



ET VE ET ÜRÜNLERİNDE POLİSİKLIK AROMATİK HİDROKARBONLARIN OLUŞUM MEKANİZMALARI VE AZALTICI YAKLAŞIMLAR

Betül KARSLIOĞLU*

Hasan Kalyoncu Üniversitesi, Güzel Sanatlar ve Mimarlık Fakültesi, Gastronomi ve Mutfak Sanatları Bölümü,
Gaziantep, Türkiye

Geliş / Received: 16.04.2022; Kabul / Accepted: 17.11.2022; Online baskı / Published online: 24.11.2022

Karşlıoğlu, B. (2022). Et ve et ürünlerinde polisiklik aromatik hidrokarbonların oluşum mekanizmaları ve azaltıcı yaklaşımlar. *GIDA* (2022) 47 (6) 1032-1045 doi: 10.15237/ gida.GD22045

Karşlıoğlu, B. (2022). Formation mechanisms and reduction strategies for polycyclic aromatic hydrocarbons in meat and meat products. GIDA (2022) 47 (6) 1032-1045 doi: 10.15237/ gida.GD22045

ÖZ

Polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAH) et ve et ürünlerinin yüksek sıcaklıklarda pişirilmesi sonucu oluşan mutajenik ve kanserojenik bileşikler olup, bu bileşiklere maruz kalmanın en yaygın yolu diyet almıdır. Et ve et ürünlerinde yüksek miktarda oluşan bu PAH bileşiklerinin oluşumuna pişirme yöntemi, pişirme sıcaklığı, pişirme süresi, etin yağ içeriği gibi birçok faktör etkilidir. PAH bileşiklerinin oluşumu kaçınılmaz olmakla birlikte, oluşum mekanizmalarının bilinmesi oluşan PAH seviyelerinin azaltılması ve engellenmesi açısından önemlidir. Bu organik kirleticilerin sağlık üzerine olumsuz etkilerinin bulunması, gıdalarda bu bileşiklerin oluşumunun azaltılmasına veya engellenmesine dair stratejiler uygulanmasına neden olmaktadır. PAH oluşumunu azaltıcı yaklaşımlar ısı işlem sıcaklığının ve süresinin mümkün olduğunca düşürülmesi, alternatif pişirme yöntemlerinin kullanımı, pişirme yöntemlerinin modifikasyonu, marinasyon uygulaması, et ve et ürünlerinin kimyasal kompozisyonundaki değişiklikler gibi önlemleri kapsamaktadır. Bu çalışmada et ve et ürünlerinde PAH oluşum mekanizmaları ve oluşum düzeyinin azaltılmasına dair stratejilerin detaylı olarak açıklanması amaçlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Polisiklik aromatik hidrokarbon, et, PAH oluşum, sağlık, azaltma stratejileri

FORMATION MECHANISMS AND REDUCTION STRATEGIES FOR POLYCYCLIC AROMATIC HYDROCARBONS IN MEAT AND MEAT PRODUCTS

ABSTRACT

Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) are mutagenic and carcinogenic compounds formed as a result of cooking meat and meat products at high temperatures, and the most common way of exposure to these compounds is dietary intake. Many factors such as cooking method, cooking temperature, cooking time, fat content of meat are effective on the formation of these PAH compounds, which occur in high amounts in meat and meat products. The adverse effects of this organic contaminants on health have led to the development of strategies to reduce the formation of these compounds in foods. Approaches to reduce PAH formation include reducing the cooking temperature and time as much as possible, using alternative cooking methods, marination, changes in the chemical composition of meat and meat products. In this study, it was aimed to explain in

*Yazışmalardan sorumlu yazar / Corresponding author

✉: betul.kokay@hku.edu.tr

☎: (+90) 342 211 80 80

☎: (+90) 342 211 80 81

Betül Karşlıoğlu; ORCID no: 0000-0002-8956-4245

detail the mechanisms of PAH formation in meat and meat products and the strategies to reduce its formation level.

Keywords: Polycyclic aromatic hydrocarbons, meat, PAH formation, health, reduction strategies

GİRİŞ

İnsan beslenmesinde sağlık için önemli bir yeri olan et; mineral maddeleri, vitaminleri ve özellikle elzem amino asitleri ve yağ asitlerini yeterli miktarda yapısında bulundurmaktadır (Çiçek ve Bulgan, 2013; Zubariova vd., 2022). Ancak et, beslenme için elzem bir gıda maddesi olmakla birlikte, kanser gibi hastalıkların kaynağı da olabilmektedir. Son yıllarda yapılan birçok epidemiyolojik çalışmalarda et tüketimi ile kanser oluşum riski arasında pozitif bir korelasyonun söz konusu olduğu vurgulanmaktadır (Lourenço vd., 2018; Zhao vd., 2019; Knuppel vd., 2020; Farvid vd., 2021; Mota vd., 2021). Bu çalışmalara paralel olarak Uluslararası Kanser Araştırma Merkezi (IARC) ve Dünya Sağlık Örgütü (WHO) gibi birçok kuruluş tarafından da etin yüksek yağ içeriğine sahip oluşu, karsinojenik bir metal olan heme-demirini ve N-nitrozo bileşiklerini içermesi nedeniyle kırmızı et ve et ürünlerinin tüketiminin kanser oluşumuna sebep olduğu bildirilmiştir (Domingo ve Nadal, 2017).

Mikrobiyolojik güvenilirliğinin sağlanması ve organoleptik özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla et ve et ürünleri çeşitli yöntemlerle pişirilmektedir. Pişirme işlemi ile istenen değişikliklerin yanı sıra insan sağlığına potansiyel olarak tehlikeli olan polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAH)'lar gibi kimyasal kontaminantlar da oluşmaktadır (Nauta vd., 2018; Molognoni vd., 2019; Mota vd., 2021). Uluslararası Kanser Araştırma Merkezi, Dünya Sağlık Örgütü, Avrupa Gıda Güvenliği Otoritesi (EFSA), Avrupa Bilimsel Gıda Komitesi (SCF) gibi birçok kuruluş tarafından PAH bileşiklerinin mutajenitesi ve karsinojenitesi ile ilgili raporlar yayınlanmıştır. Ancak toksik etkisinin daha fazla olduğu düşünülen 15 PAH (benzo[a]antrasen (BaA), benzo[b]florenten (BbF), benzo[j]florenten (BjF), benzo[k]florenten (BkF), benzo[ghi]perilen (BgP), benzo[a]piren (BaP), krisen (CHR), cyclopenta[cd]piren (CPP), dibenzo[a,h]antrasen (DhA), dibenzo[a,e]piren (DeP), dibenzo[a,h]piren (DhP), dibenzo[a,i]piren (DiP), dibenzo[a,l]piren (DlP), indeno [1,2,3-

cd]piren (IcP) ve 5 metilkrisen (5MC) bileşiği SCF tarafından öncelikli kirlenici listesine alınmış ve bu bileşiklerin insanlar üzerinde potansiyel genotoksik ve karsinojenik etkili olduğu bildirilmiştir. Bu bileşikler içerisinde ise üzerinde en çok çalışılan ve gıdalarda PAH varlığının bir göstergesi olarak kabul edilen bileşik BaP olmuştur (Bella vd., 2020). Bununla birlikte gıdalarda BaP bileşiğinin indikatör olarak kullanımının tek başına yeterli olmadığı, PAH4 (BbF, BaA, BaP, CHR) ile birlikte değerlendirilmesi gerektiği belirtilmiştir (Sobral vd., 2018). Ayrıca bu raporlarda sağlık açısından risk taşıyan PAH bileşiklerine maruz kalınması sonucunda akciğer, mesane, özofagus, mide, pankreas ve prostat kanserine yakalanma riskinin yüksek olduğu da ifade edilmiştir (Jiang vd., 2018; Lu vd., 2018; Tarafdar vd., 2018; Farvid vd., 2021). Bu yüzden PAH bileşikleri insanlar, hayvanlar ve bitkiler için önemli bir risk kaynağıdır.

Isıl işlem kontaminantı PAH'lar; organik materyallerin eksik yanması sonucu ortaya çıkan uzun süre çevrede kalmaları ve birikmeleri sonucunda çevre kirliliğine neden olabilen ve biyolojik dengeyi bozabilen, oluşumu istenmeyen organik yapıdaki bileşiklerdir (Kılıç vd., 2017; El Hussein vd., 2018; Cachada vd., 2019; Bella vd., 2020). Doğada 100'ün üzerinde PAH bileşiği tespit edilmiş olup, hava, toprak, su gibi farklı ortamlarda veya tükettiğimiz birçok gıdada PAH'lar bulunmaktadır (Co ve Jn 2018). Bu bakımdan, besleyici değerleri ve gereklilikleri nedeniyle diyetle önemli bir yeri olan et ve et ürünleri, PAH maruziyeti açısından en fazla risk oluşturan grupta yer almaktadır. Isıl işlem görmüş etlerde oluşan PAH seviyeleri; pişirme yöntemi, pişirme sıcaklığı ve süresi, yakıt türü, gıdanın ısı kaynağına olan mesafesi ve yağ içeriği gibi çeşitli faktörlere bağlıdır (Gysel vd., 2018; Sobral vd., 2018; Jiang vd., 2018; Malarut vd., 2018; Tarafdar vd., 2018; Ghorbani vd., 2020; Kim vd., 2021a; Karşlıoğlu ve Kolsarıcı, 2022). PAH bileşiklerinin en önemli alım kaynaklarından biri olan et ve et

ürünlerinde oluşum mekanizmasının incelenmesi, oluşan PAH miktarının azaltılması veya engellenmesi sağlık açısından önemlidir. Et ve et ürünlerinde PAH oluşum mekanizmaları ve azaltıcı yaklaşımların araştırılması ile ilgili çalışmaların sınırlı sayıda olması nedeniyle, bu literatür çalışmasında, PAH bileşiklerinin oluşumunda rol oynayan mekanizmalar ile azaltıcı stratejiler ile ilgili çalışmalar hakkında bilgi verilmesi amaçlanmıştır.

PAH'LARIN OLUŞUM MEKANİZMASI

PAH'lar, organik maddelerin eksik yanması sonucu ve çeşitli endüstriyel kaynaklardan çevreye yayılan serbest radikallerden oluşan iki veya daha fazla aromatik halka içeren organik kirleticilerdir (Rozantele vd., 2018; El Hussein vd., 2021; Portet-Koltalo vd., 2020; Rekanovic vd., 2021). Bu kirleticiler esasen sadece karbon ve hidrojen atomu bulunan iki veya daha fazla benzen halkasının lineer, açılabilir veya küme halinde düzenlenmesi ile meydana gelen kimyasal bileşiklerdir (Onopiuk vd., 2021, Hamidi vd., 2022).

PAH bileşikleri lipofilik, yüksek erime ve kaynama noktası ile düşük buhar basıncına sahip, yüksek moleküler ağırlıklı organik maddeler için yüksek afinite gösteren, kimyasal olarak kararlı, apolar, düşük uçuculuğa sahip, hidroliz yoluyla zayıf bir şekilde parçalanabilen, hidrofobik yapılarından dolayı sudaki çözünürlükleri az ve organik asitlerde veya organik çözücülerde ise kolayca çözünebilen yapıdadır (Kataoka ve Ishizaki 2013, Abdel-Shafy ve Mansour 2016).

PAH'ların çevreye yayılımlarında sudaki çözünürlükleri, buhar basınçları, uçuculukları, kimyasal reaktivitesi, biyotik ve abiyotik parçalanabilirliği, oktanol-su ayrılma katsayısı (Kow), organik karbon ayrılma katsayısı (Koc) gibi birçok fiziksel ve kimyasal faktör etkilidir (Abdel-Shafy ve Mansour 2016; Pirsahab vd., 2018). Bu faktörler arasında Kow bileşiğin sudan lipide geçiş potansiyelini, Koc ise bileşiğin toprakta bulunan organik karbon üzerine adsorblanma potansiyelini gösteren katsayıdır. Ayrıca PAH'ların oluşum mekanizmasını kavrayabilmek ve PAH bileşiklerinin yapıları hakkında daha fazla bilgi

sahibi olmak için bu bileşiklerin davranış ve reaksiyon kinetiği, oluşum entalpileri gibi termokimyasal değerlerin bilinmesi de mekanizmayı anlamaya yardımcı olan verilerdir (Roux vd., 2008).

PAH bileşiklerinin oluşumunu önlemek veya azaltmak için, bu bileşiklerin oluşum mekanizmalarının tam olarak anlaşılması gerekmektedir. PAH oluşumu ile ilgili pek çok varsayım mevcuttur. PAH oluşumunun kesin mekanizması tam anlamı ile açıklanamamış olmakla birlikte, pirosentez ve pirolizin PAH oluşumuna neden olan iki baskın mekanizma olduğu düşünülmektedir (Grochowicz vd., 2019; Ghorbani vd., 2020). Genel olarak düşük molekül ağırlıklı hidrokarbonlar, pirosentezle PAH'ları oluştururken (Chen ve Chen 2001), yakıt ve bitki materyallerinde bulunan yüksek molekül ağırlıklı alkanlar, piroliz yoluyla PAH'ları oluşturmaktadırlar (Ekaye vd., 2019). Ancak bazı araştırmacılar PAH oluşumunda bu iki baskın yol dışında serbest radikal reaksiyonlarının intramoleküler katılma veya küçük moleküllerin polimerizasyonu mekanizmalarının da rol oynadığını raporlamışlardır (Wongmaneepratip vd., 2019).

Genel olarak gıdadaki PAH bileşiklerinin en önemli oluşum kaynağı yanma prosesidir. PAH oluşumunun birçok önemli detayı anlaşılabilmiş olmasına rağmen, yanma prosesinin genel özellikleri ile ilgili birçok önemli nokta aydınlatılmıştır. PAH oluşumundaki ilk aromatik halka benzen kabul edilmekle birlikte, bazı reaksiyonlar aromatiklerin benzen olmadan da oluşabileceğini kanıtlamıştır (Kataoka ve Ishizaki, 2013; Reizer vd., 2019). En çok bilinen PAH oluşum mekanizmaları hidrojen ayrılması ve asetilen (C_2H_2) ilavesi olarak bilinen HACA mekanizması ve Diels-Alder reaksiyonlarıdır (Richter ve Howard, 2000; Basu, 2010; Kislov vd., 2013; Liu vd., 2015; Yang vd., 2017; Onopiuk vd., 2021). Ancak bununla birlikte henüz bilinmeyen ve PAH oluşumuna katkısı olduğu düşünülen diğer birçok alternatif oluşum mekanizmaları da söz konusudur (Reizer vd., 2019). Yanma süreci sırasında kullanılan yakıtın cinsi ve miktarı, sıcaklığı, yanma süresi ve oksijenin bulunabilirliği

gibi birçok faktör PAH'ların oluşum mekanizmasını ve yapısını belirlemektedir (Han vd., 2020). Ayrıca biyokütlenin dönüşümü sırasında hücre duvarı bileşenleri (hemiselüloz, selüloz ve lignin) ve ağır metal içeriği de PAH oluşumunda etkilidir (Basu 2010).

Araştırmacılar tütsülenmiş ve ızgara et ürünlerinde PAH oluşumunun üç farklı mekanizmasından bahsetmişlerdir (Onopiuk vd., 2021; Molognoni vd., 2019).

- a) Yağ ve proteinler başta olmak üzere organik maddelerin pirolizi veya pirosentezi
- b) Pişirilen etteki suyun ve/veya yağın ısı kaynağı üzerine düşmesi
- c) Yakıt olan organik maddenin (odun, kömür) tam yanmaması

PAH bileşikleri ete çeşitli kaynaklardan (toprak, su, hava vb.), kullanılan baharat vb. ingrediyelemler aracılığıyla ve gıda işleme yöntemlerinden (pişirme, tütsüleme, kurutma vb.) kontamine olabilmektedirler. Et ve et ürünlerinin pişirilmesi sırasında gerçekleşen yanma prosesinde odunun kurumaya başlaması ile beraber alevin bazı kısımlarında piroliz başlamakta ve aleve en yakın kısımlarda ise tam yanma meydana gelmektedir (Ledesma vd., 2016). Bu aşamada oluşan katran, aerosoller vasıtasıyla etin yüzeyinin kontamine olmasına ve PAH bileşiklerinin etin içine nüfuz etmesine neden olmaktadır (Purcaro vd., 2009). Bununla birlikte, etlerin kömür ateşinde pişirilmesi esnasında yağların eriyerek sıcak kömür üzerine düşmesi ile uçucu PAH bileşikleri oluşmakta ve böylelikle duman içeriğindeki PAH konsantrasyonu da artış göstermektedir (Ledesma vd., 2016). Oluşan bu uçucu PAH bileşikleri dumanlanma arttıkça gıdanın yüzeyinin daha çok kontamine olmasına yol açmaktadır (Kılıç vd., 2017). Sonuç olarak etlerin yüksek sıcaklıkta (200 °C ve üzeri) pişirilmesi sırasında oluşan serbest radikaller, hidrofobik gıda zincirine taşınarak önce hafif PAH bileşiklerini ardından ağır PAH bileşiklerini oluşturmak için rekombinasyona uğrarlar ve sonunda lipit açısından zengin gıda maddelerinde birikmektedirler (Singh vd., 2016).

ET VE ET ÜRÜNLERİNDE PAH BİLEŞİKLERİNİN OLUŞUMUNU AZALTICI VEYA ENGELLEYİCİ YAKLAŞIMLAR

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. PAH bileşiklerinin oluşum düzeyi uygulanan pişirme yöntemi, pişirme süresi, pişmişlik derecesi, gıdanın ısı kaynağına olan mesafesi, kullanılan yanıcı türü ve sıcaklığına bağlı olmakla birlikte, hayvanın cinsiyeti, ısı işlem gören etin türü (dana, domuz, kanatlı eti vb.), oksijene erişilebilirlik, etin nem ve yağ içeriği (doymamışlık derecesi) gibi faktörler ile baharat, doğal ve yapay antioksidan varlığı gibi etmenlere bağlıdır (Jiang vd., 2018; Haiba vd., 2021; Sampaio vd., 2021; Rekanovic vd., 2021; Hamidi vd., 2022). Bütün bunlara ilaveten kullanılan et türünün kimyasal kompozisyonu, mozaik yapısı, miyogloblin içeriği; pişirmede kullanılan kömürün veya odunun tipi, karbon içeriği, karbonizasyon sıcaklığı, etin su içeriği, su aktivitesi, pH değeri, öncü amino asitlerin ve şekerlerin varlığı, yüzey/kütle oranı, pişirme işlemi sırasında etin bir veya birden fazla alt-üst edilmesi, döndürülmesi vb. bir çok faktörün de etkili olduğu belirtilmektedir (Kamal vd., 2018; Karlıoğlu ve Kolsarıcı 2022; Pouzou vd., 2018; Wang vd., 2019; El Hussein vd., 2018; Kim vd., 2021a).

Et ve et ürünlerinde PAH oluşumunu azaltıcı veya engelleyici yaklaşımlar ile ilgili çeşitli çalışmalar Çizelge 1'de özetlenmiştir. Pişirme koşulları bu kirleticilerin oluşumunu etkileyen en önemli parametrelerden biri olmasından dolayı, doğru pişirme yönteminin seçimi, kontrollü pişirme işleminin yapılması, doğrudan alev üzerinde pişirmeden ve oluşan dumandan kaçınmak, damlayan yağın uzaklaştırılması veya yağın yanmasını önlemek, çok yüksek sıcaklıklarda pişirmemek, ateşi tutuşturmak için çıra vb. ürünlerinin kullanılmaması, ısı kaynağı ile olan mesafe seçimi ile PAH oluşumunun

B. Karslıoğlu

azaltılabileceği araştırmalarda gösterilmiştir. Ayrıca yapılan çalışmalarda; pişirme 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 (El Badry, 2010; Farhadian vd., 2011; Tkacz vd. 2012).

Çizelge 1. Et ve et rnlerinde PAH oluşumunu azaltıcı veya engelleyici yaklaşımlara ilişkin alışmalar

Et ve et rnleri	Uygulanan strateji	İncelenen PAH bileşikleri	Elde edilen bulgular	Kaynak
Izgarada pişirilmif tавuk ve dana eti	n pişirme işlemi (mikrodalga ve buhar ile) ve sarma (Muz yaprağı ve alüminyum film kullanımı)	BaP, BbFln ve Fln	Her iki et türünde de buharla ve mikrodalgayla n pişirme veya alüminyuma sarmanın BaP ve BbFln bileşiklerini azaltmada etkili olduğu; tavuk etlerinde alüminyuma sarmanın n pişirme uygulamasına göre daha fazla azaltıcı etkisinin olduğu tespit edilmiştir.	Farhadian vd., 2011
Izgarada pişirilmif dana eti	7 farklı formülasyonda marinasyon işlemi (Klasik marinasyon; Klasik+yağ ilaveli; Klasik+yağ+ limon suyu ilaveli; Klasik+limon suyu ilaveli; Klasik+yağ+demirhindi ilaveli; Ticari+ Demirhindi ilaveli ve 4 farklı marinasyon süresi (0, 4, 8 ve 12 saat))	BaP, BbFln ve Fln	% 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	Alternatif pişirme yöntemi (ohmik n pişirme ve farklı sıcaklıklarda infrared pişirme)	BaP ve PAH4	Ohmik n pişirme ve ardından infrared pişirmenin PAH4 oluşumunu azalttığını belirtmişlerdir.	Kendirci vd., 2014
Izgarada pişirilmif domuz eti	Bira marinatlarının kullanımı (siyah bira, alkolsüz bira, geleneksel bira)	BaA, BaP, Ch, BbF, BkF, DbA, BgP, IP ve PAH 8	Marinasyon sosuna siyah bira ilavesinin PAH8 oluşumunun engellenmesinde en etkili marinat olduğu bulgulanmıştır.	Viegas vd., 2014
Dana ve tavuk köfte	4 farklı marinat kullanımı (sarımsak, soğan, zencefil, karabiber)	BaA, BaP ve toplam PAH	Zencefil tozunun hem dana hem de tavuk köftelerinde toplam PAH'ların oluşumunu % 97.9 oranında engelleyen tek baharat olduğu tespit edilmiştir.	Lu vd., 2018

Çizelge 1. devam

Tütsülenmiş sazan balığı	Farklı tütsüleme filtrelerinin kullanımı (filtresiz, zeolit, granül aktif karbon ve gravel filtre)	Toplam PAH	Filtre tütsülenen örneklerine zeolit filtre toplam PAH önemli ölçüde azalttığı tespit edilmiştir.	kullanılmadan sazan balığı göre, özellikle kullanımının oluşumunu azalttığı tespit	Babic vd., 2018
Kömürde ızgara edilmiş tavuk kanat eti	Fenolik asit kullanımı (protokatesik asit, gallik asit ve ferulik asit) ve farklı pişirme sıcaklıkları uygulaması (210°C, 240°C, 270 °C)	BaA, BaP, Ch, BbF, BkF, DbA, BgP, IP ve PAH8	Marinasyon işleminin PAH oluşumuna inhibitör etkisinin farklı sıcaklık uygulamasından daha etkili olduğu bulunmuştur.		Wang vd., 2019
Izgarada pişirilmiş domuz eti	Marinasyon sosuna diallil disülfid ve kuversetin ilavesi	BaP, PAH4, PAH16	Marinasyon sosuna diallil disülfid ilavesinin PAH oluşumunu %100 azalttığı, ağır PAH bileşiklerini ise %80 oranında azalttığı bulgulanmıştır.		Wongmaneepratip vd., 2019
Kömürde ızgara edilmiş domuz eti	5 farklı sirke (kara mürver, beyaz şarap, kırmızı şarap, elma, ahududulu elma sirkesi) ile marinasyon uygulaması	BaA, BaP, Ch, BbF ve PAH4	Pişirmeden önce püskürtülen sirke çeşitlerinden en fazla inhibisyon sağlayanın kara mürver sirkesi olduğu ve ete sirke püskürtmenin inhibisyon açısından doğru bir strateji olduğu kanısına varmışlardır.		Corderio vd., 2020
Izgarada pişirilmiş tavuk baget	Pişirme yöntemi (kömürlü ve elektrikli) ve farklı çay marinatlarının kullanımı	BaA, BaP, Ch, BbF ve PAH4	Elektrikli ızgarada pişirmenin ve beyaz çay marinatu kullanımının BaP oluşumunu daha fazla önlediğini belirlemişlerdir.		Yao vd., 2020
Kömürde ızgara edilmiş domuz eti	Marinasyon sosuna kore tipi kırmızı biber (Gochujang) ilavesi ve iki farklı pişirme süresi uygulaması (Orta ve çok pişmiş)	BaA, BaP, Ch, BbF PAH4 ve PAH 16	Gochujang ile marine edilmiş örneklerin 71°C'de ızgara yapılmasının, toplam PAH oluşumunu azaltabileceği bulunmuştur.		Kim vd., 2021b
Sodyumu azaltılmış domuz pastırma	6 farklı formülasyonda kalsiyum klorür, magnezyum klorür, potasyum laktat ve kalsiyum laktat tuzlarının ikame kullanımı	BaA, BaP, Ch, BbF ve PAH4	Sodyumu azaltılmış et ürünlerinde ikame tuzların kullanımının PAH oluşumunu engellediği bulgulanmıştır.		Li vd., 2021
Izgarada pişirilmiş domuz eti	Çeşitli bitki ekstraktlarının (yaprak, karabiber, zerdeçal, jalapeno biberi ve demirhindi) kullanımı	BaA, BaP, Ch, BbF PAH4 ve PAH 16	Jalapeno biberi ekstraktı ile marine etmenin PAH seviyeleri üzerinde önemli bir azaltıcı etkiye sahip olduğu gözlenmiştir.		Onopiuk vd., 2022

Marinasyon uygulaması

Etin pişirilmeden önce bir çeşni karışımı içinde marine edilmesi, lezzetini, aromasını ve/veya tekstürünü geliştirmek için kullanılan yaygın bir uygulamadır. Marinasyon işleminin, kullanılan marinatların içeriğine göre PAH oluşumu üzerine olumlu ve olumsuz etki mekanizmaları bulunmaktadır. Çalışmalarda pişirme işlemi öncesi, etlere uygulanan farklı marinasyon uygulamasının ve marinasyon bileşimine bazı bileşenlerin ilavesinin pişmiş etlerde PAH oluşumunu veya konsantrasyonunu azaltmada oldukça etkili olduğu gösterilmiştir (Molognoli vd., 2019; Büyükkurt vd., 2020; Wang vd., 2021; Duedahl-Olesen ve Ionas, 2022).

Yapılan çalışmalarda etlerin soğan, sarımsak, çay, kırmızı şarap posası, bira, salamura, sirke, ve çeşitli baharatların marinasyon sosuna ilave edilmesinin PAH miktarının azaltılmasında etkili katkı maddeleri olduğu bildirilmektedir. Bununla birlikte fenolik bileşikler açısından zengin bileşiklerle marine edilmesinin ve/veya marinasyon sosuna bazı antioksidanların (diallil disülfid, tert-butyl-hydroquinone-TBHQ vb.) ilavesinin de PAH oluşum seviyelerini azaltmaya yardımcı bileşikler olduğu belirtilmiştir (Wang vd., 2019, Wongmaneepratip vd., 2019). Bu nedenle, et ürünlerine antioksidanların ilave edilmesi, pişmiş et ürünlerinde PAH seviyesini azaltmada etkili bir yol olarak kabul edilmiştir (Lu vd., 2018). Ayrıca bazı marinatların (alkali veya asidik marinat) ilavesi ile gıdanın kimyasal yapısının değiştirilmesi yoluyla da PAH oluşumunun azaltılabileceği ifade edilmiştir (Farhadian vd., 2012).

PAH oluşum mekanizmasında serbest radikal oluşumu nedeniyle antioksidanlar bu serbest radikalleri tutarak PAH oluşumunu azaltabilmektedir. Soğan, sarımsak, kırmızıbiber, zencefil ve karabiberin 180 °C'de derin yağda kızartılmış dana ve tavuk köftelerine eklenmesi ile PAH inhibisyonu arasındaki ilişki incelendiğinde, zencefilin hem sığır hem de tavuk köftelerinde toplam PAH'ların oluşumunu %97.93 oranında engelleyen tek baharat olduğu tespit edilmiştir (Lu vd. 2018). Bu çalışmaya paralel olarak, domuz eti ve domuz et sularında PAH oluşumu üzerine soğan ve sarımsağın etkileri araştırılmış, soğanın

toplam PAH içeriğini tavada kızartılan etlerde ortalama %60, et sularında ise %90'nın üzerinde azalttığı; sarımsağın ise tavada kızartılan etlerde konsantrasyonu %54, et sularında ise %13.5-79 oranında azalttığı bildirilmiştir (Janoszka 2011). Wongmaneepratip ve Vangnai (2017) ızgarada pişirilmiş tavuk etine sitrik asit ve sodyum bikarbonat ilave ederek PAH düzeyini azaltma etkinliğini inceledikleri çalışmada, sitrik asit ilaveli asidik marinatın PAH düzeylerinde özellikle BbF ve BaP konsantrasyonunu önemli ölçüde azalttığını ortaya koymuşlardır.

Marinasyon işleminin veya marinat kullanımının engelleyici etkisinin genellikle PAH'ların ara ürünleri olan serbest radikal ürünlerinin oluşumunda azalmaya yol açması sayesinde olduğu belirtilmektedir. Ancak marinasyon işleminin veya marinat kullanımının PAH oluşumunu engellemede tek başına etkili olmadığı, PAH oluşumunu etkileyen faktörlerin oldukça değişken olması nedeniyle diğer faktörlerle birlikte modifiye edilmesinin PAH düzeyini azaltmada daha etkili olacağı vurgulanmıştır (Duedahl-Olesen ve Ionas, 2022).

Pişirme koşulları

Et ve et ürünleri haşlama, kızartma, ızgara, barbekü, tütsüleme gibi birçok yöntemle pişirilebilmekte ve bütün pişirme yöntemlerinin farklı seviyelerde PAH oluşumuna neden olduğu bilinmektedir. Son yıllarda yapılan çalışmalarda, tütsüleme, ızgarada pişirme ve kızartma işlemlerinin yüksek düzeyde PAH oluşumuna sebep olduğu, pişirme yöntemi seçiminin, pişirme koşullarının modifikasyonu veya alternatif pişirme yöntemlerinin kullanımı (ohmik, mikrodalga, infrared pişirme yöntemleri vb.) ile PAH oluşumunun azaltılabileceği rapor edilmiştir (Singh vd. 2016). Cheng vd. (2019) ızgarada pişirilmiş etin PAH seviyesinin pişmemiş haliyle kıyasladıkları çalışmalarında, pişirme işleminin 3.43 kat daha fazla PAH oluşumuna neden olduğunu tespit etmişlerdir. Yine benzer şekilde Chung vd. (2011) mangalda pişirilmiş sığır ve domuz etinin kavurma yöntemine göre daha fazla PAH oluşumuna neden olduğunu bulgulamışlardır. Lee vd. (2016) etin pişirilmesi sırasında damlayan yağı bir beher içinde toplamak

suretiyle pişirme süresince oluşabilecek toplam PAH konsantrasyonunun %89'a kadar azaltılabileceğini ortaya koymuşlardır.

PAH oluşumunu azaltmak amacıyla kullanılan alternatif pişirme yöntemlerinden biri olan ohmik pişirme yöntemiyle yapılan bir çalışmada, üç farklı voltaj gradyanı kullanarak pişirilmiş sığır köftelerinin BaP seviyelerinin sırasıyla 0.10 ppb, 0.09 ppb ve 0.09 ppb olduğu bildirilmiştir (İcier vd., 2014). Bu çalışmaya benzer başka bir çalışmada ise; ohmik ön pişirme uygulanan köftelere infrared pişirmenin etkileri incelenmiş, toplam PAH seviyelerinin kabul edilebilir seviyelerde (4.47 ile 64 µg/kg) olduğu ve ohmik ön pişirme ardından infrared pişirme yöntemlerinin PAH oluşum düzeyi açısından güvenli bir pişirme işlemi olarak kabul edilebileceği belirtilmiştir (Kendirci vd., 2014). Bu noktadan hareketle, PAH'ların azaltılmasında en önde gelen yaklaşım gıdaların doğrudan ısı kaynağına maruz bırakılmaması, yanı sıra indirekt pişirme yöntemleri kullanılarak pişirilmesi, pişirme sıcaklığı ve/veya pişirme süresinin azaltılması, buhar ve mikrodalga ile ön ısıtma gibi alternatif pişirme yöntemlerinin gıdaların hazırlanmasının ilk aşamasına dahil edilmesi ve pişirme sırasında ortaya çıkan duman kontaminasyonunun engellenmesi olmuştur.

Kaplama/Sarma

Gıdaların PAH seviyelerini azaltmanın bir diğer yolunun ise ürünün herhangi bir materyale sarılması veya kaplanması olduğu ifade edilmiştir. Araştırmacılar gıdayı herhangi bir ambalaj materyali ile kaplamanın bariyer oluşturmak ve eriyen yağın ısı kaynağı üzerine düşmesini engellemek suretiyle PAH oluşumunu önemli ölçüde azalttığını bildirmişlerdir. (Wang vd. 2021). Ayrıca kaplama/sarma için kullanılan malzemenin gözeneklerinin boyutu, polaritesi ve geçirgenlik özelliğinin de PAH migrasyonunda belirleyici olduğu bildirilmiştir (Fasano vd., 2016; Semanová vd., 2016; Kuźmicz ve Ciemniak vd., 2018). Yapılan bir çalışmada düşük yoğunluklu polietilen lamine film bazlı plastik ambalaj kullanımının kavrulmuş ördekte PAH oluşumunu (BaA, BbFA ve BaP) %50 oranında azalttığı bulgulanmıştır

(Semanova vd., 2016). Araştırmacılar bu durumu, polarite özellikleri ile ilişkilendirmişlerdir. Yine benzer bir çalışmada tütülenmiş hamsi örneklerinin 4 farklı plastik ambalaj materyaline sarılmak suretiyle PAH adsorbsiyonları incelenmiş ve en yüksek adsorbsiyonu yüksek yoğunluklu polietilen ambalaj materyalinin, en düşük adsorbsiyonu ise polietilen tereftalat materyalinin gösterdiği ortaya konmuştur (Kuźmicz ve Ciemniak vd., 2018). Ancak araştırmacılar et örneğinin, PAH bileşiklerine benzer bir polariteye sahip olduğunda veya kullanılan ambalaj materyalinden daha fazla polariteye sahip olduğunda, kullanılan materyalin PAH'ları gıdadan uzaklaştırmada yetersiz kalabileceğini de vurgulamışlardır (Kuźmicz ve Ciemniak vd., 2018).

Yapılan başka bir çalışmada PAH kontaminasyonunu engellemek amacıyla et örnekleri buhar ve mikrodalga ile bir ön ısıtmanın ardından alüminyum ve muz yaprağına sarılarak kömür ateşinde pişirilmiş, ön ısıtma ve sarma işlemleri yapılan örneklerde BaP, BbF ve FlN bileşikleri tespit edilmemiştir (Farhadian vd., 2011). Bu çalışmaya paralel olarak, mangalda pişirilen sığır ve koyun etlerinde toplam PAH seviyeleri 6.83 µg/kg ve 26.82 µg/kg olarak tespit edilirken, alüminyum kaplanarak mangalda pişirilen sığır ve koyun etlerinde 1.26 µg/kg ve 6.29 µg/kg olarak belirlenmiştir (Eldaly vd., 2016). Domuz etiyle yapılan başka bir çalışmada ise, alüminyum tepsi içinde pişirilmiş marine edilmiş domuz bifteğinde hem marinasyon işlemi hem de tepsi kullanımı ile BaP konsantrasyonunun %81 ile %92.8 arasında azaldığı görülmüştür (Tkacz vd., 2012).

Diğer uygulamalar

Tütülenmiş et ürünlerinde kullanılan kılıf tipi (doğal veya sentetik kılıf), tütüleme metodu (direkt veya indirekt) ve tütüleme sıcaklığı vb. seçimlerin de PAH oluşumun da etkili olduğu bildirilmiştir (Onopiuk vd., 2021). Tütülenmiş et ürünlerinde kullanılan kılıf, PAH oluşum seviyesini etkileyebilecek en önemli malzemedir. Araştırmacılar tarafından tütülenmiş et ürünlerinde doğal kılıf kullanımına kıyasla sentetik kılıf kullanımının daha iyi bariyer oluşturması

nedeniyle daha az PAH oluşumuna neden olduğu tespit edilmiştir (Wang vd., 2021).

Youssef vd., (2016) koyun kılıfı yerine selüloz kılıf seçiminin PAH oluşumunu %78 oranında azalttığını saptamışlardır. Bazı araştırmacılar, PAH bileşiklerinin %90'lık bir kısmının sosis kılıflarının yüzeyinde birikmesinden dolayı, tüketimden önce, kılıfların çıkarılarak tüketilmesinin PAH maruziyetini azalttığını vurgulamışlardır (Gomes vd., 2013). Tütsülenmiş et ürünlerinde PAH maruziyetini azaltmanın diğer bir yolunun ise, son tüketimden önce bu ürünlerin su ile yıkanması olduğu belirtilmiştir. Mahugija ve Njale (2018) tütsülenmiş balıkların su ile yıkanmasının ardından tüketilmesinin %31.5'dan %86.5'a kadar PAH düzeyini azalttığını ortaya koymuşlardır. Ayrıca araştırmacılar tütsülenmiş et ürünlerinin tütsülenmesinde indirekt bir tütsüleme yönteminin seçiminin ve proses esnasında tütsü dumanının karbon filtreden geçirilmesinin PAH oluşumunu önemli ölçüde azalttığını da belirlemişlerdir (Gomes vd., 2013; Pöhlmann vd., 2013; Babic vd., 2018; Mahugija ve Njale, 2018).

Bununla birlikte PAH konsantrasyonunu azaltan diğer bir stratejinin ise doğal mikroorganizma populasyonları tarafından biyolojik olarak parçalanmaları yoluyla olduğu ifade edilmiştir (Sampaio vd., 2021). Yayımlanmış çalışmalardan hareketle, hem toprak hem de deniz ortamlarında en önemli hidrokarbon-parçalayan bakterilerin *Achromobacter*, *Acinetobacter*, *Alcaligenes*, *Arthrobacter*, *Bacillus*, *Flavobacterium*, *Nocardia*, *Pseudomonas* ve *Korineformlar* oldukları tespit edilmiştir (Demir ve Demirbağ, 1999).

SONUÇ

Günümüzde oldukça yüksek tüketim oranına sahip et ve et ürünlerinde PAH bileşiklerinin oluşumu önemli bir problemdir. Bu bileşiklerin kanser etiolojisinde önemli rol oynaması et ve et ürünlerinde oluşumunun azaltılması veya önlenmesini zorunlu hale getirmiştir. Son yıllarda yapılan araştırmalarda PAH oluşumunu azaltıcı yaklaşımlar ile ilgili çalışmalar yapılmış, doğru pişirme yöntemlerinin seçimi, daha düşük sıcaklıklarda ve daha uzun sürede pişirme, etin

direkt alevle temasının engellenmesi, az yağlı et tercihi, uygun yakıt ve ısı kaynağının seçimi, erimiş yağın ısı kaynağından uzaklaştırılması, baharat, doğal veya sentetik antioksidan ilavesi vb. uygulamaların PAH'ların oluşumunu önemli düzeyde azaltan stratejiler olduğu görülmüştür. Bu nedenle etin ateşle temasını engellemek amacıyla indirekt yöntemlerle pişirilmesi, düşük sıcaklıklarda pişirme işleminin yapılması, yağlı, fazla pişmiş et tüketilmemesi veya etin kömürleşmiş kısmının ayrılması önerilmektedir. Tüm bu nedenler göz önünde bulundurulduğunda et ve et ürünlerinde, PAH oluşum mekanizmasının incelenmesi ve oluşumu engelleyici veya azaltıcı yaklaşımların bilinmesi büyük bir önem teşkil etmektedir.

KAYNAKLAR

- Abdel-Shafy, H. I., Mansour M. S. M. (2016). A review on polycyclic aromatic hydrocarbons: Source, environmental impact, effect on human health and remediation. *Egyptian Journal of Petroleum*. 25: 107–123.
- Babic, J., Vidakovic, S., Skaljac, S., Kartalovic, B., Ljubojevic, D., Cirkovic, M. Teodorovic, V. (2018). Reduction of polycyclic aromatic hydrocarbons in common carp meat smoked in traditional conditions. *Food Additives & Contaminants: Part B*, 11(3): 208-213.
- Basu, P. (2010). Biomass gasification and pyrolysis practical design and theory. 3- 364.
- Bella, C. D., Traina, AN., Giosuè, C., Carpintieri, D., Dico, G. M. L., Bellante, A., Core, M. D., Falco, F., Gherardi, S., Uccello, M. M., Ferrantelli, V. (2020). Heavy metals and PAHs in meat, milk, and seafood from augusta area (Southern Italy): contamination levels, dietary intake, and human exposure assessment. contaminants in foodstuff and human exposure, *Frontier Public Health*, 8: 1-16.
- Büyükkurt, Ö. K., Dinçer, E. A., Çam, İ. B., Candal, C., Erbaş, M. (2020). The influence of cooking methods and some marinades on polycyclic aromatic hydrocarbon formation in beef meat. *Polycyclic Aromatic Compounds*, 40 (2): 195-205.

- Cachada, A., Dias, A. C., Reis, A. P., Silva, E. F., Pereira, R., Duarte, A. C., Patinha, C. (2019). Multivariate analysis for assessing sources, and potential risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in Lisbon urban soils. *Minerals*, 9: 139.
- Chen B.H., Chen Y.C. (2001). Formation of polycyclic aromatic hydrocarbons in the smoke from heated model lipids and food lipids. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49: 5238-5243.
- Cheng, J., Zhang, X., Ma, Y., Zhao, J., Tang, Z. (2019). Concentrations and distributions of polycyclic aromatic hydrocarbon in vegetables and animal-based foods before and after grilling: Implication for human exposure. *Science of the Total Environment*, 690: 965–972.
- 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: 1420-1426.
- Co, E and JN, O. (2018). Assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in hardwood and softwood - smoked fish. *International Journal of Animal Science*, 2 (1): 1012.
- Cordeiro, T., Viegas, O., Silva, M., Martins, Z. E., Fernandes, I., Ferreira, I. M. L. P. V. O., Pinho, O., Mateus, N., Calhau, C. (2020). Inhibitory effect of vinegars on the formation of polycyclic aromatic hydrocarbons in charcoal-grilled pork. *Meat Science*, 167: 108083.
- Çiçek, Ü., Bulgan, A. (2013). Et ve et ürünlerinde heterosiklik aminler. *Gaziosmanpaşa Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 1: 25-32.
- Demir, İ., Demirbağ, Z. (1999). Polisiklik aromatik hidrokarbonların biyolojik olarak parçalanması. *Turkish Journal of Biology*, 23: 293–302.
- Domingo, J. L., Nadal, M. (2017). Carcinogenicity of consumption of red meat and processed meat: A review of scientific news since the IARC decision. *Food and Chemical Toxicology*, 105: 256-261.
- Duedahl- Olesen, L., Ionas, A. C. (2022). Formation and mitigation of PAHs in barbecued meat -A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1867056>.
- El Badry, N. (2010). Effect of household cooking methods and some food additives on polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) formation in chicken meat. *World Applied Science Journal*, 9: 963–74.
- Eldaly, E. A., Hafez, A.E., Darwish, W.S. and Elmalt, D. (2016). Effect of Heat Treatments on Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Formation in Meat. *Zagazig Veterinary Journal*, 44(3): 263-272.
- Ekaye, S., Osazee, E. N., Osaro, A. C. (2019). Levels of PAHs in commonly consumed barbecued chicken and grilled meat (Suya) in benin metropolis. *Journal of the Nigerian Society for Experimental Biology*, 19(3): 117-126.
- El Husseini, M., Makkouk, R., Rabaa, A., Al Omar, F., Jaber, F. (2018). Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH 4) in the traditional lebanese grilled chicken: implementation of new, rapid and economic analysis method. *Food Analytical Methods*, 11: 201–214.
- El Husseini, M., Mourad, R., Rahim, H. A., Al Omar, F and Jaber, F. (2021). Assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH4) in the traditional lebanese grilled meat products and investigation of broasted frying cooking method and meat size on the PAH4 formation. *Polycyclic Aromatic Compounds*, 41(1):124-142.
- Farhadian, A., Jinap, S., Hanifah, H.N and Zaidul, L.S. (2011). Effects of meat preheating and wrapping on the levels of polycyclic aromatic hydrocarbons in charcoal-grilled meat. *Food Chemistry*, 124: 141-146.
- 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: 420-442.
- Farvid, M. S., Sidahmed, E., Spence, N. D., Angua, K. M., Rosner, B. A., Barnett, J. B. (2021). Consumption of red meat and processed meat

- and cancer incidence: a systematic review and meta-analysis of prospective studies. *European Journal of Epidemiology*, 36: 937–951.
- Fasano, E., Yebra-Pimentel, I., Martinez-Carballo, E., Simal-Gandara, J. (2016). Profiling, distribution and levels of carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons in traditional smoked plant and animal foods. *Food Control*, 59: 581–590.
- Ghorbani, M., Saleh, H. N., Barjasteh-Askari, F., Nasser, S., Davoudi, M. (2020). The effect of gas versus charcoal open flames on the induction of polycyclic aromatic hydrocarbons in cooked meat: a systematic review and meta-analysis. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 18: 345–354.
- Gomes, A., Santos, C., Almeida, J., Elias, M., Roseiro, L. C. (2013). Effect of fat content, casing type and smoking procedures on PAHs contents of Portuguese traditional dry fermented sausages. *Food and Chemical Toxicology*, 58: 369–374.
- Grochowicz, J. (2019). Chemical threats in thermally processed traditional food and possibilities of their reduction. *Agricultural Engineering*, 23 (1): 39–47.
- Gysel, N., Dixit, P., Schmitz, D. A., Engling, G., Cho, A. K., Cocker, D. R., Karavalakis, G. (2018). Chemical speciation, including polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), and toxicity of particles emitted from meat cooking operations. *Science of the Total Environment*, 63: 1429–1436.
- Haiba, N. S., Asaala, A. M., Massry, A. M. E., Ismail, I., Basahi, J., Hassan, I. A. (2021). Effects of “doneness” level on PAH concentrations in charcoal-grilled beef and chicken: an Egyptian study case. *Polycyclic Aromatic Compounds*, 41(3): 553–563.
- Hamidi, E. N., Hajeb, P., Selamat, J., Lee, S. Y., Razis, A. F. A. (2022). Bioaccessibility of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in grilled meat: the effects of meat doneness and fat content. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19: 736.
- Han, Y., Chen, Y., Feng, Y., Song, W., Cao, F., Zhang, Y. (2020). Different formation mechanisms of PAH during wood and coal combustion under different temperatures. *Atmospheric Environment*, 222: 117084.
- Icier, F., Yucel Sengun, I., Turp, Y. G., Arserim E. H. (2014). Effects of process variables on some quality properties of meatballs semi-cooked in a continuous type ohmic cooking system. *Meat Science*, 96:1345–1354.
- Janoszka, B. (2011). HPLC-fluorescence analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in pork meat and its gravy fried without additives and in the presence of onion and garlic. *Food Chemistry*, 126: 1344–1353.
- Jiang, D., Wang, G., Li, L., Wang, X., Li, W., Li, X., Shao, L., Li, F. (2018). Occurrence, dietary exposure, and health risk estimation of polycyclic aromatic hydrocarbons in grilled and fried meats in Shandong of China. *Food Science & Nutrition*, 6: 2431–2439.
- Kamal, N. H. A., Selamat, A., Sanny, M. (2018). Simultaneous formation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and heterocyclic aromatic amines (HCAs) in gas-grilled beef satay at different temperatures. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 35(5): 848–869.
- Karslıoğlu, B., Kolsarıcı, N. (2022). The effects of fat content and cooking procedures on the PAH content of beef doner kebabs. *Polycyclic Aromatic Compounds*, doi: 10.1080/10406638.2022.2067879.
- Kılıç, Ö., Dinçer, E. A., Erbaş, M. (2017). Gıdalarda polisiklik aromatik hidrokarbon bileşiklerinin bulunuşu ve sağlık üzerine etkileri. *Gıda*, 42 (2): 127–135.
- Kataoka, H., Ishizaki, A. (2013). Polycyclic aromatic hydrocarbons in foods and herbal medicines analysis and occurrence. *Handbook of polycyclic aromatic hydrocarbons*. 46–81.
- Kendirci, P., İcier, F., Kor, G., Altug Onogur, T. (2014). Influence of infrared final cooking on polycyclic aromatic hydrocarbon formation in ohmically pre-cooked beef meatballs. *Meat Science*, 97: 123–129.
- Kim, H-J., Cho, J., Jang, A. (2021a). Effect of charcoal type on the formation of polycyclic

- aromatic hydrocarbons in grilled meats. *Food Chemistry*, 343: 128453.
- Kim, H-J., Cho, J., Kim, D., Park T-S., Jin, S., K., Hur, S. J., Lee, S. K., Jang, A. (2021b). Effects of gochujang (korean red pepper paste) marinade on polycyclic aromatic hydrocarbon formation in charcoal-grilled pork belly. *Food Science of Animal Resources*, 41(3):481- 496.
- Kislov, V. V., Sadovnikov, A. I., Mebel, A. M. (2013). Formation Mechanism of polycyclic aromatic hydrocarbons beyond the second aromatic ring. *The Journal of Physical Chemistry*, 117 (23): 4794–4816.
- Knuppel, A., Papier, K., Fensom, G. K., Appleby, P. N., Schmidt, J. A., Tong, T. YN., Travis, R., Key, T. J., Perez-Cornago, A. (2020). Meat intake and cancer risk: prospective analyses in UK Biobank. *International Journal of Epidemiology*, 49 (5): 1540–1552.
- Kuzmicz, K., Ciemniak, A. (2018). Assessing contamination of smoked spratts (*Sprattus sprattus*) with polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and changes in its level during storage in various types of packaging. *Journal of Environmental Science and Health - Part B*, 53(1): 1–11.
- 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.
- 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.
- Li, Y., Cai, K., Hu, G., Gu, Q., Li, P., Xu, B., Chen, C. (2021). Substitute salts influencing the formation of PAHs in sodium-reduced bacon relevant to maillard reactions. *Food Control*, 121: 107631.
- Liu, P., Lin H., Yang, Y., Shao, C., Guan, B and Huang, Z. (2015). Investigating the role of CH₂ radicals in the HACA mechanism. *The Journal of Physical Chemistry A*, 119: 3261–3268.
- Lourenço, S., Gunge, V. B., Andersson, T. M. L., Andersen, C. L. E., Lund, A. S. Q., Køster, B., Hansen, G. L. (2018). Avoidable colorectal cancer cases in Denmark – The impact of red and processed meat. *Cancer Epidemiology*, 55: 1-7.
- Lu, F., Kuhnle, G. K., Cheng, Q. (2018). The effect of common spices and meat type on the formation of heterocyclic amines and polycyclic aromatic hydrocarbons in deep-fried meatballs. *Food Control*, 92: 399–411.
- Mahugija, J. A. M., Njale, E. (2018). Effects of washing on the polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) contents in smoked fish. *Food Control*, 93: 139-143.
- Malarut, J. A., Vangnai, K. (2018). Influence of wood types on quality and carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) of smoked sausages. *Food Control*, 85: 98–106.
- Molognoni, L., Daguer, H., Motta, G. E., Merlo, T. C., Lindner, J. D. D. (2019). Interactions of preservatives in meat processing: Formation of carcinogenic compounds, analytical methods, and inhibitory agents. *Food Research International*, 125:108608.
- Mota, J. D. O., Guillou, S., Pierre, F., Membré, J.- M. (2021). Public health risk-benefit assessment of red meat in France: Current consumption and alternative scenarios. *Food and Chemical Toxicology*, 149: 111994.
- Nauta, M. J., Andersen, R., Pilegaard, K., Pires, S. M., Ravn-Haren, G., Tetens, I. and Poulsen, M. (2018). Meeting the challenges in the development of risk-benefit assessment of foods. *Trends in Food Science & Technology*, 76: 90-100.
- Onopiuk, A., Kołodziejczak, K., Szpicer, A., Wojtasik-Kalinowska, I., Wierzbicka, A., Póltorak, A. (2021). Analysis of factors that influence the PAH profile and amount in meat products subjected to thermal processing. *Trends in Food Science & Technology*, 15: 366–379.
- Onopiuk, A., Kołodziejczak, K., Marcinkowska-Lesiak, M., Wojtasik-Kalinowska, I., Szpicer, A., Stelmasiak, A., Póltorak, A. (2022). Influence of plant extract addition to marinades on polycyclic aromatic hydrocarbon formation in grilled pork meat. *Molecules*, 27: 175.
- Pirsaheb, M., Irandost, M., Asadi, F., Fakhri, Y., Asadi, A. (2018). Evaluation of polycyclic

- aromatic hydrocarbons (PAHs) in fish: a review and meta-analysis. *Toxin Reviews*, <https://doi.org/10.1080/15569543.2018.1522643>.
- Pouzou, J. G., Costard, S., Zagmutt, F. J. (2018). Probabilistic estimates of heterocyclic amines and polycyclic aromatic hydrocarbons concentrations in meats and breads applicable to exposure assessments. *Food and Chemical Toxicology*, 114:346-360.
- Pöhlmann, M., Hitzel, A., Schwagele, F., Speer, K., Jira, W. (2013). Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) and phenolic substances in smoked Frankfurter-type sausages depending on type of casing and fat content. *Food Control*, 31:136-144.
- Purcaro, G., Moret, S., Conte, L.S. (2009). Optimisation of microwave assisted extraction (MAE) for polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) determination in smoked meat. *Meat Science*, 81: 275–280.
- Portet-Koltalo, F., Gardes, T., Debret, M., Copard, Y., Marcotte, S., Morin, C., Laperdrix, Q. (2020). Bioaccessibility of polycyclic aromatic compounds (PAHs, PCBs) and trace elements: influencing factors and determination in a river sediment core. *Journal of Hazardous Materials*, 384: 121499
- Reizer, E., Csizmadia, I. G., Palotás, A. B., Viskolcz, B., Fiser, B. (2019). Formation mechanism of benzo(a)pyrene: one of the most carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH). *Molecules*, 24: 1040.
- Rekanovic, S., Grujic, R., Tomovic, V., Stojanovic, N. (2021). Thermal treatment effect on polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) content in sheep and chicken meat products. *Journal of Hygienic Engineering and Design*, 1-9.
- Richter, H and Howard, J. B. (2000). Formation of polycyclic aromatic hydrocarbons and their growth to soot—a review of chemical reaction pathways. *Progress in Energy and Combustion Science*, 26: 565-608.
- Roux, M. T., Temprado, M., James S. C., Nagano, Y. (2008). Critically evaluated thermochemical properties of polycyclic aromatic hydrocarbons. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 37(4): 1855- 1996.
- Roventale, I., Zacsá, D., Bartkiene, E., Bartkevics, V. (2018). Polycyclic aromatic hydrocarbons in traditionally smoked meat products from the Baltic States. *Food Additives & Contaminants: Part B*, 11(2): 138–145.
- Singh, L., Varshney, J. G., Agarwal. (2016). Polycyclic aromatic hydrocarbons' formation and occurrence in processed food. *Food Chemistry*, 199: 768–781.
- Sampaio, G. R., Guizzellini, G. M., Silva, S. A., Almeida, A. P., Pinaffi-Langley, C. C., Rogero, M. M., Camargo, A. C., Torres, E. A. E. S. (2021). Polycyclic aromatic hydrocarbons in foods: biological effects, legislation, occurrence, analytical methods, and strategies to reduce their formation. *International Journal of Molecular Science*, 22: 6010.
- Semanová J, Sklársová B, Simon P, Simko P. (2016). Elimination of polycyclic aromatic hydrocarbons from smoked sausages by migration into polyethylene packaging. *Food Chemistry*, 201:1-6.
- Sobral, M. M. C., Cunha, S.C., Faria, M. A., Ferreira, I.MPLVO. (2018). Domestic cooking of muscle foods: impact on composition of nutrients and contaminants. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17: 309-333.
- Tarafdar, A., Chawda, S., Sinha, A. (2018). Health risk assessment from polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) present in dietary components: A meta-analysis on a global scale. *Polycyclic Aromatic Compounds*, 40 (3): 850-861.
- Tkacz, K., Wiek, A., Kubiak, M. S. (2012). Influence of marinades on the level of PAHs in grilled meat products. *Italian Journal of Food Science*, 24: 270–8.
- Viegas, O., Yebra- Pimentel, I., Martinez-Carbollo, E., Simal- Gandara, J., Ferreira, I.M.P.L.V.O. (2014). Effect of beer marinades on formation of polycyclic aromatic hydrocarbons in charcoal-grilled pork. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62: 2638–2643.

- Wang, W., 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.
- Wang, Z., Ng, K., Warner, R. D., Stockmann, R., Fang, Z. (2021). Reduction strategies for polycyclic aromatic hydrocarbons in processed foods. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21: 1598–1626.
- Wongmaneepratip, W., Vangnai, K. (2017). Effects of oil types and pH on carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in grilled chicken. *Food Control*, 79: 119-125.
- Wongmaneepratip, W., Jom, K. N., Vangnai, K. (2019). Inhibitory effects of dietary antioxidants on the formation of carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons in grilled pork. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 32(8): 1205-1210.
- Yang, T., Kaiser, R. I., Troy, T. P., Xu, B., Kostko, B. O., Ahmed, M., Mebel, A. M., Zagidullin, M. V and Azyazov, V. N. (2017). HACA's heritage: A free-radical pathway to phenanthrene in circumstellar envelopes of asymptotic giant branch stars. *Angewandte Chemie*, 56: 4515 –4519.
- Yao, M., Khan, I. A., Cheng, Y., Ang, Y, Zhou, X., Huang, M. (2020). Effects of cooking methods and tea marinades on the formation of heterocyclic amines and benzo[a]pyrene in grilled drumsticks. *Journal of Food Protection*, 83 (2): 365–376.
- Youssef, M. K. E., Abou- El-Hawa S. H., Hussein, S. M., Mahmoud, A. R. (2016). Influence of casing types and cold storage on polycyclic aromatic hydro carbons (PAHs) in smoked beef sausage. *Assiut Journal of Agricultural Sciences*, 47(2): 1–12.
- Zhao, Z., Wang, F., Chen, D., and Zhang, C. (2019). Red and processed meat consumption and esophageal cancer risk: a systematic review and meta-analysis. *Clinical and Translational Oncology*, 22: 532–545.
- Zubairova, L., Tagirov, H., Mironova, I., Iskhakov, R., Vagapov, I. (2022). Biotechnological techniques in animal nutrition for improving quality indicators of meat and dairy products. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2022.01.001>.