



Peynirlerin Erime Özellikleri Üzerine Biyokimyasal ve Reolojik Dinamiklerdeki Etkileşimlerin Etkisi

Orhan EREN^{1,2}, Tülay ÖZCAN³

¹ITAGEM., Gıda ve Yem Kontrol Merkez Araştırma Enstitüsü, Osmangazi Bursa, TURKEY, ORCID ID 0009-0001-6732-1429

² B.U.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Görükle Kampüsü, Nilüfer, Bursa. TURKEY, ORCID ID 0009-0001-6732-1429

³ B.U.Ü., Ziraat Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Görükle Kampüsü, Nilüfer, Bursa, TURKEY, ORCID ID 0000-0002-0223-3807

Corresponding Author: Tülay ÖZCAN, tulayozcan@uludag.edu.tr

Özet

Peynir, yüksek besin değeri ile fonksiyonel gıdalar arasında yer almaktadır. Peynirde tekstür tüketici tarafından genel kalite ve tercihin bir belirleyicisi olarak kabul edilmekle birlikte reolojik özelliklerden de etkilenmektedir. Peynir reolojisi, kazein miselleri tarafından bir arada tutulan yağlar, süt serumu veya peyniraltı suyu ile mineralleri içeren süngerimsi bir matriks ile şekillenmektedir. Peynirde erime, ısıya maruz kaldığında katı halden sıvı veya yarı sıvı hale geçiş sürecini ifade etmektedir. Bu dönüşüm, peynirin yumuşaması ve akışkanlaşması ile karakterize olup, viskoz bir kıvamla sonuçlanmaktadır. Erime özelliği, bileşim, kazein ve yağ içeriği, nem oranı, pH ve belirli minerallerin varlığı gibi çeşitli faktörlerden etkilenmektedir. Peynirde genel olarak, erime ve uzama özellikleri reolojik ve biyokimyasal dinamikler arasındaki etkileşimlere dayanmaktadır. Kazein molekülleri arasındaki etkileşimlerin azalması, erimeyi artırmaktadır. Ayrıca, eriyebilirlik, farklı peynir türleri arasında değişiklik göstermekte ve her biri çeşidi benzersiz yapı, lezzet ve teknolojik profillere sahip olmaktadır.

Article Info

Review Article

Received: 15/01/2026

Accepted: 03/04/2026

Anahtar Kelimeler

Peynir, erime, reoloji, kazein

Öne Çıkanlar

Kazein etkileşimleri peynirin erime davranışını belirler.

Bileşim ve biyokimyasal faktörler eriyebilirliği etkiler.

Erime özellikleri peynir türleri arasında farklılık gösterir.

The effect of biochemical and rheological dynamics on the melting properties of cheeses

Abstract

Cheese, with its high nutritional value, is classified among functional foods. In cheese, texture is recognized by consumers as an indicator of overall quality and preference, and it is also influenced by rheological properties. The rheology of cheese is shaped by a spongy matrix composed of fats, milk serum or whey, and minerals, all held together by casein micelles. Melting in cheese refers to the process in which it transitions from a solid state to a liquid or semi-liquid state when exposed to heat. This transformation is characterized by the softening and fluidization of the cheese, resulting in a viscous consistency. The melting property is affected by various factors such as composition, casein and fat content, moisture level, pH, and the presence of specific minerals. In general, the melting and stretching characteristics of cheese are based on the interactions between rheological and biochemical dynamics. A reduction in the interactions between casein molecules enhances melting. Furthermore, meltability varies among different cheese types, each possessing unique structural, sensory, and technological profiles.

Keywords

Cheese, melting, rheology, casein

Highlights

Casein interactions govern cheese melting behavior.

Composition and biochemical factors affect meltability.

Melting characteristics differ among cheese types.

1. Giriş

Peynir, en eski medeniyetlerden olan Sümer ve Mısır'dan günümüze kadar üretilen önemli süt ürünlerinden birisi olarak; sütün peynir mayası veya zararsız organik asitlerin etkisiyle pıhtılaştırılması, değişik şekillerde işlenmesi, bazen de tat ve koku verici maddelerin ilave edilmesi ile üretilen, çeşitli süre ve derecelerde olgunlaştırılan kendine özgü tat ve aromaya sahip, besin değeri yüksek bir süt ürünüdür. Dünya çapında çok çeşitli tekstürel ve duyuşal özelliklerde yaygınlaşan bu süt ürünü temel protein, yağ ve diğer biyolojik değeri yüksek besin maddeleri kaynağı olarak kabul edilmektedir. Peynirin spesifik kalite ve tekno-fonksiyonel özelliklerinin değerlendirilmesi tüketiciler ve endüstri için kritik öneme sahip bulunmaktadır [1-3].

Peynirlerin tercih edilen birçok özelliği ise öncelikle tekstürü tarafından şekillenmektedir. Örneğin, ısıtma işlemi uygulanmış ve uygulanmamış peynirin reolojik, makro-mikroyapı ve pişirme özellikleri esas olarak yapıya bağlı olarak değişkenlik göstermektedir [4-6]. Peynirin ısıya bağlı fonksiyonelliği, erime, yumuşama, akışkanlık, görünür viskozite, kızarma ve uzama gibi özelliklerini kapsayan, pişirme performansının kritik bir bileşenidir. Bu fiziksel özellikler işlenen hammadde sütün genel bileşiminden, işleme tekniklerinden ve olgunlaşma koşullarından (süre, bağıl nem, sıcaklık vb.) etkilenmektedir. Ayrıca, çeşitli biyokimyasal değişimlere göre şekillenen peynirdeki

kazein partiküllerinin durumu ve proteoliz derecesi de kalite parametreleri üzerindeki önemli faktörler olarak tanımlanmaktadır [4, 7, 8]

Peynir, katı (solid-like) ve de sıvı (fluid-like) benzeri davranış sergileyen viskoelastik bir üründür. Tekstürel makro yapı çoğunlukla lipitler, karbonhidratlar, su ve proteinler dahil olmak üzere temel bileşenlerinin biyo-dinamik değişimleri tarafından belirlenmektedir. Peynirin erime ve uzama özellikleri ise, temel süt proteini olan kazein molekülleri arasındaki etkileşimlere dayanmaktadır. Isıtma sırasında peynirde yapısal değişiklikler şekillenmektedir. Sulu bir ortamda, proteinlerin molekül içi ve moleküller arası hidrofobik ve elektrostatik bağları sıcaklık arttıkça güçlenmektedir. Öte yandan, hidrojen bağı gibi ek bağların ve etkileşimlerin gücü ise sıcaklık artışı ile birlikte azalmaktadır. Kuvvet dengesindeki bu değişiklik hem kazein-kazein hem de kazein-su etkileşimlerini etkilemektedir. Ayrıca, yağlı peynirlerde yağın yumuşaması da peynirin erimesi sırasında meydana gelen bir diğer önemli yapısal dönüşümdür. Bu değişiklikler peynirin erime özellikleri için önemli faktörlerdir [9-12].

Bir gıdanın kalitesi; besin değeri, görünüşü, aroması ve tekstürü gibi birçok özellik ile belirlenmektedir. Bu anlamda da gıda tasarlama işlemi biyokimyasal, viskoz/elastik ve reolojik değişimleri gerektirmektedir. Ancak, gıda bileşenlerinin karmaşıklığı ve proseslere göre çeşitli davranışları nedeniyle, gıda sistemlerinin fiziko-kimyasal ve biyo-dinamik özelliklerindeki değişiklikler kapsamlı şekilde açıklanmalıdır [13].

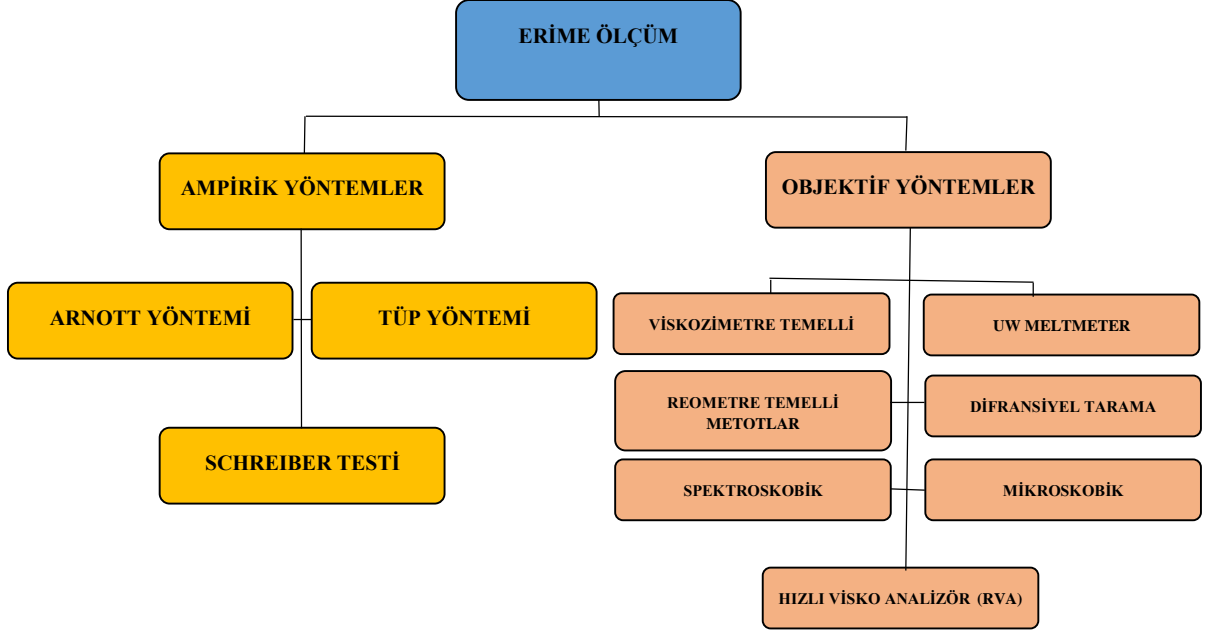
2. Peynirin erime özelliklerinin belirlenmesi

Peynirin erime özelliğinde fırınlama yaygın olarak kullanılan bir ısıl işlem yöntemidir. Peynirin teknolojik olarak kullanılabilmesi için, eritme sürecini anlamak, önemli bir ticari kaygı olmaya devam etmektedir. Ayrıca, ısıtma sırasında, peynir çok çeşitli yapısal değişikliklere uğramaktadır ki, bu değişiklikler peynirin eritme özellikleri için önemli parametrelerdir [4, 9, 14].

Objektif olarak erime yeteneğini belirlemedeki temel zorluk, bu özelliklerin katı peynirin ısı transferi ve termal faz geçişi özelliklerine, ayrıca eriyiklerin akış veya reolojik özelliklerine bağlı olmasıdır. Peynirin erime yeteneğini saptamak için uygulanacak yöntemler belirtilen özellikleri dikkate alınmalıdır [12, 15]. Bu nedenle, peynirin erime özelliğinin hassas olarak kontrolü, tekstür ve mikroyapı gibi fiziksel özelliklerin de doğru ve nesnel bir şekilde değerlendirmesini gerektirmektedir [16]. Peynirin erime özelliğini saptamak için deneysel ve nesnel yaklaşımlar ile ayrılabilen bir dizi erime testi oluşturulmuştur (Şekil 1). Deneysel testler, erime sırasında örnekteki boyutsal değişiklikleri, örneğin yükseklik, çap veya erime alanındaki dairesel değişimini ölçerek değerlendirirken, nesnel yöntemler peynirin visko-elastik özelliği, viskozitesi vb. gibi içsel reolojik özelliklerini değerlendirmeye dayanmaktadır [9, 12, 17].

Moleküler ve mikroskobik yapının bir yansıması olan peynir tekstürü, mineraller, süt proteinleri, lipitler ve su gibi diğer bileşenler açısından karmaşık bir matris oluşturur. Peynirin çeşitliliği, bileşimi ve yapısal özellikleri büyük ölçüde onu tanımlayan bileşenlerini de etkilemektedir. Süt proteinlerinin oda sıcaklığında peynirin sertliğine katkıda bulunduğu, süt yağının ise peynire yumuşak bir yapı kazandırdığı

bilinmektedir. Bu fonksiyonel özellikler, özellikle pizza yapımındaki Pasta-Filata grubu peynirler için ise kritik öneme sahiptir ki; erime, uzama, nispi nem, serbest yağ oluşumu ve kahverengileşme gibi değişimleri tetiklemektedir [17, 18].



Şekil 1. Peynirin eriyebilirliğini ölçmek için ampirik ve objektif yaklaşımlar [9]

Peynirin erimesi ayrıca, bir jel-sıvı geçişini de temsil etmektedir. Ampirik analiz açısından erime kolaylığı, peynirin ısıtıldığında ne kadar kolay eriyeceği ve yayılacağını açıklamaktadır. Bu terim, akışın büyüklüğü ve erimenin kolaylığı olmak üzere iki özelliği birleştirmektedir. Peynirin ısı transferi ve termal faz geçişi özellikleri ise, erimenin kolaylığıyla net şekilde bağlantılıdır. Akışın derecesi, peynirin reolojik özelliklerine ve yüksek sıcaklıklarda akış oluşturmak için gereken kuvvete bağlı bulunmaktadır. Erime kolaylığı, reolojik parametreler ve peynirin dokusu, kimozen konsantrasyonu, nem ile yağ içeriği, proteoliz, sıcaklık, pH, sodyum klorür konsantrasyonu, kazein-kazein, kazein-su veya kazein-yag interaksyonları ve ayrıca su ve kalsiyum içeriği gibi çok sayıda faktörden etkilenmektedir [12].

3. Peynirin erime özelliklerini etkileyen faktörler

Tekstürel olarak peynir, yoğun bir protein matriksinden oluşmakta olup, yağ globülleri ise bu sistem içinde dağılmaktadır. Bu iki fazın reolojik özellikleri birlikte peynirin erime özelliklerine katkıda bulunmaktadır. Isıtma öncesinde ve sırasında, peynirdeki iki faz (yağ fazı ve su protein) belirgin reolojik özelliklere sahip bulunmaktadır. Süt yağı 0-40°C arasında bir sıcaklıkta erirken, protein ağı esas olarak 30-70°C arasında zayıflayarak yumuşamaktadır [19, 20].

Kazein ve serum proteinleri peynirin temel bileşenleridir. Proteinler çözünmekte ancak çeşitli etkileşimlerindeki değişiklikler ile "erime" olarak bilinen olayı etkilememektedir

[4]. Protein yapısı, esasen, hidrofobik ve disülfid bağları gibi zayıf (kovalent olmayan) bağlarla oluşmaktadır. Sistem entropisi ise hidrofobik kuvvetleri yönetmektedir. Bu kuvvetlerin gücü sıcaklık artışı ile artmaktadır [21]. Peynir pıhtısı ısıtıldığında, hidrofobik işlevsel özellikler daha belirgin hale geçmekte ve birkaç protein konformasyonel değişikliğe uğrayarak peynirin deformasyonuna ve akışına sebep olmaktadır [22]. Daha yüksek sıcaklıklarda ise, peynirlerin reoloji, uzama ve erime özellikleri, esasen, hidrojen bağları, hidrofobik etkileşimler, kalsiyum çapraz bağlanması ve elektrostatik kuvvetler aracılığıyla kazein-kazein etkileşimlerinin büyüklüğü ve oranı ile belirlenmektedir. Genel olarak, artan sıcaklığın bu bağlantılar üzerindeki etkisi kazein matriksini zayıflatmaktadır. Sıcaklık artarken hidrofobik bağlantılar artsa da, kazein moleküllerinin yüzey alanındaki azalmadan dolayı jelin zayıflaması söz konusu olmaktadır. Benzer şekilde, elektrostatik itme de daha yoğun hale gelmektedir ve hidrojen bağı, sıcaklık arttıkça azalmaktadır. Bu, matriksin zayıflayacağı ve dengenin artan itme lehine değişeceği anlamına gelmektedir [1, 4]. Tablo 1’de peynir üretim koşullarında erimeyi etkileyen potansiyel kazein etkileşimleri belirtilmektedir.

Everett ve Auty’ye [18] göre, peynirin erime özelliği, kazein-kazein etkileşimlerini azaltan tüm faktörler nedeni ile artmaktadır. Bunlar, pH’yı 5,2’ye düşürmeyi, çözünür ve çözünmeyen kalsiyum oranını daha yüksek tutmayı ve peyniraltı suyuyla yıkama, jelasyon, ön asitlendirme veya daha düşük pH’da peyniraltı suyunu uzaklaştırma yolu ile sütteki toplam kalsiyum içeriğini düşürmeyi hedeflemektedir. Ayrıca, peynire işlenecek süte kültür ilavesi yerine doğrudan asitlendirme de, bağlanmış kalsiyum miktarını benzer bir pH’da azaltmaktadır [18]. Ayrıca, Kindstedt vd. [23] peynirde pH’nın 4.7’ye düşmesi ile, kazeinin izoelektrik noktasına ulaştıkça güçlü kazein-kazein bağlantılarının arttığını ve peynirin akış, erime ve gerilme özelliklerinin olumsuz etkilendiğini belirtmektedir.

Yağ içeriği peynirin erime özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir ve aslında peynirde tamamen eriyen bileşen fazı olmaktadır. Bununla birlikte yağ konsantrasyonu her zaman erime kabiliyeti ile tam olarak orantılı değildir, çünkü etkisi nem ve protein gibi diğer bileşenlerin oranı ile de etkilenmektedir [4, 8, 24]. Erime, ısı işlem aşamasında (fırınlama vb.) peynirden süt yağının salınımı ile sonuçlanmaktadır. Süt yağı globülleri, protein agregatları tarafından çevrelenmekte, ancak onlarla etkileşime girmemektedir. Yağ, kazein misellerinin agregatları arasında inert bir malzeme şeklinde bulunmaktadır ve peynirin erimesini önemli ölçüde etkilememektedir. Tekil kazein agregatları, ortalama büyüklükteki yağ globüllerine göre küçüktür. Bu “çok büyük” yağ globülleri, kazein ağının sürekliliğini bozmaktadır. Peynirdeki yağ globüllerinin sayısı arttıkça, kazein agregatları daha az yoğun ve birbirinden daha uzakta konumlanmaktadır. Bu durum, agregatlar arasındaki etkileşimlerin azalmasına yol açmakta ve sonuç olarak, yağ zayıflamakta ve daha yüksek yağ içeriğine sahip bir peynire kıyasla daha düşük sıcaklıkta daha kolay eriyen ve uzayan bir peynir elde edilmektedir. Peynirin nem içeriğinin artırılması da erime ve uzamayı artırmaktadır. Ancak buradaki mekanizma farklıdır. Peynirin bileşimi her zaman erime veya uzamada bir artışa neden olmayabilmektedir (örneğin, lor peyniri) [22, 24, 25].

Erime süresinin peynir sütündeki yağ içeriği ile negatif bir korelasyon gösterdiği belirtilmektedir. Ayrıca, yüksek yağ içeriği peynirin kesilmesi için gereken kuvveti de azaltmaktadır. Bu nedenle, süt yağ içeriğinin artırılması peynirlerin erime kabiliyetini iyileştirmektedir [26]. Lefevere vd. [27], peynirin nem içeriğinin de yağ içeriği kadar

peynirin erime özelliği üzerinde önemli bir faktör olduğunu belirtmişlerdir. Peynirdeki yağ globülleri genellikle protein miselleri arasında dolgu olarak işlev görmektedir, bu da matriks içindeki protein-protein etkileşimlerini azaltmaktadır. Bu nedenle, peynir ısıtıldığında erimesi için daha az enerji gerektirmekte ve yağın erimesi peynirin akıcılığını desteklemektedir [28]. Ayrıca, yağ asidi bileşiminin sıvı yağ viskozitesini etkilediği de kabul edilmektedir, çünkü zincir uzunluğu viskoziteyi artırırken çift bağlar bunu azaltmaktadır [29]. Ayrıca, süt yağı birçok trigliseriti de içermektedir ve her birinin farklı bir erime noktası bulunmaktadır. Bu nedenle, bazı fraksiyonlar buzdolabı sıcaklıklarında sıvı, diğerleri ise ortam sıcaklığında katı özelliindedir; bununla birlikte, süt yağı yaklaşık 40°C'nin üzerinde tamamen sıvıdır [30]. Ayrıca, yağ globüllerinin morfolojisi de peynirin fiziksel özelliklerini etkilemektedir. Everett ve Olson [31], Cheddar peynirinde serbest yağ oluşumu ile yağ globül çapı arasında bir ilişki tespit edemeseler de, Ma vd. [32] Mozzarella peynirindeki yağ globül boyutu ile erime yeteneği ve serbest yağ oluşumu arasında pozitif bir korelasyon saptamışlardır.

Erime özelliğinde pH'nın da etkisi bulunmaktadır ki bu, bağlı ve çözünür kalsiyum oranındaki değişikliklerden kaynaklanmaktadır. Toplam kalsiyumdan daha çok kazeine bağlı kalsiyum oranı, erime özelliklerini belirlemede kritik rol oynamaktadır [4, 33]. Kazeinle bağlı olan kalsiyumun oranı (misel kalsiyum), düşük pH değerlerine kıyasla daha yüksek pH değerlerinde (5.4) daha fazla olmaktadır [34; 35]. Ayrıca, peynir üretimi sırasında, peyniraltı suyunun uzaklaştırıldığı andaki pH, peyniraltı suyunun teknolojik dayanıklılığı ve peynirin teknolojik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip bulunmaktadır [36]. Yüksek misel kalsiyum konsantrasyonları, peynir matriksindeki kazein-kazein etkileşimlerini artırmaktadır. Güçlü kazein-kazein bağlarının, peynir matriksinin yapısal sertliğini artırdığı bilinmektedir; sonuç olarak, peynirler daha sert ve daha elastik olma eğilimindedir ve daha az erime özelliği göstermektedir [37]. Orta derecede bir pH'da (5.1), miseller kalsiyumun sınırlı çözünürlüğü nedeni ile kazeinin negatif yüklü kısımları açığa çıktığında kazein-kazein interaksiyonları azalmakta, bu da yumuşak bir yapıya ve yüksek erime özelliğine sahip bir peynir üretimine neden olmaktadır [4; 38].

Yüksek pH değerlerinde (6.6-6.7), kazein molekülleri arasındaki temel etkileşimler kalsiyum fosfatı içermektedir. pH düştükçe, kalsiyum fosfat kazeinden çözünerek hidrojen iyonları (H⁺) ile yer değiştirmektedir. pH düşüşü ile birlikte erime ve uzama artış ortaya çıkmaktadır. Ancak, pH çok fazla düşerse, uzama özelliği kaybolabilmektedir. Yüksek yağ içeriğine sahip peynirler, uzama ve istenen erimeyi korumak için daha yüksek bir bağlı-kolloidal kalsiyum içeriği (daha yüksek pH) gerektirirken, düşük yağlı peynirler için bunun tersi geçerlidir. Peynirin bağlı kalsiyum fosfat içeriği, sütün kazein içeriği ve peynir üretimi sırasında sütün ve peynirin pH'sı dahil olmak üzere birçok faktörden etkilenmektedir. Sütün kalsiyum içeriğini etkileyen faktörler arasında beslenme uygulamaları (daha fazla tahıl = daha yüksek kalsiyum), laktasyon dönemi (geç laktasyon=daha az kalsiyum) ve hayvan sağlığı (mastitis=daha az kalsiyum) yer almaktadır [1, 22].

Peynirlerin çoğunda en yaygın bileşen olan su, gözenekli bir kazein matriksi boyunca dağılmış sürekli fazı oluşturmaktadır. Su, önemli bir bileşen olup, çeşitli kimyasal reaksiyonlar için ortam sağlamakta ve peynirin genel nem içeriğine katkıda bulunmaktadır. Su içeriği peynirin tekstürünü etkilemekte, düşük nemli peynirler

genellikle daha az erime özelliği sergilemektedir [1, 10]. Genel olarak, peynirler, bileşimindeki nem seviyeleri yükseldikçe yumuşak özellik göstermektedir. Nemin tekstürü yumuşatma etkisi, iki temel nedenden kaynaklanmaktadır; *i*: peynir matriksindeki su bir yağlayıcı görevi görmektedir ve *ii*: nem seviyelerinin yükseltilmesi, birincil yapısal bileşen olan kazein seviyesinde orantılı bir düşüşe yol açmaktadır. Bununla birlikte, suyun peynirin erime özellikleri üzerindeki etkisi oldukça karmaşıktır. Peynirin toplam nem seviyesini artırmak, her zaman erime özelliğinde bir iyileşmeye neden olmamaktadır. Aksine, kazein-su etkileşimlerinin (iyonik güç, pH ve koloidal kalsiyum fosfat tarafından büyük ölçüde etkilenir) peynirin erime özellikleri üzerinde toplam nem seviyelerinden daha fazla etkisi olduğu belirtilmektedir [25, 37, 39]. Bununla birlikte, daha yüksek miktarda bağlı su, pişirme sırasında nem kaybına karşı bir rezerv sağlamakta ve protein-protein etkileşimlerini azaltmakta ve peynir ısıtıldığında protein akıcılığını ve sert jel yapısını sınırlandırmaktadır [40, 41].

Tuz, özellikle tekstürel özellikler ve pişirme yeteneği olmak üzere peynirin genel kalitesi üzerinde önemli oranda etkili olmaktadır. Ayrıca, peynir üretim süreci sırasında tuz eklenmesi ile peynir diğer süt ürünlerine göre daha yüksek bir sodyum içeriğine sahip bulunmaktadır. Bu nedenle, peynirlerin erime özelliklerine NaCl azaltımının veya ikamesinin etkisi de önemli olmaktadır [42, 43, 44]. Ayrıca, McCarthy vd. [45] tuz azaltımının erime üzerinde önemli bir etkisi olduğunu belirtmişler, düşük tuzlu peynirler tam tuzlu Cheddar peynirlerinden çok daha fazla erime özelliği göstermiştir.

Peynire işlenecek süte uygulanan ısı işlem peynirlerin reolojik ve tekstürel özelliklerini etkilemektedir [4, 46]. Örneğin, yüksek sıcaklıkta ısı işlem uygulanmış süttten (71°C, 30 dk.) üretilen Mozzarella peynirlerinin, pastörize (63°C, 30 dk.) veya çiğ süttten yapılanlara göre gerilme ve erime özelliklerinin orta düzeyde olduğu saptanmıştır [47]. Bu bulgu, Rynne vd. [46] tarafından da yapılan çalışmada doğrulanmıştır; yarı yağlı Cheddar peynirinin ortalama akışkanlığının, 360 günlük olgunlaşma süresince süt pastörizasyon sıcaklığının artmasıyla (72°C'den 87°C'ye, 26 sn.) azaldığı belirtilmiştir.

Isıtma sıcaklığı ve süresindeki değişim, peynirlerin pişirme koşullarını önemli ölçüde etkilemektedir. Öte yandan, ürünün ısıtma boyunca sıcaklık geçmişi de peynirlerin erime özelliklerini değiştirebilmektedir. Bir pizzanın temel malzemeleri Mozzarella peyniri, pizza sosu, hamur tabanıdır ve bileşimleri erime özelliklerini ve ürünün duyu kalitesini de önemli ölçüde değiştirmektedir. Sonuç olarak, malzemeler arasındaki bileşenlerin kütle transferi, bileşimde değişikliklere de yol açabilmektedir ve bu da peynirlerin erime özelliğini etkilemektedir. Isıtma sırasında meydana gelen protein denatürasyonu, yağın erimesi ve suyun yeniden dağılımı, peynirin viskoelastik davranışını büyük ölçüde etkilemektedir [1, 48].

Genel olarak, peynirin erime özellikleri olgunlaşma sırasındaki biyokimyasal dönüşümlere göre de değişmektedir. Proteoliz, glikoliz, lipoliz ve koloidal kalsiyum fosfatın bir kısmının çözünürlüğü, aroma ve tekstür üzerinde etkili olan biyolojik değişimlerden bazılarıdır. Proteoliz, proteinlerin daha küçük peptitlere veya amino asitlere parçalanmasıdır. Genel olarak olgunlaşma sırasında, kazein molekülü içindeki bağların peynir üretiminde kullanılan peynir mayasından arta kalan rennin enzimi (kalıntı rennet) veya mikroorganizmaların aktivitesiyle parçalanması sonucu meydana gelmektedir. Proteoliz esasen kazein ağını parçalamakta ve bu durum kolayca eriyen,

ancak sınırlı uzama özelliğine sahip bir peynirle sonuçlanmaktadır. İyi bir uzama için sağlam bir kazein ağının iplikçikler oluşturması gerekmektedir [8, 49]. Kazeinler önemli sayıda hidrofobik bölgeler içerdiğinden, hidrofobik etkileşimler yolu ile protein agregasyonu ısıtma ile peynirde en önemli değişiklikleri oluşturmaktadır. Ayrıca, yüksek nemli veya yüksek yağ içeriğine sahip peynirlerde de kazeinin aşırı proteolizi, daha yumuşak bir yapıya ve önemli ölçüde düşük sıcaklık değerlerinde de akıcılığa neden olmaktadır [4].

Mlynek vd. [26]'ye göre, peynirin sertliği ve erime özelliği, süt ve peynirin yağ içeriği ile olgunlaşma sırasında meydana gelen ve yağların kimyasal özelliklerini etkileyen lipid dönüşümleri ile de ilişkili bulunmaktadır. Ayrıca, olgunlaşma sırasında yağ içeriğindeki artışın, ortalama erime süresinde ve görünür viskozitede önemli bir azalmaya ve ortalama akışkanlıkta da büyük bir artışa yol açtığı belirtilmektedir [50]. Bu anlamda, genel olarak daha düşük yağ konsantrasyonuna sahip Mozzarella peynirleri daha az eriyebilir özellik kazanmaktadır. Yağ, Mozzarella peynirindeki protein alanları arasında bir yağlayıcı görevi gördüğü için, yokluğu protein matrislerinin akışını engelleyebilmekte, ısıtma sırasında peynir hareketini yavaşlatmakta ve bu da yağ azaltımı ile erimeyi azaltmaktadır [51].

Kalsiyum dengesinin peynirin sertliği üzerinde önemli bir etkisi olduğu bilinmektedir. Kazein matrisine bağlı kalsiyum, zamanla çözünür hale geçmekte ve kazeinler arası moleküler bağlantıları azaltmaktadır [18]. Peynirin yumuşaması, kalıntı kimozen ve sütteki doğal enzimlerin yanı sıra starter kültürler ve diğer mikroorganizmaların ürettiği proteazların neden olduğu protein parçalanmasıyla da ilişkili olmaktadır. Özellikle Pasta Filata tipi peynirlerde, zamanla kazeinlerin su tutma kapasitesi artmakta (hidratasyon) ve bu durum, peynirin daha kolay erimesine ve serum çıkışının azalmasına yol açmaktadır [52]. Lamichhane vd. [39], kazeinin belirli hidroliz desenlerinin ve sonraki peptid profillerinin, peynirlerin erime ve gerilme özellikleri üzerinde etkisinin olabileceğini belirtmektedirler.

Tablo 1. Peynir Üretim Koşullarının Kazein Etkileşimleri ve Eriyebilirlik Üzerindeki Etkileri [12]

Peynir Üretiminde Değişkenler	Elektrostatik İtme	Çekme Etkileşimleri	Peynirin Erimesine Etkisi
Asitlik gelişimi (pH \geq 4,9)	Fosfoserin kalıntılarına maruz kalma, CCP (kolloidal kalsiyum fosfat) kaybı üzerine lokalize itmeyi teşvik eder.	Daha az CCP çapraz bağının sonucu olarak azalır.	Arttırır
Düşük pH değerleri (pH <4,9)	Kazeinler izoelektrik noktalarına yaklaştıklarında itmeleri azalır.	Elektrostatik itme azaldıkça hidrofobik etkileşimler artar	Azaltır
Proteoliz	Yüklü peptitler hidrolize edildikçe itmeleri azalır.	Proteinler arasındaki toplam bağ miktarı azaldıkça azalır.	Arttırır

CCP'nin çözünürlüğü	Fosferin kalıntılarının açığa çıkması CCP'nin daha fazla kaybı durumunda lokalize itmeyi artırır.	CCP'nin daha az çapraz bağı nedeniyle azalır.	Arttırır
Sütün koyulaştırılması	Daha fazla miktarda CCP azalmasına neden olur	CCP'nin daha fazla çapraz bağlanması nedeniyle artar	Azalır
Emülsifiye edici tuzların kullanımı	CCP kısmen şelatlandığında fosfoserin kalıntılarının açığa çıkması nedeniyle, bu tuzlar pH'da bir artışa ve itmeye neden olabilir.	CCP'nin daha az çapraz bağlanması nedeniyle azalır	Arttırır
Peynire eklenen serum proteinlerinin (doğal veya denatüre) miktarının artırılması	.	Su bağlama veya kalsiyum bağlama kapasitesini artırır	Azaltır

Peynirde sıcaklıkla desteklenen fonksiyonel değişiklikler; yumuşama, erime, esneklik, akışkanlık, kahverengileşme ve görünür viskoziteyi içermekte olup pişirme performansının kritik bir özelliğidir. Guinee [7]'ye göre, ısıtılmış peynirlerin en önemli fonksiyonel özelliklerinden bazıları, reolojik değişimlerdir. Bu değişim, ısıtma sırasında ki fizikokimyasal değişiklikler (yağ birleşmesi ve kazein parçacıkları arasındaki etkileşimler gibi) nedeni ile uygulanan streslere yanıt olarak matriks katmanlarının hareketini içermektedir. Isıtma sırasında yer değiştirme derecesi, kazeinin hidrasyon oranı, kalsiyum-kazein oranı, yağ içeriği, pH ve ısıtılmamış peynirdeki yağın emülsifikasyonuna bağlı olmaktadır. Ayrıca, matriks akışkanlığı veya elastikiyetinin oranı da, kazeinin hidrasyon derecesi ile belirlenmektedir [7, 53]. Kazein misellerinin su tutma kapasitesinin artan sıcaklıkla azaldığı belirlenmiştir [54]. Yapılan bir çalışmada, erime sırasında peynir örneklerinin ağırlığının yaklaşık %15'ini kaybettiği saptanmıştır. Ancak, taze peynirlerin olgun peynirlere göre buharlaşma nedeni ile nem kaybına daha duyarlı olduğu da tespit edilmiştir [55]. Olgunlaşma sırasında, yağ içeriğinin nem kaybı üzerindeki etkisi, Kim vd. [56] tarafından değerlendirilmiş ve az yağlı peynirlerin daha fazla nem kaybı gösterdiği, tam yağlı peynirlerde ise ısıtma sırasında yağın atılması nedeni ile daha yüksek bir yağ kaybının olduğu belirtilmiştir. Bu, tam yağlı peynirlerin az yağlı peynirlere göre daha iyi erime özelliğine sahip olması ile açıklanmaktadır. Tam yağlı peynir, ısıtma boyunca nem kaybı için nispeten daha büyük bir yüzey alanı sağlarken, daha düşük yağlı peynirden daha fazla genişlemektedirler. Peynirlerin protein içeriği, erime sırasında artan yağ ve nem kaybıyla birlikte artmaktadır. Bu eğilim sonucunda, az yağlı peynir, tam yağlı peynire göre daha yüksek protein-nem ve protein-y yağ yüzdelerine sahip olabilmektedir. Sonuç olarak, az yağlı peynirin ısıtılması sırasında nem ve yağ kayıpları kuru yüzey oluşumunu engelleyerek bariyer tabakası görevi görme etkisini azaltmaktadır [57].

Sonuç olarak, eriyebilen peynirlerin reolojisi ve biyokimyası, üretici ve tüketiciler için peynirin işlenmesi ve ısıtma sırasındaki karakteristiklerini anlamak için önemli bir parametre olarak kabul edilmektedir. Peynirin eriyebilme ve uzama özellikleri yalnızca kazein etkileşimlerine değil, aynı zamanda peynirin mikro yapısındaki yağ globülleri, serum fazı ve tuz dağılımı gibi unsurlara da bağlı olmaktadır. Özellikle yağın emülsifiye

olma durumu ve kazein matriksine yerleşimi de ısıtma sırasında oluşan akışkanlığın ve uzamanın belirleyici faktörlerindedir [8, 9].

4. Sonuç

Endüstriyel ölçekte, peynirde erime ve uzama özellikleri özellikle pizza, tost veya eritme peyniri gibi ürünlerde istenen fonksiyonellik açısından kritik olmaktadır. Bu nedenle, üretim sırasında peynirin reolojik davranışını tahmin edebilmek, ürün standardizasyonu ve tüketici beklentilerinin karşılanması açısından stratejik bir avantaj sağlamaktadır. Peynirin erime ve uzama yeteneği, büyük ölçüde sütün temel proteini olan kazeinin etkileşimlerine dayanmaktadır. Peynirin bileşimi, pH'sı ve olgunlaşması, bir peynirin kazein ağını ve sonuç olarak peynirin eriyebilirliğini etkilemektedir. Bu etkileşimleri ve farklı faktörlerin nasıl değişimde bulunduğunu anlamak, erime ve uzama gibi amaçlanan fonksiyonel özellikleri sağlayan bir peynir geliştirmek için temel noktalar. Genel olarak, peynirin erimesinin ve ısı ile indüklenen değişikliklerinin doğru değerlendirilmesi üzerine elde edilecek kapsamlı bilgiler ve erime kimyasını öğrenmek, peynirin spesifik tekno-fonksiyonel özelliklerinin belirlenmesi için oldukça önemlidir. Bununla birlikte, reolojik yöntemler peynirin fiziksel özelliklerini belirlemekle birlikte, peynir dokusundaki farklılıkların nedenini tam olarak anlamak için duyuşal olarak peynir tüketilirken oluşan tekstürel ve görsel algıların da eşleştirilmesi gerekmektedir. Reolojik verilerin duyuşal analizlerle bütünleştirilmesi ile fiziksel ölçümlerle duyuşal deneyim arasındaki korelasyonlar belirlenerek, tüketici beğenisini artıran formülasyonlar geliştirilebilir.

Finansal Destek

Makalenin hazırlanmasında herhangi bir finansal destek alınmamıştır.

Çıkar Çatışması

Bu çalışmanın hazırlanmasında; veri toplanması, sonuçların yorumlanması ve makalenin yazılması aşamalarında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Yazar Katkısı

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamışlardır.

Etik Kurul

Makale etik kurul onayı gerektirmemektedir.

5. Kaynaklar

- [1] Uniacke-Lowe, T. ve Fox, P. F., Chymosin, pepsins and other aspartyl proteinases: Structures, functions, catalytic mechanism and milk-clotting properties, **Cheese: Chemistry, Physics and Microbiology**, Fourth Edition, Editör: P. L. H. McSweeney, P. F. Fox, P. Cotter ve D. W. Everett, 69–113, (2017).
- [2] Eroğlu, E. ve Özcan, T., Sütün enzimatik koagülasyonu ve peynir üretiminde bitkisel pıhtılaştırıcılar, **Bursa Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi**, 32, 2, 201–214, (2018).

- [3] Muthukumarappan, K. ve Swamy, G. J., Rheology, microstructure, and functionality of cheese, In: J. Ahmed ve S. Basu (Eds.), **Advances in Food Rheology and Its Applications**, 297–334, Oxford, UK: Elsevier, (2023).
- [4] Lucey, J., Johnson, M. ve Horne, D., Invited review: Perspectives on the basis of the rheology and texture properties of cheese, **Journal of Dairy Science**, 86, 2725–2743, (2003).
- [5] Guinee, T. P., Protein in cheese and cheese products: Structure-function relationships, In: P. L. H. McSweeney ve J. A. O’Mahony (Eds.), **Advanced Dairy Chemistry**, New York, NY, USA: Springer, (2016).
- [6] Lei, T. ve Sun, D.-W., Developments of non-destructive techniques for evaluating quality attributes of cheeses: A review, **Trends in Food Science and Technology**, 88, 527–542, (2019).
- [7] Guinee, T. P., The functionality of cheese as an ingredient: A review, **Australian Journal of Dairy Technology**, 57, 79–91, (2002).
- [8] Ozcan, T., Avci, H. R., Keser, G. ve Cavus, F., Stretching profile correlated with the aromatic properties of aged light cheese enriched with milk globule membrane components, **Food Science and Nutrition**, 13, 6, e70330, (2025).
- [9] Gunasekaran, S. ve Ak, M. M., **Cheese Rheology and Texture**, Boca Raton, FL, USA: CRC Press, (2002).
- [10] Kuo, M.-I., Anderson, M. ve Gunasekaran, S., Determining effects of freezing on pasta filata and non-pasta filata Mozzarella cheeses by nuclear magnetic resonance imaging, **Journal of Dairy Science**, 86, 2525–2536, (2003).
- [11] Tunick, M. H., Activation energy measurements in rheological analysis of cheese, **International Dairy Journal**, 20, 680–685, (2010).
- [12] Atik, D. S. ve Huppertz, T., Melting of natural cheese: A review, **International Dairy Journal**, 142, 105648, 958-6946 (2023).
- [13] Keser, G., Kıyma, B. ve Özcan, T., Gıdaların oral işlenmesi ve tribolojik perspektif, **International Journal of Science, Technology and Design**, 3, 2, 130–149, (2022).
- [14] Vogt, S. J., Smith, J. R., Seymour, J. D., Carr, A. J., Golding, M. D. ve Codd, S. L., Assessment of the changes in the structure and component mobility of Mozzarella and Cheddar cheese during heating, **Journal of Food Engineering**, 150, 35–43, (2015).
- [15] Lee, M. R., Objective measurements of textural and rheological properties of cheese, **Journal of Dairy Science and Biotechnology**, 36, 2, 73–80, (2018).
- [16] Guggisberg, D., Buetikofer, U. ve Albrecht, B., Melting and solidification characteristics of Swiss Raclette cheese measured by small amplitude oscillatory shear measurements, **Journal of Texture Studies**, 38, 297–323, (2007).
- [17] Kuo, M.-I., Wang, Y. C. ve Gunasekaran, S., A viscoelasticity index for cheese meltability evaluation, **Journal of Dairy Science**, 83, 412–417, (2000).
- [18] Everett, D. W. ve Auty, M. A. E., Cheese structure and current methods of analysis, **International Dairy Journal**, 18, 759–773, (2008).
- [19] Karlsson, A. O. ve Hauert, C., Textural design of cheese for melting applications by exchanging the type of fat, **Annual Transactions of the Nordic Rheology Society**, 16, 99–106, (2008).
- [20] Feeney, E. L., Lamichhane, P. ve Sheehan, J. J., The cheese matrix: Understanding the impact of cheese structure on aspects of cardiovascular health – A food science and a human nutrition perspective, **International Journal of Dairy Technology**, 74, 656–670, (2021).

- [21] Joshi, N., Muthukumarappan, K. ve Dave, R., Effect of calcium on microstructure and meltability of part skim Mozzarella cheese, **Journal of Dairy Science**, 87, 1975–1985, (2004).
- [22] Johnson, M., The melt and stretch of cheese, **Dairy Pipeline**, 12, 1, 12 s., (2000).
- [23] Kindstedt, P., Zielinski, A. ve Almena-Aliste, M., A post-manufacture method to evaluate the effect of pH on Mozzarella, **Australian Journal of Dairy Technology**, 56, 202–207, (2001).
- [24] Fox, P. F., McSweeney, P. L., Cogan, T. M. ve Guinee, T. P., **Cheese: Chemistry, Physics and Microbiology**, Cilt 1, General Aspects, Amsterdam, The Netherlands, (2004).
- [25] Tarapata, J., Szymańska, E., van der Meulen, L., Miltenburg, J. ve Huppertz, T., Moisture loss from cheese during baking: Influence of cheese type, cheese mass, and temperature, **Foods**, 14, 165, (2025).
- [26] Mlynek, K., Oler, A., Zielinska, K., Tkaczuk, J. ve Zawadzka, W., The effect of selected components of milk and ripening time on the development of the hardness and melting properties of cheese, **Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria**, 17, 133–140, (2018).
- [27] Lefevre, I., Dewettinck, K. ve Huyghebaert, A., Cheese fat as driving force in cheese flow upon melting, **Milchwissenschaft**, 55, 563–566, (2000).
- [28] Philipp, S., Ravi, S. ve Jörg, H., Thermo-physical properties of semi-hard cheese made with different fat fractions: Influence of melting point and fat globule size, **International Dairy Journal**, 30, 79–87, (2013).
- [29] Wiking, L., Buldo, P. ve Larsen, M. K., The contribution of individual fatty acids to the melting point pattern of bovine milk fat, **Inform (Champaign)**, 25, 1, 58–60, (2014).
- [30] Lopez, C., Briard-Bion, V., Camier, B. ve Gassi, J. Y., Milk fat thermal properties and solid fat content in Emmental cheese: A differential scanning calorimetry study, **Journal of Dairy Science**, 89, 2894–2910, (2006).
- [31] Everett, D. W. ve Olson, N. F., Free oil and rheology of Cheddar cheese containing fat globules stabilized with different proteins, **Journal of Dairy Science**, 86, 755–763, (2003).
- [32] Ma, X., James, B., Balaban, M. O., Zhang, L. ve Emanuelsson-Patterson, E. A., Quantifying blistering and browning properties of Mozzarella cheese. Part I: Cheese made with different starter cultures, **Food Research International**, 54, 912–916, (2013).
- [33] Pastorino, A. J., Ricks, N. P., Hansen, C. L. ve McMahon, D. J., Effect of calcium and water injection on structure-function relationships of cheese, **Journal of Dairy Science**, 86, 105–113, (2003).
- [34] Choi, J., Horne, D., Johnson, M. ve Lucey, J., Effects of the concentration of insoluble calcium phosphate associated with casein micelles on the functionality of directly acidified cheese, **Journal of Dairy Science**, 91, 513–522, (2008).
- [35] McAuliffe, L. N., Kilcawley, K. N., Sheehan, J. J. ve McSweeney, P. L., Manufacture and incorporation of liposome-entrapped ethylenediaminetetraacetic acid into model miniature Gouda-type cheese and subsequent effect on starter viability, pH, and moisture content, **Journal of Food Science**, 81, 2708–2717, (2016).

- [36] Yazici, F. ve Akbulut, C., Impact of whey pH at drainage on the physicochemical, sensory, and functional properties of Mozzarella cheese made from buffalo milk, **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 55, 24, 9993–10000, (2007).
- [37] McMahon, D. J., Paulson, B. ve Oberg, C. J., Influence of calcium, pH, and moisture on protein matrix structure and functionality in direct-acidified nonfat Mozzarella cheese, **Journal of Dairy Science**, 88, 3754–3763, (2005).
- [38] Monteiro, R., Tavares, D., Kindstedt, P. ve Gigante, M., Effect of pH on microstructure and characteristics of cream cheese, **Journal of Food Science**, 74, 112–117, (2009).
- [39] Lamichhane, P., Kelly, A. L. ve Sheehan, J. J., Symposium review: Structure–function relationships in cheese, **Journal of Dairy Science**, 101, 2692–2709, (2018).
- [40] Joshi, N., Muthukumarappan, K. ve Dave, R., Effect of calcium on physicochemical properties of fat-free Mozzarella cheese, **Journal of Food Science**, 68, 2289–2294, (2003a).
- [41] Joshi, N. S., Muthukumarappan, K. ve Dave, R. I., Understanding the role of calcium in functionality of part skim Mozzarella cheese, **Journal of Dairy Science**, 86, 1918–1926, (2003b).
- [42] Guinee, T. P., Salting and the role of salt in cheese, **International Journal of Dairy Technology**, 57, 99–109, (2004).
- [43] El-Bakry, M., Salt in cheese: A review, **Current Research in Dairy Sciences**, 4, 1–5, (2012).
- [44] Avcı, H. R. ve Özcan, T., Peynirde tuz oranının azaltılmasına yönelik alternatif teknolojiler: Yüksek basınç uygulaması (HPP), **Gıda ve Yem Bilimi – Teknolojisi**, 19, 1, 16–25, (2018).
- [45] McCarthy, C. M., Wilkinson, M. G., Kelly, P. M. ve Guinee, T. P., Effect of salt and fat reduction on proteolysis, rheology and cooking properties of Cheddar cheese, **International Dairy Journal**, 56, 74–86, (2016).
- [46] Rynne, N. M., Beresford, T. P., Kelly, A. L. ve Guinee, T. P., Effect of milk pasteurization temperature and in situ whey protein denaturation on the composition, texture and heat-induced functionality of half-fat Cheddar cheese, **International Dairy Journal**, 14, 989–1001, (2004).
- [47] Ghosh, B. C. ve Singh, S., Effect of heat treatment on the quality of Mozzarella cheese from buffalo milk, **Journal of Food Science and Technology**, 27, 218–220, (1990).
- [48] Wang, W., Kindstedt, P. S., Gilmore, J. A. ve Guo, M. R., Changes in the composition and meltability of Mozzarella cheese during contact with pizza sauce, **Journal of Dairy Science**, 81, 609–614, (1998).
- [49] Bahler, B., Back, R. ve Hinrichs, J., Evaluation of oscillatory and shear strain behaviour for thermo-rheological plasticisation of non-ripened cheese curd: Effect of water, protein, and fat, **International Dairy Journal**, 46, 63–70, (2015).
- [50] Guinee, T. P., Auty, M. A. ve Fenelon, M. A., The effect of fat content on the rheology, microstructure and heat-induced functional characteristics of Cheddar cheese, **International Dairy Journal**, 10, 277–288, (2000).
- [51] Sahan, N., Yasar, K., Hayaloglu, A. A., Karaca, O. B. ve Kaya, A., Influence of fat replacers on chemical composition, proteolysis, texture profiles, meltability and sensory properties of low-fat Kashar cheese, **Journal of Dairy Research**, 75, 1–7, (2007).

- [52] O'Mahony, J., Lucey, J. ve McSweeney, P., Chymosin-mediated proteolysis, calcium solubilization, and texture development during the ripening of Cheddar cheese, **Journal of Dairy Science**, 88, 3101–3114, (2005).
- [53] Akarca, G., Atik, A., Atik, I., Ozcan, T. ve Denizkara, A. J., Evaluation of the effects of beeswax films formulated with sesame and black cumin oils on the fermentation and bioflavouring properties of pasta filata type Kashar cheese, **Food and Bioprocess Technology**, 18, 7710–7730, (2025).
- [54] Nobel, S., Weidendorfer, K. ve Hinrichs, J., Apparent voluminosity of casein micelles determined by rheometry, **Journal of Colloid and Interface Science**, 386, 174–180, (2012).
- [55] Banville, V., Power, N., Pouliot, Y. ve Britten, M., Relationship between baked cheese sensory properties and melted-cheese physical characteristics, **Journal of Texture Studies**, 46, 321–334, (2015).
- [56] Kim, S. Y., Lim, S. ve Gunasekaran, S., Protein interactions in reduced-fat and full-fat Cheddar cheeses during melting, **LWT – Food Science and Technology**, 44, 582–587, (2011).
- [57] Altan, A., Turhan, M. ve Gunasekaran, S., Comparison of covered and uncovered Schreiber test for cheese meltability evaluation, **Journal of Dairy Science**, 88, 857–861, (2005).