



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Endüstriyel atık kağıtların geri dönüşümünde parçalanma süresi ve sıcaklığın yapısal özelliklere etkisi: deneysel bir analiz

Effect of disintegration time and temperature on the structural properties of recycled industrial waste paper: an experimental analysis

Yazar(lar) (Author(s)): Cengiz ŞAHİN¹

ORCID¹: 0000-0002-8348-0913

To cite to this article: Şahin C., “Endüstriyel Atık Kağıtların Geri Dönüşümünde Parçalanma Süresi ve Sıcaklığın Yapısal Özelliklere Etkisi: Deneysel Bir Analiz”, *Journal of Polytechnic*, 29(2):290221:1-10 (2026).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Şahin C., “Endüstriyel Atık Kağıtların Geri Dönüşümünde Parçalanma Süresi ve Sıcaklığın Yapısal Özelliklere Etkisi: Deneysel Bir Analiz”, *Politeknik Dergisi*, 29(2):290221:1-10 (2026).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.1761341

Endüstriyel Atık Kağıtların Geri Dönüşümünde Parçalanma Süresi ve Sıcaklığın Yapısal Özelliklere Etkisi: Deneysel Bir Analiz

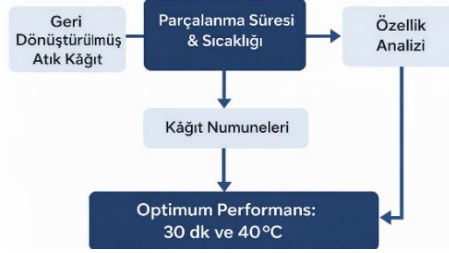
Effect of Disintegration Time and Temperature on the Structural Properties of Recycled Industrial Waste Paper: An Experimental Analysis

Önemli Noktalar (Highlights)

- ❖ Geri dönüştürülmüş endüstriyel atık kâğıtlardaki parçalanma süresi ve sıcaklığın etkisi araştırılmıştır / Effect of disintegration time and temperature on recycled industrial waste paper was investigated.
- ❖ En yüksek parlaklık ve en iyi yüzey kalitesi 30 dakika ve 40 °C' de elde edilmiştir. / 30 min at 40 °C yielded highest brightness and best surface quality.
- ❖ Parçalanma süresinin uzatılması veya sıcaklığın 60 °C'ye çıkarılması lif yapısında bozulmaya yol açmıştır. / Excessive time or high temperature (60 °C) caused fiber degradation.
- ❖ Elde edilen bulgular, kâğıt üretiminde enerji verimliliğine dayalı geri dönüşüm süreçlerini desteklemektedir. / Results support energy-efficient recycling in paper production.

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu çalışmada, farklı parçalanma süreleri ve sıcaklıklarda geri dönüştürülmüş atık kağıdın yapısal ve optik performansı incelenmektedir. En iyi performans 30 dakika ve 40 °C'de elde edilmiştir. / The study examines the structural and optical performance of recycled waste paper under different disintegration times and temperatures. The optimum performance was achieved at 30 minutes and 40 °C.



Şekil. Geri Dönüştürülmüş Kağıt Kalitesinin Optimizasyonunda Deneysel İş Akışı / Figure. Experimental Workflow for Optimizing Recycled Paper Quality

Amaç (Aim)

Bu çalışma, parçalanma süresi ve sıcaklığın geri dönüştürülmüş kâğıdın kalite özellikleri üzerindeki etkisini incelemektedir. / To investigate how disintegration time and temperature affect the quality of recycled paper.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Numuneler atık liflerden farklı süre ve sıcaklık koşulları altında elde edildikten sonra fiziksel ve optik özellikler açısından analiz edilmiştir. / Experimental paper samples were prepared from waste fibers using different durations and temperatures, followed by physical and optical property analyses.

Özgünlük (Originality)

Bu çalışma, geri dönüştürülmüş kâğıt üretiminde parçalanma süresi ve sıcaklık değişkenlerinin etkisini birlikte özgün bir yaklaşımla ele almaktadır. / This study uniquely evaluates the impact of combined disintegration time and temperature variables in recycled paper processing.

Bulgular (Findings)

Optimal kâğıt kalitesi (yüksek parlaklık, düşük hava geçirgenlik, pürüzsüz yüzey) 30 dakika ve 40 °C'de elde edilmiştir. Uzun süreli işleme kaliteyi düşürmüştür. / Optimal paper quality (high brightness, low air permeability, smooth surface) was achieved at 30 minutes and 40 °C. Extended processing reduced quality.

Sonuç (Conclusion)

Orta düzeyde parçalanma süresi ve sıcaklık, enerji verimliliğini sağlarken geri dönüştürülmüş kâğıdın kalitesini artırır. Elde edilen sonuçlar sürdürülebilir kâğıt üretimi için önemlidir. / Moderate disintegration time and temperature enhance recycled paper quality while ensuring energy efficiency. Results are valuable for sustainable paper production.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author of this article declares that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Endüstriyel Atık Kağıtların Geri Dönüşümünde Parçalanma Süresi ve Sıcaklığın Yapısal Özelliklere Etkisi: Deneysel Bir Analiz

Araştırma Makalesi / Research Article

Cengiz ŞAHİN*

¹Mimarlık ve Güzel Sanatlar Fakültesi, Görsel İletişim Tasarımı Bölümü, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Türkiye
(Geliş/Received : 09.08.2025 ; Kabul/Accepted: 26.08.2025 ; Erken Görünüm/Early View : 28.09.2025)

ÖZ

Bu çalışma, endüstriyel atık kağıtların geri dönüşümü sırasında parçalanma süresi ve sıcaklığın; üretilen kağıtların yapısal ve optik özelliklerine etkisini incelemektedir. Deneysel atık kağıtlar 5 farklı parçalanma süresinde ve 4 farklı sıcaklıkta işlenerek 20 numune grubu oluşturulmuştur. Numunelerde gramaj, yüzey düzgünlüğü, hava geçirgenliği, kontak açısı, parlaklık (L^*), renk koordinatları (a^* , b^*) ve renk farkı (ΔE) değerleri analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, 40°C’ de 30 dakikalık parçalanma süresinin en uygun koşulları sağladığını ortaya koymuştur. Bu parametrelerde hazırlanan numuneler yüksek parlaklık ($L^*=90.43$), düşük hava geçirgenliği (6.11 $\mu\text{m}/\text{pas}$) ve homojen yüzey özellikleri (3.887 ml/min) sergilemiştir. Uzun süreli (60 dk) işlemlerde ise optik kalite düşmüş, L^* değeri 87.54’e gerilemiş ve %33 gloss kaybı gözlenmiştir. Ayrıca, sıcaklık artışı 40°C’ye kadar lif dağılımını optimize ederken, 60°C yüzey özelliklerini olumsuz etkilemiştir. Bu çalışma, geri dönüştürülmüş kağıt üretiminde 30-40 dakika parçalanma süresi ve 40°C işlem sıcaklığının en uygun parametreler olduğunu ortaya koymaktadır. Bu bulgular, geri dönüşümde enerji ve kaynak verimliliğini artıracak parametrelerin belirlenmesi açısından önemlidir. Malzeme performansının daha da iyileştirilmesi için, gelecekte farklı lif karışımları ve kimyasal katkıların etkisinin araştırılması önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Yapısal özellikler, Geri dönüştürülmüş kağıt atığı, Optik özellikler, Kaynak verimliliği, Selüloz lif bozunması

Effect of Disintegration Time and Temperature on the Structural Properties of Recycled Industrial Waste Paper: An Experimental Analysis

ABSTRACT

The present study investigates the impact of disintegration time and processing temperature on the structural and optical properties of papers manufactured from recycled industrial waste. The papers were subjected to five disintegration durations at four temperatures, thus yielding 20 experimental groups. The analysis encompasses pivotal parameters such as basis weight, surface smoothness, and brightness. The findings indicate that a 30-minute disintegration time at 40 degrees Celsius provides optimal conditions, yielding high brightness ($L^*=90.43$), low air permeability (6.11 $\mu\text{m}/\text{min}$), and uniform surface properties (3.887 $\mu\text{l}/\text{min}$). The commencement of a 60-minute disintegration period resulted in a decline in optical quality, brightness ($L^*=87.54$), and gloss (33%). It has been demonstrated that an increase in temperature of up to 40 degrees Celsius has a beneficial effect on fibre distribution. It was demonstrated that at 60 degrees Celsius, there was a negative impact on surface characteristics. The study hypothesises that 30–40 minutes of disintegration at 40 degrees Celsius is optimal for the production of recycled paper. The efficacy of these parameters in enhancing energy and resource efficiency in recycling processes has been demonstrated. Further exploration is recommended, with different fibre blends and chemical additives to enhance material performance.

Keywords: Structural properties, Recycled paper waste, Optical properties, Resource efficiency, Cellulose fiber degradation

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kağıt ve kağıt ürünleri imalat sektörü, yapısal olarak parçalı (fragmente) bir karakter göstermektedir. Sektör; özel nitelikli kağıtlar, ambalaj malzemeleri, hijyenik ürünler ve endüstriyel uygulamalar gibi farklı alanlarda uzmanlaşmış çok sayıda küçük ve orta ölçekli işletmeden (KOBİ) oluşmaktadır. Bu işletmeler genellikle belirli ürün gruplarında uzmanlaşarak pazarın farklı segmentlerine hitap etmekte ve birbirlerinden bağımsız üretim faaliyetleri yürütmektedirler [1]. Kağıt neredeyse günlük yaşantıda kullanılan hemen her üründe

bulunmaktadır [2]. Kağıt, modern yaşamın vazgeçilmez malzemelerinden biri olarak çok fonksiyonlu kullanım avantajı sunmaktadır. Birincil kullanım alanı olan bilgi aktarımı (yazı ve baskı) dışında, endüstriyel üretimde filtreleme ve taşıyıcı katman olarak, inşaat sektöründe yalıtım ve dekoratif kaplama malzemesi olarak önemli bir rol üstlenmektedir. Özellikle matbaa sektöründe kitap, katalog, süreli yayınlar, kurumsal kimlik ürünleri, etiket, ambalaj üretimi konusunda kritik öneme sahiptir [3]. Bununla birlikte, hijyenik ürünlerden gıda ambalajlarına kadar geniş bir spektrumda paketleme ve

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-mail : cengizsahin@aybu.edu.tr

temizlik çözümleri sunmaktadır. Bu çok yönlülük, kağıdın sürdürülebilir ve çevre dostu özellikleriyle birleştiğinde, onu endüstriyel ve tüketici uygulamalarında vazgeçilmez kılmaktadır.

Modern dünyada küreselleşme, sanayileşme ve kentleşme dinamiklerinin etkisiyle doğal kaynakların tüketiminde ciddi bir artış gözlemlenmektedir. Bu süreç, kaynakların verimsiz kullanımına ve kontrolsüz atık üretimine yol açarak çevresel dengeleri bozmaktadır [4]. Bu nedenle, hammadde ihtiyacını azaltmak ve kaynak verimliliğini artırmak amacıyla, tüketim sonrası materyallerin toplanarak yeniden işlenmesi ve üretim sürecine katılması şeklinde tanımlanan geri dönüşüm uygulamaları, sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda günümüzde stratejik bir önem kazanmıştır. Araştırmalar, kağıdın geri dönüşüm performansı en yüksek malzemeler arasında yer aldığını kanıtlamaktadır. Kağıt geri dönüşüm prosesinin faydaları; hava emisyonlarında %74-94 aralığında azalma, su kirlilik yükünde %35'lik düşüş, su tüketiminde %45'lik tasarruf şeklindedir. Ayrıca, 1 ton atık kağıdın üretim sürecine yeniden dahil edilmesi, yaklaşık 8 yetişkin ağacın kesilmesinin önüne geçmektedir. Bu veriler, geri dönüşüm uygulamalarının çevresel sürdürülebilirlik açısından kritik önem taşıdığını ve uzun vadede ekonomik açıdan yüksek getirili bir yatırım olduğunu göstermektedir [5].

Geri dönüşüm, ekonomik iyileşme için önemli bir mekanizma olarak karşımıza çıkmaktadır. Özellikle atık kağıtların geri kazanımı, çevresel kirliliğin azaltılmasında önemli bir rol oynamaktadır [6-9]. Bununla birlikte, kağıdın geri dönüşüm sürecinde dikkate alınması gereken kritik bir husus bulunmaktadır. Kağıt üretiminin temelini oluşturan bitkisel lifler, her geri dönüşüm işlemi sırasında yapısal bütünlüklerinin bir kısmını kaybetmektedir. Bu süreçte: lif uzunluklarında kısalma, hücre çeperlerinde yapısal deformasyon, su tutma kapasitesinin azalması, saçaklanma yeteneğinde düşüş, interfiber bağ oluşturma kapasitesinde zayıflama gibi fizikokimyasal değişimler gözlemlenmektedir. Liflerin orijinal özelliklerini koruma derecesi, üretilen kağıdın kalitesini doğrudan etkilemektedir. Sonuç olarak, geri dönüştürülmüş liflerin yeni kağıt üretimindeki katkı oranı, liflerin orijinal özelliklerini koruma derecesiyle doğrudan ilişkilidir [10].

Literatür, selüloz liflerinin optimal performansla maksimum 5-6 dönüşüm döngüsüne dayanabileceğini göstermektedir. Ancak, tek bir lifin beş kez geri kazanılması bile önemli avantajlar sağlamaktadır:

- Doğal kaynak tüketiminin azaltılması
- Sera gazı emisyonlarında düşüş
- Katı atık depolama alanı ihtiyacının azalması
- Yeniden üretime kıyasla enerji tasarrufu
- Üretim maliyetlerinde düşüş
- Döngüsel ekonomi modellerine entegrasyon
- Sürdürülebilir kalkınma hedeflerine katkı
- Gelecek nesiller için kaynak garantisi

Bu çalışma, sürdürülebilirliği artırmaya yönelik güncel geri dönüşüm eğilimlerini ve metodolojilerini sistematik olarak incelemektedir. Sürdürülebilirlik; kaynak verimliliği, ekolojik denge korunumu ve artan küresel nüfus, iklim değişikliği ile kentleşmenin yarattığı baskıların hafifletilmesi bağlamında multidisipliner bir yaklaşım sunmaktadır. Kağıt, yenilenebilir lignoselülozik kaynaklardan üretilen, geri dönüştürülebilir ve sirküler ekonomiye entegre edilebilir bir malzemedir. Kağıt bazlı ürünler; biyobazlı ve sürdürülebilir hammadde kaynağı, düşük maliyet/yüksek performans oranı, hafiflik ve mekanik dayanım kombinasyonu, biyobozunur özellik göstermesi nedeniyle tercih edilmektedir.

Son yıllarda farklı endüstriyel alanlarda yüzey özellikleri ve renk stabilitesi üzerine yapılan çalışmalar da sıcaklık ve işlem süresinin önemini ortaya koymaktadır. Özellikle, baskı ve yüzey işleme teknolojilerinde sıcaklık-zaman parametrelerinin optik özellikler üzerindeki etkisi vurgulanmıştır [11-12]. Ayrıca, çevre dostu boyar maddelerin ve mikroorganizmalardan elde edilen pigmentlerin yüzey kaplama ve renk stabilitesi açısından yeni ufuklar açtığı bildirilmektedir [12-13]. Bu kapsamda, sıcaklık ve süre gibi parametrelerin optimize edilmesi, yalnızca kağıt üretimi değil, geniş bir malzeme yelpazesi için kritik bir süreçtir.

Ambalaj endüstrisinde, yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) prensipleri doğrultusunda çevresel ayak izini minimize eden yenilikçi çözümler geliştirilmektedir [15]. Bu kapsamda, kağıt bazlı ambalajların fonksiyonel özelliklerini iyileştirmeye yönelik nanoteknolojik modifikasyonlar ve bariyer kaplamalar gibi ileri teknoloji uygulamaları dikkat çekmektedir.

Kağıt üretim süreci, sürdürülebilir kalkınma ilkelerini bütüncül şekilde uygulayan bir endüstri modelidir. Kağıt endüstrisi, karbon nötr üretim süreçleri, yüksek oranda geri dönüşüm ve kapalı döngü sistemleriyle çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlarken, aynı zamanda kırsal kalkınmayı desteklemektedir. Bu özellikleriyle kağıt sektörü, sürdürülebilir üretimin öncü örneklerindedir [16]. Sürdürülebilir ormancılık uygulamalarıyla yönetilen ormanlardan elde edilen hammaddeler sayesinde, kağıt endüstrisi orman varlığının azalmasına neden olmamakta, aksine kontrollü kesim ve yeniden ağaçlandırma programlarıyla orman alanlarının artışına katkı sağlamaktadır. FSC (Forest Stewardship Council) veya PEFC (Programmes Endorsement Forest Certificatio) gibi uluslararası sertifikasyon sistemleri, bu sürdürülebilir yönetimin temel garantörleri konumundadır.

Modern sürdürülebilir ormancılık uygulamaları, ISO 14001 ve SFM (Sustainable Forest Management) kriterlerine göre şekillendirilmektedir. Bu sistemde: stok analizleri ve büyüme modellerine dayalı kesim programları, kesilen her ağaç için en az bir yeni fidan dikimi, FSC veya PEFC gibi uluslararası standartlara uygun belgelendirme gerçekleştirilmektedir [17].

Kağıt geri dönüşüm proseslerinde verimlilik, büyük ölçüde girdi materyalinin homojenliği ile ilişkilidir.

Yapılan çalışmalar, aynı kategorideki atık kağıtların birlikte işlenmesi durumunda lif uzunluğu dağılımının korunması, kontaminasyon riskinin azalması, kimyasal katkı ihtiyacının minimize edilmesi, enerji tüketim optimizasyonu açısından avantaj sağladığını göstermektedir [18]. Başarılı bir geri dönüşümün sağlanabilmesi aynı tür kağıtların gruplandırılması ve aynı üretim bandında işleme alınmasına bağlıdır [19]. Bu nedenle, atık yönetimi sürecinde uygulanan etkin sınıflandırma protokolleri geri dönüşüm ekonomisinin temel belirleyicilerindedir [20].

Atık kağıtlar; sayfa yapısı, üretim tekniği ve kullanılan katkı maddeleri (dolgu maddeleri, yüzey kaplamaları vb.) gibi çeşitli kriterlere göre sınıflandırılabilir. Geri dönüşüm prosesine uygun kağıt ve karton ürünleri, kalite ve yapısal özelliklerine göre 5 temel kategori altında toplanmaktadır. Her bir kategori, kendine özgü geri dönüşüm parametreleri ve proses optimizasyon gereklilikleri taşımaktadır. Tablo 1'de verilen sınıflandırma, atık kağıtların maksimum verimle yeniden üretim sürecine kazandırılması için kritik öneme sahiptir [21].

Tablo 1. Geri dönüşümü yapılacak kağıt sınıfları (Categories of Recyclable Paper) [22]

Kağıt Sınıfı	Tanım	Kullanım Alanı
Karışık Ofis Kağıtları (MOW)	Mekanik ve kimyasal hamur karışımından üretilen, ofis ve evsel atıklardan toplanan çeşitli kalitelere kağıtlar ile üretim artıkları.	Karton kutu üretimi, ambalaj malzemeleri
Gazete Kağıtları (ONP)	Yüksek oranda mekanik hamur içeren ve toplanan gazeteler.	Gazete kağıdı üretimi, yalıtım levhaları
Kullanılmış Oluklu Mukavva Kutuları (OCC)	Perakende, endüstriyel ve ofis ortamlarında oluşan her türlü kullanılmış karton malzemeler.	Kutu üretimi, ambalaj malzemeleri
Kağıt Üretim Sürecinde Oluşan Atıklar	Üretim sürecinde oluşan, baskı görmemiş beyaz ve renkli kağıt artıkları ile dönüşüm tesislerinden çıkan atıklar.	Renkli/renksiz kağıt üretimi, renkli kağıt havlu üretimi
Mürekkepli Kağıtlar	Baskılı yüzey içeren her türlü kağıt ürünleri (kitap, dergi, ofis çıktıları vb.).	Renkli/renksiz kağıt üretimi, kağıt havlu üretimi

2. MATERYAL ve METOT (MATERIAL and METHODS)

2.1. Materyal (Material)

Bu çalışmada, kağıt üretim süreci sırasında oluşan kesim atıkları kullanılmıştır. Söz konusu atık kağıtlar, baskı işlemi görmüş veya görmemiş kağıtların kesim

artıklarından oluşmakta olup sekonder lif olarak da adlandırılmaktadır [23]. Kullanılan atık kağıtların nitelikleri (nem içeriği, ışık haslığı, gramaj, yüzey düzgünlüğü vb.) Tablo 2'de detaylı olarak sunulmuştur. Liflerin homojen bir şekilde bileşimini sağlamak ve deney grupları arasındaki değişkenliği kaldırmak için tüm atık kağıt numuneleri aynı üretim hattından elde edilmiştir. İşlem öncesinde ek ağartma veya kimyasal işlem uygulanmamıştır.

2.2. Metot (Method)

Aynı gramajda parçalanmış lifler, 7000 mL hacmindeki su havuzunda eşit işlem koşullarında hazırlanmıştır. Hazırlanan lif süspansiyonu, daldırma yöntemi kullanılarak, standart tel elek yardımıyla kağıt levha formuna getirilmiştir. Lifler, parçalanma süresine bağlı olarak 5, 10, 15, 30 ve 60 dakika boyunca işleme tabi tutulmuştur. Her bir parçalanma grubuna ait lifler, sıcak su içinde sırasıyla 30, 40, 50 ve 60 °C sıcaklıklarda bekletilerek numuneler hazırlanmıştır. Böylece, farklı parçalanma süresi ve sıcaklık kombinasyonlarına göre karşılaştırmalı analiz yapılabilecek örnek setleri elde edilmiştir.

Tekrarlanabilirliğin sağlanabilmesi amacıyla, su sıcaklığı, pH değeri ve nem değeri gibi koşullar çalışma boyunca kontrol altında tutulmuştur. Çalışmada kullanılan tüm ekipmanların kullanım öncesi kalibrasyonları yapılmıştır. Numunelerin farklı noktalarından oluşabilecek farklılıklar göz önünde bulundurularak her bir tabakanın farklı noktalarından ölçümler yapılmıştır.

2.2.1. Kağıt fabrikasyonu atıklarından hamur eldesi (Pulp preparation from paper mill waste)

Çalışmada, 30 g/m² yoğunluğa sahip kağıt fabrikasyon atıkları kullanılmıştır. Deneysel işlem süreci aşağıda özetlenmiştir:

- Her bir deney grubu için 30 g/m² lik atık kağıtlar küçük parçalara ayrılarak blender haznesine alınmıştır.
- Blendera 1000 mL hacminde (yaklaşık 100 °C sıcaklıkta) kaynar su eklenmiştir.
- Kağıt numuneleri, 5, 10, 15, 30 ve 60 dakika olmak üzere farklı sürelerde sıcak suda bekletilmiştir.
- Belirlenen bekleme süresi sonunda numuneler, 1000 W gücündeki blenderda "2" numaralı hız ayarında 3 dakika boyunca parçalanarak hamur haline getirilmiştir.
- Elde edilen lifli hamur, daldırma yöntemiyle kağıt levha üretiminde kullanılmıştır.

2.2.2. Kağıt fabrikasyonu atıklarından kağıt eldesi (Sheet formation from processed waste fibers)

Lifler blenderla hamur kıvamına getirildikten sonra 30 L hacme sahip 27 × 40 cm ölçülerindeki hamur hazırlama teknesine aktarılmıştır. Her bir işlem için hamur haznesine 7000 mL su eklenmiştir. Su eklenme aşamasında, sıcaklık kontrollü bir şekilde ayarlanarak numuneler sırasıyla 30, 40, 50 ve 60 °C sıcaklıklarda işlem yapılmıştır.

Levha oluşturma işleminde 19×25 cm boyutlarında metal tel elek kullanılmıştır. Daldırma yöntemi ile, her sıcaklık ve parçalanma süresi kombinasyonuna karşılık gelen hamurdan kağıt levhalar hazırlanmıştır.

ölçülmüştür. Testler, 98 kPa sabit hava basıncı altında gerçekleştirilmiş olup sonuçlar Tablo 5'te sunulmuştur. Bu yöntem, test protokolüne uygun olarak yürütülmüş olup, kağıt yüzeyindeki hava geçirgenliği ile düzgünlük arasındaki ilişkiyi kantitatif olarak değerlendirmektedir.

Tablo 2. Atık kağıt olarak kullanılan kağıt fabrikasyonu atıklarının özellikleri (Properties of Paper Mill Waste Used as Raw Material)

Gramaj	Yüzey Düzgünlüğü	Hava Geçirgenliği	Kontakt Açısı	Renk Ölçümü					Işık Haslığı			
				L	a	b	Gloss	Color	L	a	b	ΔE
g/m ²	ml/min	$\mu\text{m}/\text{pas}$	$^{\circ}$	L	a	b	Gloss	Color	L	a	b	ΔE
41.2	549	2,95	75.0	91.2	1.33	11.9	15.8		84.6	3.5	29.7	19.56

2.2.3. Renk ölçümü (Color measurement)

Elde edilen kağıt numunelerinin renk ve parlaklık analizleri, CIELAB renk uzayına göre yapılmıştır. Ölçümler, D65 gün ışığı aydınlatması altında ve 10° standart gözlemci kullanılarak, Konica Minolta CM-700d spektrofotometresi ile gerçekleştirilmiştir [24-25]. Elde edilen ölçümlerde, numunelerin kuruma sonrası L^* , a^* , b^* renk değerleri ile gloss (parlaklık) değerleri tespit edilmiştir.

Numuneler ışık haslığı testine tabi tutulduktan sonra, aynı parametreler yeniden ölçülerek renk değişimleri değerlendirilmiştir. Ölçüm öncesi ve sonrası renk farkı, CIELAB sistemine göre hesaplanarak ΔE^* (toplam renk farkı) değeri elde edilmiştir. Bu hesaplamalar, ΔE^* , ΔL^* , Δa^* ve Δb^* değerleri olan renk farklılıkları aşağıda verilen formüller kullanılarak gerçekleştirilmiştir:

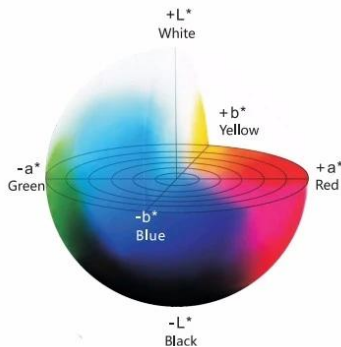
$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (1)$$

$$\Delta L^* = (L^*_2 - L^*_1) \quad (2)$$

$$\Delta a^* = (a^*_2 - a^*_1) \quad (3)$$

$$\Delta b^* = (b^*_2 - b^*_1) \quad (4)$$

Burada L^* değeri açıklık – koyuluk, a^* değeri kırmızılık – yeşillik, b^* değeri sarılık – mavilik ekseninde konumlanmaktadır. Gloss ise yüzey parlaklığını ifade eder. Renk farklılığı Δe^* ile gösterilir ve 0° 'a yaklaştıkça renk farkı azalır. İlgili ölçüm sonuçları ve hesaplanan renk farkları, Tablo 4'te sunulmuştur. Ayrıca, Şekil 1'de CIELAB renk uzayının temsili gösterimi verilmiştir.



Şekil 1. Renk Evreni (Color Universe)

2.2.4. Yüzey düzgünlüğü ölçümü (Surface smoothness measurement)

Kağıt yüzeyinin düzgünlük özellikleri, Scan-P 21 TAPPI UM 535 [26] standardında belirtilen Bendtsen yöntemi kullanılarak Lorentzen & Wettre Bendtsen test cihazı ile

2.2.5. Hava geçirgenliği ölçümü (Air permeability measurement)

Hava geçirgenliği ISO 5636-3 standardına göre belirlenmiştir ve birim basınç farkı altında, bir kağıt veya karton tabakanın birim alanındaki hava akış hızının ölçülmesi için kullanılmıştır. Ölçümler, ISO 5636'ya uygun yapılmıştır. Test numunesi, bilinen ölçülere sahip dairesel bir düz yüzey ile dairesel bir conta arasına sıkıştırılmıştır. Numune test alanının bir yüzeyindeki mutlak hava basıncı atmosfer basıncına eşittir. Test süresince numunenin iki yüzü arasındaki basınç farkı düşük seviyede ve sabit tutulmuştur. [27].

2.2.6. Kontakt açısı ölçümü (Contact angle measurement)

Kontakt açısı bir katı yüzeye temas eden sıvı ile arasındaki açıdır. Bu ölçüm, yüzeyin ıslanabilirlik özelliklerinin ve yüzey enerjisinin kantitatif olarak belirlenmesinde kritik bir parametredir. Deneysel bulgulara göre; yüksek kontakt açısı kağıt yüzeyinin hidrofobik (ıslatmaz) yüzey karakterini ve yüksek yüzey gerilimini ifade ederken, kontakt açısının 0° 'ye yaklaşması ise kağıt yüzeyinin hidrofilik (ıslatılabilirlik) yüzey karakterini ve düşük yüzey gerilimini ifade etmektedir [28]. Numunelerin kontakt açısı değişimlerini incelemek için $pgx +$ taşınabilir yüzey gerilimi ölçme cihazı (goniometre) ile ölçümler alınmıştır. Kağıt yüzeyinin hidrofobik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla, goniometre kullanılarak yatay konumdaki doğal kağıt dokusu üzerine $3 \mu\text{L}$ hacminde distile su damlası bırakılmış ve statik koşullarda temas açısı ölçümleri gerçekleştirilmiştir [29]. Ölçümler dakikada 200 kayıt alınacak şekilde yapılmış olup, veriler Tablo 4 ve Tablo 5'te sunulmuştur. Damla şekil analizleri ile temas açısı değişimleri grafiksel olarak gösterilmiştir.

2.2.7. Işık haslığı ölçümü (Lightfastness Measurement)

Işık haslığı testleri, TS 1008 EN ISO 105-B02 standardı [28, 30] uyarınca Solarbox 1500E cihazında mavi yün referanslarıyla gerçekleştirilmiş olup, test edilen ve edilmeyen örnekler arasındaki toplam renk farkı (Δe^*) spektrofotometrik yöntemle değerlendirmeye tabi tutulmuştur.

3. BULGULAR (FINDINGS)

Bu bölümde, farklı sıcaklıklarda ve bekletme sürelerinde hazırlanan kağıt numuneleri üzerinde yapılan renk ölçümleri ve ışık haslığı testlerinin bulguları yer

almaktadır. Numune hazırlama parametreleri Tablo 3'te; numunelere ait elde edilen renk ölçümleri ve ışık haslığı değerleri ise Tablo 4'te sunulmuştur.

Tablo 3. Numune hazırlama koşulları (Sample Preparation Parameters)

Numune	Bekletilen Süre	Hamur için Kullanılan Su Mik (100 c°)	Çekilen su	Makine Deviri	Makinede Parçalanma Süresi	Hamur Haznesinde Kullanılan Su
	Dk	Ml	c°	w	Dk	Ml
WS - 1	5	1000	30	1000	3	7000
WS - 2			40			
WS - 3			50			
WS - 4			60			
WS - 5	10	1000	30	1000	3	7000
WS - 6			40			
WS - 7			50			
WS - 8			60			
WS - 9	15	1000	30	1000	3	7000
WS - 10			40			
WS - 11			50			
WS - 12			60			
WS - 13	30	1000	30	1000	3	7000
WS - 14			40			
WS - 15			50			
WS - 16			60			
WS - 17	60	1000	30	1000	3	7000
WS - 18			40			
WS - 19			50			
WS - 20			60			

5- Dakikalık Numuneler: 5 dakikalık bekletme süresine tabi tutulan numunelerin renk değerlerinde sıcaklığa bağlı belirgin farklılıklar gözlemlenmiştir. 30°C'de hazırlanan WS-1 numunesi 87,79 L* değeri ile en düşük parlaklığı sergilerken, sıcaklık arttıkça genel bir parlaklık

Tablo 4. Numunelerin Renk Ölçüm ve Işık Haslığı Sonuçları
Color Measurements and Light Fastness Results of Samples

	Renk Ölçümü				Işık Haslığı					
	L	a	b	Gloss	Renk Ölçümü	L	a	b	Gloss	ΔE
1	87,79	0,27	11,01	11,38		83,61	3,42	28,38	9,8	18,14
2	88,98	-0,71	11,14	11,39		82,91	3,85	29,69	10,52	20,04
3	88,7	-0,57	11,54	11,03		83,08	3,57	29,3	10,37	19,08
4	84,84	0,48	11,48	11		82,37	3,55	28,94	8,9	17,89
5	89,94	-0,18	12,25	12,67		83,26	4,11	30,08	9,4	19,51
6	90,29	-0,26	12,23	12,55		83,45	3,93	30,09	10,74	19,57
7	89,99	-0,25	12,31	12,74		83,77	3,68	29,55	10,57	18,74
8	90,01	-0,04	12,46	11,71		82,94	3,93	29,78	9,37	19,12
9	89,83	0,47	12,74	10,85		83,98	3,53	27,72	10,6	16,40
10	89,82	0,07	12,86	12,39		83,78	3,58	28,52	11	17,14
11	90,02	-0,58	11,56	11,79		83,26	3,62	28,65	11,4	18,85
12	89,38	-0,49	11,1	11,42		83,44	3,45	28,44	7,07	18,74
13	90,4	-0,21	11,64	12,02		83,38	3,93	29,85	8,82	19,95
14	90,43	-0,22	11,68	12,6		83,74	3,8	29,71	10,22	19,64
15	90,41	-0,11	11,63	12,45		83,2	3,48	26,97	11,52	17,32
16	90,2	-0,01	11,86	12,03		83,23	3,88	29,6	11,37	19,45
17	87,54	-0,03	13,54	12,14		82,57	3,96	30,07	12,39	17,71
18	87,56	-0,03	13,97	11,09		82,41	3,85	29,26	7,42	16,59
19	88,32	-0,02	13,53	11,47		85,52	3,45	29,05	12,89	16,14
20	87,96	0,01	13,11	11,88		83,1	3,74	28,88	8,79	16,91

değerinin düşüşü dikkat çekmektedir. Özellikle 40°C'deki WS-2 numunesi 88,98 L* değeri ve -0,71 a* değeri ile en yüksek parlaklık ve belirgin bir yeşilimsi ton

sergilemiştir. Renk koordinatlarındaki bu değişimler, sıcaklık artışının kağıt yüzeyinin optik özellikleri üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermektedir.

Işık haslığı testleri sonucunda tüm numunelerde belirgin renk değişimleri ($\Delta E=17,89-20,04$) kaydedilmiştir. En yüksek renk değişimi $\Delta E=20,04$ ile 40°C'deki WS-2 numunesinde gözlenirken, en yüksek Gloss değerine de sahip olduğu tespit edilmiştir. 60°C'deki WS-4 numunesi ise hem en düşük parlaklık değerine (84,84 L*) sahip olması hem de bu gruptaki en düşük renk değişimini ($\Delta E=17,89$) göstermesi açısından dikkat çekicidir.

10- Dakikalık Numuneler: 10 dakikalık bekletme süresine tabi tutulan numunelerde renk parametreleri dikkat çekici bir şekilde 5 dakikalık numunelere göre daha yüksek L* değerleri göstermiştir. Sıcaklık arttıkça numunelerin b* (sarılık) değerlerinde artış gözlenmiş, en yüksek b* değeri 12.46 ile 60°C'deki WS-8 numunesinde ölçülmüştür. Renk tonunu gösteren a* parametresinde ise tüm numunelerde negatif değerler (-0.26 ile -0.04 arası) kaydedilmiş, bu da numunelerde yeşilimsi bir tonun hakim olduğunu göstermiştir.

Işık haslığı testleri sonucunda tüm numunelerde belirgin renk değişimleri gözlenmiştir ($\Delta E=18,74-19,57$). En yüksek renk değişimi $\Delta E=19,57$ ile 40°C'deki WS-6 numunesinde kaydedilirken, 50°C'deki WS-7 numunesi $\Delta E=18,74$ ile en düşük değişimi göstermiştir. b* değerlerinde yaklaşık 18 birimlik belirgin bir artış tespit edilmiştir. Bu durum, numunelerin ışık etkisiyle sarıma eğiliminde olduğunu göstermektedir

15- Dakikalık Numuneler: 15 dakikalık bekletme süresine tabi tutulan numunelerin renk karakteristikleri dikkat çekici bir şekilde önceki gruplardan farklılık göstermektedir. Tüm numunelerde L* değerleri 89.38-90.02 aralığında yoğunlaşarak yüksek ve istikrarlı bir parlaklık profili sergilemiştir. WS-9 numunesinde (30°C) gözlenen 0.47 a* değeri, bu gruptaki diğer numunelerden belirgin şekilde farklılık göstermekte ve hafif kırmızımsı bir tonu işaret etmektedir. Sıcaklık artışıyla birlikte b* değerlerinde gözlenen değişimler dikkat çekicidir. 30°C'de 12.74 (WS-9), 40°C'de 12.86 (WS-10), 50°C'de 11.56 (WS-11) ve 60°C'de 11.10 (WS-12) olarak ölçülmüştür. Bu veriler, sıcaklık artışının sarılık değerleri üzerinde non-linear bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Işık haslığı testleri sonucunda bu grupta kaydedilen ΔE değerleri 16.40-18.85 aralığında değişmekte olup, 5 ve 10 dakikalık gruplara kıyasla genel olarak daha düşük renk değişimleri gözlemlenmiştir. WS-9 numunesi $\Delta E=16,40$ ile en iyi performansı sergilerken, bu numunenin b* değerindeki artışın (27.72) diğerlerine göre nispeten daha düşük olduğu dikkat çekmektedir. Gloss değerlerindeki değişim incelendiğinde, WS-12 numunesinde kaydedilen %38'lik düşüş (11.42'den 7.07'ye) özellikle dikkat çekicidir ve yüksek sıcaklıkta bekletilen numunelerin yüzey yapısının ışık etkisine karşı daha hassas olduğunu düşündürmektedir.

30- Dakikalık Numuneler: 30 dakikalık bekleme süresine tabi tutulan numuneler, önceki gruplara kıyasla en homojen renk profillerini sergilemiştir. Tüm numunelerde L^* değerleri 90.20-90.43 aralığında yoğunlaşarak istisnai bir parlaklık seviyesi göstermiştir. WS-13 (30°C) ve WS-14 (40°C) numuneleri sırasıyla -0.21 ve -0.22 a^* değerleri ile hafif yeşilimsi tonlar sergilerken, sıcaklık artışına rağmen a^* değerlerindeki bu tutarlılık dikkat çekicidir. b^* değerleri ise 11.63-11.86 aralığında minimal farklılıklar göstermiş olup, bu durum uzun bekleme süresinin sarılık parametresi üzerinde standardize edici bir etkiye sahip olduğunu düşündürmektedir. Gloss değerlerinin 12.02-12.60 aralığında seyretmesi, bu gruptaki numunelerin yüzey kalitesi açısından da oldukça tutarlı olduğunu ortaya koymaktadır.

Işık haslığı testleri sonucunda ΔE değerleri 17.32-19.95 aralığında ölçülmüştür. WS-15 numunesi (50°C) $\Delta E=17.32$ ile en düşük renk değişimini gösterirken, bu numunenin b^* değerindeki artışın (26.97) diğer numunelere göre belirgin şekilde daha düşük olması dikkat çekicidir. a^* değerlerindeki pozitif yöndeki kayma (ortalama +3.75 birim) özellikle belirgindir. Gloss değerlerindeki değişim %20-30 aralığında gerçekleşmiştir.

60- Dakikalık Numuneler: 60 dakikalık bekleme süresine tabi tutulan numuneler, diğer gruplardan belirgin şekilde farklılık gösteren bir renk profili sergilemiştir. L^* değerleri 87.54-88.32 aralığında seyrederek, daha kısa bekleme sürelerine göre yaklaşık ortalama 2-3 birim daha düşük parlaklık göstermiştir. WS-17 (30°C) ve WS-18 (40°C) numuneleri -0.03 a^* değeri ile nötr tonlar sergilerken, sıcaklık artışıyla a^* değerlerinde minimal değişimler gözlenmiştir. b^* değerleri ise 13.11-13.97 aralığında ölçülmüş olup, bu durum uzun bekleme süresinin sarılık parametresini belirgin şekilde artırdığını ortaya koymaktadır. Gloss değerlerinin 11.09-12.14 aralığında seyretmesi, yüzey kalitesinin nispeten korunduğunu göstermektedir.

Işık haslığı testleri sonucunda ΔE değerleri 16.14-17.71 aralığında ölçülmüştür. WS-19 numunesi (50°C) $\Delta E=16.14$ ile en düşük renk değişimini gösterirken, bu numunenin test sonrası L^* değerinin 85.52'ye yükselmesi dikkat çekicidir. Test sonrası b^* değerlerindeki artış (29.05-30.07) diğer gruplarla benzerlik göstermekle birlikte, a^* değerlerindeki değişim (+3.45 ile +3.96 arası) daha kontrollü seviyelerde kalmıştır. Gloss değerlerindeki değişim %30-40 aralığında gerçekleşmiş olup, WS-18 numunesinde (40°C) gözlenen 11.09'dan 7.42'ye düşüş (%33) en belirgin yüzey bozulmasını işaret etmektedir.

Tablo 5'te sunulan veriler ışığında, geri dönüştürülmüş selüloz liflerinin farklı bekleme süreleri ve sıcaklıklardaki fiziksel özellikleri detaylı olarak incelenmiştir. Elde edilen bulgular, işlem parametrelerinin numunelerin gramaj, yüzey düzgünlüğü ve hava geçirgenliği üzerinde belirgin etkileri olduğunu ortaya koymaktadır.

Tablo 5. Numunelerin Gramaj, Yüzey Düzgünlüğü, Hava Geçirgenliği ve Kontak Açısı Ölçümü (Measurement of Sample Weight, Surface Smoothness, Air Permeability, and Contact Angle)

Numune	Gramaj (g/m ²)	Yüzey Düzgünlüğü ml/min	Hava Geçirgenliği µm/pas	Kontak Açısı °
WS - 1	89.3	4,053	5,71	40.2
WS - 2	82.2	5,263	8,37	
WS - 3	98.8	5,107	6,55	
WS - 4	60.3	4,705	10,2	
WS - 5	92.3	4,827	8,45	41.8
WS - 6	82.2	4,725	7,08	
WS - 7	86.3	4,299	6,89	
WS - 8	88.8	5,051	6,54	
WS - 9	108.3	6,238	5,35	40.9
WS - 10	75.7	3,887	7,86	
WS - 11	120.7	6,395	4,92	
WS - 12	94.6	6,001	6,15	
WS - 13	79.8	4,502	6,76	47.0
WS - 14	86.3	3,887	6,11	
WS - 15	98.2	5,798	5,89	
WS - 16	117.1	6,919	4,71	
WS - 17	68.1	4,852	13,1	47.0
WS - 18	62.7	3,094	12,3	
WS - 19	123.1	4,461	6,74	
WS - 20	80.1	3,829	10,8	

Numunelerin gramaj değerleri 60.3-123.1 g/m² aralığında önemli farklılıklar göstermiştir. 5 dakikalık bekleme grubunda en düşük gramaj değeri 60.3 g/m² ile 60°C'de (WS-4), en yüksek değer ise 98.8 g/m² ile 50°C'de (WS-3) kaydedilmiştir. 10 dakikalık grupta bu değerler 75.7-92.3 g/m² arasında değişirken, 15 dakikalık beklemede 108.3 g/m² (WS-9) ile maksimum seviyeye ulaşmıştır. Özellikle 60 dakikalık bekleme süresinde gramajın 60.3 g/m²'den 123.1 g/m²'ye kadar geniş bir aralıkta değişim gösterdiği gözlemlenmiştir.

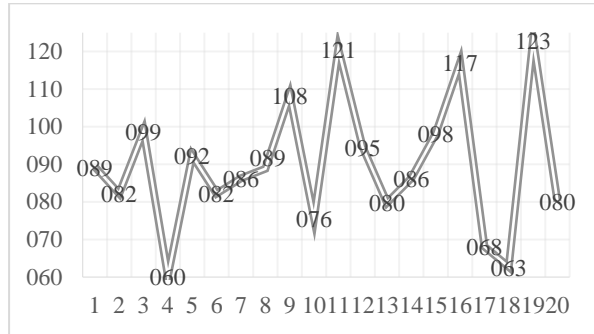
Yüzey düzgünlüğü ölçümleri, bekleme süresi ve sıcaklığın lif dağılımı üzerindeki etkisini açıkça göstermektedir. 5 dakikalık grupta en iyi yüzey düzgünlüğü 4,053 ml/min ile 30°C'de (WS-1) elde edilirken, 40°C'de bu değer 5,263 ml/min'e yükselmiştir. 15 dakikalık bekleme süresinde yüzey düzgünlüğü 6,919 ml/min (WS-16) ile en yüksek seviyeye ulaşmıştır. Yüzey düzgünlüğü değerleri incelendiğinde, 40°C'de hazırlanan numunelerde bekleme süresine bağlı olarak farklı eğilimler gözlemlenmiştir. 5 dakikalık kısa süreli beklemede 40°C numunesi (WS-2: 5,263 ml/min) aynı gruptaki diğer sıcaklıklara göre daha yüksek yüzey düzgünlüğü sergilerken, bekleme süresi arttıkça (özellikle 15 dakika ve üzeri) 40°C numunelerinin yüzey düzgünlüğü değerlerinde belirgin düşüşler kaydedilmiştir (WS-18: 3,094 ml/min). Bu durum,

sıcaklık etkisinin bekleme süresiyle birlikte değişen dinamik bir yapı sergilediğini göstermektedir.

Hava geçirgenliği ölçümleri, 4.71-13.1 $\mu\text{m}/\text{pas}$ aralığında değişim göstermiştir. 5 dakikalık grupta en düşük hava geçirgenliği 5,71 $\mu\text{m}/\text{pas}$ ile 30°C'de (WS-1), en yüksek değer ise 10,2 $\mu\text{m}/\text{pas}$ ile 60°C'de (WS-4) ölçülmüştür. 10 ve 30 dakikalık bekleme sürelerinde, sıcaklık artışıyla hava geçirgenliğinin ters orantılı olarak azaldığı gözlemlenmiştir. Özellikle 15 dakikalık beklemede 4,92 $\mu\text{m}/\text{pas}$ (WS-11) gibi oldukça düşük geçirgenlik değerleri kaydedilmiştir.

Kontak açısı ölçümleri, numunelerin hidrofobik karakteri hakkında önemli bilgiler sunmaktadır. Ölçüm yapılan numunelerde kontak açısı değerleri 40.2°-47.0° aralığında değişim göstermiştir. En yüksek değerler 47.0° ile hem WS-14 (40°C, 30 dakika) hem de WS-18 (40°C, 60 dakika) numunelerinde kaydedilmiştir.

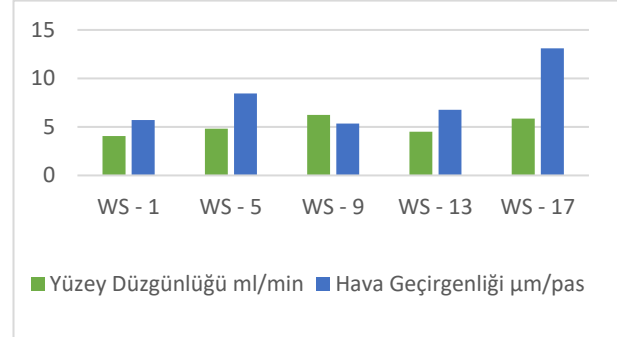
Şekil 2'de sunulan gramaj ölçüm verileri, farklı bekleme süreleri ve sıcaklık koşullarında hazırlanan numunelerin ağırlık dağılımlarını sistematik olarak ortaya koymaktadır. X ekseninde numune numaralarını (WS-1'den WS-20'ye), Y ekseninde ise gramaj değerlerini (60-120 g/m^2 aralığında) göstermektedir. Analizler, işlem parametrelerinin numunelerin gramaj değerleri üzerinde belirgin etkileri olduğunu göstermektedir.



Şekil 2. Numunelerin Gramaj Ölçümleri (Basis Weight Measurements of the Samples)

Şekil 2'deki gramaj dağılım grafiği incelendiğinde, numunelerin 60-123 g/m^2 aralığında değişen değerler sergilediği görülmektedir. Grafikte en düşük değerler ~60 g/m^2 civarında (WS-4) gözlemlenirken, en yüksek değerler ~123 g/m^2 'nin üzerinde (WS-11/WS-19) kaydedilmiştir. Bekleme süresi arttıkça genel bir artış dikkat çekmekte; 5 dakikalık numuneler 60-100 g/m^2 , 15 dakikalıklar 90-120 g/m^2 aralığında kümelenirken, 60 dakikalık grupta hem çok düşük (~62 g/m^2) hem de çok yüksek (~123 g/m^2) değerler görülmektedir. Sıcaklık etkisi özellikle 40°C'de belirginleşmekte, bu gruptaki numunelerin sürekli olarak grafiğin alt bölgelerinde (düşük gramajlı) yer aldığı, buna karşılık 50°C'dekilerin daha yüksek değerler gösterdiği görülmektedir. 60°C'de uç değerlerin varlığı dikkat çekicidir. Bu görsel analiz, özellikle 15 dakikalık beklemenin nispeten tutarlı gramaj değerleri sağladığını, uzun süreli (60 dk) işlemlerde ise sonuçların tutarsızlaştığını ortaya koymaktadır.

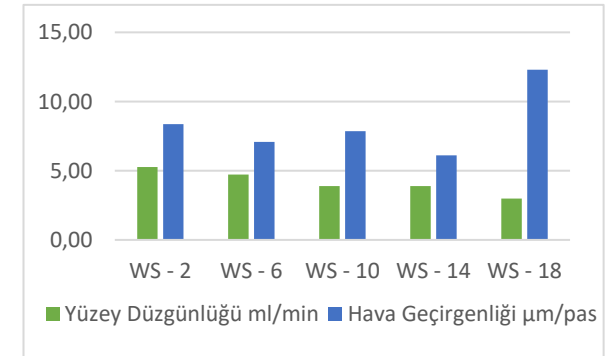
Numunelerin yüzey karakteristikleri, Şekil 3'te sunulan 30°C'de farklı bekleme sürelerine tabi tutulan örneklerin yüzey düzgünlüğü ve hava geçirgenliği ölçümleri incelendiğinde belirgin bir süre bağımlılığı göstermektedir.



Şekil 3. 30°C Farklı Bekleme Sürelerindeki Numunelerin Yüzey Düzgünlüğü ve Hava Geçirgenliği Ölçümü (Surface Smoothness and Air Permeability of Samples at 30 °C with Different Resting Times)

Grafik incelendiğinde, yüzey düzgünlüğü değerlerinin 5 dakikalık kısa süreli beklemede 4,053 ml/min seviyesinden başlayarak, 15 dakikalık optimum sürede 6,238 ml/min 'e kadar yükseldiği, ancak 60 dakikalık uzun süreli beklemede tekrar 4,852 ml/min 'e düştüğü gözlemlenmektedir. Hava geçirgenliği parametresinde ise ters bir eğilim görülmekte, en düşük değerlerin (5,35 $\mu\text{m}/\text{pas}$) 15 dakikalık grupta, en yüksek değerlerin ise (13,1 $\mu\text{m}/\text{pas}$) 60 dakikalık grupta kaydedildiği tespit edilmektedir. Bu sonuçlar, 15 dakikalık bekleme süresinin hem yüzey düzgünlüğünü artırıcı hem de hava geçirgenliğini azaltıcı optimal bir denge sağladığını ortaya koyarken, aşırı uzun bekleme sürelerinin bu avantajları ortadan kaldırdığını göstermektedir. Özellikle 30°C sabit sıcaklıkta, yüzey özelliklerinin bekleme süresiyle non-lineer bir ilişki sergilediği anlaşılmaktadır.

Şekil 4'te sunulan veriler, 40°C sabit sıcaklıkta farklı bekleme sürelerine tabi tutulan numunelerin yüzey özelliklerindeki değişimi açıkça ortaya koymaktadır.

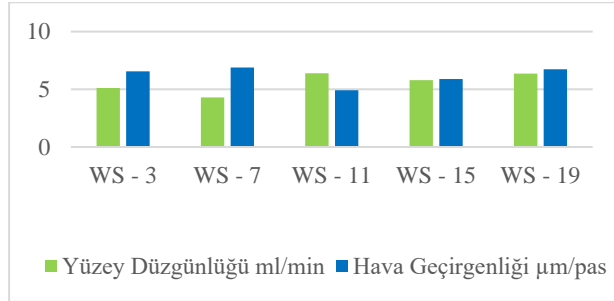


Şekil 4. 40°C Farklı Bekleme Sürelerindeki Numunelerin Yüzey Düzgünlüğü ve Hava Geçirgenliği Ölçümü (Surface Smoothness and Air Permeability of Samples at 40 °C with Different Resting Times)

Grafik incelendiğinde, yüzey düzgünlüğü ve hava geçirgenliği parametrelerinde belirgin bir zıt korelasyon olduğunu görülmektedir. Yüzey düzgünlüğü değerlerinin

WS-2'den (5 dakika) WS-18'e (60 dakika) doğru sürekli bir düşüş eğilimi gösterdiği görülmekte; başlangıçta ~5,2 m³/min olan değerlerin, 60 dakika sonunda ~3,0 m³/min seviyesine kadar gerilediği gözlemlenmektedir. Buna karşılık, hava geçirgenliği değerlerinin aynı süreçte ters orantılı olarak arttığı, özellikle 60 dakikalık WS-18 numunesinde ~12,3 µm/pas gibi yüksek bir değere ulaştığı dikkat çekmektedir. Bu sonuçlar, 40°C'de uzun süreli beklemenin hem yüzey kalitesinin bozulmasına hem de malzemenin daha geçirgen hale gelmesine neden olduğunu açıkça göstermektedir. Özellikle 15 dakika sonrasında her iki parametrede de belirgin bozulmaların başladığı görülmekte olup, bu sıcaklıkta optimal işlem süresinin 10-15 dakikayı geçmemesi gerektiği anlaşılmaktadır.

Şekil 5'te, 50°C sabit sıcaklıkta farklı bekleme sürelerine maruz bırakılan numunelerin yüzey özelliklerindeki değişimi net bir şekilde ortaya koymaktadır.



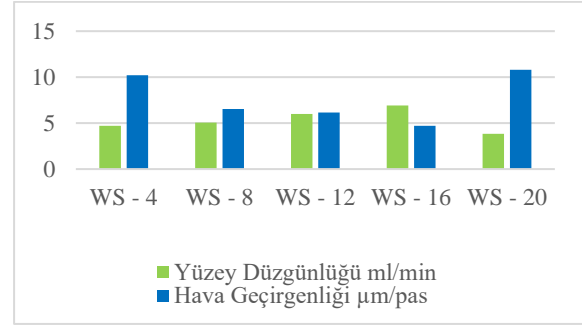
Şekil 5. 50°C Farklı Bekleme Sürelerindeki Numunelerin Yüzey Düzgünlüğü ve Hava Geçirgenliği Ölçümü (Surface Smoothness and Air Permeability of Samples at 50 °C with Different Resting Times)

Grafik incelendiğinde, yüzey düzgünlüğü değerlerinin WS-3'ten WS-19'a doğru inişli çıkışlı bir döngüde olduğu gözlemlenmektedir. Özellikle 15 dakikalık WS-11 numunesinde maksimum yüzey düzgünlüğüne ulaşıırken, 60 dakikalık WS-19 numunesinde bu değer düşüğü görülmektedir. Hava geçirgenliği parametresinde ise tam tersi bir eğilim izlenmekte; en düşük değer yine 15 dakikalık WS-11 numunesinde kaydedilirken, 60 dakikalık numunede bu değer ~6,7 µm/pas'a yükseldiği tespit edilmektedir. Bu sonuçlar, 50°C sıcaklıkta 15 dakikalık bekleme süresinin hem optimal yüzey düzgünlüğü sağladığını hem de hava geçirgenliğini minimize ettiğini göstermektedir. 60 dakikalık uzun süreli beklemede bile yüzey özelliklerindeki bozulmanın 40°C'deki numunelere kıyasla daha sınırlı kaldığı dikkat çekmektedir. Bu bulgular, 50°C'nin selüloz lifleri için dengeli fiziksel özellikler sağlayan optimal bir işlem sıcaklığı olabileceğine işaret etmektedir.

Şekil 6'da, 60°C sıcaklıkta farklı bekleme sürelerine maruz bırakılan numunelerin yüzey özelliklerindeki dikkat çekici değişimleri ortaya koymaktadır.

Grafik incelendiğinde, yüzey düzgünlüğü değerlerinin WS-4'ten (5 dakika) WS-20'ye (60 dakika) doğru dalgalı bir seyir izlediği görülmektedir. Özellikle 15 dakikalık WS-12 numunesinde ile nispeten yüksek bir yüzey

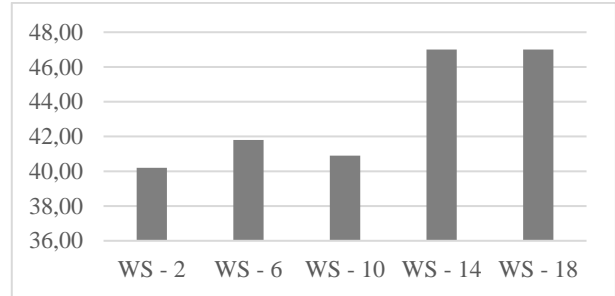
düzgünlüğü kaydedilirken, 60 dakikalık WS-20 numunesinde bu değer düşüğü gözlemlenmektedir.



Şekil 6. 60°C Farklı Bekleme Sürelerindeki Numunelerin Yüzey Düzgünlüğü ve Hava Geçirgenliği Ölçümü (Surface Smoothness and Air Permeability of Samples at 60 °C with Different Resting Times)

Hava geçirgenliği parametresinde ise en düşük ve en yüksek sıcaklıkta belirgin bir artış eğilimi dikkat çekmektedir. Bu sonuçlar, 60°C gibi yüksek sıcaklıklarda uzun süreli beklemenin yüzey kalitesini önemli ölçüde bozduğunu ve malzemenin geçirgenliğini artırdığını açıkça göstermektedir. Ayrıca 15 dakikalık bekleme süresinde de yüzey düzgünlüğü değerlerinin diğer sıcaklıklardaki (30°C ve 50°C) eşdeğer numunelere kıyasla daha düşük seviyelerde kaldığı görülmektedir. Bu bulgular, 60°C'nin selüloz lifleri için yüzey özelliklerini olumsuz etkileyen bir sıcaklık eşiği olabileceğine işaret etmektedir.

Şekil 7'de sunulan kontak açısı ölçümleri, 40°C sabit sıcaklıkta farklı bekleme sürelerine tabi tutulan numunelerin yüzey hidrofobitesindeki değişimleri açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 7. 40°C Farklı Bekleme Sürelerindeki Numunelerin Kontak Açısı Ölçümü (Contact Angle Measurements of Samples at 40 °C with Different Resting Times)

Grafik incelendiğinde, kontak açısı değerlerinin 40,2° (WS-2, 5 dakika) ile 47,0° (WS-18, 60 dakika) arasında değiştiği ve bekleme süresi arttıkça istikrarlı bir artış eğilimi gösterdiği gözlemlenmektedir. Özellikle 30 ve 60 dakikalık bekleme sürelerinde (WS-14 ve WS-18) kontak açısının 47,0° gibi yüksek değerlere ulaştığı dikkat çekmektedir. Bu sonuçlar, 40°C sıcaklıkta uzun süreli beklemenin numunelerin hidrofobik karakterini belirgin şekilde artırdığını göstermektedir. Bu artış eğilimi yüzey düzgünlüğündeki azalma ile ters korelasyon göstermekte olup, yüzey pürüzlülüğündeki artışın hidrofobiteyi artırdığı şeklinde yorumlanabilir. Bu bulgular, 40°C'de

bekleme süresinin kontrollü şekilde artırılmasının selüloz liflerinin su itici özelliklerini iyileştirebileceğine işaret etmektedir.

4. SONUÇLAR (RESULTS)

Bu çalışmada, endüstriyel atık kağıtların geri dönüşümüyle üretilen kağıtların yapısal ve optik özellikleri, farklı parçalanma süreleri (5-60 dakika) ve sıcaklık koşulları (30-60°C) altında detaylı olarak incelenmiştir. Deneysel bulgular, işlem parametrelerinin kağıt kalitesi üzerinde belirgin etkileri olduğunu ortaya koymuştur.

En iyi performans, 30 dakika parçalanma süresi ve 40°C sıcaklık koşullarında hazırlanan WS-14 numunesinde gözlemlenmiştir. Bu numune, 90.43 L* değeri ile yüksek parlaklık, 6.11 µm/pas hava geçirgenliği ile düşük porozite ve 3.887 ml/min yüzey düzgünlüğü değeri ile homojen bir yapı sergilemiştir. Bu sonuçlar, 30 dakikalık parçalanma süresinin liflerin mekanik bütünlüğünü koruduğunu ve 40°C sıcaklığın lif dağılımını optimize ettiğini göstermektedir.

Renk stabilitesi açısından, 30 dakika bekletilen numunelerin ΔE değerlerinin (17.32-19.95) diğer gruplara kıyasla daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Özellikle bu gruptaki numunelerin ışık haslığı testleri sonrasında gösterdiği renk değişimleri, kabul edilebilir sınırlar içinde kalmıştır. Buna karşılık, 60 dakika bekletilen numunelerde L* değerlerinin 87.54-88.32 aralığına düşmesi ve ΔE değerlerindeki artış, uzun süreli işlemin optik özellikleri olumsuz etkilediğini ortaya koymuştur.

60 dakikalık işlem süresine tabi tutulan numunelerde, yüzey pürüzlülüğünde artış ve hava geçirgenliğinde belirgin yükselme gözlemlenmiştir. Örneğin, WS-18 numunesinde %33'lük bir gloss kaybı ve 12.3 µm/pas hava geçirgenliği ölçülmüştür. Bu bulgular, aşırı uzun parçalanma sürelerinin liflerde yapısal bozulmaya yol açtığını ve kağıt kalitesini düşürdüğünü göstermektedir. Bu sonuçlar, sıcaklık ve süre parametrelerinin lif yapısı üzerindeki kritik etkilerini doğrulamaktadır. Benzer şekilde, [11] tekstil yüzeylerinde sublimasyon baskı sırasında sıcaklık ve zaman değişimlerinin baskı kalitesi üzerinde belirleyici rol oynadığını bildirmiştir. Ayrıca, doğal boyar maddelerin kullanıldığı çalışmalarda sıcaklığın renk stabilitesini doğrudan etkilediği rapor edilmiştir [13]. Mikroorganizmalardan elde edilen renk pigmentleri ile yapılan uygulamalarda da yüzey özelliklerinin sıcaklık ve süre parametrelerinden etkilendiği vurgulanmıştır [13].

Elde edilen sonuçlar, endüstriyel atık kağıtların geri dönüşümünde işlem parametrelerinin kritik öneme sahip olduğunu doğrulamaktadır. Özellikle 40°C sıcaklık ve 30 dakika parçalanma kombinasyonunun optimal sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Bulgular literatürle uyumludur. Geri dönüştürülmüş lifler 35-45 dakika arası parçalanma sürelerinde en iyi performansı göstermektedir [21].

Çalışmanın sınırlılıkları arasında, farklı lif karışımlarının ve kimyasal katkı maddelerinin etkilerinin incelenmemiş olması yer almaktadır. Ayrıca, laboratuvar ölçekli sonuçların endüstriyel üretimdeki geçerliliğinin test edilmesi gerekmektedir.

Gelecek çalışmalarda, farklı lif kaynaklarının ve yüzey modifikasyon tekniklerinin geri dönüştürülmüş kağıtların özellikleri üzerindeki etkilerinin araştırılması önerilmektedir. Ayrıca, optimizasyon çalışmalarının endüstriyel ölçekte validasyonu, bulguların uygulanabilirliğini artıracaktır. Bu çalışma, sürdürülebilir kağıt üretimi için geri dönüşüm parametrelerinin optimizasyonuna yönelik önemli bir rehber niteliği taşımaktadır.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Cengiz ŞAHİN: Araştırma konusunun belirlenmesi, planlama, deneylerin gerçekleştirilmesi, sonuçların analizi ve makalenin yazılması

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Cengiz, M., "Kağıt endüstrisinde sulu çözeltilerle yüzey işlemleri", *Journal of the Faculty of Forestry Istanbul University*, 37(3), 107-118, (1987).
- [2] Akcanlı, F., "Çevre muhasebesi açısından kağıt ambalajı geri dönüştüren işletmelerin faaliyetlerinin muhasebeleştirilmesi ve fayda-maliyet analizi", *Ankaş Atık Kağıt İmalat San. ve Tic. AŞ'de uygulama*, (2010).
- [3] Erkan, Z. E., & Malayoğlu, U., "Kağıt-karton sanayiinde kullanılan endüstriyel hammaddeler ve özellikleri", *4. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, 18-19, (2001).
- [4] Gündüzalp, A. A., & Güven, S., "Atık, çeşitleri, atık yönetimi, geri dönüşüm ve tüketici: Çankaya belediyesi ve semt tüketicileri örneği", *Hacettepe Üniversitesi Sosyolojik Araştırmalar E-Dergisi*, 9(1), 1-19, (2016).
- [5] Dönmez, Ö., "Organik Tarım Ürünlerinin Geri Dönüşümü Ve Geri Kazanım yöntemleri. Journal Of Social", *Humanities And Administrative Sciences (Joshas)*, 7(38), 424-438, (2022).
- [6] Gül, M., & Yaman, K., "Türkiye'de Atık Yönetimi ve Sıfır Atık Projesinin Değerlendirilmesi: Ankara Örneği", *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 35(4), 1267-1296, (2021).
- [7] Günel, G., Alakara, E. H., Demir, İ., Sevim, O., "Geri Dönüştürülmüş Çimento Harç Tozunun Çimento

- Bağlayıcı Kompozitler Üzerindeki Etkisi”, *Politeknik Dergisi*, 27(2), 533-543, (2024).
- [8] Aruntaş, H. Y., Şahinöz, M., & Dayı, M., “Çimento Hamur ve Harç Özelliklerine Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu ile Sönmüş Kirecin Birlikte Etkisinin Araştırılması”, *Politeknik Dergisi*, 27(4), 1257-1268, (2024).
- [9] Aydın, E., “Use of Various Industrial and Eggshell Wastes for the Sustainable Construction Sector”, *Politeknik Dergisi*, 27(4), 1293-1304, (2024).
- [10] Şaduman, E., “Birincil liflere atık kağıt lifi ve kuru sağlık maddesi ilavesinin kağıdın özelliklerine etkisi”, *Master's thesis*, Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (2014).
- [11] Özomay, M., & Özomay, Z., “The effect of temperature and time variables on printing quality in sublimation transfer printing on nylon and polyester fabric”, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (23), 882-891, (2021).
- [12] Özomay, Z., Şahin, C., & Keskin, B., “Investigation of the effect of different screening methods on print quality in digital printing system”, *Politeknik Dergisi*, 24(3), 1213-1217, (2021).
- [13] Adeel, S., Ozomay, Z., Ozomay, M., Massadikova, G., & Nasir, S., “Microbial Pigments in Fashion, Art, and Packaging”, *Microbial Colorants: Chemistry, Biosynthesis and Applications*, 385-395, (2025).
- [14] Adeel, S., Younis, M., Mia, R., Özomay, M., Mirnezhad, S., & Imran, M., “Environmentally friendly greener approach toward sustainable application of amaltas brown pod-based natural colorant for wool yarn dyeing”, *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 19, (2024).
- [15] B. Keskin, B. N. Altay, A. Kurt, and P. D. Fleming, “Sustainability in Paper-Based Packaging”, *Gazi Journal of Engineering Sciences*, 6 (2), pp. 129–137, (2020).
- [16] Alp, E., Kök, R., & Başkol, M. O., “Türkiye Ekonomisinde Sürükleyici Endüstri Analizi: 2002-2012 Karşılaştırması”, *Kafkas Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 8(16), 211-241, (2017).
- [17] Yakut, A., “Geri dönüştürülebilir kullanılmış kâğıttan yeni kâğıt üretiminin irdelenmesi”, *Tesisat Mühendisliği*, 127, 68-75, (2012).
- [18] Dalyancı, H. L., “Türkiye’de kâğıt-karton sektöründe geri dönüşüm ve geri dönüşüm yapan işletmelerin ekonomik yönden incelenmesi”, *Doctoral thesis*, Marmara Üniversitesi, (2006).
- [19] Sahin, T., “Atık Kağıt Geri Dönüşüm İşlemlerinde Genel Esaslar ve Mürekkep Uzaklaştırma İşlemi”, *Avrupa Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, 4(7), 31-37, (2016).
- [20] Thompson, C. G., “No Title”, *Recycled papers: The essential guide*, (1992).
- [21] Turgut Şahin, H., “Proses Değişkenlerinin Kağıt Geri Dönüşümde Verim ve Kaliteye Etkisi”. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 13(20), 101-109, (2011).
- [22] Erentürk, Ş., “Birincil Liflere Atık Kağıt Lifi Ve Kuru Sağlık Maddesi İlavesinin Kağıdın Özelliklerine Etkisi”, *Master's thesis*, Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 13, (2014).
- [23] Sahin, H., “Geri kazanılmış sekonder liflerin yeniden kullanılması üzerine bir inceleme”, *Turkish Journal of Forestry*, 15(2), 183-188, (2014).
- [24] Altural, H., Korkmaz, N. E., Saraçoğlu, Ö. G., & Tutak, M., “Adaptation of optical RGB sensor to CIE-XYZ color space”, *In 2011 IEEE 19th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)* (pp. 1145-1148). IEEE, (2011).
- [25] Kaya, S. S., Doğru, D., Adeel, S., Özomay, M., & Özomay, Z., “Ceviz Kabuğundan (Juglans Regia) Elde Edilen Doğal Boya Ekstraktı İle Atık Selüloz Elyafının Çevre Dostu Boyanması”, *4. International Cappadocia Scientific Research Congress*. 858-869, (2023).
- [26] Aydemir, C., “Kâğıdın yüzey pürüzlülüğünün, baskı renk değişimi, ışık hashğı ve baskı parlaklığına etkisi”, *Marmara Fen Bilimleri Dergisi*, 26(3), 81-88, (2014).
- [27] Ataç, Y., “Bazı yapraklı ve iğne yapraklı ağaçların öz ve diri odunlarının kağıt özellikleri yönünden incelenmesi”, *Master's thesis*, Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2009).
- [28] Özomay, Z., & Özdemir, L., “Investigation Of The Effect Of Cellophane Application On Color Change After OffsetPrinting In Cardboard Packaging Production”, *Muş Alparslan University Journal of Science*, 8(2), (2020).
- [29] Bulutsuz, A. G., “Ha/B-TCP Kuşlama ve Anodizasyon İşlemlerinin Yüzey Kontak Açısına ve Topografyasına Etkilerinin İncelenmesi”, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8(1), 1072-1083, (2020).
- [30] *TS 1008 EN ISO 105-B02*. “Textiles- Tests for colour fastness- Part B02: Colour fastness to artificial light: Xenon arc fading test.”