



## FİLAMENTLİ FUNGUSLARIN (KÜFLERİN) ALTERNATİF BESİN KAYNAĞI OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ

**Burcu KAYA, Yonca KARAGÜL YÜCEER\***

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,  
Gıda Mühendisliği Bölümü, Çanakkale, Türkiye

Geliş /Received 14.02.2024; Kabul /Accepted: 23.07.2024; Online baskı /Published online: 03.08.2024

Kaya, B., Karagül Yüceer, Y. (2024). Filamentli fungusların (küflerin) alternatif besin kaynağı olarak değerlendirilmesi. GIDA (2024) 49 (4) 751-765 doi: 10.15237/gida.GD24027

Kaya, B., Karagül Yüceer, Y. (2024). Filamentous fungi (molds) as a food source. GIDA (2024) 49 (4) 751-765 doi: 10.15237/gida.GD24027

### ÖZ

İnsan nüfusu ile artan besin ihtiyacı, gelecekte yeterli besin maddelerini içeren bir diyet erişimi giderek zorlaştıracaktır. Mevcut bitkisel ve hayvansal kaynaklı besinlerin varlığı iklime bağlıdır ve uzun vadede çevreye olumsuz etkileri olmaktadır. Bu nedenle araştırmacılar, sürdürülebilir diyet geçişi kolaylaştırmak ve teşvik etmek amacıyla alternatif kaynak arayışındadırlar. Filamentli funguslar karmaşık substratları parçalayarak değerli ürünlere dönüştürebilmektedir. Fermantasyon yoluyla elde edilen fungus biyokütlesi, protein, enzim, antioksidan madde, vitaminler, mineraller, çoklu doymamış yağ asitleri, organik asit ve lif gibi önemli esasiyel bileşiklerin kaynağıdır. Filamentli bir fungus olan *Fusarium venenatum* biyokütlesinden üretilen et benzeri dokuya sahip alternatif besin kaynağının en çok bilinen ticari örneği Quorn'dur. Son dönemde yapılan çalışmalar filamentli fungusları kullanarak gıda endüstrisi atık ve yan ürünlerinden katma değeri yüksek ürünler geliştirilmesi ve sürdürülebilirliğin sağlanmasına odaklanmıştır. Bu derleme filamentli funguslar kullanılarak gıda atık veya yan ürünlerinden biyokütle üretimi, bileşimi ve sağlık üzerine etkileri konularında yapılan çalışmalarını kapsamaktadır.

**Anahtar kelimeler:** Biyokütle, gıda atık ve yan ürünü, filamentli fungus, mikoprotein, sürdürülebilir diyet

## FILAMENTOUS FUNGI (MOLDS) AS A FOOD SOURCE

### ABSTRACT

The increasing human population and the consequent rise in food demand will make it progressively difficult to access a diet containing sufficient nutrients in the future. The availability of current plant and animal-based foods depends on climate and has negative effects on the environment in long-term. Therefore, researchers are looking for alternative sources to facilitate, and promote the transition to a sustainable diet. Filamentous fungi can break down complex substrates and convert them into valuable products. Fungal biomass obtained through fermentation is a source of important essential compounds such as proteins, enzymes, antioxidants, vitamins, minerals, polyunsaturated fatty acids, organic acids, and fibers. The most well-known commercial example of an alternative food source with meat-like texture produced from the biomass of a filamentous fungus, *Fusarium venenatum*, is Quorn. Recent studies have focused on the development of high-value-added products, and the achievement of sustainability by utilizing filamentous fungi to process food industry waste

\* Sorumlu yazar / Corresponding author

✉: yoncayuceer@comu.edu.tr

☎: (+90) 286 218 0018/20051

☎: (+90) 286 218 0541

Burcu Kaya; ORCID no: 0000-0003-1755-7705

Yonca Karagül Yüceer; ORCID no: 0000-0002-9028-2923

and by-products. This review covers studies on biomass production from food waste or by-products using filamentous fungi, its composition, and its effects on health.

**Keywords:** Biomass, food waste and by-products, filamentous fungi, mycoprotein, sustainable diet

## GİRİŞ

Dünya nüfusunun, 2050 yılında yaklaşık 10 milyar kişiye ulaşacağı tahmin edilmektedir. Buna göre doğal kaynakların tükenmesi, artan insan nüfusu ile artan besin ihtiyacı, çeşitli salgın hastalıklar ve hayvancılığın sera gazına katkısı, günümüzün evrensel sorunları arasında yer almaktadır (Giavasis vd., 2019; Gastaldello vd., 2022; Ahmad vd., 2022). Tüm bu sorunlar daha sürdürülebilir diyetle geçişi kolaylaştırmak ve teşvik etmek için alternatif kaynak arayışı çalışmalarını hızlandırmıştır (Gastaldello vd., 2022). Sürdürülebilir diyet “gıda ve beslenme güvenliğine, şimdiki ve gelecek nesiller için sağlıklı yaşama katkısında bulunan düşük çevresel etkiye sahip beslenme” olarak tanımlanmaktadır (Atta-Delgado vd., 2023). Bundan dolayı son yıllarda araştırmacıların, küresel gıda sürdürülebilirliği için filamentli funguslardan elde edilen ve önemli besin içeriğine sahip olan mikoproteinlere odaklandığı görülmektedir (Derbyshire vd., 2023). Upcraft vd. (2021), pirinç samanını *Fusarium venenatum* ile mikoproteine dönüştürerek, elde edilen ürünün hayvansal ve bitkisel kaynaklı proteinlere alternatif bir besin olabileceğini rapor etmiştir. Tong vd. (2023), *Fusarium venenatum* suşundan elde edilen mikoprotein sentez oranının ve protein miktarının metabolik mühendislik çalışmaları ile artırılabilirliğini bildirmiştir. Braho vd. (2023), *Aspergillus oryzae*, *Rhizopus oligosporus* ve *Neurospora intermedia* filamentli funguslarından mikoprotein üretmek amacıyla, nar işleme endüstrisi yan ürünlerinin ve nar suyunun kullanılabilirliğini göstermişlerdir. Ayrıca, araştırmacılar, nar kabuğu substratına maya ekstraktı eklenmesiyle biyokütle verimini 0.49 (g biyokütle/g kabuk) olarak belirlerken, aynı zamanda protein içeriğinin de önemli ölçüde (198.63 g/kg'a) yükseltilebileceğini tespit etmişlerdir.

Filamentli funguslar, karmaşık substratlardaki polimerleri parçalamakta ve bu polimerleri daha fazla ürüne metabolize ederek değerli ürünlere dönüştürebilmektedir. Organik asit, polisakarit, enzim, bitki büyüme düzenleyicisi, alkaloid,

pigment, mikotoksin ve antibiyotik funguslar tarafından üretilmektedir (El-Enshasy, 2007). Funguslar selüloz, ksilanaz, lignin peroksidaz, manganez peroksidaz, proteaz,  $\alpha$ -amilaz,  $\beta$ -ksilosidaz, amiloglukosidaz ve glukamilaz gibi çeşitli enzimleri üretebilmektedir. Gelişmiş enzim sistemlerine sahip funguslar selüloz, hemiselüloz ve lignin gibi kompleks polimerleri parçalayarak, monomerlerine dönüştürmektedir. Bu monomerlerin ileri derecede metabolize edilmesiyle organik asitler ve etanol gibi çeşitli ürün grupları üretilmektedir (Mahboubi vd., 2017a; Wikandari vd., 2022). Bu özellikleri nedeniyle filamentli funguslar organik asit, enzim, antibiyotik, steroid, yakıt gibi bazı ürünlerin üretimi için gıda, ilaç ve kimya endüstrisi gibi farklı sektörlerde kullanılmaktadır (Thunuguntla vd., 2018; Dzurendová vd., 2021). Bununla birlikte fermantasyon yoluyla elde edilen fungus biyokütlesi, protein, enzim, antioksidan madde, vitaminler, mineraller, çoklu doymamış yağ asitleri, organik asit ve sağlığa olumlu etkileri bulunan lif (glukan, kitin) gibi önemli biyoaktif bileşiklerin kaynağıdır (Vonsangnak vd., 2013; Rousta vd., 2022). Filamentli funguslar ürettikleri biyoaktif bileşikler (küçük moleküllü birleşikler ve enzimler) nedeniyle önemli mikrobiyal hücre fabrikaları olarak nitelendirilmektedir (Vonsangnak vd., 2013; Wösten, 2019). Bu faktörler göz önüne alındığında, filamentli funguslar, biyoatıkların değerli ürünlere dönüştürülmesinde önemli rol oynamaktadır. Özellikle bazı filamentli fungusların yenilebilir ve Genel Olarak Güvenli Kabul Edilen (GRAS) statüsünde yer alması, elde edilecek ürünlerin ticarileşme potansiyelinin yüksek olduğunu göstermektedir (Wikandari vd., 2022). *Aspergillus*, *Trichoderma*, *Fusarium*, *Mortierella*, *Mucor*, *Umbelopsis* ve *Rhizopus* endüstriyel öneme sahip en önemli filamentli fungus cinsleri arasında yer almaktadır (Dzurendová vd., 2021; Wikandari vd., 2022).

Bu derlemenin amacı filamentli fungusların alternatif besin kaynağı olarak değerlendirilmesi konusunda yapılan çalışmaları ortaya koyarak önemini vurgulamaktır.

## FİLAMENTLİ FUNGUSLAR

Funguslar bitki, protist, hayvan ve bakterilerden ayrı olarak sınıflandırılan en büyük ökaryot gruplarından biridir. Yenilebilir mantarların meyve veren gövdelerinin yanı sıra küfler ve mayalar gibi çok çeşitli mikromantar türlerini içeren bir gruptur (Schweiggert-Weisz vd., 2020). Yaklaşık 2-4 milyon fungus türü olduğu tahmin edilse de bunlardan yalnızca 120 bin tanesi tanımlanmıştır (Karimi vd., 2018). Funguslar *Ascomycetes*, *Basidiomycetes*, *Zygomycetes*, *Oomycetes* ve *Deuteromycetes* olmak üzere beş gruba ayrılmaktadır. *Actinomucor*, *Anylomyces*, *Mucor*, *Rhizopus*, *Monascus*, *Neurospora*, *Aspergillus*, *Penicillium*, *Candida*, *Endomyces*, *Hansenula*, *Saccharomyces*, *Torulopsis*, *Trichosporon* ve *Zygosaccharomyces* gibi cinslerin ise gıda biyoteknolojisi uygulamalarında yer aldığı bildirilmektedir (Amara ve El-Baky, 2023; Hyde vd., 2019). Birçok fungus saprofit olup organik maddelerin ayrıştırıcıları olarak çevrede önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle organik maddenin dönüşümü ve mineralizasyonu için çok önemlidirler (Lübeck ve Lübeck, 2022). Funguslar ortamdaki organik maddeleri hücre dışında sindirerek absorbe etmekte ve karbon ihtiyaçlarını karşılamaktadır (Amara ve El-Baky, 2023). Bununla birlikte birçok fungus, gelişimleri ve metabolizmaları için azotu ve diğer besinleri tamamen absorbe etme kapasitesine sahiptir. Azottan ihtiyaç duyulan tüm farklı amino asitleri sentezleyebilmektedirler (Lübeck ve Lübeck, 2022).

### Fungal gelişim

Fungal gelişimin gerçekleşmesi için substratın inhibe edici bileşikleri içermemesi, karbon ve azot elementlerini içermesi gerekmektedir. Bununla birlikte besiyeri içerisinde yüksek miktarda glukoz (30-450 g/L) bulunması önerilmektedir. Genellikle 10-35 °C sıcaklık değerleri arasında gelişim gösterse de bazı türler bu değerlerin üzerinde veya düşük sıcaklıklarda gelişebilmektedir. Funguslar sıcaklık toleranslarına göre psikrotolerant, psikrofilik, mezofilik, termotolerant ve termofilik olarak sınıflandırılmaktadır. Ayrıca funguslar genellikle geniş pH aralığında (2.6-9.0) gelişim göstermekte

olup, optimum gelişim pH'sı 4.0 ve 5.0 arasında değişmektedir (Awasthi vd., 2022).

Fungal gelişimin tek hücreli (maya) ve hifli olmak üzere iki ana formu vardır. Dimorfik (iki gelişim formunu gösteren) yapı sergileyen bazı funguslar besin, oksijen veya sıcaklık gibi çevresel koşullardaki değişikliklere göre maya benzeri veya misel form arasında geçiş yaparak gelişim gösterebilmektedir. Genellikle filamentli fungusun yaşam döngüsü tek bir sporun çimlenmesiyle başlamaktadır. Ardından germ tüpü uzayarak, hif olarak adlandırılan boru şeklindeki filamentler oluşur. Hif, fungusların çevreden besinleri alan ana yapı taşıdır. Hif büyümeye ve dallanmaya devam ettikçe miselyum adı verilen çapraz bağlı hif topluluğu oluşmaktadır (Barzee vd., 2021).

### BIYOKÜTLE ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Katı hal fermantasyonu ve derin kültür fermantasyonu teknikleri filamentli funguslardan biyokütle üretiminde kullanılmaktadır. Katı hal fermantasyonu, filamentli fungusun, nemli ve çözünmeyen katı substratı (susuz veya az miktarda serbest su içeren ortam) besin kaynağı olarak kullanması sonucu gerçekleşen bir fermantasyon sürecidir (Yafetto, 2022). Özellikle Asya ülkelerinde, *Rhizopus oligosporus* ile üretilen tempeh ve *Neurospora intermedia* ile üretilen oncom gibi fermente gıdaların üretimi için katı hal fermantasyonu kullanılmaktadır (de Lima vd., 2021). Son dönemde katı hal fermantasyonu ile yapılmış çalışmalar kahve posası ve kabuğu, şeker kamışı, agav küspesi, meyve posaları ve kabukları, mısır koçanı gibi substratları kullanarak biyoaktif fenolik bileşikler üretmeyi amaçlamıştır (Meini vd., 2021). Ancak düşük su ve enerji tüketimi ile ilişkilendirilse de katı hal fermantasyonundaki ölçek büyütmede karşılaşılan sorunlar, bu fermantasyonu küçük ölçekli fermente gıda üretimi ile sınırlandırmaktadır. Günümüzde filamentli funguslardan enzim, organik asit ve çeşitli biyoaktif bileşenleri üretmek için genellikle derin kültür fermantasyonu kullanılmaktadır (Rousta vd., 2022).

Funguslar 3 aşamada gelişim göstermektedir. İlk olarak spor şişmesi, spor çimlenmesi, hif uzaması

ve dallanma işlemlerini içeren mikromorfolojik büyüme gerçekleşmektedir. Ardından hif ağının veya fungus peletinin gelişimini kapsayan makromorfolojik büyüme meydana gelmektedir. Son olarak ise fungus hücresi otoliz olmaktadır (El-Enshasy, 2007). Miselyum morfolojisi fungal biyokütle ve metabolitlerinin üretimi üzerine önemli etkiye sahiptir. Derin kültür fermentasyonu ile gelişen bir fungus, geliştiği substratın viskozitesinin artmasına, besin, oksijen ve ısı transferinin azalmasına yol açmaktadır. Substratın Newton tipi olmayan akış modeli sergilemesine neden olan bu durum, verimli karıştırmayı sağlamak için üretim maliyetlerini arttıran daha fazla enerji kullanımını gerektirmektedir (Barzee vd., 2021). Ancak derin kültür fermentasyonu, farklı tipte reaktör tasarımı seçeneği, ölçeklenebilir üretim sağlanması ve endüstriyel uygulamalar ile onaylanmış

araştırmaların bulunması nedeniyle daha avantajlıdır. Katı hal ve derin kültür fermentasyon tekniklerinin avantaj ve dezavantajları karşılaştırmalı olarak Çizelge 1’de gösterilmiştir. Derin kültür fermentasyon tekniği kullanılarak daha yüksek konsantrasyonda biyoaktif bileşenin üretimi gerçekleştirilmektedir. Örneğin yapılan bir araştırmada filamentli funguslar tarafından üretilen biyoaktif bileşen olan L-karnitin üretimi araştırılmıştır. Sonuç olarak yarı sentetik bir ortamda *Aspergillus oryzae* türünün derin kültür fermentasyonu ile ürettiği L-karnitin konsantrasyonu, katı hal fermentasyonunda üretilenden daha yüksek bulunmuştur (Rousta vd., 2021). Bununla birlikte derin kültür fermentasyonu ile fungus biyokütlesinden (*Fusarium venenatum*) üretilen, Quorn gibi bazı ticari gıda ürünleri örnek verilebilmektedir (Rousta vd., 2022).

Çizelge 1. Katı hal ve derin kültür fermentasyon tekniklerinin avantaj ve dezavantajları  
(Strong vd., 2022)

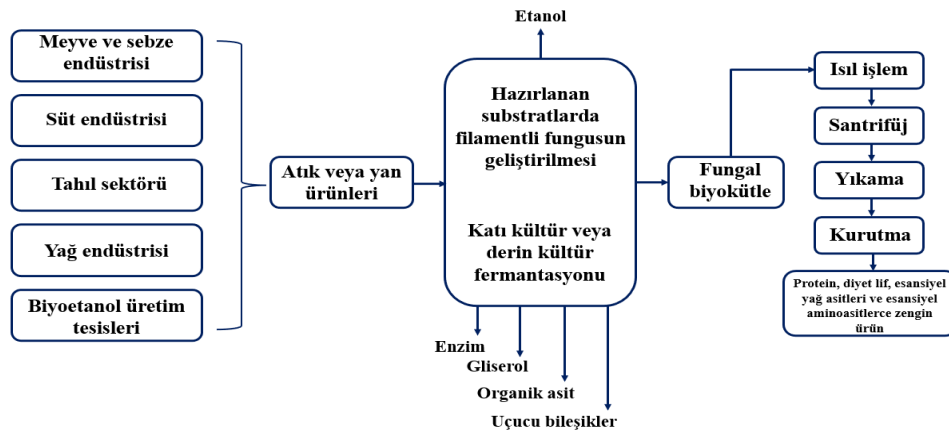
	Avantaj	Dezavantaj
Katı hal fermentasyonu	-Ucuz ve yüksek oranda substrat varlığı -Düşük su tüketimi ve atık -Substrata dayalı/optimize hücre dışı enzim üretimi -Doğal habitatları taklit etmesi	-Derin kültür fermentasyonundan daha yavaş gelişme -Ölçek büyütme zorlukları -Proses kontrol zorlukları (havalandırma, nem, pH ve ısı transferi) -Fermentasyon sonrası biyokütlenin toplanması
Derin kültür fermentasyonu	-Uygun tasarımlı reaktör seçeneği -Daha hızlı misel gelişmesi -Üstün proses kontrolü (Sıcaklık, havalandırma ve pH) -Ürün ayırma kolaylığı (Biyokütle ve çözünür ürünler)	-Yüksek su kullanımı ve atık -Misel üzerinde kayma gerilimi -Doğal koşullara kıyasla farklı beslenme/biyoaktif maddeler -Yüksek sermaye ve işletme maliyetleri

Katı hal ve derin kültür fermentasyon teknikleri, fungal biyokütlenin gelişimi için gerekli olan besin ortamını sağlamaktadır. Ancak her iki üretim stratejisinde de besiyeri içeriğindeki herhangi bir değişiklik filamentli fungustan üretilen metabolit ve biyokütle verimini etkilemektedir (Karimi vd., 2018). Örneğin derin kültür yönteminde misel yapısının oluşumuna pH, havalandırma, karbon kaynağı, substrat konsantrasyonu, inokulum konsantrasyonu ve elemental bileşim gibi faktörler etki etmektedir (Awasthi vd., 2022).

Genellikle glukoz ve fruktoz gibi şekerleri içeren sentetik besiyerlerinde ortam parametrelerini kontrol altına almak mümkündür. Ancak sentetik besiyerlerinin maliyetinin yüksek olması bu durumu dezavantaja dönüştürmektedir. Bu sorunun giderilmesi ve atık yönetiminin sürdürülebilirliği amacıyla araştırmacılar, mikrobiyal gelişim için bezelye, patates, şeker ve hurma gibi çeşitli endüstri atık veya yan ürünlerinin kullanımına yönelmiştir (Hashempour Baltork vd., 2020). Substrat olarak kullanılacak

atık veya yan ürünlerin biyolojik olarak kolay parçalanabilmesi, ucuz olması, kolay temin edilebilmesi, yeterli miktarda mikro ve makro besin elementlerini içermesi gerekmektedir (Karimi vd., 2018). Gıda endüstrisi atık ve yan ürünlerin substrat olarak kullanılmasıyla filamentli funguslardan biyokütle ve metabolik ürünlerin üretimi Şekil 1'de şematize edilmiştir. Buna göre katı kültür veya derin kültür fermantasyon yöntemleri kullanılarak, biyokütle üretimi sağlanmaktadır. Bununla birlikte etanol, enzim, gliserol, organik asit ve uçucu bileşikler fermantasyon sonucu ortaya çıkan ilk ürünlerdir. Fermantasyonun ardından fungal biyokütleyle bir seri işlem uygulanmasıyla ise protein, diyet lif,

esansiyel yağ asitleri ve aminoasitlerce zengin ürün üretilmektedir. Hashempour Baltork vd. (2023) tarafından yapılan bir çalışmada, *Fusarium venenatum* hurma atıklarında geliştirilmiş ve protein içeriği %55 olan fungal biyokütle elde edilmiştir. Gıda atık veya yan ürünlerinin substrat olarak değerlendirildiği bazı çalışmalarda, araştırmacılar substrata çeşitli ön işlemler (ısı işlem, kızgın buhar, enzim vb.) uygulayarak elde edilen son ürünün protein değerini arttırmaya çalışmıştır. Gıda atık veya yan ürünleri kullanılarak, filamentli funguslardan protein üretimini amaçlayan, 2010-2023 yıllarında yapılmış bazı çalışma örnekleri Çizelge 2'de verilmiştir.



Şekil 1. Gıda endüstrisi atık ve yan ürünlerinin substrat olarak kullanılmasıyla filamentli funguslardan biyokütle ve metabolik ürünlerin üretim aşamaları (Karimi vd., 2018)

Funguslar üzerinde yapılan biyoteknolojik çalışmalar uzun bir süre boyunca metabolik ürünlerin üretimine odaklanmıştır. Ancak son dönemde, fungal biyokütelerin temel gıda maddesi olarak kullanımının araştırılması konularında çalışmaların arttığı görülmektedir.

## FUNGAL BİYOKÜTLE BİLEŞİMİ

### Protein

Fungal biyokütlenin protein içeriği, fungus türüne ve gelişme faktörlerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Zygomycetes ve Ascomycetes sınıfı funguslar genellikle %40-50 arasında ham protein içermektedir. Ancak biyokütlenin geliştiği kültür ortamındaki azot gibi besin maddeleri, protein içeriğini önemli düzeyde etkilemektedir. Biyokütlenin toplanması, suyun giderilmesi ve kurutma gibi prosesler ise protein miktarını etkileyen diğer faktörlerdir (Karimi vd., 2018).

İnsanlar için protein sindirilebilirliğini ölçmeye yönelik standartlar in vivo denemeleri içeren Sindirilebilirliği Düzeltilmiş Amino Asit Skoru (PDCAAS) ve Sindirilebilir Vazgeçilmez Amino Asit Skoru (DIAAS)'dur (Wang vd., 2023). Fungal biyokütle olan mikoprotein protein sindirilebilirliği düzeltilmiş amino asit skorunun (PSDCAAS) 0.996 olduğu bildirilmektedir (Ahmad vd., 2022; Hashempour-Baltork vd., 2023). Yapılan bir çalışmada, süt proteininin sindirilebilirliği %95 iken, *Fusarium graminearum* türüne ait proteinin %78 olduğu saptanmıştır (Wang vd., 2023). Başka bir çalışmada, *Fusarium venenatum*'dan elde edilen proteinin PDCAAS oranının yumurta beyazına çok yakın olduğu ancak tavuk ve sığır etinden daha düşük olduğu belirtilmiştir (Wang vd., 2023; Ahmad vd., 2023).

Çizelge 2. Gıda atık veya yan ürünleri kullanılarak filamentli funguslardan protein üretimi

Substrat, Ön işlem, Besin Takviyesi	Mikroorganizma	Protein verimi (kuru fungal biyokütlede)	Referanslar
Ekmek atıkları	<i>Rhizopus delemar</i>	%35	Mousavi vd., 2023
Elma posası, 100 °C, 60 dakika ısı işlem	<i>Mucor indicus</i>	0.50 (g/g biyokütle)	Borujeni vd., 2022
Pirinç kepeği, kızgın buhar	<i>Rhizopus oryzae</i> , <i>Aspergillus oryzae</i>	%11.04 %15.25	Yang vd., 2021
Kuru öğütülmüş mısır, üre ilavesi	<i>Mucor indicus</i> <i>Rhizopus oryzae</i>	%35 %38	Barnharst vd., 2021
Atık ekmek	<i>Rhizopus delemar</i>	%27.40 - 35.80	Svensson vd., 2021
Hurma atıkları	<i>Fusarium venetatum</i>	%55	Hashempour-Baltork vd., 2020
Atık buğday ekmeği	<i>Neurospora intermedia</i>	%33	Gmoser vd., 2019
Bezelye yan ürünü	$\alpha$ -amilaz	<i>Monascus purpureus</i>	%53.61
		<i>Aspergillus oryzae</i>	%43.13
	enzimsiz	<i>Fusarium venenatum</i>	%55.28
		<i>Neurospora intermedia</i>	%54.53
		<i>Rhizopus oryzae</i>	%50.03
		<i>Monascus purpureus</i>	%58.66
		<i>Aspergillus oryzae</i>	%46.36
		<i>Fusarium venenatum</i>	%59.75
		<i>Neurospora intermedia</i>	%54.11
		<i>Rhizopus oryzae</i>	%54.79
Peynir altı suyu	<i>Aspergillus oryzae</i>	%40	Mahboubi vd., 2017a
Ananas kabuğu (96 saat inkübasyon)	<i>Trichoderma viride</i>	%11.21	Aruna, 2019
Manyok kabuğu	Fungal amiloglukosidaz	%37.63	Ezekiel vd., 2010
	enzimsiz	%36.52	

### Diyet Lifi

Diyet lifi, gastrointestinal enzimler tarafından sindirime direnç gösteren selüloz, hemiselüloz, pektin ve lignini içeren polisakkaritlerin bir karışımıdır (Zhang vd., 2023). Fungal hücre duvarı üçte ikisi  $\beta$ -glukan ve üçte biri kitinden oluşan lifli kitin-glukan matrisidir. Bu matrisin %12'si çözünür, %88'i ise çözünmez formdadır (Ahmad vd., 2022). Fungal hücreler, bu duvardaki  $\beta$ -glukanları genellikle pirofosforilaz ile oluşturulan şeker nükleotit birimlerinden sentezlemektedir (Giavasis vd., 2019).  $\beta$ -glukanlar, D-glukoz ünitelerinin  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 3), (1 $\rightarrow$ 6) glikozidik bağları ile çapraz bağlanması sonucu oluşan polisakkarit yapılarıdır. Çözünmeyen diyet lif formunun yüksek su ve yağ tutma kapasitesi vardır. Bundan dolayı yapılan çalışmalar, bu yapının kardiovasküler hastalık riskini azalttığını, glukoz metabolizmasını geliştirdiğini,

gastrointestinal kanaldaki viskoziteyi arttırarak, gastrointestinal sistemin fizikokimyasal davranışını modüle ettiğini göstermiştir (Colosimo vd., 2021; Zhang vd., 2023). Buna ek olarak Harris vd. (2019) tarafından yapılan bir çalışmada, mikoprotein ve mikoprotein saflaştırılmış diyet lifi fraksiyonunun fermente edilebildiği ve kısa zincirli yağ asidi üretilebildiği bildirilmiştir. Ayrıca araştırmacılar mikoprotein ve mikoprotein lifinin, asetat yerine propiyonat ve bütirat üretimini teşvik ettiğini saptamıştır. Avrupa Komisyonu standartlarına (EC, 2008) göre bir fungal biyokütle olan mikoprotein, yüksek lifli olarak nitelendirilmekte ve 100 gramında en az 6 g lif içermektedir (Derbyshire ve Delange, 2021).

### Lipit

Lipitler, serbest yağ asitleri, steroidler, sfingolipitler, glikolipitler, nötr lipitler ve

fosfolipitler olmak üzere altı grupta sınıflandırılmaktadır. Bu bileşikler fungus hücre zarında önemli yapısal ve fonksiyonel özelliklere sahipken, hücre metabolizması için ana enerji kaynaklarından biridir. Funguslar, substrat lipitleri ve yağları, serbest yağ asitleri ve gliserole parçalayan lipazları üretebilme yeteneğine sahiptir (Karimi vd., 2018). Filamentli funguslardaki palmitik ve stearik asitler, palmitoleik, oleik, linoleik ve linolenik asitler gibi çeşitli yağ asitleri membran fosfolipitleri ve triaçilgliserol içinde bulunmaktadır (Karimi vd., 2018).

Çoklu doymamış yağ asitleri, hücre zarlarında yapısal işlevi olan ve hormonların biyosentezi için öncü olarak görev yapan vitamin benzeri bileşiklerdir. En çok bilinenleri, ticari açıdan ilgi çekici olan, ancak elzem olmayan ve fungal sentez yolu ile üretilen araşidonik asit ve dokosaheksaenoik asittir (Copetti vd., 2019). Bununla birlikte filamentli funguslar, gamma-linoleik asit, omega-6 yağ asidi ve omega-3 yağ asidi gibi elzem olan çoklu doymamış yağ asitlerinin de önemli kaynağıdır (Vongsangnak vd., 2013). Örneğin fungal biyokütle olan mikoprotein 100 gramında, 4.3 g omega-6 yağ asidi ve 6.9 g omega-3 yağ asidi bulunmaktadır (Ahmad vd., 2022). Bununla birlikte *Mortierella alpina* araşidonik asidin ticari üretiminde kullanılmakta ve balık yağı takviyeleri bebek mamaları formülasyonuna ilave edilmektedir (Vongsangnak vd., 2013).

### Mikrobesein

Bitkiler gibi, filamentli funguslar da C (askorbik asit) vitamini, B<sub>6</sub> (piridoksin) vitamini, B<sub>2</sub> (riboflavin) vitamini, nikotinik asit ve nikotinamid gibi suda çözünen vitaminlerin bazılarını sentezleyebilmektedir (Karimi vd., 2018). Bir fungal biyokütle olan mikoprotein B<sub>9</sub> (folat), B<sub>12</sub> vitamini, kalsiyum, fosfor, magnezyum ve çinko mikroelementleri bakımından zengindir (Lübeck ve Lübeck, 2022). Ayrıca yapılan bir çalışmada mikoprotein 100 gramında, yaklaşık 180 mg kolin bulunduğu bildirilmiştir (Derbyshire ve Delange, 2021). Yapılan farklı bir çalışmada ise fungal biyokütle olarak adlandırılan mikoprotein B<sub>2</sub> ve D vitaminlerini içerdiği ancak A, C ve E vitaminlerini içermediği

belirtilmiştir (Dunlop vd., 2017). Buna karşın Rousta vd. (2022) yulaf unu ve sentetik besiyerlerinden elde ettiği *Aspergillus oryzae* biyokütlesinin, E ve D<sub>2</sub> vitaminlerini içerebileceğini saptamıştır.

Birçok canlı organizmada, serbest radikallerin (azot, oksijen vd.) varlığı ve birikimi, yapısal lipitlere, proteinlere ve DNA'ya zarar vererek, organizmanın genel sağlık durumunu olumsuz etkilemektedir. Filamentli funguslar, ergotionin, fenolik asitler, flavonoidler, tokoferoller, askorbik asit, karotenoidler, poliketidler, terpenler ve steroidler gibi çeşitli antioksidan maddelerin kaynağı olabilmektedir (Karimi vd., 2018). Mikroorganizmalar ürettikleri hidrolitik enzimler aracılığıyla, substrattaki bağlı veya konjuge fenoliklerin hidrolizini gerçekleştirebilmektedir (Zheng vd., 2007; Gulsunoglu Konuskan ve Kilic Akyılmaz, 2022; Slama vd., 2021). Örneğin Meini vd. (2021), üzüm posasındaki polifenollerini açığa çıkarabilmek için, posayı *Aspergillus niger* ve *Aspergillus oryzae* kullanarak katı hal fermantasyon tekniği ile fermente etmiştir. Buna göre araştırmacılar enzim üretimi, polifenol salınımı ve antioksidan aktivite arasında pozitif korelasyon olduğunu bildirmişlerdir. Bununla birlikte serbest fenoliklerin mikrobiyal biyodönüşümü ve mikroorganizmaların sekonder metabolizması ile yeni fenolik bileşiklerin biyodönüşümü olmaktadır (Zheng vd., 2007; Gulsunoglu Konuskan ve Kilic Akyılmaz, 2022; Slama vd., 2021). Mikrobiyal biyodönüşüm yolları, faz I (oksidasyon, indirgeme ve hidroliz) ve faz II (konjugasyon reaksiyonları) olarak sınıflandırılan bir dizi reaksiyondan oluşmaktadır. Fenolik bileşiğe bağlı olmakla birlikte, bitkisel materyalin mikrobiyal fermantasyonunda faz I ve/veya faz II reaksiyonları meydana gelebilmektedir (Mccarthy ve Sinal, 2005; Gulsunoglu Konuskan ve Kilic Akyılmaz, 2022). Örneğin, Odinot vd. (2017) yaptıkları çalışmada, kolza tohumu ununda doğal olarak bulunan sinapik asidin (4-hidroksi-3,5-dimetoksisinamik asit) kanolole iki aşamalı biyodönüşüm sürecini gerçekleştirmiştir. Araştırmacılar sürecin ilk aşamasında, *Aspergillus niger* BRFM451 rekombinant suşuna ait feruloil esteraz tip-A enzimi aracılığıyla, ham substratta konjuge formdaki sinapik asidin serbest forma

geçmesini sağlamıştır. İkinci aşamada ise *Neolentinus lepideus* BRFM15 suşunun derin kültür fermentasyonu ile sinapik asidin oksidatif olmayan dekarboksilasyon yolu ile kanolole biyolojik dönüşümünü gerçekleştirilmiştir.

### FİLAMENTLİ FUNGUSLARIN GIDALARDA KULLANIMI

Gıda üretiminde filamentli fungus kullanımı, 3000 yıllık bir geçmişe sahiptir. Özellikle Asya ülkelerinde üretilen koji ve soya sosu uzun geçmişe sahip olan geleneksel ürünlerdir (Barzee

vd., 2021). Starter kültür olarak kullanılan *Aspergillus oryzae* ve *Aspergillus sojae*, salgıladıkları enzimler aracılığı ile soya fasulyesini parçalayarak koji ve soya sosuna özgü aroma maddelerinin oluşumunu sağlamaktadır. Bununla birlikte *Neurospora intermedia* ise Endonezya'nın Java adasında, soya fasulyesi bazlı bir ürün olan oncomun üretilmesinde kullanılmaktadır (Mahboubi vd., 2017a; Mahboubi vd., 2017b). Günümüzde filamentli fungus kullanılarak üretilen çeşitli geleneksel ve ticari gıda ürünleri Çizelge 3'te listelenmiştir.

Çizelge 3. Filamentli fungus kullanılarak üretilen geleneksel ve ticari gıda ürünleri

Ürün	Filamentli fungus	Tanım	Ülke	Referanslar
Tempoh	<i>Rhizopus oligosporus</i>	Fermente soya fasulyesi	Endonezya	Wikandari vd., 2022
Douchi	<i>Aspergillus oryzae</i>	Fermente soya fasulyesi	Çin	Wang vd., 2008
Red koji	<i>Monascus</i> spp.	Fermente pirinç	Çin	Zeng vd., 2020
Tofuyo	<i>Monascus purpureus</i> <i>Aspergillus oryzae</i>	Fermente soya peyniri	Japonya	Yasuda vd., 2012
Awamori	<i>Aspergillus awamori</i>	Fermente pirincin damıtılması ile üretilen alkollü içecek	Japonya	Barzee vd., 2021
Furu/Sufu	<i>Actinomucor</i> spp. <i>Mucor</i> spp. <i>Rhizopus</i> spp.	Fermente soya peyniri	Çin	Wei vd., 2023
Meju	<i>Aspergillus</i> spp. <i>Botrytis</i> spp. <i>Rhizopus</i> spp.	Fermente soya fasulyesi	Kore	Kim vd., 2017
Miso	<i>Aspergillus oryzae</i>	Fermente soya fasulyesi	Japonya	Karimi vd., 2018
Red oncom	<i>Neurospora sitophila</i> <i>Neurospora intermedia</i>	Fermente tofu atıkları	Endonezya	Wikandari vd., 2022
Black oncom	<i>R. microsporus</i> var. <i>oligosporus</i> <i>Mucor</i> türleri	Yer fıstığı tortusu ve manyok tozu (siyah oncom) karışımı		
Gari	<i>Aspergillus niger</i> , <i>Aspergillus fumigatus</i> , <i>Fusarium</i> spp. <i>Rhizopus</i> spp. <i>Penicillium</i> spp.	Fermente ve kavrulmuş manyok	Güney Afrika	Wikandari vd., 2022
Quorn	<i>Fusarium venenatum</i>	Fungal biyokütleden oluşan et yapısı	İngiltere	Wikandari vd., 2022
Mavi küflü peynir	<i>Penicillium roqueforti</i>	Sütün filamentli fungus ile fermente edilmesiyle yapılan mavi peynir	Avusturya	Wikandari vd., 2022
Camembert peyniri	<i>Penicillium camembert</i>	Yüzeyi küfle olgunlaştırılmış peynir	Fransa	Wikandari vd., 2022



Yumurtaya benzer protein içeriğine ve sığır etine benzer sindirilebilirliğe sahip olması nedeniyle mikoprotein, et alternatifi olarak tüketilen ve filamentli fungus biyokütlesinden elde edilen, protein açısından zengin besin olarak tanımlanmaktadır (Wikandari vd., 2022). Ancak mikoprotein, proteinlerin yanı sıra amino asitler, yağlar, karbonhidratlar, vitaminler ve mineraller gibi diğer besin bileşenlerini de içermektedir (Zepka vd., 2010; Stoffel vd., 2019). Protein içeriğinin yüksek olması nedeniyle mikoprotein olarak nitelendirilmesine rağmen mikoprotein, içerisinde farklı besin maddelerini bulunduran fungal bir biyokütledir. Bundan dolayı literatürde geçen 'mikoprotein' teriminin bazen kavram karışıklığına neden olabildiği düşünülmektedir. Günümüzde mikoprotein en önemli ticari ürün örneği, *Fusarium venenatum* filamentli fungusundan üretilen Quorn'dur. 1970'lerde Rank Hovis McDougall ve Imperial Chemical Industries şirketlerinin ortak girişimi olarak ortaya çıkan Quorn, derin kültür ile geliştirilmiş *Fusarium venenatum* suşunun misellerinin filtrelenmesiyle endüstriyel olarak üretilmektedir (Stoffel vd., 2019).

Mikoprotein ürünü olan Quorn'nun üretim süreci birkaç aşamadan oluşmaktadır. Öncelikle *Fusarium venenatum* karbonhidrat içeren bir substratta, 28-30°C sıcaklık ve pH 6'da yaklaşık altı hafta boyunca hava kaldırmalı fermentörlerde fermente edilmektedir (Saeed vd., 2023). Fermantasyonun ardından sıvı faz 30-45 dakika süreyle 68 °C'nin üzerinde ısı şokuna maruz bırakılmaktadır. Böylece ürün içerisindeki RNA konsantrasyonu güvenli seviyelere (%10'dan %2'den daha düşük seviyelere) düşürülmektedir. RNA seviyesi güvenli seviyelere düşürülen sıvı 90 °C'de ikinci bir ısıtma işlemine tabi tutulmaktadır. Santrifüjün ardından ise mikoprotein biyokütlesi ve süpernatant elde edilmektedir (Lonchamp vd., 2022). İşlenen biyokütle ise bir bağlayıcı ajan (yumurta albümini veya patates proteini) ile karıştırılmakta ve et benzeri bir doku elde etmek amacıyla bir dizi işlem (buhar, soğutma, dondurma ve presleme) geçirilmektedir. Sonuç olarak protein açısından zengin bir et analogu olan Quorn ortaya çıkmaktadır (Strong vd., 2022). Mikoprotein ürünlerinin yasal olarak satışına

Birleşik Krallık'ta 1985, Avrupa ülkelerinde ise 1991 yıllarında başlamıştır. Amerika Birleşik Devletleri'nde bulunan Marlow Foods şirketi tarafından üretilen Quorn ürünleri, Gıda ve İlaç İdaresi tarafından 2001 yılında GRAS statüsüne alınmış ve 2002 yılında Amerika Birleşik Devletleri pazarına girmiştir (Finnigan vd., 2016; Gibbs ve Leung, 2023). Quorn Birleşik Krallık'ta ve dünya çapında 17 farklı ülkede satılan et yerine geçen ürünlere dahil edilmektedir (Cherta-Murillo vd., 2023).

AB Enzymes, BASF, Bayer, Chr. Hansen, Dyadic International, DSM, DuPont, Kerry Group, Monde Nissin, Novozymes, Ginkgo Bioworks ise filamentli fungusların büyük ölçekli ticari kullanımı ile ilgilenen diğer biyoteknoloji şirketleri arasında yer almaktadır (Strong vd., 2022). Araştırmacılar *Fusarium venenatum* dışında, *Aspergillus oryzae*, *Monascus purpureus*, *Paradendryphilla salina*, *Pleurotus albidus*, *Neurospora intermedia* ve *Rhizopus oryzae* gibi filamentli funguslardan da farklı fermantasyon teknikleri (derin kültür fermantasyonu, katı hal fermantasyonu ve yüzey kültür yöntemi) ile mikoprotein üretilebileceğini bildirmiştir (Ahmad vd., 2022).

Filamentli fungus miselyumu, diğer mikroorganizmaların hücre duvarlarına bağlanabilme yeteneğine sahiptir. Bundan dolayı son ürünün besin değeri, dokusal özellikleri, tat ve renk gibi görünüş özelliklerine olumlu etki sağlayan diğer mikroorganizmalar için taşıyıcı ortam olarak da kullanılabilir (Barzee vd., 2021). Örneğin uygun koşullar altında sıvı kültürlerdeki birçok fungus türü mikroalg hücreleri ile bir araya gelerek kümeleşmektedir (Barzee vd., 2021; Wang vd., 2022). Wang vd. (2022) tarafından yapılan çalışmada *Aspergillus oryzae* ve *Chlorella pyrenoidosa*'nın kombinasyonu ile atık su arıtılırken, atık sudaki besinlerin yararlı mikrobiyal biyokütleye dönüştüğü bildirilmiştir. Serbest alg hücreleri ve mantar hücrelerinin 72 saat içinde bir araya gelerek kümeleştiğini saptayan araştırmacılar, bu kombinasyonun biyokütlenin protein (1.92 g/L) ve lipit içeriğini (0.99 g/L) önemli düzeyde geliştirdiğini bildirmiştir.

## SAĞLIK ÜZERİNE ETKİSİ

Fungal biyokütle, önemli miktarda protein, yağ, amino asit ve karbonhidrat (kitosan, kitin vb.) içermektedir. Ancak yüksek nükleik asit içeriği nedeniyle, uzun süreli kullanımın memelilerde, plazma ürik asidini arttırarak, gut ve böbrek taşı oluşumuna neden olduğu bildirilmiştir (Karimi vd., 2018).

Mikoprotein, daha iyi bir plazma lipid profili ve yemek sonrası glisemik indeks kontrolü gibi sağlığı teşvik edici çeşitli etkileri olan, sürdürülebilir bir protein kaynağı olarak önerilmektedir (Elango ve Laviano, 2019). 100 g kuru mikoproteinde 45 g protein, 25 g lif, 13 g yağ, 10 g karbonhidrat, vitamin ve mineral (selenyum, çinko, sodyum) bulunmaktadır (Finnigan vd., 2016; Souza Filho vd., 2018). Ancak demir ve B<sub>12</sub> vitamini seviyeleri kırmızı ettekine göre daha düşüktür (Souza Filho vd., 2018). Hayvan toksikoloji çalışmaları, mikoproteinin akut veya kronik maruziyetten kaynaklanan sağlık sorunlarına neden olmadığını ve hayvan türlerinde normal büyüme ve gelişmeyi desteklediğini göstermiştir (Finnigan vd., 2016). Klinik çalışmalar ayrıca mikoprotein bir dizi potansiyel fizyolojik faydaya sahip olduğunu göstermiştir. Hem protein hem de lif açısından zengin olması ve büyük ölçüde doymamış yağ içeriğine sahip, karbonhidrat oranının düşük olması önemli bir avantajdır. Lif içeriğinin mineral emilimine olumsuz bir etkisi yoktur (Finnigan vd., 2016). Ancak küf miselyumu kuru ağırlıkça yaklaşık %10 ribonükleik asit (RNA) içermektedir. Yüksek RNA içeren gıdaların aşırı tüketimi ürik asit miktarının artmasına ve gut gibi sağlık sorunlarına neden olmaktadır (Souza Filho vd., 2019). Bundan dolayı küf biyokütlesindeki RNA içeriğinin azaltılması için ısl işlem uygulanması gerekmektedir (Schweigert-Weisz vd., 2020). ısl işlem hücre zarının geçirgenliğini arttırarak, hücre içeriğinin %30'unun sıvı ortama geçmesini sağlamaktadır (Finnigan vd., 2016). Wikandari vd. (2022), filamentli fungusların, gıdalarda doğrudan veya gıda yan ürünlerinden üretilen gıdalarda kullanılabilirliğini, ancak elde edilen ürünün besin değeri ve güvenliği hakkındaki bilgilerin yeterli olmadığını bildirmiştir.

## SONUÇ

Hazırlanan bu derlemede filamentli fungusların gıda atık veya yan ürünleri kullanılarak fermantasyonu sonucu gerçekleştirilen; biyokütle üretim yöntemleri, bileşimi ve sağlık üzerine etkileri incelemiştir. Özellikle organik açıdan zengin gıda atık ve yan ürünlerinin filamentli funguslar ile katma değeri yüksek ürünlere dönüştürülmesi sürdürülebilir beslenme açısından son dönemde giderek önem kazanmaktadır. Birkaç ticari örneği olsa da filamentli fungus biyokütlesinden üretilen ürünlerin ticari örnekleri sınırlıdır ve genellikle et benzeri yapılar odaklanmıştır. Gelecek çalışmalarda et benzeri yapıların dışında farklı ürünlerin üretimi açısından değerlendirilebileceği önerilmektedir. Literatürde bazı araştırmacılar yaptıkları çalışmalarda filamentli fungus biyokütlesinin besin değeri ve güvenliği hakkındaki bilgilerin yeterli olmadığını bildirmiştir. Bundan dolayı filamentli fungus biyokütlesinin sağlık üzerinde etkilerine daha fazla odaklanması gerektiği düşünülmektedir.

## ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar bu derleme makalenin herhangi bir kişi ve/veya kurum ile çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

## YAZAR KATKISI

Yazarlar makalenin hazırlanmasında eşit katkıda bulunmuşlardır.

## KAYNAKÇA

Aruna, T. E. (2019). Production of value-added product from pineapple peels using solid state fermentation. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 57: 102193, doi: 10.1016/j.ifset.2019.102193.

Ahmad, M. I., Farooq, S., Alhamoud, Y., Li, C., Zhang, H. (2022). A review on mycoprotein: History, nutritional composition, production methods, and health benefits. *Trends in Food Science & Technology*, 121: 14-29, doi: 10.1016/j.tifs.2022.01.027.

Amara, A. A., El-Baky, N. A. (2023). Fungi as a source of edible proteins and animal feed. *Journal of Fungi*, 9(1): 73, doi: 10.3390/jof9010073.

- Atta-Delgado, M. X., Lozano, S. P. G., Torres, J. A. (2023). A survey on the prevalence of sustainable diets and the eating experience satisfaction. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 84: 103305, doi: 10.1016/j.ifset.2023.103305.
- Awasthi, M. K., Kumar, V., Hellwig, C., Wikandari, R., Harirchi, S., Sar, T., Taherzadeh, M. J. (2022). Filamentous fungi for sustainable vegan food production systems within a circular economy: Present status and future prospects. *Food Research International*, 164: 112318, doi: 10.1016/j.foodres.2022.112318.
- Barnharst, T., Sun, X., Rajendran, A., Urriola, P., Shurson, G., Hu, B. (2021). Enhanced protein and amino acids of corn–ethanol co-product by *Mucor indicus* and *Rhizopus oryzae*. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 44(9): 1989-2000, doi: 10.1007/s00449-021-02580-0.
- Barzee, T. J., Cao, L., Pan, Z., Zhang, R. (2021). Fungi for future foods. *Journal of Future Foods*, 1(1): 25-37, doi: 10.1016/j.jfutfo.2021.09.002.
- Borujeni, N. E., Karimi, K., Denayer, J. F., Kumar, R. (2022). Apple pomace biorefinery for ethanol, mycoprotein, and value-added biochemicals production by *Mucor indicus*. *Energy*, 240: 122469, doi: 10.1016/j.energy.2021.122469.
- Braho, V., Sar, T., Taherzadeh, M. J. (2023). Cultivation of edible filamentous fungi on pomegranate by-products as feedstocks to produce mycoprotein. *Systems Microbiology and Biomanufacturing*, 1-12, doi: 10.1007/s43393-023-00212-0.
- Cherta-Murillo, A., Danckert, N. P., Valdivia-Garcia, M., Chambers, E. S., Roberts, L., Miguens-Blanco, J., Frost, G. S. (2023). Gut microbiota fermentation profiles of pre-digested mycoprotein (Quorn) using faecal batch cultures in vitro: a preliminary study. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 74(3): 327-337, doi: 10.1080/09637486.2023.2216404.
- Colosimo, R., Mulet-Cabero, A. I., Cross, K. L., Haider, K., Edwards, C. H., Warren, F. J., Finnigan, T. J. A., Wilde, P. J. (2021).  $\beta$ -glucan release from fungal and plant cell walls after simulated gastrointestinal digestion. *Journal of Functional Foods*, 83: 104543, doi: 10.1016/j.jff.2021.104543.
- Copetti, M. V. (2019). Fungi as industrial producers of food ingredients. *Current Opinion in Food Science*, 25: 52-56, doi: 10.1016/j.cofs.2019.02.006.
- de Lima, T. M., de Almeida, A. B., Peres, D. S., de Sousa, T. L., de Freitas, B. S. M., Silva, F. G., Egea, M. B. (2021). *Rhizopus oligosporus* as a biotransforming microorganism of *Anacardium othonianum* Rizz. byproduct for production of high -protein, -antioxidant, and -fiber ingredient. *LWT- Food Science and Technology*, 135: 110030, doi: 10.1016/j.lwt.2020.110030.
- Derbyshire, E. J., Delange, J. (2021). Fungal protein—what is it and what is the health evidence? A systematic review focusing on mycoprotein. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5: 581682, doi: 10.3389/fsufs.2021.581682.
- Derbyshire, E. J., Theobald, H., Wall, B. T., Stephens, F. (2023). Food for our future: the nutritional science behind the sustainable fungal protein-mycoprotein. A symposium review. *Journal of Nutritional Science*, 12(e44): 1-6, doi:10.1017/jns.2023.29.
- Dunlop, M. V., Kilroe, S. P., Bowtell, J. L., Finnigan, T. J., Salmon, D. L., Wall, B. T. (2017). Mycoprotein represents a bioavailable and insulinotropic non-animal-derived dietary protein source: a dose–response study. *British Journal of Nutrition*, 118(9): 673-685, doi: 10.1017/S0007114517002409.
- Dzurendová, S., Shapaval, V., Tafintseva, V., Kohler, A., Byrtusová, D., Sztokowski, M., Immermann, B. (2021). Assessment of biotechnologically important filamentous fungal biomass by Fourier Transform Raman Spectroscopy. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(13): 6710, doi: 10.3390/ijms22136710.
- EC, (2008). Commission Directive 2008/100/EC of 28 October 2008 amending council directive 90/496/EEC on nutrition labelling for foodstuffs as regards recommended daily allowances, energy

- conversion factors and definitions. *Official Journal of European Union* 38: 208–211.
- Elango, R., Laviano, A. (2019). From old to new: roles of protein sources and individual amino acids in clinical nutrition. *Current Opinion in Clinical Nutrition & Metabolic Care*, 22(1): 58-59, doi: 10.1097/MCO.0000000000000532.
- El-Enshasy, H. A. (2007). Filamentous fungal cultures—process characteristics, products, and applications. In: *Bioprocessing for Value-added Products from Renewable Resources*, McNeil B., Archer, D., Giavasis I., Harvey L. (chief ed.), Elsevier Science, Amsterdam, Netherlands, pp. 225-261.
- Ezekiel, O. O., Aworh, O. C., Blaschek, H. P., Ezeji, T. C. (2010). Protein enrichment of cassava peel by submerged fermentation with *Trichoderma viride* (ATCC 36316). *African Journal of Biotechnology*, 9(2): 117-122.
- Finnigan, T., Needham, L., Abbott, C. (2016). Mycoprotein: A Healthy New Protein With a Low Environmental Impact. In: *Sustainable Protein Sources*, Nadathur, S., Scanlin, L. (chief ed.), Academic Press, Cambridge, the US, pp. 305-323.
- Gastaldello, A., Giampieri, F., De Giuseppe, R., Grosso, G., Baroni, L., Battino, M. (2022). The rise of processed meat alternatives: A narrative review of the manufacturing, composition, nutritional profile and health effects of newer sources of protein, and their place in healthier diets. *Trends in Food Science & Technology*, 127: 263-271, doi: 10.1016/j.tifs.2022.07.005.
- Giavasis, I., Seviour, R. J., Hudman, P., McNeil, B. (2019). Fungal bioproducts for use in food: polysaccharides, organic acids, and mycoprotein. In: *Advances in Food Bioproducts and Bioprocessing Technologies*, Chavez-Gonzalez, M. L., Balagurusamy, N., Aguilar, C. (chief ed.), CRC press, Florida, the ABD, pp 511-548.
- Gibbs, J., Leung, G. K. (2023). The effect of plant-based and mycoprotein-based meat substitute consumption on cardiometabolic risk factors: a systematic review and meta-analysis of controlled intervention trials. *Dietetics*, 2(1): 104-122, doi: 10.3390/dietetics2010009.
- Gmoser, R., Sintca, C., Taherzadeh, M. J., Lennartsson, P. R. (2019). Combining submerged and solid state fermentation to convert waste bread into protein and pigment using the edible filamentous fungus *Neurospora intermedia*. *Waste Management*, 97: 63-70, doi: 10.3390/fermentation4010011.
- Gulsunoglu Konuskan, Z., Kilic Akyilmaz, M. (2022). Microbial bioconversion of phenolic compounds in agro-industrial wastes: a review of mechanisms and effective factors. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 70(23): 6901-6910 doi: 10.1016/j.bcab.2020.101562.
- Harris, H. C., Edwards, C. A., Morrison, D. J. (2019). Short chain fatty acid production from mycoprotein and mycoprotein fibre in an in vitro fermentation model. *Nutrients*, 11(4): 800, doi: 10.3390/nu11040800.
- Hashempour-Baltork, F., Hosseini, S. M., Assarehzadegan, M. A., Khosravi-Darani, K., Hosseini, H. (2020). Safety assays and nutritional values of mycoprotein produced by *Fusarium venenatum* IR372C from date waste as substrate. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(12): 4433-4441, doi: 10.1002/jsfa.10483.
- Hashempour-Baltork, F., Jannat, B., Dadgarnejad, M., Mirza Alizadeh, A., Khosravi-Darani, K., Hosseini, H. (2023). Mycoprotein as chicken meat substitute in nugget formulation: physicochemical and sensorial characterization. *Food Science & Nutrition*, 11: 4289-4295, doi: 10.1002/fsn3.3354.
- Hyde, K. D., Xu, J., Rapior, S., Jeewon, R., Lumyong, S., Niego, A. G. T., Abeywickrama, P. D., Aluthmuhandiram, J. V. S., Brahmanage, R. S., Brooks, S., Chaiyasen, A. Chethana, K. W. T., Chomnunti, P., Chepkirui, C., Chuankid, B, de Silva, N. I., Doilom, M., Faulds, C., Gentekaki, E., Gopalan, V., Kakumyan, P., Harishchandra, D., Hemachandran, H., Hongsanan, S., Karunarathna, A., Karunarathna, S. C., Khan, S., Kumla, J., Jayawardena, R. S., Liu, J., Liu, N., Luangharn, T., Macabeo, A. P. G., Marasinghe, D. S., Meeks, D., Mortimer, P. E., Mueller, P., Nadir, S., Nataraja, K. N., Nontachaiyapoom, S., O'Brien, M., Penkhrue, W., Phukhamsakda, C.,

- Ramanan, U. S., Rathnayaka, A. R., Sadaba, R. B., Sandargo, B., Samarakoon, B. C., Tennakoon, D. S., Siva, R., Sriprom, W., Suryanarayanan, T. S., Sujarit, K., Suwannarach, N., Suwunwong, T., Thongbai, B., Thongklang, N., Wei, D., Wijesinghe, S. N., Winiski, J., Yan, J., Yasanthika, E., Stadler, M. (2019). The amazing potential of fungi: 50 ways we can exploit fungi industrially. *Fungal Diversity*, 97: 1-136.
- Karimi, S., Mahboobi Soofiani, N., Mahboubi, A., Taherzadeh, M. J. (2018). Use of organic wastes and industrial by-products to produce filamentous fungi with potential as aqua-feed ingredients. *Sustainability*, 10(9): 3296, doi: 10.3390/su10093296.
- Kim, K. M., Lim, J., Lee, J. J., Hurh, B. S., Lee, I. (2017). Characterization of *Aspergillus sojae* isolated from Meju, Korean traditional fermented soybean brick. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 27(2): 251-261, doi: 10.4014/jmb.1610.10013.
- Lonchamp, J., Stewart, K., Munialo, C. D., Evans, L., Akintoye, M., Gordon, S., Euston, S. R. (2022). Mycoprotein as novel functional ingredient: mapping of functionality, composition and structure throughout the Quorn fermentation process. *Food Chemistry*, 396: 133736, doi: 10.1016/j.foodchem.2022.133736.
- Lübeck, M., Lübeck, P. S. (2022). Fungal cell factories for efficient and sustainable production of proteins and peptides. *Microorganisms*, 10(4): 753, doi: 10.3390/microorganisms10040753.
- Mahboubi, A., Ferreira, J. A., Taherzadeh, M. J., Lennartsson, P. R. (2017a). Value-added products from dairy waste using edible fungi. *Waste Management*, 59: 518-525, doi: 10.1016/j.wasman.2016.11.017.
- Mahboubi, A., Ferreira, J. A., Taherzadeh, M. J., Lennartsson, P. R. (2017b). Production of fungal biomass for feed, fatty acids, and glycerol by *Aspergillus oryzae* from fat-rich dairy substrates. *Fermentation*, 3(4): 48, doi: 10.3390/fermentation3040048.
- Mccarthy, T. C., Sinal, C. J. (2005). Biotransformation. In: *Encyclopedia of Toxicology (Second Edition)*, Wexler, P. (chief ed.), Academic Press, the USA, pp. 299-312.
- Meini, M. R., Cabezudo, I., Galetto, C. S., Romanini, D. (2021). Production of grape pomace extracts with enhanced antioxidant and prebiotic activities through solid-state fermentation by *Aspergillus niger* and *Aspergillus oryzae*. *Food Bioscience*, 42: 101168, doi: 10.1016/j.fbio.2021.101168.
- Mousavi, S. N., Parchami, M., Ramamoorthy, S. K., Soufiani, A. M., Hakkarainen, M., Zamani, A. (2023). Bioconversion of carrot pomace to value-added products: *Rhizopus delemar* fungal biomass and cellulose. *Fermentation*, 9(4): 374, doi: 10.3390/fermentation9040374.
- Odinot, E., Fine, F., Sigoillot, J. C., Navarro, D., Laguna, O., Bisotto, A., Lomascolo, A. (2017). A two-step bioconversion process for canolol production from rapeseed meal combining an *Aspergillus niger* feruloyl esterase and the fungus *Neolentinus lepidus*. *Microorganisms*, 5(4): 67, doi: 10.3390/microorganisms5040067.
- Rousta, N., Ferreira, J. A., Taherzadeh, M. J. (2021). Production of L-carnitine-enriched edible filamentous fungal biomass through submerged cultivation. *Bioengineered*, 12(1): 358-368, doi: https://doi.org/10.1080/21655979.2020.1863618.
- Rousta, N., Larsson, K., Fristedt, R., Undeland, I., Agnihotri, S., Taherzadeh, M. J. (2022). Production of fungal biomass from oat flour for the use as a nutritious food source. *NFS Journal*, 29: 8-15, doi: 10.1016/j.nfs.2022.09.001.
- Saeed, F., Afzaal, M., Khalid, A., Shah, Y. A., Ateeq, H., Islam, F., Shah, M. A. (2023). Role of mycoprotein as a non-meat protein in food security and sustainability: A review. *International Journal of Food Properties*, 26(1): 683-695, doi: 10.1080/10942912.2023.2178456.
- Schweiggert-Weisz, U., Eisner, P., Bader-Mittermaier, S., Osen, R. (2020). Food proteins from plants and fungi. *Current Opinion in Food Science*, 32: 156-162, doi: 10.1016/j.cofs.2020.08.003.
- Slama, N., Mankai, H., Limam, F. (2021). *Streptomyces tunisiensis* DSM 42037 mediated bioconversion of ferulic acid released from barley bran. *World Journal of Microbiology and*

- Biotechnology*, 37: 1-10, doi: 10.1007/s11274-021-03031-4.
- Souza Filho, P. F., Andersson, D., Ferreira, J. A., Taherzadeh, M. J. (2019). Mycoprotein: environmental impact and health aspects. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 35(10), 147, doi.org/10.1007/s11274-019-2723-9.
- Souza Filho, P. F., Nair, R. B., Andersson, D., Lennartsson, P. R., Taherzadeh, M. J. (2018). Vegan-mycoprotein concentrate from pea-processing industry byproduct using edible filamentous fungi. *Fungal Biology and Biotechnology*, 5(1): 1-10, doi: 10.1186/s40694-018-0050-9.
- Stoffel, F., de Oliveira Santana, W., Gregolon, J. G. N., Kist, T. B. L., Fontana, R. C., Camassola, M. (2019). Production of edible mycoprotein using agroindustrial wastes: Influence on nutritional, chemical and biological properties. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 58: 102227, doi: 10.1016/j.ifset.2019.102227.
- Strong, P. J., Self, R., Allikian, K., Szewczyk, E., Speight, R., O'Hara, I., Harrison, M. D. (2022). Filamentous fungi for future functional food and feed. *Current Opinion in Biotechnology*, 76: 102729, doi: 10.1016/j.copbio.2022.102729.
- Svensson, S. E., Bucuricova, L., Ferreira, J. A., Souza Filho, P. F., Taherzadeh, M. J., Zamani, A. (2021). Valorization of bread waste to a fiber-and protein-rich fungal biomass. *Fermentation*, 7(2): 91, doi: 10.3390/fermentation7020091.
- Thunuguntla, R., Mahboubi, A., Ferreira, J. A., Taherzadeh, M. J. (2018). Integration of membrane bioreactors with edible filamentous fungi for valorization of expired milk. *Sustainability*, 10(6): 1940, doi: 10.3390/su10061940.
- Tong, S., Chen, W., Hong, R., Chai, M., Sun, Y., Wang, Q., Li, D. (2023). Efficient mycoprotein production with low CO<sub>2</sub> emissions through metabolic engineering and fermentation optimization of *Fusarium venenatum*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 72, 604-612, doi: 10.1021/acs.jafc.3c08509.
- Upcraft, T., Tu, W. C., Johnson, R., Finnigan, T., Van Hung, N., Hallett, J., Guo, M. (2021). Protein from renewable resources: mycoprotein production from agricultural residues. *Green Chemistry*, 23(14): 5150-5165, doi: 10.1039/d1gc01021b.
- Vongsangnak, W., Nielsen, J. (2013). Systems biology methods and developments of filamentous fungi in relation to the production of food ingredients. In: *Microbial Production of Food Ingredients, Enzymes and Nutraceuticals*, McNeil, B., Archer, D., Giavasis, I., Harvey, L. (chief ed.), Woodhead Publishing, Sawston, the UK, pp. 19-41.
- Wang, R., Sar, T., Mahboubi, A., Fristedt, R., Taherzadeh, M. J., Undeland, I. (2023). In vitro protein digestibility of edible filamentous fungi compared to common food protein sources. *Food Bioscience*, 54: 102862, doi: 10.1016/j.fbio.2023.102862.
- Wang, S. K., Yang, K. X., Zhu, Y. R., Zhu, X. Y., Nie, D. F., Jiao, N., Angelidaki, I. (2022). One-step co-cultivation and flocculation of microalgae with filamentous fungi to valorize starch wastewater into high-value biomass. *Bioresource Technology*, 361: 127625, doi: 10.1016/j.biortech.2022.127625.
- Wang, D., Wang, L. J., Zhu, F. X., Zhu, J. Y., Chen, X. D., Zou, L., Saito, M. (2008). In vitro and in vivo studies on the antioxidant activities of the aqueous extracts of Douchi (a traditional Chinese salt-fermented soybean food). *Food Chemistry*, 107(4): 1421-1428, doi: 10.1016/j.foodchem.2007.09.072.
- Wei, G., Chitrakar, B., Regenstein, J. M., Sang, Y., Zhou, P. (2023). Microbiology, flavor formation, and bioactivity of fermented soybean curd (furu): A review. *Food Research International*, 163: 112183, doi: 10.1016/j.foodres.2022.112183.
- Wikandari, R., Hasniah, N., Taherzadeh, M. J. (2022). The role of filamentous fungi in advancing the development of a sustainable circular bioeconomy. *Bioresource Technology*, 345: 126531, doi: 10.3390/molecules28030997.
- Wösten, H. A. (2019). Filamentous fungi for the production of enzymes, chemicals and

- materials. *Current Opinion in Biotechnology*, 59: 65-70, doi: 10.1016/j.copbio.2019.02.010.
- Yafetto, L. (2022). Application of solid-state fermentation by microbial biotechnology for bioprocessing of agro-industrial wastes from 1970 to 2020: A review and bibliometric analysis. *Heliyon*, 8: e09173, doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e09173.
- Yang, M., Ashraf, J., Tong, L., Wang, L., Zhang, X., Li, N., Liu, L. (2021). Effects of *Rhizopus oryzae* and *Aspergillus oryzae* on prebiotic potentials of rice bran pretreated with superheated steam in an in vitro fermentation system. *LWT-Food Science and Technology*, 139: 110482, doi: 10.1016/j.lwt.2020.110482.
- Yasuda, M., Tachibana, S., Kuba-Miyara, M. (2012). Biochemical aspects of red koji and tofuyo prepared using *Monascus* fungi. *Applied microbiology and biotechnology*, 96: 49-60, doi: 10.1007/s00253-012-4300-0.
- Zeng, X., Tang, Z., Zhang, W., He, L., Deng, L., Ye, C., Fan, J. (2020). Effect of red koji as a Starter Culture in “Wanergao”: A Traditional Fermented Food in China. *Food Science & Nutrition*, 8(10): 5580-5590, doi: 10.1002/fsn3.1849.
- Zepka, L. Q., Jacob-Lopes, E., Goldbeck, R., Souza-Soares, L. A., Queiroz, M. I. (2010). Nutritional evaluation of single-cell protein produced by *Aphanothece microscopica* Nägeli. *Bioresource Technology*, 101(18): 7107-7111, doi: doi.org/10.1016/j.biortech.2010.04.001.
- Zhang, X., Zeng, Y., Liu, J., Men, Y., Sun, Y. (2023). Effects of three extraction methods on the structural and functional properties of insoluble dietary fibers from mycoprotein. *Food Chemistry Advances*, 2: 100299, doi: 10.1016/j.focha.2023.100299.
- Zheng, L., Zheng, P., Sun, Z., Bai, Y., Wang, J., Guo, X. (2007). Production of vanillin from waste residue of rice bran oil by *Aspergillus niger* and *Pycnoporus cinnabarinus*. *Bioresource Technology*, 98(5): 1115-1119, doi: 10.1016/j.biortech.2006.03.028.