilen değerler, diğer yöntemler ile pişirilen örneklere göre daha yüksek bulunmuştur.

Acenaphthylene ait sonuçlar Tablo 13’te verildi. Acenaphthylene bileşiği için yüksek değer XE markasında (tava, 1,880 $\mu\text{g/kg}$), en düşük ise XD markasında (air fryer, 0,558 $\mu\text{g/kg}$) saptanmıştır. Tava tekniği genellikle en yüksek seviyeleri oluştururken, Air fryer en düşük değerleri vermiştir.

Tablo 13. Acenaphthylene ($\mu\text{g/kg}$)

Marka	Pişirme Tekniği		
	Air fryer	Izgara	Tava
XB	1,129 $\pm$ 0,053 ^{cA}	1,053 $\pm$ 0,003 ^{cA}	1,085 $\pm$ 0,002 ^{bB}
XE	1,235 $\pm$ 0,006 ^{bC}	1,712 $\pm$ 0,001 ^{aB}	1,880 $\pm$ 0,007 ^{aA}
XA	1,216 $\pm$ 0,003 ^{bA}	1,039 $\pm$ 0,003 ^{cC}	1,094 $\pm$ 0,011 ^{bB}
XC	1,466 $\pm$ 0,012 ^{aA}	1,216 $\pm$ 0,011 ^{bB}	1,099 $\pm$ 0,004 ^{bC}
XD	0,558 $\pm$ 0,010 ^{dC}	0,691 $\pm$ 0,006 ^{dB}	0,848 $\pm$ 0,007 ^{cA}

*Değerler ortalama $\pm$ standart sapmadır. a-d: Aynı sütundaki küçük harfler markalar arasındaki farklılıkları; A-C: aynı satırdaki büyük harfler pişirme tekniklerine göre farklılıkları belirtir (p<0,05)

Acenaphthene ait sonuçlar Tablo 14’te verildi. Acenaphthene bileşiği için en yüksek değer XD (air fryer, 16,071 $\mu\text{g/kg}$), en düşük XC (tava, 13,302 $\mu\text{g/kg}$) markasında bulunmuştur. Izgara yöntemi bazı markalarda artış gösterirken, genel farklar istatistiksel olarak anlamlıdır.

Tablo 14. Acenaphthene ($\mu\text{g/kg}$)

Marka	Pişirme Tekniği		
	Air fryer	Izgara	Tava
XB	14,710 $\pm$ 1,095 ^{bA}	15,659 $\pm$ 0,013 ^{aA}	15,234 $\pm$ 0,036 ^{aA}
XE	15,356 $\pm$ 0,017 ^{aA}	14,582 $\pm$ 0,063 ^{cC}	14,953 $\pm$ 0,015 ^{aB}
XA	14,646 $\pm$ 0,078 ^{bB}	15,322 $\pm$ 0,017 ^{bA}	14,608 $\pm$ 0,235 ^{bB}
XC	13,957 $\pm$ 0,141 ^{bB}	14,575 $\pm$ 0,039 ^{cA}	13,302 $\pm$ 0,313 ^{cC}
XD	16,071 $\pm$ 0,076 ^{aA}	15,841 $\pm$ 0,198 ^{aA}	13,548 $\pm$ 0,270 ^{cB}

*Değerler ortalama $\pm$ standart sapmadır. a-d: Aynı sütundaki küçük harfler markalar arasındaki farklılıkları; A-C: aynı satırdaki büyük harfler pişirme tekniklerine göre farklılıkları belirtir (p<0,05)

Fluorene ait sonuçlar Tablo 15’te verildi. Fluorene bileşiği için en yüksek değer XC (ızgara, 0,098 $\mu\text{g/kg}$), en düşük XE (air fryer, 0,044 $\mu\text{g/kg}$) kombinasyonunda gözlenmiştir.

Tablo 15. Fluorene ($\mu\text{g/kg}$)

Marka	Pişirme Tekniği		
	Air fryer	Izgara	Tava
XB	0,080 $\pm$ 0,001 ^{cA}	0,065 $\pm$ 0,001 ^{cA}	0,074 $\pm$ 0,016 ^{aA}
XE	0,058 $\pm$ 0,002 ^{dB}	0,092 $\pm$ 0,002 ^{aA}	0,044 $\pm$ 0,002 ^{bC}
XA	0,089 $\pm$ 0,001 ^{bA}	0,074 $\pm$ 0,001 ^{bC}	0,084 $\pm$ 0,001 ^{aB}
XC	0,098 $\pm$ 0,001 ^{aA}	0,063 $\pm$ 0,001 ^{cB}	0,057 $\pm$ 0,003 ^{bC}
XD	0,055 $\pm$ 0,003 ^{dC}	0,075 $\pm$ 0,001 ^{bA}	0,068 $\pm$ 0,002 ^{aB}

*Değerler ortalama $\pm$ standart sapmadır. a-d: Aynı sütundaki küçük harfler markalar arasındaki farklılıkları; A-C: aynı satırdaki büyük harfler pişirme tekniklerine göre farklılıkları belirtir (p<0,05)

Phenanthrene ait sonuçlar Tablo 16’da verildi. Phenanthrene bileşiği için en yüksek değer XD (tava, 5,761 µg/kg), en düşük XC (air fryer, 5,022 µg/kg) örneklerinde bulunmuştur. Tava yönteminde Phenanthrene oluşumu artmıştır.

Tablo 16. Phenanthrene (µg/kg)

Marka	Pişirme Tekniği		
	Air fryer	Izgara	Tava
XB	5,335±0,371 ^{aA}	5,459±0,013 ^{aA}	5,485±0,049 ^{bA}
XE	5,306±0,025 ^{aB}	5,116±0,020 ^{cC}	5,533±0,006 ^{bA}
XA	5,120±0,020 ^{aC}	5,546±0,009 ^{aA}	5,323±0,078 ^{cB}
XC	5,022±0,095 ^{bC}	5,601±0,129 ^{aA}	5,337±0,014 ^{cB}
XD	5,572±0,054 ^{aB}	5,344±0,025 ^{bC}	5,761±0,035 ^{aA}

*Değerler ortalama±standart sapmadır. a-d: Aynı sütundaki küçük harfler markalar arasındaki farklılıkları; A-C: aynı satırdaki büyük harfler pişirme tekniklerine göre farklılıkları belirtir (p<0,05)

Anthracene ait sonuçlar Tablo 17’de verildi. Anthracene bileşiği için en yüksek değer XD (air fryer, 3,119 µg/kg), en düşük yine XD (tava, 2,067 µg/kg) örneklerinde tespit edilmiştir. Air fryer, bazı markalarda artışla ilişkilidir.

Tablo 17. Anthracene (µg/kg)

Marka	Pişirme Tekniği		
	Air fryer	Izgara	Tava
XB	2,718±0,225 ^{aA}	2,802±0,003 ^{bA}	2,693±0,029 ^{aA}
XE	3,076±0,928 ^{aB}	2,593±0,013 ^{cA}	2,632±0,013 ^{aA}
XA	2,595±0,012 ^{aB}	2,872±0,005 ^{aA}	2,626±0,029 ^{aB}
XC	2,446±0,082 ^{aB}	2,595±0,016 ^{cA}	2,508±0,047 ^{bA}
XD	3,119±0,915 ^{aA}	2,595±0,028 ^{cA}	2,067±0,023 ^{cA}

*Değerler ortalama±standart sapmadır. a-d: Aynı sütundaki küçük harfler markalar arasındaki farklılıkları; A-C: aynı satırdaki büyük harfler pişirme tekniklerine göre farklılıkları belirtir (p<0,05)

Benzo[a]anthracene+chrysene ait sonuçlar Tablo 18’de verildi. Benzo[a]anthracene+chrysene bileşikleri için en yüksek değer XD (air fryer, 0,080 µg/kg), en düşük XB (tava, 0,012 µg/kg) örneklerinde bulunmuştur. Air fryer bu bileşen için en yüksek riskli yöntemdir.

Tablo 18. Benzo[a]anthracene+chrysene (µg/kg)

Marka	Pişirme Tekniği		
	Air fryer	Izgara	Tava
XB	0,026±0,009 ^{aA}	0,017±0,001 ^{cA}	0,012±0,001 ^{dB}
XE	0,020±0,004 ^{aB}	0,021±0,002 ^{bA}	0,018±0,003 ^{bC}
XA	0,029±0,001 ^{aA}	0,021±0,001 ^{bB}	0,021±0,006 ^{aB}
XC	0,033±0,002 ^{aA}	0,029±0,002 ^{aA}	0,021±0,001 ^{dB}
XD	0,080±0,095 ^{aA}	0,017±0,000 ^{cA}	0,015±0,001 ^{cA}

*Değerler ortalama±standart sapmadır. a-c: Aynı sütundaki küçük harfler markalar arasındaki farklılıkları; A-B: aynı satırdaki büyük harfler pişirme tekniklerine göre farklılıkları belirtir (p<0,05)

Fluoranthane ait sonuçlar Tablo 19’da verildi. Fluoranthane bileşiği için en yüksek değer XA (tava, 1,151 µg/kg), en düşük XE (air fryer, 0,509 µg/kg) gözlenmiştir. Tava yöntemi genellikle yüksek değerlere sahiptir.

Tablo 19. Fluoranthane (µg/kg)

Marka	Pişirme Tekniği		
	Air fryer	Izgara	Tava
XB	1,008±0,204 ^{aA}	0,812±0,012 ^{aA}	0,807±0,024 ^{cA}
XE	0,509±0,024 ^{bC}	0,813±0,016 ^{aB}	1,030±0,028 ^{bA}
XA	0,651±0,006 ^{bC}	0,717±0,013 ^{bB}	1,151±0,24 ^{aA}
XC	0,735±0,026 ^{bA}	0,793±0,033 ^{aA}	0,747±0,035 ^{cA}
XD	0,751±0,002 ^{bB}	0,821±0,019 ^{aA}	0,806±0,016 ^{cA}

*Değerler ortalama±standart sapmadır. a-c: Aynı sütundaki küçük harfler markalar arasındaki farklılıkları; A-B: aynı satırdaki büyük harfler pişirme tekniklerine göre farklılıkları belirtir (p<0,05)

Pyrene ait sonuçlar Tablo 20’de verildi. Pyrene bileşiği için tespit edilebilirlik düşüktür; bazı markalarda hiç tespit edilmemiştir.

Tablo 20. Pyrene (µg/kg)

Marka	Pişirme Tekniği		
	Air fryer	Izgara	Tava
XB	0,030±0,001 ^{aA}	0,033±0,001 ^{aA}	-*
XE	-	-	-
XA	0,046±0,001 ^{aB}	0,050±0,001 ^{aA}	0,007±0,001 ^{aC}
XC	0,044±0,001 ^{aA}	0,022±0,001 ^{aB}	0,004±0,001 ^{aC}
XD	-	-	-

*Değerler ortalama±standart sapmadır. *- Tespit edilemedi, a-b: Aynı sütundaki küçük harfler markalar arasındaki farklılıkları; A-B: aynı satırdaki büyük harfler pişirme tekniklerine göre farklılıkları belirtir (p<0,05)

Benzo[b]flouranthene+benzo[k]flouranthene ait sonuçlar Tablo 21’de verildi.

Tablo 21. Benzo[b]flouranthene+benzo[k]flouranthene (µg/kg)

Marka	Pişirme Tekniği		
	Air fryer	Izgara	Tava
XB	0,032±0,020 ^{bA}	0,019±0,007 ^{aA}	0,019±0,002 ^{bA}
XE	0,026±0,001 ^{bB}	0,030±0,001 ^{aA}	0,028±0,002 ^{aA}
XA	0,021±0,001 ^{bA}	0,020±0,000 ^{aA}	0,018±0,001 ^{bB}
XC	0,031±0,000 ^{bA}	-*	0,011±0,000 ^{cA}
XD	0,059±0,001 ^{aA}	0,024±0,000 ^{aB}	0,018±0,000 ^{bC}

*Değerler ortalama±standart sapmadır. *- Tespit edilemedi, a-b: Aynı sütundaki küçük harfler markalar arasındaki farklılıkları; A-B: aynı satırdaki büyük harfler pişirme tekniklerine göre farklılıkları belirtir (p<0,05)

Benzo[b]flouranthene ve benzo[k]flouranthene bileşikleri için en yüksek değer XD (air fryer, 0,059 µg/kg), en düşük XC (tava, 0,011 µg/kg) örneklerinde bulunmuştur.

Tablo 22’de hamburger köfte örneklerinde Dibenzo[a,h]athracene (µg/kg) bileşiği düzeyleri verilmiştir. Dibenzo[a,h]athracene bileşiği için en yüksek değer XD (air fryer, 1,24 µg/kg), bu bileşenin air fryer yönteminde diğer yöntemlere göre daha fazla oluştuğu görülmektedir.

Tablo 22. Dibenzo[a,h]athracene (µg/kg)

Marka	Pişirme Tekniği		
	Air fryer	Izgara	Tava
XB	0.24±0.01 ^{Aa}	0.17±0.00 ^{Ba}	0.09 ± 0.00 ^{Ca}
XE	.*	-	-
XA	-	-	-
XC	-	0.31 ± 0.01 ^{Aa}	-
XD	1.24 ± 0.06 ^{Aa}	0.09 ± 0.00 ^{Ba}	0.07±0.00 ^{Ba}

*Değerler ortalama±standart sapmadır. *- Tespit edilemedi, a-b: Aynı sütundaki küçük harfler markalar arasındaki farklılıkları; A-B: aynı satırdaki büyük harfler pişirme tekniklerine göre farklılıkları belirtir (p<0,05)

Tablo 23’te hamburger köfte örneklerinde Indeno [1,2,3-cd] pyrene Acenaphthene (µg/kg) bileşiği düzeyleri verilmiştir. Indeno[1,2,3-cd]pyrene bileşiği için XE (ızgara, 2,02 µg/kg) en yüksek değere sahiptir, air fryer ise daha düşük seviyeler göstermiştir.

Tablo 23. Indeno [1,2,3-cd] pyrene (µg/kg)

Marka	Pişirme Tekniği		
	Air fryer	Izgara	Tava
XB	1.09±0.20 ^{Aa}	-	1.00±0.02 ^{Aa}
XE	0.95±0.02 ^{Ca}	2.02±0.01 ^{Aa}	1.92±0.01 ^{Ba}
XA	-	-	0.98±0.02 ^{Aa}
XC	-	-	-
XD	-	-	-

*Değerler ortalama±standart sapmadır. *- Tespit edilemedi, a-b: Aynı sütundaki küçük harfler markalar arasındaki farklılıkları; A-B: aynı satırdaki büyük harfler pişirme tekniklerine göre farklılıkları belirtir (p<0,05)

Tablo 24’te hamburger köfte örneklerinde Benzo[a]pyrene (µg/kg) bileşiği düzeyleri verilmiştir. Hiçbir örnekte Benzo[a]pyrene (BaP) bileşeni tespit edilememiştir. Bu bileşenin PAH analizlerinde tespit edilememesi oldukça önemli bir bulgudur çünkü BaP, EFSA ve diğer düzenleyici otoriteler tarafından PAH’lar içinde en kritik marker bileşik olarak kabul edilir.

Tablo 24. Benzo[a]pyrene ($\mu\text{g/kg}$)

Marka	Pişirme Tekniği		
	Air fryer	Izgara	Tava
XB	-	-	-
XE	-	-	-
XA	-	-	-
XC	-	-	-
XD	-	-	-

*Değerler ortalama $\pm$ standart sapmadır. *- Tespit edilemedi, a-b: Aynı sütundaki küçük harfler markalar arasındaki farklılıkları; A-B: aynı satırdaki büyük harfler pişirme tekniklerine göre farklılıkları belirtir ($p<0,05$)

Benzo[a]pyrene genellikle çok yüksek sıcaklık ($>300^\circ\text{C}$) ve açık alev temasında oluşur. Yoğun piroliz ve yanma ürünleri gerekir, bu da dumanın gıda yüzeyine yoğunlaşmasıyla gerçekleşir. Bu çalışmada kullanılan yöntemler açık alev veya kömür ateşi içermediğinden BaP oluşumu tespit edilmemiştir. Izgara yönteminde kullanılan elektrikli cihaz kontrollü bir sistem olduğundan yağ alevle doğrudan temas etmemiştir, bunun BaP oluşumunu ciddi şekilde sınırladığı düşünülmektedir. Ayrıca köfteler yüksek nem içeriğine sahiptir, bu da yüzey sıcaklığının kritik eşik değerini aşmasını engeller. Bu nedenlerle BaP gibi ileri kondensasyon ürünleri oluşmamış olabilir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Genel olarak, ızgara yöntemi çoğu markada yüksek moleköl ağırlıklı PAH'ların (örn. Indeno[1,2,3-cd]pyrene) oluşumuna neden olurken, hava fritözü bazı düşük moleköl ağırlıklı PAH'lar için (örn. Dibenz[a,h]anthracene, Benzo[a]anthracene) risk oluşturmuştur. Tava yöntemi ise orta düzeyde PAH birikimi göstermiştir. Markalar arasında XE ve XD, bazı kritik PAH'lar için en yüksek değerlere ulaşmıştır. En düşük toplam PAH düzeyi genellikle tava yöntemiyle pişirilen XC veya XB örneklerinde gözlenmiştir. Izgara yapmak, yüksek moleköl ağırlıklı PAH'ların daha yüksek konsantrasyonlarını sürekli olarak üretirken, air fryer bu bileşikler belirlenmiş şekilde azaltmış ancak bazı düşük moleköl ağırlıklı PAH'ları artırmış ve hava fritözünün tamamen güvenli bir alternatif olduğu algısına soru işareti koymuştur. En kanserojen PAH bileşenlerinden olan benzo[a]piren, analiz edilen hiçbir örnekte tespit edilmemiştir.

Izgara, Indeno[1,2,3-cd]piren gibi yüksek moleköl ağırlıklı PAH'ları sürekli olarak artırırken, hava fritözü, bu bileşikler azaltsa da, özellikle Dibenz[a,h]antrasen olmak üzere bazı düşük moleköl ağırlıklı PAH'ların daha yüksek seviyeleriyle ilişkilendirilmiştir. Tavada kızartma, orta düzeyde PAH konsantrasyonları üretmiştir. Bu bulgular, air fryerin tamamen risksiz kabul edilemeyeceğini göstermekte ve farklı pişirme yöntemlerinde PAH oluşumunu en aza indirmek için optimizasyon stratejilerine duyulan ihtiyacı vurgulamaktadır.

Air fryer yöntemi, yağın doğrudan ısı kaynağı ile temas etmemesi ve duman oluşumunun azalması nedeniyle genellikle daha sağlıklı bir pişirme yöntemi olarak kabul edilmektedir. Bu çalışmada, air fryer ızgara yöntemine kıyasla Indeno[1,2,3-cd]pyrene gibi yüksek moleköl ağırlıklı PAH'ların oluşumunu belirgin şekilde azaltmıştır. Bu durum, ızgarada gözlenen yağ damlaması ve piroliz reaksiyonlarının air fryerde gerçekleşmemesi ile açıklanabilir. Bununla birlikte, air fryer yöntemi PAH riskini tamamen ortadan kaldırmamaktadır. Dibenz[a,h]anthracene ve Benzo[a]anthracene gibi bazı düşük moleköl ağırlıklı PAH'ların air fryer ile pişirilen örneklerde ızgara veya tavaya göre daha yüksek seviyelerde bulunması dikkat çekicidir. Bu sonuç, air fryer cihazının kapalı sistemde yüksek hızlı sıcak hava sirkülasyonu ile oksidatif reaksiyonları teşvik etmesi ve yüzeyde yağ tabakasının varlığı nedeniyle lokal ısınma noktalarının oluşması ile ilişkilendirilebilir.

Hamburger köftesini air fryerde pişirmenin, düşük PAH konsantrasyonuna yol açabileceği düşünülmektedir. Hamburger köftesi numunelerindeki PAH konsantrasyonları düşünülenin

aksine air fryer, tava ve ızgara pişirme teknikleri arasında farklılık göstermiştir. Bazı PAH bileşikleri air fryerde yüksek oranda bulunurken bazı bileşikler en düşük konsantrasyonlarda ölçüldü. Bu durumun pişirme süresi ve sıcaklığı ile doğrudan ilişkisi olduğu düşünülmektedir.

Lee ve ark. çalışmasına göre çok yüksek sıcaklıklarda derin yağda kızartılmış tavuk eti, air fryer (180 °C) ile kızartılmış tavuk etine göre daha yüksek akrilamid ve toplam PAH içeriğine sahip olabilmektedir (Lee vd., 2020). Başka bir çalışmada da farklı barbekü türleri (tel ve taş) kullanılarak ve çeşitli pişirme derecelerinde (az pişmiş, orta pişmiş, iyi pişmiş ve çok iyi pişmiş) pişirilen sığır bifteklerindeki değişen BaP konsantrasyonları incelenmiş olup iyi pişmişten çok pişmişe doğru pişme derecesinin artması tel barbeküde pişirilmiş örneklerdeki BaP miktarını artırdığı bildirilmiştir (Oz & Yuzer, 2016). Çalışmamızda tava ve ızgara ile pişirme karşılaştırıldığında PAH oluşumu benzerlik gösterdi. Aydın ve Şahan en yüksek PAH oluşumunun haşlama, elektrikli ızgara, tava ve fırında pişirmeye kıyasla mangalda olduğunu bulmuşlardır. Ancak diğer pişirme yöntemlerinde PAH tespit edilmemiştir (Aydın & Şahan, 2018). Rose ve ark. ise kızartma, ızgara, tost ve fırınlamanın odun kömüründe barbeküde pişirilen etlere kıyasla düşük toplam PAH oluşumunu bildirmiştir (Rose vd., 2015). Öte yandan, kömürde ızgara ve açık ateşli pişirme yöntemleri, yağ damlaması ve tütsü temasının etkisiyle PAH oluşumunda ciddi artışlar yaratabilmektedir (Chung vd., 2011).

Isıtma yöntemleri ve PAH oluşumu üzerine yapılan farklı karşılaştırmalı çalışmalardan, elektrikli ve gazlı ızgara, fırında pişirme ve dolaylı tütsülemenin farklı et türlerinde nispeten daha az PAH ve BaP konsantrasyonu ürettiği bulunmuştur (Alomirah vd., 2011). Bu veriler yüksek pişirme sıcaklıkları gerektirmeyen ev tipi pişirme ortamlarında PAH oluşumu riskinin oldukça azaltılabileceği ve kansorejen madde alım riskini minimize edebileceğini göstermiştir. 3 farklı pişirme yönteminde de Phenanthrene, Anthracene ve Acenaphthene hariç diğer PAH bileşikleri 2 µg/g altında kaldı. Ayrıca bu bileşikler insanlar için risk teşkil etmeyen PAH grubunu oluşturuyor. Elde ettiğimiz sonuçlarda sağlık açısından risk oluşturabileceği bildirilen PAH grubu üyeleri numunelerimizde bulunmamıştır.

Air fryer kullanan pişirme tekniklerinde PAH oranları değişebilmektedir. Chen ve ark. çalışmasına göre hava fritözünün kullanılmasıyla karşılaştırıldığında, fırında pişirilen sığır eti, özellikle 19 dakika boyunca 200 °C'de pişirildiğinde, air fryere kıyasla 22,34 ng/kg'lık bir artışla daha yüksek BaP konsantrasyonu sergilemektedir. Hava fritözünde pişirme sırasında, 200 °C grubundaki BaP konsantrasyonu, 9 dakika pişirildiğinde 140 °C grubundakinden önemli ölçüde daha yüksekti, ancak 14 dakika veya 19 dakika pişirildiğinde 140 °C grubundakinden önemli

ölçüde daha düşük olduğu görüldü. Bu durumda pişmiş sığır etindeki BaP konsantrasyonu, Air fryer kullanıldığında sığır etindeki BaP konsantrasyonu sıcaklıktan veya pişirme süresinden etkilenmediği vurgulanmaktadır. Çalışma bu tutarsızlığın nedeninin hava filtre ve fan sisteminden kaynaklandığını ve yüksek sıcaklıklarda iç sıcaklığın daha düzgün dağıtıldığı ve filtre tabakasından düzgün geçebildiğinin bu durumun PAH oluşumunu azaltabileceğini vurgulamaktadır (Chen vd., 2024). Bir fan ve bir filtre plakası ile donatılan hava fritözü, iç sıcaklığın daha düzgün bir şekilde dağılmasını sağlar ve sığır etindeki BaP konsantrasyonu düşer.

Çalışmamızda air fryer, ızgara ve tava pişirme yöntemlerinin tümünde BaP tespit edilemedi. Ancak beklenilenin aksine air fryer ile pişirmenin ızgara ve tavada pişirmeye kıyasla PAH oluşumunda önemli değişiklik oluşturmadı. Literatürde çoğu çalışma air fryer ile pişirmenin PAH oluşumunu azaltmada ciddi etki ortaya koyduğunu vurgulamaktadır. Ancak air fryerde hamburger köftesi pişirmenin PAH oluşumuna etkisini inceleyen çalışmalarda yeterli kanıt ortaya koyamamaktadır. Çünkü air fryerde hamburger köftesi pişirmenin PAH oluşumuna etkisini inceleyen sınırlı sayıda çalışma mevcuttur. Sınırlı yöntem karşılaştırmaları ve örneklerdeki çeşitlilik çalışmaların kapsamının genişletilmesi olanağını sınırlamaktadır. Yine de air fryer ile yapılan sınırlı birkaç çalışma PAH oluşum riskinin azaltılabileceğine dikkat çekmiştir. Air fryer, özellikle yağsız pişirmeyle, PAH düzeylerini anlamlı şekilde azaltabilmektedir (Chen vd., 2024; Lee vd., 2020). Öte yandan paralel olarak farklı sıcaklıkların çalışılması farklı sonuçlar elde edilebileceğini göstermektedir (Palazoğlu vd. 2010). Başka bir çalışma daha yüksek pişirme sıcaklığının (500–700 °C) her zaman ette daha yüksek PAH oluşumu seviyesini desteklediğini, ancak daha düşük sıcaklık aralığında (100–150 °C) da PAH'ların, karbon ve hidrojen içeren bileşenlerin PAH'ların öncüsü olarak mevcut olduğu daha uzun jeolojik zaman ölçeklerinde oluşabileceğini ortaya koymuştur (Purcaro vd. 2013). Bu nedenle, pişirme sıcaklığının eş zamanlı pişirme süresiyle azaltılması ve et ile yakıt kaynakları arasındaki mesafenin artırılması veya kömürleşmeyi veya aşırı pişirmeyi önlemek için dolaylı ısıtma işleminin tercih edilmesi her zaman tavsiye edilir. Çalışmada kullanılan 180 °C 8 dk pişirme koşulu hamburger köfte numunesi için PAH oluşumuna olumsuz etki yapmış olabilir. Sürenin biraz daha kısaltılması önemli bir etken olabilir. Fakat Chen ve ark. çalışmasında air fryerde süre ve sıcaklığın değişiminin PAH oluşumu arasında bir ilişki bulunmadığını vurgulamaktadır (Chen vd., 2024).

Air fryer ile pişirilen hamburger köftelerinin polisiklik aromatik hidrokarbon (PAH) konsantrasyonlarının ızgara ve tava gibi geleneksel yöntemlere kıyasla daha yüksek olması ilk bakışta şaşırtıcı görünebilir çünkü PAH oluşumu genellikle doğrudan alev teması, yüksek sıcaklıkta yağın yanması veya dumanla pişirme gibi süreçlerle ilişkilendirilir (Aydın ve Şahan, 2018; Farhadian 2010; Lee vd., 2016). Ancak kapalı sistemde pişirme ve yağ buharlarının sirkülasyonu yağ ve et suyunun buharlaşmasıyla oluşan uçucu bileşikler hazneden tam olarak dışarı atılamaz. Bu buharlar köftenin etrafında dolaşarak yüzeyde yoğunlaşabilir ve PAH oluşumuna zemin hazırlayabilir. Özellikle köfte gibi yağlı ürünlerde, bu yağ buharı yüksek sıcaklıkla tekrar tekrar ısınır, bu da PAH oluşumunu artırabilir. Diğer yandan havanın doğrudan yüzeye çarptığı yerlerde lokal sıcaklıklar daha yüksek olabilir. Bu lokal aşırı ısınma, özellikle yağ içeren yüzeylerde termal bozulma ile PAH üretimini tetikleyebilir. Sonuç olarak air fryer'ın yüksek ısıda, kapalı sistemde ve yağın buharlaşarak yeniden yüzeye dönmesine olanak sağlayan çalışma prensibi, PAH oluşumunu artırabilir. Özellikle yağlı et ürünlerinin bu yöntemle pişirilmesi sırasında PAH seviyelerinin artması olasıdır. Buna karşılık ızgarada yağın akması ve açık hava ile temas, PAH oluşumunu görece azaltabilir.

Pişirme uygulamalarının evrimi geleneksel diyet yapıları ve alışkanlıklarını derinden etkilemiştir. Kızartma, tavada kızartma ve derin yağda kızartma gibi geleneksel pişirme yöntemleri kırmızı ete önemli miktarda zararlı kimyasal katabilir ve sağlık risklerine yol açabilir (Nandasiri vd., 2023; Santos vd., 2017). Bu nedenle, et tüketimi ile sağlık riskleri arasındaki ilişkiyi değerlendirirken pişirme yöntemlerinin etkisi hesaba katılmalıdır. Sonuçlarımız, air fryer'ın yüksek molekül ağırlıklı PAH oluşumunu azaltmasına rağmen, düşük molekül ağırlıklı PAH'ların oluşumu üzerinde olumsuz etkilerinin olabileceğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle, air fryer ile pişirme sırasında bu bileşiklerin oluşumunu minimize edecek stratejiler geliştirilmesi ve mekanizmaların daha detaylı araştırılması gerekmektedir.

Sonuç olarak “air fryer her koşulda sağlıklıdır” demek kadar “zararlıdır” demek de genelleme olur. Kontrollü kullanım ve gıda bilincine bağlı olarak avantajlı ya da riskli hale gelebilir. Önceki çalışmaların sonuçlarıyla birlikte, mevcut çalışmadan elde edilen veriler, özellikle yağsız pişirme koşulları altında PAH gibi başlıca tehlikeli maddelerin oluşumunu azaltmada air fryerin avantajlarını desteklemekte ancak bu konudaki çalışmaların yetersizliği air fryerin sağlıklı pişirme yöntemi olarak bir alternatif olabileceği konusundaki şüpheleri gidermede yetersiz kalmaktadır.

PAH'lar pişirme sırasında oluşur ve pişirme sıcaklığı, etin yağlılık durumu, pişirme yöntemi ve süresine göre gıdada bulunan miktarlar değişiklik gösterebilir. Pişirme tekniklerinin seçimi gıdalarda PAH oranlarının azaltılmasında önemli bir seçim olabilir. Özellikle gıdaların işlenmesi sırasında yakıtla doğrudan temas etmesi PAH oluşumu riskini arttırmaktadır. Evde pişirme yöntemleri için de durum farklı değildir. Çünkü yanlış pişirme uygulaması PAH oluşumu riskini arttırarak sağlıkla tüketilmesi gereken gıdalarda gıda güvenliğini riske atmaktadır. Son yıllarda evde her türlü gıdanın pişirilmesinde air fryer sıklıkla kullanılmaya başlandı. Yaptığımız çalışmada hamburger köftelerinde pişirme tekniklerinin PAH oluşumuna etkisi incelendi ve karşımıza çarpıcı sonuçlar çıktı. Air fryer ile pişirme yöntemi genel olarak düşük PAH konsantrasyonları gözlemlense de diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında önemli bir fark yaratmadığı görüldü. Bunun nedeninin gıdanın bileşimine bağlı olabileceği gibi uygulanan sıcaklık ve sürenin etkisinin olabileceğini de düşündürdü. BaP, BaA, Chr ve BbF'nin toplamını ifade eden PAH4 seviyeleri, PAH'ların yüksek karsinogenik gücü olan PAH'ları ifade etmekte ve gıdalardaki PAH oluşumunun değerlendirilmesinde indikatör olarak kullanılmaktadırlar. Çalışmamızda bu gruptan herhangi bir bileşik ızgara, tava ve air fryer ile pişirilen örneklerimizde tespit edilememiştir. Bu yönüyle çalışma evde pişirme tekniklerinin geleneksel odun ile pişirme yöntemlerine kıyasla güvenilir olabileceğine işaret etmektedir.

Lipid oksidasyonu, et ve et ürünlerinin kalitesini ve kabul edilebilirliğini sınırlayan en önemli faktörlerden biridir. Pişmiş hamburger köfte örneklerinde TBARS değerleri ortalaması ızgara örneklerinde 0.051 $\mu\text{mol MA/kg}$, tava örneklerinde 0.067 $\mu\text{mol MA/kg}$ ve air fryer örneklerinde 0.069 $\mu\text{mol MA/kg}$ olarak belirlenmiştir. En düşük TBARS değeri ortalaması ızgara yöntemi ile pişirilen köftelerde tespit edilmiştir. En yüksek değerler ise air fryerde gözlemlenmiştir. Bunun nedeni air fryer de pişirmenin süresinin diğer pişirme yöntemlerine kıyasla uzun ve pişirme sıcaklığının yüksek olduğu düşünülmektedir.

Air fryer sadece PAH oluşumu değil besin değerinin kaybedilmeden gıdaların pişirilmesinde hala önemli bir alternatif olmaya devam etmektedir. Air fryer gıda kaynaklı toksisiteyi etkili bir şekilde azaltmaya yardımcı olarak daha sağlıklı beslenme alışkanlıkları ve dengeli bir besin kaynağı sağlayabilir.

KAYNAKÇA

- Achten, C., & Andersson, J. T. (2015). Overview of Polycyclic Aromatic Compounds (PAC). *Polycyclic Aromatic Compounds*, 35(2-4), 177-186. <https://doi.org/10.1080/10406638.2014.994071>
- Ağaoğlu, S., Alemdar, S., & Alişarlı, M. (2000). Hamburger ve piliç burgerlerin mikrobiyolojik kalitesi. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi*, 11(1), 40-43.
- Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Gıda Mühendisliği Bölümü, Antalya, Kılıç, Ö., Aykın Dinçer, E., & Erbaş, M. (2017). Gıdalarda polisiklik aromatik hidrokarbon bileşiklerinin bulunuşu ve sağlık üzerine etkileri. *Gıda / the journal of food*, 42(2), 127-135. <https://doi.org/10.15237/gida.GD16060>
- Alomirah, H., Al-Zenki, S., Al-Hooti, S., Zaghloul, S., Sawaya, W., Ahmed, N., & Kannan, K. (2011). Concentrations and dietary exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) from grilled and smoked foods. *Food Control*, 22(12), 2028-2035. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2011.05.024>
- Amirdivani, S., Khorshidian, N., Ghobadi Dana, M., Mohammadi, R., Mortazavian, A. M., Quiterio de Souza, S. L. Raices, R. (2019). Polycyclic aromatic hydrocarbons in milk and dairy products. *International Journal of Dairy Technology*, 72(1), 120-131. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12567>
- Anderson, E. T., & Berry, B. W. (2001). Effects of inner pea fiber on fat retention and cooking yield in high fat ground beef. *Food Research International*, 34(8), 689-694. [https://doi.org/10.1016/S0963-9969\(01\)00089-8](https://doi.org/10.1016/S0963-9969(01)00089-8)
- Anonim. TS10580 Köfte (pişmemiş) Standardı (2010).
- Arslan, M., Xiaobo, Z., Shi, J., Rakha, A., Hu, X., Zareef, M., ... Basheer, S. (2018). Oil Uptake by Potato Chips or French Fries: A Review. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 120(10), 1800058. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201800058>
- Aydin, Ö. Ş., & Şahan, Y. (2018). Bazı Et Türlerinde Polisiklik Aromatik Hidrokarbon Oluşumuna Farklı Pişirme Yöntemlerinin Etkisi. *Akademik Gıda*, 16(4), 387-394. <https://doi.org/10.24323/akademik-gida.505505>
- Bae, S. Y., Yi, S. M., & Kim, Y. P. (2002). Temporal and spatial variations of the particle size distribution of PAHs and their dry deposition fluxes in Korea. *Atmospheric Environment*, 36(35), 5491-5500. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00666-0](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00666-0)

- Bal, A., & Küçüköner, E. (2023). Sıcak hava fritözü ve derin yağda kızartma tekniği ile kızartılmış gıdaların karşılaştırılması. *Gıda*, 48(5), 1060-1070. <https://doi.org/10.15237/gida.GD23086>
- Basak, S., Sengor, G. F., & Telli Karakoc, F. (2010). The Detection of Potential Carcinogenic PAH Using HPLC Procedure in Two Different Smoked Fish, Case Study: Istanbul/Turkey. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 10(3). <https://doi.org/10.4194/trjfas.2010.0307>
- Bostan, S. (2021). *Farklı pişirme yöntemlerinin Akçaabat köftesinde polisiklik aromatik hidrokarbon (PAH) oluşumuna etkisi* (Master Thesis, Gümüşhane Üniversitesi). Gümüşhane Üniversitesi. Geliş tarihi gönderen <https://acikerisim.gumushane.edu.tr/xmlui/handle/20.500.12440/2378>
- Boz, H. (2022). Sıcak Havada Pişirilmiş (Airfrying) Ürünlerin Özellikleri. *Gastro-World*, 1(1), 41-49.
- Broniatowski, M., Binczycka, M., Wójcik, A., Flasiński, M., & Wydro, P. (2017). Polycyclic aromatic hydrocarbons in model bacterial membranes – Langmuir monolayer studies. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Biomembranes*, 1859(12), 2402-2412. <https://doi.org/10.1016/j.bbamem.2017.09.017>
- Chahin, A., Guaiavarc'h, Y. P., Dziurla, M.-A., Toussaint, H., Feidt, C., & Rychen, G. (2008). 1-Hydroxypyrene in Milk and Urine as a Bioindicator of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Exposure of Ruminants. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(5), 1780-1786. <https://doi.org/10.1021/jf072757g>
- Chen, B.-H., Inbaraj, B. S., & Hsu, K.-C. (2022). Recent advances in the analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in food and water. *Journal of Food and Drug Analysis*, 30(4), 494-522. <https://doi.org/10.38212/2224-6614.3429>
- Chen, X., Liao, Y., Lin, B., He, X., Li, S., Zhong, C., ... Fan, L. (2024). The Concentration of Benzo[a]pyrene in Food Cooked by Air Fryer and Oven: A Comparison Study. *Toxics*, 12(6), 416. <https://doi.org/10.3390/toxics12060416>
- Cheng, T., Lam, A. K., & Gopalan, V. (2021). Diet derived polycyclic aromatic hydrocarbons and its pathogenic roles in colorectal carcinogenesis. *Critical Reviews in Oncology/Hematology*, 168, 103522. <https://doi.org/10.1016/j.critrevonc.2021.103522>
- Chung, S. Y., Yettella, R. R., Kim, J. S., Kwon, K., Kim, M. C., & Min, D. B. (2011). Effects of grilling and roasting on the levels of polycyclic aromatic hydrocarbons in beef and pork. *Food Chemistry*, 129(4), 1420-1426. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.05.092>

- Contini, C., Boncinelli, F., Gerini, F., Scozzafava, G., & Casini, L. (2018). Investigating the role of personal and context-related factors in convenience foods consumption. *Appetite*, 126, 26-35. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2018.02.031>
- Cordeiro, T., Viegas, O., Silva, M., Martins, Z. E., Fernandes, I., Ferreira, I. M. L. P. V. O., ... Calhau, C. (2020). Inhibitory effect of vinegars on the formation of polycyclic aromatic hydrocarbons in charcoal-grilled pork. *Meat Science*, 167, 108083. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2020.108083>
- Coria-Hernández, J., Arjona-Román, J. L., & Meléndez-Pérez, R. (2023). Comparative study of conventional frying and air frying on the quality of potatoes (*Solanum tuberosum* L.). *Food Science & Nutrition*, 11(10), 6676-6685. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3617>
- Çelik, P. (2012). *Kanatlı eti (hindi eti ve tavuk eti) ve kırmızı et karışımı ile elde edilen köftelerin kalite özelliklerinin belirlenmesi. Namık Kemal Üniversitesi (Yüksek Lisans Tezi)*. Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ, Türkiye.
- Çimen, A., & Çiçek, Ü. (2021). Tokat ilinde satışa sunulan köfte ve dönerlerin bazı fiziksel, kimyasal ve serolojik özellikleri. *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, 10(2), 71-83.
- Çorman, M. E., Armutcu, C., Uzun, L., & Denizli, A. (2017). Rapid, efficient and selective preconcentration of benzo[a]pyrene (BaP) by molecularly imprinted composite cartridge and HPLC. *Materials Science and Engineering: C*, 70, 41-53. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2016.08.040>
- Edwards, N. T. (1983). Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAH's) in the Terrestrial Environment—A Review. *Journal of Environmental Quality*, 12(4), 427-441. <https://doi.org/10.2134/jeq1983.00472425001200040001x>
- (EU) Commission Regulation (EU), 2023. EU Commission. (2023). Commission Regulation (EU) 2023/915 of 25 April 2023 on maximum levels for certain contaminants in food and repealing Regulation (EC) No 1881/2006., 1881/2006 2023/915 § (2023).
- European Food Safety Authority (EFSA). (2008). Polycyclic aromatic hydrocarbons in food—scientific opinion of the panel on contaminants in the food chain. *Wiley Online Library*, 6(8), 724.
- Falcó, G., Domingo, J. L., Llobet, J. M., Teixidó, A., Casas, C., & Müller, L. (2003). Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Foods: Human Exposure through the Diet in Catalonia, Spain. *Journal of Food Protection*, 66(12), 2325-2331. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-66.12.2325>

- Fang, G.-C., Wu, Y.-S., Chen, J.-C., Chang, C.-N., & Ho, T.-T. (2006). Characteristic of polycyclic aromatic hydrocarbon concentrations and source identification for fine and coarse particulates at Taichung Harbor near Taiwan Strait during 2004–2005. *Science of The Total Environment*, 366(2-3), 729-738. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.09.075>
- Farhadian, A., Jinap, S., Faridah, A., & Zaidul, I. S. M. (2012). Effects of marinating on the formation of polycyclic aromatic hydrocarbons (benzo[a]pyrene, benzo[b]fluoranthene and fluoranthene) in grilled beef meat. *Food Control*, 28(2), 420-425. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2012.04.034>
- Farhadian, A., Jinap, S., Hanifah, H. N., & Zaidul, I. S. (2011). Effects of meat preheating and wrapping on the levels of polycyclic aromatic hydrocarbons in charcoal-grilled meat. *Food Chemistry*, 124(1), 141-146. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.05.116>
- Farhadian, Afsaneh, Jinap, S., Abas, F., & Sakar, Z. I. (2010). Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in grilled meat. *Food Control*, 21(5), 606-610. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2009.09.002>
- Galanakis, C. M., Tornberg, E., & Gekas, V. (2010). Dietary fiber suspensions from olive mill wastewater as potential fat replacements in meatballs. *LWT - Food Science and Technology*, 43(7), 1018-1025. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2009.09.011>
- Gökalp, H. Y. (1993). *Et ve Ürünlerinde Kalite Kontrolü ve Laboratuvar Uygulama Kılavuzu*. Atatürk Üniversitesi, Ziraat Fakültesi.
- Grotta, L., Castellani, F., Palazzo, F., Naceur Haouet, M., & Martino, G. (2017). Treatment Optimisation and Sample Preparation for the Evaluation of Lipid Oxidation in Various Meats Through TBARS Assays before Analysis. *Food Analytical Methods*, 10(6), 1870-1880. <https://doi.org/10.1007/s12161-016-0740-y>
- Günç Ergönül, P., & Kaya, D. (2015). Polisiklik Aromatik Hidrokarbonlar (PAH) ve Gıdalarda Önemi—Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) and Their Importance in Foods. *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 11(2). <https://doi.org/10.18466/cbujos.00333>
- Hao, X., Yin, Y., Feng, S., Du, X., Yu, J., & Yao, Z. (2016). Characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in food oils in Beijing catering services. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(24), 24932-24942. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7671-4>

- IARC. (2010). IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Ingested nitrate and nitrite, and cyanobacterial peptide toxins. *IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans*, 94, v-vii, 1-412.
- İmtiyaz, H., Soni, P., & Yukongdi, V. (2023). Assessing the Consumers' Purchase Intention and Consumption of Convenience Food in Emerging Economy: The Role of Physical Determinants. *Sage Open*, 13(1), 21582440221148434. <https://doi.org/10.1177/21582440221148434>
- İçöz, A., & Kayışoğlu, S. (2012). Tekirdağ'da Tüketime Sunulan Hamburger ve Piliç Burgerlerin Mikrobiyolojik ve Fizikokimyasal Özellikleri. *Akademik Gıda*, 10(2), 63-68.
- Jägerstad, M., & Skog, K. (2005). Genotoxicity of heat-processed foods. *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, 574(1-2), 156-172. <https://doi.org/10.1016/j.mrfmmm.2005.01.030>
- Karslıoğlu, B. (2022). Et ve et ürünlerinde polisiklik aromatik hidrokarbonların oluşum mekanizmaları ve azaltıcı yaklaşımlar. *Gıda*, 47(6), 1032-1045. <https://doi.org/10.15237/gida.GD22045>
- Kayışoğlu, S., Kayışoğlu, S., İçöz, A., & İçöz, A. (2012). Eğitim Düzeyinin Fast-Food Tüketim Alışkanlığına Etkisi. *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 9(2), 16-19.
- Kendirci, P., İcier, F., Kor, G., & Onogur, T. A. (2014). Influence of infrared final cooking on polycyclic aromatic hydrocarbon formation in ohmically pre-cooked beef meatballs. *Meat Science*, 97(2), 123-129. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2014.01.020>
- Kılıç, Ö., Aykın Dinçer, E., & Erbaş, M. (2017). Gıdalarda polisiklik aromatik hidrokarbon bileşiklerinin bulunuşu ve sağlık üzerine etkileri. *gıda / the journal of food*, 42(2), 127-135. <https://doi.org/10.15237/gida.GD16060>
- Kim, H.-J., Cho, J., & Jang, A. (2021). Effect of charcoal type on the formation of polycyclic aromatic hydrocarbons in grilled meats. *Food Chemistry*, 343, 128453. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128453>
- Kishikawa, N., Wada, M., Kuroda, N., Akiyama, S., & Nakashima, K. (2003). Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in milk samples by high-performance liquid chromatography with fluorescence detection. *Journal of Chromatography B*, 789(2), 257-264. [https://doi.org/10.1016/S1570-0232\(03\)00066-7](https://doi.org/10.1016/S1570-0232(03)00066-7)
- Köseler, M. D. (2008). *Büyükçekmece Gölü'nde polisiklik aromatik hidrokarbon (PAH) konsantrasyonunun belirlenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Kwon, J., Kim, I., Moon, B., Lee, K.-W., Jung, M., & Lee, J. (2023). The effects of different cooking methods and spices on the formation of 11 HCAs in chicken wing and pork belly. *Food Control*, 147, 109572. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109572>
- Lai, J.-P., Niessner, R., & Knopp, D. (2004). Benzo[a]pyrene imprinted polymers: Synthesis, characterization and SPE application in water and coffee samples. *Analytica Chimica Acta*, 522(2), 137-144. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2004.07.003>
- Ledesma, E., Rendueles, M., & Díaz, M. (2016). Contamination of meat products during smoking by polycyclic aromatic hydrocarbons: Processes and prevention. *Food Control*, 60, 64-87. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2015.07.016>
- Lee, J.-G., Kim, S.-Y., Moon, J.-S., Kim, S.-H., Kang, D.-H., & Yoon, H.-J. (2016). Effects of grilling procedures on levels of polycyclic aromatic hydrocarbons in grilled meats. *Food Chemistry*, 199, 632-638. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.12.017>
- Lee, J.-S., Han, J.-W., Jung, M., Lee, K.-W., & Chung, M.-S. (2020a). Effects of Thawing and Frying Methods on the Formation of Acrylamide and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Chicken Meat. *Foods*, 9(5), 573. <https://doi.org/10.3390/foods9050573>
- Lee, J.-S., Han, J.-W., Jung, M., Lee, K.-W., & Chung, M.-S. (2020b). Effects of Thawing and Frying Methods on the Formation of Acrylamide and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Chicken Meat. *Foods*, 9(5), 573. <https://doi.org/10.3390/foods9050573>
- Li, X., Gao, Y., Deng, P., Ren, X., & Teng, S. (2023). Determination of Four PAHs and Formaldehyde in Traditionally Smoked Chicken Products. *Molecules*, 28(13), 5143. <https://doi.org/10.3390/molecules28135143>
- Linares, V., Perelló, G., Nadal, M., Gómez-Catalán, J., Llobet, J. M., & Domingo, J. L. (2010). Environmental versus dietary exposure to POPs and metals: A probabilistic assessment of human health risks. *J. Environ. Monit.*, 12(3), 681-688. <https://doi.org/10.1039/B914962G>
- Lourenço, S. C., Moldão-Martins, M., & Alves, V. D. (2019). Antioxidants of Natural Plant Origins: From Sources to Food Industry Applications. *Molecules*, 24(22), 4132. <https://doi.org/10.3390/molecules24224132>
- Luzardo, O. P., Ruiz-Suárez, N., Henríquez-Hernández, L. A., Valerón, P. F., Camacho, M., Zumbado, M., & Boada, L. D. (2014). Assessment of the exposure to organochlorine pesticides, PCBs and PAHs in six species of predatory birds of the Canary Islands,

- Spain. *Science of The Total Environment*, 472, 146-153. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.11.021>
- Manoli, E., & Samara, C. (1999). Polycyclic aromatic hydrocarbons in natural waters: Sources, occurrence and analysis. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 18(6), 417-428. [https://doi.org/10.1016/S0165-9936\(99\)00111-9](https://doi.org/10.1016/S0165-9936(99)00111-9)
- Martorell, I., Perelló, G., Martí-Cid, R., Castell, V., Llobet, J. M., & Domingo, J. L. (2010). Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) in foods and estimated PAH intake by the population of Catalonia, Spain: Temporal trend. *Environment International*, 36(5), 424-432. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2010.03.003>
- McGrath, T. E., Wooten, J. B., Geoffrey Chan, W., & Hajaligol, M. R. (2007). Formation of polycyclic aromatic hydrocarbons from tobacco: The link between low temperature residual solid (char) and PAH formation. *Food and Chemical Toxicology*, 45(6), 1039-1050. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2006.12.010>
- Molle, D. R. D., Abballe, C., Gomes, F. M. L., Furlani, R. P. Z., & Tfouni, S. A. V. (2017). Polycyclic aromatic hydrocarbons in canola, sunflower and corn oils and estimated daily intake. *Food Control*, 81, 96-100. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2017.05.045>
- Naccari, C., Cristani, M., Giofrè, F., Ferrante, M., Siracusa, L., & Trombetta, D. (2011). PAHs concentration in heat-treated milk samples. *Food Research International*, 44(3), 716-724. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.12.029>
- Naccari, F., Martino, D., Trombetta, D., Cristani, M., Licata, P., Richetti, A., & Naccari, C. (2006). *Trace elements in bovine milk from dairy farms in Sicily*. Messina, Italy: Italian journal of food science.
- Nandasiri, R., Semenko, B., Wijekoon, C., & Suh, M. (2023). Air-Frying Is a Better Thermal Processing Choice for Improving Antioxidant Properties of Brassica Vegetables. *Antioxidants*, 12(2), 490. <https://doi.org/10.3390/antiox12020490>
- Olatunji, O. S., Fatoki, O. S., Opeolu, B. O., & Ximba, B. J. (2014). Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons [PAHs] in processed meat products using gas chromatography – Flame ionization detector. *Food Chemistry*, 156, 296-300. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.01.120>
- Onopiuk, A., Kołodziejczak, K., Marcinkowska-Lesiak, M., & Poltorak, A. (2022). Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons using different extraction methods and HPLC-FLD detection in smoked and grilled meat products. *Food Chemistry*, 373, 131506. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131506>

- Onopiuk, A., Kołodziejczak, K., Szpicer, A., Wojtasik-Kalinowska, I., Wierzbicka, A., & Półtorak, A. (2021). Analysis of factors that influence the PAH profile and amount in meat products subjected to thermal processing. *Trends in Food Science & Technology*, 115, 366-379. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.06.043>
- Oz, F., & Yuzer, M. O. (2016). The effects of cooking on wire and stone barbecue at different cooking levels on the formation of heterocyclic aromatic amines and polycyclic aromatic hydrocarbons in beef steak. *Food Chemistry*, 203, 59-66. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.02.041>
- Öz, E. (2021). Mangalda Pişirilmiş Sebzelerin Polisiklik Aromatik Hidrokarbon İçeriği. *Cukurova University, Agriculture Faculty*, 1(36), 13-22. <https://doi.org/10.36846/CJAFS.2021.31>
- Palazoğlu, T. K., Savran, D., & Gökmen, V. (2010). Effect of Cooking Method (Baking Compared with Frying) on Acrylamide Level of Potato Chips. *Journal of Food Science*, 75(1). <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2009.01389.x>
- Paris, A., Ledauphin, J., Poinot, P., & Gaillard, J.-L. (2018). Polycyclic aromatic hydrocarbons in fruits and vegetables: Origin, analysis, and occurrence. *Environmental Pollution*, 234, 96-106. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.028>
- Purcaro, G., Moret, S., & Conte, L. S. (2013). Overview on polycyclic aromatic hydrocarbons: Occurrence, legislation and innovative determination in foods. *Talanta*, 105, 292-305. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2012.10.041>
- Rose, M., Holland, J., Dowding, A., Petch, S. (R. G.), White, S., Fernandes, A., & Mortimer, D. (2015). Investigation into the formation of PAHs in foods prepared in the home to determine the effects of frying, grilling, barbecuing, toasting and roasting. *Food and Chemical Toxicology*, 78, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2014.12.018>
- Salman, G. Ş. (2012). *Düşük yağlı hamburger üretiminde limon lifi kullanim olanağı* (Yüksek Lisans Tezi). Ankara Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Sampaio, G. R., Guizellini, G. M., da Silva, S. A., de Almeida, A. P., Pinaffi-Langley, A. C. C., Rogero, M. M., ... Torres, E. A. F. S. (2021). Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Foods: Biological Effects, Legislation, Occurrence, Analytical Methods, and Strategies to Reduce Their Formation. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(11), 6010. <https://doi.org/10.3390/ijms22116010>
- Santos, C. S. P., Cunha, S. C., & Casal, S. (2017). Deep or air frying? A comparative study with different vegetable oils. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 119(6), 1600375. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201600375>

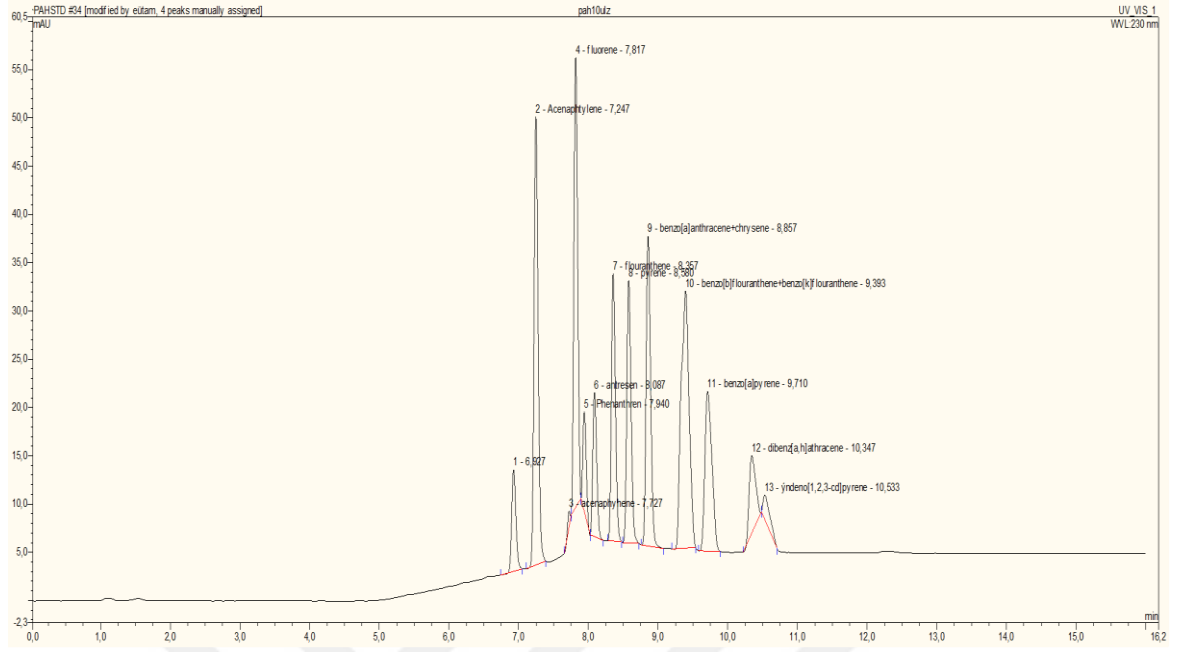
- Scheeder, M. R. L., Casutt, M. M., Roulin, M., Escher, F., Dufey, P.-A., & Kreuzer, M. (2001). Fatty acid composition, cooking loss and texture of beef patties from meat of bulls fed different fats. *Meat Science*, 58(3), 321-328. [https://doi.org/10.1016/S0309-1740\(01\)00037-7](https://doi.org/10.1016/S0309-1740(01)00037-7)
- Schwab, A. P., & Dermody, C. L. (2021). Pathways of polycyclic aromatic hydrocarbons assimilation by plants growing in contaminated soils. İçinde *Advances in Agronomy* (C. 169, ss. 193-250). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2021.03.002>
- Semanová, J., Skláršová, B., Šimon, P., & Šimko, P. (2016). Elimination of polycyclic aromatic hydrocarbons from smoked sausages by migration into polyethylene packaging. *Food Chemistry*, 201, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.01.057>
- Serpe, F. P., Esposito, M., Gallo, P., & Serpe, L. (2010). Optimisation and validation of an HPLC method for determination of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in mussels. *Food Chemistry*, 122(3), 920-925. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.03.062>
- Shi, Y., Wu, H., Wang, C., Guo, X., Du, J., & Du, L. (2016). Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in coffee and tea samples by magnetic solid-phase extraction coupled with HPLC–FLD. *Food Chemistry*, 199, 75-80. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.11.137>
- Šimko, P. (2002). Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in smoked meat products and smoke flavouring food additives. *Journal of Chromatography B*, 770(1-2), 3-18. [https://doi.org/10.1016/S0378-4347\(01\)00438-8](https://doi.org/10.1016/S0378-4347(01)00438-8)
- Soyutemiz, G. E. (2000). Bursa 'da Satışa Sunulan Beş Farklı Grup Hazır Köftenin Kimyasal Bileşimi ve pH Değerlerinin Saptanması. *Gıda*, 25(1).
- Speer, K., Steeg, E., Horstmann, P., Kühn, Th., & Montag, A. (1990). Determination and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in native vegetable oils, smoked fish products, mussels and oysters, and bream from the river Elbe. *Journal of High Resolution Chromatography*, 13(2), 104-111. <https://doi.org/10.1002/jhrc.1240130206>
- Stumpe-Vīksna, I., Bartkevičs, V., Kukāre, A., & Morozovs, A. (2008). Polycyclic aromatic hydrocarbons in meat smoked with different types of wood. *Food Chemistry*, 110(3), 794-797. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.03.004>
- Şimşek, A. (2020). Hamburger Köftelerin Oksidatif Stabilitesi Üzerine Farklı Pişirme Teknikleri ve Merkez Sıcaklığı Uygulamalarının Etkisi. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 8(4), 807-817. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v8i4.807-817.2769>

- Tani, Y., Fujiwara, T., & Kondo, K. (2020). Cooking skills related to potential benefits for dietary behaviors and weight status among older Japanese men and women: A cross-sectional study from the JAGES. *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity*, 17(1), 82. <https://doi.org/10.1186/s12966-020-00986-9>
- Verma, V., Singh, V., Chauhan, O. P., & Yadav, N. (2023). Comparative evaluation of conventional and advanced frying methods on hydroxymethylfurfural and acrylamide formation in French fries. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 83, 103233. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.103233>
- Viegas, O., Novo, P., Pinto, E., Pinho, O., & Ferreira, I. M. P. L. V. O. (2012). Effect of charcoal types and grilling conditions on formation of heterocyclic aromatic amines (HAs) and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in grilled muscle foods. *Food and Chemical Toxicology*, 50(6), 2128-2134. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2012.03.051>
- Vignesh, A., Amal, T. C., & Vasanth, K. (2024). Food contaminants: Impact of food processing, challenges and mitigation strategies for food security. *Food Research International*, 191, 114739. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114739>
- Wang, H., Wang, C., Li, C., Xu, X., & Zhou, G. (2019). Effects of Phenolic Acid Marinades on the Formation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Charcoal-Grilled Chicken Wings. *Journal of Food Protection*, 82(4), 684-690. <https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-18-420>
- WHO. (2022). *WHO global strategy for food safety 2022-2030: Towards stronger food safety systems and global cooperation*. World Health Organization.
- Wretling, S., Eriksson, A., Eskhult, G. A., & Larsson, B. (2010). Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Swedish smoked meat and fish. *Journal of Food Composition and Analysis*, 23(3), 264-272. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2009.10.003>
- Yousefi, M., Shemshadi, G., Khorshidian, N., Ghasemzadeh-Mohammadi, V., Fakhri, Y., Hosseini, H., & Mousavi Khaneghah, A. (2018). Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) content of edible vegetable oils in Iran: A risk assessment study. *Food and Chemical Toxicology*, 118, 480-489. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2018.05.063>
- Zainal, P. N. S., Alang Ahmad, S. A., Abdul Aziz, S. F. N., & Rosly, N. Z. (2022). Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: Occurrence, Electroanalysis, Challenges, and Future Outlooks. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 52(4), 878-896. <https://doi.org/10.1080/10408347.2020.1839736>

- Zhao, Z., Yin, Z., & Zhao, Q. (2017). Red and processed meat consumption and gastric cancer risk: A systematic review and meta-analysis. *Oncotarget*, 8(18), 30563-30575. <https://doi.org/10.18632/oncotarget.15699>
- Zhou, R.-Z., Jiang, J., Mao, T., Zhao, Y.-S., & Lu, Y. (2016). Multiresidue analysis of environmental pollutants in edible vegetable oils by gas chromatography–tandem mass spectrometry. *Food Chemistry*, 207, 43-50. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.03.071>



EKLER



Ek 1. PAH15+1 standart karışımına ait kromotogram