

Samsun İli Yağış ve Sıcaklık Verilerinin Şen Trend Yöntemi ile Trend Analizi

Trend Analysis of Samsun's Precipitation and Temperature Data by Şen's Trend Method

Eray BAYRAKTAR¹, Bahtiyar EFE^{1*}

¹ Samsun Üniversitesi, Özdemir Bayraktar Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Meteoroloji Mühendisliği Bölümü, 19 Mayıs, Samsun, Türkiye

Öz

Sıcaklık ve yağış, bir bölgenin iklimini belirlemede kullanılan en önemli iki meteorolojik değişkendir. İklim değişikliği ve değişkenliği çalışmalarında en çok incelenen değişkenler de yine yağış ve sıcaklıktır. Samsun ili, Karadeniz bölgesinin en kalabalık ilidir. Bu çalışmada, Samsun ili için, günlük ortalama sıcaklık ve günlük toplam yağış değerlerinin yıllık ve mevsimlik trendi Şen Trend Analizi aracılığı ile incelenmiştir. 17030 nolu Samsun Bölge istasyonuna ait veriler Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden temin edilmiş olup, veriler 01.01.1990 ile 31.12.2019 arasındaki döneme aittir. Yıllık ortalama sıcaklık değerleri, düşük orta ve yüksek değerler için monotonik artan trende sahiptir. Her üç alt grup için de trendin büyüklüğü neredeyse aynıdır. Sadece en yüksek değere yakın olan değerler trend büyüklüğü diğerlerinden biraz fazladır. Mevsimlerin ortalama sıcaklık değerleri incelendiğinde ise, kış mevsimindeki tek bir nokta hariç bütün noktalar artan trend bölgesindedir. Trendin alt gruplardaki davranışı, her mevsim için farklı olup, trendin en şiddetli olduğu mevsim yaz mevsimidir. Toplam yağış verilerinin ise daha karmaşık bir yapıya sahip olduğu bulunmuştur. Yıllık toplam yağış verileri düşük değerler için azalan trend ile başlamış sonra artan trende geçmiştir. Orta değerler nerede ise monotonik artan trende sahiptir. Yüksek değerlerde ise, en yüksek değerlere sahip iki nokta artan trende sahip olup, trendin büyüklüğü fazladır. Mevsimlik toplam yağışlardaki trend davranışı daha karışıktır. Düşük ve orta değerlerde azalan ve artan trendler görülürken, yüksek değerlerde yaz mevsimi hariç belirgin bir artan trend gözlemlenmektedir. Hatta kış mevsiminde, monotonik olmayan bir artan trend söz konusudur.

Anahtar Kelimeler: Şen Trend Yöntemi, Sıcaklık, Yağış, Samsun.

Abstract

Temperature and precipitation are the two most important meteorological variables used in determining the climate of a region. In this study, the annual and seasonal trend of the daily average temperature and daily total precipitation values for the province of Samsun will be analyzed by the Şen Trend Analysis Method. The data of Samsun station has been obtained from the General Directorate of Meteorology, and belong to the period between 01.01.1990 and 31.12.2019. Annual average temperature values have a monotonic increasing trend for low, medium and high values. The size of the trend is almost the same for all three subgroups. When the average temperature values of the seasons are examined, all points are in the increasing trend zone, except for a single point in the winter season. The behavior of the trend in the subgroups is different for each season, and the season when the trend is most severe is summer. Total precipitation data were found to have a more complex structure. Annual total rainfall data started with a decreasing trend for low values, then passed into an increasing trend. The middle values have a nearly monotonic increasing trend. In high values, the two points with the highest values have an increasing trend and the severity of the trend is high. While decreasing and increasing trends are observed in low and medium values, a distinct increasing trend is observed in high values except summer season.

Keywords: Şen Trend Analysis, Temperature, Precipitation, Samsun.

I. GİRİŞ

İklimin ana elemanlarını oluşturan meteorolojik parametrelerden sıcaklık ve yağış verileri küresel iklim karakterinin ortaya konulmasında büyük öneme sahiptir. Bu parametrelerde hem bölgesel hem de zamana bağlı olarak büyük değişimler görülmektedir. Yağış ve sıcaklık, iklim elemanları içerisinde insan yaşamı için en önemli parametrelerdir. Günümüzde küresel ısınma ve iklim değişikliği dünya çapında en önemli çevre sorunu olarak kabul edilmektedir. Gerek artan nüfus gerekse buna bağlı meydana gelen sanayileşmedeki gelişme su kaynakları ve enerji konusunu da son derece önemli hale getirmektedir. Bu nedenle mevcut su kaynaklarının optimum bir şekilde kullanılması veya kullanılmayan su kaynaklarından faydalanma konularının çok iyi irdelenmesi gerekmektedir. Özellikle yağış ve sıcaklık gibi parametrelerin trendlerinin belirlenmesi geleceğe yönelik öngörülebilir bulunabilmesi için gereklidir. Trendi belirlemek için farklı yöntemleri uygulamıştır [1,2]. Türkiyenin, iklim değişikliğinden birçok farklı şekilde etkilenmesi beklenmektedir. IPCC (2007)'ye göre 21. yy'ın sonlarına doğru sıcaklıkların artacağı ve buna bağlı olarak yağışların azalacağı öngörülmektedir [3] Bu

sebepten dolayı su kaynaklarımızın yönetimi için hidrometeorolojik parametrelerde ve sıcaklıklarda meydana gelen değişiklikleri analiz etmek ve gözlemek büyük önem arz etmektedir [4].

Sıcaklık ve yağış, araştırmacılar tarafından detaylı bir şekilde incelenmiştir. Araştırmacıların bir kısmı, bazı atmosferik olayların yağışa [5], sıcaklığa [6] ve uç sıcaklıklara etkisini [7] incelemiştir; bir kısmı, yağış sıklığını sınıflamış ve tahmin etmeye çalışmıştır [8]; bir kısmı da bazı önemli olayları incelemiştir [9]. Tabii ki en çok araştırma sıcaklık ve yağış verilerinin trend analizleri konusunda yapılmıştır. Kankal ve Akçay, Doğu Karadeniz Bölgesi'nde bulunan Trabzon iline ait 2 meteoroloji istasyonuna ait yıllık, mevsimlik ve aylık bazda toplam yağış verilerini kullanarak trend analizleri yapmışlardır. Her iki istasyonda sonbahar ve ilkbaharda genelde artan trendlere rastlanılmıştır. Yaz mevsimi için Trabzon istasyonunda genellikle trend görülmezken, Akçaabat istasyonunda azalan yönde trend ortaya çıkmıştır. Yıllık toplam yağışlar değerlendirildiğinde, Trabzon istasyonu için genellikle artan, Akçaabat istasyonu için ise genellikle değişmeyen trend bulunmuştur [10].

Polat ve Sunkar tarafından yapılan bir çalışmada, Rize ili sıcaklık ve yağış trend analizinin belirlemek için Rize, Pazar, Hopa ve Trabzon otomatik gözlem istasyonlarının uzun yıllar (1970-2014) rasat verileri kullanılarak Rize'nin iklim özellikleri belirlenmeyi amaçlamışlardır. Bu çalışmada, Mann-Kendall ve Sen yöntemi kullanarak sıcaklık ve yağış trend analizi yapılmıştır. Mann-Kendall ve Sen analiz sonuçlarına göre Pazar dışındaki istasyonlarda sıcaklık trendinde belirgin artış, yağışta ise Hopa dışındaki istasyonlarda artış trendi görülmüştür [11].

Cosun ve Karabulut tarafından yapılan bir çalışmada yer alan Kahramanmaraş'ta bulunan meteoroloji istasyonları için yıllık, mevsimlik ve aylık sıcaklık trendleri incelenmiştir. Bu çalışmada trend analizi için parametrik olmayan Mann-Kendall yöntemi kullanılmıştır. Sonuçlara göre yıllık sıcaklıklarda Kahramanmaraş ve Elbistan istasyonlarında sıcaklık trendinin artan yönde olduğu gözlenmiştir [12].

Keskin ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada Doğu Anadolu Bölgesinde yer alan Ağrı, Ardahan, Bingöl, Bitlis, Elâzığ, Erzincan, Erzurum, Hakkâri, Iğdır, Kars, Malatya, Muş, Tunceli ve Van illeri için sıcaklık ve yağış trend analizi yapılmıştır. Analizler Mann-Kendall testi kullanılarak yapılmıştır. Sonuçlara bakıldığında bölge genelinde sıcaklık trendlerinde bir artış gözlemlenirken, yağış değerlerinde genel bir azalış gözlemlenmektedir. Erzurum ve Bitlis illeri hariç diğer 12 il için sıcaklık artış trendi belirlenmiştir. Bununla birlikte yağış trendleri Kars ve Ardahan'da artarken diğer 12 ilde böyle bir artış söz konusu değildir [13].

Özfidaner ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada İç Anadolu Bölgesi yağış verilerinin gidiş analizi incelenmiştir. Belirtilen çalışmada İç Anadolu bölgesinde bulunan 7 yağış gözlem istasyonuna ait aylık toplam yağış verilerinin Mann-Kendall sıra korelasyon test istatistiği ile gidişatının belirlenmesi amaçlanmıştır. 1960-2013 yılları arasında ölçülmüş olan yağış verileri kullanılmıştır. İstasyonların %42,9 (36 istasyonda)'unda azalma, %57,2 (47 istasyonda)'sinde artma trendi belirlenmiştir. Aynı 7 yağış gözlem istasyonunda ölçülen yağışların değişimlerini irdelenmiş özellikle Ankara, Nevşehir ve Kırşehir istasyonlarında azalma trendleri belirlenmiştir. Sivas istasyonunda genel olarak artma gözlemlenmiştir. Ayrıca Niğde istasyonunda Ağustos ve Ekim aylarında önemli artışlar meydana gelmiştir [14].

Bu çalışmada, Samsun iline ait sıcaklık ve yağış değişkenlerinin trend analizi yapılmıştır. Trend analizinde Şen trend analizinin kullanılması trendin gözle tespit edilmesini kolaylaştırmaktadır. 2. bölümde materyal ve metot, 3. bölümde bulgular, 4. bölümde ise sonuçlar verilmiştir.

II. MATERYAL VE METOT

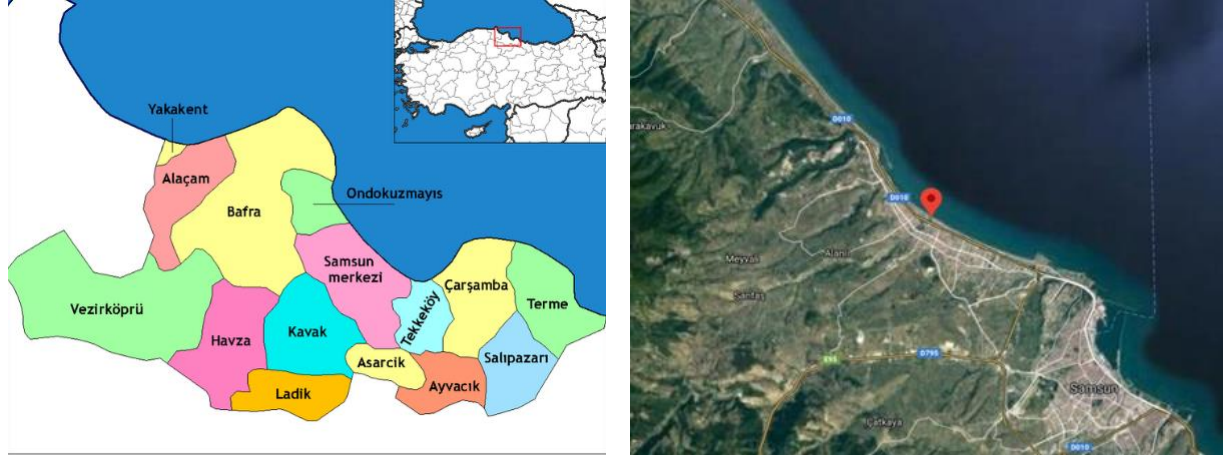
2.1. Veri

Bu çalışmada Samsun ili Atakum ilçesi sınırlarında yer alan Samsun Meteoroloji Bölge Müdürlüğü'ne ait 17030 numaralı otomatik meteoroloji gözlem istasyonunda 1990-2019 döneminde kaydedilmiş olan günlük ortalama sıcaklık ve günlük toplam yağış değerleri kullanılmıştır. Günlük sıcaklık ortalaması, gün boyunca ölçülmüş olan sıcaklıkların ortalamasıdır. Günlük toplam yağış değerleri, günlük ölçülen yağış değerlerinin toplamı olarak alınmıştır. Meteoroloji istasyonunun enlemi 41°20' Kuzey, boylamı 36°15' Doğu, yüksekliği ise 4 metre olup istasyonun konumu Şekil 1'de gösterilmiştir.

Samsun ili Karadeniz Bölgesi'nin en büyük metropol kentidir. Samsun ili, Karadeniz havzasına açılan ilk deniz kapısı ve İç Anadolu'ya açılan ilk kara kapısı olması nedeniyle bölgede önemli bir yere sahiptir. Karadeniz sahil şeridinin orta bölümünde Yeşilırmak ve Kızılırmak nehirlerinin Karadeniz'e döküldükleri deltalar arasında yer alan Samsun ili yeryüzü şekilleri bakımından üç ayrı özellik gösterir. Birincisi güneyindeki dağlık kesim, ikincisi; dağlık kesimle kıyı şeridi arasında kalan yaylalar, üçüncüsü; yaylalarla Karadeniz arasındaki kıyı ovalarıdır. Samsun genellikle ılıman bir iklime sahip olup iklim şehrin iç ve sahil şeridinde iki ayrı özellik gösterir. Sahil şeridinde Karadeniz ikliminin etkileri görülür. Bu etkilere göre yazları sıcak, kışları ılık ve yağışlı geçer. İç kesimlerde yüksekliği 2.446 metre olan Akdağ dağı ve yüksekliği 1971 metre olan Canik dağlarının etkisinde kalır. Bu etkilere göre kışlar soğuk, yağmur ve kar yağışlı yazlar ise serin geçer [15].

Samsun iline ait 1929-2018 arası yapılan ölçümlerin bir kısmının klimatolojik ortalaması Tablo 1'de görülmektedir. Yıllık ortalama sıcaklık 14,5 °C ile Türkiye ortalaması olan 13,6 °C'den yüksektir. Bu durum yükseltinin etkisiyle açıklanabilir. Şimdiye kadar ölçülen en yüksek sıcaklık 39.0 °C ile Ağustos, en düşük sıcaklık ise -9.8 °C ile Şubat ayında gerçekleşmiştir. Yıllık toplam yağış miktarı ortalama

718 mm olup, günlük toplam en yüksek yağış miktarı 88.9 mm ile 1997 yılı Haziran ayının on birinci gününde gerçekleşmiştir. Günlük en hızlı rüzgâr 1965 yılı Mayıs ayının yirmi birinci gününde 122.4 km/sa ölçülmüştür. En yüksek kar yağışı 31.01.1950 tarihinde 33.0 cm olarak ölçülmüştür [16].



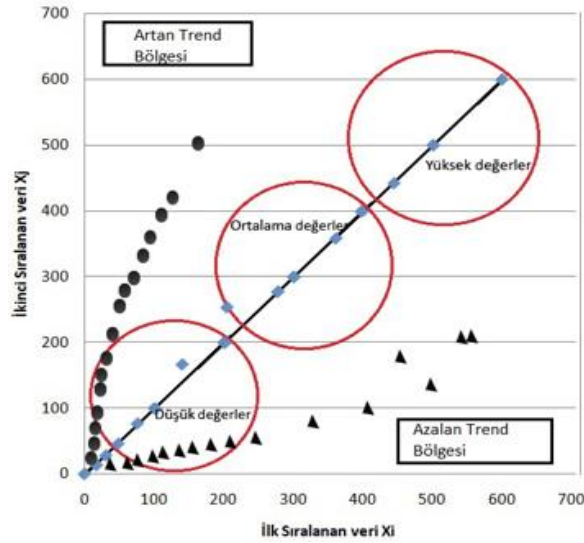
Şekil 1. a) Çalışma yapılan Samsun ili merkezi ve ilçeleri, b) 17030 Samsun istasyonunun konumu

Tablo 1. 1929-2018 yılları arası 17030 Samsun istasyonu bilgileri (Kaynak: [15])

| | Ocak | Şubat | Mart | Nisan | Mayıs | Haziran | Temmuz | Ağustos | Eylül | Ekim | Kasım | Aralık | Yıllık |
|--|------|-------|------|-------|-------|---------|--------|---------|-------|------|-------|--------|--------|
| Ortalama Sıcaklık (°C) | 7.0 | 7.0 | 7.9 | 11.2 | 15.6 | 20.3 | 23.3 | 23.6 | 20.1 | 16.2 | 12.5 | 9.3 | 14.5 |
| Ortalama En Yüksek Sıcaklık (°C) | 10.7 | 11.0 | 12.1 | 15.3 | 19.1 | 23.6 | 26.5 | 27.1 | 23.9 | 20.3 | 16.7 | 13.0 | 18.3 |
| Ortalama En Düşük Sıcaklık (°C) | 4.0 | 3.9 | 4.6 | 7.8 | 12.1 | 16.1 | 19.1 | 19.6 | 16.5 | 12.9 | 9.3 | 6.3 | 11.0 |
| Ortalama Güneşlenme Süresi (saat) | 2.7 | 3.2 | 3.6 | 4.7 | 6.2 | 8.3 | 8.8 | 8.2 | 6.3 | 4.6 | 3.7 | 2.7 | 63.0 |
| Ortalama Yağışlı Gün Sayısı | 13.5 | 13.6 | 15.2 | 13.5 | 12.6 | 9.2 | 5.9 | 6.3 | 9.66 | 12.0 | 12.0 | 13.0 | 136.4 |
| Aylık Toplam Yağış Miktarı Ortalaması (mm) | 71.6 | 58.7 | 66.4 | 57.0 | 48.3 | 45.2 | 34.4 | 37.3 | 54.0 | 78.7 | 83.5 | 82.0 | 717.7 |
| En Yüksek Sıcaklık (°C) | 24.2 | 26.5 | 33.6 | 37.0 | 37.4 | 37.4 | 37.5 | 39.0 | 38.3 | 38.4 | 32.4 | 28.9 | 39.0 |
| En Düşük Sıcaklık (°C) | -8.1 | -9.8 | -7.0 | -2.4 | 2.7 | 7.8 | 13.4 | 12.4 | 6.8 | 1.5 | -2.8 | -5.0 | -9.8 |

2.2. Metot

Sıcaklık ve yağış verilerindeki trendi incelemek için Şen Trend Analizi kullanılmıştır. Bu yöntemde veri seti zamansal olarak ölçüm başlangıç tarihinden son ölçüm tarihine doğru sıralanır. Daha sonra, oluşan seri ilk tarihten itibaren iki eşit parçaya bölünür ve ayrı ayrı kendi içinde küçükten büyüğe doğru sıralanır. Sonrasında ilk alt-seri (Xi), X-ekseni üzerinde ve ikinci alt seri (Xj), Y-ekseni üzerinde yer almak üzere kartezyen koordinat sistemi üzerinde sıralanır (Şekil 2). Oluşan iki boyutlu grafikte, veri noktaları 1:1 doğrusunun üzerinde sıralanıyorsa trend yok demektir. Eğer veriler 1:1 doğrusunun alt üçgeninde olup, düşük alanda yer alıyorsa düşük bir seviyede azalan trend olduğu, orta alanda yer alıyorsa orta düzeyde bir azalan trend olduğu, yüksek alanda yer alıyorsa yüksek oranda azalan bir trend olduğu sonucuna varılır. Eğer veriler 1:1 doğrusunun üst üçgeninde olup, yine düşük alanda yer alıyorsa düşük bir seviyede artan trend olduğu, yine orta alanda yer alıyorsa orta düzeyde bir artan trend olduğu, yine yüksek alanda yer alıyorsa yüksek oranda artan bir trend olduğu sonucuna varılır. [3,17, 18,19]. Örnek olarak, bu yöntemi sıcaklık verilerine uygulayacak olursak, düşük değerler artan trend bölgesinde olursa, düşük sıcaklıklarda artış olduğu sonucuna varılır. Yine yüksek toplam yağış değerlerindeki artan trend, mevsimlik toplam yağışlarda yüksek değerlerin arttığını belirtmektedir.



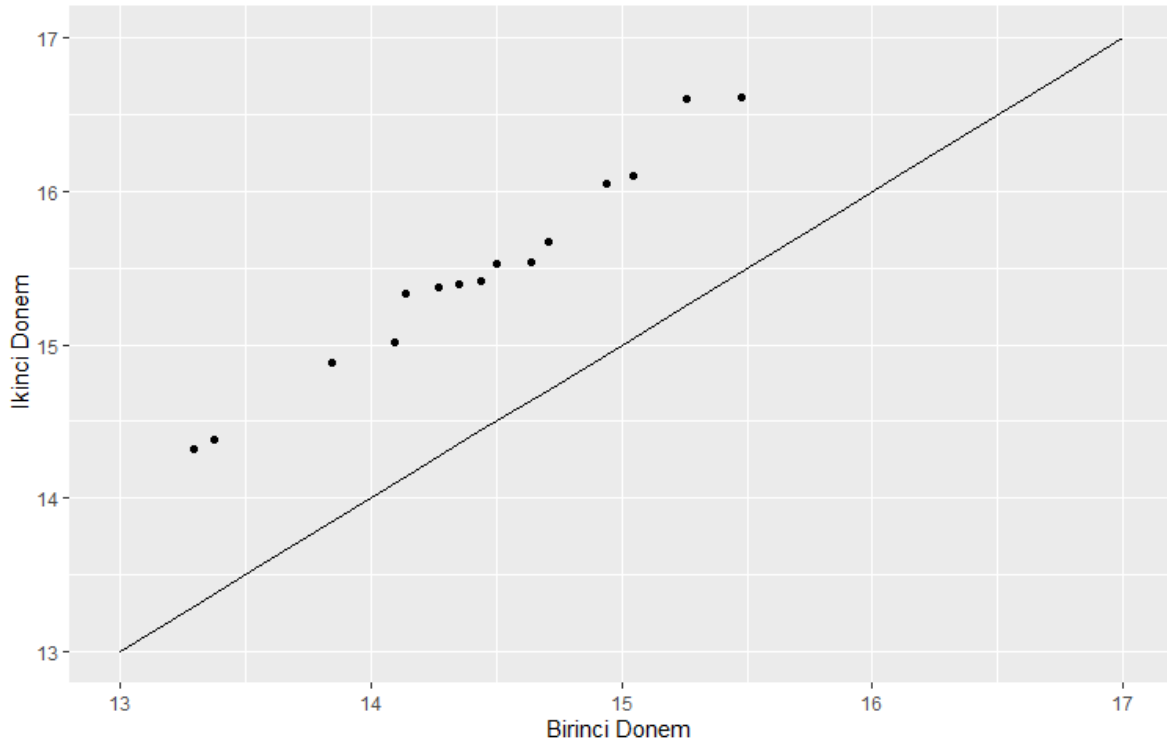
Şekil 2. Şen Yöntemi sonucunu gösteren grafik. (Üçgen, kare ve daire aynı örnek veri setinden alınmış olup sadece farklı trend bölgesinde olduğu için farklı şekle sahiptir. Farklı trend durumlarını belirtmek için farklı şekiller kullanılmıştır.)

III. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

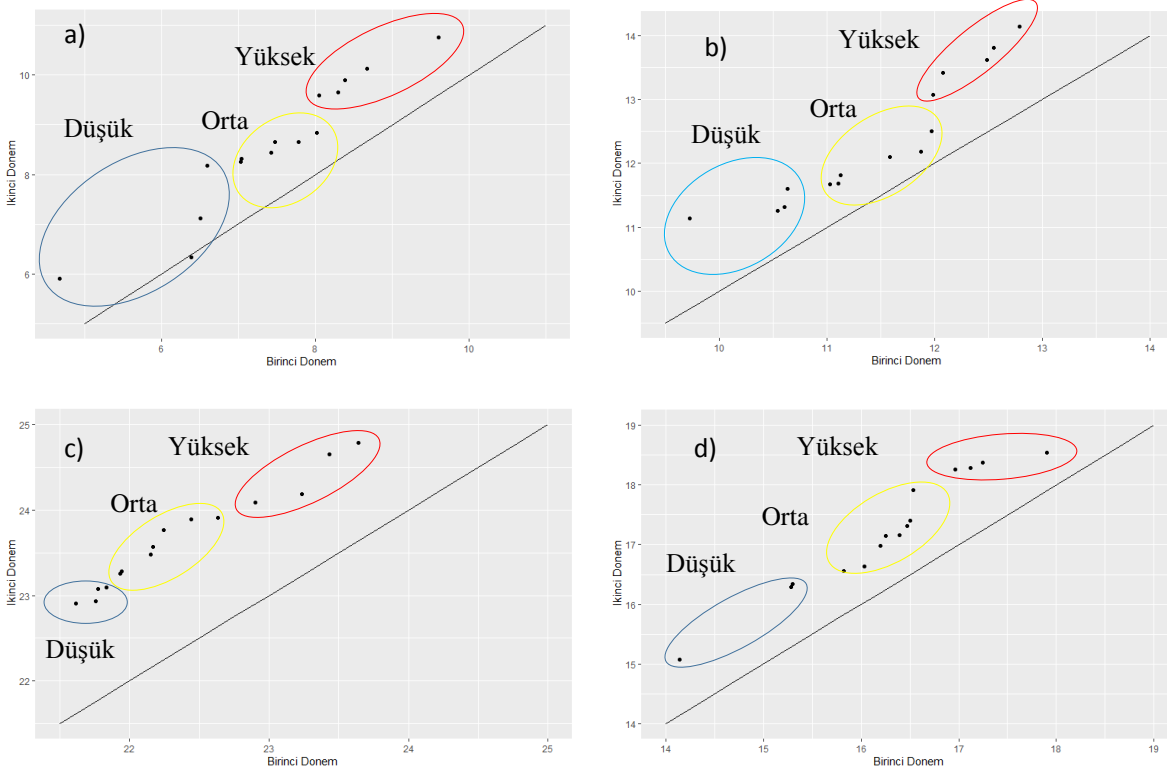
3.1. Sıcaklık

Samsun istasyonunun belirtilen dönemdeki günlük ortalama sıcaklık verilerinin yıllık ortalamalarının Şen trend analiz yöntemi uygulandığı zaman; düşük, orta ve yüksek değerler için artan bir trend görülmektedir (Şekil 3). Her üç alt grup için de trend monotonik artan trenddir. Üç alt grupta da trendin büyüklüğü aynıdır. Sadece en yüksek değerden bir önceki noktanın trend büyüklüğü biraz fazladır. Bu sonuca göre düşük, orta ve yüksek yıllık ortalama sıcaklıkların değerinin arttığı görülmektedir.

Samsun istasyonunun aynı dönemdeki günlük ortalama sıcaklık verilerinin mevsimlik ortalamalarının trend analizi Şekil 4'te görülmektedir. Kış mevsimi için Şen trend analiz yöntemi uygulandığında; düşük değerlerde öncelikle artan yönde ardından azalan yönde ve tekrar artan yönde bir trend gözlemlenmiştir. Azalan trend sadece bir nokta için gözlemlenmiştir. Orta değerler artan bir trende sahip olup, trendin büyüklüğü değerler büyüdükçe azalmaktadır. Yüksek değerler içinse neredeyse monotonik bir artan trend olduğu söylenebilir (Şekil 4a). Sonuç olarak, kış mevsiminde düşük değerlerdeki azalış hariç sıcaklıklarda artış gözlemlenmiştir. İlkbahar mevsimi için Şen trend analiz yöntemi uygulandığında; düşük değerler için artan yönde bir trend olduğu ancak artan trendin azalış yönünde ilerleyip tekrar artışa geçtiği gözlemlenmektedir. Orta değerler için artan bir trend olduğu, trendin büyüklüğünün grubun değerleri arttıkça azaldığı görülmektedir. Yüksek değerler içinse monotonik artan trend olduğu ve trendin büyüklüğünün diğer iki alt gruptan büyük olduğu gözlemlenmektedir (Şekil 4b). Özetle ilkbaharda, orta değerlerde az olmakla birlikte bütün alt gruplarda artan trend gözlemlenmektedir. Yaz mevsimi için Şen trend analiz yöntemi uygulandığında; düşük değerler için artan bir trend, orta değerler için artan bir trend olduğu fakat giderek şiddetinde düşüş gösterdiği, yüksek değerler için öncelikle artan bir trend olduğu fakat şiddetinde düşüş yaşayıp tekrar şiddetinde artışa geçen bir artan trend olduğu gözlemlenmektedir. (Şekil 4c). Yaz mevsimindeki trendin büyüklüğü diğer mevsimdekilerden büyüktür. Sonbahar mevsimi için Şen trend analiz yöntemi uygulandığında; düşük değerler için artan bir trend, orta değerler için büyüklüğü giderek artan bir artan trend, yüksek değerler için ise büyüklüğü giderek azalan bir artan trend olduğu gözlemlenmektedir (Şekil 4d). Genel olarak, sonbaharda bütün alt gruplarda büyüklüğü nerede ise aynı bir artan trend görülmektedir.



Şekil 3. Yıllık ortalama sıcaklık için Şen trend analizi.



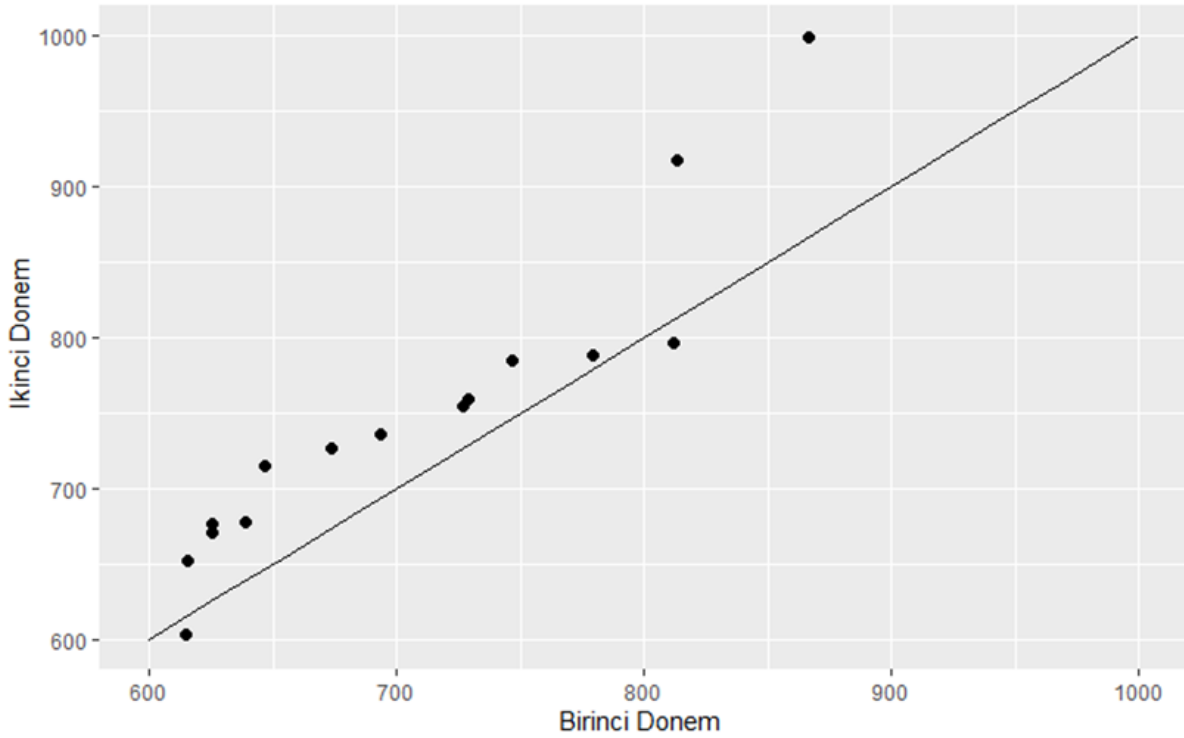
Şekil 4. Ortalama sıcaklık için Şen trend analizi a) Kış, b) İlkbahar, c) Yaz ve d) Sonbahar mevsimi.

3.2. Yağış

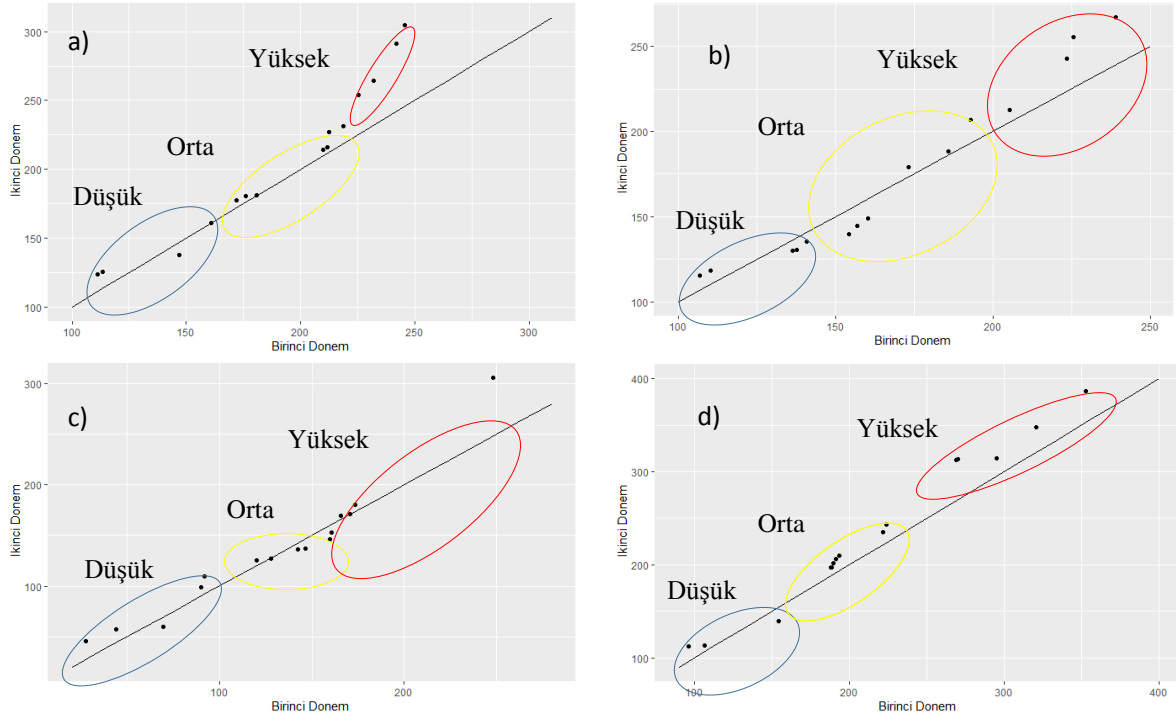
Samsun istasyonunun yıllık toplam yağış değişkenine Şen trend analiz yöntemi uygulandığı zaman; düşük değerlerin azalan trend ile başlayıp şiddetini artırarak artan trend haline geldiği, orta değerler için şiddetinde düşüş gerçekleşen artan trend olduğu gözlemlenmektedir. Yüksek değerler içinse, noktaların önce trendsizlik eğrisi etrafında salındığı sonra ise en yüksek değerlerin, en büyük trend büyüklüğüne sahip olduğu gözlemlenmektedir (Şekil 5).

Samsun istasyonunun aynı dönemdeki mevsimlik toplam yağışlarının trend analizi Şekil 6'da görülmektedir. Kış mevsimi toplam yağış miktarına Şen trend analiz yöntemi uygulandığı zaman; düşük değerler, artan trend olarak başlamış, azalan trend bölgesine geçmiş ve son olarak trendsizlik eğrisi üzerinde kalmıştır. Orta değerler trendsizlik eğrisinin etrafında yani büyüklüğü az olan artan trende sahiptir. Yüksek değerler için artan trend olup trendin büyüklüğünde artış görülmektedir. Yüksek değerler için artan trendin şiddetindeki artış miktarı, diğer mevsimlere göre şiddeti en yüksek olan artan trenddir

(Şekil 6a). İlkbahar mevsimi toplam yağış miktarına Şen trend analiz yöntemi uygulandığı zaman; düşük değerler artan trend olarak başlayıp azalan trende geçiş yapmıştır. Orta değerler azalan trend olarak başlayıp artan trend bölgesine geçiş yapmıştır. Yüksek değerler için artan trend gözlemlenmekte olup trendin büyüklüğünde artış gözlemlenmektedir (Şekil 6b). Yaz mevsimi toplam yağış miktarına Şen trend analiz yöntemi uygulandığı zaman; düşük değerler, artan trend olarak başlayıp azalan trend bölgesine geçmiş ve sonra tekrar artan trend bölgesine geçmiştir. Orta değerler, artan trend olarak başlayıp, azalan trend durumuna geçmiştir. Yüksek değerler, trendsizlik eğrisi etrafında değişen artan trende sahip olup sadece en yüksek yağış değerinde belirgin bir artan trend mevcuttur (Şekil 6c). Sonbahar mevsimi toplam yağış miktarına Şen trend analiz yöntemi uygulandığı zaman; düşük değerler artan trend ile başlayıp sonra azalan trend bölgesine geçiş yapmıştır. Orta değerler için monotonik artan trend gözlemlenmektedir. Yüksek değerler için artan trend gözlemlenmekte olup trendin büyüklüğü azalmaktadır (Şekil 6d).



Şekil 5. Yıllık toplam yağış için Şen trend analizi sonuçları (1990-2019).



Şekil 6. Mevsimlik toplam yağış için Şen trend analizi sonuçları a) Kış, b) İlkbahar, c) Yaz ve d) Sonbahar

V. SONUÇ

Samsun ili Karadeniz bölgesinin en kalabalık ilidir. Bu çalışmada, Samsun ili için günlük ortalama sıcaklık ve günlük toplam yağış değerlerinin yıllık ve mevsimlik trendi, Şen Trend Analizi aracılığı ile incelenmiştir. 17030 nolu Samsun Bölge istasyonuna ait veriler, Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden temin edilmiş olup, veriler 01.01.1990 ile 31.12.2019 arasındaki döneme aittir.

Samsun istasyonunun belirtilen dönemdeki yıllık ortalama sıcaklık değerlerine Şen trend analiz yöntemi uygulandığı zaman; düşük, orta ve yüksek değerler için artan bir trend görülmektedir. Her üç alt grup için de trend monotonik artan trenddir. Bu sonuca göre düşük, orta ve yüksek yıllık ortalama sıcaklıkların değerinin arttığı görülmektedir. Kış mevsimi için; düşük değerlerde öncelikle artan yönde ardından azalan yönde ve tekrar artan yönde bir trend gözlemlenmiştir. Azalan trend sadece bir nokta için gözlemlenmiştir. Orta değerler artan bir trende sahip olup, trendin büyüklüğü değerler büyüdükçe azalmaktadır. Yüksek değerler içinse neredeyse monotonik bir artan trend olduğu söylenebilir. Sonuç olarak, kış mevsiminde düşük değerlerdeki azalış hariç sıcaklıklarda artış gözlemlenmiştir. İlkbahar mevsimi için Şen trend analiz yöntemi uygulandığında; düşük değerler için artan yönde bir trend olduğu ancak artan trendin azalış yönünde ilerleyip tekrar artışa geçtiği gözlemlenmektedir. Orta değerler için artan bir trend olduğu, trendin büyüklüğünün grubun değerleri arttıkça azaldığı görülmektedir. Yüksek değerler içinse monotonik artan trend olduğu ve trendin büyüklüğünün diğer iki alt gruptan büyük olduğu gözlemlenmektedir. Özetle ilkbaharda, orta değerlerde

az olmakla birlikte bütün alt gruplarda artan trend gözlemlenmektedir. Yaz mevsimi için Şen trend analiz yöntemi uygulandığında; düşük değerler için artan bir trend, orta değerler için artan bir trend olduğu fakat giderek şiddetinde düşüş gösterdiği, yüksek değerler için öncelikle artan bir trend olduğu fakat şiddetinde düşüş yaşayıp tekrar şiddetinde artışa geçen bir artan trend olduğu gözlemlenmektedir. Yaz mevsimindeki trendin büyüklüğü diğer mevsimdekilerden büyüktür. Sonbahar mevsimi için Şen trend analiz yöntemi uygulandığında; düşük değerler için artan bir trend, orta değerler için büyüklüğü giderek artan bir artan trend, yüksek değerler için ise büyüklüğü giderek azalan bir artan trend olduğu gözlemlenmektedir. Genel olarak, sonbaharda bütün alt gruplarda büyüklüğü nerede ise aynı bir artan trend görülmektedir. Sonuç olarak, mevsimsel ortalama sıcaklıklar, bütün mevsimler ve bütün alt gruplar için artan trend bölgesinde bulunmaktadır. Kısaca, hem mevsimsel hem de yıllık ortalama sıcaklıklar artan trende sahiptir.

Samsun istasyonunun yıllık toplam yağış değişkenine Şen trend analiz yöntemi uygulandığı zaman; düşük değerlerin azalan trend ile başlayıp şiddetini artırarak artan trend haline geldiği, orta değerler için şiddetinde düşüş gerçekleşen artan trend olduğu gözlemlenmektedir. Yüksek değerler içinse, noktaların önce trendsizlik eğrisi etrafında salındığı sonra ise en yüksek değerlerin, en büyük trend büyüklüğüne sahip olduğu gözlemlenmektedir.

Kış mevsimi toplam yağış miktarına Şen trend analiz yöntemi uygulandığı zaman; düşük değerler artan trend olarak başlamış, azalan trend bölgesine geçmiş ve son olarak trendsizlik eğrisi üzerinde kalmıştır.

Orta değerler trendsizlik eğrinin etrafında yani büyüklüğü az olan artan trende sahiptir. Yüksek değerler için artan trend olup trendin büyüklüğünde artış görülmektedir. Yüksek değerler için artan trendin şiddetindeki artış miktarı, diğer mevsimlere göre şiddeti en yüksek olan artan trenddir. İlkbahar mevsimi toplam yağış miktarına Şen trend analiz yöntemini uygulandığı zaman; düşük değerler artan trend olarak başlayıp azalan trende geçiş yapmıştır. Orta değerler azalan trend olarak başlayıp artan trend bölgesine geçiş yapmıştır. Yüksek değerler için artan trend gözlemlenmekte olup trendin büyüklüğünde artış gözlenmektedir. Yaz mevsimi toplam yağış miktarına Şen trend analiz yöntemi uygulandığı zaman; düşük değerler, artan trend olarak başlayıp ile azalan trend bölgesine geçmiş ve sonra tekrar artan trend bölgesine geçmiştir. Orta değerler artan trend olarak başlayıp, azalan trend durumuna geçmiştir. Yüksek değerler trendsizlik eğrisi etrafında değişen artan trende sahip olup sadece en yüksek yağış değerinde belirgin bir artan trend mevcuttur. Sonbahar mevsimi toplam yağış miktarına Şen trend analiz yöntemini uygulandığı zaman; düşük değerler artan trend ile başlayıp sonra azalan trend bölgesine geçiş yapmıştır. Orta değerler için monotonik artan trend gözlemlenmektedir. Yüksek değerler için artan trend gözlemlenmekte olup trendin büyüklüğü azalmaktadır. Özet olarak, mevsimlik toplam yağış değerleri, yüksek değerler için her mevsimde artan trend bölgesinde bulunmaktadır. Diğer alt gruplarda ise hem azalan hem artan trendler mevcut olup bu gruplardaki trendin büyüklüğü, yüksek değerlerdeki trendin büyüklüğünden küçüktür. Sonuç olarak, yağışlardaki trend her mevsim için farklılık göstermektedir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, Meteoroloji Genel Müdürlüğü'ne çalışmada kullanılan veriyi hazırladığı için teşekkür eder.

KAYNAKLAR

- [1] Mann, H. B. (1945). Non-Parametric tests against trend. *Econometrica*, 13, 245-259.
- [2] Şen, Z. (2012). Innovative trend analysis methodology. *Journal of Hydrological Engineering*, 17 (9), 1042-1046.
- [3] Şen, Ö. L., Bozkurt, D., Göktürk, O. M., Dündar, B. & Altürk, B. (2013). Türkiye'de iklim değişikliği ve olası etkileri. 3. Taşkın Sempozyumu. 29-30 Nisan 2013.
- [4] Şimşek, O., Gümüş, V., Soydan, N. G., Yenigün, K., Kavşut, M. E. & Topçu, E. (2013). Hatay ilinde bazı meteorolojik verilerin gidiş analizi. *SDU International Journal of Technological Science*, 5(2), 132-144.
- [5] Efe, B., Lupo, A. R., & Deniz. A. (2019). The relationship between atmospheric blocking and precipitation changes in Turkey between 1977 – 2016. *Theoretical and Applied Climatology*, 138(3), 1573-1590.
- [6] Efe, B., Lupo, A. R., Sezen, I. & Deniz. A. (2020). The relationship between atmospheric blocking and temperature anomalies in Turkey between 1977 – 2016. *International Journal of Climatology*, 40(2), 1022-1037.
- [7] Efe, B., Lupo, A. R., & Deniz. A. (2020). Extreme temperatures linked to the atmospheric blocking events in Turkey between 1977 – 2016. *Natural Hazards*, 104(2), 1879 - 1898. doi: <https://10.1007/s11069-020-04252-w>.
- [8] Şen, Z. ve Öztopal, A. (2001). Genetic algorithms for the classification and prediction of precipitation occurrence. *Hydrological Sciences Journal*, 46(2), 255-267, doi: 10.1080/02626660109492820
- [9] Özdemir, E.T., Kolay, O. & Yetemen, O. (2019). Yomra (Trabzon) kırsalında 31 ağustos 2017'de meydana gelen dolu yağışının incelenmesi. *Anadolu Çev. ve Hay. Dergisi*, 4(2), 243-250.
- [10] Kankal, M. & Akçay, F. (2018). Trabzon ili yağışlarının eğilim analizi. *Gümüşhane Fen Bilimleri Dergisi*, 9(2): 318-331.
- [11] Polat, P. & Sunkar, M. (2017). Rize'nin iklim özellikleri ve Rize çevresinde uzun dönem sıcaklık ve yağış verilerinin trend analizleri. *Fırat Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 27(1), Sayfa: 1-23.
- [12] Cosun, F. & Karabulut, M. (2009). Kahramanmaraş'ta ortalama, minimum ve maksimum sıcaklıkların trend analizi. *Türk Coğrafya Dergisi*, 53, 41-50.
- [13] Keskin, M. E., Çakto, İ., Çetin, V. & Bektaş, O. (2018). Doğu Anadolu Bölgesi sıcaklık ve yağış trend analizi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6(2), 294-300.
- [14] Özfidaner, M., Uçan, D. & Topaloğlu, F. (2016). İç Anadolu Bölgesi yağış verilerinin gidiş analizi. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi TARGİD Özel Sayı* 161-168.
- [15] Hekimoğlu, B., Altındeğer, M. & Demirbaş, A. R. (2007). Samsun İlinin Fiziki Durumu ve Avantajları, https://samsun.tarimorman.gov.tr/Belgeler/Yayinlar/Tarimsal_strateji/samsun_ilinin_fiziki_durumu_ve_avantajlari.pdf, (Eylül, 2020).
- [16] Meteoroloji Genel Müdürlüğü Arşiv Kayıtları (1929-2018).
- [17] Şen, Z. (2013). Trend identification simulation and application. *Journal of Hydrological Engineering*, 19(3) 635-642.
- [18] Yıldırım, A. (2015). Trend Analizi Yöntemleri: Orta Fırat Havzası Uygulaması. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, Türkiye, 85 sayfa.
- [19] Ceribasi, G. (2018). Analyzing of meteorological and hydrological datas of ıznik lake basin by using innovative sen method. *Journal of Environmental Protection and Ecology*, 19 (1), 15-24.

The Impact of the COVID-19 Pandemic on the Air Quality (PM10) in Şile District of Istanbul, Turkey

COVID-19 pandemisinin İstanbul'un Şile ilçesinde hava kalitesine (PM10) etkisi

Halime YAKIŞIK¹ , Uğur ÖZVEREN¹ 

¹ Marmara Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, 34854, İstanbul, Türkiye

Abstract

The first COVID-19 case in Turkey was approved on March 11, 2020. Based on the rapid spread feature of the COVID-19 pandemic, a partial lockdown was put into practice in the whole of İstanbul for the weekends from March 21st to June 1st, 2020. The application of strict restriction precautions enabled us to decrease the effect of the COVID-19 pandemic on the Turkey National Health System while changing social behaviors. On the other hand, these forced measures provided an opportunity to determine the impact of anthropogenic events on air quality based on controlling pollution levels. The main goal of the present study is to examine the effect of the partial lockdown precautions on the pattern of air quality in the Şile district of İstanbul. The analysis of the air quality was carried out with the aid of air quality data from the monitoring station in Şile that contains PM10 concentration. The results showed an increase of approximately 16.90% in PM10 concentrations in Şile. This was ascribed to the increment of vehicle traffic and human mobility due to the migration from other districts of İstanbul during the COVID-19 outbreak. It is considered that the rural and characteristic properties of the district are among the reasons for taking immigration from the other districts of İstanbul during the COVID-19 outbreak. This study examines the impacts of the psychological behavioral changes and the restrictions related to the pandemic on air pollution.

Keywords: COVID-19, Lockdown, Air quality, PM Concentration, Şile district, İstanbul

Öz

Türkiye'deki ilk COVID-19 vakası 11 Mart 2020'de onaylandı. COVID-19 salgınının hızlı yayılma özelliğine bağlı olarak, 21 Mart - 1 Haziran 2020 tarihleri arasında İstanbul genelinde hafta sonları için kısmi kısıtlama uygulamaya konuldu. Sıkı kısıtlama önlemlerinin uygulanması, sosyal davranışları değiştirirken COVID-19 Türkiye Ulusal Sağlık Sistemi üzerindeki etkisini azaltmayı sağladı. Öte yandan, bu zorunlu önlemler insan kaynaklı olayların havat kalitesi üzerindeki etkisini kirlilik seviyelerini kontrol etmeye bağlı olarak belirleme fırsatı sağladı. Bu çalışmanın temel amacı, kısmi kısıtlama önlemlerinin İstanbul'un Şile ilçesi hava kalitesi üzerine etkisini incelemektir. Hava kalitesi analizi, Şile'deki izleme istasyonunun PM10 konsantrasyonu içeren hava kalitesi verileri yardımıyla gerçekleştirildi. Sonuçlar, Şile'nin PM10 konsantrasyonlarında yaklaşık % 16.90 artış olduğunu gösterdi. Bu, COVID-19 salgını sırasında İstanbul'un diğer ilçelerinden göç nedeniyle araç trafiğinin ve insan hareketliliğinin artmasıyla ilişkilendirildi. İlçenin kırsal karakteristik özelliklerinin COVID-19 salgını sırasında İstanbul'un diğer ilçelerinden göç alma sebepleri arasında olduğu değerlendirilmektedir. Bu çalışma, pandemi ile ilgili psikolojik davranış değişikliklerinin ve kısıtlamaların hava kirliliği üzerindeki etkilerini incelemektedir.

Anahtar Kelimeler: COVID-19, Kısıtlama, Hava kalitesi, PM Konsantrasyonu, Şile ilçesi, İstanbul

I. INTRODUCTION

On March 11, 2020, it was announced that COVID-19 is the worst infectious disease brought by the new coronavirus SARS-CoV-2 at the beginning of the 20th century, both in terms of mobility and mortality (Organization, 2020d). This worldwide outbreak of COVID-19 caused many deaths and cost billions of dollars (Allocati et al., 2016). The World Health Organization (WHO) has reported that COVID-19 has spread rapidly throughout the world, including Asia, Africa, Europe, the Americas, and Oceania, with 1,279,722 confirmed cases and 72,614 deaths as of April 8, 2020 (Medicine, 2020; Organization, 2020b). The COVID-19 disease, which was first detected in China on December 8, 2019 (News, 2020), causes severe respiratory illness in most people and was designated a "pandemic" by the World Health Organization (WHO) on March 12, 2020, due to its rapid spread (Organization, 2020c). To respond to this situation, governments around the world have begun to implement unprecedented public policies such as isolation, social distancing, distance learning, and self-quarantine (Anderson et al., 2020). The comprehensive psychosocial and economic consequences of the COVID-19 pandemic have unprecedented effects worldwide. Millions of people around the world have been asked to stay at home (as-called "lockdowns").

The first COVID-19 case in Turkey was announced on March 11, 2020 by the Ministry of Health of the Republic of Turkey. In a few weeks, there are 214.993 verified cases in all regions of Turkey, most of the cases approved in İstanbul (108.749)(Ji et al., 2020; "TÜRKİYE GÜNLÜK KORONAVİRÜS TABLOSU, <https://covid19.saglik.gov.tr/>, 2020," 2020). These data show that the ratio of confirmed cases in İstanbul to total cases in Turkey is about % 50.6. Therefore, partial closures were imposed by the government throughout İstanbul on weekends from March 21 to June 1, 2020, to reduce the rate of spread of the virus. Stringent measures were also taken after March 15 to encourage millions of people to stay at home. These include switching the education system to online classes, restricting vehicles from entering the country, and enforcing curfews for people under 20 and over 65.

It is known that COVID -19 is more painful than other infectious diseases worldwide and causes fear in many people. Fear and curfews have been shown to impact COVID-19 the environment, as well as reduce displacement and emissions from transportation and industry. In a study conducted in Somerville, Massachusetts, it was found that truck and private vehicle transportation will decrease by 46% and 71%, respectively, between March 27 and May 14, 2020, as people are advised to stay home (Hudda et al., 2020). However, it is acknowledged that reducing displacements and industrial activities can aid in observing the impact of anthropogenic activities on air pollutants in Milan, which is regarded as one of the most polluted cities in Italy and Europe (Carugno et al., 2017; Van Donkelaar et al., 2015). Therefore, the changes in air quality during this closure period may also provide an opportunity to evaluate the impact of anthropogenic events on air pollution in İstanbul in order to control air pollution in the future. COVID-19 can cause fever, cough, and dyspnea as an acute respiratory illness (Jiang et al., 2020). In addition, the cause of death of many COVID -19 patients is associated with cytokine storm syndrome (Guo et al., 2020; Mehta et al., 2020). This syndrome leads to many destructions and even death in the body due to an uncontrolled release of proinflammatory cytokines (Tisoncik et al., 2012). On the other hand, there is evidence that these symptoms also occur due to the effect of long-term exposure to air pollutants (Gan et al., 2012; Le Tertre et al., 2002; Wong et al., 2002). Several epidemiological studies show that long-term and short-term exposure, especially to PM10 (particulate matter with a diameter of 10 μm or less), leads to severe diseases due to accumulation in the respiratory tract (Kim et al., 2003; Schwartz, 1995, 1999; Van Donkelaar et al., 2015). The International Energy Agency (IEA) announced that nearly 6.5 million people die prematurely each year due to air pollution (Huang & Kuo, 2018). The concentration of air pollutants may be related to emissions, road traffic,

and population density, which all negatively affect urban regions. The USEPA introduced the Pollutant Standards Index (PSI) to analyze the air quality consisting of pollutants in 1976 (Qian et al., 2004).

The aim of this study is to compare PM10 concentrations before and during partial quarantine and to understand how stress due to low social distance in urban centers and partial quarantine may affect air quality in rural areas adjacent to urban centers during the initial phase of the COVID -19 outbreak. Therefore, Şile was selected as a rural area near the city of İstanbul. To our best knowledge, there is no study investigating air pollution from migration to areas outside urban centers due to the psychological effects of COVID.

II. EXPERIMENTAL

2.1. Air Quality Data Collection and Processing

Şile was one of the most heavily populated areas of the city during the COVID epidemic. The reason for this is that in this area, away from the city center and surrounded by nature, the inhabitants felt safe from the COVID epidemic. Therefore, the sampling site was decided as the Şile district of İstanbul (41° 10' 13"–29° 33' 48"), located in the north-east of the Marmara Region, on the shore of the Black Sea, and has an area of 735 km². It is bordered with Kandıra in the east, Derince and Körfez in the southeast, Pendik and Gebze in the south, Çekmeköy in the southwest and Beykoz in the west. According to the census, the population of the district was 37,692, of which 24.26% was the elderly population ("ENDEKSA, <https://www.endeksa.com/tr/analiz/istanbul/bahcelievler/sirinevler/demografi>," 2020; " T.C. Şehir ve Çevre Bakanlığı, Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağı, Air Quality Monitoring Station," 2018). Its population increases in the summer period, as it is located on the Black Sea coast and is chosen for summer holidays. In addition, the forests that cover approximately 90% of the district are among the reasons for travel during the summer season (Tuzlacı & Tolon, 2000). In this study, the obtained dataset contains concentrations of particulate matter with a diameter of less than 10 μm (PM10) for Şile (Figure 1) were collected from the Republic of Turkey Ministry of Environment and Urbanization, "Air Quality Monitoring Stations" website (" T.C. Şehir ve Çevre Bakanlığı, Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağı, Air Quality Monitoring Station," 2018). The daily mean pollutant concentration ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) was used to determine the relative change (%) for comparing the partial closure period (from March 21, 2020, to June 1, 2020) with the year prior to the partial closure (from March 21, 2019, to June 1, 2019). Prior to performing the data analysis, missing observations were deleted on a daily basis. To exclude seasonal changes in air pollution, the same data as a year ago was selected for the period before the partial closure.



Figure 1. Localization of the Şile district in İstanbul

The first COVID-19 case in Turkey was reported by the Ministry of Health of the Republic of Turkey on March 11, 2020. Within a few weeks, 214,993 cases were confirmed in all regions of Turkey, most of them in Istanbul (108,749) (Ji et al., 2020; "TÜRKİYE GÜNLÜK KORONAVİRÜS TABLOSU, <https://covid19.saglik.gov.tr/>, 2020," 2020). By July 20, 2020, there were 220,572 confirmed cases and 5508 deaths in Turkey due to COVID-19 (BAKANLIĞI & MÜDÜRLÜĞÜ, 2020). From these results, the ratio of reported cases in İstanbul to total cases in Turkey is about 50.6%. Therefore, the partial lockdown of the whole of İstanbul for the weekends from March 21 to June 1, 2020, was introduced by the government to reduce the rate of spread of the virus. Stringent measures have been taken to keep millions of people at home, such as switching the education system to online classes, restricting the entry of vehicles and enforcing curfews for people under 20 and over 65. To examine the current distribution of the disease throughout the country, the total numbers of cases and deaths were given in Fig.2.

III. RESULTS

3.1. COVID-19 Outbreak

In addition to the fact that the COVID-19 pandemic causes physical health problems, the environmental effects of the coronavirus should also be taken into account, depending on the psychological health of people and the change in their social lives. For this reason, the number of patients and mortality rates were studied first, as the COVID-19 epidemic increased the anxiety of people in the city center, and they moved to rural areas. This relationship also shows the impact of the COVID-19 pandemic on the environment due to increased road traffic and population density in rural areas.

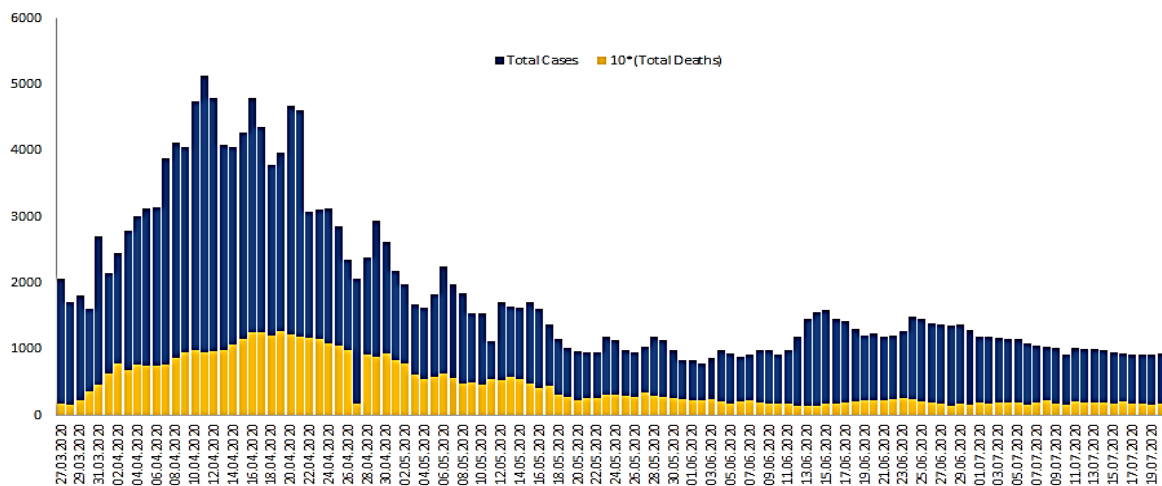


Figure 2. The distribution of COVID-19 cases in Turkey

These figures also show the impact of measures on the outbreak of COVID-19. As shown in Fig.2, the decreasing trend of the number of cases and deaths has been observed since March 15, when the restrictions started. Moreover, Figure 3, showing the relationship between deaths and the number of cases, shows that there is a linear relationship and that the death rate increases as a function of the spread of the disease. Thus, we can conclude that the death rate is lower in rural areas, where there are fewer cases, than in urban centers, where the disease spreads more rapidly.

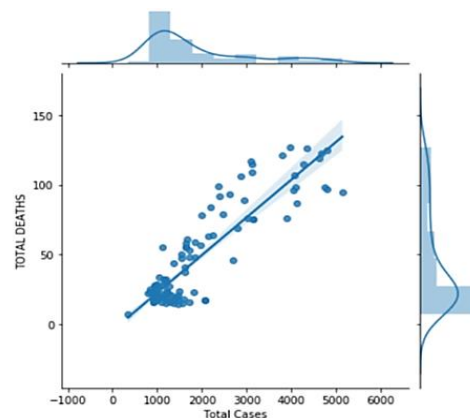


Figure 3. The relationship between total case and death numbers

3.2. Behavioral and Environmental Effects of the COVID-19 Outbreak

Since the beginning of civilization, man has manipulated nature for his own benefit. It is an unavoidable fact that the rapid growth of industrialization and urbanization is affecting air quality. In addition, environmental problems such as climate change, ozone layer depletion and global warming are the result of air pollutants entering urban areas from power plants, road traffic and natural disasters. In recent years, air pollution has been considered an important problem to be addressed.

On the other hand, the suddenness and global scale of the COVID-19 pandemic has raised important issues that require collaborative research to contain the devastation caused by the disease. A global ban on social gatherings has been imposed for a period of several weeks to months as a precautionary measure against SARS-CoV-2. Furthermore, public health authorities, including the World Health Organization (WHO), have made some recommendations to prevent the transmission of COVID-19 outbreaks during social gatherings (Organization, 2020a). In addition to government restrictions, the media and other stakeholders such as doctors and researchers have also urged people to avoid public gatherings such as sporting events or religious ceremonies to prevent the spread of coronavirus infection. Meanwhile, efforts to restrict movement have had critical environmental impacts that are seen as critical to positively impacting people's health status. Although people spend more time indoors during the pandemic period due to personal precautions and/or partial curfews, there are no emissions of toxic particulates and greenhouse gasses, and air quality has improved significantly. Therefore, it is considered that the COVID-19 pandemic has had an unprecedented impact on human civilization worldwide, but also a very positive impact on the environment.

The rapid transmission of the COVID-19 infection also had an impact on social life, and people spent more time at home. Air pollution decreased significantly in urban centers, while it increased in rural districts of cities due to population migration to rural areas. In this study, we observed how air quality changed in Şile during the period beginning with the diagnosis of COVID-19 (March 11–June 28, 2020) and compared it with 2019 air quality data (March 11–June 28, 2019). This provided insight into the impact of fear and panic on people's lifestyles during the pandemic COVID-19. In addition, the impact of the partial curfew on air pollution was analyzed by comparing air pollution concentrations before and during the curfew in Şile. The partial curfew and pre-curfew periods were set to March 21 to June 1, 2020, and March 21 to June 1, 2019, respectively. The experimental results of the Şile (PM10) monitoring stations between March 11, 2020 - June 28, 2020, and

March 11, 2019 - June 28, 2019, are shown in Figure 4.

Şile is one of the most sparsely populated districts in Istanbul, with a population of about 40,000, and has very low pollutant emissions compared to other districts due to lower anthropogenic activity. On the other hand, a significant increase in analyzed PM10 pollutant concentrations compared to the pre-pandemic period was observed in the rural Şile district of Istanbul (Table 1). As given in Figure 6, the remarkable increase in PM10 concentration was observed after the first COVID case was confirmed. Particulate matter smaller than 10 μm in size is known as PM10, and it can come from a variety of sources, including carbonaceous particles from exhaust emissions or natural or anthropogenic effects. The increment of PM10 concentration in Şile can be due to the migration from other districts of İstanbul with the beginning of the COVID-19 outbreak, and this situation is thought to lead to increased road human mobility within the Şile. This can be observed from the Regional Directorate State Roads Volume Map data as given in Fig. 5 and Fig. 6. According to 2019 data, while the total number of vehicles per day for Şile was 11974, it is seen that this number reached 12800 in 2020. However, lower PM10 concentrations observed in certain periods of 2020 (27 April–7 May and 17 May–1 June) compared to 2019 can be attributed to the impact of civil unrest on economic activities and energy use. These results observed for Şile show us that stress and panic, which started with the diagnosis of COVID-19, have an impact on the lifestyle of the people here. The high rate of the elderly population (24.26%) may have been effective in this case.

If we take a closer look at the daily average data, higher PM10 concentrations are observed in 2020 on April 27-May 2, May 05-May 08, and May 17-June 1, compared to the same dates in 2019. The increasing trend in PM10 concentration observed for both 2019 and 2020 from April to June can be associated with changes in seasonality. Because the existing temperature difference may result in an extra accumulation of pollutant particles in the ground layer of the troposphere (Nidzgorska-Lencewicz & Czarnecka, 2015). Besides this, local transport emission properties such as low wind speed and lack of precipitation are commonly considered to be influential parameters for high PM10 concentration levels (Nidzgorska-Lencewicz & Czarnecka, 2015). As shown in Fig. 7, the average hourly wind speed in Şile demonstrates considerable seasonal alteration throughout the year. Therefore, the changes in PM10 concentration observed for May and June of 2019 can be attributed to the flow of air masses due to changes in macroscale atmospheric circulation properties (Demuzere et al., 2008; Wai & Tanner, 2005). On the other hand, it is understood from previous studies that

an increase in the amount of airborne water vapor leads to an increase in PM10 concentration (Canepari et al., 2013). As a result, the exceedances of the limit PM10 concentration values that occurred in 2019 through April, May, and June can be attributed to the Şile atmosphere's humidity comfort levels. As shown in Fig. 8, Şile district shows significant seasonal

variation in the perceived humidity. The period of high humidity in the air throughout the year starts in the spring months and continues until September. The increasing trend in PM10 concentration observed during the last days of April may be related to the comfort levels of Şile.

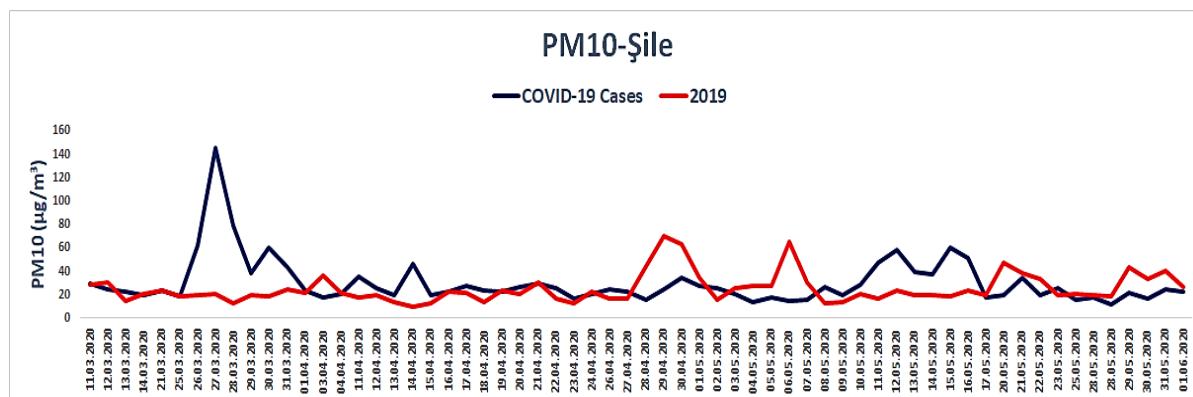


Figure 4. Daily mean concentrations of PM10 ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) in in before and duration of COVID-19 pandemic period in Şile

Table 1. Mean concentration and relative change of PM10 in Şile district of İstanbul. Hourly mean for the pandemic period (11 March-1 June 2020) and before COVID-19 (11 March-1 June 2019)

| | Mean Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) During COVID-19 Pandemic | Mean Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Before COVID-19 Pandemic | Relative Change (%) |
|-----------|--|--|---------------------|
| Şile PM10 | 29.94 | 24.87 | 16.90 |

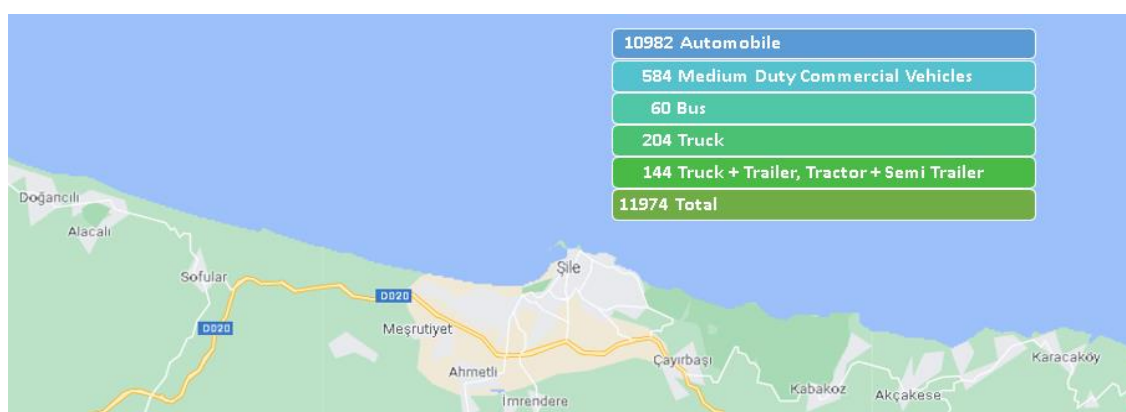


Figure 5. Vehicle density on the D020 highway in 2019 (Müdürlüğü)

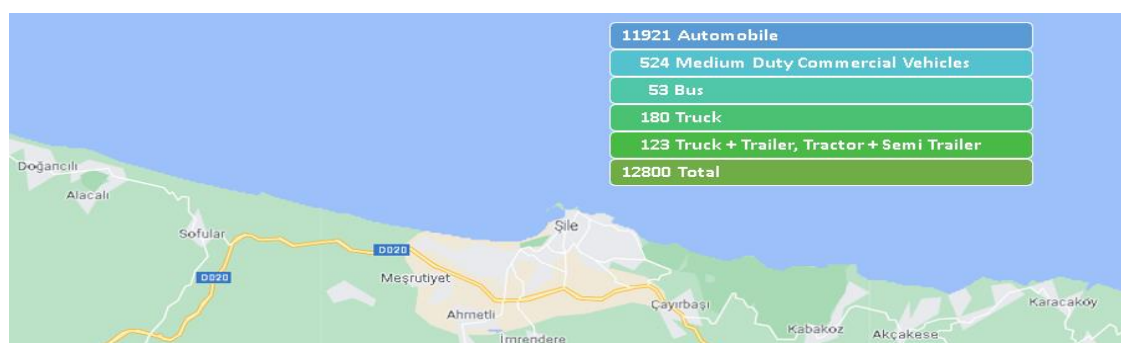


Figure 6. Vehicle density on the D020 highway in 2020 (Müdürlüğü)

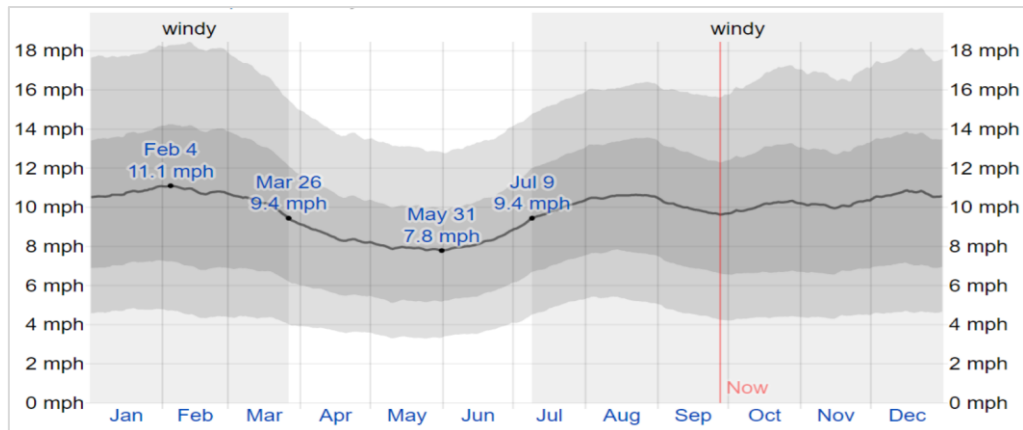


Figure 7. The average of mean hourly wind speeds (dark gray line) in Şile ("Climate and Average Weather Year Round in Şile,")

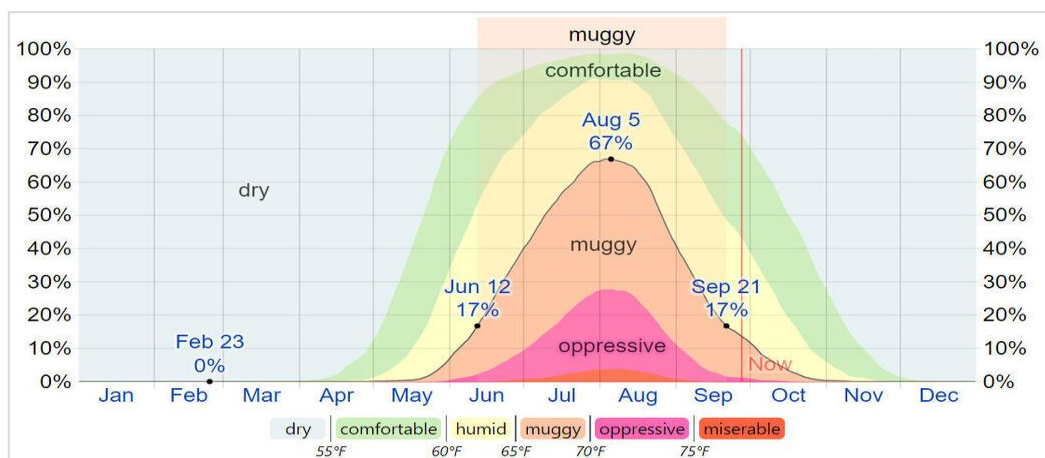


Figure 8. The various humidity comfort levels in Şile, categorized by dew point ("Climate and Average Weather Year Round in Şile,")

IV. CONCLUSION

Şile is one of the districts with the highest population migration before and after the closure during the pandemic, COVID-19. The reason is that in this region, far from the city center and intertwined with nature, people feel safe from the COVID-19 pandemic. Therefore, we studied the relationship between the daily changes of air pollutants in Şile district and the confirmed cases of COVID-19 in Turkey. For this purpose, a time series analysis of average daily air quality levels, COVID-19 case and death rates during the pandemic and partial curfew was studied. The air quality of a district is usually influenced by various factors such as urbanization, vehicle exhaust, traffic, weather conditions, and others. We found a significant association between air quality and the outbreak of COVID-19 in Şile County. The impact of this pandemic was shown in the increasing air pollution (PM10) in Şile district, which is significant because it is known that exposure to PM10 can lead to lung cancer and chronic obstructive pulmonary disease (COPD).

REFERENCES

- [1] Allocati, N., Petrucci, A., Di Giovanni, P., Masulli, M., Di Ilio, C., & De Laurenzi, V. (2016). Bat–man disease transmission: zoonotic pathogens from wildlife reservoirs to human populations. *Cell death discovery*, 2(1), 1-8.
- [2] Anderson, R. M., Heesterbeek, H., Klinkenberg, D., & Hollingsworth, T. D. (2020). How will country-based mitigation measures influence the course of the COVID-19 epidemic? *The Lancet*, 395(10228), 931-934.
- [3] BAKANLIĞI, T. C. S., & MÜDÜRLÜĞÜ, S. B. S. G. (2020). COVID-19 Situation Report Turkey. <https://sbsgm.saglik.gov.tr/TR,66424/covid-19-situation-report-turkey.html>
- [4] Canepari, S., Farao, C., Marconi, E., Giovannelli, C., & Perrino, C. (2013). Qualitative and quantitative determination of water in airborne particulate matter. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(3), 1193-1202.

- [5] Carugno, M., Consonni, D., Bertazzi, P. A., Biggeri, A., & Baccini, M. (2017). Temporal trends of PM10 and its impact on mortality in Lombardy, Italy. *Environmental Pollution*, 227, 280-286.
- [6] Climate and Average Weather Year Round in Şile. <https://weatherspark.com/y/96072/Average-Weather-in-%C5%9Eile-Turkey-Year-Round#Figures-WindSpeed>
- [7] Demuzere, M., Trigo, R., Vila-Guerau de Arellano, J., & Van Lipzig, N. (2008). The impact of weather and atmospheric circulation on O3 and PM10 levels at a mid-latitude site. *Atmos. Chem. Phys. Discuss*, 8, 21037-21088.
- [8] ENDEKSA, <https://www.endeksa.com/tr/analiz/istanbul/bahcelievler/sirinevler/demografi>. (2020). <https://www.endeksa.com/tr/analiz/istanbul/bahcelievler/sirinevler/demografi>
- [9] Gan, W. Q., Davies, H. W., Koehoorn, M., & Brauer, M. (2012). Association of long-term exposure to community noise and traffic-related air pollution with coronary heart disease mortality. *American journal of epidemiology*, 175(9), 898-906.
- [10] Guo, Y.-R., Cao, Q.-D., Hong, Z.-S., Tan, Y.-Y., Chen, S.-D., Jin, H.-J., Tan, K.-S., Wang, D.-Y., & Yan, Y. (2020). The origin, transmission and clinical therapies on coronavirus disease 2019 (COVID-19) outbreak—an update on the status. *Military Medical Research*, 7(1), 1-10.
- [11] Huang, C.-J., & Kuo, P.-H. (2018). A deep cnn-lstm model for particulate matter (PM2.5) forecasting in smart cities. *Sensors*, 18(7), 2220.
- [12] Hudda, N., Simon, M. C., Patton, A. P., & Durant, J. L. (2020). Reductions in traffic-related black carbon and ultrafine particle number concentrations in an urban neighborhood during the COVID-19 pandemic. *Science of the Total Environment*, 140931.
- [13] Ji, H., Xie, W., Liu, W., Liu, X., & Zhao, D. (2020). Sorption of dispersed petroleum hydrocarbons by activated charcoals: Effects of oil dispersants. *Environmental Pollution*, 256, 113416.
- [14] Jiang, F., Deng, L., Zhang, L., Cai, Y., Cheung, C. W., & Xia, Z. (2020). Review of the clinical characteristics of coronavirus disease 2019 (COVID-19). *Journal of general internal medicine*, 1-5.
- [15] Kim, H., Kim, Y., & Hong, Y.-C. (2003). The lag-effect pattern in the relationship of particulate air pollution to daily mortality in Seoul, Korea. *International Journal of Biometeorology*, 48(1), 25-30.
- [16] Le Tertre, A., Medina, S., Samoli, E., Forsberg, B., Michelozzi, P., Boumghar, A., Vonk, J., Bellini, A., Atkinson, R., & Ayres, J. (2002). Short-term effects of particulate air pollution on cardiovascular diseases in eight European cities. *Journal of Epidemiology & Community Health*, 56(10), 773-779.
- [17] Medicine, J. H. U. o. (2020). Coronavirus Research Center. 20. <https://coronavirus.jhu.edu/map.html>
- [18] Mehta, P., McAuley, D. F., Brown, M., Sanchez, E., Tattersall, R. S., Manson, J. J., & Collaboration, H. A. S. (2020). COVID-19: consider cytokine storm syndromes and immunosuppression. *Lancet (London, England)*, 395(10229), 1033.
- [19] Müdürlüğü, U. v. A. B. K. G. Trafik Hacim Haritaları. <https://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Trafik/TrafikHacimHaritasi.aspx>
- [20] News, G. (2020). First COVID-19 case happened in November, China government records show - report. <https://www.theguardian.com/world/2020/mar/13/first-covid-19-case-happened-in-november-china-government-records-show-report>
- [21] Nidzgorska-Lencewicz, J., & Czarnecka, M. (2015). Winter weather conditions vs. air quality in Tricity, Poland. *Theoretical and Applied Climatology*, 119(3), 611-627.
- [22] Organization, W. H. (2020a). Coronavirus disease 2019 (COVID-19): situation report, 88.
- [23] Organization, W. H. (2020b). Coronavirus disease 2019 (COVID-19): situation report, 72.
- [24] Organization, W. H. (2020c). WHO announces COVID-19 outbreak a pandemic. <http://www.euro.who.int/en/health-topics/healthemergencies/coronavirus-covid-19/news/news/2020/3/who-announces-covid-19-outbreak-a-pandemic>
- [25] [Record #185 is using a reference type undefined in this output style.]
- [26] Qian, Z., Chapman, R. S., Hu, W., Wei, F., Korn, L. R., & Zhang, J. J. (2004). Using air pollution based community clusters to explore air pollution health effects in children. *Environment international*, 30(5), 611-620.
- [27] Schwartz, J. (1995). Short term fluctuations in air pollution and hospital admissions of the elderly for respiratory disease. *Thorax*, 50(5), 531-538.
- [28] Schwartz, J. (1999). Air pollution and hospital admissions for heart disease in eight US counties. *Epidemiology*, 17-22.
- [29] T.C. Şehir ve Çevre Bakanlığı, Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağı, Air Quality Monitoring Station. (2018). <http://www.havaizleme.gov.tr>
- [30] Tisoncik, J. R., Korth, M. J., Simmons, C. P., Farrar, J., Martin, T. R., & Katze, M. G. (2012). Into the eye of the cytokine storm.

- Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 76(1), 16-32.
- [31] Tuzlacı, E., & Tolon, E. (2000). Turkish folk medicinal plants, part III: Şile (İstanbul). *Fitoterapia*, 71(6), 673-685.
- [32] TÜRKİYE GÜNLÜK KORONAVİRÜS TABLOSU, <https://covid19.saglik.gov.tr/>, 2020. (2020). <https://covid19.saglik.gov.tr/>
- [33] Van Donkelaar, A., Martin, R. V., Brauer, M., & Boys, B. L. (2015). Use of satellite observations for long-term exposure assessment of global concentrations of fine particulate matter. *Environmental health perspectives*, 123(2), 135-143.
- [34] Wai, K., & Tanner, P. A. (2005). Extreme particulate levels at a western pacific coastal city: the influence of meteorological factors and the contribution of long-range transport. *Journal of atmospheric chemistry*, 50(2), 103-120.
- [35] Wong, T. W., Tam, W., Yu, T., & Wong, A. (2002). Associations between daily mortalities from respiratory and cardiovascular diseases and air pollution in Hong Kong, China. *Occupational and environmental medicine*, 59(1), 30-35.

Açık Denizde Plankton Varlığı ile Hidrokarbon Enerji Kaynaklarının Belirlenmesi Çalışmaları: Doğu Karadeniz Örneği

Determination of Plankton Presence and Hydrocarbon Energy Resources in the Open Sea: The Example of the Eastern Black Sea

Güzide KALYONCU ERGÜLER¹ 

¹Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü (MTA), Çevre Araştırmaları Dairesi, 06530, Ankara, Türkiye

Öz

Hidrokarbon kaynaklarına olan ihtiyaç, yenilenebilir enerji kaynakları kullanımı artsa da, gerek nüfus gerek endüstrideki artış nedeniyle sürmektedir. Tükenen karasal ortamdaki enerji kaynakları ve artan enerji ihtiyacı nedeniyle arama faaliyetleri denizel ortamlara yönelmiştir. Açık denizlerde hidrokarbon enerji kaynağı aramak çok sayıda belirsizlik içermekte ve bu belirsizliklere bağlı olarak maliyetlerin yükselmesine neden olmaktadır. Hidrokarbon alanların tespitinde uzun soluklu çabalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada 20.000 km²'lik Doğu Karadeniz deniz alanında öncelikli alan tespiti amacıyla, sediment çökelleri tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla, doğal koşullarında hareket kabiliyeti olmayan planktonların ortam koşullarındaki hareketleri incelenmiştir. Planktonlar hareketlerini, akıntının doğasına göre belirlerler. Buzullarda dahi görülebilen bu canlılar, Doğu Karadeniz'de de ağırlıklı olarak görülür. Zooplankton adı verilen hayvanlardan veya fitoplankton adı verilen bitkilerden oluşan planktonlar zamanla deniz tabanına inerek nehirler yoluyla denize giren inorganik maddelerle karışır ve böylece enerji kaynaklarını oluşturma potansiyeli taşırlar. Bu çalışmada plankton varlığından yola çıkarak 20.000 km² açık deniz alanına ait uzaktan algılama ile elde edilen bulanıklık ve sıcaklık haritaları ile sediment çökelim alanlarının varlığı incelenmiştir. Bulanıklık haritaları için seki diskteki disk ölçümleri ile yerinde yapılan elektriksel kondüktivite (Ec), potansiyel hidrojen (pH), sıcaklık (°C) ölçümü alınmış ve meteorolojik veriler incelenmiştir. Yapılan detay harita incelemeleri ile İyidere- Hopa açık deniz alanında sekiz alan potansiyel mikro sediment çökelleme alanı olarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Plankton, Sıcaklık Haritası, Bulanıklık Haritası, Seki Disk, Açık Deniz Maden Aramacılığı

Abstract

Although energy use is increasing due to the need for hydrocarbon, it is eroding both because of population and industry. Due to depleted terrestrial energy resources and increasing vegetation, it has turned to marine environments. There are many methods in the carbon system in the high seas, and this excessive dependency causes defeats. Shorter efforts are not observed in hydrocarbon alloys. In this study, site selection, sediment deposits that are not considered to be used in the 20,000 km² Eastern Black Sea marine area. To this end, it conveys the emotions of plankton that are not related to the transferred movements. Planktons determine movement, current according to current. These creatures, which can be seen even in glaciers, can be seen in the Eastern Black Sea Region. Plankton, which consists of animals called zooplankton or plants called phytoplankton, sometimes descends to the sea base and mixes with organic materials given to the sea through rivers and has the capacity to create energy. In this study, let's plan the precipitation with the plankton 20.000 km² sea direction visual and the old precipitation and maps of the plankton temperature. Take electrical conductivity (Ec), potential-to-potential (pH), temperature (C) in situ with secchi disc measurements for turbidity, and meteorological travels. With the detailed map examinations, they show İyidere- Hopa as a potential micro-deposition area in the open sea area.

Keywords: Plankton, Heat Map, Turbidity Map, Secchi Disk, Offshore Mining

I. GİRİŞ

Hidrokarbon, en temel organik molekül türünü ifade eder. Sadece iki elementten; hidrojen ve karbondan oluşur. Genel olarak, hidrokarbon molekülleri, hidrojen atomları ile çevrili merkezi bir yapı oluşturan bir veya daha fazla karbon atomu ile yapılandırılır. Alkanlar, alkenler, alkinler ve aromatik hidrokarbonlar olmak üzere dört ana hidrokarbon türü vardır. Hidrokarbonlar ve türevleri fosil yakıtların ana bileşenleridir ve oksijenle yanarken enerji açığa çıkarır. Metan, CH₄ kimyasal formülüne sahip bir alkandır ve fosil yakıt türü olan doğal gazın ana hidrokarbon bileşenidir. Hidrokarbon yanma reaksiyonu, ekzotermik reaksiyon olduğundan ısı enerjisi açığa çıkmaktadır. Açık denizlerde metan kaynağını oluşturan bir nedende deniz planktonlarıdır.

Deniz planktonları deniz tabanından bağımsız sürüklenirler. Bu nedenden dolayı planktonlar yüzen organizmalar olarak kabul edilir. Planktonlar okyanuslardaki fotosentezin oldukça yüksek oranda olmasına neden olur. Böylece karbondioksitin belli bir seviyede kalmasını sağlarlar. Ayrıca, dünyanın zamanla ısınmasını engelleyici mikroskobik bariyerdir de denilebilir. Fito ve zoo olarak iki temel yapısı olan planktonlardan; bitkisel kökenli

olanlar (fitoplanktonlar), su yüzeyinde güneş ışığından yararlanırlar. Metan yığılım etkisinin daha yüksek etkisi olduğu düşünülen hayvansal kökenli olanlar ise (zooplanktonlar) biyolojik olarak isimlendirilir. Planktonların gerek özellikleri gerek yapıları bakımından çok çeşitlilik sunmalarından dolayı araştırmacılar tarafından farklı sınıflandırmalara tabii tutulmuştur. Bunlar daha çok biyolojik özellikleri ve boylarının dikkate alınması ile yapılır. Planktonlar boylarına göre femto, pico, ultra, nanno, mikro, makro, mega ön adlarından biri ile birlikte ifade edilen planktonlar (<0.2 µm ila > 20mm) ön adlarından biri ile birlikte ifade edilerek isimlendirilirler [1,2]. Aslında planktonlar yüksek protein içermeleri nedeniyle birçok canlının besin kaynağını oluştururlar. Birincil üretici olarak bilinen bu canlılar gruplara ayrılarak isimlendirilir. Denizel fitoplankton da en sık rastlanan grupsa Diatomophyceae grubudur. Denizel zooplankton olarak en çok bilinenler Holoplankton, Coelenteratlar, Copepoda, Cladocera'dır [3]. Fitoplanktonlar ise, güneşten CO₂, H₂O ve diğer besinlerden yüksek enerjili organik biyolojik oluşum sürecinin açıklanmasında ve fotosentez ile tüm deniz ortamlarında en önemli birincil üreticidir.

Plankton ve partiküler maddenin izotopik bileşimleri arasındaki ilişkiler incelendiğinde nehir sularının nehir kesiminde %70 kırıntılı-humus madde ve %30 planktonojenik maddeden oluşan materyali taşıdığı ve hidrokarbon gazlarının jeokimyasında karşılaştırılabilir konsantrasyonlarda metan (0,3-5 µl/L) ve doymamış olanlar da dahil olmak üzere daha ağır hidrokarbonlarla karakterize edilmektedir [4]. Birçok paleo-öşinografik çalışma, planktonik ve bentik örneklerden veya her ikisinden alınan foraminifer oksijen ve karbon kararlı izotop bileşimlerine (δ18O, δ13C) dayanmaktadır [5]. Foraminifer karbonat testlerinin δ13C değerlerinin metan sızıntısına diğer tortu parametrelerine göre çok daha duyarlı olduğu görülmektedir [6]. Kuzeydoğu Atlantik Okyanusu'ndaki Blake Ridge diapirinde gaz hidratlarının varlığı için, geç Holosen'de metan sızıntısının bentik foraminiferlerin ekolojisi ve jeokimyası üzerindeki etkisini incelemiştir [7]. Stratigrafideki anormal derecede düşük graph13C foraminifer değerleri genellikle paleo-metan sızıntısı aktivitelerini yansıtabilecek şekilde yorumlanmaktadır [8]. Metan zenginleşmesini [9] zooplankton kaynağı ile net bir şekilde açıklamaktadır. Metanojenler, [10] esasen zooplankton kaynaklıdır. Metanotrofik bakterilerin zooplankton için önemli bir besin kaynağı sağlayabileceğini ve metan oksidasyonunun, özellikle kış aylarında birçok gölde potansiyel olarak önemli bir bentik-pelajik karbon ve enerji bağlantısını temsil ettiğini göstermiştir [11]. Sudaki trofik etkileşimlerin metan biyojeokimyasal döngüsünü [12] önemli ölçüde etkilediği belirtilmiştir. Metanı yüzeye taşıyan fiziksel mekanizmaların (örneğin yukarı doğru kabarma) [13] aynı zamanda gelişmiş birincil üretimi ve CO₂ düşüşünü destekleyen besin açısından zenginleştirilmiş suyu da taşıyabileceğini düşünülmüştür. Açık

denizlerdeki metan sızıntısı alanları zamanla yoğunlukları dikkate alarak sera gazı yutakları olarak görülebilir. Planktonlar tarafından üretilen asetate kullanan potansiyel olarak metanojenik Archaea'yı barındırır ve bu durum metan üretimi için doğrudan bir substrat geçişini göstermektedir [14,15,16].

Bu çalışma kapsamında sediment yığılım alanlarının tespitine yönelik haritalama çalışmaları yapılmıştır. Bu amaç doğrultusunda öncelikli alanların haritalandırılması ve belirlenmesine yönelik çalışmalar Maden Tetkik Arama (MTA) Genel Müdürlüğünde sürdürülmüştür. Haritaların oluşturulmasında kullanılan verilerin analizleri detaylı açıklanmıştır.

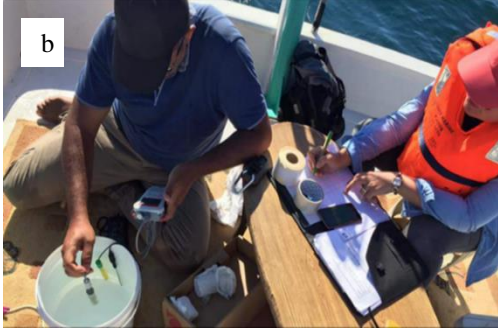
II. MATERYAL VE METOD

Bu çalışmada alan sınırlandırma çalışmaları yapılmak amacıyla uzaktan algılama haritaları için veriler yerinde yapılan ölçümler ile sağlanmıştır. Çalışma kapsamında Seki disk ve meteorolojik veriler ile doğru harita bulgularına erişim ve bu erişim ile sağlanan haritalama çalışmalarında deniz yüzeyinde olası plankton halkasının belirlenmesi amaçlanmıştır.

2.1. Seki Disk

Bu çalışmada literatürde yer aldığı üzere [17,18,19] ölçüm doğruluğu için güneş ışığı açısı, ölçüm zaman aralığı gibi ön tespitler yapılmıştır. Arazi çalışmasında ölçüm algoritması hazırlanarak ve tüm alanlarında aynı şekilde uygulanmıştır. Bu nedenle, güneşin mümkün olduğu kadar dik olduğu zamanlarda ölçüm alınmıştır. Sınırlı olan ölçüm zamanıyla programlamaya gidilmiş ve ölçüm vakti sürece dahil edilerek hesaplanmıştır. Ölçümlerin etkin kullanımını sağlamak için her biri farklı piksel alanına düşecek şekilde en az 500 m ara ile ölçüm alınmıştır. Piksel alanı, 14 banda sahip orta çözünürlüğü (görünür kızılötesi bölgede 15 metre/piksel, kısa dalga kızılötesi bölgesinde 30 metre/piksel ve termal kızılötesi bölgesinde 90 metre/piksel) kapsar. Tablo 1'de mevki baz alınarak alınan ölçümlerin her bir mevki alanından üç tanesine yer verilmiştir. Seki disk, MTA Genel Müdürlüğü Deniz Araştırmaları Dairesinden temin edilmiştir. Yerinde yapılan elektriksel kondüktivite (Ec), potansiyel hidrojen (pH), sıcaklık (t°C) ölçümlerde Dumlupınar Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü ekipmanları kullanılmıştır (Şekil 1).





Şekil 1. Arazi çalışmalarından ölçüm görüntüleri (a) seki disk, (b) Ec, pH, t°C

2.2. Meteorolojik Verilerin İncelenmesi

Açık deniz sediment yığılım alanları olarak görülen plankton halkalarının belirlenmesi amacıyla alınan haritaların tarihleri oldukça büyük öneme sahiptir. Doğru alan tespiti için binlerce sayıda var olan uzaktan algılama harita sayısını incelenebilir sayıda tutmak doğru tarihlere ait haritaların eldesi ile mümkündür. Bu çalışma kapsamında gerek bulanıklık haritaları gerek sıcaklık haritalarının tarihsel veri görünümünün elde edilmesi ile alan belirleme çalışmaları yapılmıştır. Başka bir deyişle, doğru yere bakabilmek için doğru görüntü tarihi belirlenmesi gerekmektedir.

Çalışma kapsamında sıcaklık ve bulanıklık haritalarının tarihsel görüntüsünün daha etkin seçimini sağlamak için meteorolojik verilere ihtiyaç duyulmuştur. Bulanıklık haritaları için yağış miktarları incelenmiş, sıcaklık haritalarının öncelikli tarihli olanlarının ve sıcaklık farkının en fazla olabileceği tarihlerin belirlenmesi amacıyla hava sıcaklığı verilerinin yüksek deniz suyunun ise düşük sıcaklıkta olduğu tarihler belirlenmeye çalışılmıştır. Doğal koşullarda ki bulanıklık sebebi olan yağışlı günlerin çıkartılması ile daha açık bulutsuz gözlemlene imkanı bulunan uygun tarihli haritaların incelenmesi için belirlemeler yapılmıştır. Tüm meteorolojik bulgular Rize ili için analiz edilmiştir.

2.3. Hamsi Populasyonunun İncelenmesi

Hamsi balığının biyolojik özelliği gereği zooplankton olarak hayata başlaması ve sayısının deniz suyu sıcaklığı ile ters orantılı bir dağılım göstermesi nedeniyle uzaktan algılama haritalarında sediment halkalarının tespitini kolaylaştırmaktadır. Plankton alanlarına ait deniz suyu sıcaklık verisine sahip olunamadığından deniz suyunun soğuk olduğu yılların tespiti için hamsi populasyonu incelenmiştir. Bu amaçla Karadeniz’de su soğuduğunda ortaya çıkan hamsi, deniz suyu çok soğuk olduğunda ise populasyon miktarında görülen artış haritalardaki halkaların tespitine olanak sağlamaktadır. Ayrıca sıcaklık haritalarındaki anomalinin yakalanması için deniz suyu sıcaklığı ile hava sıcaklığı farkının olabildiğince en fazla olması bu ilişkiyi daha anlamlı hale getirir. Hamsi populasyonunu incelerken, hamsi ile beslenen palamut ve lüfer miktarları araştırılmıştır. Hamsi

populasyonu çok olan yılların deniz suyu sıcaklığı düşüktür ve sıcaklık haritalarının daha etkin seçilimine olanak sağlanmaktadır. Düşük deniz suyu sıcaklıklarının belirlenmesi amacıyla su ürünleri avcılık verilerinden alınan [20], yüksek oranda olan 2007 ve 2016 yıllarına ait hamsi populasyonu haritalama çalışmaları kapsamında detaylı incelenmiştir.

2.4. Uzaktan Algılama Çalışmaları

Terra uydusu üzerine monte edilen ve 18 Aralık 1999 tarihinde uzaya fırlatılan ASTER (Gelişmiş uzay kaynaklı termal yayılma ve yansımaya radyometresi /The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) sensörü, birçok veri alanlarını içeren ve kızıl ötesi bölgesi olan; elektromanyetik spektrumun görünür yakın, kısa dalga ve termal kızılötesi alanlarından veri elde etmektedir. Görüntü genişliği 185 x 185 km olan Landsat TM’den elde edilen veriler jeoloji, oşinografi, arazi uygulamaları ve değişim belirlenmesi gibi mühendislik alanlarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Çalışma kapsamında Rize (İyidere)-Artvin (Hopa) boyunca ülkemiz münhasır deniz alanlarını kapsayan alan, uzaktan algılama verileri ve teknikleri kullanılarak incelenmiştir. Deniz yüzeyi sıcaklığını hesaplarken ASTER ve Landsat TM uydu verilerindeki termal kızılötesi bantlar, görünür yakın ve kısa dalga kızılötesi bantlardan ayrılarak, Universal Transverse Mercator (UTM), World Geodetic System 1984 (WGS 84) projeksiyon ve datum sistemine göre jeo-referanslandırılmıştır. Analizden önce bulutlu alanlar ve kara alanları uygun bir eşik değeri kullanılarak maskelenmiştir. Deniz yüzeyi sıcaklık radyans türünden dağılımının hesaplanması için, veri saklama kolaylığı açısından uydu tarafından DN (Sayısal Numara)’ye çevrilen sıcaklık değerleri birim çevirme katsayısı kullanılarak işleme koyulmuştur. Radyansa dönüştürülen ASTER Termal band değerlerinden ilk aşamada “parlaklık sıcaklık” değerleri elde edilmiş ve buradan “Çok-Banlı Deniz Yüzeyi Sıcaklığı - Multi-Channel Sea Surface Temperature (MCSST)” algoritması kullanılarak santrigrat derece cinsinden sıcaklık hesaplaması gerçekleştirilmiştir [21, 22]. Deniz yüzeyi sıcaklığı 1°C aralığında haritalanmıştır. Deniz yüzeyi sıcaklık dağılım haritalarında maviden kırmızıya geçen renk ölçeği, düşükten yükseğe doğru sıcaklık değerlerini temsil etmek üzere kullanılmıştır. Uydu verilerinden elde edilen değerlerin tarihsel bazda karşılaştırmasının yapılabilmesi amacıyla birbirleri ile çakışan tüm sıcaklık aralıklarında aynı renk tonu kullanılmıştır. Haritalama yapılırken karaya ait alanlar KYM/321 sahte renk kompoziti (false colour composite) ile görüntülenmiştir.

Deniz yüzeyi bulanıklığını hesaplarken ise ASTER ve Landsat TM uydu verilerindeki görünür yakın kızılötesi bantlar UTM, WGS 84 projeksiyon ve datum sistemine göre jeo-referanslandırılmıştır. Analizden önce bulutlu

ve karaya ait alanlar maskelenmiştir. Bulanıklık formülleri uygulanarak [21, 23] deniz yüzeyi bulanıklığı 1'er birim aralıklı olacak şekilde haritalanmıştır. Görüntüler seçilirken farklı yıllardaki görüntülerin mümkün olduğunca benzer hava koşulları ile uyumluluğu için [24] aynı aylarda seçilmesine özen gösterilmiştir.

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Çözünmüş mineralleri içeren besin ve protein kaynağı da olan denizel ortamların tabanları doğalgaz ve petrol ağırlıklı hidrokarbon yataklar ile gaz hidrat alanları ilk sırada olmak üzere masif sülfür yatakları içerebilir. Bu yatakların bulunması önce arama çalışmalarına [25] bağlıdır.

Bazı temel türler, metanı enerji ve karbon kaynağı olarak kullanan simbiyotik bakterilere sahiptir, ancak diğerleri (vestimentiferan solucanlar) enerji için sülfür kullanır. İç kıta sahanlığı habitatları, çok sayıda nehirde gelen besinlerle beslenir ve bu nedenle, kıyıya yakın biyota, nitrat açısından zenginleştirilmiş fitoplankton tarafından desteklenir. Örneğin, Meksika Körfezi ekosisteminin planktonunun üretkenliği ve tür bileşimi, kaynak su (Karayipler) ve buna eşlik eden fiziksel süreçler tarafından kontrol edilir ve yoğun deniz hayvanı popülasyonlarıyla çevrili petrol ve tuz göllerine ulaşmaktadır [26].

Önceki çalışmalarda Güneydoğu Karadeniz'in uydu gözlemlerinin sonuçları sunulmuştur [27]. Deniz tabanındaki hidrokarbonların doğal sızıntılarından kaynaklanan deniz yüzeyindeki petrol kirliliğinin izlenmesi için uzaktan algılama teknikleri kullanılmıştır. Uzaktan algılama çalışmalarında çok sensörlü yaklaşımın, verilerin daha kapsamlı bir şekilde yorumlanmasına katkıda bulunduğunu ve deniz yüzeyi kirliliği dağılımının daha iyi anlaşılmasına yardımcı olduğunu belirlemişlerdir. Aynı çalışmada yüksek çözünürlüklü uydu verileri kullanarak, yüzey petrol alanları mekansal ve zamansal değişkenliğine dair net bir resim ve coğrafi dağılımlarının bu bölgedeki doğal hidrokarbon sızıntılarının coğrafi konumları ile ilişkili olduğunu göstermişlerdir. Gerçek deniz tabanı kaynak konumunun kesin tahmini için SAR'ı kullandıklarını ve yüzey rüzgârlarının ve akımlarının, petrol yüzeylerinin deniz yüzeyine taşınması, yayılması, evrimi ve kalıcılığı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Dinamik ve dolaşım süreçlerinin ve doğal faktörlerin (mevcut meandering, vortikal aktivite ve rüzgar sıraları) etkilerinin, salınan petrolün seyri ve durumunu belirtmiştir. Karadeniz'in güneydoğusundaki deniz dibindeki doğal hidrokarbonların gösterdiği deniz yüzeyindeki petrol kirliliğinin ayrıntılı haritalarını bir araya getirmiş ve en ağır kirlilik bölgelerini özetlemişlerdir [27].

Fiziksel-kimyasal su ölçümlerinin sonuçları genellikle fitoplanktonların yaşama amaçlarına uygun değildir [28]. Karadeniz'de oksijenli yüzey sularının en fazla

150-200 metre derinliğe kadar uzandığı [29,30] ve derinlikle artan değişim gösteren hidrojen sülfür içermektedir [30]. Çünkü oksijenli sularla sülfürlü sulara arasındaki yoğunluk farkı, düşey karışımlar yoluyla derin sulara oksijen geçiş imkanı sunamaz. Oksijenli tabakanın alt sınırı lokal olarak değiştiğinden; sülfürlü anoksik suların başladığı derinlik de tabii olarak bölgesel olarak farklılık gösterir. Bu sülfürlü tabakanın başlama sınırı siklonik döngü bölgelerinde genelde 80 metre ile başlar ve 100 metreye ulaşır. Derinlere doğru inildikçe hidrojen sülfür konsantrasyonu düzenli bir artış gösterdiği daha önce yapılan hassas ölçümlerde görülmüştür [31].

Hamsi balığı Karadeniz'de su soğuduğunda ortaya çıkar. Deniz suyu çok soğuk olduğunda ise popülasyon miktarını artırır. Hamsi popülasyonunu incelerken, hamsi ile beslenen palamut ve lüfer miktarlarını da incelemek gerekir. Popülasyonu çok olan yıllar deniz suyu sıcaklığı düşüktür ve sıcaklık haritalarının daha etkin seçimini sağlamak için bu düşük deniz su sıcaklıkları belirlenmesi amacıyla TÜİK hamsi popülasyonu incelenmiştir (Tablo 1). 2007 ve 2016 yıllarını kapsayan veri çizelgesi hamsi popülasyonu avcılardan 30 katına ulaşan popülasyonda olduğu belirlenmiştir. Yapılan inceleme sonrasında uzaktan algılama haritalarında belli periyod pikleri olan; 2000, 2007, 2011 ve 2015 yılları uzaktan algılama görüntülerinin öncelikli incelenmiştir. Fitoplankton ve zooplankton yüzeyde spesifik dağılım göstermiştir ve fitoplankton için termoklin tabakası oluşturmuştur [32]. Birincil fitoplankton üretimini etkileyen faktörler ışık, sıcaklık, tuzluluk, besinler, küçük besinler ve organik gereksinimler olarak açıklamaktadır [33]. Yaşamlarının ilk evresini plankton olarak sürdüren organizmalara meroplankton olarak bilinmekte, bu grupta yer alan balık, yumurta ve lavralar da ihtiyoplankton olarak adlandırılmaktadır [34, 35]. Hamsiler, plankton olarak yaşamlarına başlamaları hem de plankton ile beslenmeleri oldukça ilginç olup, Karadeniz hamsisi yumurtalarını beşinci ila onuncu ay arasında döker. Bu nedenle Mayıs, Haziran, Temmuz, Ağustos, Eylül, Ekim ayları plankton halkalarını arama çalışmalarında incelenecek görüntü aylarını oluşturmaktadır.

Tablo 1. 2007 ve 2016 yılları oldukça hamsi popülasyonu (ton) ([20]'den oluşturulmuştur)

| Yıl | Hamsi | Palamut | Lüfer | Toplam Yiyici (Palamut+ Lüfer) | Hamsi / (Palamut +Lüfer) |
|------|--------|---------|-------|--------------------------------|--------------------------|
| 2000 | 280000 | 12000 | 4250 | 16250 | 17.23 |
| 2001 | 320000 | 13460 | 13060 | 26520 | 12.07 |
| 2002 | 373000 | 6286 | 25000 | 31286 | 11.92 |
| 2003 | 295000 | 6000 | 22000 | 28000 | 10.54 |
| 2004 | 340000 | 5701 | 19901 | 25602 | 13.28 |
| 2005 | 138569 | 70797 | 18357 | 89154 | 1.55 |
| 2006 | 270000 | 26690 | 8399 | 35089 | 7.69 |
| 2007 | 385000 | 5965 | 6858 | 12823 | 30.02 |

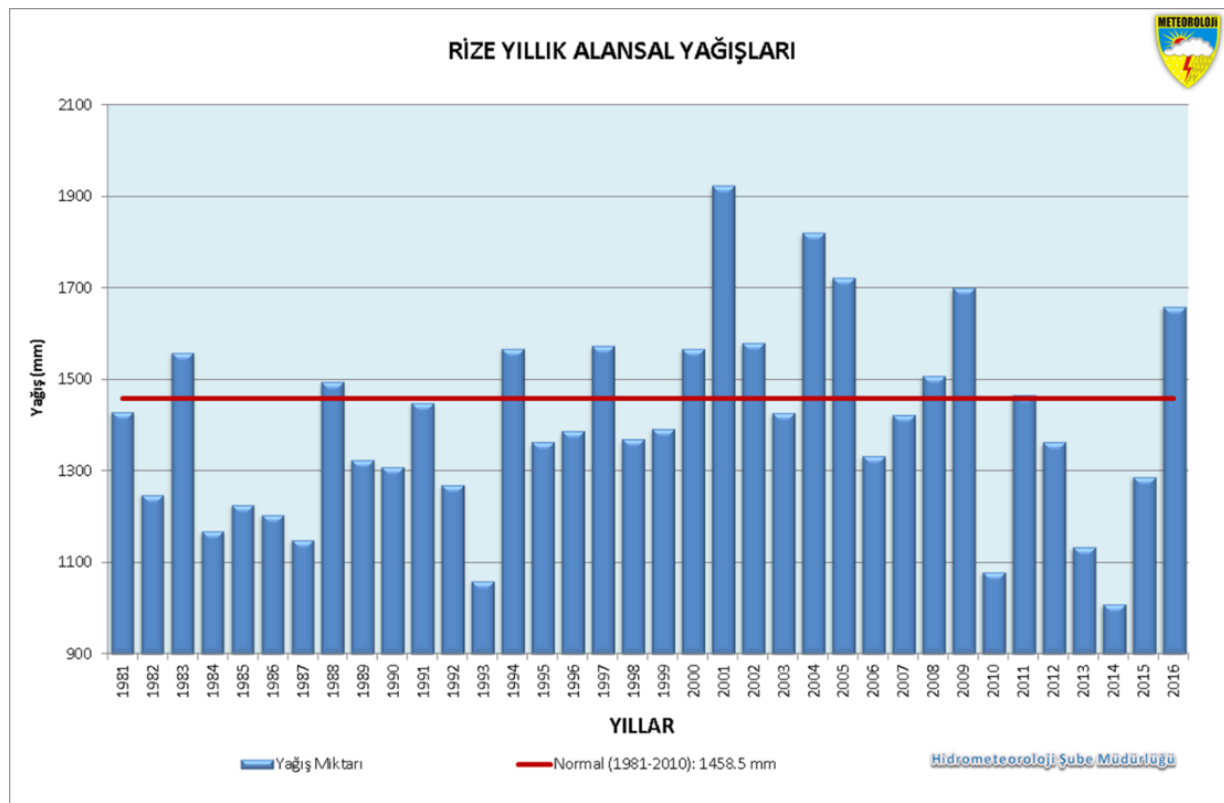
| | | | | | | |
|------|--------|-------|------|-------|-------|--|
| 2008 | 251675 | 6448 | 4048 | 10496 | 23.98 | $D = f * (B2/B1)$ (1) Eşitlikte, D= Bulanıklık, B1= Bant1, B2= Bant2, ifade eder ve sabit sayı olan f: 17.3965 olarak alınmıştır. |
| 2009 | 204699 | 7036 | 5999 | 13035 | 15.70 | |
| 2010 | 229023 | 9401 | 4744 | 14145 | 16.19 | |
| 2011 | 228491 | 10019 | 3122 | 13141 | 17.39 | |
| 2012 | 163982 | 35764 | 7390 | 43154 | 3.80 | |
| 2013 | 179615 | 13158 | 5225 | 18383 | 9.77 | |
| 2014 | 96440 | 19032 | 8356 | 27388 | 3.52 | |
| 2015 | 193492 | 4573 | 4136 | 8709 | 22.22 | |
| 2016 | 102595 | 39460 | 9574 | 49034 | 2.09 | |

Arazi çalışmalarında seki disk ve yerinde yapılan yüze yakın ölçümün aynı mevkii alanı içerisinde kalan üç tanesi olacak şekilde bir kısmı Tablo 2’de verilmiştir. Uzaktan algılama merkezinde ASTER verisiyle su bulanıklığı hesaplanır. Literatürde pek çok türde formüle rastlamak mümkündür. Her biri farklı parametreler kullanılarak üretilebilir. yapılan arazi çalışmalarından elde edilen secci disk verileri bulanık haritaları için kullanılarak hesaplamalar doğrultusunda Eşitlik (1) de verilmiştir;

Rize’nin yıllık ve aylık olmak üzere periyodik yağış ve sıcaklık analizleri yapılarak iklim süreci belirlenerek çalışmalar sürdürülmüştür. Rize jeomorfolojik özellikleri nedeniyle diğer illerimizin aksine nisan mayıs ayında en az yağış almaktadır. Bu nedenle bu aylar bulanıklık görüntü incelemede yer almıştır. Ayrıca, Şekil 2’de görüldüğü üzere 2006, 2010, 2013, 2014 ve 2015 en az yağış alınan yıllardır. Yağış tablosu (Tablo 3) incelendiğinde, Mart ve Nisan en az yağışlı aylardır.

Tablo 2. Seki disk ölçümü alınan alanların değerleri.

| Mevkii | Ölçüm Tarihi | Ölçüm Saati | Koordinat Bilgisi | pH | Ec | T°C | Seki disk | |
|--------------|--------------|-------------|------------------------------|------|-------|-------|-----------|-----------|
| | | | | | | | Beyaz (m) | Siyah (m) |
| İyidere 1 | 08.10.2017 | 09:25 | 41 01 35 9 N 40 21 33 4 E | 8.34 | 24.50 | 29.00 | 1.275 | 2.516 |
| İyidere 4 | 08.10.2017 | 10:40 | 41 3 01 6 N 40 21 077 E | 9.74 | 25.10 | 30.80 | 8.05 | 1.96 |
| İyidere 6 | 08.09.2017 | 11:05 | 41 04 011 N 40 20 636 E | 8.45 | 25.1 | 29.6 | 9.60 | 2.73 |
| Derepazarı 1 | 08.09.2017 | 11:25 | 41 05 497 N 40 22 987 E | 8.49 | 25.2 | 30.1 | 9.60 | 2.51 |
| Derepazarı 3 | 08.09.2017 | 12:20 | 41 04 518 N 40 23 792 E | 8.42 | 25 | 30.7 | 7.76 | 2.3 |
| Derepazarı 5 | 08.09.2017 | 12:50 | 41 03 396 N 40 24 555 E | 8.46 | 24.8 | 30.7 | 5.74 | 1.86 |
| Çayeli 2 | 09.10.2017 | 11:10 | 41 07 938 N 40 41 042 E | 6.1 | 25.2 | 30.5 | 5.575 | 2.5 |
| Çayeli 5 | 09.10.2017 | 11:45 | 41 06 261 N 40 43 099 E | 6.11 | 25.10 | 30.00 | 8.84 | 3.18 |
| Çayeli 6 | 09.10.2017 | 11:50 | 41 05 730 N 40 43 389 E | 6.11 | 25.10 | 28.70 | 5.82 | 2.19 |
| Rize 1 | 09.10.2017 | 08:45 | 41 02 805 N 40 31 366 E | 8.37 | 24.80 | 30.30 | 5.00 | 2.69 |
| Rize 2 | 09.10.2017 | 08:50 | 41 03 31 N 40 31 234 E | 8.37 | 24.90 | 30.50 | 9.00 | 3.33 |
| Rize 6 | 09.10.2017 | 09:27 | 41 05 356 N 40 31 027 E | 8.35 | 24.90 | 30.00 | 7.50 | 1.65 |
| Hopa 1 | 10.10.2017 | 09:35 | 41 25 385 N 41 25 551 E | 6.20 | 25.30 | 30.00 | 6.37 | 3.20 |
| Hopa 3 | 10.10.2017 | 09:55 | 41 26 264 N 41 23 753 E | 6.23 | 25.60 | 30.00 | 6.00 | 3.00 |
| Hopa 6 | 10.10.2017 | 10:27 | 41 27 890 N 41 22 426 E | 6.28 | 25.70 | 30.30 | 15.96 | 4.435 |
| Arhavi 3 | 10.09.2017 | 13:00 | 41 23 322 N 41 138 45 E | 6.65 | 26.60 | 30.90 | 17.36 | 5.50 |
| Arhavi 9 | 10.09.2017 | 14:30 | 41 18 741 N 41 10 111 E | 6.67 | 26.90 | 30.40 | 7.96 | 2.46 |
| Arhavi 11 | 10.09.2017 | 14:45 | 41 17 641 N 41 10 455 E | 6.67 | 26.80 | 29.90 | 9.01 | 2.755 |
| Pazar 3 | 09.09.2017 | 14:30 | 41 13 557 N 40 51 609 E | 6.20 | 25.60 | 30.80 | 12.10 | 2.5 |
| Pazar 5 | 09.09.2017 | 14:50 | 41 12 490 N 40 53 061 E | 6.18 | 25.80 | 31.50 | 9.00 | 3.00 |
| Pazar 7 | 09.09.2017 | 15:20 | 41 11 159 N 40 54 858 E | 6.20 | 25.00 | 29.50 | 7.30 | 2.43 |



Şekil 2. Rize İli Yıllık Yağışları [36]

Tablo 3. Rize ili aylık yağış tablosu [37]

| | Ay (Ölçüm Periyodu 1928 - 2020) | | | | | | | | | | | |
|---|---------------------------------|-------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | I. | II. | III. | IV. | V. | VI. | VII. | VIII. | IX. | X. | XI. | XII. |
| <i>Ortalama Sıcaklık (°C)</i> | 6.80 | 6.80 | 8.10 | 11.6 | 16.0 | 20.30 | 22.90 | 23.20 | 20.30 | 16.40 | 12.30 | 8.80 |
| <i>Ortalama En Yüksek Sıcaklık (°C)</i> | 10.60 | 10.70 | 11.90 | 15.4 | 19.4 | 23.50 | 25.90 | 26.50 | 24.00 | 20.40 | 16.40 | 12.80 |
| <i>Ortalama En Düşük Sıcaklık (°C)</i> | 3.80 | 3.60 | 4.90 | 8.30 | 12.7 | 16.70 | 19.60 | 10.00 | 16.90 | 13.10 | 9.10 | 5.70 |
| <i>Ortalama Güneşlenme Süresi (saat)</i> | 2.20 | 3.10 | 3.60 | 4.60 | 5.60 | 6.60 | 5.40 | 5.20 | 5.00 | 4.20 | 3.00 | 2.20 |
| <i>Ortalama Yağışlı Gün Sayısı</i> | 15.80 | 14.70 | 16.30 | 15.3 | 15.7 | 15.20 | 15.10 | 15.40 | 15.40 | 15.60 | 14.30 | 15.10 |
| <i>Aylık Toplam Yağış Miktarı Ortalaması (mm)</i> | 232.6 | 187.2 | 159.4 | 96.0 | 96.3 | 134.7 | 151.6 | 196.9 | 254.8 | 292.3 | 255.2 | 244.5 |
| <i>En Yüksek Sıcaklık (°C)</i> | 24.00 | 28.10 | 32.60 | 35.8 | 38.2 | 36.10 | 35.40 | 35.60 | 35.00 | 33.80 | 30.40 | 26.70 |

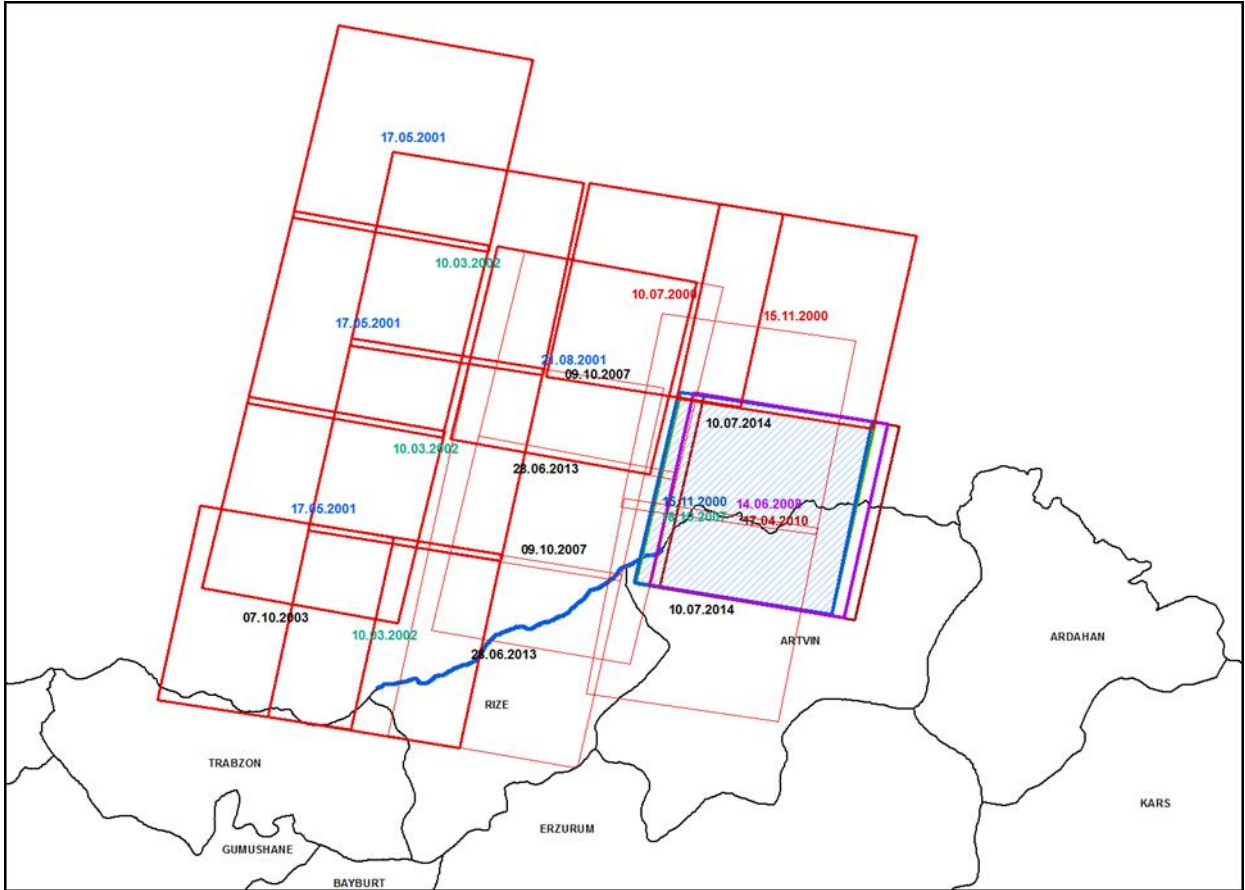
İncelenen tarihlerde veya arşivde bulunamadığı takdirde bu tarihlere yakın tarihlerdeki, belirtilen deniz alanına ait ASTER ve Landsat TM (Tematik Haritalama/Thematic Mapper) uydu görüntüleri (Tablo 4) ERDAS IMAGINE v9.1 ve PCI Geomatica 2017 yazılımları kullanılarak analiz edilmiş, ArcMap v9.2 yazılımı ile 1/100.000 ölçeğinde haritalanmıştır. Çalışma alanını kapsayan ASTER uydu görüntülerinin coğrafi konum ve tarihleri Şekil 3'te Landsat 5 TM uydu görüntülerinin coğrafi konum ve tarihleri ise Şekil 4'te gösterilmiştir.

ASTER ve Landsat TM uydu verileri analizlerinin ve gerekli algoritmaların uygulanmasının ardından deniz yüzeyi sıcaklık ve deniz yüzeyi bulanıklık dağılım haritaları elde edilmiştir. Uzaktan algılama analizleri neticesinde elde edilen sıcaklık ve bulanıklık dağılım haritalarında bazı noktalar dikkat çekmiştir. Bunlardan birisi, bulutlu alanların maskelenmesine karşın bulut ve

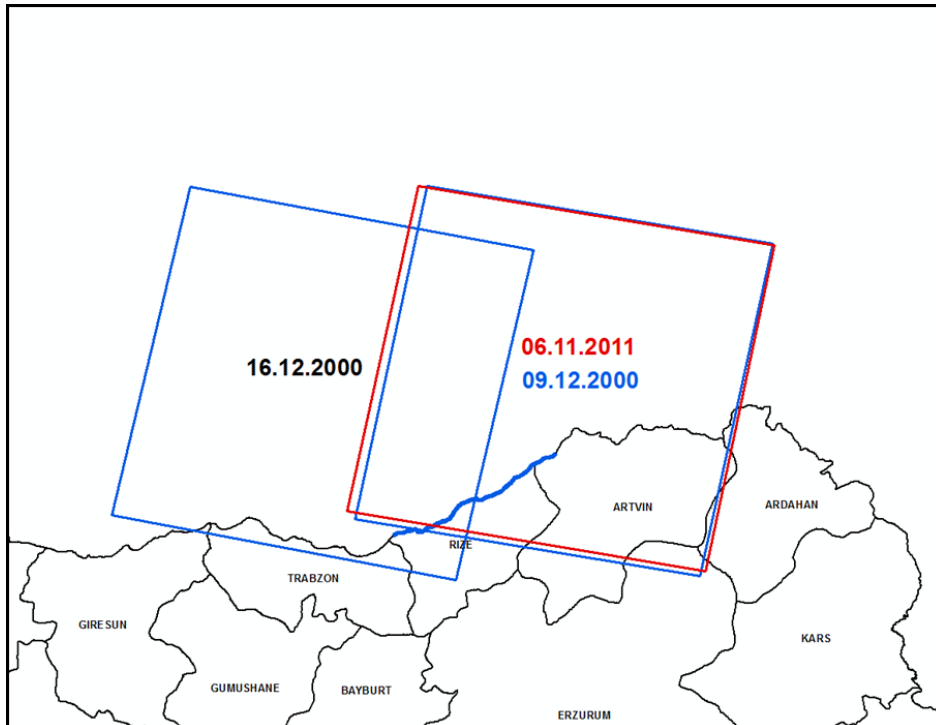
pusa bağlı değişimlerin bazı görüntülere yansdığı gözlemlenmiştir. Yani bulut maskesinin yoğun bulut kütlesi dışında kalan daha az yoğun, sis veya pus gibi öğeleri maskeleyemediği gözlemlenmiştir. Bir diğer nokta, bazı görüntülerin alındığı sırada alanda bulunan gemilerin deniz yüzeyi sıcaklık anomalisi yansması oluşturmaktadır. Bir başka nokta da elde edilen haritalarda akarsuyun denize döküldüğü alanlarda sıcaklık ve bulanıklık anomalilerinin görülmesidir ki; bu yer yüzeyinden gelen sular ile deniz suyu sıcaklığının ve yoğunluğunun farklı olmasından kaynaklanan doğal bir durumdur. ASTER ve Landsat TM uydu verilerinden elde edilen sıcaklık ve bulanıklık değerleri yalnızca deniz yüzeyi ile ilgili irdelenmiştir. Plankton halkalarının belirlenmesi için görüntülerinin incelendiği haritalardan bazıları olan Şekil 5 ve Şekil 6 aşağıda yer almaktadır.

Tablo 4. Rize (İyidere)-Artvin (Hopa) çalışma alanına ait ASTER ve Landsat TM uydu verileri

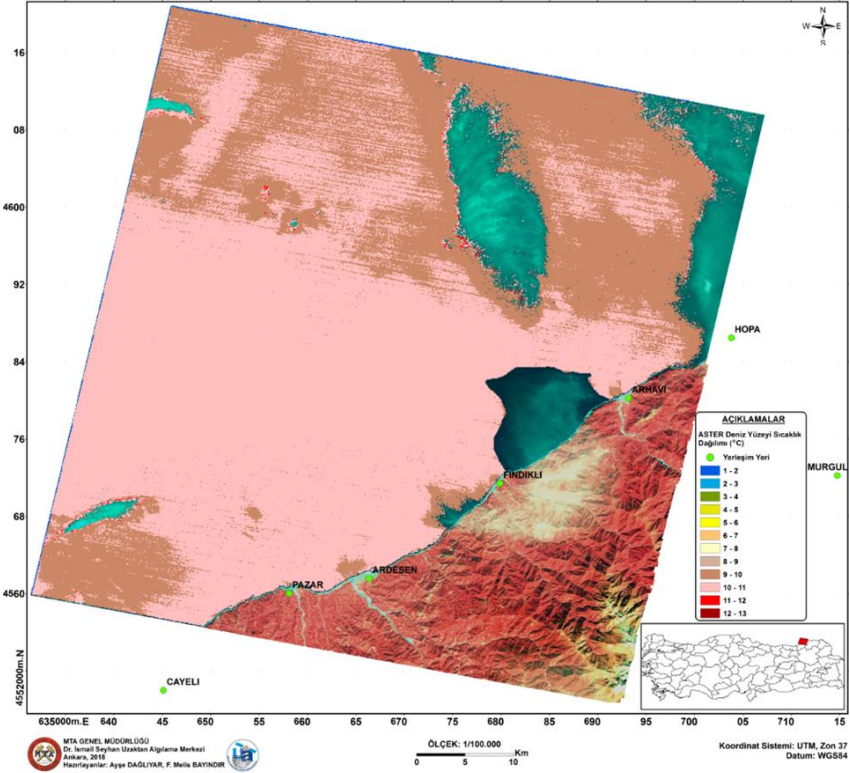
| Görüntü Adı | Granul ID- Path/Row | Tarih |
|------------------|---------------------|------------|
| ASTER | ASTB000710082834 | 10.07.2000 |
| | ASTB001115082646 | 15.11.2000 |
| | ASTB001115082637 | 15.11.2000 |
| | ASTB140710080734 | 10.07.2014 |
| | ASTB010517082905 | 17.05.2001 |
| | ASTB010517082856 | 17.05.2001 |
| | ASTB010517082914 | 17.05.2001 |
| | ASTB010821082656 | 21.08.2001 |
| | ASTB011102081755 | 02.11.2001 |
| | ASTB011102081804 | 02.11.2001 |
| | ASTB011102081813 | 02.11.2001 |
| | ASTB020310081458 | 10.03.2002 |
| | ASTB020310081440 | 10.03.2002 |
| | ASTB020310081449 | 10.03.2002 |
| | ASTB031007081327 | 07.10.2003 |
| | ASTB030608081938 | 08.06.2003 |
| | ASTB030608081946 | 08.06.2003 |
| | ASTB030608081955 | 08.06.2003 |
| | ASTB071009081941 | 09.10.2007 |
| | ASTB071009081932 | 09.10.2007 |
| ASTB071018081323 | 18.10.2007 | |
| ASTB080614081350 | 14.06.2008 | |
| ASTB100417081326 | 17.04.2010 | |
| ASTB130628081348 | 28.06.2013 | |
| ASTB130628081340 | 28.06.2013 | |
| ASTB140710080743 | 10.07.2014 | |
| LANDSAT 5 TM | 172/31 | 09.12.2000 |
| | 172/31 | 06.11.2011 |
| | 173/31 | 16.12.2000 |



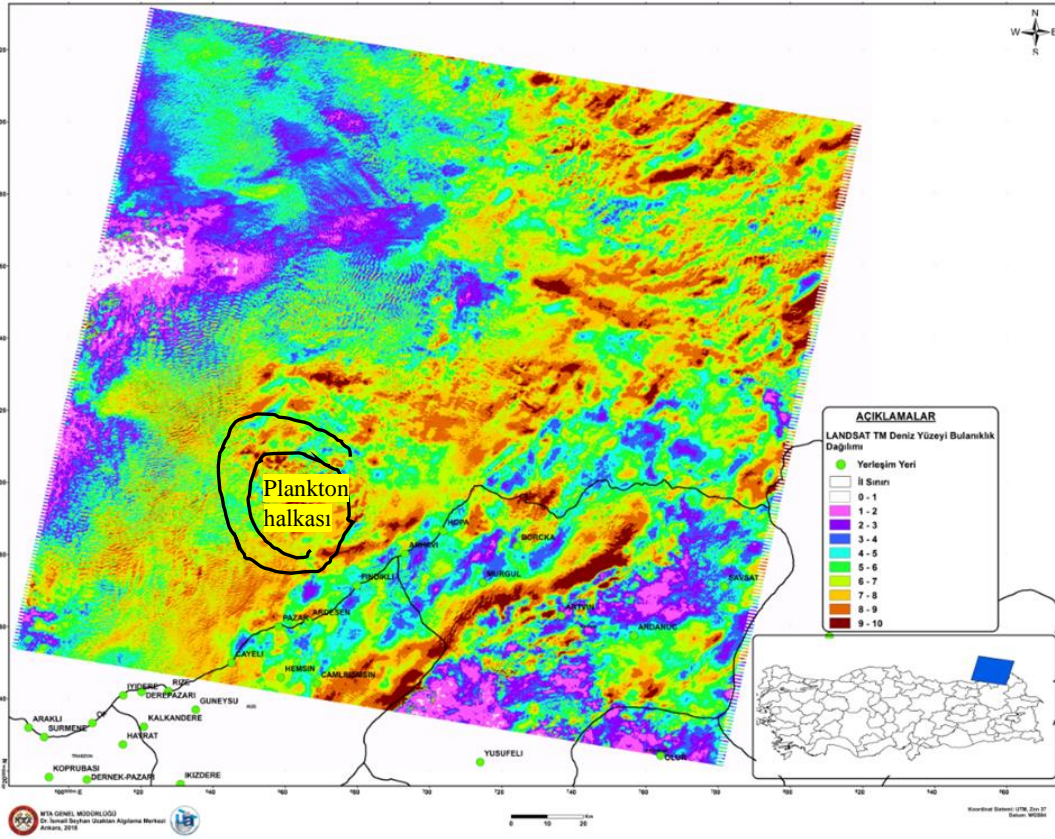
Şekil 3. Çalışma alanını kapsayan ASTER uydu görüntülerinin coğrafi konum ve tarihleri



Şekil 4. Çalışma alanını kapsayan Landsat TM uydu görüntülerinin coğrafi konum ve tarihleri



Şekil 5. Çalışma kapsamında hazırlanan deniz yüzeyi sıcaklık dağılım haritalarından bir örnek (ASTB071009081941 Granul ID'li 09.10.2007 tarihli uydu görüntüsünden).



Şekil 6. Çalışma kapsamında hazırlanan deniz yüzeyi bulanıklık dağılım haritalarından bir örnek (172/31 Granul ID'li, 06.11.2011 tarihli Landsat TM uydu görüntüsünden)

Yapılan yerinde ölçümler ile belirlenen bulanıklık katsayısı kullanılarak bulanıklık haritaları, meteorolojik veriler ile değerlendirilen farklı tarihlere ait sıcaklık ve bulanık haritalarında tekrarlanan plankton halkaları incelenmiştir. İyidere-Hopa arası Doğu Karadeniz deniz alanında, plankton yığılımlarının sürekliliği tespit edilen sekiz alan öncelikli çalışma alanı olarak belirlenmiştir.

3.1. Sonuç ve Değerlendirmeler

Plankton incelemesinde yola çıkarak olası hidrokarbon alanlarının tespitine yönelik hazırlanan bu çalışmada, incelenen meteorolojik veriler, hamsi popülasyonu, yerinde seki disk ölçümleri ve elde edilen bulgular ile sıcaklık ve bulanıklık haritalarında gereken sabitler belirlenmiştir. Uzaktan algılama veri haritalarının oluşturularak kendi hareket mekanizması olmayan planktonların çevresel etmenlerle oluşturduğu sediment halkaları ile sediment yığılım alanlarının tespitine yönelik bulgular değerlendirilmiştir. Yüksek metan yığılım alanlarının oluşturacağı olası maden alanları hakkında öngörü sunulmuştur.

Madencilik faaliyetlerinde arama çalışmaları doğası gereği yüksek bütçe gerekliliği nedeniyle çalışma alanının bilimsel veriler ile daraltılmasına başka bir deyişle öncelikli alan çalışmalarına ihtiyaç duyar. Plankton halkaları sıcaklık ve bulanıklık haritalarında tespit edilerek Doğu Karadeniz deniz alanında sekiz alan öncelikli alan tespiti olarak değerlendirilmiştir. Bu çalışma kapsamında tespit edilen alanlar yaklaşık 20 000 km² deniz alanını kaplayan alan içerisinde öncelikli çalışılması (jeofizik, sondaj vb.) gereken alanlardır. Sediment yığılımı gerçekleşen alanların tespiti plankton izleri ile gerçekleştirilmiştir. Her sediman yığılımından potansiyel maden sahaları doğmasa da sediman maden yataklarının oluşumu için açık deniz sediment yığılım alanlarının tespiti şarttır. Günümüz olanakları ile bu bilgilerin değerlendirmelerinin yapılması kaynak arama çalışmaları için oldukça önemlidir. Bu ön bulgular karınca yuvalarında ki yığılı toprakların kuzeyi göstermesi gibi maden aramacılığında da bakılacak yönün belirlenmesine katkı sunmaktadır. Çalışma kapsamında belirlenen açık deniz alanları ile yeni hidrokarbon sahaları için öncelikli etüt alanlarının varlığı ve bu alanların ayrıntılı çalışmalar kapsamında değerlendirilmesi gerekliliği sonucuna ulaşılmıştır.

3.1.1. Teşekkür bölümü

Bu çalışma, MTA Genel Müdürlüğü tarafından 2018-38-14-04 no.lu ‘Doğu Karadeniz Gaz Hidratlarının Oluşum Mekanizmasının Belirlenmesi ve Çevresel Etkilerinin Araştırılması’ projesi kapsamında desteklenmiş olup proje raporundan üretilmiştir. Yerinde yapılan secchi disk ölçümlerinde yardımlarını gördüğüm Sayın Prof. Dr. Zeynal Abiddin Ergüler’e, uzaktan algılama haritalarının temini için Sayın Ayşe Dağlıyar ve Sayın Melis Bayındır’a çok teşekkür ederim.

KAYNAKLAR

- [1] Koray, T. (2002). Denizel Fitoplanktonlar. Ege Üniversitesi Su Ürünleri Fakültesi Yayınları No:32, 228 pp. İzmir.
- [2] Şahin, Y. ve Akyurt, İ. (2010). Planktonlar ve Fotobiyoreaktörler. Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi. Volume: 1 Number: 2. 83-92.
- [3] Cirik, S. ve Gökpinar, Ş. (1993). Plankton Bilgisi ve Kültürü. Ege Su Ürünleri Fakültesi Yayınları No:47. 274.
- [4] Galimov, E.M., Kodina, L.A., Stepanets, O.V. et al. (2006). Biogeochemistry of the Russian Arctic. Kara Sea: Research results under the SIRRO project, 1995–2003. *Geochem. Int.* 44. 1053–1104.
- [5] Dessandier, PA., Borrelli, C., Yao, H. et al. (2020). Foraminiferal $\delta^{18}O$ reveals gas hydrate dissociation in Arctic and North Atlantic ocean sediments. *Geo-Mar Lett* 40. 507–523.
- [6] Panieri G, Graves C ve James R. (2016). Paleomethane emissions recorded in foraminifera near the landward limit of the gas hydrate stability zone offshore western Svalbard . *Geochemistry Geophysics Geosystems*. 17(2):521-537.
- [7] Panieri, G et al. (2014). Late Holocene Foraminifera Of Blake Ridge Diapir: Assemblage Variation And Stable-Isotope Record In Gas-Hydrate Bearing Sediments. *Marine Geology* 353. 99-107.
- [8] Wan, S. et all. (2018). Foraminifera From Gas Hydrate-Bearing Sediments Of The Northeastern South China Sea: Proxy Evaluation And Application For Methane Release Activity. *Journal of Asian Earth Sciences* 168. 125-136.
- [9] Schmale, O., Wäge, J., Mohrholz, V., Wasmund, N., Gräwe, U., Rehder, G., Labrenz, M. ve Loick Wilde, N. (2018). The contribution of zooplankton to methane supersaturation in the oxygenated upper waters of the central Baltic Sea. *Limnology and Oceanography*. 63 (1).412-430.
- [10] Traganza, E.D., J.W. Swinnerton ve Cheek C.H. (1979). Methane supersaturation and ATP-zooplankton blooms in near-surface waters of the Western Mediterranean and the subtropical North Atlantic Ocean. *Deep-Sea Res.* 23A, 1237-1245.
- [11] Bastviken, D., Ejlertsson, J., Sundh, I. ve Tranvik, L. (2003). Methane as a Source of Carbon and Energy for Lake Pelagic Food Webs. *Ecology*. 84. 4. 969-981.
- [12] Devlin, S. P. et al. (2015). Top consumer abundance influences lake methane efflux. *Nat. Commun.* 6:8787.
- [13] Pohlman, J.W., Greinert, J., Ruppel, C., Silyakova, A., Vielstädte, L., Casso, M., Mienert, J. ve Bünz, S. (2017). Enhanced CO₂ uptake at a shallow Arctic Ocean seep field

- overwhelms the positive warming potential of emitted methane. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114 (21). 5355-5360.
- [14] Mau, S. Tu, T-H. Becker, M. dos Santos Ferreira, C. Chen, J-N. Lin, L-H. Wang, P-L. Lin S. ve Bohrmann G. (2020). Methane Seeps and Independent Methane Plumes in the South China Sea Offshore Taiwan. *Front. Mar. Sci.* 7:543.
- [15] Grossart, H.-P., Frindte, K., Dziallas, C., Eckert, W. ve Tang, K. W. (2011). Microbial methane production in oxygenated water column of an oligotrophic lake. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 108. 19657–19661.
- [16] Bogard, M. J., Del Giorgio, P. A., Boutet, L., Chaves, M. C. G., Prairie, Y. T., Merante, A., et al. (2014). Oxic water column methanogenesis as a major component of aquatic CH₄ fluxes. *Nat. Commun.* 5:5350.
- [17] U.S. Environmental Protection Agency. (1993). *Methods for the determination of inorganic substances in environmental samples: Cincinnati, OH, U.S. Environmental Protection Agency EPA/600/R-93/100.* 178 p. USEPA 180.1.
- [18] International Organization for Standardization. (1999). *Water quality — Determination of turbidity: Geneva, Switzerland, International Organization for Standardization. ISO 7027.* 10.
- [19] ASTM International. (2003). D6855-03 Standard test method for determination of turbidity below 5 NTU in static mode: ASTM International, Annual Book of Standards, Water and Environmental Technology, 2003, vol. 11.01. West Conshohocken. Pennsylvania. 13.
- [20] TÜİK. (2017). Su ürünleri üretim miktarları. Türkiye İstatistik Kurumu. Alınılma adresi: <http://www.tuik.gov.tr/UstMenu.do?metod=temelist> (20.04.2017).
- [21] Tachikawa, T. (2005). *Mapping of Water Turbidity and Chlorophyll – A Concentration & Mapping of Water Surface Temperature Lecture Notes, Earth Remote Sensing Data Analysis Center.*
- [22] Xing, Q. Chen, C.Q. ve Shi, P. (2006). Method of integrating Landsat-5 and Landsat-7 data to retrieve sea surface temperature in coastal waters on the basis of local empirical algorithm. *Ocean Sci. J.* 41. 97–104.
- [23] Mukherjee, S., Joshi, P.K., Mukherjee, S., Ghosh, A., Grag, R.D. ve Mukhopadhyay, A. (2013). Evaluation of vertical accuracy of open source Digital Elevation Model (DEM). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation.* 21. 205-217.
- [24] Özçalık, H. Torun, A., T. ve Bilgilioğlu, S., S. (2020). Landsat uydu görüntüleri kullanılarak Mogan Gölü'nün su yüzeyi ve arazi örtü değişiminin belirlenmesi. *Türkiye Uzaktan Algılama Dergisi* 2(2); 77-84.
- [25] Ehsani, A. ve Sivrikaya O. (2018). Okyanus ve Deniz Altı Madenciliğinin Kısa Tarihçesi. *Karaelmas Fen ve Müh. Derg.* 8(1):396-402.
- [26] Rowe, G. T. (2017). Offshore Plankton and Benthos of the Gulf of Mexico. *Habitats and Biota of the Gulf of Mexico: Before the Deepwater Horizon Oil Spill.* 641-767.
- [27] Marina, I. ve M. Lavrova, O., Y. (2017). Multi-sensor satellite survey of natural oil slicks in the southeastern Black Sea, *Proc. SPIE* 10422, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions, 1042215.
- [28] Aryawati, R. ve Thoha, H. (2011). Hubungan Kandungan Klorofil-A Dan Kelimpahan Fitoplankton Di Perairan Berau Kalimantan Timur. *Maspari Journal.* 2. 89-94.
- [29] Sorokin, Yu.I. (1983). The Black Sea. In: Ketchum, P.H. (Ed.), *Ecosystems of the World, Ciltl 26. Estuaries and Enclosed Seas.* Elsevier, Amsterdam. 253-291.
- [30] Codispoti, L.A., Friederich, G.E., Murray, J.W. ve Sakamoto, C. M. (1991). Chemical variability in the Black Sea: implications of continuous vertical profiles that penetrated the oxic/anoxic interface. *Deep-Sea Res I.* 38. Suppl.2. 691-S710.
- [31] Sorokin, Yu.I. (2002). *The Black Sea ecology and oceanography.* Backhuys Publishers. Leiden. 875.,
- [32] Pratiwi, N.T. M., Wulandari, D.Y., Ayu, I.P. ve Iswantari, A. (2017). Diversity and Spatial Distribution of Plankton in Connected Waters of Bali Strait, Between Eastern Part of Java and Western Part of Bali Island. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 54.
- [33] Dragsted, L.O. Vanhaecke, L. Brennan, L. Noerma, S. Nowrotek, M. ve Wright, A. L. (2020). *Advances in Marine Plankton. Scientific Research An academic Publicer Books.*
- [34] Konsulov, A. ve Kamburska, L. (1998). Black Sea Zooplankton Structural Dynamic and Variability off the Bulgarian Black Sea Coast During 1991-1995. In: *NATO TUBlack Sea Project: Ecosystem Modelling as a Management Tool for the Black Sea, Symposium on Scientific Results, L. Ivanov and T. Oguz (eds.), Kluwer Academic Publishers.* 281-292.
- [35] Satılmış, H.H. ve Bat, L. (2010). *Yunus Araştırma Bülteni.* 10:2.
- [36] MGM. (2017). *Meteoroloji Genel Müdürlüğü, İstasyon Bilgileri Veritabanı.*
- [37] MGM. (2020). *Meteoroloji Genel Müdürlüğü, İstasyon Bilgileri Veritabanı.*

Determination of the Significance of the Most Effective Nutrients on Lipase Production from *Cryptococcus albidus* D24

Cryptococcus albidus D24'ten Lipaz Üretimi Üzerindeki En Etkili Besin Maddelerinin Öneminin Belirlenmesi

Abdussamed URAS¹ , Orkun PİNAR¹ , Dilek KAZAN¹ 

¹Marmara University, Faculty of Engineering, Department of Bioengineering, 34854, Maltepe, Istanbul, Turkey.

Abstract

In this study, the optimization of the medium components used for the production of lipase enzyme from *Cryptococcus albidus* D24 was performed using the Plackett-Burman statistical design method (PBD), and the most important nutrients affecting the production of lipase enzyme from D24 strain were determined as the first step. According to PBD, the highest lipase activity (19.34 U/ml/min) was obtained with medium including Tween 80 (X2) 2.5% (v/v), and (g/L) Peptone (X4) 8.0, Yeast Extract (X6) 7.5, Beef Extract (X7) 7.5, Malt Extract (X8) 7.5, NH₄Cl (X9) 6.0, NaNO₃ (X10) 1.5, (NH₄)NO₃ (X12) 6.0, (NH₄)HCO₃(X13) 6.0, MgSO₄.7H₂O (X15) 1.0, and KH₂PO₄ (X16) 2.0 at the end of 144 h cultivation. Regarding the concentration effect (CE) values obtained from PBD, NH₄Cl (CE=7.1587), olive oil (CE=3.5544), (NH₄)HCO₃ (CE=3.0747), and tryptone (CE=2.1427) were evaluated as more effective nutrients among the sixteen compounds studied. After that, the optimum concentrations of these effective compounds were determined by Response Surface Methodology (RSM). Experimental results showed that the medium containing olive oil (X3), tryptone (X5), NH₄Cl (X9), and (NH₄)HCO₃ (X13) yielded maximum lipase activity (12.03 U/ml/min) with 1.5% (v/v), 3.0 g/L, 7.5 g/L, and 12.0 g/L respectively, and a cost reduction for raw materials can be achieved to obtain one (1) unit of enzyme activity.

Keywords: *Cryptococcus albidus* D24, lipase, Plackett-Burman, Response Surface Methodology

Öz

Bu çalışmada, *Cryptococcus albidus* D24'ten lipaz enzimi üretimi için kullanılan besiyeri bileşenlerinin Plackett-Burman İstatistiksel Tasarım Yöntemi (PBD) kullanılarak optimizasyonu gerçekleştirilmiş ve ilk adım olarak D24 suşundan lipaz enzimi üretimine etki eden en önemli besin maddeleri belirlenmiştir. PBD'ye göre en yüksek lipaz aktivitesi (19,34 U/ml/dk), Tween 80 (X2) %2,5 (h/h) ve (g/L) Pepton (X4) 8,0, Maya özütü (X6) 7,5, Et ekstraktı (X7) 7,5, Malt Ekstrakt (X8) 7,5, NH₄Cl (X9) 6,0, NaNO₃ (X10) 1,5, (NH₄)NO₃ (X12) 6,0, (NH₄)HCO₃ (X13) 6,0, MgSO₄.7H₂O (X15) 1,0 ve KH₂PO₄ (X16) 2,0 bileşenlerini içeren ortam ile 144 saat sonunda elde edilmiştir. PBD'den elde edilen konsantrasyon etkisi (CE) değerlerine göre incelenen on altı bileşik arasında, NH₄Cl (CE=7,1587), zeytinyağı (CE=3,5544), (NH₄)HCO₃ (CE=3,0747) ve tripton (CE=2,1427) daha etkili olarak bulunmuştur. Daha sonra belirlenen bu etkili bileşiklerin optimum konsantrasyonları, Yanıt Yüzey Yöntemi (RSM) ile belirlenmiştir. Deneysel sonuçlara göre, zeytinyağı (X3), tripton (X5), NH₄Cl (X9) ve (NH₄)HCO₃ (X13) bileşenleri, sırasıyla %1,5 (h/h), 3,0 g/L, 7,5 g/L ve 12,0 g/L konsantrasyonlarında maksimum lipaz aktivitesi (12,03 U/ml/dak) elde edildiği ve bir (1) ünite enzim aktivitesi elde etmek için, hammadde maliyetinde bir azalma sağlanabileceği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Cryptococcus albidus* D24, lipaz, Plackett-Burman, Yanıt Yüzey Yöntemi

I. INTRODUCTION

Lipases (triacylglycerol ester hydrolyzes, EC 3.1.1.3), one of the most crucial industrial enzymes, have the ability to catalyze the hydrolysis of triglycerides to different monomers including fatty acids, diglycerides, monoglycerides, and glycerol. Besides hydrolysis reactions, their ability to form ester bonds facilitates them to catalyze various reactions including esterification, inter-esterification, and transesterification [1-3].

The first lipase from the pancreas was identified by J. Eberle in 1834. Then, various sources, including microorganisms, animals, and plants have been investigated for lipase production [4]. Among all these sources, yeasts were found to be more attractive producers compared to other sources due to easy production, ease of genetic manipulation, high production yield, low production cost. Additionally, their lipases are also applicable to various areas such as detergent, pharmaceutical, biofuel, pulp and paper, and chemical industries [2, 5-8]. For that reason, different yeast species such as *Rhizopus delemar*, *Rhizomucor miehei*, *Candida antarctica*, *Candida rugosa*, *Candida cylindracea*, and *Saccharomycopsis lipolytica* have been investigated for their ability to produce lipases [9, 10]. Although different yeast strains have different lipase production capacities, environmental

conditions including the type and concentration of medium components, pH, temperature, incubation time, inoculation volume, aeration rate, and agitation speed are the main factors that affect enzyme production [11].

The first step for enhancing enzyme production capacity is the determination of the medium components and their concentrations since the selection of favorable ingredients as carbon and nitrogen sources and inorganic salts may influence cell growth and productivity [12-17]. Moreover, different experimental design methodologies were applied to investigate the significance of a large number of medium constituents and their combinatorial interactions on lipase production [18]. The one-factor-at-a-time method is a classical optimization method that comprises the changing of a single variable while keeping others constant. In this method, a limited number of values are evaluated to understand the effect of each component and it is very hard to obtain reliable data at the end of the limited number of experiments to understand the interactions among the components as well as their effects on production [19]. On the other hand, statistical methods help us to overcome the drawbacks of the classical optimization methods. They minimize the margin of error and reduce the total number of experiments. Additionally, along with the rapidity of resulting the process, it reduces the time consumed and intense labor while giving reliable and accurate data compared to classical methods [20]. Among the other statistical methods, the Plackett–Burman design (PBD) and response surface methodology (RSM) are the most popular statistical design approaches used for bioprocessing [18]. PBD is applied to find the main factors from numerous variables in order to fix or eliminate for further optimization processes, while response surface methodology (RSM) is used for obtaining the optimal conditions of a multivariable system [21].

To select crucial media components for optimum lipase production, Salihu et al. (2013) [20] applied Plackett–Burman design using eleven components. Six components, including sucrose, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, Na_2HPO_4 , MgSO_4 , Tween-80, and olive oil indicated positive effects on lipase production with maximum enzyme activity.

Furthermore, Maharana and Ray (2014) [22] determined not only the most effective carbon sources including glucose, lactose, sucrose, xylose, fructose, maltose, and organic nitrogen sources, but also inorganic nitrogen sources including beef extract, peptone, yeast extract, mineral chlorides such as KCl, NaCl, CaCl_2 , $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, MgCl_2 and $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ and various solid substrates like sugarcane bagasse, wood chips, and coconut oil cake on lipase production from *Pseudomonas* sp. AKM-L5 by using PBD. Based on nitrogen sources, the maximum effect on lipase

production was observed using calcium nitrate, while it was found that inorganic nitrogen sources have greater stimulation on lipase production compared to organic nitrogen sources. Additionally, lactose as carbon source, $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ as mineral chlorides and ground nut oil cake as solid substrates provided maximum positive effects.

Moreover, Lanka and Latha, (2015) [23] applied Plackett–Burman statistical tool to determine various physical and nutritional variables including not only temperature, pH, and incubation period but also medium components such as Gum Arabic, for lipase from *Emericella nidulans* NFCCI 3643. After PBD medium optimization, the most effective variables were selected for RSM using a three-level Box–Behnken design.

Samaei–Nouroozi et al., (2015) [24] also used PBD to determine the effect of ten medium components such as glucose, inorganic salts, and olive oil, and they used CCD to evaluate the level of significant factors for lipase produced from *Alkalibacillus salilacus* SR-079 Halo. In these factors, olive oil– KH_2PO_4 showed square effects while interaction effects were observed by using olive oil with glucose and with NaCl for lipase production.

In light of these explanations, PBD and RSM statistical design approaches were applied within the scope of this work to determine the effect of nitrogen sources and waste cooking oil on lipase production from *Cryptococcus albidus* D24 [25]. Therefore, the significant carbon and nitrogen sources were determined by using the PBD method, and further optimization was achieved by RSM methodology to obtain the concentration level of the investigated ingredients for lipase production from *C. albidus* D24.

II. MATERIAL AND METHODS

2.1. Strain and chemicals

C. albidus (D24), deposited at Ege University, Faculty of Science, Department of Biology, Basic and Industrial Microbiology Section, was kindly supplied from Assoc. Prof. Dr. Tansel Yalçın. Most of the chemicals were of analytical grade and supplied either by Merck (Darmstadt, Germany) or Sigma (St Louis, MO) along with a few chemicals that were supplied from BioLife (Port Charlotte, USA) unless otherwise noted.

2.2. Preculture preparation

Preculture with an initial pH of 6.2 was prepared in 100 mL Erlenmeyer flasks with the final working volume of 20 mL. It was sterilized in autoclave at 1.06 bar and 121°C for 15 minutes and after sterilization, the medium was inoculated with a single colony of *C. albidus* (D24). Incubation was carried out in an orbital shaker at 180 rpm and 28 °C for 16 h. At the end of the cultivation, cells were harvested by centrifuge at 4000

rpm for 6 min under aseptic conditions. Then, wet cell pellet was resuspended in the basal medium and transferred to the lipase production medium to adjust the initial optical density (OD) of 1.0 at 600 nm. In all experiments, initial optical density (OD) was kept at the constant value of 1.0.

2.3. Determination of the most effective nutrients

Sixteen medium components including waste oil (X1) and olive oil (X3) as carbon sources, Tween 80 (X2) as a surfactant, peptone (X4), tryptone (X5), yeast extract (X6), beef extract (X7), and malt extract (X8) as organic nitrogen sources, and ammonium chloride (NH₄Cl) (X9), sodium nitrate (NaNO₃) (X10), ammonium sulfate ((NH₄)₂SO₄) (X11), ammonium nitrate ((NH₄)NO₃) (X12), ammonium hydrogen carbonate ((NH₄)HCO₃) (X13), and ammonium bicarbonate ((NH₄)HCO₃) X(14) (purchased from local market) as inorganic nitrogen sources, magnesium sulfate heptahydrate (MgSO₄.7H₂O) (X15) and potassium dihydrogen phosphate (KH₂PO₄) X(16) as minerals (Table 1) with three dummy variables were evaluated in twenty sets of experiments (Table 2) using Plackett-Burman statistical design (PBD).

Table 1. The medium components proposed in Plackett-Burman experiments and their corresponding low and high concentration levels.

| Variable Code | Medium Ingredients | Low Level (g/L) (-1) | High Level (+1) |
|---------------|---|----------------------|-----------------|
| X1 | Waste oil | 0.0% v/v | 2.5% v/v |
| X2 | Tween 80 | 0.5% v/v | 2.5% v/v |
| X3 | Olive oil | 0.0% v/v | 2.5% v/v |
| X4 | Peptone | 2.0 | 8.0 |
| X5 | Tryptone | 0.0 | 7.5 |
| X6 | Yeast Extract | 2.0 | 7.5 |
| X7 | Beef Extract | 0.0 | 7.5 |
| X8 | Malt Extract | 0.0 | 7.5 |
| X9 | NH ₄ Cl | 0.0 | 6.0 |
| X10 | NaNO ₃ | 1.5 | 6.0 |
| X11 | (NH ₄) ₂ SO ₄ | 0.0 | 6.0 |
| X12 | (NH ₄)NO ₃ | 0.0 | 6.0 |
| X13 | (NH ₄)HCO ₃ | 0.0 | 6.0 |
| X14* | (NH ₄)HCO ₃ | 0.0 | 6.0 |
| X15 | MgSO ₄ .7H ₂ O | 0.25 | 1.0 |
| X16 | KH ₂ PO ₄ | 0.5 | 2.0 |

* X14 is purchased from the local market with the lowest price as a cost-effective inorganic nitrogen source alternative for industrial production. Although X13 and X14 have the same molecular formula, X14 has impurities compared to X13.

Each medium was experimented twice, while the lipase activity for each run was performed as triplicate. Since the assessment of wastes from the food industries to

produce value-added compounds would be very attractive for both economic and environmental standpoints, waste cooking olive oil was used as a carbon source while olive oil was also used as the control. PBD is a two-level factorial design and allows the screening of k-1 variables, where k is the number of the set of experiments. Dummy variables are not the components used in experiments, but they can be used to determine the measurement error. The effect of the concentrations and the estimation of the effect of the dummy variable were achieved by using the following equation described by Rajput et al., (2016) [26] (Equation 1).

$$CE(X_i) = 2 (\varepsilon N_i^+ - \varepsilon N_i^-) / k, \quad (1)$$

where CE(X_i): The concentration effect of the variable; N_i⁺ and N_i⁻: The lipase production of the trials, where the variable X_i estimated at its higher and lower concentrations, respectively; k: The number of trials in this equation. The following equation is used to calculate the variance of dummy variables in order to estimate experimental error. (Equation 2);

$$V_{eff} = \varepsilon (ED)^2 / n, \quad (2)$$

where V_{eff}: The variance of the concentration effect (experimental error); ED: The concentration effect of the dummy variable; n: The number of dummy variables. The square root of the variance of dummy variables was used to calculate the standard error (SE) of the concentration effect. Student's t-test given below was used to establish the significance level (p-value) of each concentration effect. (Equation 3):

$$t(X_i) = E(X_i) / SE, \quad (3)$$

where E(X_i) is the effect of the variable X_i.

Equation 4 was used to obtain the statistical confidence level of each variable (Equation 4).

$$\text{Statistical confidence} = (1 - p) \times 100. \quad (4)$$

The statistical confidence level of 95%, which was considered as a highly significant effect on lipase production corresponds to a value of $p = 0.05$. Confidence level of 70-95% was evaluated to be effective, whereas confidence level below 70% was accepted as insignificant.

2.4. Statistical experimental design

For the development, improvement, and optimization of bioprocesses, RSM including, mathematical and statistical methods is used for modeling and analysis of problems. These problems are the response of the interest affected by a large number of variables and the main goal is the optimization of this response [27-29].

Therefore, after using PB design to determine the most effective nutrients on lipase synthesis, Response Surface Methodology (RSM) was used to obtain the optimum concentration of the key medium components that affect lipase production. The most effective components with their concentrations were prepared to investigate the optimum conditions on lipase

production and their effects.

The highest and lowest level of each source were given in Table 3, while the statistical design for the most effective components and their concentrations were shown in Table 4.

Table 2. PB Design for 16 medium components & 3 dummy variables; ‘-’ means to use the lowest level of concentrations in different set of experiments.

| Run | X1 | X2 | X3 | X4 | X5 | X6 | X7 | X8 | X9 | X10 | X11 | X12 | X13 | X14 | X15 | X16 | D1 | D2 | D3 |
|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|----|
| 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 |
| 2 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 1 |
| 3 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 |
| 4 | -1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 |
| 5 | -1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 |
| 6 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 |
| 7 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| 8 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 |
| 9 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | -1 |
| 10 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 1 |
| 11 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 |
| 12 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 |
| 13 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 |
| 14 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 |
| 15 | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 16 | -1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 |
| 17 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 |
| 18 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 |
| 19 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 |
| 20 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 |

Table 3. The most effective medium components used on statistical experiments.

| Variable Code | Medium Ingredients | Concentration of nutrients | |
|---------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------|
| | | Low level (g/L) | High Level(g/L) |
| X3 | Olive Oil | 0.5% (v/v) | 2.5% (v/v) |
| X5 | Tryptone | 3 | 15 |
| X9 | NH ₄ Cl | 3 | 12 |
| X13 | NH ₄ HCO ₃ | 3 | 12 |

Table 4. Statistical Design for the most effective components and their concentrations ('-1' means to use lowest, '0' means to use middle and '1' means to use the highest level of concentrations in different set of experiments).

| RUN | X3 | X5 | X9 | X13 |
|-----|----|----|----|-----|
| 1 | 0 | 0 | -1 | -1 |
| 2 | 0 | 0 | 1 | -1 |
| 3 | 0 | 0 | -1 | 1 |
| 4 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 5 | -1 | -1 | 0 | 0 |
| 6 | -1 | 1 | 0 | 0 |
| 7 | 1 | -1 | 0 | 0 |
| 8 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | -1 | 0 | -1 |
| 10 | 0 | 1 | 0 | -1 |
| 11 | 0 | -1 | 0 | 1 |
| 12 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 13 | -1 | 0 | -1 | 0 |
| 14 | 1 | 0 | -1 | 0 |
| 15 | -1 | 0 | 1 | 0 |
| 16 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 17 | -1 | 0 | 0 | -1 |
| 18 | 1 | 0 | 0 | -1 |
| 19 | -1 | 0 | 0 | 1 |
| 20 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 21 | 0 | -1 | -1 | 0 |
| 22 | 0 | 1 | -1 | 0 |
| 23 | 0 | -1 | 1 | 0 |
| 24 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 25 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 26 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 27 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Lipase production was carried out in 500 mL Erlenmeyer flasks including 100 mL of the production medium at 250 rpm and 28 °C.

2.5. Determination of Lipase Activity

The method explained by Yalçın et al., (2014) [25] was used to determine the activity of D24 lipase with triplicate measurements. 100 µL of enzyme solution and 2 mL of the pNPP solution prepared in 0.05 M sodium acetate were mixed. Then, the reaction mixture was incubated for 3 min at 37 °C. After incubation, 150 µL of 1 M Na₂CO₃ was added to stop the reaction. Finally, the absorbance of the reaction mixture was measured at 410 nm spectrophotometrically against substrate-free enzyme as the blank. One unit of lipase activity (U) was described as the enzyme that releases 1 µmol p-nitrophenyl for 1 min at 37 °C and pH 5.6.

III. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Determination of the most effective nutrients for D24 lipase production using Plackett-Burman statistical approach

As shown in Table 5, the highest lipase activity of 19,34 U/ml/min was obtained using Medium 6, which includes Tween 80 (X2) (v/v) 2.5%, and (g/L) peptone (X4) 8.0, yeast extract (X6) 7.5, beef extract (X7) 7.5, malt extract (X8) 7.5, ammonium chloride (X9) 6.0, sodium nitrate (X10) 1.5, ammonium nitrate (X12) 6.0, ammonium hydrogen carbonate (X13) 6.0, MgSO₄.7H₂O (X15) 1.0, and KH₂PO₄ (X16) 2.0.

To analyze the effect of each ingredient, concentration effects, t-value, p-value, and the significance level of each component are calculated, and results are shown in Table 6. The standard error of 2.9078 calculated for each component was the same. According to concentration effect data, Tween 80 (X2), olive oil (X3), tryptone (X5), yeast extract (X6), malt extract (X8), ammonium chloride (X9), ammonium nitrate (X12), ammonium hydrogen carbonate (X13), MgSO₄.7H₂O (X15), and KH₂PO₄ (X16) had a positive effect, while waste oil (X1), peptone (X4), beef extract (X7), sodium nitrate (X10), ammonium sulfate (X11), and ammonium bicarbonate (X14) had a negative effect on lipase production.

Furthermore, the Pareto chart, which illustrates the order of significance of all variables affecting lipase production from *C. albidus* D24 (Figure 1) was drawn. The results revealed that ammonium chloride (X9) is the best component with the highest contribution to increase the lipase activity by more than 20%. Olive oil (X3), which follows ammonium chloride, enhanced lipase production by more than 10%.

Generally, the production of an extracellular lipase might require an inducer such as fatty acids. Among the various fatty acids, oleic acid was evaluated to be the best inducer for lipase production [30]. Therefore, compounds containing oleic acid are mostly used for lipase production. Olive oil containing a high amount of oleic acid is one of the carbon sources widely used for lipase production [31]. Additionally, triolein, a triacylglycerol containing three oleic acid molecules, also includes up to 83% of olive oil [32]. Similar to literature, olive oil used for D24 lipase production showed the great significance level as 96% (Table 6). The highest significance level of olive oil reported by Rajendran et al., (2007) [14] is in agreement with our results.

Nitrogen sources, in addition to carbon sources, have an impact on lipase production. Thus, the effect of different nitrogen sources on the production of D24 lipase was examined. Among the nitrogen sources evaluated, ammonium chloride showed 99% of significance. The next most important nitrogen source

that increased D24 lipase was ammonium hydrogen carbonate with 94% of significance. Additionally, while tryptone, yeast extract, and sodium nitrate showed significance between 80 and 90%, other components such as beef extract, malt extract, ammonium nitrate, Tween 80, waste oil, KH_2PO_4 , and $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ showed significance below 80%.

Regarding the concentration effect (CE) values obtained from PB design (Table 6), ammonium chloride (CE=7.1587), olive oil (CE=3.5544), ammonium hydrogen carbonate (CE=3.0747), and tryptone (CE=2.1427) were evaluated as the more effective nutrients among the (sixteen) 16 compounds studied.

Mainly, using the olive oil concentration at an optimized level in the production medium is critical for an improved production. Since using too much oil in the production medium prevents the growth of microorganisms by forming a bi-phasic barrier between microorganisms and its physicochemical environment. As a result of this situation, oxygen transfer and nutrient utilization by microorganisms could be blocked [33-34].

For that reason, the concentration of olive oil together with the most effective inorganic and organic nitrogen sources were optimized by using RSM in order to find their best concentrations of these four nutrients to achieve the highest lipase production.

Table 5. Concentration of each component (g/L) used in the production medium and average lipase activities determined.

| Run | X1 | X2 | X3 | X4 | X5 | X6 | X7 | X8 | X9 | X10 | X11 | X12 | X13 | X14 | X15 | X16 | Lipase Activity (U/ml/min) |
|-----|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------------------------|
| 1 | 2.5 | 2.5 | 0.0 | 2.0 | 0.0 | 2.0 | 7.5 | 0.0 | 6.0 | 1.5 | 6.0 | 6.0 | 6.0 | 6.0 | 0.25 | 0.5 | 4.26 |
| 2 | 2.5 | 0.5 | 0.0 | 2.0 | 0.0 | 7.5 | 0.0 | 7.5 | 0.0 | 6.0 | 6.0 | 6.0 | 6.0 | 0.0 | 0.25 | 2.0 | 5.63 |
| 3 | 0.0 | 0.5 | 0.0 | 2.0 | 7.5 | 2.0 | 7.5 | 0.0 | 6.0 | 6.0 | 6.0 | 6.0 | 0.0 | 0.0 | 1.0 | 2.0 | 3.88 |
| 4 | 0.0 | 0.5 | 0.0 | 8.0 | 0.0 | 7.5 | 0.0 | 7.5 | 6.0 | 6.0 | 6.0 | 0.0 | 0.0 | 6.0 | 1.0 | 0.5 | 3.67 |
| 5 | 0.0 | 0.5 | 2.5 | 2.0 | 7.5 | 2.0 | 7.5 | 7.5 | 6.0 | 6.0 | 0.0 | 0.0 | 6.0 | 6.0 | 0.25 | 2.0 | 18.03 |
| 6 | 0.0 | 2.5 | 0.0 | 8.0 | 0.0 | 7.5 | 7.5 | 7.5 | 6.0 | 1.5 | 0.0 | 6.0 | 6.0 | 0.0 | 1.0 | 2.0 | 19.34 |
| 7 | 2.5 | 0.5 | 2.5 | 2.0 | 7.5 | 7.5 | 7.5 | 7.5 | 0.0 | 1.5 | 6.0 | 6.0 | 0.0 | 6.0 | 1.0 | 0.5 | 6.74 |
| 8 | 0.0 | 2.5 | 0.0 | 8.0 | 7.5 | 7.5 | 7.5 | 0.0 | 0.0 | 6.0 | 6.0 | 0.0 | 6.0 | 6.0 | 0.25 | 0.5 | 1.35 |
| 9 | 2.5 | 0.5 | 2.5 | 8.0 | 7.5 | 7.5 | 0.0 | 0.0 | 6.0 | 6.0 | 0.0 | 6.0 | 6.0 | 0.0 | 0.25 | 0.5 | 14.60 |
| 10 | 0.0 | 2.5 | 2.5 | 8.0 | 7.5 | 2.0 | 0.0 | 7.5 | 6.0 | 1.5 | 6.0 | 6.0 | 0.0 | 0.0 | 0.25 | 0.5 | 15.07 |
| 11 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 8.0 | 0.0 | 2.0 | 7.5 | 7.5 | 0.0 | 6.0 | 6.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.25 | 2.0 | 0.100 |
| 12 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.0 | 0.0 | 7.5 | 7.5 | 0.0 | 6.0 | 6.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 1.0 | 0.5 | 13.35 |
| 13 | 2.5 | 2.5 | 0.0 | 2.0 | 7.5 | 7.5 | 0.0 | 7.5 | 6.0 | 1.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 6.0 | 0.25 | 2.0 | 9.610 |
| 14 | 2.5 | 0.5 | 0.0 | 8.0 | 7.5 | 2.0 | 7.5 | 7.5 | 0.0 | 1.5 | 0.0 | 0.0 | 6.0 | 0.0 | 1.0 | 0.5 | 2.180 |
| 15 | 0.0 | 0.5 | 2.5 | 8.0 | 0.0 | 7.5 | 7.5 | 0.0 | 0.0 | 1.5 | 0.0 | 6.0 | 0.0 | 6.0 | 0.25 | 2.0 | 0.100 |
| 16 | 0.0 | 2.5 | 2.5 | 2.0 | 7.5 | 7.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 1.5 | 6.0 | 0.0 | 6.0 | 0.0 | 1.0 | 2.0 | 12.27 |
| 17 | 2.5 | 2.5 | 0.0 | 8.0 | 7.5 | 2.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 6.0 | 0.0 | 6.0 | 0.0 | 6.0 | 1.0 | 2.0 | 3.680 |
| 18 | 2.5 | 0.5 | 2.5 | 8.0 | 0.0 | 2.0 | 0.0 | 0.0 | 6.0 | 1.5 | 6.0 | 0.0 | 6.0 | 6.0 | 1.0 | 2.0 | 10.69 |
| 19 | 0.0 | 2.5 | 2.5 | 2.0 | 0.0 | 2.0 | 0.0 | 7.5 | 0.0 | 6.0 | 0.0 | 6.0 | 6.0 | 6.0 | 1.0 | 0.5 | 3.730 |
| 20 | 0.0 | 0.5 | 0.0 | 2.0 | 0.0 | 2.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 1.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.25 | 0.5 | 5.330 |

Table 6. Calculated concentration effect, t-value, p-value, and the significance level of each component.

| Components | Concentration Effects | t-value | p-value | Significance |
|--|-----------------------|---------|---------|--------------|
| Waste Oil (X1) | -1.1938 | -0.4106 | 0.3183 | 68.1665 |
| Tween 80 (X2) | 1.1914 | 0.4097 | 0.3191 | 68.0854 |
| Olive Oil (X3) | 3.5544 | 1.2224 | 0.0380 | 96.2027 |
| Peptone (X4) | -1.2242 | -0.4210 | 0.3082 | 69.1761 |
| Tryptone (X5) | 2.1427 | 0.7369 | 0.1215 | 87.8456 |
| Yeast Extract (X6) | 1.9692 | 0.6772 | 0.1436 | 85.6445 |
| Beef Extract (X7) | -1.5168 | -0.5216 | 0.2266 | 77.3407 |
| Malt Extract (X8) | 1.4600 | 0.5021 | 0.2404 | 75.9600 |
| Ammonium chloride (X9) | 7.1587 | 2.4619 | 0.0056 | 99.4386 |
| Sodium nitrate (X10) | -1.7582 | -0.6047 | 0.1770 | 82.3042 |
| Ammonium sulfate (X11) | -2.6303 | -0.9046 | 0.0783 | 92.1695 |
| Ammonium nitrate (X12) | 0.0460 | 0.0158 | 0.9662 | 3.3772 |
| Ammonium hydrogen carbonate (X13) | 3.0747 | 1.0574 | 0.0544 | 94.5640 |
| Ammonium bicarbonate (X14)* | -2.9916 | -1.0288 | 0.0581 | 94.1944 |
| MgSO ₄ .7H ₂ O (X15) | 0.5671 | 0.1950 | 0.6103 | 38.9721 |
| KH ₂ PO ₄ (X16) | 1.2866 | 0.4425 | 0.2885 | 71.1463 |

*Although a similar effect was expected both from X14 and X13 because of the identical molecular formula, X14 showed a negative effect because of impurities compared to X13.

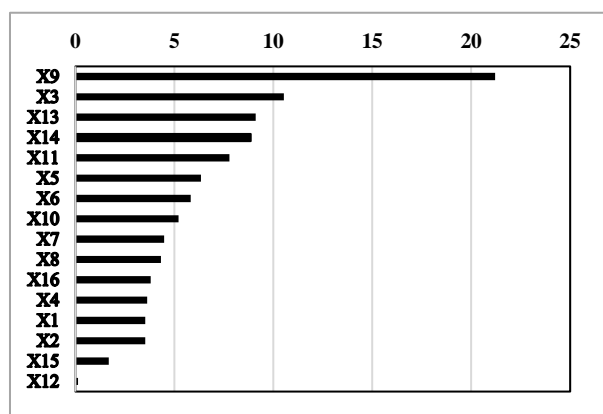


Figure 1. Pareto chart representing the contribution percentage of the medium components (**X1:** Waste Oil, **X2:** Tween 80; **X3:** Olive Oil, **X4:** Peptone, **X5:** Tryptone, **X6:** Yeast Extract, **X7:** Beef Extract, **X8:** Malt Extract, **X9:** Ammonium chloride, **X10:** Sodium nitrate, **X11:** Ammonium sulfate, **X12:** Ammonium nitrate, **X13:** Ammonium hydrogen carbonate, **X14:** Ammonium bicarbonate, **X15:** MgSO₄.7H₂O, **X16:** KH₂PO₄).

3.2. Optimization of the concentration of the most effective substrates using statistical experimental design

After the determination of the most effective components, Response Surface Methodology (RSM) was used to find out the best combination of

independent variables to increase lipase activity. The combinations of four compounds and lipase activity obtained from these combinations are summarized in Table 7.

To understand the simultaneous effect of the most effective components as olive oil (X3), tryptone (X5), NH₄Cl (X9), and NH₄HCO₃ (X13) on lipase activity, main effect plot (Figure 2) was constructed between mean lipase activity and the concentrations of four components. An interesting situation is observed by comparing main effect plots of the inorganic nitrogen source, Figure 2 (a) and (b), respectively. It is clear from Figure 2 (a) that lipase activity was decreased with increasing the concentration of X13 up to (w/v) 7.5%. Above this value, the positive effect of NH₄HCO₃ (X13) on lipase production was observed. Just the opposite of the X13 effect, lipase production was enhanced up to (w/v) 7.5% NH₄Cl (X9). However, over this concentration, lipase production was reduced (Figure 2 (b)). On the other hand, the presence of tryptone (X5), as an organic nitrogen source, did not cause a difference in lipase production at a concentration below (w/v) 9.0% (Figure 2 (c)). However, increasing tryptone amount in the medium caused a decrease in lipase activity. When olive oil's main effect (Figure 2 (d)) on the mean lipase activity (U/mL/min) was investigated, it is clear that olive oil has a positive impact on lipase synthesis from C.

albidus D24 at all concentrations investigated.

The situation mentioned above is further analyzed by looking at how these four most effective compounds interact with each other to enhance D24 lipase production (Figure 3). The first row of Figure 3 (a), (b), and (c)) shows how NH_4HCO_3 (X13) interacts with NH_4Cl (X9) (Figure 3 (a)), tryptone (X5) (Figure 3 (b)) and olive oil (X3) (Figure 3 (c)) for lipase production. It is clear that the lower and higher concentrations of NH_4HCO_3 have opposite effects on lipase production in the presence of NH_4Cl (Figure 3 (a)) and tryptone (Figure 3 (b)). At low NH_4HCO_3 concentration (w/v, 3%), lipase activity decreased up to (w/v) 7.5% of NH_4Cl and then increased, while at higher NH_4HCO_3 values, the opposite effect was observed. For tryptone (Figure 3 (b)), the interaction of NH_4HCO_3 with tryptone is exactly the opposite of the interaction of it with ammonium chloride (X9). When the interaction between NH_4HCO_3 (X13) and olive oil is examined (Figure 3 (c)), at all olive oil concentrations studied, lower amounts of X13 yielded lower lipase activity. But lipase activity consistently showed an increasing trend in all olive oil concentrations independent of X13 concentration.

Interestingly, at constant ammonium chloride (X9) concentration, although the lipase activity was higher at higher NH_4Cl concentrations, raising the concentration of three variables caused a decrease lipase production

at both higher and lower ammonium chloride concentrations (Figure 3 (d), (e), and (f)). The situation observed for ammonium chloride was completely reversed for NH_4HCO_3 , NH_4Cl , and olive oil at constant tryptone concentrations (Figure 3 (g), (h), and (i)).

As for olive oil, lipase production was enhanced at higher olive oil concentration (Figure 3 (j), (k), and (l)). When the interaction of olive oil with inorganic and organic nitrogen sources was investigated, at low olive oil concentrations, lipase activity was slightly changed with the increment of NH_4HCO_3 , NH_4Cl , and tryptone (Figure 3 (j), (k), and (l)). However, dramatic and opposite changes were observed with NH_4HCO_3 and NH_4Cl (Figure 3 (j) and (k)) at the presence of the higher amount of olive oil. As seen from Figure 3 (j), lipase activity was decreased with raising NH_4HCO_3 up to 7.5% concentration. Above this value, lipase activity was elevated as a higher concentration of NH_4HCO_3 has a positive effect. Opposite to NH_4HCO_3 , enzyme activity was raised with increasing ammonium chloride concentration (Figure 3 (k)) up to the same concentration of ammonium hydrogen carbonate and then decreased.

Overall, olive oil, and NH_4Cl have a positive impact on lipase production from *C. albidus* D24, while the effect of tryptone and NH_4HCO_3 depends on the concentration of other nutrients studied.

Table 7. Concentrations (g/L) of olive oil (X3), tryptone (X5), NH_4Cl (X9), and ammonium hydrogen carbonate (X13) used in RSM and average lipase activities determined for each run.

| Run | X3 | X5 | X9 | X13 | Activity (U/ml/min) |
|-----|-----|----|-----|-----|---------------------|
| 1 | 1.5 | 9 | 3 | 3 | 8.060 |
| 2 | 1.5 | 9 | 12 | 3 | 11.27 |
| 3 | 1.5 | 9 | 3 | 12 | 3.040 |
| 4 | 1.5 | 9 | 12 | 12 | 0.860 |
| 5 | 0.5 | 3 | 7.5 | 7.5 | 1.680 |
| 6 | 0.5 | 15 | 7.5 | 7.5 | 2.520 |
| 7 | 2.5 | 3 | 7.5 | 7.5 | 5.440 |
| 8 | 2.5 | 15 | 7.5 | 7.5 | 4.970 |
| 9 | 1.5 | 3 | 7.5 | 3 | 4.000 |
| 10 | 1.5 | 15 | 7.5 | 3 | 1.040 |
| 11 | 1.5 | 3 | 7.5 | 12 | 12.03 |
| 12 | 1.5 | 15 | 7.5 | 12 | 10.77 |
| 13 | 0.5 | 9 | 3 | 7.5 | 2.680 |
| 14 | 2.5 | 9 | 3 | 7.5 | 1.100 |
| 15 | 0.5 | 9 | 12 | 7.5 | 4.860 |
| 16 | 2.5 | 9 | 12 | 7.5 | 3.240 |
| 17 | 0.5 | 9 | 7.5 | 3 | 3.260 |
| 18 | 2.5 | 9 | 7.5 | 3 | 7.950 |
| 19 | 0.5 | 9 | 7.5 | 12 | 4.760 |
| 20 | 2.5 | 9 | 7.5 | 12 | 11.63 |
| 21 | 1.5 | 3 | 3 | 7.5 | 1.370 |
| 22 | 1.5 | 15 | 3 | 7.5 | 0.650 |
| 23 | 1.5 | 3 | 12 | 7.5 | 6.590 |
| 24 | 1.5 | 15 | 12 | 7.5 | 2.840 |
| 25 | 1.5 | 9 | 7.5 | 7.5 | 5.760 |
| 26 | 1.5 | 9 | 7.5 | 7.5 | 3.530 |
| 27 | 1.5 | 9 | 7.5 | 7.5 | 6.230 |

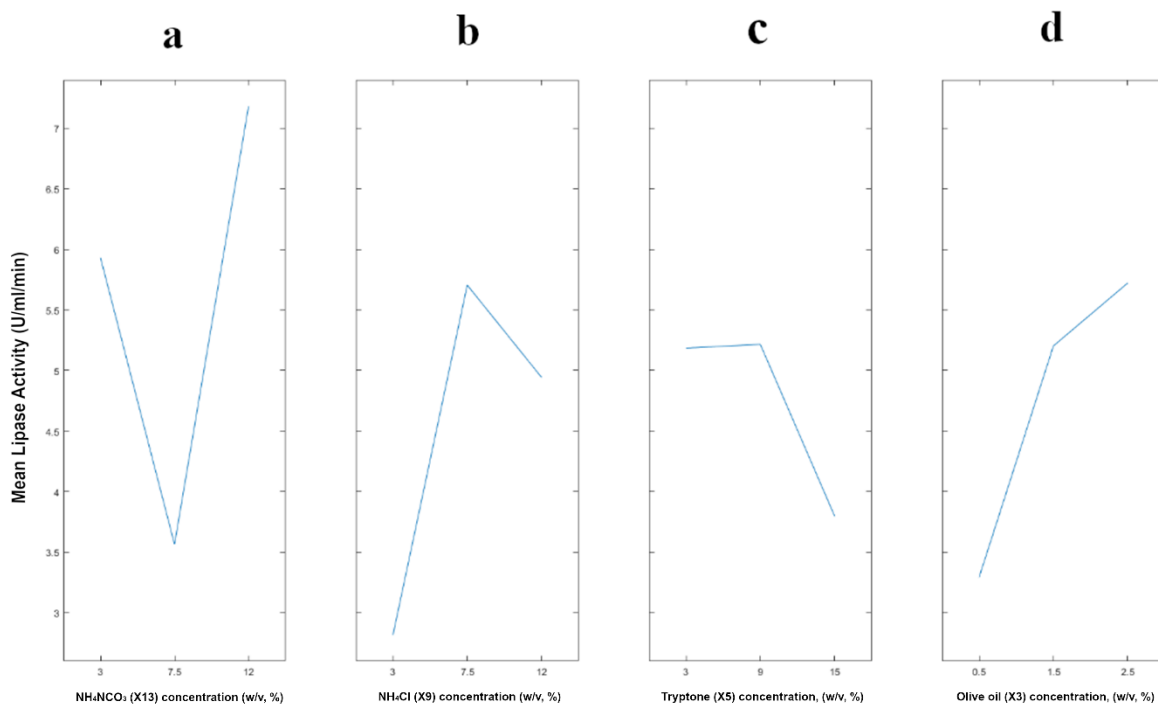


Figure 2. Main effects plot for lipase activity

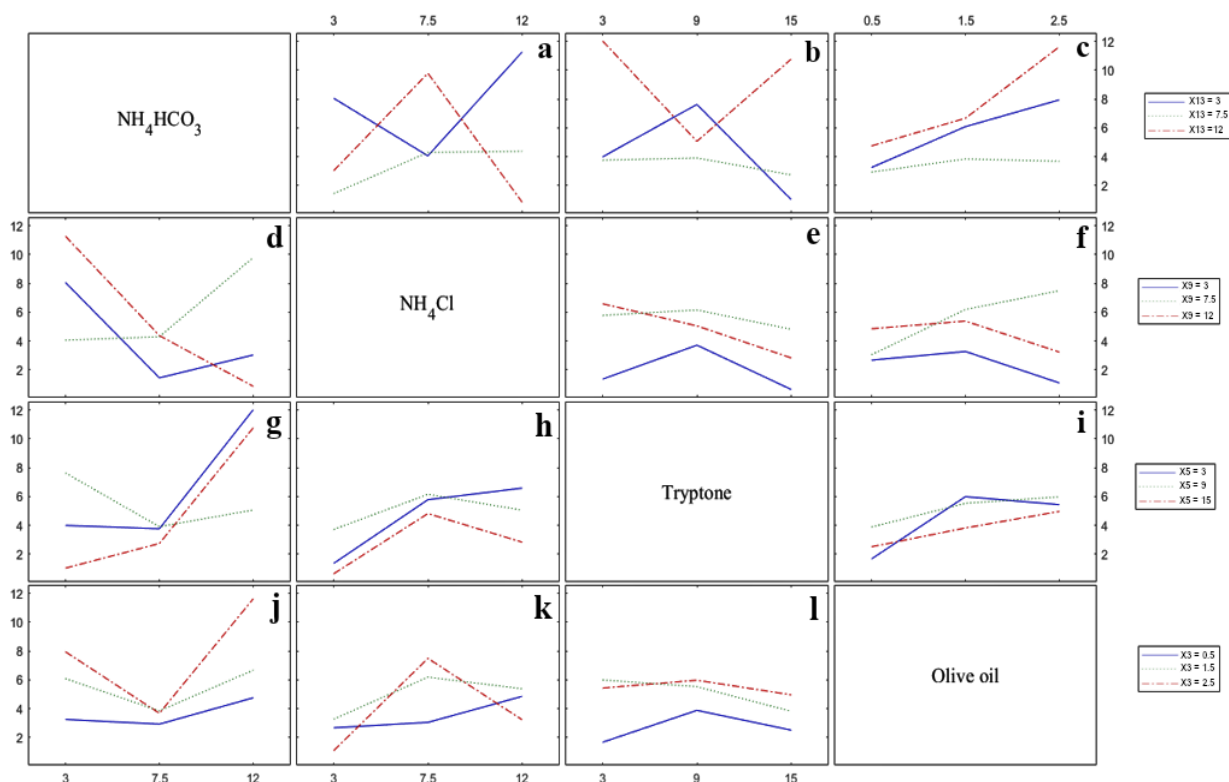


Figure 3. Interaction of the effect of the most effective compounds for lipase production.

IV. CONCLUSIONS

Enzymes are widely used in different areas such as detergent, food, agricultural, and pharmaceutical industries to obtain the desired product in an efficient, fast, and environmentally friendly manner. However, their usage is restricted because of their stability under extreme conditions of the processes. Therefore, different attempts have been made to find microorganisms that have an ability to produce enzyme having excellent properties.

Depending on our preliminary experimental studies, the newly isolated *C. albidus* D24 from petroleum sludge produces organic solvent stable specifically acetone stable lipase enzyme. To produce lipase from *C. albidus* efficiently, this thesis aimed to screen the most important medium components by using PB statistical design. After the determination of most effective nutrients, their responses and optimum concentrations were optimized by Response Surface Methodology (RSM) to develop cost-effective process.

According to experimental results, Tween 80 was the best surfactant compared to Triton X-100 and Tween 20. The optimum concentration of Tween 80 was determined as (v/v) 2.5%. However, in the literature, the enhancement of lipase activity up to 13 times with 2.0% Tween 80 was reported, we first decided to carry out experimental work to determine the most effective nutrients for lipase production from *C. albidus* D24.

According to PB statistical design, *C. albidus* D24 produced crude enzyme having 19.34 U/ml/min lipase activity in the medium including Tween 80 (X2) (v/v) 2.5%, (g/L) peptone (X4) 8.0, yeast extract (X6) 7.5, beef extract (X7) 7.5, malt extract (X8) 7.5, ammonium chloride (X9) 6.0, sodium nitrate (X10) 1.5, ammonium nitrate (X12) 6.0, ammonium hydrogen carbonate (X13) 6.0, MgSO₄.7H₂O (X15) 1.0, and KH₂PO₄ (X16) 2.0 at the end of 144 hours of cultivation period at 28°C and pH 7.0.

Among the sixteen different nutrients studied, olive oil was the best carbon source for D24 lipase production. As for nitrogen sources, tryptone have higher concentration effect compared to other organic nitrogen sources investigated. Besides organic sources, inorganic nitrogen sources were also analyzed. Ammonium chloride and ammonium hydrogen carbonate were the best inorganic sources studied. The concentration effect values of ammonium chloride olive oil, ammonium hydrogen carbonate, and tryptone were 7.1587, 3.5544, 3.0747, and 2.1427, respectively.

When, RSM was applied to determine the optimum concentration of these four effective compounds, the optimum concentration of olive oil (X3) tryptone (X5), ammonium chloride (X9), and ammonium hydrogen carbonate (X13) were determined as (v/v) 1.5%, 3.0 g/L, 7.5 g/L, and 12 g/L, respectively.

To decide the economic feasibility of the media, the cost of the medium components required to produce one unit enzyme activity was calculated.

In the production medium, where the highest activity (19.34 U/ml/min) was obtained with the PDB method, 4 (four) organic and 4 (four) inorganic nitrogen sources, 2 (two) mineral salts, and Tween 80 as a carbon source were used. In this medium, the raw material cost required to obtain one (1) unit of enzyme activity was determined as 0.104 Euro, considering the costs of all media components. In the RSM study conducted with four (4) most effective media components (Olive oil (X3), Tryptone (X5), Ammonium chloride (X9), and Ammonium hydrogen carbonate (X13)) determined according to PDB, maximum lipase activity (12.03 U/ml/min) was achieved through optimization. Although, activity was obtained with only four (4) components as a result of the optimization made with RSM was slightly decreased compared to activity obtained with medium 6 in PDB, the raw material cost required to obtain one (1) unit of enzyme activity was found to be 0.0277 Euro which is lower compared with PDB. In other words, a reduction in raw material cost was observed with the medium optimized by the RSM method. To our best knowledge, this is the first research work to optimize the lipase production from *C. albidus* D24.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by Marmara University, Scientific Research Projects Committee [grant number FEN-C-YLP-060510-0142], and Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) with 1007 - Public Institutions Research Funding Program (KAMAG) [grant number 115G079].

REFERENCES

- [1] Divakar, S. and Manohar B. (2007). In: Industrial Enzymes: Structure, Function and Applications. Use of Lipases in the Industrial Production of Esters. J. Polaina and A. P. MacCabe (eds.), Dordrecht, Springer Netherlands: p 283-300.
- [2] Anvari, M. (2015). Extraction of lipase from *Rhizopus microsporus* fermentation culture by aqueous two-phase partitioning. *Biotechnol. Biotechnol. Equip.*, 29(4), 723-731.
- [3] Venditti, I., Palocci, C., Chronopoulou, L., Fratoddi, I., Fontana, L., Diociaiuti, M., & Russo, M. V. (2015). *Candida rugosa* lipase immobilization on hydrophilic charged gold nanoparticles as promising biocatalysts: Activity and stability investigations. *Colloids Surf. B.*, 131, 93-101.
- [4] Ping, L., Yuan, X., Zhang, M., Chai, Y., & Shan, S. (2018). Improvement of extracellular lipase production by a newly isolated *Yarrowia lipolytica* mutant and its application in the

- biosynthesis of L-ascorbyl palmitate. *Int. J. Biol. Macromol.*, 106, 302-311.
- [5] Hasan, F., Shah, A. A., & Hameed, A. (2006). Industrial applications of microbial lipases. *Enzyme Microb. Technol.*, 39(2), 235-251.
- [6] Anbu, P. (2014). Characterization of an extracellular lipase by *Pseudomonas koreensis* BK-L07 isolated from soil. *Prep. Biochem. Biotechnol.*, 44(3), 266-280.
- [7] Priji, P., Unni, K. N., Sajith, S., Binod, P., & Benjamin, S. (2015). Production, optimization, and partial purification of lipase from *Pseudomonas* sp. strain BUP 6, a novel rumen bacterium characterized from Malabari goat. *Biotechnol. Appl. Biochem.*, 62(1), 71-78.
- [8] Vakhlu, J. (2006). Yeast lipases: enzyme purification, biochemical properties and gene cloning. *Electron. J. Biotechnol.*, 9(1), 69-85.
- [9] Patel, R. N. (2008). Synthesis of chiral pharmaceutical intermediates by biocatalysis. *Coord. Chem. Rev.*, 252(5-7), 659-701.
- [10] Singh, A. K., & Mukhopadhyay, M. (2012). Overview of fungal lipase: a review. *Appl. Biochem. Biotechnol.*, 166(2), 486-520.
- [11] Dong, H.N., Zhao, X.M., Yuan, M.A.Y., Zhang, M.H. (2012) Optimization of a synthetic medium for ethanol production by xylose-fermenting *Zymomonas mobilis* using response surface methodology., *Chin. Sci. Bull.*, 57, 28-29.
- [12] Maia, M. M. D., Heasley, A., De Morais, M. C., Melo, E. H. M., Morais Jr, M. A., Ledingham, W. M., & Lima Filho, J. L. (2001). Effect of culture conditions on lipase production by *Fusarium solani* in batch fermentation. *Bioresour. Technol.*, 76(1), 23-27.
- [13] Fickers, P., Nicaud, J. M., Gaillardin, C., Destain, J., & Thonart, P. (2004). Carbon and nitrogen sources modulate lipase production in the yeast *Yarrowia lipolytica*. *J. Appl. Microbiol.*, 96(4), 742-749.
- [14] Rajendran, A., Thirugnanam, M., & Thangavelu, V. (2007). Statistical evaluation of medium components by Plackett-Burman experimental design and kinetic modeling of lipase production by *Pseudomonas fluorescens*. 6, 469-478.
- [15] Salihu, A., & Alam, M. Z. (2012). Production and applications of microbial lipases: a review. *Sci. Res. Essays*, 7(30), 2667-2677.
- [16] Soleymani, S., H. Alizadeh, H. Mohammadian, E. Rabbani, F. Moazen, H. M. Sadeghi, Z. S. Shariat, Z. Etemadifar & M. Rabbani (2017). Efficient Media for High Lipase Production: One Variable at a Time Approach. *Avicenna J. Med. Biotechnol.* 9(2), 82.
- [17] Singh, V., Haque, S., Niwas, R., Srivastava, A., Pasupuleti, M., & Tripathi, C. K. M. (2017). Strategies for fermentation medium optimization: an in-depth review. *Front. Microbiol.*, 7, 2087.
- [18] Abdel-Fattah, Y. R., Soliman, N. A., Yousef, S. M., & El-Helow, E. R. (2012). Application of experimental designs to optimize medium composition for production of thermostable lipase/esterase by *Geobacillus thermodenitrificans* AZ1. *J Genet Eng Biotechnol.*, 10(2), 193-200.
- [19] Chauhan, K., Trivedi, U., & Patel, K. C. (2007). Statistical screening of medium components by Plackett-Burman design for lactic acid production by *Lactobacillus* sp. KCP01 using date juice. *Bioresour. Technol.*, 98(1), 98-103.
- [20] Salihu, A., Bala, M., & Bala, S. M. (2013). Application of Plackett-Burman experimental design for lipase production by *Aspergillus niger* using shea butter cake. *Int. Sch. Res. Notices*, 2013, 1-5.
- [21] Al Mamun, M. A., Mian, M. M., Saifuddin, M., Khan, S. N., & Hoq, M. M. (2017). Optimization of fermenting medium by statistical method for production of alkaline protease by *Bacillus licheniformis* MZK05M9. *J. Appl. Biol. Biotechnol.*, 5(6), 24-28.
- [22] Maharana, A. K., & Ray, P. (2014). Application of Plackett-Burman Design for improved cold temperature production of lipase by psychrotolerant *Pseudomonas* sp. AKM-L5. *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci.* 3(4), 269-282.
- [23] Lanka, S., & Latha, J. N. L. (2015). Response surface methodology as a statistical tool for fermentation media optimization in lipase production by palm oil mill effluent (POME) isolate *Emericella nidulans* NFCCI 3643. *Int. J. Innov. Res. Sci. Eng.. Technol.*, 4(4), 2535-2545.
- [24] Samaei-Nouroozi, A., Rezaei, S., Khoshnevis, N., Doosti, M., Hajihoseini, R., Khoshayand, M. R., & Faramarzi, M. A. (2015). Medium-based optimization of an organic solvent-tolerant extracellular lipase from the isolated halophilic *Alkalibacillus salilacus*. *Extremophiles*, 19(5), 933-947.
- [25] Yalçın, H. T., Çorbacı, C., & Uçar, F. B. (2014). Molecular characterization and lipase profiling of the yeasts isolated from environments contaminated with petroleum. *J. Basic Microbiol.*, 54(S1), S85-S92.
- [26] Rajput, K. N., Patel, K. C., & Trivedi, U. B. (2016). Screening and selection of medium components for cyclodextrin glucanotransferase production by new alkaliphile *Microbacterium terrae* KNR 9 using Plackett-Burman design. *Biotechnol. Res. Int.*, 2016, 1-7.
- [27] Montgomery, D. C. (2017). Design and analysis of experiments, 9th edition, Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc, p. 1-731.

-
- [28] Bař, D., & Boyacı, I. H. (2007). Modeling and optimization I: Usability of response surface methodology. *J. Food Eng.*, 78(3), 836-845.
- [29] Myers, R. H., Montgomery D. C., and C. Anderson-Cook (2009). Response surface methodology. Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc, p. 38-44.
- [30] Obradors, N., Montesinos, J. L., Valero, F., Lafuente, F. J., & Sola, C. (1993). Effects of different fatty acids in lipase production by *Candida rugosa*. *Biotechnol. Lett.*, 15(4), 357-360.
- [31] Royer, A., Gerard, C., Naulet, N., Lees, M., & Martin, G. J. (1999). Stable isotope characterization of olive oils. I—Compositional and carbon-13 profiles of fatty acids. *J. Am. Oil Chem. Soc.*, 76(3), 357-363.
- [32] Boskou, D., Blekas, G., & Tsimidou, M. (2006). Olive oil composition. In: Olive Oil, D. Boskou (ed.), 2nd edition, Academic Press and AOCS Press, p 41-72.
- [33] Pau, H. S., & Omar, I. C. (2004). Selection and optimization of lipase production from *Aspergillus flavus* USM A10 via solid state fermentation (SSF) on rice husks and wood dusts as substrates. *Pak. J. Biol. Sci.*, 7, 1249-1256.
- [34] Mukhtar, H., Khursheed, S., Mumtaz, M. W., Rashid, U., & Al-Resayes, S. I. (2016). Optimization of lipase biosynthesis from *Rhizopus oryzae* for biodiesel production using multiple oils. *Chem. Eng. Technol.*, 39(9), 1707-1715.

Ticari Otobüs Gövde Yapısında Topoloji Optimizasyonu Çalışması

Topology Optimization Study of Commercial Bus Body Structure

Soner KARAMERT¹  Abdullah DEMİR² 

¹Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, 34722, İstanbul, Türkiye

²Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 34722, İstanbul, Türkiye

Öz

Bu çalışmada, ticari bir otobüs gövde yapısında topoloji optimizasyonu tekniği kullanılarak profil örgü yapısının değiştirilmesi ile optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Bir ticari taşıtın gövdesinin yol koşullarındaki mukavemetini değerlendirmenin birçok yöntemi bulunmaktadır. Bu yöntemlerden en kapsayıcısı olduğu değerlendirilen gövde katılık değerleri, optimizasyon çalışmasında korunması gereken kriter olarak kabul edilmiştir. Gövde yapısı optimizasyon çalışması ile değiştirilen gövde yapısının katılık değerleri ölçülmüş ve optimizasyon öncesindeki gövde yapısının değerleri ile karşılaştırılmıştır. Yapılan bu genel karşılaştırmaya ilave olarak gövde yapısında kullanılan her bir kilogram malzemenin sağladığı katılık değerleri; iki tasarım için de ölçülmüş, optimize edilmiş gövdedeki her bir kilogramın optimize edilmemiş gövdeye göre daha verimli kullanıldığını göstermiştir. Ayrıca optimizasyon sonrası ölçülen katılık değeri, literatür verisi ile de karşılaştırılmış ve otobüs gövde yapısında %9 mertebelerinde bir hafifletme gerçekleştirildiği tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Otobüs gövde yapısı, Topoloji optimizasyonu, Otobüs gövde katılığı

Abstract

In this study, an optimization study was carried out by changing the profile mesh structure using the topology optimization technique in a commercial bus body structure. There are many methods to evaluate the strength of a commercial vehicle body in road conditions. Body stiffness values, which are considered to be the most comprehensive of these methods, were accepted as the criteria to be protected in the optimization study. The stiffness values of the optimized body structure were measured and compared with the values of the non-optimized body structure. In addition to this general comparison, the stiffness values provided by each kilogram of material used in the body structure were measured for both designs and the comparison showed that each kilogram in the optimized body was used more efficiently than in the non-optimized body. The stiffness value measured after optimization was also compared with the literature data. At the end of the optimization study, 9% weight reduction is achieved.

Key words: Bus body structure, Topology optimization, Torsional stiffness

I. GİRİŞ

19. yüzyılın sonu itibarıyla insanlık tarihinde yer almaya başlayan otomobil teknolojisi ile birlikte eş zamanlı olarak otobüsler de dünya tarihinde boy göstermeye başlamışlardır. Sanayi devrimi sonrasında büyüyen şehirlerin ulaşım ihtiyaçlarına cevap vermek adına bu taşıtlar günümüze önemli değişiklikler ile ulaşmışlardır. 21. yüzyılda şehirleşme ve şehir nüfuslarındaki artışla birlikte otomobiller ve toplu taşıma araçları insan hayatında önemli bir rol oynamaya başlamış ve ulaşım temel bir ihtiyaç haline gelmiştir. Otomotiv sektöründeki firmalar ise bu ihtiyaca cevap vermeye çalışmaktadır. Bu bağlamda birçok otomotiv şirketi rekabetçiliği sağlayabilmek ve çevrecilik kaygıları doğrultusunda araçlarının satın alma ve işletme maliyetlerini düşürmek için çalışmaktadır.

Son yıllarda otomotiv sektöründe çevreci uygulamaları destekleyen hibrit, elektrikli ve yakıt hücreli taşıtlar trendi gelişirken; bu trendler ağırlık ve maliyetleri azaltma ile performans ve yakıt ekonomisini iyileştirme gibi tamamlayıcı uygulamalarla desteklenmektedir [1]. Güvenlik zafiyeti oluşturmadan yapılacak olan optimizasyon çalışmaları, taşıtların tasarımını en uygun seviyeye getirme gayesiyle yürütülmektedir. Bu bağlamda, ticari araçlarda optimizasyon çalışmaları son dönemlerde ön plana çıkmaktadır [2,3].

Topoloji optimizasyonu, belirli bir tasarım alanı içerisindeki malzeme dağılımını belirli yük ve sınır koşulları için en uygun hale getiren ve bir dizi performans hedefini karşılayan bir yaklaşımdır [4]. Bu çalışmada, ticari bir otobüsün gövde yapısının optimize edilmesine yönelik otobüs gövdesinin profil örgü yapısında hafifletme çalışması yapılmıştır. Bu amaçla topoloji optimizasyonu tekniği kullanılarak, profil örgü yapısının geometrik olarak değiştirilmesi suretiyle en uygun tasarıma ulaşılmaya çalışılmıştır.

Sorumlu yazar: Soner KARAMERT, Tel: +90 380 523 78 27, e-posta: sonerkaramert@marun.edu.tr

Gönderilme: 28.08.2021, **Düzenleme:** 18.04.2022, **Kabul:** 18.04.2022

Bir taşıtın gövde katılığı süspansiyon sistemini ve yol koşullarında sağladığı konforu direkt olarak etkilemektedir. Katı bir gövde yol koşullarında süspansiyonların daha etkili çalışmasını sağlamaktadır. Esnemelerin minimum olduğu katı bir gövde, ses ve gürültü açısından da avantaj sağlamak suretiyle kalite algısını yükseltmektedir [5]. Ancak fazla katı bir gövde oluşturmak için ağır bir gövde yapısı kullanmak gövdenin en uygun tasarımdan uzaklaşmasına, neticede hem yakıt tüketimi ve atmosfere salınan zararlı egzoz emisyonlarının artmasına hem de rekabet edebilirlikten uzaklaşmasına neden olmaktadır [6].

Bir ticari taşıtın gövdesinin yol koşullarındaki mukavemetini değerlendirmenin farklı yöntemleri bulunmaktadır. Bu çalışmada ticari bir otobüs gövde yapısı optimizasyonunda gövde katılık değerlerinin kullanılması uygun bulunmuştur [7].

Tasarımda optimizasyon, çeşitli parametrelere bağlı olarak bir hedef dahilinde en uygun geometriye ulaşmak için kullanılan bir tekniktir. Bu çalışmada, ticari bir otobüsün kaynaklı gövdesinde ağırlık azaltma çalışmaları yapılmıştır. Topoloji optimizasyonu tekniği kullanılarak ilgili aracın özgün gövde yapısının değiştirilmesi suretiyle en elverişli tasarıma ulaşılmıştır. Araç gövde yapısı optimizasyonu sırasında gövde katılığının korunması hedeflenmiştir. Optimizasyon öncesinde ölçülen gövde katılığı değerleri ile optimizasyon sonrası ölçülen gövde katılığı değerleri karşılaştırılmıştır.

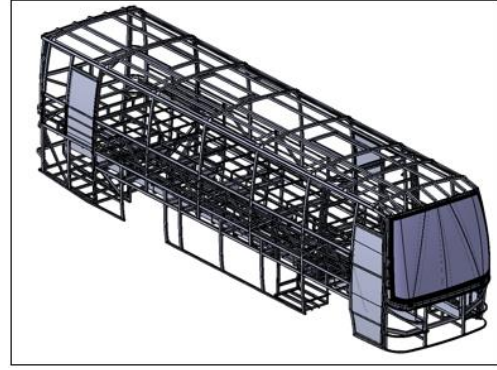
II. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Otobüsün gövde yapısı

Bir otobüs geometrisi profil örgü yapısı ve bu yapıya bağlı güç paketi, kapı ve dış kaplamalar, aks ve süspansiyon sistemi ile klima, sızdırmazlık elemanları ve camlar gibi yardımcı sistemlerden oluşmaktadır.

Otobüs gövde yapısı, otobüs geometrilerinde bulunan ve bağlı alt sistemleri bir arada tutmak ve yol koşullarındaki mukavemeti sağlamak için kullanılan bir sistemdir. Otobüslerde de yer yer şasi geometrisinin kullanıldığı görülmekle birlikte çoğunlukla profil örgü yapısı kullanılarak oluşturulan yapı alt sistemleri bir arada tutarak otobüsün iskeletini oluşturmaktadır. Bu iskelet örgü yapısının adına otobüs gövde yapısı adı verilmektedir. Kısa mesafe yolcu taşımacılığı ve servis amaçlı kullanılan otobüslerde ise çoğunlukla şasi ve gövde yapısı birlikte kullanılmaktadır.

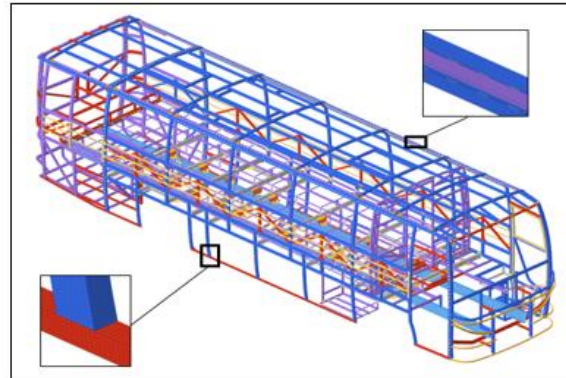
Bu çalışmaya konu olan otobüs, iki adet U profil yapısının oluşturduğu şasinin üzerine inşa edilmiş bir gövde yapısına sahip 10 metre uzunluğundaki ticari bir otobüs geometrisidir. Otobüs ön ve arka akslarının genişliği 1840 mm'dir. Söz konusu geometri açık kaynaklı bir geometri paylaşım ortamından bu çalışmada yapılacak sonlu elemanlar analizlerinde kullanılmak üzere temin edilmiştir [8].



Şekil 1. Otobüs geometrik modeli [8]

2.2. Sonlu elemanlar modeli

Söz konusu otobüs gövde yapısının bu çalışmada icra edilecek sonlu elemanlar analizlerinde kullanılmak üzere model ağ örgüsü oluşturulmuştur (Şekil 2). Sonlu elemanlar modelinde profiller kabuk elemanlarla modellenmiş ve paralel kaynak bağlantıları düğüm noktaları arasındaki rijit elemanlardan oluşturulurken geometrinin birbirine dikey olarak bağlandığı bölgeler düğüm yapılarının birbirlerine birleştirilmesi ile temsil edilmiştir. Orta yüzey yardımı ile kabuk modellemeye uygun olmayan yapılar katı elemanlarla modellenmiştir. Modelde kullanılan ortalama eleman büyüklüğü 7 mm olarak seçilmiştir. Otobüs gövde yapısının sonlu elemanlar modelinde 2,1 milyon kabuk eleman (CQUAD4), 380 bin katı eleman (CTETRA4) ve 18.000 rijit(rbe2) eleman kullanılmıştır. Sonlu elemanlar modeli yaklaşık 2,5 milyondan, Hypermesh yazılımı ile oluşturulmuştur.



Şekil 2. Otobüs gövde yapısı sonlu elemanlar modeli

Bu çalışmada otomotiv sektöründe yoğun olarak kullanılmakta olan St52 çeliği geçerli malzeme olarak tanımlanmıştır [9]. İlgili malzemenin mekanik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Malzeme özellikleri

| Malzeme | Elastisite Modülü (GPa) | Poisson Oranı | Yoğunluk (kg/m ³) |
|---------|-------------------------|---------------|-------------------------------|
| St 52 | 210 | 0,3 | 7.850 |

2.3. Gövde katılığı

Literatür incelemesinde, otobüs gövde katılık değerlerinin aracın mukavemetini belirlemede, geometrik optimizasyon çalışmalarında kullanılan önemli bir parametre olduğu değerlendirilmiştir [10,11,12,13]. Bu çalışmada sonlu elemanlar analizi ile tespit edilen burulma katılığı değerleri kullanılarak, araç gövde yapısının optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon analizleri sonuçları incelenerek tekrar bu sonuçlar doğrultusunda yeni bir gövde geometrik modeli oluşturulmuştur. Optimize geometrik yapının sonlu elemanlar modeli oluşturularak burulma katılığı ölçümü analizleri yapılmıştır. Son olarak optimizasyon çalışması öncesi ve sonrasındaki burulma katılığı değerleri ağırlık kazancı ile birlikte karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Bu çalışma kapsamında yapılan analizlerde araç şasisinin deformasyon senaryolarından burulma senaryosu kullanılmıştır [14].

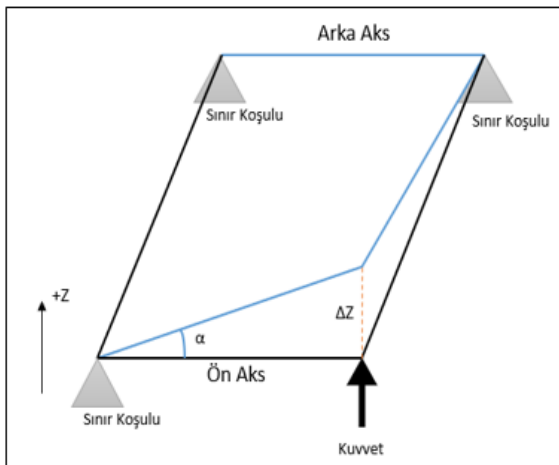
2.3.1. Burulma katılığı

Dört temel yükleme türü arasındaki en temel olan yüklemelerdir. Burulma yüklemesi, araç gövdesinin asimetrik kasis veya tümseklerden geçerken karşılaştığı yüklemeler türüdür. Araç gövde yapısının yol koşullarında bu yüke karşı gösterdiği direnç ise burulma katılığı olarak adlandırılmaktadır [14,15].

$$K_b = \frac{M}{a_b} \quad (1)$$

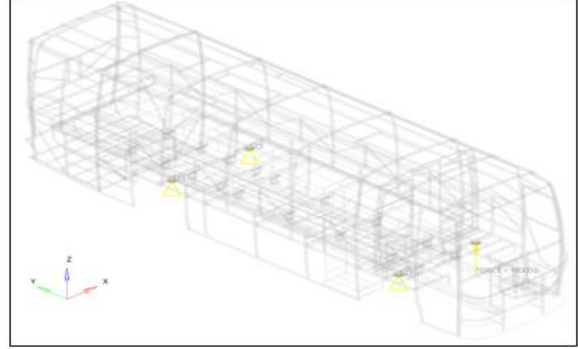
$$a_b = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta Z}{w} \right) \quad (2)$$

Burada K_b , Nm/rad cinsinden otobüs gövde yapısının burulma katılığıdır. w , metre cinsinden araç aks genişliğini ifade etmektedir. ΔZ ise yüklemenin uygulandığı bölgede belirlenen noktalardan alınan deplasman değerlerini ifade ederken, M ifadesi ise aks bölgesine uygulanan momenti (Nm) ifade etmektedir. a_b ise burulma açısını temsil etmektedir.



Şekil 3. Burulma katılığı yüklemesi

Burulma katılığı yükleme ve sınır koşulları Şekil 3’de gösterilmiştir. Bu senaryoda yükleme değeri olarak 10.000 N modele tatbik edilmiştir. Bu uygulamanın nedeni bu şekilde katılık hesaplarındaki kusurlardan oluşabilecek hata miktarının azaltılmasıdır. İlgili yükleme sonlu elemanlar modelinde sol ön tekerleğin süspansiyon yay bağlantı bölgesine tanımlanmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. Burulma katılığı analizi yükleme ve sınır koşulları

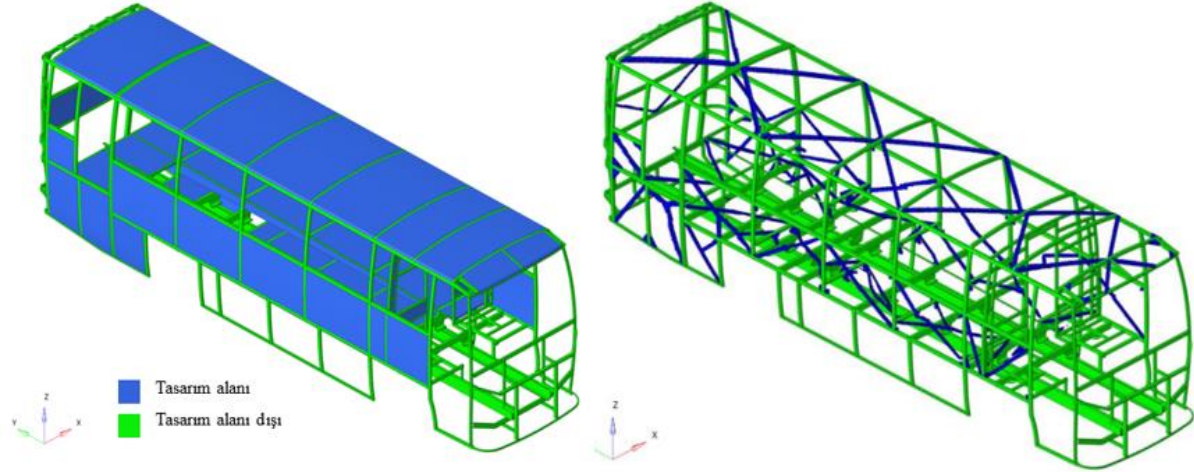
Bu çalışmada burulma katılığı ölçümü için kullanılan sonlu elemanlar analizi modelinde sınır koşulu olarak yüklemenin yapıldığı sol ön tekerlek süspansiyon yay bağlantı bölgesi dışındaki diğer üç tekerlek süspansiyon yay bağlantı bölgesi, üç adet eksenel yönde sabitlemiştir. Bu bölgelere tanımlanan sınır koşullarına dönme serbestliği tanımlanmıştır. Bu senaryodaki yükleme ve sınır koşulları tanımlanırken literatür verileri dikkate alınmıştır [7].

2.4. Topoloji optimizasyonu analizi

Optimizasyon analiz modeli Şekil 5’te gösterilmiştir. Ayrıca analiz modelinde kullanılan parametrelerin bilgisi ise Tablo 2’de verilmiştir. Mavi bölgeler tasarım alanı olarak belirlenirken yeşil bölgeler ise tasarım alanı dışında bırakılmıştır. Profil örgü yapısının daha iyi belirlenmesi adına otobüs gövde yapısı katı elemanlarla modellenmiştir. Optimizasyon analizi Optistruct programında yapılmıştır (Şekil 5).

Tablo 2. Optimizasyon analizi parametreleri

| Parametre | Bilgi |
|---------------------------|--|
| Hedef Fonksiyonu | Esneklik (Compliance) Enazaltılması |
| Tasarım Kısıtı | Tasarım Alanı Hacim Oranı ($0,75 \geq x \geq 0,90$) |
| Minimum Boyut | 21 mm |
| Hedef Toleransı | $\pm 0,005$ |
| Discrete (Panelizasyon-1) | 3 |
| Metot | Kabul Edilebilir Yönler Yöntemi (Method of Feasible Directions) |



Şekil 5. Optimizasyon analiz modeli ve sonuçları

III. ANALİZ

3.1. Optimizasyon öncesi ve sonrası gövde yapıları

Yukarıda model bilgisi verilen optimizasyon analizi sonucu Şekil 6'da gösterilmiştir. Optimizasyon analizi, 39 iterasyon ile daha önce belirlenen hedef toleransı kapsamında yakınsamış ve sonuçlanmıştır. Sonuçlanan analiz uyarınca bir optimize gövde yapısı oluşturulmuştur. Optimizasyon analizi sonuçlarında görülen profil yapısı aynı kalınlık özellikleriyle tekrar şekillendirilmiş ve yeni optimize gövde oluşturulmuştur. Oluşturulan gövdede düz görülen birçok profilin çapraz olarak konumlandırıldığı ve bazı profillerin kaldırıldığı Şekil 6'dan görülebilmektedir.

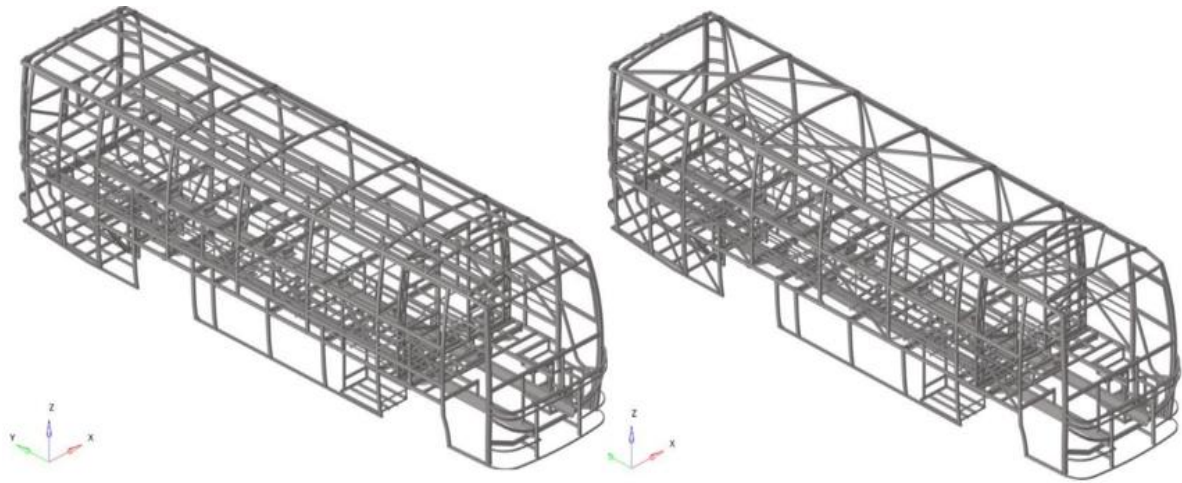
Optimizasyon analizi sonuçları uyarınca oluşturulan gövde yapısı optimizasyondan önceki gövde yapısı ile karşılaştırılmış ve ağırlık anlamında kazanç ile kazancın yüzdesi tespit edilmiştir (Tablo 3).

Tablo 3. Gövde ağırlığı karşılaştırması

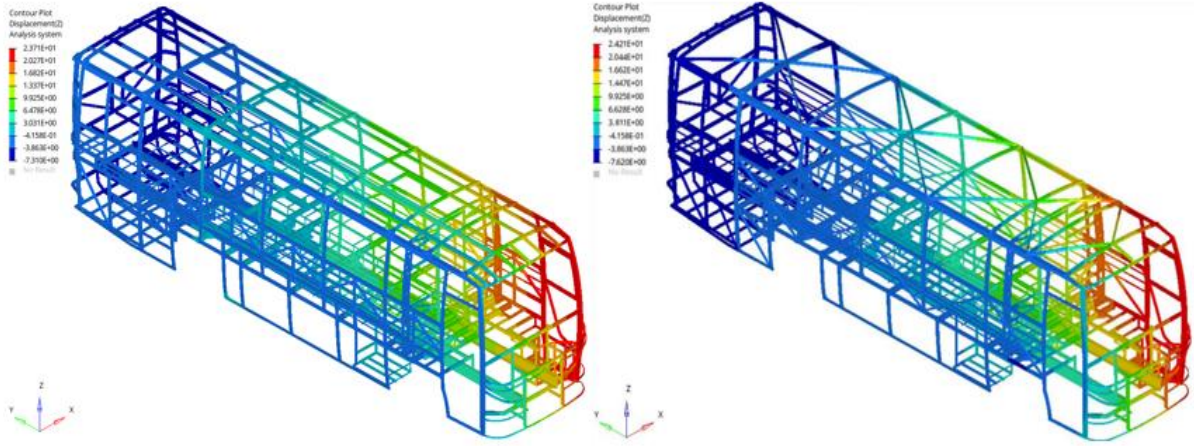
| Optimizasyon Öncesinde Gövde Ağırlığı (kg) | Optimizasyon Sonrasında Gövde Ağırlığı (kg) | Yüzdellik Kazanç (%) |
|--|---|----------------------|
| 2.409 | 2.193 | 8,96 |

3.2. Optimizasyon öncesi ve sonrası burulma katılığı ölçümü

Şekil 7'de sonuç görseli verilen analiz düşey deplasman sonuçları incelendiğinde gövde yapısındaki maksimum deplasmanın 23,71 mm olduğu görülmektedir. Ancak gövde katılığının net olarak ölçülebilmesi için yükleme yapılan süspansiyon bağlantı bölgesindeki deplasmanlar incelenmelidir. Burulma katılığı analizleri Nastran programında yapılmıştır.



Şekil 6. Optimizasyon öncesi gövde geometrisi (Solda), Optimize edilmiş gövde geometrisi (Sağda)



Şekil 7. Burulma katılığı analiz sonucu optimizasyon öncesi (solda), optimize edilmiş gövde (sağda)

Aynı modelleme yöntemi ve sınır koşulları ile optimize edilmiş gövde yapısı da mukavemet analizlerine tabi tutulmuştur. Analiz sonuçlarında gözlemlenen deplasman değerleri optimizasyon öncesi yapılan mukavemet analizinin sonuçlarında görülen deplasman değeri ile karşılaştırılmıştır. Optimizasyon öncesi ve sonrasında ölçülen gövde burulma katılık değerlerinin karşılaştırmalı sonuçları ile ağırlık hafifletmesi sonrasında optimize edilmiş ve optimizasyon öncesi gövde yapıları kilogram başına sağladıkları katılık değerleri açısından karşılaştırmalı olarak incelenmiş değerleri Tablo 4’de verilmiştir.

Tablo 4. Burulma katılığı analizi deplasman sonuçları (süspansiyon bölgesi) ve burulma katılığı değerleri

| Deplasman ve Burulma Katılığı | Değer |
|---|--------|
| Optimizasyon Öncesi Ölçülen Deplasman (mm) | 16,61 |
| Optimizasyon Sonrası Ölçülen Deplasman (mm) | 17,05 |
| Optimizasyon Öncesi Burulma Katılığı ($\times 10^6$ Nm/rad) | 2,044 |
| Optimizasyon Sonrası Burulma Katılığı ($\times 10^6$ Nm/rad) | 1,987 |
| Optimizasyon Öncesi Kilogram Başına Gövde Katılığı (Nm/(rad*kg)) | 848,48 |
| Optimizasyon Sonrası Kilogram Başına Gövde Katılığı (Nm/(rad*kg)) | 906,06 |
| Yüzdeler Artma (%) | 6,78 |

IV. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

4.1. Sonuç

Bu çalışmada, ticari bir otobüsün gövde yapısında optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Bu bağlamda topoloji optimizasyonu tekniği kullanılarak profil örgü yapısının geometrik olarak değiştirilmesi suretiyle en uygun tasarıma ulaşılmıştır.

Sonlu elemanlar analizi ile bilgisayar ortamında yapılan simülasyonlarla gövde yapısı optimize edilmiştir. Bu optimizasyon çalışmaları sonucunda otobüs gövde yapısında %8,96’lık ağırlık kazancı elde edilmiştir.

Literatürde otobüs gövde yapısı için kesin bir katılık sınırına rastlanılmamakla birlikte incelenen çalışmalarda elde edilen ve tavsiye niteliği taşıyan, burulma ve eğilme katılığına dair birtakım değerler tespit edilmiştir [16,17,18,19]. İlgili değerler burulma katılığı için yaklaşık $1,5 \times 10^6$ Nm/rad ile $2,5 \times 10^6$ Nm/rad aralığındadır. Bu çalışmada optimize edilmiş otobüs gövde yapısı katılık verileri bu sınırlar arasında yer almaktadır.

Optimizasyon çalışmaları öncesi ve sonrasındaki analizler ile ölçülen gövde katılıkları karşılaştırılmış ve gövde katılığında %2,78’lik bir azalma gözlenmiştir. Ancak bu katılık verileri literatürden elde edilen değerler ile karşılaştırılmış ve kabul edilebilir aralıkta olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanında gövde yapısındaki profillerin kilogram başına sağladığı katılık değerleri incelenmiştir. Elde edilen verilerde optimize edilmiş gövde yapısının kilogram başına katılık değerlerinin %6,78 değerinde arttığı tespit edilmiştir.

Bu veriler kütle kazancı verileri ile birlikte değerlendirildiğinde gövde yapısının daha verimli hale getirildiği, gövde katılık değerlerinde azalma meydana gelmiş olsa da kilogram başına katılık değerlerinde artış sağlanması dolayısıyla verimli ve en uygun geometriye ulaşıldığı tespit edilmiştir.

Semboller

K_b : Nm/rad cinsinden otobüs gövde yapısının burulma katılığı

W : Metre cinsinden araç aks genişliği

ΔZ_i : Yüklemenin uygulandığı bölgede belirlenen noktalardan alınan deplasman değerleri

M : Aks bölgesine uygulanan moment

a_b : Burulma açısı

Not:

Bu çalışma “*Ticari Bir Otobüs Gövde Yapısında Gövde Katılığına Göre Topoloji ve Kalınlık Optimizasyonu*” isimli yüksek lisans tezinden hazırlanmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] German, J. (2015). Hybrid vehicles: Technology development and cost reduction. The International Council on Clean Transportation, Washington DC, USA.
- [2] Brennan, J. and Hayes, K. (2000). Recent applications of topology and topography optimization in automotive design. In 8th Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization (p. 4709).
- [3] Shi, J. F. and Sun, J. H. (2009, February). Overview on innovation of topology optimization in vehicle CAE. In 2009 International conference on electronic computer technology (pp. 457-460). IEEE.
- [4] Zhu, J. and Gao, T. (2016). Topology optimization in engineering structure design. Elsevier, Oxford, UK.
- [5] Danielsson, O. and Cocaña, A.G. (2015). Influence of body stiffness on vehicle dynamics characteristics in passenger cars. MSc Thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.
- [6] Clark, N., Khan, A. S., Wayne, W. S., Gautam, M., Thompson, G. J., McKain et al. (2007). Weight effect on emissions and fuel consumption from diesel and lean-burn natural gas transit buses (No. 2007-01-3626). SAE Technical Paper.
- [7] Reyes, C.A., Ramírez, E. I., Ruiz, O. and Ortiz, A. (2013). Analysis and Optimization of a Passenger Bus Frame Through Finite Element Software. 2013 SIMULIA Community Conference.
- [8] www.grabcad.com, Erişim Tarihi: 20 Ocak 2019.
- [9] Haldankar, M. and Shirahatti, A. M. (2014). Finite element analysis and optimization of commercial bus body structure. International Journal of Engineering and Technical Research, 2(12), 175-178.
- [10] Kim, T. (1993). Study on the stiffness improvement of bus structure (No. 931995). SAE Technical Paper.
- [11] Falck, J. (2013). Effect of side windows, stiffening plate and roof sheet on the stiffness of the bus body. MSc Thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- [12] Zhong, W., Su, R., Gui, L. and Fan, Z. (2015) Topology and sizing optimisation of integral bus chassis with the use of a cooperative coevolutionary genetic algorithm with independent ground structures. In Proceedings of the 11th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimisation, 07-12 June, Sydney, Australia.
- [13] Iozsa, M.D., David, V. C. and Manea, A. M. (2018). Effect of side stiffening plates on the stiffness of the bus structure. MS&E, 444(7), 072004.
- [14] Riley, W. B. and George, A. R. (2002). Design, analysis and testing of a formula SAE car chassis (No. 2002-01-3300). SAE Technical Paper.
- [15] Jain, A. (2014). Computational Analysis and Optimization of Torsional Stiffness of a Formula-SAE Chassis (No. 2014-01-0355). SAE Technical Paper.
- [16] Lan, F., Chen, J. and Lin, J. (2004). Comparative analysis for bus side structures and lightweight optimization. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 218(10), 1067-1075.
- [17] Bosch, (2004). Bosch Electronic Automotive Handbook. Robert Bosch GmbH.
- [18] Crococolo, D., De Agostinis, M. and Vincenzi, N. (2011). Structural analysis of an articulated urban bus chassis via FEM: a methodology applied to a case study. Strojniški vestnik- Journal of Mechanical Engineering, 57(11), 799-809.
- [19] Jain, R., Tandon, P. and Vasantha Kumar, M. (2014). Optimization methodology for beam gauges of the bus body for weight reduction.

Hava ve Deniz Şartları Dikkate Alınarak Gemi Sefer Performansının Modellenmesi: Ege Denizi örneği

Modelling Ship Voyage Performance Taking Weather and Sea Condition Into Account: Aegean Sea Example

Timur İNAN¹ 

¹ Altınbaş Üniversitesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü, 34217, İstanbul, Türkiye

Öz

Ticari gemilerin seyir sürelerinin azaltılması, ticari maliyetlerin ve yakıt tüketiminin azaltılması açısından önem arz etmektedir. Ticari maliyetlerin azaltılması, ticaretten edinilen kazancın yükselmesini sağlamaktadır. Yakıt tüketiminin azalması ise karbon salınımının azaltılarak karbon salınımından dolayı oluşan çevresel kirliliğin azalması açısından önem arz etmektedir.

Bu çalışmada, Ege Denizi'ne ait kayıtlı rüzgar yön ve hızı, akıntı yön ve büyüklüğü, dalga yön ve yüksekliği verileri kullanılarak, ticari gemilerin hava ve deniz şartlarına bağlı olarak tahmini seyir süresini ve yakıt harcamasını hesaplayabilecek bir karar destek sistemi, çeşitli tahmin yöntemlerinden faydalanılarak ortaya konulmuştur. Bu sistem gemilerin seyir rotalarını oluşturma aşamasında kaptanlara yardımcı olabilecek bir karar destek sistemi olarak ortaya koyulmuştur. Karar destek sistemi için; rüzgar yönü (derece), rüzgar hızı (m/sn), akıntı yönü (derece), akıntı büyüklüğü (cm/sn), dalga yönü (derece) ve dalga yüksekliği (metre) parametreleri giriş olarak kullanılmıştır. Karar destek sisteminin çıkışı ise tahmini seyir süresi (saat) ve tahmini yakıt tüketimi (ton) olarak iki ayrı kategoride incelenmiştir. Tahmin yöntemi olarak yapay sinir ağı (YSA), uyarlamalı sinirsel Bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) ve Gauss süreç regresyonu (GSR) kullanılmıştır. Kullanılan yöntemlerin elde ettikleri sonuçları değerlendirilerek, yöntemlerin başarıları kıyaslanmıştır. YSA yöntemi 0.98 regresyon ve 0.153 MSE, ANFIS yöntemi 0.935 regresyon ve 0.478 MSE, GSR yöntemi ise 0.98 regresyon ve 0.195 MSE değerlerini elde etmiştir. Sonuç olarak; seyir süresi ve yakıt tüketimi tahmininde YSA yönteminin daha doğru tahminler üretebildiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Varış zamanı tahmini, Hava ve deniz şartları, Yapay sinir ağları, Uyarlamalı sinirsel bulanık çıkarım sistemi, Gauss süreç regresyonu.

Abstract

Reducing the cruise times of commercial ships is important in terms of reducing commercial costs and fuel consumption. Reducing commercial costs provides an increase in profits from trade. Reducing fuel consumption is important in terms of reducing environmental pollution caused by carbon emissions by reducing carbon emissions.

In this study, a decision support system is presented. The decision support system uses historical weather and sea data of the Aegean sea for training. To achieve better prediction values; artificial neural network (ANN), adaptive neural fuzzy inference system (ANFIS) and gaussian processes regression (GPR) methods are used. The inputs of the system are; wind direction (degrees), wind force (m/sn), sea current direction (degrees), sea current velocity (cm/sn), wave direction (degrees) and wave height (meters). The outputs of the system are; mean voyage time (hours), total fuel oil consumption (tonnes). The comparison of the methods in the name of prediction success are presented. ANN has 0.98 regression and 0.153 MSE, ANFIS has 0.935 regression and 0.478 MSE, GPR has 0.98 regression and 0.195 MSE values. As the summary; ANN method has better prediction values when comparing against ANFIS and GPR methods. As a result; ANN is found successful by means of predicting the ship speed taking into weather and sea conditions.

Keywords: ETA (Estimated Time of Arrival) prediction, Artificial neural network, Anfis, Gaussian process regression.

I. GİRİŞ

Günümüzde, ticari gemilerin seyir için harcayacakları zamanın hesaplanması, gemiye yeni seyir ayarlanabilmesi, taşıyıcı firmaların zamanında limanda olabilmeleri, limanın hazır hale getirilmesi gibi birçok faktör açısından önem arz etmektedir. Ticari gemilerin kaptanları seyir başlangıcından itibaren seyir sonuna kadar kendi firmalarına ve yük sahibi firmalara tahmini varış zamanını bildirmek durumundadırlar. Bir geminin tahmini varış saatini hesaplayabilmek her ne kadar tecrübe ile mümkünse de en yakın tahmini yapmak çoğu zaman zor olmaktadır. Çünkü bölgedeki rüzgar, akıntı ve dalga gibi parametreler geminin hızına etki etmektedir.

Bu çalışmada, Ege Denizi için seyir süresi ve yakıt tüketimi tahmini yapabilen bir karar destek sistemi ortaya koyulmaktadır. Tahmin için 3 farklı yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemler YSA, ANFIS ve GSR yöntemleridir. Yöntemlerin tahmin işlevlerini gerçekleştirebilmeleri için önceden eğitilmeleri gerekmektedir. Bu amaçla, Ege Denizi'ne ait geçmiş deniz ve hava raporlarının bulunduğu bir veri seti kullanılmıştır. Veri seti IFREMER veritabanından elde edilmiştir [1]. Veritabanındaki bilgiler tarih, sıcaklık (celcius), akıntı yönü (derece), akıntı hızı (cm/sn), atmosferik basınç (milibar), dalga yüksekliği (metre), rüzgar hızı (m/sn), rüzgar yönü (derece) başlıklarından oluşmaktadır ve 2007 ile 2013 yılları arasında kapsamaktadır.

Konu ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde tahmin için çeşitli yöntemlerin kullanıldığı görülmektedir. Valcic ve diğerleri yaptıkları çalışmada gemi hızının tahmin edilebilmesi için uyarlamalı bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) yöntemini kullanmıştır [2].

Vitiello ve diğerleri, Grimaldi Grup gemilerinden birine yerleştirilen veri toplama cihazından aldıkları verileri istatistiksel hesaplama yöntemleriyle işleyerek karbondioksit emisyonunun azaltılmasına yönelik bir çalışma ortaya koymuşlardır [3].

Mao ve diğerleri tarafından ortaya konulan çalışmada bir konteyner gemisinin tahmini varış zamanını tahmin edebilen ve tahmin için istatistiksel yöntemleri kullanan bir karar destek sistemi sunulmuştur. Yine aynı şekilde [5] bir RO-RO gemisinin yakıt tüketimini ve hız eğrisini istatistiksel yöntemler kullanarak tahmin edebilen bir sistem ortaya koymuşlardır [4].

Beşikçi ve diğerleri, gemi yakıt tüketiminin azaltılmasını hedefleyen bir karar destek sistemi ortaya koymuştur. Karar destek sistemi yapay sinir ağı tabanlı bir sistem olarak tasarlanmıştır [6].

Parolas, Rotterdam limanına yanaşan konteyner gemilerinin tahmini varış zamanını makine öğrenmesi teknikleri ile tahmin edebilen bir sistemi yüksek lisans tezi olarak ortaya koymuştur [7].

Barbour, Amerika Birleşik Devletleri tren yollarında yük trenlerinin tahmini varış zamanını destek vektör makinaları ile hesaplayabilen bir tez ortaya koymuştur [8].

Bodunov ve diğerleri tarafından sunulan konferans bildirisinde gemilerin trafik yoğunluğuna bağlı olarak tahmini varış zamanını tahmin edebilen, yapay sinir ağı tabanlı bir sistem ortaya konulmuştur [9].

Üney ve diğerleri tarafından sunulan konferans bildirisinde Ornstein-Uhlenbeck süreç odaklı stokastik işlem modeli kullanarak AIS (Otomatik Tanımlama Sistemi) verileri yardımıyla, geminin izleyeceği yolun tahminini yapabilen bir sistem ortaya konulmuştur [10].

Alessandrini, gemilerin geçmiş rota bilgilerine dayanarak, ileride hangi rotayı izleyebileceklerini tahmin edebilen bir sistemi "path-finding algorithm" kullanarak ortaya koymuşlardır [11].

Yakın tarihli bir çalışmada, geminin geçmiş seyirlerinden faydalanarak eğitilmiş, hava ve deniz durumunu da dikkate alarak varış zamanı tahmini yapabilen bir sistem yapay zeka kullanılarak ortaya konulmuştur [12].

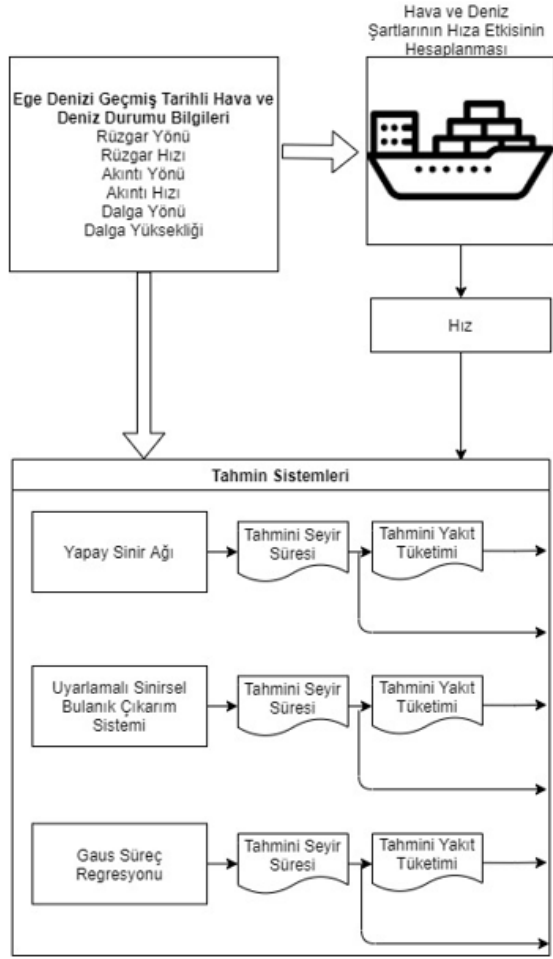
"Reinforcement learning" tabanlı diğer bir çalışmada ise geminin tahmini varış süresi hesaplayabilen bir sistem ortaya konulmuştur. Öğrenme için gerekli veriler otomatik tanımlama sisteminden elde edilmiştir [13].

Literatür genel olarak gözden geçirildiğinde tahmin yöntemleri olarak yapay sinir ağları, destek vektör makinaları, uyarlamalı sinirsel bulanık çıkarım sistemi ve istatistiksel yöntemlerin kullanıldığı görülmektedir. Çalışmaların çoğunluğu otomatik tanımlama sistemi (AIS) üzerinden elde edilen verilerin tahminde kullanılması ile alakalıdır. Az sayıda çalışmada hava şartlarının da hesaplama dahil edildiği görülmektedir.

Bu çalışmanın farklı yanı, literatürde kullanılan birçok yöntemin bir arada kullanılması, performanslarının karşılaştırılması ve eğitilen tahmin sisteminin gerçek geçmiş verilere dayanıyor olmasıdır. Ayrıca, literatüre bakıldığında Ege Denizi'ne ait benzer bir çalışma bulunamamıştır.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, örnek olarak Yunanistan'ın Mikonos limanından Alexandroupoli limanına gitmesi planlanan bir gemi için hesaplama yapılmıştır. Gemi servis hızı 12 knot, deplasmanı 8000 gross ton ve saatlik yakıt tüketimi 0.6 ton olarak alınmıştır. Bu çalışmada, geçmiş hava ve deniz durumu kullanılarak eğitilmiş üç farklı sistem bulunmaktadır. Yapay sinir ağları, uyarlamalı sinirsel çıkarım sistemi ve gauss süreç regresyonu yöntemleri kullanılarak geminin hızının ne olabileceği tahmin edilmekte ve bu verilere dayanarak geminin toplam seyir süresi ve yakıt tüketimi hesaplanmaktadır. Çalışmanın genel yapısı Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1. Sistemin genel yapısı

Ege Denizi'ne ait geçmiş tarihli hava ve deniz raporları alınarak gemi hızına etkisi anlaşılması için ilk önce matematiksel hesaplamalar yapılmaktadır. Hesaplamalar, hava ve deniz şartlarının gemi hızına ne kadar etki ettiğini ortaya koymaktadır. Gemi hızının hesaplanmasının ardından yine geminin özelliklerine bağlı olarak yakıt tüketimi ortaya çıkmaktadır. Geçmiş tarihli veriler ile varış süresi ve yakıt tüketimi bilgileri kullanılarak tahmin sisteminde bulunan üç yöntem eğitilmektedir ve her bir yöntem kendi tahminini üretmektedir.

2.1. Hava ve Deniz Şartlarının Gemi Hızına Etkisinin Hesaplanması

Rüzgar yönünün ve hızının geminin hızına etkisinin hesaplanmasında 1 numaralı eşitlik kullanılmıştır [14].

$$V_a = V_0 - (1,08 \cdot h - 0,126 \cdot q \cdot h + 2,77 \cdot 10^{-3} \cdot F \cdot \cos \alpha) \times (1 - 2,33 \cdot 10^{-7} W \cdot V_0) \quad (1)$$

V_a geminin gerçek hızını (knot), V_0 geminin deniz şartları göz önüne alınmaksızın normal hızını (knot), h dalga boyunu (m), q dalga ile gemi rotasının arasındaki açıyı (radyan), α rüzgâr ile gemi rotasının arasındaki açıyı (radyan), F rüzgâr hızını (m/s), W ise geminin deplasmanını (ton) temsil etmektedir. Bu çalışmada

8000 gross ton deplasman değerine sahip bir gemi üzerinden hesaplama yapılmıştır.

2.2. Akıntı Yönü ve Hızının Gemi Hızına Etkisinin Hesaplanması

Gemi hızına akıntının etkisinin hesaplanabilmesi amacıyla 2, 3 ve 4 numaralı eşitlikler kullanılmıştır [15].

$$V_{cx} = V_c \cdot \cos(\alpha_c) - V_x \quad (2)$$

$$V_{cy} = V_c \cdot \sin(\alpha_c) - V_y \quad (3)$$

$$V_0 = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \quad (4)$$

Burada, V_0 geminin normal şartlar altındaki hızını, V_x boylamsal akıntının geminin hızına etkisi hesaplandıktan sonra elde edilen boylamsal hızı, V_y enlemsel akıntının geminin hızına etkisi hesaplandıktan sonra elde edilen enlemsel hızı, α_c ise gemi pruvası ile akıntı arasındaki açıyı ifade etmektedir.

2.3. Yakıt Tüketiminin Hesaplanması

Yakıt tüketimi, rotanın belirlenmesinde önemli bir parametredir. Yakıt tüketimi 5 numaralı eşitlikle hesaplanmaktadır [16].

$$sfoc = fc \cdot kWh \quad (5)$$

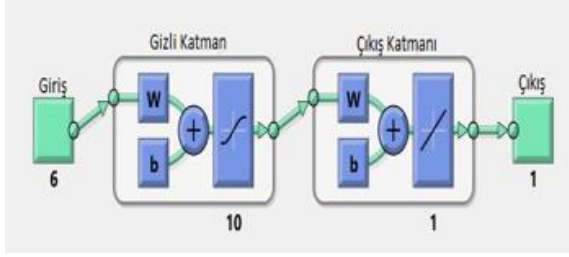
Burada $sfoc$, yakıt tüketim miktarını, fc kilowatt başına gemi makinasının harcadığı fuel oil miktarını, kWh ise gemi makinasının ürettiği gücü temsil etmektedir. Bu çalışmada kullanılan yakıt tüketim özelliği 167 g/kW dir.

2.4. Tahmin Yöntemleri

Geçmiş tarihli hava ve deniz şartları ile hesaplanan tahmini seyir süresi ve yakıt tüketimi değerlerinin de hesaplanması ile tüm verileri işleyerek tahmini varış süresini ve yakıt tüketimini hava ve deniz durumuna bağlı olarak hesaplamayı öğrenebilen bir sistemin ortaya konulması gerekmektedir. Bu amaçla üç yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemler yapay sinir ağları, uyarlamalı sinirsel bulanık çıkarım sistemi ve gauss süreç regresyonu yöntemleridir.

2.4.1. Yapay sinir ağı

Yapay sinir ağlarının eğitimi aşamasında veritabanındaki bilginin %15'i test için, %15'i doğrulama için, %70'i ise eğitim için kullanılmıştır. Eğitim için kullanılan algoritma Levenberg-Marquardt algoritmasıdır. Ortaya konulan yapay sinir ağı 10 adet gizli nörona sahip bir ağıdır. İleriye dönük tahmin yapabilmek için kullandığı gecikme miktarı 2 olarak belirlenmiştir. Gizli katmanda transfer fonksiyonu olarak hiperbolik tanjant fonksiyonu, çıkış katmanında transfer fonksiyonu olarak da lineer fonksiyon kullanılmaktadır. Şekil 2'de, oluşturulan yapay sinir ağına ait blok diyagram görülmektedir.



Şekil 2. Oluşturulan yapay sinir ağı yapısı

Yapay sinir ağlarının giriş katmanı, gizli katman ve çıkış katmanları arasındaki bağıntılar 6 ve 7 numaralı fonksiyonlarda detaylı olarak verilmektedir [17].

$$h_i = \prod \left[\sum_{j=1}^{\Phi} w_{i,j} x_j + b_i^H \right] \quad (6)$$

$$y_k = \prod \left[\sum_{i=1}^H w_{K,i} h_i + b_i^O \right] \quad (7)$$

h_i , i numaralı nöronun çıkış değeri, $w_{i,j}$, i numaralı nöronun j adımındaki ağırlık değeri, x_j , j adımındaki giriş değeri, b_i^H , i numaralı nöronun çıkışa etki katsayısı, Φ , girişler ile gizli katman arasındaki bağlantıların sayısı, H , nöron sayısı, O yapay sinir ağının çıkış sayısı, y_k , yapay sinir ağının çıkışıdır.

Eğitilen yapay sinir ağı 6 girişli 1 çıkışlı bir yapıya sahiptir ve giriş katmanı, gizli katman ve çıkış katmanı olmak üzere üç katmandan oluşmaktadır. Tablo 1’de giriş ve çıkışlara ait bilgiler görülmektedir.

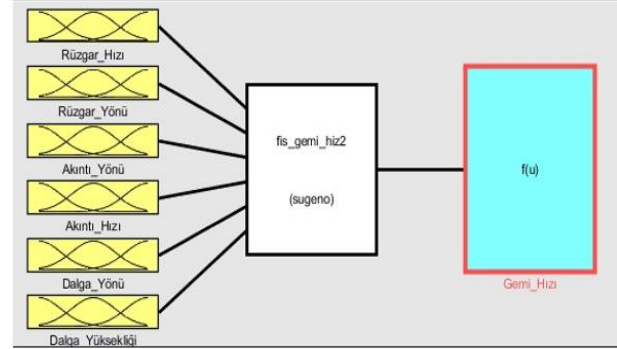
Tablo 1. Yapay sinir ağı giriş ve çıkışları

| Parametreler | |
|--------------|---|
| Girişler | Rüzgar hızı(m/s), rüzgar yönü (derece), akıntı yönü (derece), akıntı hızı (cm/sn), dalga yönü (derece), dalga yüksekliği (m). |
| Çıkış | Gemi tahmini hızı (knot) |

2.4.2. Uyarlamalı sinirsel bulanık çıkarım sistemi

Uyarlamalı bulanık çıkarım sistemi (ANFIS), kendisine sunulan eğitim, test ve doğrulama verileri kullanarak öğrenebilen ve öğrendiklerinden yola çıkarak ileriye dönük tahmin yapabilen bir sistemdir [18]. Bu çalışmada, deniz ve hava şartları ile gemi hızı arasındaki ilişkiyi öğrenerek hava ve deniz şartlarına göre gemi hızının tahmin ettirilmesi amacıyla kullanılmıştır.

Ortaya konulan ANFIS sisteminin 6 girişi, 1 çıkışı bulunmaktadır. Sistemin blok diyagramı Şekil 3’teki gibidir.



Şekil 1. ANFIS sistemi blok diyagramı

ANFIS sisteminde her bir giriş için 3 adet üyelik fonksiyonu tanımlanmıştır. Üyelik fonksiyonları gbell fonksiyonu şeklinde belirlenmiştir. Öğrenme için kullanılan verinin %80 i eğitim, %10’u doğrulama, %10’u ise test amaçlı kullanılmıştır.

2.4.3. Gauss süreç regresyonu

Gauss süreç regresyonu (GSR) kernel tabanlı olasılıksal bir modeldir. Bir GSR modeli kendisine uygulanan bir giriş vektörü üzerinden çıkış değişkenini tahmin etmeye çalışan bir model olarak tanımlanabilmektedir. Temel olarak ele alındığında, GSR modeli fonksiyonu basit olarak Eşitlik 8’deki gibi bir lineer regresyon formülü ile ifade edilebilir.

$$y = x^T \beta + \varepsilon \quad (8)$$

Burada, y çıkışı, x giriş vektörünü, β eğitim verisine bağlı olarak üretilen bir katsayıyı ifade etmektedir. ε ise yaklaşık olarak $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$ şeklinde ifade edilmektedir. Buradaki hata kovaryansı (σ^2) yine giriş vektöründen elde edilmektedir. Bir GSR modeli kendisine uygulanan değişkenler üzerinden temel bir fonksiyon üreterek değişkenlerin kovaryansını hesaplar ve fonksiyonun hassasiyetini ölçer. Bu durumda eşitlik 9 numaralı eşitlikteki halini almaktadır.

$$h(x)T\beta+f(x) \quad (9)$$

Burada h , temel fonksiyonu şeklinde, $f(x)$ ise $f(x) \sim GS(0, k(x, x'))$ şeklinde tanımlanmaktadır. Buradan da anlaşılacağı üzere $f(x)$ fonksiyonu 0 ile $k(x, x')$ şeklinde sonuç veren bir kovaryans fonksiyonunun döndürdüğü değer arasında sonuç veren bir fonksiyon olarak tanımlanmaktadır. Kovaryans fonksiyonu giren vektör ile tahmin vektörü arasındaki hatayı hesaplayan bir fonksiyon olarak tanımlanmaktadır. Dolayısıyla GSR çıkışı Eşitlik 10’daki gibi tanımlanabilir.

$$P(y_i/f(x_i), x_i) \sim N(y_i/h(x_i)T\beta+f(x_i), \sigma^2) \quad (10)$$

Bu çalışmada kullanılan tüm tahmin yöntemlerinde olduğu gibi gemi hızı tahmini için GSR modelinde de 6 giriş ve 1 çıkış bulunmaktadır.

III. BULGULAR

Eğitim için elde edilen veriler üç ayrı sistemin eğitimi için kullanılmıştır. Sistemlerin elde ettikleri başarı, verdikleri tahmin değerlerinin giriş değerlerine göre hata karelerinin ortalaması (MSE) ve regresyon (R) değerleri ile hesaplanmıştır. Eşitlik 11'de MSE değerinin hesaplanmasında kullanılan formül görülmektedir.

$$mse = \frac{\sum_{t=1}^n (e_t - o_t)^2}{n} \quad (11)$$

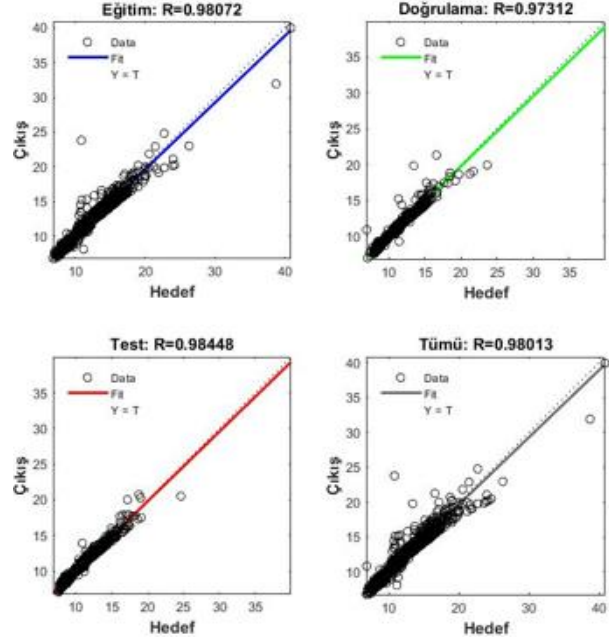
$$R = \frac{\sum_{t=1}^n (e_t - \bar{e}_t)(o_t - \bar{o}_t)}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (e_t - \bar{e}_t)^2} \sqrt{\sum_{t=1}^n (o_t - \bar{o}_t)^2}} \quad (12)$$

Burada, o_t sistemin t adımında vermesi gereken çıkışı, e_t , t adımında sistemin verdiği çıkışı, n tahmin sayısını temsil etmektedir.

3.1. Yapay Sinir Ağı Tahmin Değerleri

Oluşturulan yapay sinir ağı gemi hızı ve yakıt tüketimi tahmininde değerlerini elde etmiştir. Elde edilen değerler Şekil 4'te görülmektedir.

Oluşturulan yapay sinir ağı eğitimde 0.98, doğrulamada 0.97, testte 0.98, tüm aşamalarda ise 0.98 regresyon değerine sahip olmuştur. Hataların karelerinin ortalaması ise minimum 0.153 olarak ölçülmüştür.

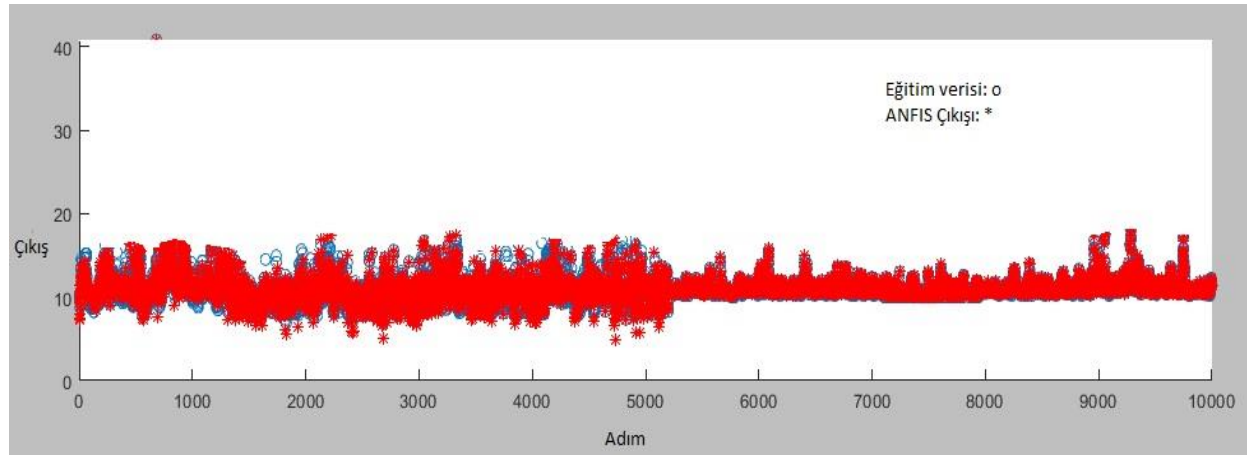


Şekil 2. Yapay sinir ağı başarı değerleri

3.2. Uyarlamalı Sinirsel Bulanık Çıkarım Sistemi Değerleri

Oluşturulan ANFIS sisteminden elde edilen değerler Şekil 5'te görülmektedir.

ANFIS sisteminin ürettiği tahmin değerleri ile sisteme uygulanan eğitim verisi karşılaştırılmış ve eğitim verisinde 0.57 MSE değerinin, kontrol verisinde ise 0.47 MSE değerinin elde edildiği gözlemlenmiştir. Her iki durumda da regresyon değeri 0.935 olarak ölçülmüştür.



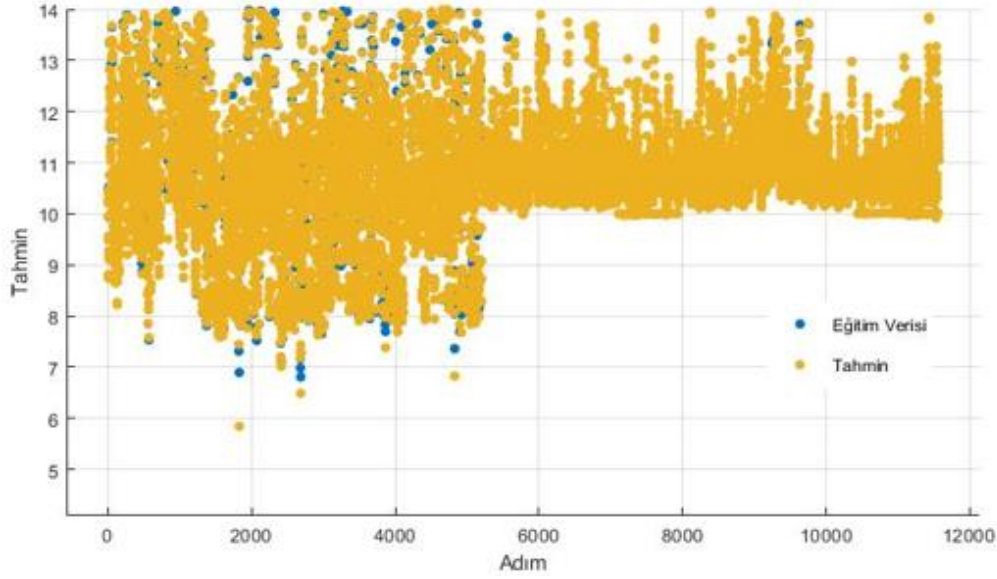
Şekil 3. Eğitim verisi ile ANFIS tahminlerinin karşılaştırılması

3.3. Gauss Süreç Regresyonu Yöntemi ile Elde Edilen Değerler

Gauss süreç regresyonu yöntemi ile elde edilen çıkış değerleri Şekil 6'da görülmektedir.

GSR yöntemi ile elde edilen tahmin değerleri ile eğitim verisi karşılaştırılmış ve en düşük 0.195 MSE değerini

elde ettiği görülmüştür. Regresyon değeri ise 0.98 olarak gözlemlenmiştir. GSR yöntemi ile elde edilen tahmin değerleri ile eğitim verisi karşılaştırılmış ve en düşük 0.195 MSE değerini elde ettiği görülmüştür. Regresyon değeri ise 0.98 olarak gözlemlenmiştir.



Şekil 4. Gauss süreç regresyonu ile elde edilen tahmin değerleri

IV. TARTIŞMA

Sistemin elde ettiği sonuçların başarısı Tablo 2’de görülmektedir. Sonuçlardan da anlaşılacağı üzere yapay sinir ağları bu üç metot içerisinde en yüksek regresyon değerini ve en düşük MSE değerini elde ederek gemi hızı tahmini konusunda en başarılı yöntem olmuştur.

Tablo 2. Yöntemlerin başarılarının karşılaştırılması

| YSA | | ANFIS | | GSR | |
|-------------|--------------|-------|-------|------|-------|
| R | MSE | R | MSE | R | MSE |
| 0.98 | 0.153 | 0.935 | 0.478 | 0.98 | 0.195 |

Literatür incelendiğinde, gemi seyrinin verimli hale getirilmesi açısından çok sayıda çalışma olduğu görülmektedir. Bu alanda yapılan çalışmalar gemilerin yakıt tüketiminin tahmin edilmesi, gemilerin hızının tahmin edilmesi veya gemilerin mümkün olan en yavaş hızla en az yakıtı tüketerek belirlenen seyir süresini aşmamak şartıyla seyirlerini tamamlaması olduğu görülmektedir [3] [6], [13]. Bu amaçla YSA, Anfis gibi bir çok yöntemin kullanıldığı görülmektedir. Bu çalışmada, diğer çalışmalardan farklı olarak 3 ayrı yöntem bir arada tahmin amacıyla kullanılmıştır. Modelin eğitimi için kullanılan veriler ise Ege Denizi’ne has verilerdir. Bu yönüyle çalışma diğer çalışmalardan farklılık arz etmektedir.

V. SONUÇLAR

Ege denizi’ne ait geçmiş tarihli hava ve deniz raporları Ifremer web sitesinden elde edilerek bu veriler gemi hızı hesaplamasında kullanılan formüle uygulanmıştır. Formül sonucu elde edilen yeni hız değerleri, geçmiş tarihli hava ve deniz raporlarına eklenerek tüm veriler üç ayrı tahmin yöntemini eğitmek için kullanılmıştır. Kullanılan yöntemler yapay sinir ağları, Anfis ve GSR

yöntemleridir. Yöntemlerin elde ettikleri başarılar, hataların karelerinin ortalama değeri (MSE) ve regresyon değerleri üzerinden değerlendirmeye alınmıştır. Sonuç olarak yapay sinir ağları minimum 0.153, Anfis 0.478 ve GSR yöntemi 0.195 MSE değerini elde edebilmiştir. Bunun yanında regresyon değerlerine bakıldığında yapay sinir ağları 0.98, Anfis 0.935 ve GSR ise 0.98 regresyon değerlerini elde etmiştir. Yapay sinir ağları, gemi hızının hava ve deniz şartlarına göre tahmininde başarılı bulunmuştur.

Çalışma, halihazırda Ege Denizi’ni kapsamaktadır. İleride yapılacak çalışmalarda Akdeniz içerisinde bulunan diğer limanlar ve Akdeniz’e ait hava ve deniz bilgileri kullanılarak çalışmanın kapsamı genişletilecektir.

KAYNAKLAR

- [1] Ifremer, Ifremer Oceansites. <ftp://ftp.ifremer.fr/ifremer/oceansites/DATA/E1M3A/> (Aralık, 2019).
- [2] Valcic, M., Antonic, R., Tomas, V. (2011). ANFIS Based Model for Ship Speed Prediction. *Brodogradnja*. 62(4), s. 373-382.
- [3] Erto, P., Lepore, A., Palumbo, B., Vitiello, L. (2015). A Procedure for Predicting and Controlling the Ship Fuel Consumption: Its Implementation and Test. *Qual. Reliab. Eng. Int.* 31, s. 1177-1184.
- [4] Mao, W., Rychlik, I., Wallin, J., Storhaug, G. (2016). Statistical models for the speed prediction of a container ship. *Ocean Engineering*. 126, s. 152-162.
- [5] Bialystocki, N. ve Konovessis, D. (2016). On the estimation of ship’s fuel consumption and speed curve: A statistical approach. *Journal of Ocean Engineering and Science*. 1, s. 157-166.

- [6] Besikçi, E., Arslan, O., Turan, O., Ölçer, A. I. (2016). An artificial neural network based decision support system for energy efficient ship operations. *Computer Operations Research*. 66, 393-401.
- [7] Parolas, I. (2016). ETA prediction for containerships at the Port of Rotterdam using Machine Learning Techniques. Yüksek Lisans Tezi. *Delft University of Technology* s. 54-64.
- [8] Barbour W. W. (2017). Prediction of Arrival Times of Freight Traffic on US Railroads Using Support Vector Regression. Yüksek Lisans Tezi. *University of Illinois* s. 21-31.
- [9] Bodunov, O., Schmidt, F., Martin, A., Brito, A., Fetzer, C. (2018). Real-time Destination and ETA Prediction for Maritime Traffic. Debs 2018 Grand Challenge, Hamilton, New Zealand.
- [10] Üney, M., Millefiori, M., Braca, P. (2019). Data Driven Vessel Trajectory Forecasting Using Stochastic Generative Models. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, Brighton, UK.
- [11] Alessandrini, A., Mazzarella F. ve Vespe M. (2019). Estimated Time of Arrival Using Historical Vessel Tracking Data. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 20(1), s. 7-15.
- [12] Farag Y. ve Ölçer, A.I. (2020). The development of a ship performance model in varying operating conditions based on ANN and regression techniques. *Ocean Engineering*. 198, 1-12.
- [13] Park K., Sim S. ve Bae H. (2021). Vessel estimated time of arrival prediction system based on a path finding algorithm. *Maritime Transport Research*. 2, s. 1-14.
- [14] Feng, L. (1992). Study on the ship's loss-speed in wind and waves. *Journal of Dalian Maritime University*, s. 347-351.
- [15] Lin, Y. H. ve Fang, M. C. (2013). The Ship-Routing Optimization Based on the Three-Dimensional Modified Isochrone Method, *32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Nantes, France.
- [16] MAN, Technical Specifications of MAN Engines. <https://marine.man-es.com/> (Şubat, 2020).
- [17] Tijani, I. B., Akmeliawati, R., Legowo, A. ve Budiyo, A. (2014). Nonlinear identification of a small scale unmanned helicopter using optimized NARX network with multiobjective differential evolution. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, s. 99-115.
- [18] İnan T. (2015). Moving target trajectory estimation using Kalman, curve fitting and Anfis methods. *Global Journal of Information Technology*, 5(1) s. 25-40.
- [19] Vapnik V. (1998). *Statistical Learning Theory*, New York: John Wiley Publishing.

Yapay Zeka Algoritmalarında Kullanılan Tahmin Metotları ile Çimento ve Betonunun Basınç Dayanımına Etki Eden Faktörlerin İncelenmesi

Investigation of Factors Affecting Compressive Strength of Cement and Concrete with Prediction Methods Used in Artificial Intelligence Algorithms

Kübra TÜMAY ATEŞ¹ 

¹ Çukurova Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 01250, Adana, Türkiye

Öz

Artan nüfusla birlikte konut veya yapılara duyulan ihtiyaç artmıştır. Bu durum da inşaat sektörünün çekirdeği olan çimento ve beton ihtiyaçlarının artmasına sebep olmuştur. Ancak çimento veya betonu oluşturan bileşenlerin içeriğinin değişmesi ya da üretimde oluşabilecek herhangi bir aksaklık durumunda nihai ürünlerin de eksik veya hatalı üretilmesine sebebiyet verebilmektedir. Aynı zamanda çimento veya beton üretiminde, bileşenlerin karışım oranlarının belirlenmesi betonun basınç dayanımını ölçebilmeyi zorunlu kılmaktadır. Bu kapsamda, nihai ürün olan beton veya çimentonun basınç dayanımının ölçülmesi sektörel olarak kaçınılmaz bir durum haline gelmiştir. Bu durum da fabrikalardaki dayanım testlerinin belirli zaman aralıkları ile ölçülmesi ile mümkündür. Nihai ürünlerin üretilmesi aşamasında zamanı verimli kullanabilmek adına yapılmış olan bu çalışmada; çimento veya betonun basınç dayanımının tahminlenmesi ve bunları oluşturan bileşen miktarlarının da basınç dayanımına olan etkisi uzun yıllardır incelenen ve çalışılan konular arasında yer almaktadır. Buradan yola çıkılarak çalışmanın temel planı yapay zeka metotları ile yapılmış geniş bir literatür taraması neticesinde elde edilen bulguları iki farklı başlık altında inceleyerek sonuçları yorumlamaktır. Yapılan analizin başlıca eğilimi çimentonun ve betonun basınç dayanımını etkileyen faktörlerin ortaya çıkarılmasıdır. Çalışmada, konuyla ilgili 1997- 2021 yılları arasında yayınlanmış 1012 çalışma incelenmiştir. Araştırmaya dahil edilecek olan kriterler göz önünde bulundurularak 52 yayın çalışma için uygun bulunmuştur. Yayınlar konu, limit ve bileşen karşılaştırmaları açısından değerlendirilmiştir. Çalışmadan elde edilen bulgular neticesinde, çimento ve betonun basınç dayanımına etki eden faktörlerin; kürlenme günü süresi, çimento-su oranı, katkı maddeleri oranı ve bileşen oranı olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çimento Bileşenleri, Basınç Dayanımını Etkileyen Faktörler, Yapay Sinir Ağı Metodu, Yapay Zeka Tahmin Metotları

Abstract

With the increasing population, the need for housing or buildings has increased. This situation has led to an increase in the needs of cement and concrete, which are the core of the construction industry.. However, in case of a change in the content of the components that make up the cement or concrete or any malfunction that may occur in the production, it may cause the final products to be produced incompletely or incorrectly. At the same time, in the production of cement or concrete, the determination of the mixing ratios of the components makes it necessary to measure the compressive strength of the concrete. In this context, measuring the compressive strength of the final product, concrete or cement, has become an inevitable sectoral situation. This is possible by measuring the strength tests in factories at certain time intervals. In this study, which was carried out in order to use time efficiently during the production of final products; The estimation of the compressive strength of cement or concrete and the effect of the amount of components that make them up on the compressive strength are among the subjects that have been studied and studied for many years. From this point of view, the basic plan of the study is to interpret the results by examining the findings obtained as a result of a wide literature review made with artificial intelligence methods under two different headings. The main tendency of the analysis is to reveal the factors affecting the compressive strength of cement and concrete. In the study, 1012 studies published between 1997 and 2021 on the subject were examined. Considering the criteria to be included in the research, 52 publications were found suitable for the study. The publications were evaluated in terms of subject, limit and component comparisons. As a result of the findings obtained from the study, the factors affecting the compressive strength of cement and concrete; curing day time, cement-water ratio, additives ratio and component ratio were determined.

Keywords: Cement Components, Factors Affecting Compressive Strength, Neural Network Method, Artificial Intelligence Prediction Methods

I. GİRİŞ

Çimento üretimi için gerekli olan klinkerin ana hammaddeleri kalker, kil, demir cevheri ve boksittir. İçerisinde en yüksek konsantrasyona sahip olan kalker ve kil, çeşitli kaynaklardan elde edilmektedir. Hammaddeler genellikle

belli bir elek üstünde % bakiye olarak tarif edilen inceliklere öğütülür. Bu incelik, kimyasal analizlerle tayin edilen ve imal edilecek klinkerin tipine özgü testlerle tespit edilir [1]. Çimento üretiminin temel prosesi klinker elde etme aşamasıdır. Farin, döner fırın ünitesinde ~1350- 1400°C'ye ısıtılarak pişirilir. Pişen ana ürüne klinker denir. Pişirme işlemi için ihtiyaç duyulan ısı enerjisi genellikle kömürden sağlanmaktadır. Kömür kullanılmadan önce yakıt hazırlama denen bir süreçten geçer. Bu süreçte kömür ortalama 10 mikron tane büyüklüğü ve %2 rutubet olacak şekilde değirmenlerde öğütülüp, silolara beslenir. Toz haldeki kömür iki ayrı noktadan, fırın kafası olarak tabir edilen fırın girişinden ve kalsinatörden fırına girer. Pişme işlemi sırasında farindeki bir takım oksitler birbirleriyle reaksiyona girerek yeni yapılar oluştururlar. Pişmiş haldeki bu malzemeye klinker adı verilir. Fırından çıkan 1200°C sıcaklıktaki klinker, çıkışta 100°C'nin altına düşecek şekilde ani soğutma işlemine tabi tutulur. Soğutma işlemi, klinkerin pişme işleminde oluşan kristal yapısını koruması açısından büyük önem taşır. Soğutma çıkışı sonrasında, klinker uygun stoklama bölümlerine alınır. Klinkerin saflığı miktarı, fiziksel ve kimyasal özellikleri çimentonun aktivite indeksi üzerinde büyük bir role sahiptir [2,4].

Genel olarak, cürüflü çimentolar çoğu kimyasal katkı maddeleriyle sorunsuz olarak kullanılabilir. Ancak, tüm diğer çimentolarda olduğu gibi, cürüflü çimentolarla üretilen betonlarda kimyasal katkı kullanmak gerektiği taktirde, gerçek koşullara uygun koşullarda denemeler yapılmasında yarar vardır. ASTM C 595 "Standard Specification for Blended Hydraulic Cements" (49) standardında katkılı çimentolarda kullanılabilecek granüle yüksek fırın cürufuna (GYFC) ilişkin koşullar genel olarak belirtilmiştir. Bu standardta, GYFC'nin kullanılabilirliğinin belirleneceği deney yöntemi GYFC içeren çimentoların üretiminde uygulanan öğütme şekline göre değişiklik gösterir. Klinker ve cürufun ayrı öğütüldüğü durumlarda, ıslak eleme ile 45 µm elek bakiyesi %20'den fazla olmayan bir incelikteki cürufun 28 günlük aktivite endeksinin %75'den yüksek olması gerekmektedir. Söz konusu aktivite endeksi, kısaca, portland çimentosuyla bir kısım portland çimentosu yerine GYFC kullanılmış cürüflü çimentonun dayanımlarının oranıdır. Birlikte öğütme koşullarında ise cüruf aktivite endeksi bulunurken kullanılacak cürufun inceliğinin cürüflü çimento içindeki tahmini inceliğiyle aynı olması gerekmektedir. Bunun dışında, ASTM C 1073 "Test Method for Hydraulic Activity of Ground Slag by Reaction With Alkali" (50) standardında cürufun hidrolik aktivitesini 24 saatte belirleyen bir test yöntemi bulunmaktadır. Bu yöntemde göre, öğütülmüş GYFC ve karışım suyu olarak sodyum hidroksit çözeltisi kullanılmış olan küp numunelerde, hızlandırılmış bakım uygulandıktan sonra, basınç dayanımı bulunur. Söz konusu yöntem aynı kaynaktan düzenli olarak alınan cürufuların kalite

kontrolünü amaçladığından bulunan bu dayanım değeri ile ilgili bir sınırlama bulunmamaktadır.

Türkiye standartları için ise; TS EN 197-1 standardında CEM III olarak ifade edilen çimentolar "yüksek fırın cürüflü çimento"lardır. Bu çimentolar tiplerine bağlı olarak % 36 ile % 95 oranları arasında yüksek fırın cürufu içerebilirler. Yüksek fırın cürufu, demir-çelik tesislerindeki yüksek fırınlarda demir üretimi esnasında açığa çıkan bir yan üründür. Yüksek fırın cürufu aniden soğutulmuş granül hale getirilir ve daha sonrasında öğütülür. Öğütülen bu malzeme çimentoya katılabildiği gibi betonda ayrı olarak da kullanılabilir. Yüksek fırın cürufu tek başına bağlayıcılık özelliği olmayan, ancak klinker veya Portland çimentosu ile birlikte kullanıldığında bağlayıcılık özelliği kazanan bir malzemedir. Yüksek fırın cürufunun betonun fiziksel ve mekanik özelliklerine oldukça fazla olumlu katkısı vardır. Yüksek fırın cürufu ve yüksek fırın cürüflü çimento ile yapılan betonun en önemli üstünlüğü çevresel etkilere karşı daha dirençli olmasıdır. Bu nedenle sülfat etkisi, deniz suyu etkisi, donma-çözünme etkisi ve aşınma etkisi gibi çevresel faktörlerin baskın olduğu yerlerde kullanımı faydalıdır. Ayrıca betonun daha işlenebilir ve geçirimsiz olmasını sağlar ve uzun vadede basınç dayanımı cüruf içermeyen betonlara oranla daha yüksektir [2-5].

Çimento ve betonu oluşturan bileşenler ve günler bazındaki basınç tahmini kapsamında yapılmış önde gelen çalışmalar kategorilere ayrılarak detaylı şekilde incelenmiş ve sonuçları yorumlanmıştır. Benzer çalışmaların bulguları ayrı ayrı sunulmuştur. İncelenen çalışmalara bakıldığında, çimento veya betonu oluşturan bileşenlerin basıncı çok yönlü olarak etkileyebileceği yargısına ulaşılabilmektedir.

Çimento ve betonunun basınç dayanımına etki eden faktörlerin yapay zeka metotları kapsamında incelenmesi, konuyu çok ayrıntılı bir şekilde ele alış şekli, analiz edilen detaylı bileşenler kapsamında ilk kez yapılan bir çalışmadır. Bu çalışmada betonu ve çimentoyu oluşturan bileşenler ayrı başlıklar altında çok detaylı şekilde irdelenmiştir. Böylece betonu ve çimentoyu oluşturan bileşenlerin çok ufak miktarlarda da olsa değiştirilmesi sonucunda karışımın basınç dayanımını değiştireceği tespit edilmiştir. Böylelikle bu çalışma, inşaat sektörü ve çimento ile ilgili yapılabilecek herhangi bir çalışma türü için önemli ve detaylı bilgiler içermektedir.

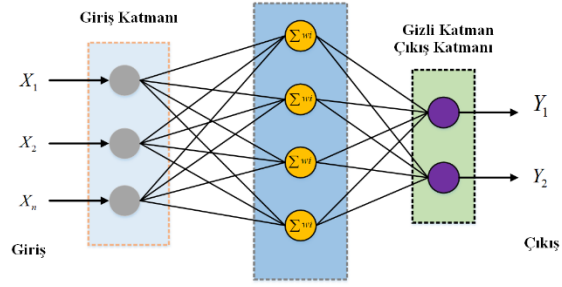
Çalışma kapsamında detaylı bir literatür taraması yapılmış ve konu, limit ve bileşen karşılaştırmaları yapılmıştır. Bu kapsamda 1997-2021 yılları arasında 1012 çalışma taranmış ve 56 yayın analiz edilerek betonun ve çimentonun basınç dayanımına etki eden faktörler ayrıntılı bir şekilde karşılaştırılarak ortaya konmuştur. Çalışma neticesinde bu etkenlerin birçok parametreye bağlı olduğu saptanmıştır.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

Beton veya çimento sektöründe uygulanan, basınç dayanım tahmin metotları ve bileşenlerin basınç dayanımına olan etkisini ortaya çıkarabilmek amacıyla geniş kapsamlı bir literatür çalışması yapılmıştır. Konuyla ilgili 1997- 2021 yılları arasında yayınlanmış 1012 çalışma incelenmiş ve analiz edilmiştir. Sistematik inceleme için araştırmaya dahil edilecek olan kriterler göz önünde bulundurularak 52 yayın çalışma için uygun bulunmuş ve çalışmada yer verilmiştir. Yayınlar konu, limit ve bileşen karşılaştırmaları açısından değerlendirilmiştir. Çalışmada Science Direct, Pergamon, Elsevier ve ULAKBİM veri tabanları kullanılmıştır. Ayrıca 'Factors Affecting Compressive', 'Cement Components' anahtar kelimeleri kullanılarak taranmıştır. Taranan yayınlarda çimentonun basınç dayanımına etki eden faktör ve bileşenler sınır olarak belirlenmiş ve özellikle çimento sektöründe hali hazırda bilinen özelliklerden daha farklı bileşenlerin dayanıma nasıl etki ettiği araştırılmıştır. Çalışmaların hepsi yazar tarafından bağımsız bir bakış açısıyla değerlendirilmiştir. Aynı zamanda Türk Standartları Enstitüsü'nün yayımlanmış olduğu standartlar [2-5] de incelenerek gerekli bilgiler toplanmaya çalışılmıştır. Bu bağlamda beton ve çimento sektörleri ayrı ayrı incelenmiş ve yapılan çalışmaları ayrı başlıklar halinde detaylı olarak verilmiştir. Bu çalışmalarda kullanılan bileşenler, yöntemler ve basınç dayanımına olan etkilerin neler olduğu analiz edilip değerlendirilmiştir. Yapılan literatür çalışmalarında, bileşenlerin basınç dayanımına olan etkilerinin bulunabilmesi ve nihai ürünlerin basınç dayanımı tahmininde son zamanlarda kullanılan en yaygın yöntemlerden biri olan yapay zeka teknikleri diğer metotlara oranla daha ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

Ek olarak çalışmada kullanılan Yapay Sinir Ağları (YSA)'nın teorik mimari yapısı ve basit formülü tanımlanmıştır. YSA, girdi ve çıktı verileri arasındaki doğrusal ve doğrusal olmayan karmaşık ilişkileri öğrenme algoritması ile inceleyebilen, insan beynindeki nöronların çalışma sistemini örnek alan matematiksel bir olgudur [6-7]. Herhangi bir sistem için basit bir YSA modeli geliştirmek ağın topolojisi, eğitim algoritması ve aktivasyon fonksiyonlarının tanımlanması ile mümkündür. Sinir ağları, her biri bilinen bir "girdi" ve "sonuç" içeren örnekleri işleyerek öğrenir (veya eğitilir), ikisi arasında ağın veri yapısı içinde depolanan olasılık ağırlıklı ilişkiler oluşturur. Belirli bir örnekten bir sinir ağının eğitimi, genellikle ağın işlenmiş çıktısı (genellikle bir tahmin) ile bir hedef çıktı arasındaki farkın belirlenmesiyle gerçekleştirilir. Bu fark hatadır. Ağ daha sonra ağırlıklı ilişkilerini bir öğrenme kuralına göre ve bu hata değerini kullanarak ayarlar. Art arda yapılan ayarlamalar, sinir ağının hedef çıktıya giderek daha fazla benzeyen çıktı üretmesine neden olur. Yeterli sayıda ayarlamadan sonra eğitim, belirli kriterlere göre sonlandırılabilir [6-7].

YSA modellemesinin geri yayılma algoritması, çok katmanlı ileri beslemeli ağların eğitimi için en uygun yöntem olarak kabul edilir (Şekil 1). Yapay nöronlar, ağırlıklı ara bağlantılarla çok girdili doğrusal olmayan süreçler olarak modellenir. Bir geri yayılma ağının eğitimi için algoritma, önerilen yaklaşıma göre geliştirilebilir (Denklem 1). Burada X_j ağdaki girdileri, w_{ij} hatayı azaltmak için kullanılan ağırlık değerini, Q_i ise eşik değerini ifade etmektedir. Ayrıca f_i modele uygulanan fonksiyon iken y_i modelin tahmin sonucudur (Denklem 1) [6-7].



Şekil 1. Basit bir YSA için Örnek Mimari Yapı [6-7]

$$y_i = f_i \left(\sum_{j=1}^n w_{ij} x_j + Q_i \right) \quad (1)$$

2.1. Çimento ve Betonunun Basınç Dayanımına Etki Eden Faktörlerin Yapay Sinir Ağı (YSA) Metodu İle Analizi

Çalışmanın bu bölümünde kullanılan analiz metodu YSA'dır. YSA insan davranışının temeli olan öğrenme mekanizmasına başvurarak beyin işlevlerini bilgisayarlı bir şekilde yansıtmaya çalışır. Öğrenebilme yetenekleri sayesinde alınan örnekleri kullanarak, algoritmik çözümlerin olmadığı veya bulunamayacak kadar karmaşık algoritmik çözümlerin olduğu problemlere uygulanabilir. Verileri işleyebilme yetenekleri sayesinde YSA, parametrik yaklaşımlardan daha esnek ve güçlü olduğu için tercih edilmiştir. Bu kapsamda taranan literatürün ayrıntıları sırasıyla verilmiştir.

Dantas ve arkadaşları [8] yapmış oldukları çalışmada; beton içeren inşaat ve yıkım atıklarının basınç dayanımını, YSA modelleri geliştirerek tahmin etmeye çalışmışlardır. İnşaat ve yıkım atıklarını içeren betonların 3,7,28 ve 91 günlük verileri kullanılmıştır. Modelleri oluşturmak için kullanılan deneysel sonuçlar literatürden toplanmıştır. Toplamda, YSA modellemesi için 1178 veri kullanılmıştır. Eğitim aşamasında verilerin %77.76 'sı ve test aşamasında %22.24 'ü kullanılmıştır. Modeli oluştururken, bir çıktı parametresini elde edilmesi için 17 girdi parametresi kullanılmıştır. Hem eğitim hem de teste elde edilen sonuçlar YSA'nın 3,7,28 ve 91 günlük basınç dayanımını tahmin etmek için potansiyel kullanımını kuvvetli bir biçimde göstermektedir. Sonuçlar istatistiksel metotlar ile birlikte yorumlandığında, çıktı değerlerinin deneysel değerlere çok yakın olduğunu

gözlemişlerdir. Bu sebeple yapmış oldukları tahminin doğruluğunu ortaya koyarak literatüre katkıda bulunmuşlardır.

Bir başka çalışmada Nasuf ve Özbakır [8]; çalışmalarında Agregat hammaddesinin fiziksel özelliklerinin beton dayanımına etkisini YSA ile araştırmışlardır. Çalışmalarında uygulamayı YSA'nın Geriye Yayılım Öğrenme Algoritması ve deneysel metodu karşılaştırarak yapmışlardır. Betonun, büyük çoğunluğunu oluşturan agregat dışındaki tüm bileşenleri sabit tutarak 7 ve 28 günlük basınç dayanımı testleri yapılmıştır. Geliştirdikleri YSA modelinde giriş katmanları agregatların fiziksel özellikleri, çıkış katmanında ise betonun 7 ve 28 günlük dayanım sonucunu değerlerini kullanmışlardır. Modelin öğrenme kapasitesini arttırabilmek için giriş ve çıkış katmanları arasına gizli katmanlar koymuşlardır. Deneysel metotta ise agregatların fiziksel ve mekanik özelliklerini ölçerek, deneylerinde özgül ağırlığı $31,7 \text{ gr/cm}^3$ olan CEMI 42,5 R tipi çimento kullanmışlardır. Betonun oluşturan agregatların fiziksel ve mekanik özellikleri 21 farklı parametre ile ifade edilmiştir. 2 farklı YSA modeli kurularak, modelin girdilerini agregatların özellikleri olarak belirlenmiş, çıkış parametresi ise beton dayanımı olarak belirlenmiştir. Toplam 334 numune alınarak yapılan çalışmada, 250 adet veri YSA eğitim verisi olarak kullanılmıştır. 84 tanesi ise YSA'nın eğitim verisini oluşturmuştur. Yapmış oldukları çalışmalar neticesinde deneysel metotları ve YSA'yı kıyasladıklarında tahmin değerlerinin birbirlerine çok yakın olduğunu görerek 7 ve 28 günlük değerleri başarı ile tahmin etmişlerdir.

Aynı yöntemle farklı bir test yapan Çağlar ve arkadaşları [9], yapay sinir ağları ile betonarme kirişlerin hasar analizi tahminini yapmaya çalışmışlardır. Basit mesnetli izotropik kirişlerin kesme dayanımlarını tanımlamak için geliştirilen birçok çalışmaya ek olarak YSA geri yayılım algoritması ile alternatif bir çalışma ortaya koymuşlardır. Bu alanda yapılan 24 deneysel çalışma neticesinde 12 adet veriyi YSA modelini eğitmek için kullanmışlardır. Geriye kalan 12 veriyi ise test aşamasında kullanmışlardır. İki farklı YSA modeli geliştirilmiştir ve ilk YSA modelinde, girdi katmanı değerleri için yedi parametre kullanmışlardır. İkinci modelde ise ilk modelden alınan parametre ile tamamlanmıştır. Gizli katman sayısının bir olarak geliştirildiği bu modelde, YSA performans sonuçlarının grafiğe dökülmesi ile literatüre farklı bir bakış açısı kazandırılmıştır

Yüzer ve arkadaşları [10], yüksek sıcaklık etkisinde kalan betonun basınç dayanımı ve renk değişimi ilişkisini yapay sinir ağları yöntemi ile tahmin etmeye çalışmışlardır. Yapmış oldukları çalışmada, yüksek sıcaklığın ve söndürme türünün betonun fiziksel ve mekanik özelliklerine etkileri deneysel metotlarla incelenmiştir. Akabinde Yapay Sinir Ağları yönteminden yararlanarak, renk değişimi ve ultrases

geçiş hızı ile basınç dayanımı arasındaki ilişkileri araştırmışlardır. Çalışmada CEM I 42.5 R çimentosu, ve farklı sayı-çeşitte hammaddeler kullanılarak üretilen betonlar, farklı yüksek sıcaklıklarda çeşitli deneylere tabi tutulmuştur. Problem, geri yayılım algoritmaları ve çok katmanlı bir YSA modeli ile tahmin edilmiştir. Deneysel çalışma bir parametresi de CEMI 42.5 R'i içeren dört farklı aşamada gerçekleştirilmiştir. YSA tahminlemesi ise iki farklı model ile oluşturulmuştur. Modelin girdi katmanında betonun dayanımını etkileyen dört farklı parametre, çıktı katmanında ise betonun basınç dayanımı yer almıştır. YSA modelinde 47 veri kullanılmıştır. Bunlardan 38 tanesi veriyi eğitmek için kullanılırken, 9 tanesi ise veriyi sınama için kullanılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda lineer regresyon yapılarak korelasyon katsayısının yüksek olduğu ortaya konulmuştur. Sonuçları bir başka YSA analizi ile de sınayarak hemen hemen aynı sonuçları elde etmişlerdir (Hegazy ve Ayed'in yöntemi). Çalışmanın genel olarak sonuçları incelendiğinde, tahminlerin ortalama %95,34 oranında doğru olduğunu saptamışlardır.

Bir başka çalışmada Wang ve arkadaşları [11], çelik cürufunun mineral bileşimlerini değiştirerek hidrasyon aktivitesinin artırılması üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışma, çelik cürufunun çimentolu özelliklerini iyileştirmenin yollarını araştırmayı amaçlamaktadır. Çalışmada kullanılan çelik cürufunun spesifik yüzey alanı $458 \text{ m}^2/\text{kg}$ iken, kullanılan çimentonun spesifik yüzey alanı $312 \text{ m}^2 / \text{kg}$ 'dir. Çin Ulusal Standardı GB 175-1999'a uygun olarak 42.5 kuvvet derecesinde Portland çimentosu ile çalışmalarını yürütmüşlerdir. Orijinal çelik cürufundan başka iki tür çelik cürufu, orijinal çelik cürufunun iki parça halinde elenmesi ile elde edilmiştir. Çelik cürufu-A, orijinal çelik cürufunun toplam kütlelerinin % 81'ini oluşturan, 61m'den küçük parçacıkların bölümünü temsil eder. Çelik cürufu-B ise diğer kısmı temsil etmektedir. 3, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları Çin Ulusal Standartları GB/ T17671-1999'a göre test edilerek sonuçlar elde edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, çelik cürufunun çimentolu fazının silikat ve alüminattan oluştuğunu göstermektedir, ancak bu fazların büyük parçacıkları çelik cürufunun çimentolu özelliklerine çok küçük bir katkı sağlamaktadır. RO (Reverse Osmosis) fazı (CaO-FeO-MnO-MgO katı çözeltisi), Fe_3O_4 , C_2F ve f-CaO, çelik cürufunun çimentolu özelliklerine katkıda bulunmamaktadır. Bazı büyük parçacıkların giderilmesiyle daha çimentolu ve daha az RO fazlı yeni bir çelik cürufu elde edilebilir. Bu yeni çelik cürufu, orijinal çelik cürufundan daha iyi çimentolu özelliklere sahiptir. Büyük parçacıklar beton için, ince agregalar olarak kullanılabilir olarak bulunmuştur.

Benzer bir konuyu ele alan Slonski [12], YSA kullanarak, yüksek performanslı betonun basınç dayanımı tahmini için model seçim yöntemlerinin karşılaştırmıştır. Bu çalışmanın temel amacı, yüksek

performanslı betonun basınç dayanımı tespitinde, otomatik olarak en uygun sinir modellerini oluşturan üç istatistiksel stratejiyi tanıtmak ve karşılaştırmaktır. Girdilerden, su miktarı ve süper akışkanlaştırıcı arasındaki korelasyon katsayısı 0.66'dır. Basınç dayanımı ile çimento miktarı arasındaki lineer korelasyon katsayısı ise 0.50 olarak bulunmuştur. Bu da basınç dayanımı ve çimento arasında güçlü bir ilişki olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak; yüksek performanslı beton karışımının basınç dayanımının, bir beton karışımı bileşeninin miktarlarını ve betonun yaşını tanımlayan sekiz girdi bileşeninden ileri beslemeli katmanlı sinir ağı kullanılarak doğru bir şekilde tahmin edilebileceğini göstermiştir.

Özcan ve arkadaşları [13], silika duman betonunun uzun vadeli basınç dayanımı tahmininde yapay sinir ağları ile bulanık mantık modellerini karşılaştırmıştır. Kullanılan çimento, özgül ağırlığı 3,16 olan CEM I 42,5R tipi Portland çimentosudur. Blaine spesifik yüzey alanı ise 3350 cm²/g 'dir. CEM I tipi çimentonun ve silis dumanın kimyasal bileşiminde; SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MgO, SO₃, K₂O, Na₂O maddeleri yer almaktadır. Özgül ağırlık ve birim ağırlık, sırasıyla 2.32 ve 245 kg/m³'tür. Silika dumanının 45 mm'lik elek üzerinde kalan kısmı %4.8 'dir. Çakıl %1.3 emme değerinde maksimum 16 mm nominal boyutta tespit edilmiştir ve doymuş yüzey kuru (SSD) koşulundaki nispi yoğunluğu 2.70'dir. Kullanılan kumun absorpsiyon değeri %1.8 ve SSD koşulundaki nispi yoğunluğu 2.61 'dir. Sonuçlar incelendiğinde, silika dumanının 28 güne kadar kısa sürede basınç dayanımını etkilediğini, ardından 28 günden sonra silika dumanının basınç dayanımı üzerindeki etkisini azalttığını göstermiştir. Neticede yapılan çalışmada, YSA ve FL'nin silis duman betonunun, basınç dayanımını öngörmede alternatif yaklaşım olabileceğini göstermiştir. Aynı zamanda YSA ve FL arasındaki R² açısından yapılan karşılaştırma, YSA'nın FL sonuçlarından daha iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir.

Babu ve Kumar [14] yapmış oldukları çalışmada, öğütülmüş tanecikli yüksek fırın cürufunun (ÖYFC) betondaki etkinliğini araştırmışlardır. Çalışmada 175 karışımdan ASTM tip I (283 ± 391 m² / kg aralığında inceliği olan) normal Portland çimentosu kullanılmıştır. Normal şartlar altında sertleştirilen 70 betondan oluşan karışımlar değerlendirilmiştir. Betonda, mineral katkı maddesi olarak kullanılmak üzere ASTM C989 tarafından belirtilen minimum karakteristiklere (350 ila 465 m²/kg, SiO₂ %31.1 ile % 38.59 ve CaO % 32.8 ile %43.9 arasındadır) uyan elementler kullanılmıştır. Bileşenlerin değişim yüzdeleri% 10 ile% 80 arasında değişmektedir. İnce akarsu olarak doğal nehir kumu kullanılmış ve kaba agreganın azami büyüklüğü 10 ila 20 mm arasında belirlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, fark edilen değişiklik, silindirden küp kuvvetine olan değişiklik olarak görülmüştür ve 55 ± 70 MPa güç aralığında bulunan betonlar için tek bir 0.9

faktörü kullanılarak düzeltilmiştir. Su ile çimento esaslı malzemelerin, farklı değişim yüzdelerinde basınç dayanımı ilişkilerine oranı, bütün betonlar için 28 günlük sonuçları bulunmuştur. Günlük kompresör GGBS'yi içeren% 30'a varan yerine geçen betonların kuvvetleri, normal betonlarınkinden biraz daha fazlayken ve diğer tüm yüzdelerde ilişkiler normal betonlarınkinin altında elde edilmiştir. Farklı cüruf değişim yüzdeleri nedeniyle oluşan değişikliklerin, uçucu kül durumunda karşılık gelen değişikliklerden daha küçük olduğu da gözlenmiştir. Dayanım değerlerini tüm değiştirme seviyelerinde normal betona yakın bir seviyeye getirmek için, su-çimentolu malzeme oranları uygulanarak değişiklik yapılmıştır. Sonuçlar incelendiği zaman; değer artışları 28 günde, "genel güç verimliliği faktörü (k)", %10 ile %80 arasında değişen yüzde değişim seviyeleri için 1,29 ile 0,70 arasındadır. Genel olarak; bu yöntemle, ÖYFC seviyeleri ile %10 ila 80 arasında değişen, 20 ila 100 MPa arasında değişen betonların kestiriminin, normal betonlarda da aynı olan 0.94'lük bir regresyon katsayısı ile sonuçlandırıldığı bulunmuştur.

Kumar ve arkadaşları [15] granüle yüksek fırın cürufunun mekanik aktivasyonu ve bunun portland cüruf çimentosu özelliklerine ve yapısına etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında; Chattisgarh (Hindistan) eyaletindeki entegre çelik tesislerinden birinden granüle yüksek fırın cürufu örneği kullanmışlardır. Cürufun kimyasal bileşimi (ağırlıkça% olarak): SiO₂ - 33.1, Al₂O₃ - 21.6, Fe₂O₃ - 0.87, CaO - 33.0, MgO - 8.85. [(CaO + MgO + Al₂O₃) / SiO₂] ve [(CaO + MgO + 1 / 3Al₂O₃) / SiO₂ + 2 / 3Al₂O₃] olarak tanımlanan cürufun, bazlığı sırasıyla 1.9 ve 1'dir. Cürufun cam içeriği %93 'dür. Alınan %40 cüruf, %55 klinker ve % 5 alçı içeren ticari portland cüruf çimentosudur. Çalışmada, tipik olarak erken yaşlarda (7-20 gün) kuvvet azalması gösterirken, %50-70 mekanik olarak aktif cüruf içeren AMCXS numunelerinde, erken kuvvet (3 ve 7 gün) artmıştır. Mekanik aktivasyon nedeniyle, 1 gün kuvvetinde belirgin bir artış gözlenmiştir. Mekanik modifiye edilmiş çimentoda da %45 yüksek fırın cürufu kullanıldığında benzer bir gözlem rapor edilmiştir. Dayanımdaki artış, değiştirme seviyesindeki artışla daha az belirgin hale gelmiştir. %95 cüruf (örn. AMC95S) içeren numuneler hariç AMCXS %70 cürufu numuneleri için, IC-A'dan 3 ve 7 gün dayanım da daha yüksek bulunmuştur. AMC70S'nin 28 günlük gücü ticari çimentodan (IC-A) 2 kat daha yüksek bulunmuştur. Cüruf muhtevasında% 70'in üzerinde bir artışla 28 günlük dayanım düşmeye başlamıştır. AMC80S ve AMC85S için 28 günlük dayanım IC-A'dan yüksektir. Bununla birlikte, AMC95S, IC-A'dan daha düşük bir güç göstermiştir. Çalışmanın ana sonuçları şunlardır: Cürufun mekanik aktivasyonu, erken dayanım gelişimi üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir. Düşük erken dayanım gelişimi, geleneksel portland cüruf çimentosu içindeki cüruf oranının artırılmasında önemli bir engeldir. Aktive edilmiş

klinker ve cüruf, aynı kökenli %40 oranında cüruf içeren bir ticari çimento karşısında mukavemete zarar vermeden cürufun %85'ine kadar cürufu değiştirilmesinin mümkün olduğu bulunmuştur.

Farklı bir çalışmada Ni ve Wang [16] yapmış oldukları çalışmada, betonun basınç dayanımını yapay sinir ağları ile tahmin etmeye çalışmışlardır. Çıktıyı etkileyen faktörler ile 28 günlük basınç dayanımıdır. Kullanılan çimento Çin standartlarındaki 425 ve 525 no'lu Portland çimentosudur. Yapılan deneyde yuvarlatılmış ve kırılmış, maksimum boyutu 31,5 ve 40,0 mm olan iki çeşit kaba agrega kullanılmıştır. İnce agrega modülü 1.9 ila 3.4 mm, su / çimento oranı 0.35 ile 0.70 arasındadır. Çimento dozu ise 257 ile 543 kg/m³ arasında değişmektedir. İki çeşit süper akışkanlaştırıcı, FE ve FDN, katkı maddesi olarak seçilmiştir. İki çeşit beton numunesi dökülmüştür. En fazla 40 mm olan kaba agregalar için ilk cins, 150 150 mm kübik boyutlara sahiptir. Diğeri ise maksimum 31,5 mm büyüklüğündeki kaba agregalar için 100 100 mm'lik kübik boyutta kullanılmıştır. Bunlar, bir kütleme kabinde (% 95'in üzerinde nispi nem, sıcaklık 232 °C) 28 gün boyunca sertleştirilmiştir. 65 karışıma karşılık gelen 28 günlük basınç dayanımı elde edilmiştir. En fazla 31,5 ve 40,0 mm boyutlarında yuvarlatılmış ve ezilmiş olmak üzere iki çeşit kaba agrega kullanılmıştır. İnce agrega modülü 1.9 ila 3.4 mm, su / çimento oranı 0.37 ila 0.70 arasında değişmekte ve çimento dozu 263 ila 570 kg / m³ arasında değişmektedir. Verilerin modele entegre edilmesi sonucunda, bazı etki faktörlerine dayanarak betonun 28 günlük basınç dayanımını tahmin etmenin hızlı bir yolunu sağlayan YSA modelleri oluşturularak doğru tahminler elde edilmiştir.

Topçu ve arkadaşları [17] hafif bir betonun basınç dayanımını yapay sinir ağları (YSA) ile tahmin etmeye çalışmışlardır. Çalışmalarında YSA modeline ek olarak SONREB modeli ile de çalışma yapmışlardır. Deneysel çalışmalarında, Ultrases ve Schmidt okumalarının aynı numunelerde yapılması amacıyla, farklı serilerde bir kenarı 15 cm olan hafif agrega ile küp numuneler üretmişlerdir. Kullanılan çimento miktarı 450 kg/m³, 100 kg/m³ kireç taşı tozu ve 50 kg/m³ uçucu külün toplamı ince malzeme miktarını oluşturmaktadır. Karışımlardaki su oranı %35'tir. Çalışmada kullanılan Ultrases geçiş süresi ve Schmidt çekici okumaları; 3, 7, 28 ve 90. günlerde basınç dayanımı testine tabi tutulmuştur. YSA modelindeki tahminleme süreci sonucunda, test verilerinin güvenilirlik derecesi % 96 çıkarken, deneysel verilerin tahmin edildikten sonraki güvenilirlik derecesi % 90 çıkmıştır. Yapılan çalışmaların ortak noktası olarak çıkan güvenilirlik testleri ve grafiklerinden elde edilen sonuçlara göre, deneysel çalışmanın ve YSA modelinin birbirlerine çok yakın ölçüde uyumlu olduğudur. Sonuç olarak YSA ile oluşturulan modelin tahminleme sonuçları güvenilir ve doğru çıkmıştır. Buna ek olarak hata değerlendirmesi aşamasında YSA modelinin %4.5 ile deneysel

çalışmadan çok daha düşük oranda hata vermesi ile YSA modelinin daha iyi sonuç verdiği sonucuna varılmıştır.

Diğer bir çalışmada Bagel [18] çalışmasında, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı içeren üç harçlı çimentoların dayanım ve gözenek yapısını incelemiştir. Sabit çalışma kabiliyetine sahip, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı içeren harmanlanmış çimento harçları, performanslarını düz Portland çimento harcı ve cüruf çimentosu harcı ile karşılaştırmak amacıyla, basınç dayanımı ve cıva sızması için test edilmiştir. Çalışmada kullanılan malzemeler; Portland çimentosu, yüksek fırın cürufu ve silika göre silisli sürekli granülometri kumu, harç yapımında kullanılan cüruf tur. Çalışmalar, 28 günlük cüruf aktivite endeksi ile karakterize edilmiştir. Her karışım için, bağlayıcı madde, kum ve suyla karıştırılarak 20 mm küp numune hazırlanmıştır. Silika dumanı ve cüruf tozları çimento ile birlikte karıştırılıp, kalıplarda 24 saat normal sertleşmeden sonra (%98 RH, 20 ± 0.5 °C), numuneler çözülüp 20 ± 0.5 °C'de suda saklanmıştır. Sıkıştırma testleri 1,7,28 ve 90 günlerde yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda; üçlü karışımlarda cürufun bulunması, silika dumanı inceliğinden kaynaklanan su talebinin artmasının, çimento-silika duman harçlarında olduğu gibi ifade edilmediğini ve dolayısıyla basınç dayanımındaki artışın w / b'ye bağlı olarak düşmediğini kanıtlar. Dolayısıyla, silika dumanı, karışıma su azaltıcı katkı eklenmese bile, daha büyük hacimlerde çimento harçlarına ilave edilebilir. Ayrıca, cüruf-silika dumanı karışımı bu harçlardaki çimentonun, çimento-silika duman karışımlarındaki silika dumanından daha fazla miktarda kullanabilmesini sağlar. Çimentonun, harçlarda kısmi olarak değiştirilip, cürufun kullanılması aynı işlenebilirlik ile sadece Portland çimentosu ile benzer harçtan biraz daha yüksek su geçirgenliğine sahip bir malzemeyle sonuçlanır. Neticede bu cüruf harcına silika dumanının eklenmesi, geçirgenliği daha da arttırmıştır

Prasad ve arkadaşları ise [20] yapmış oldukları çalışmada; YSA kullanarak, yüksek hacimli uçucu kül ve kendiliğinden yerleşen beton ile yüksek performanslı betonun basınç dayanımını tahmin etmeye çalışmışlardır. Kullanılan çimentonun içeriği; su/çimento, su/bağlayıcı, su/toz, ince agrega/toz, kaba agrega /toz, yüksek oranda su azaltıcı /toz, uçucu kül/bağlayıcı ve silika/bağlayıcılardan meydana gelmektedir. SCC için bu oranlar giriş değişkeni olarak tanımlanmıştır. Çalışma kapsamında normal portland çimentosu ile yapılan ve normal şartlarda sertleştirilen yaklaşık 300 beton numunesi değerlendirilmiştir. Çalışmada, 28 günlük basınç dayanımı dışında, çökme akışı da öngörülmüştür. YSA modelinde yer alan giriş parametreleri; çimento içeriği ve su/çimento, su/bağlayıcı, su/toz, ince agrega/toz, kaba agrega/toz, yüksek aralık su düşürücü/toz, VMA/toz, uçucu kül/bağlayıcı ve silika/bağlayıcı oranları olarak 10 tane'dir. Normal dereceler için SCC veya HPC'de

yüksek hacimli uçucu kül ile bile, %3-4 mikrosilika ilave edildiğinde, 28 gün sonunda hedef kuvvetine ulaşma olasılığı yeterince yüksek görülmüştür. Son olarak, önceki çalışmalarda YSA'nın aksine bu çalışmada sunulan ağ, betonun yaklaşık 30 ila 60 MPa arasındaki çok çeşitli basınç dayanımları üzerindeki basınç dayanımlarını öngörebilmektedir.

Siddique ve arkadaşları [21] yapay sinir ağları kullanarak, kendiliğinden yerleşen ve dip külü içeren betonun basınç dayanımı tahmini çalışması yapmışlardır. Bu çalışmada ele alınan temel parametreler; çimento içeriği, kum içeriği, kaba agrega içeriği, uçucu kül içeriği, su / toz oranı ve süper akışkanlaştırıcı dozajıdır. YSA-I için kullanılan altı ana değişken: Çimento içeriği; uçucu kül, ince agrega (kum), iri taneli agrega, su-toz, süper akışkanlaştırıcıdır. YSA-II için kullanılan sekiz ana değişken ise: çimento, uçucu kül, ince agrega (kum) içeriği, alt kül (ince agreganın kısmen değiştirilmesi olarak), iri taneli agrega, su-toz, su, süper akışkanlaştırıcıdır. Doğrusal olmayan değişkenleri içeren iki sorunu modellemek için basit bir geri yayılım sinir ağı modeli oluşturulup sonuçlar incelendiğinde; yapay sinir ağını kullanarak yapılan modelleme, literatürdeki verilerde, 28 gün sonra, YSA-I'de 0.9'un üzerinde bir korelasyon katsayısına sahip olan basınç dayanımı için yapıldığı görülmüştür. Geliştirilen modeller, deneysel olarak elde edilen veriler için her yaşta daha iyi bulunmuştur. YSA-I'deki toz içeriği için maksimum etki gözlenmiş (çimento + uçucu kül) ve 90 günlük kuvvet için YSA-II hariç gözlemlenmiştir. İnce agrega başka herhangi bir agrega tipi ile değiştirilmediğinden, önem faktörü YSA-I 'de ince agregalar için 30 olarak gözlenmiştir. YSA-II için, ince agregalar (kum+dip külü) için 30 ila 40 arasındadır; alt kül iri taneli agregalar, YSA-II'nin tüm modellerinde minimum önem faktörü gösterdiği görülmüştür. Yapılan çalışma sonuçları ile birlikte doğru bir tahmin sergilenerek literatüre kaydedilmiştir

Pal ve arkadaşları [21], Öğütülmüş tanecikli yüksek fırın cürufunun betondaki hidrolik aktivitesini incelemişlerdir. Etkili bir kısmi çimento değiştirme malzemesi olarak kullanılan çelik imalat endüstrisinin, bir yan ürünü olan öğütülmüş granül yüksek fırın cürufunun (ÖYFC), betonun birçok performans özelliğini iyileştirdiği kanıtlanmıştır. ÖYFC'nin reaktivitesinin, cüruf kaynağına, kullanılan hammaddenin tipine, yöntem ve soğutma hızına göre değişen cüruf özelliklerine bağlı olduğu bulunmuştur. Mevcut çalışma, 7 ve 28 günlerde (HI7 ve HI28) Cürufun Hidrolik İndeksi (HI) ile cürufun etki özelliklerini, yani cam içeriğini, inceliği ve kimyasal bileşimi arasında çoklu regresyon analizi kullanarak yeni bir ilişki ortaya koymayı amaçlamaktadır. Çalışma, çeşitli kaynaklardan 37 cüruf örneği üzerinde yapılmıştır. HI7, HI28 ile önemli cüruf özellikleri, yani SiO₂, CaO, MgO, Al₂O₃, cam içeriği ve Blaine inceliği arasında bu tür bir korelasyon elde etmek için çaba

gösterilmiştir. İlk denklem SiO₂ ve cürufun cam içeriği kullanılarak geliştirilmiştir. Ayrıca, literatürde sıkça belirtilen kompozisyon modüllerinden ikisi (C/S) ve ((C + M + A)/S), Denklemleri oluşturmak için cam içeriği ile birlikte dahil edilmiştir. Sonuçta, cürufun önemli fiziksel ve kimyasal özellikleri (SiO₂,CaO,MgO,Al₂O₃,cam içeriği ve Blaine inceliği) HI7 elde etmek için eşzamanlı olarak hesaba katılmıştır. Sonuç olarak; HI'lar, cürufun en önemli fiziksel ve kimyasal özellikleri, yani SiO₂,CaO,MgO,Al₂O₃,cam içeriği ve Blaine'nin 7 ve 28 günlerinde inceliği ile güçlü bir ilişkisi olduğu bulunmuştur. Bu çalışmada geliştirilen denklemleri kullanarak, cürufun reaktivitesinin bulunmadığı durumlarda bile, cürufun fiziksel ve kimyasal özelliklerini bilerek, cürufun reaktivitesi belirlenmiştir. Cüruf karakteristiklerindeki geniş çeşitlilikteki varyasyonlar bu denklemlerde hesaba katılarak; bu durum yalnızca HI'yi değil aynı zamanda cürufun 7 ve 28 gündeki güç performansını da tahmin ettiği öne sürülmüştür

Bilim ve arkadaşları [23] çalışmalarında, öğütülmüş granül yüksek fırın cüruf betonunun basınç dayanımını tahmin etmek için yapay sinir ağları çalışması yapmışlardır. Beton karışım parametreleri üç farklı su - çimento oranı (0,3,0,4 ve 0,5), üç farklı çimento dozu (350, 400 ve 450 kg m³) ve dört kısmi cüruf değişim oranı (%20,% 40,60) % ve %80) ile çalışmalarını tamamlamışlardır. Kullanılan çimento, özgül ağırlığı 3.16 g /cm³ olan ASTM Tip I normal Portland çimentosu (PC 42.5 N/mm²) dur. Blaine spesifik yüzey alanı 3250 cm²/g ve kimyasal bileşimi, SiO₂ Al₂O₃ Fe₂O₃ CaO MgO SO₃ LOI Na₂O K₂O 'dan oluşmaktadır. Nemli kürlenmiş örneklerin (22 Å ± 2 C) basınç dayanımları 3, 7, 28, 90 ve 360. günlerde ölçülmüştür. Sonuçlar incelendiğinde, ağırlıkla cüruf değişimi, Portland çimentosu betonunun kontrolüne kıyasla kısa vadede betonların gücünü azalttığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte, uzun vadede cüruf içeren beton, normal Portland çimentosu betonununkine eşdeğer veya daha büyük bir nihai mukavemet sergilemiştir. Cüruf değişim seviyesinin artmasından kaynaklanan güç kaybı, erken yaşlarda daha belirgin olduğu sonucuna varılmıştır. Bununla birlikte, güç kaybı uzun vadede ortadan kalkmış ve cüruf içeren beton, normal Portland çimentosu betonununkine eşdeğer veya daha yüksek dayanım geliştirdiği görülmüştür. Normal Portland çimentosu betonunun kontrolü ile karşılaştırıldığında, su-çimento esaslı malzeme oranındaki artış, özellikle yüksek oranda cüruf içeren betonun dayanımını daha da azalttığı ispatlanmıştır.

Alshihri ve arkadaşları [24] araştırmalarında, yapay sinir ağları ile 3,7,14 ve 28 günlük kürlenme sonrası hafif beton karışımlarının basınç dayanımını tahmin etmeye çalışmışlardır. Sıkıştırma mukavemeti, sekiz değişkenli bir fonksiyon olarak modellenmiştir ve girdi parametreleri: kum, su / çimento oranı, hafif ağırlıkta ince agrega, hafif ağırlıkta kaba agrega, çözeltilde

kullanılan silis dumanı, çimentoya ek olarak kullanılan silika dumanı, süper yumuşatıcı ve kür süresidir. Çıktı parametresi ise basınç dayanımıdır. Çalışmada yerel olarak üretilen sıradan bir Portland çimentosu kullanılmıştır. Çimento içeriği sırasıyla yaklaşık 450, 400 ve 350 kg/m³ olarak kullanılmıştır. Veriler test edilip sonuçlar incelendiğinde, iki YSA uygulamasından, bir hafif beton karışımlarının 3,7,14, ve 28. gün basınç dayanımı tahmininde geri yayılım ve kademeli bir ilişki tarif edilmiştir. Sonuçlara göre, kaskad korelasyonlu sinir ağ modelinin, geri yayılma ağı çalışmalarına göre daha iyi performans gösterdiği ve çok hızlı bir şekilde öğrendiği gözlenmiştir.

Ji ve arkadaşları [25], yapay sinir ağlarına dayanan somut karışım oranlı bir tasarım algoritması geliştirmişlerdir. Çalışmada kullanılan malzemeler Çin'de üretilmiş olup, çimento 42.5 Portland çimentosudur. Birinci sınıf bir uçucu kül (Çin Standardı) kullanılmıştır. Süper plastikleştirici TW-7, naftalen tipidir. Kullanılan kaba agregası, maksimum 16 mm partikül büyüklüğüne sahip kesintisiz dereceli kırma çakıl ve ince agregası nehir kumudur. On sekiz grup beton karışımı oranları belirlenmiştir. İlk dokuz grup normal beton olup, on ile on sekiz arasındaki gruplar, uçucu kül ve süper akışkanlaştırıcı ile karıştırılmış uçucu kül betonudur. YSA modeli dört girdi parametresi ve bir çıktı parametresinden oluşmaktadır. Araştırmaları sonucunda, betonun karışım oranı ile belirlenen betonun davranışları (dayanım, çökme ve diğerleri), çimento sınıfı ve agregası ve benzeri yapıların niteliği gibi diğer parametrelerin sabit tutulması durumunda beş parametreye bağlı olduğu iddia edilmiştir. Önerilen algoritma tarafından tasarlanan betonun daha düşük çimento ve su içeriğine, daha yüksek dayanıklılığa, daha iyi ekonomik ve ekolojik etkilere sahip olmasını beklemişlerdir.

Parichatprecha ve Nimityongskul [26] yapay sinir ağları kullanılarak yüksek performanslı betonun dayanıklılığının analizini yapmışlardır. Model, önceki araştırmaların yanı sıra deneylerden elde edilen 86 veri seti kullanılarak geliştirilmiş, eğitilmiş ve test edilmiştir. Modeli doğrulamak için, regresyon denklemleri gerçekleştirilmiş ve eğitilmiş sinir ağı ile karşılaştırılmıştır. Test öngörüsünün ortalama mutlak yüzde hatası (MAPE) sonuçlar % 13,88 ve mutlak varyans oranı (R²) 0.9741 olarak bulunmuştur. Betonun klorit penetrasyon direnci, herhangi bir su bağlayıcı oranıyla, çimentoyu değiştirmek için en az %20 uçucu kül kullanılarak önemli ölçüde iyileştirilebilmektedir. Herhangi bir su bağlayıcı oranı seviyesinde, çimento en az %5 silis dumanı ile değiştirilirken, betonun klorür iyonlarının geçirgenliği ihmal edilebilir düzeyde çok düşük seviyeye kadar sınıflandırılabilir. Silika dumanının artırılması, klorür iyonlarının penetrasyon kabiliyetini, ufalanmış uçucu külden daha yüksek bir dereceye kadar azaltmaktadır. Silis dumanının çok ince bir parçacık olduğu ve çimento ve uçucu kül ile karıştırıldığında daha yüksek kimyasal reaktiviteye

sahip olduğu belirtilmiştir. Eğitilmiş sinir ağları kullanılarak yapılan benzetim dayanıklılık modeline dayanarak, HPC'yi dayanıklılık açısından tasarlamak için optimum çimento içeriği 450–500 kg /m³ aralığındadır.

Tayfur ve arkadaşları [26] bulanık mantık ve yapay sinir ağları ile yüksek dayanımlı betonun basıncını tahmini çalışması yapmıştır. Bu çalışmada kullanılan çimento, sıradan portland çimentosudur. ASTM C 494'e (veya süperplastikleştirici) (ASTM 2002a) göre Tip F olarak sınıflandırılan, % 42 katı partikül içeren melamin bazlı, silis dumanlı (SD), yüksek aralıklı, su azaltıcı bir karışım kullanılmıştır. Miktarları 500,550,600,650 ve 700 kg/m³ olan beş farklı bağlayıcı içeriği kullanılmıştır. Türkiye standartlarına uygun bir sınıflandırma elde etmek için dört farklı agregası grubu (kırılmış kireçtaşı) bir araya getirilmiştir. Maksimum toplam boyut 25 mm'dir. Agregaların derecelendirilmesi sabit tutularak ve ince agregaların kaba agregalara oranı, bütün karışımlarda 40 /60'dır. Su içeriği 6 cm'lik bir çökme değeri elde etmek için ayarlandı ve buna göre su / çimentolu malzeme oranı yaklaşık 0.26 'dır. Süper akışkanlaştırıcı içeriği, tüm karışımlar için toplam bağlayıcı miktarının % 3'üdür. 15 cm'lik küp numuneleri hazırlanarak ve test yaşlanıncaya kadar 23 ° C'de su içinde kürlenmiştir. Tüm karışımların basınç dayanımları, 3,7 veya 28 gün sonra belirlenmiştir. Yöntemlerle elde edilen veriler sonucunda, SD içeren betonların (%5 SD ve 650 kg/m³ bağlayıcı içerikli betonlar hariç) ölçülen dayanımları her yaş için SD içermeyenlerden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. YSA'lar ve FL modelleri, yüksek dayanımlı betonların gücünü tahmin etmede iyi olduğu sonucuna varılmıştır.

Atici [27] çalışmasında, çok değişkenli regresyon analizi ve yapay sinir ağı kullanarak mineral katkı betonunun dayanımını tahmin etmiştir. Çalışmada, sıradan Portland çimentosu (PC 42.5 MPa) kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan çimentonun özgül ağırlığı 3,11 g/cm³ ve Blaine spesifik yüzey alanı 3100 cm²/g 'dır. Modeli tahmin edebilmek için çalışmada yirmi yedi beton karışımı kullanılmıştır. 20 ± 2 ° C sıcaklıkta ve %65 ± 5 oranında nispeten nemli bırakılmıştır. Tüm örnekler 3,7, 28, 90 ve 180 günlük kuruma sürelerinden sonra test edilmiştir. Genel olarak, tüm numunelerin basınç dayanımları 3,7 ve 28 günlerde artma oranı, 90 günden belirgin şekilde daha az bulunmuştur. Regresyon analizinde ise, üretim öncesi karışım betonunun tahmini için basınç dayanımı bağımlı bir değişken olarak kabul edilirken, çimento, yüksek fırın cürufu ve kürlenme süresi bağımsız değişken olarak belirlenmiştir. Modelin ve istatistiksel analizlerin sonuçları incelendiğinde; farklı kürlenme sürelerinde (3,7,28, 90 ve 180 günlerde) beton karışımındaki basınç dayanımı tahminine YSA'nın uygulanması, doğrusal olmayan fonksiyonel ilişkilerin hesaplanması açısından daha uygun bulunmuştur.

Sarıdemir ve arkadaşları [28] herhangi bir deney yapmadan öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu içeren betonların miktarını tahmin etmek için YSA ve bulanık mantık kullanmıştır. Karışımlar; 3,7,14, 28,63,90,119, 180 ve 365 günlükken test edilmiştir. Kürlerin sekiz ayrı kısmı kontrol karışımı olarak hazırlanmış, dördü ise 250,300,350 ve 400 kg/m³ çimento içerikli karışım tasarımları için hazırlanmıştır. Çimento içerikli karışımlardan dördü 175, 210,245 ve 280 kg /m³ olacak şekilde belirlenmiştir. Geriye kalan 12 beton karışımı, aynı birim su içeriğine (168 kg/m³) sahiptir. Çimentolu malzemelerin karşılık gelen birim içeriği (su-çimento oranı) azaldıkça 400'den 622 kg/m³'e yükseltilmiştir. Sonuç olarak, öğütülmüş granül yüksek fırın cüruf betonunun basınç dayanımı değerleri cüruf ve su oranlarının değişimi ile etkilendiği görülmüştür. Ayrıca günden güne basınç dayanım değerlerinin değiştiği saptanmıştır. Böylece yapay sinir ağlarında ve bulanık mantık modellerinde, kısa hata oranları ile çok kısa bir sürede herhangi bir deney yapmadan tahmin edilebileceği sonucuna varılmıştır.

Bir başka çalışmada Kewalramani ve Gupta [30], yapay sinir ağları üzerinden ultrasonik nabız hızını kullanarak beton basınç dayanımı tahmini yapmışlardır. Bu çalışmada, YSA'nın yanı sıra çoklu regresyon analizi de kullanılmıştır. Analiz, sıkıştırma stres dalgalarının hızını ölçen bir yöntem (UPV) ile desteklenmiştir. Çalışma iki farklı şekil ve boyutta iki farklı beton karışımı üzerinde yapılmıştır. 100 mm x 150 mm (A Silindirleri) ve 80 mm x 150 mm (B Silindirleri) boyutunda silindirik numuneler ve 150 mm'lik (A Küpleri) ve 100 mm'lik (B Küpleri) küp numuneleri ile çalışma yapılmıştır. Beton numuneleri UPV için laboratuvarında, basınç dayanımı 7,28,183 ve 365. günlük sürelerde test edilmiştir. Beton numuneleri yedi farklı kütleme tekniği kullanılarak kürlenmiştir. Geleneksel kütleme yöntemlerinin yanı sıra, göllenme ve serpme, örnekler 3 ve 7 günlük bir süre boyunca beş farklı renkli polietilen membran tabakaları kullanılarak kürlenmiştir. Ağırlıkların arasında büyük farklılıklar nedeniyle, farklı büyüklükteki küpler ve silindirler için ayrı ayrı yapılmıştır. İki yöntem arasında karşılaştırma yapılırsa; yapay sinir ağlarının, betonun basınç dayanımını daha etkin bir şekilde tahmin etmek için kullanılabilirliğini göstermektedir.

Naderpour ve arkadaşları [31] çalışmalarında, çok sayıda deneysel veriyi yapay sinir ağları kullanarak, elyaf takviyeli polimer(frp) ile sınırlı betonun basınç dayanımı elde etmek için yeni bir yaklaşım geliştirilmiştir. Altı girdi parametresi, Dairesel beton numunesinin mm cinsinden çapı, dairesel beton numunesinin mm cinsinden yüksekliği, FRP mm cinsinden toplam kalınlığı, FRP'nin kasnak yönünden çekme dayanımı, kısıtlanmamış betonun MPa cinsinden basınç dayanımı, MPa'daki FRP'nin elastik modülüdür. YSA modellemesinde beton ve FRP'nin özellikleri gibi giriş düğümleri olarak kullanılan parametrelere sahip olan çıktı parametresi ise FRP ile

sınırlı betonun basınç dayanımı olarak belirlenmiştir. Levenberg-Marquardt algoritması, giriş vektörlerini ve hedef vektörleri rastgele eğitim, doğrulama ve test dahil üç gruba ayırmıştır. Sinir ağlarının geliştirilmesiyle, FRP-sınırlı betonun basınç dayanımı, beton numunenin çapı ve yüksekliği, toplam FRP kalınlığı, dairesel yönde FRP'nin gerilme dayanımı, FRP'nin elastik modülü ve basınç dayanımı olmak üzere altı girdi parametresi ile ilgili olduğu sonucuna varmışlardır. YSA modelinin deneysel sonuçları öngörmedeki ortalama hatası % 9'dan düşükken, diğer üç model için ortalama hataların %13'ten fazla olduğu tespit edilmiştir. Böylelikle, önerilen model, mevcut deneysel verilerle doğrulanarak ve iyi bir uyum gösterdiği belirtilmiştir.

Tritnik ve arkadaşları [32], ultrasonik nabız hızı ve yapay sinir ağları kullanılarak beton dayanımı tahmini yapmışlardır. Agregat etkisi, ilk beton sıcaklığı, çimento tipi, çevre sıcaklık ve su-çimento oranı kendi deneyleriyle belirlenmiştir. Çalışmada, CEM II/A-S, 42.5R, CEM I, 52.5R, CEM I, 42.5N ve CEM I, 42.5N SR. olmak üzere dört tip çimento kullanılmıştır. Deneysel çalışmanın sonuçlarını, taze betonun ilk sıcaklığının, çevre sıcaklığının, çimento türünün ve su-çimento oranının, sunulan değerler arasındaki ultrasonik dalga hızı-betonun basınç dayanımı ilişkisi üzerinde önemli bir etkisi olmadığını ve statik dayanım, dinamik dayanım ve genç betonun Young modülü değerlerinin güvenilir olabileceğini göstermiştir.

Sobhani ve arkadaşları [33] somut bileşenleri girdi değişkenleri olarak ele alarak, topaksız betonun 28 günlük basınç dayanımını tahmin etmek için çeşitli regresyon, YSA ve bulanık mantığı temel alan Uyarlamalı Ağ Tabanlı Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS) modelleri inşa edilerek, eğitilmiş ve test edilmiştir. Bu çalışmada, Tip II Portland çimentosu ve silis dumanı çimento esaslı malzemeler olarak kullanılmıştır. Ayrıca, bu çalışmada % 99.0' dan fazla SiO₂ içeren silisli dolgu maddesi kullanılmıştır. Sonuçlar neticesinde, karma tasarım optimizasyonunda, yapay sinir ağı ve ANFIS modelleri önerilmektedir.

Chandwani ve arkadaşları [34] hazır beton karışımının çökme analizini genetik algoritmalar (GA) kullanılarak modelleyerek, yapay sinir ağlarını eğitmişlerdir. Çalışma için; çimento, uçucu kül, kum (ince agregat olarak), kaba agregat 20 mm, kaba agregat 10 mm, katkı, su-bağlayıcı oranı ve karşılık gelen çökme değerinden oluşan 560 karışım oranından oluşan beton tasarım karışımı bileşenlerinden oluşan veriler kullanılmıştır. Model için; hazır beton karışım oranı bileşenleri, yani çimento, uçucu kül (PFA), kum, kaba agregat (CA) 20 mm, kaba agregat (CA) 10 mm, karışım ve su bağlayıcı oranı, yedi giriş parametresi kullanılmıştır. Buna bağlı olarak, beton çöküşünün değeri, sinir ağı için çıkış parametresini oluşturmuştur. Eğitilmiş hibrit model, belirli bir beton tasarım karışımı için, hızlı bir şekilde beton birikintisinin öngörülmesinde farklı tasarım

karışımı oranlarında çok sayıda deneme yapılmadan kullanılabilirliği öngörülmüştür.

Yaprak ve Karacı [35] polipropilen lifli betonların yüksek sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonraki basınç dayanımlarını yapay sinir ağları modeli ile tahmin etmişlerdir. Çalışmada, polipropilen lif oranına ve sıcaklığa bağlı olarak betonun basınç dayanımının değişimini tahmin edebilecek şekilde; geriye yayımlı, iki girişli, tek çıkışlı, on nörona sahip tek gizli katmana sahip bir YSA oluşturulmuştur. Çalışmada kullanılan çimento tipi CEM I 42.5, polipropilen lif, doğal kum, akışkanlaştırıcı ve kırık taş kullanılmıştır. Çökme 12-14 cm aralığında sabit tutulmaya çalışılmıştır ve su-çimento oranı 0.53 olarak belirlenmiştir. Çalışmada 150x300 mm lik kırk sekiz adet silindirik numune üretilmiştir. Deneysel betonlar 20,400,600 ve 800 derece sıcaklığa maruz bırakılarak dayanımları ölçülmüştür. YSA ile üretilen modelde, girdi parametreleri polipropilen lif miktarı ve sıcaklık değişimleri, çıktı parametresi betonun basınç dayanımıdır. YSA modelinde 32 deneysel çalışma yapılmıştır, ağı eğitimi için 20 veri, testi için ise 12 veri seti kullanılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda YSA modelinin düzgün sonuçlar verdiği gözlenmiş ve polipropilen lifin betonun basınç dayanımına olumsuz olarak etki ettiği görülmüştür.

Hasgül ve Anagül [36] yapmış oldukları deneysel çalışmanın yapay sinir ağları ile birlikte geliştirilerek beton dayanımını tahmin etmişlerdir. Çalışmada Portland 42,5 Çimentosu kullanılmıştır. YSA modeli tek karakteristik üzerine kurularak eğitilmiştir ve giriş parametreleri; portland çimentosu 42.5, kompoze portland çimentosu 42,5, uçucu kül, su, kırılmış kum, yıkanmış kum, katkı maddeleri ve kırılmış taş kullanılmıştır. Çıktı parametresi ise basınç dayanımı olarak belirlenmiştir. Kurulan YSA modelinde 80 veri kümesi içinden 22 tanesi modeli test etmek amacıyla kullanılmıştır. Deneysel verilerin analizinde ise regresyon analizi kullanılmıştır. Regresyon analizi için 82 veri kullanılmıştır. Regresyon analizinin bağımsız değişkenleri YSA'nın girdi parametreleri ile aynıdır, bağımlı değişkeni ise basınç dayanımı olarak belirlenmiştir. Çalışmanın sonucunda deneysel çalışma (regresyon) ve YSA'nın sonuçları karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre YSA modelinin regresyona göre çok daha küçük hata değerine sahip olduğu görülmüş, aynı zamanda sapmaların da daha az olduğu tespit edilmiştir.

Lai ve Serra [37] çalışmalarında, en önemli karışım tasarım parametreleri atandığında, çimento yapılarının basınç dayanımını değerlendirmeyi amaçlamıştır. Çalışmada kullanılan veriler, sekiz karışım için yapılan geniş kapsamlı deneysel ölçümleri ifade etmektedir. Oluşturulan YSA geri yayılım algoritması ile eğitilmiş ve 240 veri ile çalışılmıştır. YSA modelindeki girdi parametreleri, Avrupa standartlarına uygun olarak üretilen, 28 günlük plastik harçlı çimento, ince kum, kalın kum, ince agrega, kalın agrega, agrega-çimento

oranları, su-çimento oranları ve plastikleştiricilerdir. Çıktı parametresi ise basınç dayanımı olarak belirlenmiştir. Çalışmanın sonucunda YSA ile başarılı bir şekilde betonun basınç dayanımını tahmin edebilecek bir model geliştirmişlerdir.

Azar ve arkadaşları [38], silis dumanı içeren beton karışımları üzerinde 28 gün boyunca Portland çimentosunun basınç dayanımını ölçerek, yaptıkları deneylerin sonuçlarına göre, belirli oranlarda silis dumanı ve kağıt atık külü içeren betonun basınç dayanımının arttığını göstermiştir.

Gholampour ve arkadaşları [39], döküm kumu/geri dönüştürülmüş ince agrega ve uçucu kül/öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu oranlarının bir kombinasyonu ile üretilen betonun basınç dayanımını incelemiştir. Sonuçta, betonun basınç dayanımı, su-çimento oranı, agrega-çimento oranı, test yaşı ve yüzde çimento/metakaolin oranlarına dayalı olarak YSA yaklaşımıyla tahmin edilmiştir.

2.2. Çimento ve Betonun Basınç Dayanımına Etki Eden Faktörlerin Farklı Tahmin Metotları ile Analizi

Çalışmada kullanılan diğer tahmin metotları ise yapay zeka metotları (Genetik Algoritma (GA)), bulanık mantık metotları (ANFIS), ANOVA ve Regresyon gibi yöntemlerdir. Bu metotların YSA ile olan benzer tarafları göz önüne bulundurulduğunda hepsinin tahmin metodu olduğu söylenebilir. Bu metotların güvenilirliği YSA kadar yüksek olabilmektedir. Farklı yöntemlerin seçilmesi, yöntemler arasındaki sonuçların kıyaslanması açısından önem arz etmektedir. Buna göre detaylı olarak ele alınan literatür taramasından elde edilen sonuçlar irdelenmiştir.

Özel ve Topsakal veri madenciliğini kullanarak betonun basınç dayanımını tahmin etmeye çalışmışlardır. Çalışmalarında CEM I 42,5 R tipi çimento, en büyüğü 16 mm olan kalker agregası, hiper akışkanlaştırıcı katkı ve kırma kum kullanılmıştır. Çalışmaları için, çimento miktarları %1 olarak sabit miktarda tutulmuştur. Veri madenciliği ile betonun basınç dayanımını belirleyebilmek için girdi parametrelerini; karışım, numune alma zamanı, numune boyutu ve çimento dozajı olarak belirlenirken, çıktı parametresi ise basınç değerleri olarak belirlenmiştir. Verilerin %80'i test verisi olarak değerlendirilirken, %20'si analiz verisi olarak değerlendirilmiştir. Çalışmalarının sonucunda, KStar (R= 0.9369) algoritmasına ait korelasyon katsayısının en yüksek olduğunu belirleyerek betonun basınç dayanımını tahmin etmişlerdir. Betonun basınç dayanımını etkileyen en önemli unsurların sırasıyla; çimento miktarı, numune boyutu, numune alma zamanı ve karıştırma metodu olduğunu ortaya koymuşlardır [40].

Başka bir çalışmada Prošek ve arkadaşları [41], yapmış oldukları deneysel çalışmalarda susuz klinkerin atık betonda bulunduğunu ve öğütülerek geri kazanılabileceğini göstermişlerdir. Aynı zamanda Portland çimentosunun macunlarda geri dönüştürülmüş malzeme ile değiştirilmesi, gerilme mukavemetinde önemli bir artışa neden olurken, çimentonun ince tozları daha yüksek miktarlarda artık klinker içerdiğinde ve ince tanelerin miktarı Portland çimentosu ağırlığının %30'unu geçmediğinde basınç dayanımındaki bozulmanın ihmal edilebilir olduğunu göstermişlerdir.

Benzewr şekilde Ma ve Qian [42], laboratuvarında yüksek sıcaklıkta ısıtma ile hazırlanan alkali sülfatların çimento hidrasyonu ve sertleşme özelliklerine etkilerini incelemiştir. Sonuçlara bakıldığında klinker kaynaklı alkali sülfatın betonun basınç dayanımı üzerinde olumsuz etkisinin önemli ölçüde yüksek olduğu bulunmuştur. Dayanımı arttırmak için ise çimentodaki $\text{Na}_2\text{Oeq}/\text{SO}_3$ molar oranının <0.5 olması gerektiği savunulmuştur.

Gholampour ve arkadaşları [43], çimento ikame malzemeleri olarak uçucu kül (FA) ve öğütülmüş yüksek fırın cürufu (GGBS), kum ikame malzemeleri olarak döküm kumu (FS) ve geri dönüştürülmüş ince agrega (RFA) kullanımı, beton ve inşaat ve yıkım (C&D) atıklarının çevre üzerindeki etkisini azaltmak için yeşil bir yapı malzemesi. FS/RFA ve FA/GGBS kombinasyonu ile üretilen betonun dayanımını deneysel metotlarla ölçmüştür. 17 beton karışımı hazırlanmış ve her karışımın işlenebilirlik, yoğunluk, basınç, yarmada çekme ve eğilme mukavemeti, elastik modülü ve su emmesini değerlendirmek için testler yapılmıştır. FS ve RFA içeriğinde %100'e varan bir artışın betonun basınç dayanımında azalmaya neden olduğu gösterilmiştir. Bununla birlikte, %25 kum ikamesinde RFA içeren beton, geleneksel betona kıyasla biraz daha yüksek basınç dayanımına sahip olduğu tespit edilmiştir.

Ele alınan çalışmada Vakhsouri ve arkadaşları [44], kendiliğinden yerleşen betonun (SCC) basınç dayanımını, karışım oranlarını ve çökme akışını öngören bir model tasarlamaya çalışmıştır. Çalışmalarında ANFIS modellerini on sekiz girdi parametresi kombinasyonunda kullanarak, girdi olarak basınç dayanımı, çökme akışı ve karışım oranları esas alarak aralarında bir ilişki kurmak üzere tasarlamışlardır. Uygulanan veriler, daha önce yapılan deneysel çalışmalardan alınmıştır. Daha önce yapılan deneysel çalışmaların 55'i, 28 günlük SCC basınç dayanımı ANFIS modellerinde açıklanmıştır. Karışım tasarım oranlarının ve SCC'nin taze özelliklerinin basınç dayanımı üzerindeki etkisi üzerine kapsamlı bir çalışma yapmak için, bu parametrelerin 18 kombinasyonu analiz edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. ANFIS analizinde, toz hacmini, su / toz oranı ile değiştirmek hata boyutunu 0,08'e

çıkartmıştır. İnce agrega hacminin, harç hacmine oranını % 45'e kadar artırılması ise basıncı düşürmüştür.

Yuan ve arkadaşları [45], hibrit modellerde genetik tabanlı algoritmalar ve ANFIS methodu ile beton basınç dayanımını tahmin etmişlerdir. Beton kalitesini etkileyen yapısal ve yapılandırılmamış faktörleri araştırmışlardır. Çalışmalarında iki hibrit model önerilmiştir. Bunlardan biri genetik tabanlı algoritma, diğeri ise adaptif ağ tabanlı bulanık çıkarım sistemidir (ANFIS). Genetik tabanlı algoritma için, geri yayılım yapay sinir ağının (BP-YSA) ağırlıklarını ve eşiklerini optimize etmek için genetik algoritma (GA) uygulanmıştır. ANFIS modeli için iki farklı bina yapısı incelenmiştir. 28 günlük basınç dayanımı için 180 farklı beton karışımı kullanılmıştır. Tüm testler, standart prosedürler kullanılarak hazırlanan 15 cm'lik silindirik beton numuneleri ile yapılmıştır. Önerilen modellerin sonuçları sırasıyla, GA tabanlı YSA modelinde ve ANFIS modelinde R^2 ; 0.813 ve 0.950 olarak bulunmuştur. GA tabanlı YSA modelinde ve ANFIS modelinde sırasıyla RMSE 2.22 ve 1.46 olarak bulunmuştur. Analizlerin sonuçları, iki hibrit model ANFIS ve GA-YSA'in YSA modelinden daha iyi performans gösterdiğini göstermektedir. Çalışmada ortogonal tasarım kullanılması; YSA ve bulanık mantık tekniklerinin entegrasyonunu içeren ANFIS'in tahmin doğruluğu, parametre belirleme ve kullanım kolaylığı açısından 28-CCS için güvenilir bir model olduğunu onaylamıştır.

Diğer bir çalışmada Tesfamariam ve Najjaran [46], ANFIS metoduna Mix-Desing yöntemini entegre ederek betonun basınç dayanımı tahmin etmeye çalışmışlardır. Çalışmalarında bulanık bir modelin geliştirilmesi ve somut dayanımın hesaplanması için uyarlanabilen, nöro-bulanık çıkarım sistemi önermişlerdir. Bu çalışmada literatürden alınan, A ve B Şirketi olmak üzere iki şirketin gerçek karışım oranlarından yararlanılmıştır. İki şirket arasındaki temel malzeme özellikleri, kullanılan kum hariç, benzerdir. B Şirketi yalnızca doğal kum kullanırken, A Şirketi hem doğal hem de kırılmış kum karışımlarını kullanmıştır. Model doğrulaması için, Model A ve B'nin her biri için toplam 24 veri kullanılırken, Model A-B için toplam 48 veri kullanılmıştır. Model doğrulama için bulanık çıkarım sistemi modeli öngörülmesi ve gerçek beton kuvveti kullanılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde, önerilen model literatürde rapor edilen gerçek verilerle test edilmiş ve doğrulanmıştır. Karşılık gelen mutlak ve göreceli modellerin R^2 'si: Model A için (0.999, 0.984), Model B, için (0.970, 0.995) ve Model AB için (0.999, 0.998) olarak tespit edilmiştir. Önerilen ANFIS modelinin, mutlak girdi parametrelerini bulabilmek için uygun bir yaklaşım olduğu bulunmuştur.

Mirrashid ve arkadaşları [47], ANFIS metodunu kullanarak manyetit agrega içeren betonun basınç

dayanımını tahmin etmişlerdir. Çalışmada; Manetit agregalardan yapılan betonun, farklı büyüklüklerde ve betonun farklı yaşlarına bağlı olarak 7,28 ve 42 günlük basınç dayanımının nasıl değiştiği ANFIS methodu ile tahmin edilmiştir. Kullanılan çimento Portland II çimentosudur. Betonun basınç dayanımını belirlemek için iki nöral bulanık model belirlenmiştir. İlk model 25 mm'lik maksimum kaba agrega ebadından oluşurken, ikinci model, 12,5 mm'lik maksimum kaba agregalardan oluşmaktadır. Çalışmanın sonuçlarına bakıldığında; modelin %98 korelasyon katsayısı ve düşük hata oranıyla test edilmesi ANFIS'in, betonun basıncı tahmin etmede uygun olduğunu göstermiştir.

Khademi ve arkadaşları [48], Yapay Sinir Ağı, Uyarlanabilir Nöro Bulanık Çıkarım Sistemi ve Çoklu Doğrusal Regresyon kullanarak geri dönüştürülmüş agrega betonunun basınç dayanımını tahmin etmişlerdir. Parametreler arasında çimento, doğal ince agrega, geri dönüştürülmüş ince agrega, doğal kaba agregalar (10 mm), doğal kaba agregalar (20 mm), geri dönüştürülmüş kaba agregalar (20 mm), geri dönüştürülmüş kaba agregalar (20 mm), katkı ve su bulunmaktadır. Boyutsuz parametreler arasında su-çimento oranı, kum-agrega oranı su/toplam malzeme oranı, geri dönüştürülmüş agreganın doğal agrega hacme göre ve agrega çimento oranına değiştirme oranıdır. Yapılan analizler sonucunda, 28 günlük geri dönüşümlü agrega betonunun basınç dayanımı tahmininin, YSA ($R^2=0,91$) ve ANFIS ($R^2=0,90$) tarafından MLR'ye ($R^2=0,60$) göre daha iyi yapıldığı sonucuna varılmıştır. Başka bir deyişle, her üç modelin test aşamasını karşılaştırarak, betonun ön karışım tasarımında MLR modelinin kullanılmasının daha iyi olduğu tespit edilmiştir. YSA ve ANFIS modellerinin karışım tasarım optimizasyonunda kullanılması önerilmiştir.

Farklı bir çalışmada Gorninski ve arkadaşları [49], çalışmalarında polimer beton bileşiklerinin esneklik modülünün incelenmiş ve polimer beton ile portland çimento betonunu ANOVA analizi ile karşılaştırmışlardır. Çalışmada; ortoftalik veya izoftalik polyester olmak üzere iki tip bağlayıcı kullanılarak, üretilen polimer beton (PC) bileşiklerinin esneklik modülünü değerlendirmek amaçlanmıştır. Kullanılan kompozisyonlar, uygun maliyetli PC'yi tanımlayan önceki bir çalışmadan seçilmiştir. Kullanılan polimer konsantrasyonları, kuru malzemelerin ağırlığının %12'si ortoftalik polyester ve %13'ü izoftalik polyesterdir. Uçucu kül bir dolgu maddesi olarak kullanılmış ve ağırlıkça %8, %12, %16 ve %20 kül içeren bileşimler ile analizler yapılmıştır. Yapılan ANOVA analizi sonucunda ortaya çıkan istatistiksel sonuçlar, yalıtkanlıktaki reçine tipinin ve uçucu kül konsantrasyonunun, izolasyondaki elastikiyet değerleri modülü üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Aynı zamanda faktörler arasında da bir etkileşimin olduğu gözlenmiştir. Uçucu külün konsantrasyonu, her reçine tipi için farklı etkiler

göstermiştir. Bu, izoftalik polyester PC'nin uçucu külün %16'sı ile en yüksek modülü gösterdiği, ortoftalik polyester PC'nin bileşiminde %20 uçucu kül ile en yüksek değeri gösterdiği sonucuna varılmıştır. İstatistiksel analizler, incelenen faktörlerin, yani reçine tipi ve uçucu kül konsantrasyonunun ve aralarındaki etkileşimlerin anlamlı olduğunu göstermiştir

Koçkal ve Özturan [50], hafif uçucu kül agregalarının, yüksek dayanımlı hafif uçucu kül betonlarının üretiminde uygulanabilir özelliklerinin optimizasyonu çalışması yapmışlardır. Hafif uçucu kül agregalarının yüksek dayanımlı hafif uçucu kül beton üretiminde uygunluk için özelliklerinin optimizasyonu, tepki yüzeyi metodolojisi kullanılarak incelenmiştir. Sinterleme parametreleri (sıcaklık, bağlayıcı içeriği ve bağlayıcı tipi) ile deneysel olarak elde edilen üç sonuç arasındaki ilişki (özgül ağırlık, su emme ve kırılma dayanımı) belirlenmiştir. Tahmini tepki yüzeyi modellerinin regresyon parametrelerinin varyans analizi (ANOVA) ile belirlenmiştir. ANOVA seçilen modellerin elde edilen verileri yeterince temsil ettiğini göstermektedir. F değerinin 0,05'ten küçük olması, %95 güven düzeyinde model terimlerinin istatistiksel olarak anlamlı bir uyumsuzluk olduğunu göstermiştir. RSM, deneysel değerlerin, öngörülen modellerin geçerliliğini ve yeterliliğini doğrulayan, öngörülen değerlere makul derecede yakın olduğunu göstermiştir. Modelin iyiliği, R2 katsayısı ile kontrol edilmiştir. Regresyon modelleri; Özgül Ağırlıkta spesifik yerçekimi ve su absorpsiyonu için belirleme katsayısı (R^2) için 0.78 ile 0.98 arasında değişmiştir ($p < 0.05$). Sonuçlar, sıcaklığın kuadratik etkisinin ve sıcaklık ile bağlayıcı içeriği arasındaki etkileşimin, özgül ağırlık için önemli olduğunu göstermiştir

Bir diğer çalışmada Chen ve arkadaşları [51], geri dönüşümlü agrega dolgu malzemelerinin basınç dayanımı ve eğilme dayanımı üzerine duyarlılık faktörleri analizi çalışması yapmışlardır. Çalışmada, 32.5 Standart Portland çimentosu, şehir suyu ve kireç tozu kullanılmıştır. Geri dönüştürülmüş ince agrega, kırma ve eleme işleminden sonra maksimum parçacık boyutu 4.75 mm'den az olan inşaat atığı üreten bir okul binasının onarımından elde edilmiştir. Çeşitli faktörlerin etkilerini daha iyi anlamak için, rejenere tuğla granül ve beton bloktan yapılan 96 örnek ile bir araştırma yapılmıştır. Rejenere tuğla granül içeriği (rejenere tuğla granülü ve beton granül oranı), su - çimento oranı, agrega - çimento oranı, kireç içeriği ve agrega değişim oranı olarak belirlenmiştir. Geri dönüşümlü agrega dolgu duvar malzemelerinin her bir faktör ve seviye arasındaki mekanik özellikleri, basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve eğilme-sıkıştırma oranı ile değerlendirilmiştir. $R = 0.708$ in sonucu olarak; doğrusal modelin ve regresyon denkleminin anlamlı olduğu bulunmuştur. Ek olarak, $FI = 15.6068 (17.6770 / 39.2829) > F_{0.1} (10, 5) = 2.52$ regresyon denklemindeki varyans değerinden, lineer varsayımla elde edilen regresyon denkleminin büyük bir öneme

sahip olduğu görülmektedir. Basınç dayanımı, teorik ve ölçülen değerleri, eğilme dayanımı ve eğilme dayanımı oranları arasındaki farkların sırasıyla 0.1-1.7, 0.02-0.53 ve 0.01-0.08 olduğu görülmüştür. Sonuçlar, su-çimento oranının 0.7-0.8 olduğunu ve özellikle geri dönüşümlü agreganın basınç dayanımının ve bükülme dayanımının iyileştirilmesinde etkili olduğunu göstermiştir. Dolgu duvar malzemeleri ve agrega-çimento oranı, eğilme-sıkıştırma oranındaki en önemli faktör olarak ortaya çıkmıştır

Yine başka bir çalışmada Aldahdooh ve arkadaşları [52], ultra ince hurma yağı yakıt külü içeren, yeşil ultra yüksek performanslı fiber betonarme betonun geliştirilmesine yönelik bir model tasarlamışlardır. Çalışmada sıradan Portland çimentosu kullanılmıştır. Numuneler için basınç dayanımları 7, 14 ve 28 gün sonra test edilirken, direkt çekme dayanımı, eğilme dayanımı için örnekler 7,28 ve 90 gün sonra test edilmiştir. Diğer mekanik özellikler, 28 günlük basınç dayanımı testine tabi tutulmuştur. Çalışmada, Proses faktörleri (portland çimento - çok ince hurma yağı külü oranı) ve (yoğunlaştırılmış silika dumanı - çok ince hurma yağı külü oranı) ile yanıtlar (basınç dayanımı ve akış) arasındaki etkileşim, varyans analizinden (ANOVA) elde edilmiştir. İkinci dereceden kestirim modellerinin kalitesini ölçmek, model terimlerini değerlendirmek ve model terimlerini kontrol etmek için; R^2 belirleme katsayısı, % 95 güven düzeyinde olasılık değeri (P-değeri) ve (t- Test) %5 anlamlılık düzeyi (Prob <0.05) belirlenmiştir. Sinyal / gürültü oranı, 4'ten daha yüksek olan her iki cevap için 66.101 ve 45.87'dir. Bu sonuç, istenen tahmini modeli göstermiş ve öngörülen modellerin doğruluğunu kanıtlamaktadır. Çalışma sonundaki nihai sonuçta belirlenen ölçütler; çimento içeriği 360.25 kg / m³, plastikleştirici içeriği 214.25 kg / m³ ve hurma yağı külü içeriği 290.52 kg / m³ olan 158.28 MPa'lık sıkıştırma kuvvetine sahip yeşil ultra yüksek performanslı fiber takviyeli çimentolu kompozitler üretilmesidir

Phan ve Carino [53], test koşullarının ve karışım oranlarının, yüksek sıcaklığa maruz olan yüksek mukavemetli betonun davranışına etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında amaç; farklı sıcaklıklar ve farklı karışım oranlarına sahip betonların basınç dayanım etkilerini ortaya çıkarmaktır. Çalışmada ASTM (Amerikan Standartları) Tip I Portland çimentosu kullanılarak dört yüksek dayanımlı beton karışımından örnekler alınmıştır. Aynı zamanda, karışımlarda kaba agrega, 5.40 inceliği modülü (FM), 1520 kg /m³'lük kuru çubuk kütleli yoğunluğu olan ve 2.60'lık özgül ağırlığı ile kırılmış kireçtaşı (13 mm nominal maksimum boyut) kullanılmıştır. İnce agrega, 2.85 FM, 1456 kg /m³'lük bir kuru çubuk kütleli yoğunluğu ve özgül ağırlığı 2.63 olan doğal kumdur. Silis dumanı, %54'lük bir katı madde oranı ile bulamaç formunda deneye dahil edilmiştir. Yapılan deneyler; 100, 200, 300 ve 450 C'ye kadar ısıtma için üç teste

tabii tutulmuştur. İstatistiksel olarak anlamlı etkileri tanımlamak için 0,05 ve daha düşük olasılık seviyesi kullanılmıştır. Elastik modülü değerleri, eksik veriler nedeniyle, basınç dayanımı kadar eksiksiz analiz edilememiştir. ANOVA ile yapılan analizde, sıcaklık testi koşulu ve test koşulu-dcm olan iki faktörün etkileşimi olduğu ortaya çıkmıştır. Özetle, ANOVA sonuçları, test koşulunun yüksek sıcaklığa maruz kalma nedeniyle ölçülen güç kaybı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, verilen bir test koşulu ile ölçülen kuvvet kaybı, maruz kalma sıcaklığına ve beton karışımına bağlı olarak ortaya çıkmıştır. En düşük w/cm (0.22) ve düşük maruz kalma sıcaklıkları (100 ve 200 C) için, rezidüel özellik testi ile ölçülen kuvvet kaybı en düşük çıkmıştır. Öte yandan, daha yüksek sıcaklığa maruz kalma (450 C) ve w/cm (0.57) için, rezidüel özellik testinde kuvvet kaybı en yüksek seviyede ölçülmüştür. Bu sonuçların, yüksek sıcaklıkta ölçülen güçle, aynı yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra oda sıcaklığında ölçülen basınç değeri arasında karmaşık bir ilişki olduğu görülmektedir. Bu etkileşimlere bakıldığında, test koşulunun etkisinin maruz kalma sıcaklığına ve w/cm'ye bağlı olduğu tespit edilmiştir

Başka bir çalışmada Tanyıldızı ve Coşkun [54], silis dumanı katkılı hafif betonun fiziksel özelliklerinin parametrelerini belirlemek için ANOVA analizi yapmışlardır. Sıkıştırma ve ayrılma çekme dayanımının deneysel parametreleri için dört seviye silis dumanı (% 0,% 10,% 20 ve % 30) ve iki seviyeli çimento dozajı (400 ve 500 kg/m³) belirlenmiştir. Ayrıca,%20 silis dumanı ve 500 kg / m³ çimento içeriği yüksek değerleri kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan çimento tipi CEM-I 42,5 N tipi Portland çimentosudur. Çalışmada kullanılan Ponza taşının maksimum tane çapı 16 mm'dir. Alınan örnekler 20 °C suda 28 gün boyunca kürlenmiştir. Düşük hata oranlarıyla (%3.25 ve %1.26) yapılan deneyler sonucunda, % 20 oranında silis dumanı ve 500 kg/m³ çimento kullanıldığında, hafif betonun basınç ve yarmada çekme dayanımının en yüksek değer alacağı bulunmuştur. ANOVA analizi sonucunda ise, basınç ve yarmada çekme dayanımı üzerinde en büyük etkiyi sırası ile kullanılan silis dumanı ve çimento dozaj miktarının etkilediği görülmüştür.

Diğer bir çalışmada Lim ve arkadaşları [55], yüksek performanslı beton karışım oranlarında genetik algoritma kullanarak sonuçları yorumlamışlardır. Bu çalışmada, biyolojik evrimsel süreç (doğal seleksiyon ve doğal genetik) üzerine modellenen küresel bir optimizasyon tekniği olan genetik algoritma kullanılarak ve birçok çözüme sahip olabilecek bir probleme yakın yeni bir optimal çözüm bulmak için kullanılmıştır. Yüksek performanslı beton karışımları için saha testinde istenen özelliklere sahip deneme karışımı sayısını azaltmak için öneriler sunulmuştur. Deneysel araştırmada 189 karışım kümesi

kullanılmıştır. Deneyde normal portland çimentosu kullanılarak, 7 günlük basınç dayanımı gözlenmiştir. Çalışma sonucunda; sıkıştırma mukavemetini etkileyen faktörler, su/bağlayıcı oran, su içeriği (kg/m^3), ince agrega oranı, uçucu külün değişim oranı, silis dumanının değiştirme oranı ve hava sürükleyici ajanlardır. Öte yandan, toplam / çimento oranı azaldığında su içeriği sabit tutulursa, su/bağlayıcı oranı azalır ve sonuç olarak işlenebilirlik bir miktar azalır, ancak ciddi şekilde etkilenmediği görülmüştür. Ancak, silis dumanının yüksek performanslı betonun

işlenebilirliğini azaltmada etkili olduğu gözlenmiştir. Çalışmanın sonuçlarına bakıldığında, yüksek performans tasarımı için genetik algoritma uygulayarak; beton karışımlarında, istenen özelliklere sahip deneme karışımı sayısının azaltılabileceğini gözlemlemiştirlerdir.

Çimento ve betonunun basınç dayanımına etki eden faktörlerin yapay zeka ile analizi kronolojik sıra halinde Tablo 1'de özet olarak sunulmuştur.

Tablo 1. Çimento ve Betonunun Basınç Dayanımına Etki Eden Faktörlerin Yapay Sinir Ağı Metodu (YSA) ile Analizi Özet Tablosu

| Çalışma | Problem | Kullanılan Yaklaşım | Doğrulama Parametresi | Kullanılan Parametreler |
|--------------------------------|--|---|---------------------------------|--|
| [36]Lai ve Serra, 1997 | Çimento yapılarının basınç dayanım tahmini | Yapay Sinir Ağı Modeli (Geri yayılım algoritması) | Göreceli hata = 0,05 | Çimento, kum, çimento ağırlığı, agrega, akışkanlık |
| [17]Ni ve Wang, 2000 | Betonun basınç dayanım tahmini | Yapay Sinir Ağı Modeli (Çok katmanlı ileri besleme algoritması) | Toplam hata 0,005 | Çimento, su, kaba agrega, ince kum, çökme, katkı maddeleri, sıcaklık |
| [22]Pal ve diğ., 2003 | Öğütülmüş taneçikli yüksek fırın cürufunun betondaki hidrolik aktivitesinin incelemesi | Deney Tasarımı | R= 0,815 | Cüruf (SiO_2 , CaO, MgO, Al_2O_3) cam içeriği ve Blaine |
| [10]Çağlar ve diğ., 2005 | Betonarme kirişlerin hasar analizi tahminini | Yapay Sinir Ağı Modeli (Geri yayılım algoritması) | Eğitim seti performans eğrileri | Beton, kiriş uzunluğu, kiriş kalınlığı, akışkanlık |
| Hasgül ve Anagül, 2005 | Betonun basınç dayanım tahmini | Yapay Sinir Ağı Modeli (İleri beslemeli algoritma) | $R^2= 0,94$ | Çimento su, uçucu kül katkı maddeleri, yıkanmış kum, kırma kum, kırma taş |
| Ji ve diğ., 2006 | Betonlar için somut karışım oranlı bir tasarım algoritması | Yapay Sinir Ağı Modeli (Geri yayılım algoritması) | SSE = 1.1×10^{-14} | Su-çimento oranı, eşdeğer su-çimento oranı, ortalama macun kalınlığı, uçucu kül-bağlayıcı oranı, ince agregaların tane hacim oranı |
| [30]Kewalramani ve Gupta, 2006 | Beton basınç dayanımı tahmini | Yapay Sinir Ağı Modeli (İleri beslemeli geri yayılım algoritması) | Hata < %25 | Çimento, su |
| Yüzer ve diğ., 2007 | Yüksek sıcaklık etkisinde kalan betonun basınç dayanımı ve renk değişimi ilişkisini | Yapay Sinir Ağı Modeli (İleri beslemeli geri yayılım algoritması) | R= 0,97 | Çimento, (CaO SiO_2 Al_2O_3 Fe_2O_3 MgO SO_3 Kızdırma Kaybı), kalker, silis dumanı, agrega, cüruf, uçucu kül, sıcaklık |
| [13]Özcan ve diğ., 2009 | Silika duman betonunun uzun vadeli basınç dayanımı tahmini | Yapay Sinir Ağı Modeli (İleri beslemeli algoritma) | $R^2=0,994$ | Çimento, Agrega, Silika Dumanı, (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO MgO, SO_3 , K_2O Na ₂ O, LOI) |

| | | | | |
|---|---|---|---------------------------|---|
| [20]Prasad ve diğ., 2009 | Yüksek hacimli uçucu kül ve kendiliğinden yerleşen beton ile yüksek performanslı betonun basınç dayanım tahmini | Yapay Sinir Ağı Modeli (Geri yayılım algoritması) | $R^2=0,91$ | Çimento, su, pudra, uçucu kül, agrega, bağlayıcı madde,mikrosilika |
| [23]Bilim ve diğ., 2009 | Öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu betonunun basınç dayanım tahmini | Yapay Sinir Ağı Modeli (İleri beslemeli geri yayılım algoritması) | $R^2= 0,92$ | Çimento, Agregası, Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu, Plastikleştirici |
| [24]Alshihri ve diğ., 2009 | Hafif beton karışımlarının basınç dayanım tahmini | Yapay Sinir Ağı Modeli (İleri beslemeli geri yayılım algoritması) | $R^2=0,982$ | Çimento, İnce Agregası, Kaba Agregası, Su |
| [26]Parichatprecha ve Nimityongskul, 2009 | Yüksek performanslı betonun dayanıklılığının analizini | Yapay Sinir Ağı Modeli (Geri yayılım algoritması) | $R^2=0,974$ | Çimento, uçucu kül, agrega, su, silika dumanı, süperplastikleştirici |
| [30]Saridemir ve diğ., 2009 | Öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu (GGBFS) içeren betonların miktar tahmini | Yapay Sinir Ağı Modeli (Geri yayılım algoritması) | $R^2=0,981$ | Çimento, su, agrega |
| [32]Tritnik ve diğ., 2009 | Betonun basınç dayanım tahmini | Yapay Sinir Ağı Modeli (Çok katmanlı ileri beslemeli sinir ağı) | $R^2=0,80$ | Çimento,su,sıcaklık,agrega,kum |
| [35]Yaprak ve Karacı, 2009 | Polipropilen lifli betonların yüksek sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonraki basınç dayanım tahmini | Yapay Sinir Ağı Modeli (Geri yayılım algoritması) | $R= 0,99$ | Çimento, doğal kum, kırma tas, polipropilen lif ve akiskanlaştırıcı |
| [12]Slonski, 2010 | Yüksek performanslı betonun basınç dayanımı tahmini | Yapay Sinir Ağı Modeli(İleri beslemeli algoritma) | $R^2= 0,50$ | Çimento, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, su, süperplastikleştirici, agrega |
| [15]Babu ve Kumar, 2010 | Öğütülmüş taneçikli yüksek fırın cürufunun (ÖYFC) betondaki etkinliği | Kimyasal Analiz | Ortalama etki faktörü=0,9 | Yüksek fırın cürufu, çimento,su |
| [18]Topçu ve diğ., 2010 | Hafif bir betonun basınç dayanım tahmini | Yapay Sinir Ağı Modeli (İleri beslemeli geri yayılım algoritması) | $R^2 =0,923$ | Çimento,Su, Katkı, Uçucu Kül, Kireç Taşı Tozu, Doğal Kum, Pomza |
| [31]Naderpour ve diğ., 2010 | Elyaf takviyeli polimer ile sınırlı betonun basınç dayanım tahmini | Yapay Sinir Ağı Modeli (Geri yayılım algoritması) | $R^2=0,968$ | Beton numunenin çapı, yüksekliği, polimer lifin kalınlığı ve çekme dayanımı, rafine olmayan betonun basınç dayanımı |

| | | | | |
|-------------------------------|--|---|---------------------------------|---|
| [33]Sobhani ve diğ., 2010 | Betonun basınç dayanım tahmini | Yapay Sinir Ağı Modeli (İleri beslemeli geri yayılım algoritması) | $R^2= 0.947$ | Kalsiyum oksit (CaO) Silisyum dioksit (SiO ₂) Alüminyum oksit (Al ₂ O ₃) Demir oksit (Fe ₂ O ₃) Magnezyum oksit (MgO) Sodyum oksit (Na ₂ O) Potasyum oksit (K ₂ O) Kükürt trioksit (SO ₃) Tri kalsiyum silikat (C ₃ S) Di kalsiyum silikat (C ₂ S) Tri kalsiyum alüminat (C ₃ A) |
| [12]Wang ve diğ., 2011 | Çelik cürufunun mineral bileşimlerini değiştirerek hidrasyon aktivitesinin artırılması | Termogravimetrik analiz | Termogravimetri = %5,82, %20,08 | Çimento, Çelik cürufu, Al,Mg,Si, Na, P,S,K, CaO, FeO,MnO,MgO ,Fe ₃ O ₄ , C ₂ F |
| [21]Siddique ve diğ., 2011 | Kendiliğinden yerleşen ve dip külü içeren betonun basınç dayanımı tahmini | Yapay Sinir Ağı Modeli (geri yayılım algoritması) | $R^2=0,919$ | Çimento, kum, kaba agrega, uçucu kül, kum, su, dip külü, süperakışkanlaştırıcı |
| [27]Atıcı, 2011 | Mineral katkı betonunun dayanım tahmini | Yapay Sinir Ağı Modeli (Geri yayılım algoritması) | $R =0,89$ | Agrega (SiO ₂ Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃ CaO MgO SO ₃ K ₂ O Na ₂ O LoI Kireç Çözünmeyen kalıntı) Çimento Yüksek fırın cürufu Uçucu Kül |
| [8]Dantas ve diğ., 2013 | Beton içeren inşaat ve yıkım atıklarının basınç dayanımı tahmini | Yapay Sinir Ağı Modeli (Çok katmanlı ileri beslemeli algoritma) | $R^2= 0.971$ | Çimento, Su, Agregası, Geri Dönüşümlü Harç, Kırmızı S |
| [26]Tayfur ve diğ., 2013 | Yüksek dayanımlı betonun dayanım tahmini çalışması | Yapay Sinir Ağı Modeli (İleri besleme algoritması) | $R =0,80$ | Çimento, Agregası, Su CaO,SiO ₂ ,Al ₂ O ₃ ,Fe ₂ O ₃ Na ₂ O,SO ₃ ,LoI,Yerçekimi Blaine |
| [36]Chandwani ve diğ., 2015 | Hazır beton karışımının çökme analizi | Yapay Sinir Ağı Modeli (Geri yayılım algoritması) | $R= 0.979$ | Çimento, Uçucu Kül, Kum, Agregası, Çökeltici, Su Bağlayıcı |
| [9]Özbakır ve Nauf, 2016 | Agregar hammaddesinin fiziksel özelliklerinin beton dayanımına etkisi | Yapay Sinir Ağı Modeli (Geriye Yayılma Öğrenme algoritması) | $R^2 =0,93$ | Çimento, Kül, Kırma Kum, Dere Kumu |
| [38]Azar ve arkadaşları, 2019 | Silis dumanı içeren beton karışımları ve portland çimentosu | Verilerin deney sonuçlarına göre YSA modeli ile önerilmesi | Betonun basınç dayanımı | Silis dumanı, kağıt atık külü içeren betonun, Portland Çimentosu |

| | | | | |
|-------------------------------------|---|--|-------------------------|--|
| [39]Gholampour ve arkadaşları, 2020 | Döküm kumu/geri dönüştürülmüş ince agrega ve uçucu kül, ÖYFC'nin basınç dayanımına etkisi | Su-çimento oranı, agrega-çimento oranı, test yaşı ve yüzde çimento/metakaolin oranlarına dayalı olarak YSA yaklaşımıyla tahmin | Betonun basınç dayanımı | Su-çimento oranı, agrega-çimento oranı, test yaşı ve yüzde çimento/metakaolin oranlarına |
|-------------------------------------|---|--|-------------------------|--|

III. TARTIŞMA

Yapılan geniş çaplı literatür taramalarının sistematik bir şekilde derlenmesi sonucunda, çimento ve betonun içerisinde bulunan bileşenler ve hammaddelerin basınç dayanımını nasıl etkilediği özet bir şekilde sunulmuştur. Konuyla ilgili 1997- 2021 yılları arasında yayınlanmış 1012 çalışma incelenmiş ve analiz edilmiştir. Araştırmaya dahil edilecek olan kriterler göz önünde bulundurularak 52 yayın çalışma için uygun bulunmuş ve çalışmada yer verilmiştir. Yayınlar konu, limit ve bileşen karşılaştırmaları açısından değerlendirilmiştir. Çalışmada Science Direct, Pergamon, Elsevier ve ULAKBİM veri tabanları kullanılmıştır. Çalışmada Türkçe ve İngilizce yayınlar tercih edilmiştir. Ayrıca 'Factors Affecting Compressive', 'Cement Components' anahtar kelimeleri kullanılarak taranmıştır.

Bu kapsamda; çimento ve betonu oluşturan bileşenlerin miktarlarının değişmesi basınç dayanımının değişmesine neden olduğu görülmüştür. Genel olarak ele alınan kürlenme sürelerinin basınç dayanımı üzerinde çok önemli bir etki yarattığı tespit edilmiştir.

Diğer makalelerde [56-59] bildirildiği gibi, C_3A ve $CaCO_3$ karboalüminat hidratları arasındaki reaksiyona girer ve basınç dayanımını etkilediği bulunmuştur. Bunun yanı sıra küçük kireçtaşı ilavelerinin hem basınç dayanımı hem de hidrasyon ısısı üzerindeki etkileri nispeten iyi bilinmektedir, ancak bu etkilerin klinker özelliklerine (örneğin C_3S içeriği), çimentonun inceliğine ve diğer faktörlere olan bağımlılığı hakkında daha az şey bilinmektedir.

- Portland çimentosuna kireçtaşı ilavesi, basınç dayanımı, su talebi, işlenebilirlik, dayanıklılık [1 ± 7] gibi çeşitli çimento özelliklerini önemli ölçüde iyileştirebilir ve ayrıca üretim maliyetlerini düşürebilir [56]. Portland çimentosunun dayanımı arttırmak için ise çimentodaki Na_2Oeq/SO_3 molar oranının <0.5 olması gerektiği savunulmuştur.

- Su-çimento oranının 0.7-0.8 olduğu durumlarda ve özellikle geri dönüşümlü agreganın basınç dayanımının ve bükülme dayanımının iyileştirilmesinde etkili olduğunu göstermiştir. Dolgu duvar malzemeleri ve agrega-çimento oranı, eğilme-sıkıştırma oranındaki en önemli faktör olarak ortaya çıkmıştır.

- Silika dumanının 28 güne kadar kısa sürede basınç dayanımını etkilediğini, ardından 28 günden sonra silika dumanının basınç dayanımı üzerindeki etkisini azalttığını göstermiştir. Aynı zamanda %20 oranında silis dumanı ve 500 kg/m^3 çimento kullanıldığında, hafif betonun basınç ve yarmada çekme dayanımının en yüksek değer alacağı bulunmuştur.

- Sıcaklığın kuadratik etkisinin ve sıcaklık ile bağlayıcı içeriği arasındaki etkileşimin, özgül ağırlık için önemli olduğunu göstermiştir.

- Yüksek fırın cürufunun çimentolara eklenmesiyle basınç dayanımının arttığı görülmüştür. Beton basınç dayanımını etkileyen en önemli unsurların sırasıyla; çimento miktarı, numune boyutu, numune alma zamanı ve karıştırma metodu olduğu belirlenmiştir.

- Normal Portland çimentosu betonunda; su-çimento esaslı malzeme oranındaki artış, özellikle yüksek oranda cüruf içeren betonun dayanımını daha da azalttığı ispatlanmıştır.

IV. SONUÇ

Genel olarak çalışma kapsamında betonun ve çimentonun basınç dayanımına etki eden kriterler ve farklı bileşenler ayrıntılı olarak incelenmiştir. Çalışmada 52 yayının ortak bileşenleri, kriterleri ve birbirinden farklı bileşen ve kriterleri ortaya çıkarılarak sonuçlar ayrıntılarıyla sunulmuştur.

Özetle; C_3A ve $CaCO_3$ karboalüminat hidratları arasındaki reaksiyona girer ve basınç dayanımını etkilediği bulunmuştur. Su-çimento oranının 0.7-0.8 olduğu durumlarda ve özellikle geri dönüşümlü agreganın basınç dayanımının ve bükülme dayanımının iyileştirilmesinde etkili olduğu görülmüştür. Sıcaklığın kuadratik etkisinin ve sıcaklık ile bağlayıcı içeriği arasındaki etkileşimin, özgül ağırlık için önemli olduğu görülmüştür. Silika dumanının 28 güne kadar kısa sürede basınç dayanımını etkilediğini, ardından 28 günden sonra silika dumanının basınç dayanımı üzerindeki etkisini azalttığı görülmüştür. Portland çimentosunun dayanımı arttırmak için ise çimentodaki Na_2Oeq/SO_3 molar oranının <0.5 olması gerektiği savunulmuştur.

Böylelikle; ileriki çalışmalara rehber olabilecek bu çalışmada, yapılan beton veya çimento karışımlarında herhangi bir maddenin değişmesi, miktarının artması veya azalması, uygun sıcaklıkların ve parça büyüklüklerinin değişmesi ve kürlenme günleri değiştiğinde basınç dayanımının nasıl değiştiği anlaşılabilir. Ayrıca çalışmadan elde edilen spesifik bilgiler, gelecekte oluşturulabilecek beton ve çimento karışımları hakkında bilgi edinilmesine yardımcı olabilecektir. Gelecekteki araştırmalar ve çalışmalar; sonuç bölümünde belirtilen maddelerin irdelenmesiyle, yeni ve güncel betonun basınç dayanımı ile ilgili çalışmalarla kıyaslanabilecektir. Beton/çimento karışımları için farklı bileşenlerin eklenip çıkarılması ile oluşabilecek basınç dayanımlarını farklı açılardan da analiz edebileceklerdir.

KAYNAKLAR

- [1] Korkmaz, A.V., (2020). Hammadde Ve Klinker Ögütülebilirliklerinin Çimento Üretiminde Enerji Tüketimine Etkisinin Araştırılması. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 59(3).
- [2] TS EN 197-1 (2002). Genel Çimentolar- Bölüm 1: Genel Çimentolar- Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, Türk Standardları Enstitüsü.
- [3] TS EN 197-2 (2002). Çimento- Bölüm 2: Uygunluk Değerlendirmesi, Türk Standardları Enstitüsü.
- [4] TS EN 196-2 (2002). Çimento Deney Metodları- Bölüm 2: Çimentonun Kimyasal Analizi, Türk Standardları Enstitüsü.
- [5] TS EN 196-21,(2002). Çimento Deney Metodları- Bölüm 21: Klörür, Karbon Dioksit ve Alkali Muhtevası Tayini, Türk Standardları Enstitüsü.
- [6] Yao, X., (1999). Evolving artificial neural networks. *Proceedings of the IEEE*,87(9), 1423-1447.
- [7] Sarle, W.S., (1994). Neural networks and statistical models.
- [8] Dantas A.T.A., Leite M.B., & Jesus Nagahama de K., (2013). Prediction of compressive strength of concrete containing construction and demolition waste using artificial neural networks. *Construction and Building Materials*, 38, 717-722
- [9] Nasuf S.E., & Özbakır O., (2016). Agregaların Fiziksel Özelliklerinden Yola Çıkılarak Beton Dayanımlarının Yapay Sinir Ağları İle Kestirilmesi". *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 4(3) ,165-172.
- [10] Çağlar N., Küyük H.S., & Köksal H.O., (2007).Yapay Sinir Ağları İle Betonare Kirişlerin Hasar Analizi. 2005.
- [11] Yüzer, N., B. Akbaş, & Kızılkanaat A.B. Predicting the compressive strength of concrete exposed to high temperatures with a neural network model, *in TÇMB, 3rd International Symposium Sustainability in Cement and Concrete*, İstanbul.
- [12] Wang, Q., Yan P., & Feng, J., (2011). A discussion on improving hydration activity of steel slag by altering its mineral compositions. *Journal of hazardous materials*, 186(23), 1070-1075.
- [13] Słoński, M., (2010). A comparison of model selection methods for compressive strength prediction of high-performance concrete using neural networks. *Computers & structures*, 88(21-22) 1248-1253.
- [14] Özcan, F., Atiş, C. D., Karahan, O., Uncuoğlu, E., & Tanyildizi, H., (2009). Comparison of artificial neural network and fuzzy logic models for prediction of long-term compressive strength of silica fume concrete. *Advances in Engineering Software*, 40(9), 856-863.
- [15] Babu, K.G., & Kumar, V.S.R., (2000) Efficiency of GGBS in concrete. *Cement and Concrete Research*, 30(7) 1031-1036.
- [16] Kumar, S., Kumar, R., Bandopadhyay, A., Alex, T. C., Kumar, B. R., Das, S.K., & Mehrotra, S.P., (2008). Mechanical activation of granulated blast furnace slag and its effect on the properties and structure of portland slag cement. *Cement and Concrete Composites*, 30(8), 679-685.
- [17] Ni, H.-G., & Wang J.-Z., (2000). Prediction of compressive strength of concrete by neural networks. *Cement and Concrete Research*, 30(8), 1245-1250.
- [18] Topçu, İ.B., Uygunoğlu, T., & İnce H.H., (2010). Hafif Beton Basınç Dayanımının Yapay Sinir Ağlarıyla Tahmini. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 6(1), 19-29.
- [19] Bagel, L., (1998).Strength and pore structure of ternary blended cement mortars containing blast furnace slag and silica fume. *Cement and Concrete Research*, 28(7), 1011-1022.
- [20] Prasad, B.R., Eskandari H., & Reddy B.V., (2009). Prediction of compressive strength of SCC and HPC with high volume fly ash using ANN. *Construction and Building Materials*, 23(1), 117-128.
- [21] Siddique, R., Aggarwal, P., & Aggarwal, Y., (2011).Prediction of compressive strength of self-compacting concrete containing bottom ash using artificial neural networks. *Advances in engineering software*, 42(10), 780-786.
- [22] Pal, S., Mukherjee A., & Pathak S., (2003) .Investigation of hydraulic activity of ground granulated blast furnace slag in concrete. *Cement and Concrete Research*, 33(9),1481-1486.
- [23] Bilim, C., Atiş, C.D., Tanyildizi, H., & Karahan, O., (2009). Predicting the compressive strength of ground granulated blast furnace slag concrete using artificial neural network.

- Advances in Engineering Software, 40(5), 334-340.
- [24] Alshihri, M.M., Azmy, A.M., & El-Bisy, M.S., (2006). Neural networks for predicting compressive strength of structural light weight concrete. *Construction and Building Materials*, 23(6), 2214-2219.
- [25] Ji, T., Lin, T., & Lin, X., (2006). A concrete mix proportion design algorithm based on artificial neural networks. *Cement and Concrete Research*, 36(7), 1399-1408.
- [26] Parichatprecha, R., & Nimityongskul P., (2009). Analysis of durability of high performance concrete using artificial neural networks. *Construction and Building Materials*, 23(2), 910-917.
- [27] Tayfur, G., Erdem, T.K., & Kırca, Ö., (2013). Strength prediction of high-strength concrete by fuzzy logic and artificial neural networks. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(11), 04014079.
- [28] Atici, U., (2011). Prediction of the strength of mineral admixture concrete using multivariable regression analysis and an artificial neural network. *Expert Systems with applications*. 38 (8), 9609-9618.
- [29] Sarıdemir, M., Topçu, İ.B., Özcan, F., & Severcan, M.H., (2009). Prediction of long-term effects of GGBFS on compressive strength of concrete by artificial neural networks and fuzzy logic. *Construction and Building Materials*, 23(3), 1279-1286.
- [30] Kewalramani, M.A., & Gupta, R., (2006). Concrete compressive strength prediction using ultrasonic pulse velocity through artificial neural networks. *Automation in Construction*, 15(3), 374-379.
- [31] Naderpour, H., Kheyroddin, A., & Amiri, G.G., (2010). Prediction of FRP-confined compressive strength of concrete using artificial neural networks. *Composite Structures*, 92 (12) , 2817-2829.
- [32] Trtnik, G., Kavčič, F., & Turk, G., (2009). Prediction of concrete strength using ultrasonic pulse velocity and artificial neural networks. *Ultrasonics*, 49(1), 53-60.
- [33] Sobhani, J., Najimi, M., Pourkhorshidi, A.R., & Parhizkar, T., (2010). Prediction of the compressive strength of no-slump concrete: A comparative study of regression, neural network and ANFIS models. *Construction and Building Materials*, 24(5), 709-718.
- [34] Chandwani, V., Agrawal, V., & Nagar, R., (2015). Modeling slump of ready mix concrete using genetic algorithms assisted training of Artificial Neural Networks. *Expert Systems with Applications*, 42 (2), 885-893.
- [35] Yaprak, H. & Karaci, A., (2009). Polipropilen lifli betonların yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımlarının yapay sinir ağları ile tahmini. *International Journal of Engineering Research and Development*, 2, 23-28,
- [36] Hasgül, Ö., & Anagün, A.S., (2005). Deneysel Sonuçların Analizinde Yapay Sinir Ağları Kullanımı ve Beton Dayanım Testi İçin Bir Uygulama, *V. Ulusal Üretim Araştırmaları Sempozyumu*, İstanbul Ticaret Üniversitesi 133-139.
- [37] Lai, S. & Serra, M., (1997). Concrete strength prediction by means of neural network. *Construction and Building Materials* ,11(2), 93-98.
- [38] Azar, J. P., Najarchi, M., Sanaati, B., Najafzadeh, M. M., & Mirhosseini, S.M., (2019). The Experimental Assessment of the Effect of Paper Waste Ash and Silica Fume on Improvement of Concrete Behavior. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 23(10), 4503-4515.
- [39] Gholampour, A., Zheng, J., & Ozbakkaloglu, T., (2021). Development of waste-based concretes containing foundry sand, recycled fine aggregate, ground granulated blast furnace slag and fly ash. *Construction and Building Materials*, 121004.
- [40] Özel, C. & Topsakal, A., (2014). Veri Madenciliği Kullanarak Beton Basınç Dayanımının Belirlenmesi. *Cumhuriyet Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fen Bilimleri Dergisi*, 35(1), 1-11.
- [41] Prošek, Z., Trejbal, Nežerka, J., Goliáš, V., Faltus, V.M., & Tesárek, P., (2020). Recovery of residual anhydrous clinker in finely ground recycled concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 155, 104640.
- [42] Ma, Y., & Qian, J. (2016). Effect of Alkali Sulfate on Workability, Strength and Volume Stability Related to SCC. Washington DC, USA 15-18 May 2016 Edited by Kamal H. Khayat, 841.
- [43] Gholampour, A., Zheng, J., & Ozbakkaloglu, T., (2020). Development of waste-based concretes containing foundry sand, recycled fine aggregate, ground granulated blast furnace slag and fly ash. *Construction and Building Materials*, 121004.
- [44] Vakhshouri, B., & Nejadi, S., (2018). Prediction of compressive strength of self-compacting concrete by ANFIS models. *Neurocomputing*, 280, 13-22.
- [45] Yuan, Z., L.-N., Wang, & Ji, X., (2014). Prediction of concrete compressive strength: Research on hybrid models genetic based algorithms and ANFIS. *Advances in Engineering Software*, 67, 156-163.
- [46] Tesfamariam, S., & Najjaran, H., (2007). Adaptive network-fuzzy inferencing to estimate concrete strength using mix design. *Journal of*

- Materials in Civil Engineering*, 19(7), 550-560.
- [47] Mirrashid, M., Jafari, M., Akhlaghi, A., & Vahidnia, A., (2013). Prediction of compressive strength of concrete containing magnetite aggregates using Adaptive Neural Fuzzy Inference System (ANFIS). *4th International Conf. Concr. Dev.*, Tehran, Iran.
- [48] Khademi, F., Jamal, S.M., Deshpande, N., & Londhe, S., (2016). Predicting strength of recycled aggregate concrete using artificial neural network, adaptive neuro-fuzzy inference system and multiple linear regression. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 5(2), 355-369.
- [49] Gorninski, J. P., Dal Molin, D. C., & Kazmierczak, C.S., (2004). Study of the modulus of elasticity of polymer concrete compounds and comparative assessment of polymer concrete and portland cement concrete. *Cement and concrete research*, 34(11), 2091-2095.
- [50] Kockal, N.U., & Ozturan T., (2011). Optimization of properties of fly ash aggregates for high-strength lightweight concrete production. *Materials & Design*, 32(6), 3586-3593.
- [51] Chen, Z., Zhang, Y., Chen, J., & Fan, J., (2018). Sensitivity factors analysis on the compressive strength and flexural strength of recycled aggregate infill wall materials. *Applied Sciences*, 8(7), 1090.
- [52] Aldahdooh, M., Bunnori, N.M., & Johari, M.M., (2013). Development of green ultra-high performance fiber reinforced concrete containing ultrafine palm oil fuel ash. *Construction and Building Materials*, 48,379-389.
- [53] Phan, L.T., & Carino, N.J., (2008). Effects of test conditions and mixture proportions on behavior of high-strength concrete exposed to high temperatures. *ACI Materials Journal*, 99 (1,) 54-66.
- [54] Tanyildizi, H. & Coşkun, A., (2013). Varyans analizi (ANOVA) yöntemi ile silis dumanı katkılı hafif betonun mekanik özelliklerine deney parametrelerinin etkilerinin belirlenmesi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 29(3), 227-233.
- [55] Lim, C.-H., Yoon, Y.S. & Kim, J.-H., (2004). Genetic algorithm in mix proportioning of high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(3), 409-420.
- [56] Livesey, P., (1991). Performance of limestone-filled cements, in: R.N. Swamy(Ed.). *Blended Cements in Construction*, Elsevier, London,1 -15.
- [57] Cochet, G., & Sorrentino, F., (1993). Limestone filled cements: Properties and uses, in: S.L. Sarkar, S.N. Ghosh (Eds.). *Mineral Admixtures in Cement and Concrete*, 4, ABI Books, New Delhi, 266 -295.
- [58] Klemm, W.A., & Adams, L.D., (1990). An investigation of the formation of carboaluminates, in: P. Klieger, R.D. Hooton (Eds.). *Carbonate Additions to Cement*, STP 1064, ASTM, Philadelphia, 60 -72.
- [59] Sawicz, Z., & Heng, S.S., (1996). Durability of concrete with addition of limestone powder. *Magazine of Concrete Research*, 48(175), 131-137.

Tedarik Zinciri Yönetiminde Lojistik ve Dağıtım Ağının Etki Seviyelerinin Belirlenmesi ve Tedarikçi Seçimi Optimizasyonu için AHP ve Matematik Programlama Modelini İçeren Yeni Bir Yaklaşım*

*A New Approach Involving AHP and Mathematical Programming Model for Determination of Effect Levels of Logistics and Distribution Network, and Supplier Selection Optimization in Supply Chain Management**

Merve GÜLTEPE¹ , Ebru YILMAZ² 

¹Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Programı
2019 Yılı Mezunu, Adana, Türkiye

²Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Sarıçam, Adana, Türkiye

Öz

Bu çalışmada, ilk olarak, analitik hiyerarşi prosesi (AHP) yöntemi kullanılarak tedarik zinciri yönetiminde lojistik ve dağıtım ağı açısından etkisi olan kriterlerin değerlendirilmesi yapılmaktadır. Bu değerlendirme neticesinde sisteme etkisi en çok olan ana kriter ve alt kriterler belirlenmektedir. Değerlendirme neticesinde hız ana kriteri ele alınmaktadır. Daha sonra, hız kriteri ve dolayısıyla alt kriterleri de kullanılarak bir matematik programlama modeli geliştirilmektedir. Geliştirilen bu modelin çözümünde GAMS optimizasyon yazılımı kullanılmaktadır. Bu çalışmada, geliştirilen bir tedarikçi seçim probleminde, etki eden alt kriterler ve geliştirilen matematik programlama modeli kullanılarak optimum tedarikçi seçimi sağlanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Tedarik zinciri, Lojistik, Dağıtım ağı, AHP, Matematik programlama modeli

Abstract

In this study, first, using analytical hierarchy process (AHP) method, the criteria that have an impact on supply chain management in terms of logistics and distribution network are evaluated. As a result of this evaluation, the main criteria and sub-criteria that have the most important impact on the system are determined. As a result of the evaluation, the speed main criterion is examined. Then, a mathematical programming model is developed using the speed criterion and hence also its sub-criteria. GAMS optimization software is used for the solution of the developed model. In this study, the optimum supplier selection is ensured using the selected sub-criteria and the developed mathematical programming model in a developed supplier selection problem.

Keywords: Supply chain, Logistics, Distribution network, AHP, Mathematical programming model

I. GİRİŞ

Tedarik zinciri kavramı tedarikçi, imalatçı, dağıtıcı gibi çeşitli öğeleri bulunduran bir ağ olup hammadde aşamasından ürünlerin nihai tüketicilere ulaşana kadarki tüm süreçlerdeki ürünlerin ve bilginin akışını yöneten bir sistem şeklinde ifade edilebilir. Tedarik zinciri yönetimi kavramı ise tedarikçi, üretici, müşteri zincirinde yer alan malzeme ve bilgi akışı gibi durumları yönetmek şeklinde belirtilebilir. Tedarik zinciri yönetiminde amaç, işletmelerin üretim kapasitesinin artırılması, piyasaya karşı duyarlılığın artırılması ve tüketiciler ile tedarikçiler arasındaki ilişkilerin iyileştirilmesiyle birlikte işletmenin performansının geliştirilmesidir [1].

Ürünlerin üretildiği yerden alınıp stok yerlerinde tutulması, ürünlerin istenilen yerlere istenilen dağıtım ağı vasıtasıyla ulaştırılması ve bütün bu sürecin planlı, verimli ve hızlı olarak yapılabilmesi lojistik kavramı olarak ifade edilebilmektedir. Bir lojistik faaliyeti, ulaştırmayı, ulaştırma öncesinde işletmeler arasındaki bilgi aktarımı, iletişim kanalları ve ulaştırma sonrasındaki depolama işlemlerini içermektedir [2]. Lojistik yönetimi süreci tedarik

* Bu çalışma, Dr. Öğr. Üyesi Ebru YILMAZ danışmanlığında Merve GÜLTEPE'nin Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalında 2019 Yılında Tamamladığı "Tedarik Zinciri Yönetiminde AHP Ve Matematik Programlama Modeli Kullanılarak Lojistik Ve Dağıtım Ağının Etki Seviyelerinin Belirlenmesi Ve Tedarikçi Seçimi Optimizasyonu [Determination Of Effect Levels Of Logistics And Distribution Network, And Supplier Selection Optimization By Using AHP And Mathematical Programming Model In Supply Chain Management]" İsimli Yüksek Lisans Tezi tabanlıdır.

zinciri yönetiminin önemli bir parçası olup tedarik zinciri yönetimi sürecinin etkinliğinin lojistik ile de belirlenebileceği diğer bir ifade ile lojistik yönetimi sürecine bağlı olduğu belirtilebilir ve tedarik zinciri yönetimine ve lojistik yönetimine dair uygulamalar, değer yaratan faaliyetler olarak tanımlanabilir ve böylece işletmeler için rekabet gücü kazandırma gibi faktörler açısından büyük önem sağlarlar [3].

Bir tedarik zincirini meydana getirenler genellikle tedarikçiler, üreticiler ve dağıtıcılarıdır. Böylece, performans değerlendirmesini oluşturan unsurlar tedarik performansı, üretim performansı ve dağıtım performansı şeklinde üç başlıkta toplanabilir [4]. Genellikle dağıtım kanalı, ürünlerin ve hizmetin pazarlaması için işletme içindeki birimler ve acente, toptancı, perakendeci gibi işletme dışındaki aracı ya da aracısız kuruluşlar tarafından meydana getirilen bir yapıdır [5]. Dağıtım performansı da bir tedarik zinciri için önemli faktörlerden birisidir. Tedarik edilen ürünlerin üretimi gerçekleştirildikten sonra alıcıya ulaştırılması amacıyla uygun dağıtım ağı belirlenerek uygun lojistik aracılığıyla da dağıtım sağlanmalıdır.

Analitik hiyerarşi prosesi (AHP) yöntemi, karar verme problemlerini çözmeye yönelik geliştirilmiş çok kriterli bir karar verme metodudur ve belirlenen kıstaslara göre birden daha fazla sayıda seçeneğin önem dereceleri bazında sıralanmasını sağlamaktadır [6]. Bu çalışmada ilk olarak tedarik zinciri yönetimi için lojistik ve dağıtım ağını etkileyen ana kriterler ve bu kriterlerin alt kriterleri belirlenip bu kriterlerin AHP yöntemine göre Super Decisions programında değerlendirmeleri ve önem derecelerine göre sıralanmaları sunulmaktadır.

İlgili literatürden bazı çalışmalar aşağıda yer almaktadır: Vasiliauskas vd. [7], çalışmalarında, dağıtım kanallarının çok kriterli değerlendirmesini temel alarak otomobil dağıtım ağlarının gelişimini analiz etmektedirler. Çalışmalarında, çok kriterli değerlendirmenin dağıtım kanallarının seçimi için uygun olduğunu ve dağıtım kanallarındaki bütünlük kompleks bir değerlendirme sonuçlarının verimli bir yönetimin ve yüksek kaliteli bir dağıtım ağının geliştirilmesini sağlayabileceğini belirtmişlerdir. Daugherty [8], çalışmasında, lojistik ve tedarik zinciri yönetimi alanlarındaki çalışmaları incelemektedir ve gelecek çalışmalar için öneriler sunmaktadır. Bu çalışmada önceki literatürün incelenmesi ile araştırma konularının kronolojik olarak sıralanmasının sağlanmasının ve bilgi tabanına katkı sağlayan önemli alanların belirlenmesinin amaçlandığı ifade edilmektedir. Islam vd. [9], çalışmalarında, lojistik ve tedarik zinciri yönetiminde yer alan ilke ve yöntemlere bir giriş sunmaktadırlar ve konuya dair terimleri açıklamaktadırlar. Ayrıca, çalışmalarında, sürdürülebilirlik kavramı da dikkate alınmakta olup ulaştırma ve lojistikle ilgili olan problemler için matematik formülasyon da sunulmaktadır. Matsui [10], çalışmasında, çift kanallı tedarik zincirleri kullanan bir

üretici için optimum bir şekilde ürün dağıtım stratejisini incelemektedir. Çalışmada, fiyat rekabetiyle karşılaşan bir üretici için simetrik bir dağıtım stratejisinin mutlak olarak optimal olmadığı da belirtilmektedir. Liu vd. [11], çalışmalarında, iki rakip fonksiyonel lojistik servis sağlayıcısını da içeren lojistik servis tedarik zincirinin sipariş dağılımını incelemektedirler. Jia vd. [12], çalışmalarında, bir üretici ve bir lojistik servis sağlayıcısından meydana gelen bir servis tedarik zincirinde, bir çevrimiçi doğrudan kanal aracılığı ile satılan ürünler için fiyatlandırma ve pazara sunma süresi konularını içeren çok aşamalı bir problem ile ilgilenmektedirler. Akyüz vd. [13], çalışmalarında, mobilya sanayi alanında yer alan bir firma için en uygun tedarikçinin belirlenmesi konusu ile ilgilenmektedirler. İnceledikleri bu problem için çalışmalarında AHP yöntemi kullanılmaktadır. Onat ve Kaçtıoğlu [14], çalışmalarında, perakende sektöründe depolama faaliyetleri ile ilgilenen bir işletme için tedarikçi seçimi ile ilgili bir uygulama sunmaktadırlar. Çalışmalarında bulanık AHP ve Bulanık TOPSIS yöntemleri kullanılmaktadır. Akın Vargeloğlu vd. [15], çalışmalarında, tedarikçi seçimi ve değerlendirilmesi konusu için sezgisel bulanık kümelerle dayalı olan ve nicel ve nitel değerlendirmeleri içeren bir yaklaşım sunulmaktadır. Çalışmalarında önerilen yaklaşım, inşaat sektöründeki bir işletme için tedarikçi seçimi ve değerlendirilmesinde uygulanmaktadır. Çelik ve Çağıl [16], çalışmalarında, tarım araçları üreten bir firma için tedarikçi seçimi konusunu incelemektedirler. Çalışmalarında bulanık AHP, bütünlük bulanık DEMATEL-bulanık TOPSIS ve bütünlük bulanık AHP-bulanık MOORA yöntemleri kullanılarak tedarikçilerin değerlendirilmesi yapılmaktadır. Erbyık vd. [17], çalışmalarında, otomotiv endüstrisinde yer alan üç tedarikçinin performans değerlendirme sonuçlarını dikkate alarak en etkin tedarikçilerin sıralanmasının belirlenmesi ile ilgilenmektedirler. Çalışmalarında tedarikçi seçimi yöntemi olarak çok kriterli karar verme yöntemlerinden birisi olan Electre yöntemi kullanılmaktadır.

Bu çalışmada öncelikle tedarik zinciri yönetimi için lojistik ve dağıtım ağını etkileyen ana kriterler ve bu kriterlere dair alt kriterler belirlenmektedir. Bu kriterlerin AHP yöntemi ile Super Decisions programı kullanılarak değerlendirilmeleri ve dolayısıyla önem derecelerine göre sıralanmaları yapılmaktadır. Bu değerlendirme neticesinde sistem üzerinde etkisi en çok olan ana kriterin hız olduğu görülmektedir. Daha sonra, optimum tedarikçi seçimi için hız kriterinin alt kriterlerinden sağlanan sonuçlar ve ayrıca çeşitli kısıtlar dikkate alınarak bir matematik programlama modeli geliştirilmektedir. Çalışmada sunulan bu yaklaşımın uygulaması, geliştirilen bir tedarikçi seçim problemi ve ilgili duyarlılık analizi ile gösterilmektedir.

II. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada ilk olarak tedarik zinciri yönetimindeki lojistik ve dağıtım ağlarını etkileyen faktörler belirlenerek bu faktörlerin Super Decisions programı kullanılarak AHP yöntemi ile önem derecesine göre sıralanması sağlanmaktadır. Bu çalışmada dikkate alınan kriterler Tablo 1’de görülmektedir.

Tablo 1. Tedarik zinciri yönetiminde lojistik ve dağıtım ağları üzerinde etkisi olan kriterler

| Ana kriterler | Alt kriterler |
|---|--|
| Kalite | Ürün kalitesi |
| | Üretim kalitesi |
| | Hizmet kalitesi |
| | Lojistik ve dağıtım ağı kalitesi |
| | Hatasız ürün/hizmet oranı |
| Hız | İşletme talebine olan dönüş hızı |
| | Teslimat hızı [18] |
| | Teslimat sonrasında sunulan hizmet hızı |
| | Bilgi ve ürün akış hızı (diğer bir ifade ile ürünün konumu ve durumu hakkındaki bilgi akış hızı) |
| İletişim | Müşterilerle olan iletişim [19] |
| | Tedarikçilerle olan iletişim |
| | İşletme içi iletişim [19] |
| İşletmenin müşteri ile olan ilişkileri [20] | Müşteri ile olan etkileşim [19] |
| | Müşteri ilişkilerinde güvenilirlik [20] |
| Tedarikçi | Çözüm odaklı yaklaşım |
| | İlgili prosedür, mevzuatlara uyum/gerekli dokümantasyonların tamamlanması |
| | Teknik yeterlilik |
| | Önceki dönemlerdeki hizmet/servis performansı |
| | Satış şekilleri |
| | Aksiyon alma esnekliği |
| | Yenilikleri takip edebilme |
| | İşbirliğine yatkınlık |
| | Güvenilirlik [20] |
| | Yeni teknoloji ve dijitalleşmeye yatkınlık |
| Yeni ürün sunabilme [20] | |
| Lojistik | İstenen şartların göz önünde bulundurulması |
| | İlgili prosedür, mevzuatlara uyum/gerekli dokümantasyonların tamamlanması |
| | Doğru lojistik sisteminin seçilmesi |

| | |
|---------------------------|---|
| | Lojistik takip sistemi |
| Dağıtım ağı / kanalı | Esneklik |
| | Optimum dağıtım ağının / kanalının kullanılması |
| | İstenen şartların göz önünde bulundurulması |
| | Takip sistemi |
| Maliyet | Birim maliyet [20] |
| | Lojistik ve dağıtım ağının toplam maliyeti |
| | Ödeme kolaylığı [20] |
| | Sektörel fiyat koşullarına uyum [20] |
| Teknoloji | Teknolojiyi takip |
| | Lojistik takip sistemi |
| | Dijitalleşme / inovatif yapıya sahip olma |
| İşletme konumu [18] | Tedarikçiye olan uzaklık |
| | Müşteriye olan uzaklık |
| | Hinterland (art bölge) |
| İşletmenin tecrübesi [18] | Pazar tecrübesi |
| | Şirket yönetme tecrübesi |
| Performans | Üretim performansı |
| | Kalite performansı |
| | Dağıtım performansı |
| | Tedarik performansı |
| | Teslim performansı [20] |

Tablo 1’de belirtilen bu kriterler için genel olarak aşağıdakiler ifade edilebilir:

Tedarik zinciri yönetiminde lojistik ve dağıtım ağları açısından etken olan kriterlerden birisi kalitedir. Ürün kalitesi ve hizmet kalitesinde sağlanan iyileştirmeler sayesinde tedarik zinciri akışı daha hızlı ilerleyebilmektedir ve kalitesizlik nedeniyle olabilecek dönüşler minimum seviyeye indirilebilir. Üretimde kalitenin sağlanması diğer bir ifade ile süreç boyu kalitenin sağlanması ile final üründe kalitesizlikle karşılaşma durumu azalabilmektedir. Lojistik ve dağıtım ağı açısından ürün ya da hizmetin nihai alıcıya ulaştırılmasına kadar geçen süreçteki akışın kaliteli olması müşterilerle olumlu ilişkiler kurulmasına, beklentilerin optimum seviyede karşılanmasına ve dağıtım ya da lojistikten kaynaklanan hataların minimum seviyede kalmasına imkân sağlayabilmektedir. Kaliteli ürün/hizmet sayesinde hata oranı azaltılarak tedarik zincirinde meydana gelebilecek kopmalar engellenmiş olacaktır.

Hız kriteri de tedarik zinciri yönetiminde lojistik ve dağıtım ağları üzerinde etkisi olan kriterlerden birisidir. Müşterilerin memnuniyeti; Tablo 1’de de görüldüğü

gibi, teslimat hızına [18], işletmenin isteklere dönüş hızına, bilgi akışının hızlı olmasına, teslimat sonrasındaki destek hızına bağlı olduğundan hız; tedarik zincirindeki en etkili halkadan birisidir. Müşteriler için işletmelerin taleplerine tedarikçilerin dönüş hızı önemli bir kriterdir çünkü işletme içindeki planlar, taleplere dönüşlere göre şekillendirildiğinden dönüş hızı da bu açıdan etkindir. Ayrıca, yapılan dönüşlere göre verilen siparişlerin teslimat hızı [18] planları aksatmamalıdır. İşletmelere dolayısıyla da müşterilere belirtilen teslimat zamanındaki sapmalar minimize edilerek tedarik zinciri akışı sağlanabilmektedir. Teslimat sonrasında oluşabilen problemlere tedarikçi firmaların dönüş hızı da müşteri memnuniyetini sağlamada önemli olabilmektedir. Ürün ya da hizmette teslimat sonrasındaki sorunların hızlı bir şekilde çözülmesi tedarikçi prestiji ve işletmenin müşteriler tarafından tercih edilebilirliği açısından önemlidir. İşletmeler hizmet hızı planlarını aksatmayan, çözüm odaklı yaklaşan ve ürün ya da hizmetin durumu ile ilgili bilgileri aktarmada hızlı olan tedarikçi firmalara yönelebilmektedir.

Tedarik zincirinde etkin iletişim sayesinde müşterilerin talepleri doğru bir şekilde anlaşılıp karşılanmış olacaktır. Tedarikçilerle iletişim sağlıklı olarak kurulduğunda talepler tedarikçilere doğru iletilecektir. Bu şekilde iletişim eksikliği nedeniyle oluşabilecek hatalar elimine edilerek zincirin halkaları bozulmadan sistem akışı sürdürülmüş olacaktır. İşletmedeki iletişimin ve bilgi akışının doğru olarak sağlanması bölümler arası bilgi eksikliklerini azaltmış olacaktır. Dursun ve Gürsev [19]'in çalışmasında da müşterilerle olan iletişim ve işletme içi iletişim kriterleri sunulmaktadır.

Alkan vd. [20]'nin çalışmasında da yer aldığı gibi tedarik zinciri yönetimindeki ana ölçütlerden birisi de müşteri ilişkileridir. Tablo 1'de de görüldüğü gibi bu ana kriterin alt kriterleri olarak müşteri ile olan etkileşim [19] ve müşteri ilişkilerinde güvenilirlik [20] dikkate alınmaktadır. Böylelikle, bu kriterler dikkate alınarak tedarik zincirinde akışın daha sağlıklı ve hızlı ilerlemesine, müşteri memnuniyetinin sağlanmasına, tedarik zinciri halkalarının daha güçlü olmasına olanak sağlanabilmektedir.

Bir diğer ana kriter olarak tedarikçi kriteri dikkate alınmaktadır. Bu çalışmada tedarikçi başlığı içerisinde de Tablo 1'de de görüldüğü gibi birçok alt kriter detaylıca ele alınmaktadır. Tedarik zinciri sürecinde oluşabilecek sorunlarda, tedarikçinin çözüm odaklı yaklaşımı zincirde aksamalar olmamasına, sürecin sağlıklı bir şekilde ilerlemesine ve oluşabilecek gecikmelerin minimum seviyeye indirilmesine imkân sağlayacaktır. Ürün ya da hizmette gerekli olan dokümantasyonların oluşturulması, işin gerektirmiş olduğu prosedürlere ve mevzuatlara uyulması ve mevzuatların takip edilmesi tedarikçilerin tercih edilebilirliğini arttırabilmektedir. Ürün ya da hizmetin

gerektirdiği teknik yeterliliği bulduran tedarikçiler karşılaşılan sorunlarda daha hızlı aksiyon alabilmektedir ve böylece müşterilerin taleplerine daha doğru cevaplar verilebilmektedir ve tedarik zincirinde karşılaşılabilecek aksaklıklar azaltılabilmektedir. Tedarik zincirinde, lojistik ve dağıtım ağında iyi olan tedarikçilerin seçilebilmesi açısından tedarikçi firmaların önceki dönemlere dair performansları incelenerek bu firmaların ön değerlendirilmesi yapılabilir. Tedarikçilerin satış teknikleri tedarikçi seçimi açısından etkili olabilmektedir. Tedarikçilerin yenilikleri takip edebilmesi, pazarda tutunabilmesini ve böylelikle zincirin bir halkası olarak kalmasını sağlayabilmektedir. Tedarikçilerin tedarik zincirinde karşılaşılabilen sorunlarda işbirliğine yatkın olmaları ve çözüm bulmadaki hızları, akışın hızlı ve sağlıklı olmasına imkan sağlayabilmektedir. Alkan vd. [20]'nin çalışmasında belirtilen güvenilirlik ve yeni ürün sunabilme kriterleri, bu çalışmada tedarikçi ana kriterinin alt kriterleri içerisinde yer almaktadır. Tedarikçilerin güvenilir tutumları ile zincirin halkalarının ilişkilerinde karşılaşılabilecek belirsizlikler daha az olabilmektedir. Teknoloji ve dijitalleşmeye yatkın olan, yenilikleri ve teknolojiyi takip eden ve bu yenilikleri ürünlerine hızlı bir şekilde yansıtan tedarikçiler pazarda rakiplerine göre önde olabilmektedir ve böylece tercih edilmede fark yaratabilirler.

Bu çalışmada dikkate alınan diğer bir ana kriter lojistik kriteridir. Taşınacak ürünün özellikleri, taşıma esnasında dikkat edilmesi gereken durumlar ve müşteri talepleri göz önünde bulundurularak uygun lojistik türünün seçilmesi gerekebilmektedir. Seçilen lojistik türü için taşımada uyulması gereken kurallar ve mevzuatın gerektirdikleri göz önünde bulundurulmalıdır ve böylelikle seçilen lojistik türü ile taşınması sağlanan ürün güvenli bir şekilde müşteriye ulaştırılır. Doğru lojistik sisteminin seçilmesi sayesinde tedarik zincirinde aksama olmadan ürünlerin ilk üreticiden nihai alıcıya ulaştırılması sağlanabilmektedir. Ayrıca, lojistik takip sistemi ile gönderi takibi kolaylaşır ve müşteriye bilgi aktarımı sağlanarak müşteri ve tedarikçi arasındaki iletişim doğru bir şekilde sağlanır.

Dağıtım ağı diğer bir ana kriter olarak ele alınmaktadır. Müşteri taleplerinin ve isteklerinin göz önünde bulundurularak tedarikçilerin istenen zamanda, istenen şekilde ürün ya da hizmetin teslimatını sağlayabilmeleri, müşteri memnuniyetinin oluşması açısından önemlidir. Optimum dağıtım ağının seçilmesiyle tedarik zincirinde en verimli, en hızlı, minimum maliyetli dağıtımın ve teslimatın gerçekleşmesi sağlanabilmektedir. Müşteri taleplerine göre gerektiğinde dağıtım ağında değişikliklerin gerçekleştirilmesi diğer bir ifade ile isteklere göre tedarikçilerin esnek olması alt kriter olarak dikkate alınmaktadır. Dağıtım ağı ana kriteri içerisindeki alt kriterlerden birisi ise dağıtım ağının izlenebilirliği diğer

bir ifade ile bir takip sistemini bulundurmasıdır. Böylelikle, müşterilere doğru bir şekilde anlık bilgiler sunulabilmektedir.

Bu çalışmada maliyet kriteri ana kriter olarak dikkate alınmaktadır. Alt kriterlerden birim maliyet, ödeme kolaylığı ve sektörel fiyat koşullarına uyum kriterleri Alkan vd.[20]'nin çalışmalarında da yer almaktadır. Birim olarak maliyet lojistik ve dağıtım ağında işletmelerin tercih edilebilirliği açısından etkili olabilmektedir. Ayrıca hem birim olarak hem de lojistik ve dağıtım ağının toplam olarak maliyeti göz önünde bulundurularak lojistik ve dağıtım ağı seçilebilmektedir. Bunlara ilaveten, müşterilerin ödeme konusunda kolaylıklar sağlayan firmaları tercih ettiği görülebilmektedir.

Bu çalışmada teknoloji ana kriteri içerisinde teknolojiyi takip, lojistik takip sistemi, dijitalleşme / inovatif yapıya sahip olma alt kriterleri ele alınmaktadır. Teknoloji takip edilerek lojistik ve dağıtım ağı açısından daha teknolojik yöntemler kullanılabilir. Böylelikle hem müşteri talepleri teknolojik yöntemler ile daha hızlı bir şekilde karşılanabilmektedir hem de zincirde yer alan rakiplere karşı avantaj sağlanabilmektedir. Daha teknolojik bir lojistik takip sistemini bulduran işletme müşterilere rakiplerine göre daha hızlı ve daha doğru bilgiler sunabilmektedir ve akıştaki aksaklıklar daha hızlı fark edilerek düzeltici faaliyetler daha hızlı uygulanabilmektedir. Teknolojik gelişmelerinin yakından izlenip uygulanması, işletmelerin tedarik zincirinde tercih edilebilirliği açısından önemli olabilmektedir.

İşletmeler doğru yerde konumlandırılarak sundukları hizmet daha verimli ve etkin olabilmektedir [18]. Çünkü, konum, hammaddeye ve son alıcıya yakınlık, teslim süresi gibi konular açısından önem teşkil edebilmektedir. Tedarikçi ve müşteriye yakın olan işletmeler taşıma süresi ve dolayısıyla taşıma maliyeti gibi konularda avantaj sağlayabilmektedir. Liman ya da merkezi geçişi içeren hinterland (art bölgeye) yakınlık sayesinde ithalat ve ihracatta avantaj sağlanabilmektedir ve tedarik zincirinde yurt dışında da müşteri bağlantıları elde edilebilmektedir.

İşletme tecrübesi Eren ve Gür [18]'ün çalışmasında da yer almaktadır ve tecrübe de tedarik zincirinde ve lojistik ve dağıtım ağının seçilmesinde etkili olan kriterlerdendir. Pazar tecrübesine sahip olan ve pazardaki gelişmeleri takip eden firmalar pazarın gerektirdiklerine hakim olmaları nedeniyle pazarda biliniyor durumdadırlar. İlaveten, pazar tecrübesi olmayıp sektörde yeni olan ancak başka alanlarda bilinirliği bulunan firmalar diğer alanlardaki tecrübelerine ve şirket yönetme tecrübelerine dayanarak bu tecrübelerini lojistik ve dağıtım ağında da göstererek rakiplerine göre önde olabilirler.

Tablo 1'de de görüldüğü gibi bu çalışmada ele alınan ana kriterlerden birisi de performans kriteridir. Performans ana kriteri içerisinde yer alan alt kriterler arasında birbirleriyle de bağlantılı olabilmektedir. Teslim performansı Alkan vd. [20]'nin çalışmasında da bulunmaktadır. Üst seviyede bir üretim performansı ürünün kalite performansını da etkileyebilmektedir. Böylelikle ürün ya da hizmetin tedarik performansı da istenen düzeyde olabilmektedir. Tedarik edilen ürünler için sağlanan dağıtım ağının performansı ve hatasız ilerleyebilmesi ürün ya da hizmetin teslim durumunu da etkileyebilmektedir. Bu performans kriterlerinin istenen koşullarda ve üst seviyede sağlanabilmesi zincir performansını da optimum düzeyde tutabilir.

Tablo 2. Ana kriterlerin ağırlık değerleri

| Tutarlılık için oran: 0,09958 | |
|---|---|
| Ana kriterler | Super Decisions programına göre ana kriterlerin ağırlık çıktıları |
| Kalite | 0,07835 |
| Hız | 0,25921 |
| İletişim | 0,04282 |
| İşletmenin müşteri ile olan ilişkileri [20] | 0,03656 |
| Tedarikçi | 0,13707 |
| Lojistik | 0,11802 |
| Dağıtım ağı/kanalı | 0,14933 |
| Maliyet | 0,03577 |
| Teknoloji | 0,01020 |
| İşletme konumu [18] | 0,05926 |
| İşletmenin tecrübesi [18] | 0,03525 |
| Performans | 0,03814 |

Tablo 1'de sunulan ana kriterler ve alt kriterler Super Decisions programında puanlandırılmıştır. Böylelikle, Super Decisions programından elde edilen çıktıya göre ana kriterlerin ağırlıklı değerleri Tablo 2'de görülmektedir. Bu tabloda, ağırlık çıktılarının sonuçları yuvarlama yapılmadan virgülden sonra birkaç rakam alınarak ifade edilmektedir. Tablo 2'de de görüldüğü üzere programdan elde edilen sonuçlara göre hız kriteri 0,25921 ağırlık ile tedarik zinciri yönetiminde lojistik ve dağıtım ağlarını en çok etkileyen ana kriterdir. Hız kriterinin alt kriterleri ise Tablo 1'de de belirttiği gibi işletme talebine olan dönüş hızı, teslimat hızı [18], teslimat sonrasında sunulan hizmet hızı, bilgi ve ürün akış hızı (diğer bir ifade ile ürünün konumu ve durumu hakkındaki bilgi akış hızı) şeklindedir. Çalışmada hız ana kriteri üzerinden matematik programlama modeli geliştirilmiş olup GAMS optimizasyon programı kullanılarak bu geliştirilen model çözülmüştür. Ele alınan problemde hız kriterinin alt kriterlerine göre bir firmanın tedarikçi seçmek istediği kabul edilmekte olup bu problemin amacı ise minimum tedarik süresidir. Bu problemle ilgili olarak diğer tanımlamalar ise aşağıda yer almaktadır:

İndisler:

$i = 1, \dots, I$ (I : toplam alt kriter sayısı)
 $n = 3$

Parametreler:

a : Teslimat sonrasında sunulan hizmet hızının alacağı maksimum değer belirlenmesinde kullanılan katsayı
 b : Teslimat hızının [18] maksimum değerini belirlemek için işletme talebine eklenecek süre (saat)
 c : Teslimat sonrasında sunulan hizmet hızı için atanan minimum değer (saat)
 d : Talebe dönüş yapıp teslim edilmesi için gereken maksimum süre (saat)
 e : Bilgi ve ürün akış hızının hedeflenen minimum değerini hesaplamak için kullanılan katsayı
 f : Teslimat sonrasında sunulan hizmet hızının hedeflenen maksimum değerini hesaplamak için kullanılan katsayı

Yukarıda parametrelerde belirtilen bu değerler pozitif ve tamsayı değerlerdir.

Karar Değişkenleri:

x_i : Hız kriterinin alt kriterleri;

x_1 : İşletme talebine olan dönüş hızı

x_2 : Teslimat hızı [18]

x_3 : Teslimat sonrasında sunulan hizmet hızı

x_4 : Bilgi ve ürün akış hızı

k_i : Alt kriterlerin Super Decisions program çıktısına göre ağırlıkları;

k_1 : İşletme talebine olan dönüş hızının ağırlığı

k_2 : Teslimat hızının [18] ağırlığı

k_3 : Teslimat sonrasında sunulan hizmet hızının ağırlığı

k_4 : Bilgi ve ürün akış hızının ağırlığı

Amaç Fonksiyonu:

Bu problemin amacı Super Decisions programı ile ulaşılan kriterlerin ağırlıkları da dikkate alınarak en uygun amaç fonksiyon değerine sahip olan tedarikçinin belirlenmesidir. Diğer bir ifade ile, bu problemde minimum tedarik süresinin sağlanması amaçlanmaktadır. Problemin amaç fonksiyonu (Z), Eşitlik (1) ile aşağıda görüldüğü gibi ifade edilmektedir:

$$\text{Min}(Z) = k_1 * x_1 + k_2 * x_2 + k_3 * x_3 + k_4 * x_4 \quad (1)$$

Kısıt Denklemleri:

Eşitlik (2) 'de teslimat sonrasında sunulan hizmetin, talebe olan dönüş hızının belli bir katsayı (a) ile çarpımından fazla olmaması ifade edilmektedir. Diğer bir ifade ile bu Eşitlik ile teslimat sonrasında sunulan hizmet ile talebe olan dönüş hızı arasında en fazla a kadar bir oran olması gerektiği belirtilmektedir.

$$x_3 \leq a * x_1 \quad (2)$$

Eşitlik (3) ise teslimat hızının [18] maksimum değerinin talebe olan dönüş hızına eklenen b değerine bağlı olduğunu göstermektedir.

$$x_2 \leq x_1 + b \quad (3)$$

Eşitlik (4) teslimat sonrasında sunulan hizmetin hızına minimum bir değer atamaktadır. Talebe dönüş yapıp teslim edilmesi için gereken maksimum sürenin d olması gerektiği ise Eşitlik (5) ile ifade edilmektedir.

$$x_3 \geq c \quad (4)$$

$$x_1 + x_2 \leq d \quad (5)$$

Eşitlik (6) ile bilgi ve ürün akış hızının tüm süreç düşünülerek değerlendirilmesi sağlanmakta olup böylelikle bilgi ve ürün akış hızının diğer üç alt kriterin ortalamasından küçük ya da eşit olması gerektiği kısıtı gösterilmektedir.

$$x_4 \leq \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (6)$$

Eşitlik (7) ile bilgi ve ürün akış hızına minimum değer atanmakta olup talebe olan dönüş hızının e ile oranından büyük ya da eşit olması sağlanmaktadır.

$$x_4 \geq \frac{x_1}{e} \quad (7)$$

Eşitlik (8) ile de teslimat sonrasında sunulan hizmetin hızı için bir maksimum değer belirtilmektedir.

$$x_3 \leq \frac{x_2}{f} \quad (8)$$

Eşitlik (9)'da x_i değişkenlerinin 0'dan büyük ya da eşit olduğu belirtilmektedir.

$$x_i \geq 0, \quad \forall i, \quad i = 1, \dots, 4 \quad (9)$$

Materyal ve Metot Bölümü için daha fazla bilgiye Gültepe [21]'den ulaşılabilir.

III. BULGULAR

Tüm alt kriterlere Super Decisions programında değerler atanmış olup bu değerler ve alt kriterlerin değerlendirme sonuçları (ağırlıkları) ifade edilmektedir. Hız kriteri tüm ana kriterler içinde en yüksek ağırlığa sahip olduğundan bu çalışmada bu kriterin alt kriterlerinin değerlendirilmesi sunulmakta olup Tablo 3'te görülmektedir.

Tablo 3. Hız kriterine ait alt kriterlerin ağırlık değerleri

| Tutarlılık için oran: 0,04417 | |
|---|---|
| Hız kriterine ait alt kriterlerin ağırlık ifadeleri | Super Decisions programına göre hız kriterine ait alt kriterlerin ağırlık değerleri |
| k_1 | 0,10638 |
| k_2 | 0,64847 |
| k_3 | 0,05483 |
| k_4 | 0,19032 |

Daha önce tanımlanan parametre değerleri ise şu şekilde varsayılmaktadır $a=4$, $b=36$ saat, $c=8$ saat, $d=60$ saat, $e=2$ ve $f=2$ şeklindedir.

İncelenen problemin amacı kriter ağırlıkları da göz önünde bulundurularak minimum tedarik süresine sahip tedarikçinin belirlenmesidir. Bu problem GAMS optimizasyon programında yazılıp çözülmektedir ve sağlanan optimum sonuca göre, tedarikçilerden beklenen süreler Tablo 4'te yer almaktadır.

Tablo 4. Optimum süre değerleri

| Karar değişkenleri | Değeri (saat) |
|--------------------|---------------|
| x_1 | 2 |
| x_2 | 16 |
| x_3 | 8 |
| x_4 | 1 |

Z amaç fonksiyonu x_i değerlerinin Super Decisions programında hesaplanan k_i değerleriyle çarpımından bulunan değerlerin toplamı olarak hesaplanmaktadır ve bu örnek problemde optimum amaç fonksiyon değeri 11,217 saat olarak elde edilmektedir. Tablo 5'te bu örnek problemde tedarikçilerin mevcut durumdaki süreleri ve toplam ağırlıklı amaç fonksiyon değerleri yer almaktadır. Amaç fonksiyonunda toplam sürecin minimum olması gerektiğinden bu süreci optimum

amaç fonksiyon değeri olan 11,217 saatten daha kısa sürede tamamlayabilen dört tedarikçi olduğu Tablo 5'te görülebilmektedir. Bunlar, T3, T7, T8 ve T10 tedarikçileridir. Diğer 6 tedarikçinin amaç fonksiyon değeri optimal değerden daha yüksek olduğundan bu tedarikçiler (T1, T2, T4, T5, T6 ve T9) değerlendirilmede elenir.

GAMS optimizasyon programından elde edilen optimum sonuca göre değerlendirmeye kalan bu dört tedarikçi için x_i değerleri açısından firma önceliği hangi kriterlere göre olacaksa değerlendirme de o şekilde yapılabilir. Örneğin, Tablo 5'e bakıldığında tedarikçi T8'nin hedef değerler açısından tüm şartları sağladığı diğer bir ifade ile hedef değerlere eşit ya da daha küçük sürelerle sahip olduğu görülür. Tedarikçi T3'ün amaç fonksiyon değeri optimum amaç fonksiyon değerinden daha küçük olmakla beraber x_1 ve x_4 değerleri Tablo 4'te yer alan optimum süre değerlerinden daha yüksektir. T7 tedarikçisinin x_3 ve x_4 değerleri optimal olan x_3 ve x_4 değerlerinden daha yüksektir ama amaç fonksiyon değeri diğer tedarikçilerinkinden daha düşüktür. T10 tedarikçisi ise sadece x_1 değişkeni açısından optimal değerden daha yüksek bir değere sahiptir. Böylece, bu dört tedarikçiden hangisinin seçilebileceğine dair karar verme sırasında hem bu tedarikçilerin amaç fonksiyon değerlerine göre hem de alt kriterlerin değerlerine göre karar verilmesinin daha doğru bir sonuç sağlayabileceği düşünülmektedir.

Tablo 5. Tedarikçi değerleri

| Tedarikçi firmalar | x_i değerleri | | | | Amaç fonksiyon değeri (saat) |
|--------------------|-----------------|--------------|--------------|--------------|------------------------------|
| | x_1 (saat) | x_2 (saat) | x_3 (saat) | x_4 (saat) | |
| T1 | 3 | 15 | 13 | 5 | 11,711 |
| T2 | 5 | 19 | 8 | 0,75 | 13,434 |
| T3 | 4 | 13 | 7 | 3 | 9,810 |
| T4 | 2 | 18 | 5 | 0,5 | 12,255 |
| T5 | 6 | 15 | 11 | 4 | 11,730 |
| T6 | 1 | 17 | 7 | 1 | 11,705 |
| T7 | 2 | 11 | 9 | 1,5 | 8,125 |
| T8 | 1,5 | 16 | 6 | 0,75 | 11,007 |
| T9 | 4 | 20 | 7 | 0,5 | 13,874 |
| T10 | 4 | 12 | 8 | 1 | 8,836 |

3.1. Duyarlılık Analizi

Bu bölümde teslimat sonrasında sunulan hizmet hızı için atanan minimum değeri belirten c değeri ile bir duyarlılık analizi yapılarak c parametresindeki değişikliğin amaç fonksiyon değerini ve tedarikçi değerlendirilmesini nasıl etkilediği incelenmektedir. Tablo 6'da c değerindeki değişiklik neticesinde kriterlerin ve amaç fonksiyonun değerleri yer almaktadır. Tablo 6'da görüldüğü gibi c değerinin artması ile amaç fonksiyonun değerinde artış meydana gelmektedir.

c değerindeki değişimin amaç fonksiyon değerinde değişikliğe neden olmasından dolayı Tablo 7'de de görüldüğü gibi tercih edilen tedarikçilerde de değişiklikler olabilmektedir. Tablo 7, c değerinin artması neticesinde tercih edilebilecek tedarikçi sayısının arttığını da göstermektedir. Örneğin, c değeri 4 veya 5 olduğunda uygun tedarikçi bulunmamaktadır, ancak c değeri 10, 11 veya 12 ise tüm tedarikçilerin uygun olduğu görülebilmektedir.

Tablo 6. c değerindeki değişikliğin kriterler ve amaç fonksiyon değerlerine etkisi

| c değeri | x_1 (saat) | x_2 (saat) | x_3 (saat) | x_4 (saat) | Amaç fonksiyon değeri (saat) |
|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------------------------|
| 4 | 1 | 8 | 4 | 0,5 | 5,609 |
| 5 | 1,25 | 10 | 5 | 0,625 | 7,011 |
| 6 | 1,5 | 12 | 6 | 0,75 | 8,413 |
| 7 | 1,75 | 14 | 7 | 0,875 | 9,815 |
| 8 | 2 | 16 | 8 | 1 | 11,217 |
| 9 | 2,25 | 18 | 9 | 1,125 | 12,619 |
| 10 | 2,5 | 20 | 10 | 1,25 | 14,022 |
| 11 | 2,75 | 22 | 11 | 1,375 | 15,424 |
| 12 | 3 | 24 | 12 | 1,5 | 16,826 |

Tablo 7. Tedarikçilerin değerlendirilmesi

| Tedarikçi | Tedarikçiye ait amaç fonksiyon değeri | c parametresinin değeri | | | | | | | | | |
|-----------|---------------------------------------|---------------------------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--|
| | | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | |
| | | Amaç fonksiyonun değeri | | | | | | | | | |
| | | 5,609 | 7,011 | 8,413 | 9,815 | 11,217 | 12,619 | 14,022 | 15,424 | 16,826 | |
| T1 | 11,711 | | | | | | √ | √ | √ | √ | |
| T2 | 13,434 | | | | | | | √ | √ | √ | |
| T3 | 9,810 | | | | √ | √ | √ | √ | √ | √ | |
| T4 | 12,255 | | | | | | √ | √ | √ | √ | |
| T5 | 11,730 | | | | | | √ | √ | √ | √ | |
| T6 | 11,705 | | | | | | √ | √ | √ | √ | |
| T7 | 8,125 | | | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | |
| T8 | 11,007 | | | | | √ | √ | √ | √ | √ | |
| T9 | 13,874 | | | | | | | √ | √ | √ | |
| T10 | 8,836 | | | | √ | √ | √ | √ | √ | √ | |

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada öncelikle tedarik zinciri yönetiminde lojistik ve dağıtım ağını etkileyen ana kriterler ve bu kriterlerin kırılımı olan alt kriterler belirlenmekte olup toplamda 12 adet ana kriter ve 50 adet alt kriter dikkate alınmaktadır. AHP yöntemi ile Super Decisions programı üzerinde kriterlerin değerlendirmeleri ve dolayısıyla önem derecelerine göre sıralanmaları yapılmaktadır. Bu değerlendirme neticesinde sistem üzerinde en çok etkisi olan, sistemi en çok etkileyen ana kriterin hız olduğu görülmektedir. Daha sonra, hız kriterinin alt kriterlerinden sağlanan sonuçlar da kullanılarak ve ayrıca, çeşitli kısıtlar da dikkate alınarak optimum tedarikçi seçimi için bir matematik programlama modeli geliştirilmektedir. Geliştirilen matematik programlama modelinin amaç fonksiyon denklemi ile minimum tedarik süresinin sağlanması amaçlanmaktadır. Geliştirilen bu matematik programlama modelinin çözümü için GAMS optimizasyon programı kullanılmaktadır. Çalışmada geliştirilen yaklaşımın uygulanmasının gösterilebilmesi açısından geliştirilen bir örnek problemin değerlendirilmesi neticesinde 10 tedarikçi

içerisinden 4 tedarikçinin optimal amaç fonksiyon değerine göre uygun olduğu görülmektedir. Ayrıca, duyarlılık analizi ile teslimat sonrasında sunulan hizmet hızı için atanan minimum değerdeki değişikliğin kriterlerin ve amaç fonksiyonun değerlerini etkilediği görülmektedir. İlaveten teslimat sonrasında sunulan hizmet hızı için atanan minimum değerdeki değişimin amaç fonksiyon değerinde değişikliğe neden olmasından dolayı seçilebilecek tedarikçilerin de değişebileceği duyarlılık analizi ile sunulmaktadır.

Bu çalışmanın devamı niteliğinde yapılabileceklere öneriler ise şu şekildedir: Bu çalışmada dikkate alınan ve AHP yöntemi ile Super Decisions programında değerlendirilen ana kriterlere ve alt kriterlere ilaveler yapılarak bu kriterler daha da detaylandırılabilir. İncelenen problem için geliştirilen matematik programlama modeline farklı kısıtlar ya da farklı kriterler ilave edilerek çalışmanın kapsamı genişletilebilir ve sonuçlar karşılaştırılabilir. Ayrıca, bu çalışmanın uygulaması bir gerçek firma değerleri dikkate alınarak gerçek tedarikçilerin değerlendirilmesi olarak yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Paksoy, T. (2005). Tedarik zinciri yönetiminde dağıtım ağlarının tasarımı ve optimizasyonu: malzeme ihtiyaç kısıtı altında stratejik bir üretim-dağıtım modeli. *Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 14, 435-454.
- [2] Erkan, B. (2014). Türkiye’de lojistik sektörü ve rekabet gücü. *ASSAM Uluslararası Hakemli Dergi*, 1(1), 44-65.
- [3] Kayabaşı, A., & Özdemir, A. (2008). Üretim işletmelerinde lojistik yönetimi faaliyetlerinde performans yönetimine bakış: beklenti-fayda farkı analizi uygulaması. *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 22(1), 195-209.
- [4] Akman, G., & Alkan, A. (2006). Tedarik zinciri yönetiminde bulanık AHP yöntemi kullanılarak tedarikçilerin performansının ölçülmesi: otomotiv yan sanayiinde bir uygulama. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 5(9), 23-46.
- [5] Eroğlu, A.H., Kambir, H., & Eker, N. (2008). Endüstriyel işletmelerin dağıtım kanalı seçimini etkileyen faktörlerin belirlenmesine yönelik bir çalışma. *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 13(1), 95-110.
- [6] Sivrikaya, B.T., & Ünal, E. (2018). AHP grup karar verme yöntemi ile bilgi işlem çalışanlarının yetkinlik temelli performanslarının değerlendirilmesi. *Uluslararası İktisadi ve İdari İncelemeler Dergisi*, 17. ÜİK Özel Sayısı, 501-514.
- [7] Vasiliauskas, A.V., Vilkelis, A., Zinkevičiūtė, V., & Batarliene, N. (2010). Development of automobile distribution networks on the basis of multi-criteria evaluation of distribution channels. *Transport*, 25(4), 361-367.
- [8] Daugherty, P.J. (2011). Review of logistics and supply chain relationship literature and suggested research agenda. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 41 (1), 16-31.
- [9] Islam, D.M.Z., Meier, J.F., Aditjandra, P.T., Zunder, T.H., & Pace, G. (2013). Logistics and supply chain management. *Research in Transportation Economics*, 41(1), 3-16.
- [10] Matsui, K. (2016). Asymmetric product distribution between symmetric manufacturers using dual-channel supply chains. *European Journal of Operational Research*, 248(2), 646-657.
- [11] Liu, W., Wang, D., Shen, X., Yan, X., & Wei, W. (2018). The impacts of distributional and peer-induced fairness concerns on the decision-making of order allocation in logistics service supply chain. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 116, 102-122.
- [12] Jia, J., Chen, S., & Li, Z. (2019). Dynamic pricing and time-to-market strategy in a service supply chain with online direct channels. *Computers & Industrial Engineering*, 127, 901-913.
- [13] Akyüz, K.C., Tugay, T., Perçin, S., & Yıldırım, İ. (2020). Analitik hiyerarşi süreci (AHP) ile mobilya sanayi sektöründe en uygun tedarikçi seçimine yönelik bir uygulama. *Uluslararası İktisadi ve İdari İncelemeler Dergisi*, 29, 1-22.
- [14] Onat, A., & Kaçtıoğlu, S. (2020). Bulanık AHP ve bulanık TOPSIS yöntemi ile tedarikçi seçimi: perakende sektöründe bir uygulama. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 19(37), 65-79.
- [15] Akin Vargeloğlu, A., Başkır, M.B., & Gamgam, H. (2021). Ekonomik göstergelere dayalı tedarikçi seçimi için sezgisel bulanık yaklaşım. *Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 23(3), 1017-1037.
- [16] Çelik, F., & Çağıl, G. (2021). Bulanık çok kriterli karar verme teknikleri ile tedarikçi seçimi; bir traktör fabrikası örneği. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi DEÜ FMD*, 23(68), 607-619.
- [17] Erbiyık, H., Alkan Kabakçı, G., & Erdil, A. (2021). Electre yöntemi ile otomotiv sektöründe tedarikçi seçimi: yeşil tedarikçi seçimi uygulaması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, Ejosat Özel Sayı 2021 (ARACONF) Özel Sayı 24, 421-429.
- [18] Eren, T., & Gür, S. (2017). Online alışveriş siteleri için AHP ve TOPSIS yöntemleri ile 3PL firma seçimi. *Hitit Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 10(2), 819-834.
- [19] Dursun, T., & Gürsev, S. (2016). Pazarlamada dağıtım kanalları yönetimi ve lojistik merkezlerin gelişiminde kümeleme yaklaşımı. *Öneri Dergisi*, 12(45), 555-568.
- [20] Alkan, A., Kasımoğlu, H.Ç., Çelik, C., & Aladağ, Z. (2017). AHP ve PROMETHEE yöntemleri ile lastik üreticisi bir firma için tedarikçi seçimi [Supplier selection for a tire company with AHP and PROMETHEE methods]. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi [Sakarya University Journal of Science]*, 21(2), 261-269.
- [21] Gültepe, M. (2019). Tedarik zinciri yönetiminde AHP ve matematik programlama modeli kullanılarak lojistik ve dağıtım ağının etki seviyelerinin belirlenmesi ve tedarikçi seçimi optimizasyonu [Determination of effect levels of logistics and distribution network, and supplier selection optimization by using AHP and mathematical programming model in supply chain management]. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Adana, Türkiye, 93 sayfa.

A Detailed Study on Halotolerant Bacteria Isolated from Food Salts Collected from Different Countries

Farklı Ülkelerden Toplanan Gıda Tuzlarından İzole Edilen Tuza Toleranslı Bakteriler Hakkında Detaylı Bir Çalışma

Meral BIRBIR¹, Seyma HELVA², Pinar CAGLAYAN¹

¹Marmara University, Faculty of Arts and Sciences, Biology Department, Division of Plant Diseases and Microbiology, Istanbul, Türkiye

²Marmara University, Institute of Pure and Applied Sciences, Istanbul, Türkiye

Abstract

Twenty-five food salts, collected from seven-country, were examined for moisture contents and ash contents, pH values, total numbers of bacteria, and total numbers of halotolerant bacteria. The growth and biochemical reactions of halotolerant bacteria at different NaCl concentrations, pH, and temperature values were investigated. The efficacy of dry-heat sterilization and high-pressure steam sterilization for the inactivation of bacteria was examined using six food salts. Moisture contents, ash contents, and pH values of salts were respectively found as 2.3-3.7%, 95-97%, and 6.37-9.94. Total numbers of bacteria and halotolerant bacteria were detected as between 1-58 CFU/g and 1-40 CFU/g on Modified Nutrient Agar media, respectively. While bacteria were found in twenty salt samples, halotolerant bacteria were detected in seventeen samples. One hundred thirty-eight rod-shaped halotolerant bacteria were isolated from seventeen samples. One hundred eighteen and twenty isolates were found Gram-positive and Gram-negative, respectively. While 131 isolates were motile, seven isolates were observed as non-motile. All isolates grew in both absence of NaCl and presence of 10% NaCl, pH 5, 7, and 9, 24°C, and 37°C. Eighty-six isolates showed different pigmentations. Ammonia production was detected at sixty isolates. Catalase, oxidase, protease, lipase, amylase, caseinase were produced by 138, 83, 84, 48, 92, 100 isolates, respectively. Fifty-seven percent of halotolerant bacteria formed endospores. All bacteria in six salts were killed using both dry-heat sterilization (175°C for 2 hours) and high-pressure steam sterilization (121°C for 30 minutes). In conclusion, we suggest using dry-heat sterilization or high-pressure steam sterilization to kill Gram-negative halotolerant bacteria containing endotoxin and Gram-positive halotolerant bacteria with endospores in food salts to prevent food spoilage and foodborne diseases in humans.

Keywords: Halotolerant bacteria, food salt, biochemical tests, enzymatic activities, phenotypic characteristics, sterilization of food salts

Öz

Yedi ülkeden toplanan yirmi beş gıda tuzu nem içeriği, kül içeriği, pH değerleri, toplam bakteri sayısı ve toplam tuza toleranslı bakteri açısından incelenmiştir. Tuza toleranslı bakterilerin farklı NaCl konsantrasyonlarında, pH ve sıcaklık değerlerinde gelişmeleri ve biyokimyasal reaksiyonları araştırılmıştır. Bakterilerin inaktivasyonu için kuru ısı sterilizasyonunun ve yüksek basınçlı buhar sterilizasyonunun etkinliği altı gıda tuzu kullanılarak incelenmiştir. Tuzların nem içerikleri, kül içerikleri ve pH değerleri sırasıyla %2.3-3.7, %95-97 ve 6.37-9.94 olarak bulunmuştur. Modifiye Nutrient Agar besiyerinde toplam bakteri ve halotolerant bakteri sayısı sırasıyla 1-58 KOB/g ve 1-40 KOB/g arasında tespit edilmiştir. Yirmi tuz örneğinde bakteri bulunurken, on yedi örnekte halotolerant bakteri tespit edilmiştir. On yedi örnekte yüz otuz sekiz çubuk şeklinde halotolerant bakteri izole edilmiştir. Yüz on sekiz ve yirmi izolat sırasıyla Gram-pozitif ve Gram-negatif olarak bulunmuştur. 131 izolat hareketli iken, yedi izolat hareketsiz olarak gözlenmiştir. Tüm izolatlar hem NaCl yokluğunda hem de %10 NaCl varlığında, pH 5, 7, ve 9, 24°C ve 37°C'de gelişmiştir. Seksen altı izolat farklı pigmentasyonlar göstermiştir. Altmış izolatta amonyak üretimi tespit edilmiştir. Katalaz, oksidaz, proteaz, lipaz, amilaz ve kazeinaz sırasıyla 138, 83, 84, 48, 92 ve 100 izolat tarafından üretilmiştir. Tuza toleranslı bakterilerin %57'si endospor oluşturmuştur. Altı gıda tuzundaki tüm bakteriler hem kuru ısı sterilizasyonu (175°C'de 2 saat) hem de yüksek basınçlı buhar sterilizasyonu (121°C'de 30 dakika) kullanılarak öldürülmüştür. Sonuç olarak, gıda bozulmalarını ve insanlarda gıda kaynaklı hastalıkları önlemek için gıda tuzlarında endotoksin içeren Gram-negatif tuza toleranslı bakterileri ve endosporlu Gram-pozitif tuza toleranslı bakterileri öldürmek için kuru ısı sterilizasyonu veya yüksek basınçlı buhar sterilizasyonu kullanılmasını öneriyoruz.

Anahtar kelimeler: Halotolerant bakteriler, gıda tuzları, biyokimyasal testler, enzimatik aktiviteler, fenotipik karakteristikler, gıda tuzlarının sterilizasyonu

I. INTRODUCTION

Foods such as fish, tomato paste, grape leaves, olives, cheese, butter, sausage, bacon, vegetables, and sauerkraut are preserved with salt to prevent food spoilage. This traditional preservation method has been applied as dry

salting and brine salting. In these methods, it is assumed that NaCl inhibits bacterial growth by reducing moisture content and water activity in food and slowing down the cellular metabolism of microorganisms [1]. In addition to its preservative properties, salt provides flavor to food products, especially processed foods [2].

The fermentation process, which is an easy and cheap method, is applied since ancient times to preserve foods [3, 4]. While vine leaf, fish, and daikon radish are preserved with the dry salting method, brining method is used to preserve cabbage, carrot, and cucumbers [4]. After the salting process, the products are fermented for approximately 14-days at room temperature. During the fermentation process, essential amino acids and various vitamins are produced by beneficial microorganisms such as lactic acid bacteria and yeasts [4, 5]. These microorganisms may produce compounds that give taste, aroma, and flavor to food [6].

Although salt is used as a preservation agent, preservation salt may contain some pathogenic and spoilage bacteria which can survive in the presence of salt. Bacteria that can be grown in both the absence and presence of salt are called halotolerant bacteria [7]. Halotolerant bacteria are able to grow at 0-25% NaCl, pH 5-10, and 4-50°C [7, 8]. Halotolerant bacteria produce different compatible solutes which help to balance the osmotic level inside the cell with the outer environment [9]. When salt is used as a preservation agent, halotolerant bacteria may contaminate the dry-salted and brine-salted food products. In previous studies, halotolerant bacteria were isolated from salted fish [10], fish sauce [11], cheese brine [12], fermented food [13], salt crystal [14], sugarcane press mud [15], grasshopper sub shrimp paste [16], cheese rinds [17], and fermented *Solanum macrocarpon* food [18].

Halotolerant microorganisms may produce amylase, protease, lipase, and cellulase enzymes [19]. Protease and lipase enzymes produced by halotolerant microorganisms have been reported as salt-tolerant enzymes [13, 20]. These enzymes are also tolerant to high pH, temperature, and organic solvents [21, 22]. Though enzymes of halotolerant bacteria have industrial importance, these enzymes may cause food spoilage. Due to the fact that the dry-salted or brine-salted dairy, meat and vegetable products have an important commercial market worldwide, the microbial contamination of these products must be prevented to extend their shelf-life [4, 23].

When salt is used as a preservation agent, the halotolerant bacteria found in salt and their hydrolytic activities should be checked before the preservation process [24]. When the preservation salt contaminated with halotolerant bacteria is used in food preservation, it may cause degradation of salted foods [25].

Researchers reported that dried salted codfish cured with Mediterranean Sea salt contained extremely halotolerant bacteria in high numbers [26]. In another study, codfish samples were separately cured with three different salt samples such as only NaCl, commercial sea salt obtained from southern Europe, and natural salt collected from northern Europe [27]. Codfish cured with commercial sea salt contained 1.3×10^4 CFU/g halotolerant bacteria and 1.25×10^3 CFU/g coliform bacteria [27]. Researchers stated that extremely halotolerant microorganisms such as staphylococci were detected at salted cod. Investigators emphasized that sea salt contained ten times more microorganisms compare to the microorganisms of mine salt [28]. Moreover, total counts of halotolerant bacteria in 30 curing salt used in the leather industry were detected between 10^4 and 10^6 CFU/g [24]. These studies showed that halotolerant microorganisms are common inhabitants in food salt and salt used in the leather industry.
















Bacterial contamination of food products, derived from salt, may cause food spoilage, reduce the shelf life of the product, reduce of nutritional quality of food and cause foodborne diseases in humans [29]. Hence, the goals of this study were to examine the moisture contents, ash contents, and pH values of the food salt samples, determine the total numbers of viable bacteria and total numbers of viable halotolerant bacteria and isolate halotolerant strains from these salt samples. Moreover, the growth and optimum ranges of halotolerant isolates at different salt concentrations, different pH, and different temperature values were investigated. Cell morphology, motility, Gram reaction, colony characteristic, and biochemical activities of each halotolerant isolate were also examined in detail. The efficacy of dry-heat sterilization and high-pressure steam sterilization for the inactivation of bacterial populations including halotolerant bacteria in six food salt samples was also investigated.

II. MATERIAL AND METHOD

2.1. Salt Samples











In this study, 25 salt samples belonging to Cyprus black lava sea salt (one sample), Himalaya salt (five samples), Rock salt (seven samples), Table salt (eight samples), Nepal salt (one sample), Sea salt (three samples) were used. The salt samples coded as 1FSS (Cyprus black lava sea salt), 2FSS, 3FSS, 7FSS, 13FSS, 15FSS (Himalaya salt), 4FSS, 10FSS, 16FSS, 19FSS, 20FSS, 23FSS, 25FSS (Rock salt), 5FSS, 11FSS, 12FSS, 14FSS, 17FSS, 18FSS, 22FSS, 24FSS (Table salt), 6FSS (Nepal salt), 8FSS, 9FSS, 21FSS (Sea salt) were collected from different countries (Table 1).

Table 1. Countries where salt samples were collected, types, colors, codes of salt samples

| Countries | Types | Colors | Codes |
|-----------|---|--------|-------------------|
| France | Cyprus black lava sea salt  | Black | 1FSS ^a |
| France | Himalaya salt  | Red | 2FSS |
| France | Himalaya salt  | White | 3FSS |
| France | Rock salt  | White | 4FSS |
| France | Table salt  | White | 5FSS |
| France | Nepal salt  | Pink | 6FSS |
| Türkiye | Himalaya salt  | White | 7FSS |
| Türkiye | Sea salt  | White | 8FSS |
| Türkiye | Sea salt  | White | 9FSS |
| Türkiye | Rock salt  | White | 10FSS |
| Türkiye | Table salt  | White | 11FSS |
| Türkiye | Table salt  | White | 12FSS |
| Türkiye | Himalaya salt  | Pink | 13FSS |
| Türkiye | Table salt  | White | 14FSS |
| Pakistan | Himalaya salt  | Pink | 15FSS |

^a1FSS: 1 Food Salt Sample.

Table 1. Continued

| | | | |
|-------------|---|-------|-------|
| Pakistan | Rock salt  | White | 16FSS |
| Pakistan | Table salt  | White | 17FSS |
| Pakistan | Table salt  | White | 18FSS |
| Germany | Rock salt  | White | 19FSS |
| Germany | Rock salt  | White | 20FSS |
| Germany | Sea salt  | White | 21FSS |
| England | Table salt  | White | 22FSS |
| England | Rock salt  | White | 23FSS |
| Switzerland | Table salt  | White | 24FSS |
| Austria | Rock salt  | White | 25FSS |

2.2. Detection of Moisture Contents of Food Salt Samples

Five grams of each sample were weighed and the samples were separately put into a small cylindrical capped glass bottle. These bottles were placed in a drying oven at 102°C for 6 hours. The dried samples were then placed into a desiccator for 30 minutes. After 30 minutes, the salt samples were weighed and placed in a drying oven for 1 hour. After the cooling process, the samples were weighed again. The drying process was repeated until the first dry weight was closely equal to the second dry weight. Finally, the moisture contents of the salt samples were calculated [18].

2.3. Detection of Ash Contents of Food Salt Samples

Five grams of each salt sample were put into ceramic crucibles. Then the samples were ashed in a muffle furnace at 600°C for 8 h. After the cooling process, the samples were weighed for the determination of ash content [30, 31].

2.4. Detection of pH values of Food Salt Samples

Five grams of each salt sample were put into a flask with 100 mL of distilled water. The flasks were shaken for 1 hour at 150 rpm. The pH values of the salt sample solutions were measured with a pH meter (Sartorius Professional Meter PT-10P, Goettingen, Germany) [30].

2.5. Determination of Total Bacterial Numbers and Total Halotolerant Bacterial Numbers of Salt Samples

To determine the total numbers of bacteria and total numbers of halotolerant bacteria in these salt samples, one gram of each salt sample was weighed and placed in 9 mL of sterile physiological saline solution containing 0.85% NaCl. Then, the salt solution was shaken in a shaking incubator at 100 rpm for 30 minutes at 24°C. Each of these solutions was passed through a sterile cellulose nitrate membrane (0.2 µm pore size) and the membrane was placed onto the surface of a Petri plate containing Modified Nutrient Agar (MNA) medium (peptone, 5 g; glucose, 10 g; beef extract, 3 g; agar, 20 g; distilled water, 1000 mL; pH 7) without salt. The plates were incubated at 37°C for seven days. After incubation, the bacterial colonies on the cellulose nitrate membrane placed on the MNA medium were counted to determine colony-forming units (CFU/g) of the total number of bacteria. All colonies grown on the cellulose nitrate membrane placed on MNA were restreaked several times to obtain pure cultures. The growth of pure bacterial culture was examined on both MNA medium without salt and MNA media with 10% NaCl and 20% NaCl. According to the test results, the total numbers of halotolerant bacteria in the food salt samples were determined.

2.6. Examination of Morphology, Motility and Gram Reaction of Halotolerant Bacterial Isolates

Each of the pure halotolerant bacterial isolates was

grown on a Modified Nutrient Broth (MNB) medium at 37°C for 24 h for the determination of cellular morphology, and motility. Then, the morphology and motility of each halotolerant isolate were examined on wet mounts under a light microscope [32]. The Gram staining procedure of each pure halotolerant bacterial isolate grown on MNA medium at 37°C for 24 h was performed according to the previously described method [32].

2.7. Examination of Growth Range of Halotolerant Bacterial Isolates at Different NaCl Concentrations, Different pH and Temperature Values

For detection range and optimal concentrations of NaCl required for the growth of each halotolerant isolate, each isolate was grown at both MNA medium without NaCl and MNA media supplemented with 10% and 20% NaCl (w/v). To determine pH range and optimal pH values for the growth of the isolates, each halotolerant isolate was grown on salt-free MNA media adjusted with 5, 7, and 9 pH values. The range and optimal growth temperatures of each isolate were detected on the MNA medium without NaCl with the optimal pH 7, at temperatures of 4°C, 24°C, and 37°C [33, 34].

2.8. Examination of Colony Properties of Pure Halotolerant Bacterial Isolates

Each of the pure halotolerant bacterial isolates was grown on MNA media without salt at 37°C for 24 h for the detection of colony form, elevation, margin, pigmentation, texture, appearance, and optical property [32-34].

2.9. Examination of Endospore Structures of Halotolerant Bacterial Isolates

To examine the endospore structure of each halotolerant bacterial isolate, the isolate was streaked out over MNA medium and the medium was incubated at 37°C for 72 h. Then, the heat-fixed smear of each halotolerant bacterial isolate was prepared and endospore staining of the isolate was performed according to the previously described method [32]. Malachite green solution (5%) was added to the slide covered with paper toweling, and the slide was placed on a hot plate for 5 min. Then, the paper towel was removed and the cooled slide was rinsed with water for 30 sec. Finally, the slide was covered with safranin for 60 sec and rinsed with water for 30 sec. The slides were examined under oil immersion [32].

2.10. Biochemical Tests (Catalase, Oxidase, Protease, Lipase, Amylase, Caseinase, Ammonia Production from Peptone) of Halotolerant Test Isolates

Catalase, oxidase, protease, lipase, amylase, and caseinase activities, and ammonia production of each halotolerant isolate were investigated. Catalase test was carried out by adding three drops of 3% H₂O₂ onto the

colonies of the isolates grown on the MNA medium without salt at 37°C for 24 h [32]. The formation of oxygen bubbles indicated positive catalase activity. For oxidase test, two drops of oxidase test agent (1% tetramethyl-p-phenylenediamine dihydrochloride) were dropped onto filter paper, and then the bacterial colony of each isolate was transferred to filter paper. Detection of purple color onto filter paper was regarded as a positive result in 30 sec [32]. Gelatine Agar medium (tryptone, 15 g; soytone, 5 g; gelatin, 20 g; agar, 20 g; distilled water, 1000 mL; pH 7) without salt was used to determine protease activity. After incubation at 37°C for 7 days, a saturated ammonium sulphate solution was added to the medium. A clear zone around the colony was accepted as a positive protease activity [35, 36]. Olive oil-containing Lipase Agar medium with rhodamine-B (trypticase peptone, 4 g; yeast extract, 4 g; olive oil, 30 mL; rhodamine-B, 0.2 g; Tween 80, 0.33 mL; agar, 20 g; distilled water, 1000 mL; pH 7) was used for lipase activity. After incubation at 37°C for 5 days, the Petri plate was checked under ultraviolet light. Fluorescent orange halos in the medium were accepted as positive lipase activity [37]. Starch medium (starch, 10 g; beef extract, 3 g; agar, 20 g; distilled water, 1000 mL; pH 7) was used for amylase test. After incubation at 37°C for 48 hours, Gram's Lugol solution was added to the medium. A clear zone around the colony was accepted as a positive amylase activity [32]. Plate Count Agar medium (tryptone, 5 g; yeast extract, 2.5 g; glucose, 1 g; skim milk, 20 mL; agar, 20 g; distilled water, 1000 mL; pH 7) containing skim milk was used for caseinase test. After incubation at 37°C for 48 h, a clear zone around the colony was accepted as a positive caseinase activity [32]. Peptone Broth medium (peptone, 10 g; sodium chloride, 5 g; distilled water, 1000 mL; pH 7) was used for detection of ammonia production from peptone. After incubation at 37°C for 24 h, 1-2 drops of Nessler reagent were dropped into tubes. Brown precipitate in the test tube was an indicator of ammonia formation of peptone [38].

2.11. Determination of Efficacy of Dry-Heat Sterilization and High-Pressure Steam Sterilization for Inactivation of Bacteria in Food Salt Samples

In this experiment, the efficacy of both dry-heat sterilization and high-pressure steam sterilization for the inactivation of bacteria including halotolerant bacteria found in six food salt samples were separately examined. Six food salt samples coded as FSS1, FSS9, FSS15, FSS18, FSS22, and FSS24 containing viable bacteria and halotolerant bacteria in high numbers were selected for sterilization experiments. Salt samples of FSS1 (Cyprus black lava sea salt obtained from France), FSS9 (sea salt, Türkiye), FSS15 (Himalaya salt, Pakistan), FSS18 (table salt, Pakistan), FSS22 (table salt, England), FSS24 (table salt, Switzerland) were used in the experiments. All experiments were done twice. Therefore, four groups of food salt samples coded as FSS1, FSS9, FSS15, FSS18, FSS22, and

FSS24 were prepared. One gram of salt samples belonging to FSS1, FSS9, FSS15, FSS18, FSS22, and FSS24 was weighed. Then, each salt sample was separately placed on sterile glass Petri plates. The plates belonging to FSS1, FSS9, FSS15, FSS18, FSS22, and FSS24 were placed in a Pasteur oven (FN500, NUVE, Türkiye) and sterilized at dry-heat at 175°C for 2 h. The other plates that belonged to FSS1, FSS9, FSS15, FSS18, FSS22, and FSS24 were placed inside the autoclave (HMC, HIRAYAMA, Japan) and sterilized at high-pressure steam at 121°C for 30 min. After sterilization processes, six food salt samples were separately added to 10 mL of sterile physiological saline solution (0.85%), and the salt solutions were mixed in a shaking incubator at 24°C for 30 min at 100 rpm. The saline solutions were passed through a sterile cellulose nitrate membrane (0.2 µm pore size), and each membrane was placed onto the MNA medium surface in the Petri plates. The plates containing membranes were incubated at 37°C for seven days. After incubation, the Petri plates were examined in terms of the presence or absence of the bacterial colonies. The absence of bacterial colonies on the membranes showed the high inactivation effect of dry-heat sterilization and high-pressure steam sterilization against bacteria found in food salt samples.

III. FINDINGS AND DISCUSSION

In the present study, although bacteria were observed in 20 salt samples, halotolerant bacteria were observed in 17 salt samples. While bacteria were not detected in five salt samples (4FSS and 5FSS collected from France; 8FSS and 12FSS Türkiye; 17FSS Pakistan), halotolerant bacteria were not found in eight salt samples (3FSS, 4FSS and 5FSS France; 8FSS and 12FSS Türkiye; 17FSS Pakistan; 20FSS Germany; 23FSS England). The moisture contents, ash contents, and pH values of salt samples changed between 2.3-3.7%, 95-97%, and 6.37-9.94, respectively. While most of the food salt samples had neutral pH values, only two salt samples coded as 5FSS (9.94) and 20FSS (8.55) had alkaline pH values (Table 2). The moisture contents of the salt samples were found to be very low. The organic content of the salt samples was calculated from the ash content. Organic contents of the salt samples were also found as fairly low. Low moisture content and low organic content may adversely affect the growth of bacteria in food salt samples. Due to the low moisture contents and low organic substances of the salt samples, 80% of salt samples contained bacteria (1-58 CFU/g), and 68% of salt samples had halotolerant bacteria (1-40 CFU/g) in low number. In a previous study, moisture contents of 40 salt samples, which were used in hide and skin preservation, ranged from 0.90% to 4.97% [38]. In another research, moisture contents and pH values of the salt samples used in the leather industry had been found between 0.90% and 5.02%, 6.23 and 7.22, respectively [24].

Table 2. The salt codes, countries, moisture contents, ash contents, pH values, total numbers of bacteria, total numbers of halotolerant bacteria of salt samples

| Salt Codes | Countries | Moisture (%) | Ash (%) | pH | Total Numbers of Bacteria (CFU/g) | Total Numbers of Halotolerant Bacteria (CFU/g) |
|------------|-------------|--------------|---------|------|-----------------------------------|--|
| 1FSS | France | 3.3 | 96.0 | 7.38 | 35 | 34 |
| 2FSS | France | 3.3 | 96.6 | 7.50 | 22 | 22 |
| 3FSS | France | 3.5 | 95.2 | 7.21 | 2 | 0 |
| 4FSS | France | 3.3 | 96.6 | 7.33 | 0 | 0 |
| 5FSS | France | 3.4 | 95.0 | 9.94 | 0 | 0 |
| 6FSS | France | 3.0 | 97.0 | 8.00 | 10 | 10 |
| 7FSS | Türkiye | 3.3 | 97.0 | 6.54 | 17 | 14 |
| 8FSS | Türkiye | 3.0 | 97.0 | 7.04 | 0 | 0 |
| 9FSS | Türkiye | 3.0 | 96.6 | 6.95 | 40 | 40 |
| 10FSS | Türkiye | 3.2 | 96.0 | 6.83 | 10 | 8 |
| 11FSS | Türkiye | 3.3 | 95.0 | 7.43 | 12 | 11 |
| 12FSS | Türkiye | 3.3 | 95.2 | 6.37 | 0 | 0 |
| 13FSS | Türkiye | 3.7 | 96.0 | 7.40 | 30 | 12 |
| 14FSS | Türkiye | 3.0 | 95.7 | 6.57 | 1 | 1 |
| 15FSS | Pakistan | 2.5 | 96.3 | 6.82 | 30 | 30 |
| 16FSS | Pakistan | 3.3 | 95.5 | 6.51 | 9 | 9 |
| 17FSS | Pakistan | 3.0 | 97.0 | 6.59 | 0 | 0 |
| 18FSS | Pakistan | 3.0 | 96.6 | 6.60 | 58 | 16 |
| 19FSS | Germany | 3.4 | 95.0 | 6.96 | 1 | 1 |
| 20FSS | Germany | 2.8 | 96.0 | 8.55 | 8 | 0 |
| 21FSS | Germany | 3.0 | 97.0 | 7.10 | 12 | 10 |
| 22FSS | England | 2.3 | 95.5 | 7.15 | 21 | 20 |
| 23FSS | England | 2.5 | 96.0 | 7.90 | 2 | 0 |
| 24FSS | Switzerland | 3.0 | 96.3 | 7.04 | 40 | 40 |
| 25FSS | Austria | 3.0 | 97.0 | 7.70 | 9 | 7 |

A total of 138 pure halotolerant bacterial isolates were obtained from 17 salt samples. Growth ranges of the halotolerant isolates at different salt concentrations, different pH, and different temperature values are shown in Table 3. All isolates grew at the absence of salt and presence of 10% NaCl in the medium. However, only 22 isolates (6FSS5, 6FSS8, 9FSS7, 9FSS15, 9FSS16, 9FSS24, 9FSS31, 11FSS3, 11FSS7, 11FSS9, 13FSS12, 14FSS1, 18FSS7, 18FSS35, 18FSS50, 21FSS5, 21FSS9, 22FSS2, 24FSS2, 24FSS3, 25FSS1, 25FSS10) were able to grow at 20% NaCl. These results showed that the isolates were halotolerant bacteria. All halotolerant isolates showed growth at pH 5, 7, and 9. While eight isolates (13FSS22, 13FSS30, 18FSS5, 18FSS6, 18FSS7, 18FSS9, 21FSS1, 25FSS8) grew at 4°C, all isolates grew at 24°C and 37°C.

When the pH values of the food salt samples containing halotolerant bacteria were compared with the pH values at which the halotolerant isolate was grown, a close relationship was observed between the salt samples and the halotolerant isolates in terms of pH values. The pH values of 17 food salt samples (in which halotolerant bacteria were isolated) were between 6.51 and 8.00 (Table 2). All halotolerant bacteria were grown on MNA agar media with pH values of 5, 7, and 9. The optimum growth of the isolates was observed at pH 7. These results showed that the pH values of food salt samples containing halotolerant bacteria were suitable to support the growth of halotolerant isolates.

In another study, the optimal temperature ranges for halotolerant bacteria were found as 30°C-40°C [39]. In a different study, the researchers reported the growth of these microorganisms at pH 7.0-8.5 and 0%-12% NaCl concentrations [40]. The researchers stated that the optimal temperature and pH for the growth of halotolerant isolates were 37°C and 7, respectively [24]. Our test results were found to be consistent with the results of the previous studies. All halotolerant isolates showed optimal growth at MNA medium without salt, pH 7 and 37°C (Table 3).

All isolates of halotolerant bacteria were rod-shaped. Although 131 halotolerant isolates were motile, seven isolates were non-motile. While 118 halotolerant isolates (86%) were found as Gram-positive bacteria, 20 halotolerant isolates (14%) were Gram-negative bacteria. Seventy-eight isolates were endospore-forming bacteria (Table 4). The cell wall of Gram-negative bacteria contains the lipopolysaccharide layer (LPS) that is toxic to animals and humans. The toxicity of LPS is due to Lipid A called endotoxin. Some endotoxins may cause fever, gastrointestinal symptoms such as gas, diarrhea, and vomiting in humans [41]. Food salts containing Gram-negative and Gram-positive halotolerant bacteria may contaminate uncooked foods such as salads. The bacterial growth in the foods stored at room temperature may result in food spoilage and cause foodborne disease in humans.

The common presence of halotolerant Gram-positive bacteria in salt samples was also detected in the salt samples collected from the leather industry. In that study, the researchers isolated 83 halotolerant bacteria from 30 hide and skin preservation salt samples. All isolates were found as motile, rod-shaped, and endospore-forming Gram-positive bacteria in that study [24].

Forms of the colonies of halotolerant bacteria were detected as circular (91 isolates), punctiform (33 isolates), irregular (8 isolates), rhizoid (5 isolates) or filamentous (1 isolate). Elevations of the colonies were flat (76 isolates), convex (7 isolates) or raised (55 isolates). Margins of the colonies were entire (97 isolates), erose (17 isolates), filamentous (15 isolates) or undulate (9 isolates). Pigmentations of the colonies were orange (2 isolates), cream (62 isolates), dark cream (7 isolates), white (47 isolates), yellow (14 isolates), dark yellow (1 isolate) or non-pigmented (5 isolates). Textures of the colonies were smooth (73 isolates) or rough (65 isolates). Appearances of the colonies were dull (66 isolates) or shiny (72 isolates). Optical properties of the colonies were opaque (63

isolates), translucent (49 isolates) or transparent (26 isolates) (Table 4).

Catalase and oxidase reactions, protease, lipase, amylase, and caseinase activities, ammonia production from peptone of the test isolates are shown in Table 5. All isolates were catalase positive. Catalase test reactions of the halotolerant bacteria showed that these microorganisms are aerobic or facultative aerobic. Among 138 isolates, 83, 84, 48, 92, 100 isolates were oxidase, protease, lipase, amylase, and caseinase positive, respectively. Sixty isolates produced ammonia from peptone. Food salt samples coded as 1FSS, 2FSS, 6FSS, 7FSS, 9FSS, 10FSS, 11FSS, 13FSS, 14FSS, 15FSS, 16FSS, 18FSS, 19FSS, 21FSS, 22FSS, 24FSS, 25FSS had halotolerant bacteria with hydrolytic activities (Table 5). In a study carried out with 30 salt samples collected from different leather factories in Corlu and Tuzla (Türkiye), catalase and protease activities of all isolates (83 strains) in the salt samples were found as positive and 55 isolates showed positive oxidase activities [24].

Table 3. Growth ranges of halotolerant isolates at different NaCl concentrations, different pH and different temperature values

| | Isolate Codes | NaCl Concentrations | | | pH Values | | | Temperature Values | | |
|----|---------------|---------------------|-----|-----|-----------|------|------|--------------------|------|------|
| | | 0% | 10% | 20% | pH 5 | pH 7 | pH 9 | 4°C | 24°C | 37°C |
| 1 | 1FSS1 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 2 | 1FSS2 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 3 | 2FSS1 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 4 | 2FSS2 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 5 | 6FSS1 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 6 | 6FSS2 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 7 | 6FSS3 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 8 | 6FSS4 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 9 | 6FSS5 | ++ | + | + | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 10 | 6FSS6 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 11 | 6FSS7 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 12 | 6FSS8 | ++ | + | + | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 13 | 6FSS9 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 14 | 6FSS10 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 15 | 7FSS1 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 16 | 9FSS1 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 17 | 9FSS2 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 18 | 9FSS3 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 19 | 9FSS4 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 20 | 9FSS5 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 21 | 9FSS6 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 22 | 9FSS7 | ++ | + | + | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 23 | 9FSS8 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 24 | 9FSS9 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 25 | 9FSS13 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 26 | 9FSS14 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 27 | 9FSS15 | ++ | + | + | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 28 | 9FSS16 | ++ | + | + | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 29 | 9FSS17 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |

| | | | | | | | | | | |
|----|--------|----|---|---|---|----|---|---|---|----|
| 30 | 9FSS18 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 31 | 9FSS19 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 32 | 9FSS20 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 33 | 9FSS21 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 34 | 9FSS22 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 35 | 9FSS23 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 36 | 9FSS24 | ++ | + | + | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 37 | 9FSS26 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 38 | 9FSS27 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 39 | 9FSS28 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 40 | 9FSS29 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |

Table 3. Continued

| | Isolate Codes | NaCl Concentrations | | | pH Values | | | Temperature Values | | |
|----|---------------|---------------------|-----|-----|-----------|------|------|--------------------|------|------|
| | | 0% | 10% | 20% | pH 5 | pH 7 | pH 9 | 4°C | 24°C | 37°C |
| 41 | 9FSS30 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 42 | 9FSS31 | ++ | + | + | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 43 | 9FSS32 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 44 | 9FSS33 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 45 | 9FSS34 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 46 | 9FSS35 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 47 | 9FSS36 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 48 | 9FSS37 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 49 | 9FSS38 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 50 | 9FSS39 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 51 | 9FSS40 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 52 | 10FSS1 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 53 | 10FSS2 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 54 | 10FSS3 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 55 | 10FSS4 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 56 | 10FSS5 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 57 | 10FSS6 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 58 | 10FSS7 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 59 | 10FSS8 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 60 | 11FSS1 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 61 | 11FSS2 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 62 | 11FSS3 | ++ | + | + | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 63 | 11FSS4 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 64 | 11FSS5 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 65 | 11FSS6 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 66 | 11FSS7 | ++ | + | + | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 67 | 11FSS8 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 68 | 11FSS9 | ++ | + | + | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 69 | 11FSS10 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 70 | 11FSS11 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 71 | 13FSS3 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 72 | 13FSS11 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 73 | 13FSS12 | ++ | + | + | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 74 | 13FSS15 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 75 | 13FSS19 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 76 | 13FSS20 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 77 | 13FSS21 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 78 | 13FSS22 | ++ | + | - | + | ++ | + | + | + | ++ |
| 79 | 13FSS26 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 80 | 13FSS28 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 81 | 13FSS29 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 82 | 13FSS30 | ++ | + | - | + | ++ | + | + | + | ++ |

| | | | | | | | | | | |
|----|--------|----|---|---|---|----|---|---|---|----|
| 83 | 14FSS1 | ++ | + | + | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 84 | 15FSS1 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 85 | 15FSS2 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 86 | 16FSS1 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 87 | 16FSS2 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 88 | 16FSS3 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 89 | 16FSS4 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 90 | 16FSS5 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 91 | 16FSS6 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 92 | 16FSS7 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |

Table 3. Continued

| | Isolate Codes | NaCl Concentrations | | | pH Values | | | Temperature Values | | |
|-----|---------------|---------------------|-----|-----|-----------|------|------|--------------------|------|------|
| | | 0% | 10% | 20% | pH 5 | pH 7 | pH 9 | 4°C | 24°C | 37°C |
| 93 | 16FSS8 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 94 | 16FSS9 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 95 | 18FSS1 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 96 | 18FSS5 | ++ | + | - | + | ++ | + | + | + | ++ |
| 97 | 18FSS6 | ++ | + | - | + | ++ | + | + | + | ++ |
| 98 | 18FSS7 | ++ | + | + | + | ++ | + | + | + | ++ |
| 99 | 18FSS9 | ++ | + | - | + | ++ | + | + | + | ++ |
| 100 | 18FSS10 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 101 | 18FSS11 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 102 | 18FSS35 | ++ | + | + | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 103 | 18FSS40 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 104 | 18FSS41 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 105 | 18FSS45 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 106 | 18FSS46 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 107 | 18FSS50 | ++ | + | + | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 108 | 18FSS52 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 109 | 18FSS53 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 110 | 18FSS55 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 111 | 19FSS1 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 112 | 21FSS1 | ++ | + | - | + | ++ | + | + | + | ++ |
| 113 | 21FSS2 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 114 | 21FSS3 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 115 | 21FSS4 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 116 | 21FSS5 | ++ | + | + | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 117 | 21FSS6 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 118 | 21FSS7 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 119 | 21FSS8 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 120 | 21FSS9 | ++ | + | + | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 121 | 21FSS10 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 122 | 22FSS1 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 123 | 22FSS2 | ++ | + | + | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 124 | 22FSS3 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 125 | 22FSS4 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 126 | 22FSS5 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 127 | 22FSS6 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 128 | 22FSS7 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 129 | 24FSS2 | ++ | + | + | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 130 | 24FSS3 | ++ | + | + | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 131 | 25FSS1 | ++ | + | + | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 132 | 25FSS4 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 133 | 25FSS5 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 134 | 25FSS6 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 135 | 25FSS7 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 136 | 25FSS8 | ++ | + | - | + | ++ | + | + | + | ++ |
| 137 | 25FSS9 | ++ | + | - | + | ++ | + | - | + | ++ |
| 138 | 25FSS10 | ++ | + | + | + | ++ | + | - | + | ++ |

++:shows optimal growth values

Table 4. Phenotypic properties of pure halotolerant bacterial colonies

| | Isolate Codes | Cell Morphology | Motility | Gram Reaction | Endospore | Colony Characteristics | | | | | | |
|----|---------------|-----------------|----------|---------------|-----------|------------------------|-----------|-------------|---------------|---------|------------|------------------|
| | | | | | | Form | Elevation | Margin | Pigmentation | Texture | Appearance | Optical Property |
| 1 | 1FSS1 | Rod | + | - | - | Circular | Raised | Entire | Orange | Smooth | Shiny | Opaque |
| 2 | 1FSS2 | Rod | + | + | + | Punctiform | Flat | Entire | Non-pigmented | Smooth | Shiny | Transparent |
| 3 | 2FSS1 | Rod | + | + | - | Punctiform | Flat | Entire | White | Smooth | Shiny | Transparent |
| 4 | 2FSS2 | Rod | + | + | + | Punctiform | Flat | Entire | Non-pigmented | Rough | Shiny | Transparent |
| 5 | 6FSS1 | Rod | + | + | - | Circular | Flat | Entire | Cream | Smooth | Dull | Opaque |
| 6 | 6FSS2 | Rod | + | - | - | Circular | Flat | Filamentous | Cream | Rough | Dull | Opaque |
| 7 | 6FSS3 | Rod | + | + | + | Circular | Flat | Filamentous | White | Smooth | Dull | Opaque |
| 8 | 6FSS4 | Rod | + | + | + | Circular | Raised | Filamentous | White | Rough | Dull | Opaque |
| 9 | 6FSS5 | Rod | + | + | + | Circular | Raised | Filamentous | White | Smooth | Dull | Opaque |
| 10 | 6FSS6 | Rod | - | + | + | Circular | Flat | Filamentous | Cream | Rough | Dull | Opaque |
| 11 | 6FSS7 | Rod | + | - | - | Circular | Raised | Entire | Cream | Smooth | Dull | Opaque |
| 12 | 6FSS8 | Rod | + | + | + | Circular | Raised | Entire | Cream | Smooth | Dull | Opaque |
| 13 | 6FSS9 | Rod | + | + | + | Circular | Raised | Entire | White | Rough | Dull | Opaque |
| 14 | 6FSS10 | Rod | + | + | + | Circular | Raised | Entire | Yellow | Smooth | Dull | Opaque |
| 15 | 7FSS1 | Rod | + | + | + | Circular | Convex | Entire | Orange | Smooth | Shiny | Opaque |
| 16 | 9FSS1 | Rod | + | + | - | Circular | Raised | Entire | Cream | Rough | Dull | Opaque |
| 17 | 9FSS2 | Rod | + | + | - | Circular | Raised | Entire | Cream | Rough | Shiny | Translucent |
| 18 | 9FSS3 | Rod | - | + | + | Circular | Convex | Entire | Cream | Smooth | Shiny | Opaque |
| 19 | 9FSS4 | Rod | + | + | - | Punctiform | Flat | Entire | Cream | Rough | Shiny | Translucent |
| 20 | 9FSS5 | Rod | + | + | - | Punctiform | Flat | Entire | Cream | Smooth | Shiny | Translucent |
| 21 | 9FSS6 | Rod | + | + | - | Punctiform | Flat | Entire | White | Rough | Dull | Translucent |
| 22 | 9FSS7 | Rod | + | + | + | Punctiform | Flat | Entire | Yellow | Smooth | Shiny | Translucent |
| 23 | 9FSS8 | Rod | + | + | - | Circular | Flat | Entire | Yellow | Smooth | Shiny | Translucent |
| 24 | 9FSS9 | Rod | + | + | - | Circular | Raised | Entire | Cream | Smooth | Dull | Translucent |
| 25 | 9FSS13 | Rod | - | + | - | Circular | Flat | Erose | Cream | Rough | Dull | Opaque |
| 26 | 9FSS14 | Rod | + | + | + | Punctiform | Raised | Entire | Cream | Smooth | Shiny | Translucent |
| 27 | 9FSS15 | Rod | + | + | - | Circular | Flat | Entire | Cream | Rough | Dull | Opaque |
| 28 | 9FSS16 | Rod | + | + | + | Circular | Raised | Entire | Cream | Smooth | Shiny | Opaque |
| 29 | 9FSS17 | Rod | + | + | - | Punctiform | Flat | Entire | White | Smooth | Dull | Translucent |
| 30 | 9FSS18 | Rod | + | + | + | Circular | Flat | Erose | White | Smooth | Shiny | Translucent |
| 31 | 9FSS19 | Rod | - | + | - | Circular | Flat | Entire | Cream | Smooth | Shiny | Translucent |
| 32 | 9FSS20 | Rod | + | + | + | Punctiform | Raised | Entire | Cream | Smooth | Dull | Translucent |
| 33 | 9FSS21 | Rod | + | - | - | Circular | Raised | Entire | Yellow | Smooth | Shiny | Transparent |
| 34 | 9FSS22 | Rod | + | + | - | Punctiform | Flat | Entire | Yellow | Rough | Shiny | Transparent |
| 35 | 9FSS23 | Rod | + | + | - | Punctiform | Flat | Entire | Yellow | Smooth | Shiny | Transparent |
| 36 | 9FSS24 | Rod | + | + | + | Circular | Raised | Undulate | Dark cream | Smooth | Shiny | Transparent |
| 37 | 9FSS26 | Rod | + | - | - | Punctiform | Flat | Entire | Cream | Smooth | Shiny | Translucent |
| 38 | 9FSS27 | Rod | + | + | + | Punctiform | Flat | Entire | Cream | Smooth | Shiny | Translucent |
| 39 | 9FSS28 | Rod | + | + | - | Circular | Raised | Entire | Cream | Rough | Dull | Opaque |
| 40 | 9FSS29 | Rod | + | + | - | Punctiform | Flat | Entire | Cream | Smooth | Dull | Opaque |
| 41 | 9FSS30 | Rod | + | + | - | Circular | Raised | Entire | White | Smooth | Shiny | Translucent |
| 42 | 9FSS31 | Rod | + | + | + | Circular | Raised | Undulate | White | Smooth | Dull | Translucent |
| 43 | 9FSS32 | Rod | + | + | - | Circular | Flat | Entire | Cream | Smooth | Shiny | Translucent |
| 44 | 9FSS33 | Rod | + | + | - | Circular | Raised | Undulate | Cream | Rough | Dull | Opaque |
| 45 | 9FSS34 | Rod | - | + | + | Circular | Flat | Entire | Cream | Smooth | Dull | Opaque |
| 46 | 9FSS35 | Rod | + | + | - | Punctiform | Flat | Entire | Cream | Smooth | Shiny | Transparent |
| 47 | 9FSS36 | Rod | + | + | - | Circular | Raised | Erose | Dark cream | Smooth | Shiny | Translucent |
| 48 | 9FSS37 | Rod | + | + | - | Punctiform | Raised | Entire | Yellow | Smooth | Shiny | Opaque |
| 49 | 9FSS38 | Rod | + | + | + | Circular | Flat | Entire | Cream | Rough | Dull | Translucent |
| 50 | 9FSS39 | Rod | + | + | + | Circular | Raised | Erose | Cream | Smooth | Shiny | Translucent |

Table 4. Continued

| | Isolate Codes | Cell Morphology | Motility | Gram Reaction | Endospore | Colony Characteristics | | | | | | |
|-----|---------------|-----------------|----------|---------------|-----------|------------------------|-----------|-------------|---------------|---------|------------|------------------|
| | | | | | | Form | Elevation | Margin | Pigmentation | Texture | Appearance | Optical Property |
| 51 | 9FSS40 | Rod | + | + | + | Punctiform | Flat | Entire | Cream | Smooth | Shiny | Translucent |
| 52 | 10FSS1 | Rod | + | + | - | Circular | Raised | Entire | White | Rough | Dull | Translucent |
| 53 | 10FSS2 | Rod | + | + | + | Circular | Raised | Entire | White | Rough | Dull | Opaque |
| 54 | 10FSS3 | Rod | + | + | + | Circular | Raised | Entire | Cream | Rough | Dull | Opaque |
| 55 | 10FSS4 | Rod | + | + | - | Circular | Raised | Entire | White | Rough | Dull | Opaque |
| 57 | 10FSS6 | Rod | - | + | - | Punctiform | Flat | Entire | Cream | Rough | Shiny | Translucent |
| 58 | 10FSS7 | Rod | + | + | - | Circular | Flat | Entire | Cream | Smooth | Shiny | Transparent |
| 59 | 10FSS8 | Rod | + | + | - | Punctiform | Flat | Entire | White | Smooth | Shiny | Transparent |
| 60 | 11FSS1 | Rod | + | + | + | Circular | Raised | Entire | Cream | Smooth | Dull | Opaque |
| 61 | 11FSS2 | Rod | + | + | + | Circular | Flat | Erose | Cream | Rough | Dull | Translucent |
| 62 | 11FSS3 | Rod | + | + | + | Circular | Raised | Entire | White | Smooth | Dull | Transparent |
| 63 | 11FSS4 | Rod | + | + | + | Circular | Raised | Entire | Cream | Smooth | Dull | Opaque |
| 64 | 11FSS5 | Rod | + | + | + | Circular | Flat | Entire | White | Smooth | Dull | Opaque |
| 65 | 11FSS6 | Rod | + | + | + | Circular | Raised | Entire | White | Rough | Dull | Opaque |
| 66 | 11FSS7 | Rod | + | + | + | Circular | Raised | Entire | Cream | Smooth | Shiny | Opaque |
| 67 | 11FSS8 | Rod | + | + | + | Circular | Flat | Entire | Cream | Smooth | Shiny | Translucent |
| 68 | 11FSS9 | Rod | + | + | + | Circular | Raised | Entire | White | Rough | Dull | Opaque |
| 69 | 11FSS10 | Rod | + | + | + | Circular | Flat | Entire | White | Rough | Dull | Opaque |
| 70 | 11FSS11 | Rod | + | + | + | Circular | Raised | Entire | Cream | Rough | Dull | Opaque |
| 71 | 13FSS3 | Rod | + | + | + | Irregular | Convex | Entire | Cream | Rough | Shiny | Opaque |
| 72 | 13FSS11 | Rod | + | + | + | Punctiform | Flat | Entire | Non-pigmented | Smooth | Shiny | Transparent |
| 73 | 13FSS12 | Rod | + | + | + | Irregular | Convex | Entire | Cream | Rough | Shiny | Opaque |
| 74 | 13FSS15 | Rod | + | + | + | Circular | Convex | Entire | White | Smooth | Dull | Translucent |
| 75 | 13FSS19 | Rod | + | + | + | Irregular | Flat | Entire | Cream | Rough | Shiny | Opaque |
| 76 | 13FSS20 | Rod | + | + | + | Rhizoid | Flat | Filamentous | Cream | Smooth | Dull | Translucent |
| 77 | 13FSS21 | Rod | + | + | + | Circular | Flat | Entire | White | Rough | Shiny | Opaque |
| 78 | 13FSS22 | Rod | + | + | + | Circular | Flat | Entire | White | Smooth | Shiny | Transparent |
| 79 | 13FSS26 | Rod | + | + | + | Rhizoid | Flat | Filamentous | White | Rough | Shiny | Translucent |
| 80 | 13FSS28 | Rod | + | + | + | Rhizoid | Raised | Filamentous | White | Rough | Shiny | Transparent |
| 81 | 13FSS29 | Rod | + | + | + | Rhizoid | Flat | Filamentous | White | Rough | Dull | Transparent |
| 82 | 13FSS30 | Rod | + | + | + | Rhizoid | Flat | Filamentous | White | Rough | Shiny | Translucent |
| 83 | 14FSS1 | Rod | + | - | - | Circular | Flat | Entire | Dark cream | Smooth | Shiny | Transparent |
| 84 | 15FSS1 | Rod | + | + | + | Circular | Raised | Entire | Yellow | Smooth | Shiny | Translucent |
| 85 | 15FSS2 | Rod | + | - | - | Circular | Flat | Entire | Yellow | Smooth | Shiny | Translucent |
| 86 | 16FSS1 | Rod | + | + | + | Punctiform | Raised | Entire | Cream | Rough | Dull | Opaque |
| 87 | 16FSS2 | Rod | - | - | - | Punctiform | Flat | Entire | Dark yellow | Smooth | Shiny | Transparent |
| 88 | 16FSS3 | Rod | + | - | - | Circular | Flat | Entire | Yellow | Smooth | Dull | Translucent |
| 89 | 16FSS4 | Rod | + | + | + | Circular | Raised | Entire | Cream | Smooth | Dull | Opaque |
| 90 | 16FSS5 | Rod | + | + | + | Circular | Raised | Entire | White | Smooth | Dull | Opaque |
| 91 | 16FSS6 | Rod | + | + | + | Circular | Düz | Entire | White | Smooth | Dull | Opaque |
| 92 | 16FSS7 | Rod | + | + | + | Punctiform | Flat | Undulate | Cream | Rough | Dull | Transparent |
| 93 | 16FSS8 | Rod | + | - | - | Punctiform | Flat | Entire | White | Rough | Shiny | Translucent |
| 94 | 16FSS9 | Rod | + | + | + | Circular | Flat | Entire | Cream | Rough | Dull | Translucent |
| 95 | 18FSS1 | Rod | + | + | + | Punctiform | Flat | Entire | Cream | Rough | Shiny | Opaque |
| 96 | 18FSS5 | Rod | + | + | + | Circular | Raised | Erose | White | Smooth | Dull | Opaque |
| 97 | 18FSS6 | Rod | + | + | - | Circular | Flat | Erose | Dark cream | Smooth | Dull | Opaque |
| 98 | 18FSS7 | Rod | + | + | - | Circular | Flat | Entire | White | Smooth | Dull | Opaque |
| 99 | 18FSS9 | Rod | + | + | - | Circular | Convex | Entire | White | Rough | Dull | Opaque |
| 100 | 18FSS10 | Rod | + | + | + | Circular | Raised | Entire | White | Rough | Dull | Translucent |
| 101 | 18FSS11 | Rod | + | + | + | Circular | Flat | Entire | Cream | Rough | Shiny | Translucent |
| 102 | 18FSS35 | Rod | + | + | + | Circular | Flat | Erose | Cream | Rough | Dull | Translucent |
| 103 | 18FSS40 | Rod | + | + | + | Circular | Flat | Entire | White | Rough | Shiny | Opaque |
| 104 | 18FSS41 | Rod | + | + | - | Punctiform | Flat | Entire | White | Rough | Dull | Translucent |
| 105 | 18FSS45 | Rod | + | + | - | Circular | Flat | Erose | Dark cream | Smooth | Shiny | Translucent |

Table 4. Continued

| | Isolate Codes | Cell Morphology | Motility | Gram Reaction | Endospore | Colony Characteristics | | | | | | |
|-----|---------------|-----------------|----------|---------------|-----------|------------------------|-----------|-------------|---------------|---------|------------|------------------|
| | | | | | | Form | Elevation | Margin | Pigmentation | Texture | Appearance | Optical Property |
| 106 | 18FSS46 | Rod | + | + | + | Punctiform | Convex | Entire | Dark cream | Smooth | Shiny | Transparent |
| 107 | 18FSS50 | Rod | + | + | + | Circular | Raised | Entire | Cream | Smooth | Dull | Opaque |
| 108 | 18FSS52 | Rod | + | + | + | Circular | Raised | Entire | White | Rough | Dull | Opaque |
| 109 | 18FSS53 | Rod | + | + | - | Circular | Flat | Entire | Dark cream | Rough | Dull | Transparent |
| 110 | 18FSS55 | Rod | + | + | + | Circular | Raised | Undulate | White | Rough | Shiny | Opaque |
| 111 | 19FSS1 | Rod | + | - | - | Punctiform | Flat | Entire | Non-pigmented | Rough | Shiny | Transparent |
| 112 | 21FSS1 | Rod | + | + | + | Circular | Flat | Erose | Cream | Rough | Dull | Opaque |
| 113 | 21FSS2 | Rod | + | - | - | Circular | Flat | Erose | Cream | Smooth | Shiny | Opaque |
| 114 | 21FSS3 | Rod | + | - | - | Circular | Flat | Erose | Cream | Rough | Dull | Opaque |
| 115 | 21FSS4 | Rod | + | - | - | Circular | Flat | Erose | Cream | Rough | Dull | Opaque |
| 116 | 21FSS5 | Rod | + | + | + | Filamentous | Raised | Filamentous | Cream | Smooth | Shiny | Translucent |
| 117 | 21FSS6 | Rod | + | + | + | Circular | Flat | Entire | White | Rough | Dull | Translucent |
| 118 | 21FSS7 | Rod | + | + | + | Circular | Flat | Erose | Yellow | Rough | Dull | Opaque |
| 119 | 21FSS8 | Rod | + | + | + | Circular | Raised | Undulate | Cream | Rough | Dull | Translucent |
| 120 | 21FSS9 | Rod | + | + | + | Circular | Raised | Undulate | Cream | Rough | Shiny | Translucent |
| 121 | 21FSS10 | Rod | + | + | + | Circular | Flat | Erose | Cream | Smooth | Dull | Opaque |
| 122 | 22FSS1 | Rod | + | - | - | Circular | Raised | Erose | White | Smooth | Shiny | Opaque |
| 123 | 22FSS2 | Rod | + | + | - | Punctiform | Flat | Entire | White | Smooth | Shiny | Translucent |
| 124 | 22FSS3 | Rod | + | + | + | Punctiform | Flat | Entire | White | Rough | Dull | Transparent |
| 125 | 22FSS4 | Rod | + | - | - | Circular | Flat | Undulate | White | Rough | Shiny | Translucent |
| 126 | 22FSS5 | Rod | + | - | - | Circular | Raised | Entire | Yellow | Smooth | Shiny | Opaque |
| 127 | 22FSS6 | Rod | + | - | - | Circular | Flat | Undulate | White | Rough | Dull | Transparent |
| 128 | 22FSS7 | Rod | + | + | - | Punctiform | Flat | Entire | White | Smooth | Shiny | Transparent |
| 129 | 24FSS2 | Rod | + | + | + | Circular | Flat | Entire | Yellow | Rough | Shiny | Opaque |
| 130 | 24FSS3 | Rod | + | + | - | Circular | Raised | Entire | White | Rough | Shiny | Translucent |
| 131 | 25FSS1 | Rod | + | + | + | Irregular | Raised | Filamentous | White | Rough | Shiny | Opaque |
| 132 | 25FSS4 | Rod | + | - | - | Circular | Flat | Erose | Cream | Smooth | Dull | Opaque |
| 133 | 25FSS5 | Rod | + | + | - | Irregular | Raised | Entire | Cream | Rough | Shiny | Opaque |
| 134 | 25FSS6 | Rod | + | + | + | Circular | Flat | Entire | Non-pigmented | Smooth | Shiny | Transparent |
| 135 | 25FSS7 | Rod | + | + | + | Irregular | Raised | Filamentous | Cream | Rough | Shiny | Translucent |
| 136 | 25FSS8 | Rod | + | + | + | Irregular | Raised | Filamentous | Cream | Rough | Shiny | Translucent |
| 137 | 25FSS9 | Rod | + | + | - | Irregular | Raised | Filamentous | Cream | Rough | Shiny | Translucent |
| 138 | 25FSS10 | Rod | + | - | - | Circular | Raised | Entire | Yellow | Smooth | Shiny | Opaque |

Table 5. Biochemical test results of halotolerant test isolates

| | Isolate Codes | Catalase | Oxidase | Protease | Lipase | Amylase | Caseinase | Ammonia from peptone |
|----|---------------|----------|---------|----------|--------|---------|-----------|----------------------|
| 1 | 1FSS1 | + | - | - | + | - | - | + |
| 2 | 1FSS2 | + | + | + | - | + | + | + |
| 3 | 2FSS1 | + | + | - | - | - | - | - |
| 4 | 2FSS2 | + | - | - | + | + | - | + |
| 5 | 6FSS1 | + | - | - | + | + | + | + |
| 6 | 6FSS2 | + | - | - | + | + | + | - |
| 7 | 6FSS3 | + | - | - | + | + | + | + |
| 8 | 6FSS4 | + | - | + | + | + | + | + |
| 9 | 6FSS5 | + | + | - | + | + | + | - |
| 10 | 6FSS6 | + | + | + | + | - | + | - |
| 11 | 6FSS7 | + | - | + | - | + | + | + |
| 12 | 6FSS8 | + | - | - | - | + | + | - |
| 13 | 6FSS9 | + | + | + | - | + | + | + |
| 14 | 6FSS10 | + | + | - | - | + | + | - |
| 15 | 7FSS1 | + | - | + | + | - | + | - |
| 16 | 9FSS1 | + | + | - | - | + | + | + |
| 17 | 9FSS2 | + | + | + | - | + | + | + |
| 18 | 9FSS3 | + | + | + | - | + | + | + |
| 19 | 9FSS4 | + | + | - | - | - | + | - |
| 20 | 9FSS5 | + | + | + | + | - | + | - |
| 21 | 9FSS6 | + | + | + | - | + | - | - |
| 22 | 9FSS7 | + | + | - | - | + | + | + |
| 23 | 9FSS8 | + | + | + | - | + | + | - |
| 24 | 9FSS9 | + | + | + | - | + | - | - |
| 25 | 9FSS13 | + | - | - | - | + | + | + |
| 26 | 9FSS14 | + | + | - | - | + | + | - |
| 27 | 9FSS15 | + | - | + | + | - | + | - |
| 28 | 9FSS16 | + | + | + | + | + | + | - |
| 29 | 9FSS17 | + | + | + | + | - | + | - |
| 30 | 9FSS18 | + | + | - | - | - | + | - |
| 31 | 9FSS19 | + | - | + | - | - | + | - |
| 32 | 9FSS20 | + | + | + | - | + | + | - |
| 33 | 9FSS21 | + | - | + | - | - | - | - |
| 34 | 9FSS22 | + | - | + | - | + | - | - |
| 35 | 9FSS23 | + | + | + | - | + | + | - |
| 36 | 9FSS24 | + | + | + | + | - | - | - |
| 37 | 9FSS26 | + | + | + | - | - | - | + |
| 38 | 9FSS27 | + | + | - | - | - | + | - |
| 39 | 9FSS28 | + | + | + | - | - | + | - |
| 40 | 9FSS29 | + | + | + | - | - | + | - |
| 41 | 9FSS30 | + | + | + | - | + | + | - |
| 42 | 9FSS31 | + | + | - | - | + | + | - |
| 43 | 9FSS32 | + | - | + | + | + | + | + |
| 44 | 9FSS33 | + | + | + | + | - | - | - |
| 45 | 9FSS34 | + | + | + | - | - | + | - |
| 46 | 9FSS35 | + | + | + | + | - | + | - |
| 47 | 9FSS36 | + | - | + | - | - | + | - |
| 48 | 9FSS37 | + | - | + | - | - | + | - |
| 49 | 9FSS38 | + | - | - | - | - | - | + |
| 50 | 9FSS39 | + | + | + | - | - | - | - |
| 51 | 9FSS40 | + | - | + | - | + | + | + |
| 52 | 10FSS1 | + | - | + | - | - | - | + |
| 53 | 10FSS2 | + | + | + | - | - | - | - |
| 54 | 10FSS3 | + | - | + | - | + | + | + |
| 55 | 10FSS4 | + | + | - | + | + | + | - |
| 56 | 10FSS5 | + | - | + | - | + | + | - |
| 57 | 10FSS6 | + | - | + | - | + | - | - |
| 58 | 10FSS7 | + | - | + | - | + | - | + |
| 59 | 10FSS8 | + | + | + | - | - | + | - |
| 60 | 11FSS1 | + | + | + | + | + | + | - |
| 61 | 11FSS2 | + | + | + | + | - | + | + |
| 62 | 11FSS3 | + | + | + | + | + | + | - |
| 63 | 11FSS4 | + | - | + | - | - | - | + |

Table 5. Continued

| | Isolate Codes | Catalase | Oxidase | Protease | Lipase | Amylase | Caseinase | Ammonia from peptone |
|-----|---------------|----------|---------|----------|--------|---------|-----------|----------------------|
| 64 | 11FSS5 | + | + | + | + | + | + | - |
| 65 | 11FSS6 | + | + | + | + | - | + | + |
| 66 | 11FSS7 | + | + | + | + | + | + | - |
| 67 | 11FSS8 | + | - | - | + | + | + | - |
| 68 | 11FSS9 | + | + | + | - | + | + | + |
| 69 | 11FSS10 | + | + | + | - | - | + | - |
| 70 | 11FSS11 | + | - | - | + | + | + | - |
| 71 | 13FSS3 | + | - | - | - | + | + | - |
| 72 | 13FSS11 | + | - | - | - | + | + | - |
| 73 | 13FSS12 | + | - | - | - | + | + | + |
| 74 | 13FSS15 | + | - | - | - | + | + | - |
| 75 | 13FSS19 | + | - | - | - | + | + | - |
| 76 | 13FSS20 | + | + | + | - | + | - | + |
| 77 | 13FSS21 | + | + | - | - | - | - | - |
| 78 | 13FSS22 | + | + | - | - | + | + | + |
| 79 | 13FSS26 | + | + | + | - | + | + | - |
| 80 | 13FSS28 | + | - | - | - | - | + | + |
| 81 | 13FSS29 | + | + | - | - | + | - | + |
| 82 | 13FSS30 | + | + | + | - | + | + | + |
| 83 | 14FSS1 | + | + | - | - | - | + | + |
| 84 | 15FSS1 | + | - | - | - | - | - | - |
| 85 | 15FSS2 | + | + | - | - | + | - | - |
| 86 | 16FSS1 | + | - | - | - | + | + | - |
| 87 | 16FSS2 | + | - | - | + | + | + | + |
| 88 | 16FSS3 | + | + | + | - | - | - | - |
| 89 | 16FSS4 | + | - | + | + | + | + | + |
| 90 | 16FSS5 | + | - | + | + | + | + | - |
| 91 | 16FSS6 | + | + | + | - | + | - | + |
| 92 | 16FSS7 | + | - | + | + | + | + | - |
| 93 | 16FSS8 | + | - | + | - | - | + | + |
| 94 | 16FSS9 | + | + | - | + | + | - | - |
| 95 | 18FSS1 | + | + | - | + | + | + | - |
| 96 | 18FSS5 | + | + | + | - | - | - | - |
| 97 | 18FSS6 | + | + | + | + | + | + | - |
| 98 | 18FSS7 | + | + | + | + | + | + | - |
| 99 | 18FSS9 | + | + | + | - | + | - | - |
| 100 | 18FSS10 | + | + | + | + | + | + | + |
| 101 | 18FSS11 | + | + | - | + | + | - | - |
| 102 | 18FSS35 | + | + | + | + | - | - | + |
| 103 | 18FSS40 | + | + | + | - | - | + | + |
| 104 | 18FSS41 | + | + | + | - | + | + | + |
| 105 | 18FSS45 | + | + | + | - | + | - | - |
| 106 | 18FSS46 | + | + | + | + | + | + | - |
| 107 | 18FSS50 | + | + | + | - | + | + | - |
| 108 | 18FSS52 | + | + | + | + | + | - | + |
| 109 | 18FSS53 | + | + | + | - | + | + | - |
| 110 | 18FSS55 | + | + | + | - | + | + | + |
| 111 | 19FSS1 | + | - | + | + | - | - | + |
| 112 | 21FSS1 | + | - | - | + | + | + | + |
| 113 | 21FSS2 | + | + | - | - | + | + | - |
| 114 | 21FSS3 | + | - | + | + | + | + | + |
| 115 | 21FSS4 | + | - | + | - | + | + | + |
| 116 | 21FSS5 | + | - | - | - | + | + | + |
| 117 | 21FSS6 | + | - | - | - | + | + | - |
| 118 | 21FSS7 | + | + | + | - | + | + | + |
| 119 | 21FSS8 | + | - | - | - | + | + | + |
| 120 | 21FSS9 | + | - | - | - | + | + | + |
| 121 | 21FSS10 | + | + | + | - | + | + | + |
| 122 | 22FSS1 | + | + | + | + | - | + | + |
| 123 | 22FSS2 | + | - | - | + | - | - | - |
| 124 | 22FSS3 | + | - | - | - | - | - | - |
| 125 | 22FSS4 | + | - | - | + | + | + | + |
| 126 | 22FSS5 | + | - | + | - | - | + | - |
| 127 | 22FSS6 | + | + | + | + | + | + | + |
| 128 | 22FSS7 | + | + | + | + | + | + | - |

Table 5. Continued

| | Isolate Codes | Catalase | Oxidase | Protease | Lipase | Amylase | Caseinase | Ammonia from peptone |
|-----|---------------|----------|---------|----------|--------|---------|-----------|----------------------|
| 129 | 24FSS2 | + | + | - | - | + | - | - |
| 130 | 24FSS3 | + | + | - | - | + | - | + |
| 131 | 25FSS1 | + | + | + | - | - | - | + |
| 132 | 25FSS4 | + | - | + | - | + | + | + |
| 133 | 25FSS5 | + | + | + | - | + | + | + |
| 134 | 25FSS6 | + | - | - | - | + | + | + |
| 135 | 25FSS7 | + | + | - | - | + | + | + |
| 136 | 25FSS8 | + | + | - | - | + | + | + |
| 137 | 25FSS9 | + | + | - | - | + | + | + |
| 138 | 25FSS10 | + | - | - | + | - | - | - |

In the present study, the sterilization methods of food salt samples were also examined. Six food salt samples containing bacteria and halotolerant bacteria in high numbers were selected for sterilization experiments. Food salt samples of FSS1 (Cyprus black lava sea salt, France), FSS9 (sea salt, Türkiye), FSS15 (Himalaya salt, Pakistan), FSS18 (table salt, Pakistan), FSS22 (table salt, England), FSS24 (table salt, Switzerland) were used in the sterilization experiments. The numbers of total bacteria and halotolerant bacteria in the FSS1, FSS9, FSS15, FSS18, FSS22, FSS24 were respectively found as 35 and 34 CFU/g; 40 and 40 CFU/g; 30 and 30 CFU/g; 58 and 16 CFU/g; 21 and 20 CFU/g; 40 and 40 CFU/g (Table 2). After sterilization processes of food salt samples of FSS1, FSS9, FSS15, FSS18, FSS22, and FSS24 using dry heat (175°C for 2 hours) and high-pressure moist heat (121°C for 30 minutes), the bacterial colony was not detected on the membranes of the MNA agar media incubated at 37°C for seven days. Therefore, the dry-heat sterilization process of six food salt samples at 175°C for 2 h and the high-pressure moist heat sterilization process of six food salt samples at 121°C for 30 min were found highly effective sterilization methods to kill all bacterial populations including Gram-positive halotolerant bacteria containing endospore and Gram-negative halotolerant bacteria having endotoxin. After both sterilization methods, the color and appearance of the salt samples did not change.

IV. CONCLUSIONS AND EVALUATIONS

This research is the first study that examines the food salt samples collected from France, Germany, England, Pakistan, Türkiye, Switzerland, and Austria for halotolerant bacteria. A total of 138 halotolerant bacteria were isolated from the food salt samples coded as 1FSS (2 isolates), 2FSS (2 isolates), 6FSS (10 isolates), 7FSS (1 isolate), 9FSS (36 isolates), 10FSS (8 isolates), 11FSS (11 isolates), 13FSS (12 isolates), 14FSS (1 isolate), 15FSS (2 isolates), 16FSS (9 isolates), 18FSS (16 isolates), 19FSS (1 isolate), 21FSS (10 isolates), 22FSS (7 isolates), 24FSS (2 isolates), and 25FSS (8 isolates). Among the food salt samples, the most number of halotolerant isolates was recovered from 9FSS. The food salt samples contained orange, cream, dark cream, white, yellow, dark yellow, and non-pigmented colonies with the appearance of dull and shiny. The examination colors of preservation salt samples before using them in food preservation and

salted foods may offer us an idea about the bacterial contamination. All halotolerant isolates grew in both absence of salt and the presence of 10% NaCl. Some of the isolates grew by 20% NaCl. Hence, those isolates were accepted as halotolerant bacteria. While a few halotolerant isolates grew at refrigerator temperature, all halotolerant isolates grew at room temperature and 37°C. The halotolerant isolates recovered from food salt samples grew on acidic, neutral, and alkaline media. According to the most important results obtained from the present study, 80% of food salt samples contained bacteria, and 68% of the food salt samples had halotolerant bacteria. Moreover, Gram-positive halotolerant bacteria containing endospore structure were found in 15 salt samples, and Gram-negative halotolerant bacteria having endotoxin were detected in 10 salt samples. Most of these halotolerant isolates had hydrolytic activities such as protease, amylase, lipase, or caseinase. Based on the results of this study, Gram-positive and Gram-negative halotolerant bacteria producing hydrolytic enzymes may grow in acidic, neutral, and alkaline foods stored at room temperature, 37°C, and even some of them at 4°C. Some of these microorganisms may cause food spoilage and foodborne diseases. The sterilization of six food salt samples was accomplished using both dry-heat and high-pressure moist heat treatments in this study. Therefore, we suggest using sterilized salt in uncooked foods to prevent bacterial growth, food spoilage, and foodborne diseases.

REFERENCES

- [1] Lück, E. and Pager, M. (2000). Conservacion Quimica de los Alimentos: Caracteristicas, Usos, Efectos. Zaragoza: *Acribia*, 46-98.
- [2] Hutton, T. (2002). Sodium technological functions of salt in the manufacturing of food and drink products. *Brit. Food J.*, 104, 126-52.
- [3] Hunaefi, D., Akumo, D. N. and Smetanska, I. (2013). Effect of fermentation on antioxidant properties of red cabbages. *Food Biotechnol.*, 27, 66-85.
- [4] Vatansever, S., Vegi A., Garden-Robinson, J. and Hall, C.A. (2017). The Effect of fermentation on the physicochemical characteristics of dry-salted vegetables. *J. Food Res.*, 6(5).
- [5] Kabak, B. and Dobson, A. D. W. (2011). An Introduction to the traditional fermented foods

- and beverages of Turkey. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, 51, 248-260.
- [6] Margesin, R. and Schinner F. (2001). Potential of halotolerant and halophilic microorganisms for biotechnology. *Extremophiles*, 5, 73-83.
- [7] Kushner, D.J. and Kamekura M. (1988). Physiology of halophilic eubacteria. In: Halophilic bacteria, F. Rodriguez-Valera (ed.), CRC Press, 1, 87-103.
- [8] Rahman, S.S., Siddique R. and Tabassum N. (2017). Isolation and identification of halotolerant soil bacteria from coastal patenga area. *BMC Res. Notes.*, 10: 531.
- [9] Roberts, M.F. (2005). Organic compatible solutes of halotolerant and halophilic microorganisms. *Saline Syst.*, 1(1), 5.
- [10] Lin, C.S., Liu, F.L., Lee, Y.C., Hwang, C.C., Tsai, Y.H. (2012). Histamine contents of salted seafood products in Taiwan and isolation of halotolerant histamine-forming bacteria, *Food Chem.*, 131, 574-579.
- [11] Zaman, M.Z., Bakar, F.A., Selamat, J., Bakar, J., Ang, S.S., Chong, C.Y. (2014). Degradation of histamine by the halotolerant *Staphylococcus carnosus* FS19 isolate obtained from fish sauce, *Food Control*, 40, 58-63.
- [12] Hastrup, M.K., Johansen, P., Malskær, A.H., Castro-Mejia, J.L., Kot, W., Krych, L., Arneborg, N., Jespersen, L. (2018). Cheese brines from Danish dairies reveal a complex microbiota comprising several halotolerant bacteria and yeasts, *Int. J. Food Microbiol.*, 117, 493-522.
- [13] Fitriani, S., Güven, K. (2018). Isolation, screening, partial purification and characterization of protease from halophilic bacteria isolated from Indonesian fermented food, *Anadolu Univ. Bilim Teknol. Derg. C Yaşam Bilim. Biyoteknol.*, 7(2), 130-142.
- [14] Srivastava, A.K., Sharma, A., Srivastava, R., Tiwari, P.K., Singh, A.K., Yadav, J., Jamali, H., Bharati, A.P., Srivastava, A.K., Kashyap, P.L., Chadkar, H., Kumar, M., Saxena, A.K. (2019). Draft genome sequence of halotolerant bacterium *Chromohalobacter salexigens* ANJ207, isolated from salt crystal deposits in pipelines, *ASM*, 8(15).
- [15] Rajesh, R., Gummadi, S.N., α -Amylase and cellulase production by novel halotolerant *Bacillus* sp. PM06 isolated from sugar cane press mud, *Biotechnol. Appl. Biochem.* 1-11.
- [16] Sang, X., Li, K., Zhu, Y., Ma, X., Hao, H., Bi, J., Zhang, G., Hou, H. (2020). The impact of microbial diversity on biogenic amines formation in grasshopper sub shrimp paste during the fermentation, *Front. Microbiol.*, 11(782), 1-13.
- [17] Kothe, C.I., Bolotin, A., Krařrem, B.F., Dridi, B., Food Microbiome Team, Renault, P. (2021). Unravelling the world of halophilic and halotolerant bacteria in cheese by combining cultural, genomic and metagenomic approaches, *Int. J. Food Microbiol.*, 358, 109312.
- [18] Thao, T.T.P., Thoa, L.T.K., Ngoc, L.M.T., Lan, T.T.P., Phuong, V., Truong, H.T.H., Khoo, K.S., Manickam, S., Hoa, T.T., Tram, N.D.Q., Show., P.L., Huy, N.D. (2021). Characterization halotolerant lactic acid bacteria *Pediococcus pentosaceus* HN10 and in vivo evaluation for bacterial pathogens inhibition, *Chem. Eng. Process*, 168.
- [19] Oliveira, L.C., Ramos, P.L., Marem, A., Kondo, M.Y., Rocha, R.C.S., Bertolini, T., Silveira, M.A.V., Cruz, J.B., Vasconcellos, S.P., Juliano, L. and Okamoto, D.N. (2015). Halotolerant bacteria in the são paulo zoo composting process and their hydrolases and bioproducts. *Braz. J. Microbiol.*, 46(2), 347-54.
- [20] Mokashe, N., Chaudhari, B., Patil, U. (2018). Operative utility of salt-stable proteases of halophilic and halotolerant bacteria in the biotechnology sector, *Int. J. Biol.*, 117, 493-522.
- [21] Kılınç, B. (2019). Su ürünlerinde halofilik bakteriler ve endüstriyel alanda kullanımları, *Acta Aquatica Turcica*, 15(4): 535-545.
- [22] Amoozegar, M.A., Safarpour, A., Noghabi, K.A., Bakhtariy, T., Ventosa A. (2019). Halophiles and their vast potential in biofuel production, *Front. Microbiol.*, 10, 1-17.
- [23] Swain, N.R., Anandharaj, M., Ray, R. C. and Rani, R. P. (2014). Fermented fruits and vegetables of Asia: A potential source of probiotics, *Biotechnol. Res. Int.*, 1-19.
- [24] Yilmaz, E. and Birbir, M. (2019). Characterization of halotolerant *Bacillus* species isolated from salt samples collected from leather factories in Turkey. *J. Amer. Leather Chem. Assoc.*, 114, 118-130.
- [25] Oren, A. (2008). Microbial salt at high salt concentrations: phylogenetic and metabolic diversity. *Saline Systems*, 4, 2.
- [26] Vilhelmsson O., Hafsteinsson H. and Kristjánsson J.K. (1997). Extremely halotolerant bacteria characteristic of fully cured and dried cod. *Int. J. Food. Microbiol.*, 36, 163-70.
- [27] Rodrigues, M.J., Ho, P., López-Caballero, M., Bandarra, N.M. and Nunes, M.L. (2005). Chemical, microbiological, and sensory quality of cod products salted in different brines, Food microbiology and safety. *J. Food Sci.*, 70(1), 1-6.
- [28] Huss H.H. and Valdimarsson G. (1990). Microbiology of salted fish. *FAO Fish Techn. News*, 10(1): 190.
- [29] Shaji, S., Mary, A. and Rani Juneius, C.E. (2018). Recent food preservation techniques employed in the food industry. In: Microbial Biotechnology, J.K. Patra, G. Das, H. Shin (eds), 2. Edition, Korea, 3-21.

- [30] Birbir, M. and Ilgaz, A. (1996). Isolation and identification of bacteria adversely affecting hide and leather quality. *J. Soc. Leather Technol. Chem.*, 80, 147-153.
- [31] Bailey, D.G. (2003). The preservation of hides and skins. *J. Amer. Leather Chem. Assoc.*, 98, 308-319.
- [32] Harley, J.P. and Prescott, L.M. (2002). *Laboratory Exercises in Microbiology*. 5.edition, McGraw-Hill Companies.
- [33] Johnson, T.R. and Case, C.L. (2010). *Laboratory Experiments in Microbiology*. Ninth Edition, Pearson.
- [34] De La Haba, R.R., Yilmaz, P., Sánchez-Porro, C., Birbir, M. and Ventosa, A. (2011). *Salimicrobium salexigens* sp. nov., a moderately halophilic bacterium from salted hides. *Syst. Appl. Microbiol.*, 34(6), 435-439.
- [35] Sánchez-Porro, C., Martin, S., Mellado, E. and Ventosa, A. (2003). Diversity of moderately halophilic bacteria producing extracellular hydrolytic enzymes, *J. Appl. Microbiol.*, 94, 295-300.
- [36] Caglayan, P., Birbir, M., Sánchez-Porro, C. and Ventosa, A. (2017). Screening of industrially important enzymes produced by moderately halophilic bacteria isolated from salted sheep skins of diverse origin. *J. Amer. Leather Chem. Assoc.*, 112(6), 207-216.
- [37] Gutiérrez-Arnillas, E., Rodríguez, A., Sanromán, M.A. and Deive, F.J. (2016). New sources of halophilic lipases: isolation of bacteria from Spanish and Turkish saltworks. *Biochem. Eng. J.*, 109, 170-177.
- [38] Birbir, M., Ogan, A., Calli, B. and Mertoglu, B. (2004). Enzyme characteristics of extremely halophilic archaeal community in Tuzkoy Salt Mine, Turkey. *World J. Microb. Biot.*, 20, 613-621.
- [39] Priest, F.G., Goodfellow, M., Shute, L.A. and Berkeley, R.C.W. (1987). *Bacillus amyloliquefaciens* sp. nov. norn. rev., *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.*, 69-71.
- [40] Arahal, D.R. and Ventosa, A. (2002). Moderately halophilic and halotolerant species of *Bacillus* and related genera. In: *Applications and Systematics of Bacillus and relatives*. R.C.W. Berkeley, M. Heyndrickx, N.A. Logan, P. De Vos (ed), Blackwell, Oxford, 83-99.
- [41] Madigan, M.T., Bender K.S., Buckley, D.H., Sattley, W. and Stahl D.A. (2022). *Brock Biology of Microorganisms*, Sixteenth Edition, Pearson Education Limited.

Computational Examination of Unsteady Cavitating Flow Characteristics on a 2D NACA66 Profile by Utilizing OpenFOAM®

Kararsız Kaviteasyonlu Akış Karakteristiklerinin 2 Boyutlu Bir NACA66 Profili Üzerinde OpenFOAM® Kullanılarak Sayısal Olarak İncelenmesi

Samir Arda OĞUR¹ , Emre ALPMAN¹ 

¹ Mechanical Engineering Department Marmara University, 34722, Istanbul, Turkey

Abstract

The complexity of the flow mechanism is one of the crucial problems in cavitation. In this present study, detailed computational examinations of cavitating flow around a NACA66 hydrofoil were performed by using OpenFOAM® software. Dynamic and unsteady behaviours of cavitating flow were solved utilizing the $k-\varepsilon$ and $k-\omega$ SST turbulence models. Schnerr-Sauer cavitation model was used for the calculations. Firstly, simulations were carried out by applying the same cavitation model (Schnerr Sauer) with the $k-\varepsilon$ and $k-\omega$ SST model. The results were evaluated by examining the studies in the literature in terms of water volume fractions. After that with $k-\omega$ SST, numerical simulations were performed for 6° and 8° angle of attack with different cavitation numbers and the outlet pressure conditions, the cases are called “Case 1” and “Case 2” respectively. The results were compared with the studies performed by Leroux et. al. Oscillation cycles and flow characteristics were obtained successfully in both cases. The mechanism called the re-entrant jet was shown to be primarily responsible for cavitation break-off in two cases. This mechanism consists of two steps: 1) an interplay between the re-entrant flow and the cavity contact surface in the occlusion region, resulting in recurrent secondary cloud shedding until the primary cloud detachment, and 2) a shock wave triggered by the primary cloud collapsing, which affects the development of the remnant cavity.

The main contribution of this study is to demonstrate the superiority of the $k-\omega$ SST model over the other two-equation the $k-\varepsilon$ model and examine the impact of using the $k-\omega$ SST turbulence model with the Schnerr-Sauer cavitation model on predicting flow characteristics such as cavitation dynamics, pressure distribution and cavity form. Reasonable accuracy has been observed for pressure fluctuations and cavitation dynamics.

Keywords: cavitation, cavitation break-off, $k-\omega$ SST model, NACA66 hydrofoil, OpenFOAM®

Öz

Akış mekanizmasının karmaşıklığı, kaviteasyondaki en önemli problemlerden biridir. Bu çalışmada, OpenFOAM® yazılımı kullanılarak bir NACA66 hidrofil etrafındaki kaviteasyonlu akışın ayrıntılı sayısal incelemeleri yapılmıştır. Kaviteasyonlu akışın dinamik ve kararsız davranışları $k-\varepsilon$ ve $k-\omega$ SST türbülans modelleri kullanılarak çözülmüştür. Hesaplamalar için Schnerr-Sauer kaviteasyon modeli kullanılmıştır. İlk olarak simülasyonlar aynı kaviteasyon modeli (Schnerr Sauer) uygulanarak $k-\varepsilon$ ve $k-\omega$ SST modeller ile gerçekleştirilmiştir. Daha sonra $k-\omega$ SST modeliyle sırasıyla “Durum 1” ve “Durum 2” olarak adlandırılan çıkış basıncı koşullarına paralel olarak farklı kaviteasyon sayılarına sahip iki farklı 6° ve 8° hücum açısı için sayısal simülasyonlar yapılmıştır. Sonuçlar, Leroux çalışmasının deneysel ve sayısal sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Leroux deneylerine kıyasla her iki durumda da salınım döngüleri ve akış özellikleri başarılı bir şekilde elde edildi. Yeniden giren jet olarak adlandırılan mekanizmanın, iki durumda da kaviteasyon kopmasından birincil olarak sorumlu olduğu gösterildi. Bu mekanizma iki adımdan oluşur: 1) ana bulut ayrılmasına kadar tekrarlı ikincil bulut dökülmesiyle sonuçlanan, yeniden giriş akışı ile kaviteasyon arayüzü arasındaki, kapanma bölgesindeki bir etkileşim ve 2) ana bulutun çökmesi tarafından tetiklenen kalan kaviteasyonun gelişimini etkileyen bir şok dalgası şeklindedir.

Bu çalışmanın ana katkısı, $k-\omega$ SST modelinin diğer iki denklemlilikli $k-\varepsilon$ modeli üzerindeki üstünlüğünü göstermek ve Schnerr-Sauer kaviteasyon modeli ile $k-\omega$ SST türbülans modelinin kullanılmasının kaviteasyon dinamikleri, basınç dağılımı ve kaviteasyon formu gibi akış özelliklerinin tahmin edilmesi üzerindeki etkisini incelemektir. Basınç dalgalanmaları ve kaviteasyon dinamikleri için kabul edilebilir doğruluk gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: kaviteasyon, kaviteasyon kopması, $k-\omega$ SST model, NACA66 hidrofil, OpenFOAM®

I. INTRODUCTION

Cavitation is a very essential physical phenomenon that can emerge in many fields in connection with hydraulic machinery. It is an already well-known fact that hydraulic machinery applications generally face many problems such as brutal vibration, material damage and loss, noise, performance breakdown due to cavitation. Cavitation can be described as the rapid creation and implosion of vapour bubbles inside a liquid flow. The cavitation phenomenon occurs mainly when the flow field's static pressure goes down below the fluid's vapour pressure.

Corresponding Author: Samir Arda OĞUR, Tel: +90 531 860 88 18, e-posta: ardaogur@marun.edu.tr

Submitted: 03.01.2022, **Revised:** 18.05.2022, **Accepted:** 18.05.2022

Unsteady cavitation causes unwanted effects such as noise and vibration, which can lead to cyclic pressures, material loss, and performance degradation. As a result, an appropriate computational model and precise numerical simulation of cavitating flows are critical for predicting cavitation dynamics. It is beneficial and important to analyse them on a basic geometry with general measurements and compare them to previous authoritative studies.

The formation of the cavity-shedding process and the unsteady cavitating flow mechanism have been extensively studied. The transition from sheet to cloud cavitation has frequently been linked to a re-entrant jet at the cavity's edge. The role of the re-entrant jet in the cavity break-off process has been widely investigated using experimental and numerical methods. In general sheet cavitation on the suction side of a pump's blades, exhibits a pronounced unsteady nature. When the angle attack is minimal or the velocity is low, it mostly affects the back portion of the cavity, however, when the circumstances are more unfavourable, the whole vaporized region becomes unsteady, with peeling off big bubble structures on a regular basis. This second form, known as cloud cavitation, causes pressure variations from the cavity downstream, significant strains, and sonic dispersion owing to the implosion of cavitation bubbles near the wall surface. All these impacts are typically detrimental to the efficient working of an engineering applicant. Thus, it is critical to distinguish the various unsteady conditions that may emerge, as well as to comprehend the underlying physical principles that cause such instability.

Many authors have investigated cloud cavitation experimentally in two basic designs, namely, Venturi type sections [1, 2, 3] and two-dimensional foil sections [4, 5, 6, 7, 8]. The origin of flow instability is a recurring focus in all these papers. Until recently, the majority of studies have pointed to a re-entrant jet that travels from downstream to upstream at the flow separation zone. When the re-entrant jet reaches the contact surface of the sheet cavitation, the cavity separates, and the downstream side is re-emitted by the main flow until it collapses. This phenomenon, first proposed by Furness and Hutton [1], has lately been verified by experiments using electrical impedance probes and double optical probes. [1, 9]. Lush and Skipp utilized high-speed photography to examine cavitation in a duct flow, and they noticed periodical cavitation shedding caused by the re-entrant jet. The dye injection technique was implemented on an investigation of cavitation in a plano-convex foil to have an observation of re-entrant jets [10, 11]. Gopalan and Katz used particle image velocimetry (PIV) and The main objective of the computations is to accurately simulate the unsteady behaviours of cavitating flows. Cavitation models and turbulence models are essential to obtain accurate results from cavitating flow simulations. In cavitating flow simulation, the

high-speed photography to examine the flow characteristics at the closure region and the sheet cavitation. It was discovered that the re-entrant jet forms when the cavity tends to close in an intense counter-pressure zone. Callenaere et al. examined unsteady cavitation and plotted the flow patterns with different stages involving the re-entrant jet. They realized the significance of an opposing pressure gradient in the formation of a re-entrant jet and, as a result, recurrent vapour shedding. These studies demonstrated that the cavity's cyclic pattern is significantly connected to the evolution of the re-entrant jet. This process is strongly dependent on the thickness of the cavity-forming over a backwards-facing step: cloud cavitation develops so far that very small contact exists between the re-entrant jet and the cavitation sheet interface [12, 13]. Furthermore, vortex generation in the cavity triggers the reverse pressure gradient and the growth and thickness of the re-entrant jet, resulting in cloud separation [6, 13]. Several hypotheses have been offered to clarify the creation of reverse flow: it might be caused by the collapse of the preceding vapour cloud [10] or by a process related to cavity growth [1, 14].

Additional physical mechanisms were also identified to support the flow instability: the cavity break-off was attributed to the interaction of the re-entrant jet and contact surface instability in the cavity's rear section [15]. A combined experimental and computational technique was implemented to examine the sheet/cloud cavitation dynamics around a 2D NACA0015 hydrofoil. Studies showed that the shock mechanism is the origin of cloud cavitation formation at low values of $\sigma/2\alpha$. They also explained the effects of shock waves created by the collapse of huge bubble bunches in the perspective of experimental or computational examination of cavitating flow around a two-dimensional 2D hydrofoil section. [5, 16]. Pressure pulses and partial cavity instabilities have been captured in cavitating flows on a NACA66 (mod) hydrofoil. At 6° and 8° incidence angles, two separate periodical behaviour with two different frequencies (dynamics 1 and dynamics 2) were demonstrated computationally. The re-entrant jet was shown to be the main cause of cavity break-off in both cases. Dynamics 2 represents the typical cavity's growth on the hydrofoil length following the flow separation process and resulting cloud cavitation. For dynamics 1, more intricate flow characteristics were observed. In this case, the periodical behaviour was obtained at a lower Strouhal number ($\sim 0.07/0.09$) than dynamics 2. (~ 0.3) [8, 17]. Readers are encouraged to see Figure 5 and Figure 7 in [17] for details.

homogeneous hypothesis has been extensively applied. The cavitating region is regarded as a separate fluid with fully mixed vapour and liquid in this idea [18]. Two types of models are frequently used in support of this hypothesis. Firstly, the state equation model is

shown in [19] and [20]. In the partial cavity closure region, previous experimental studies demonstrated that the baroclinic torque factor is the most important element in the vorticity generation. The baroclinic torque component, however, cannot be adequately described by the state equation model since density and pressure gradients are always parallel. Secondly, the transport equation model, which is based on Rayleigh–Plesset equations and involves an extra equation for the volume fraction of vapour (or liquid) that incorporates condensation and evaporation components [21]. Many comparable cavitation models were implemented based on the transport equation model. The RANS equations, comprising the equation of mixture momentum and volume fraction for multiphase flows, were solved using an artificial compressibility approach with a specific modified formulation [22]. Moreover, a new cavitation model was utilized to simulate the unsteady cavitation in the nozzle and over a NACA 0015 hydrofoil. The results demonstrated its ability to resolve cavitation effects such as the periodical behaviour of cloud cavitation, the re-entrant jet evolution and the localised pressure peaks owing to the collapse of the bubble cloud. [23]. The "Full cavitation model" based on the expressions of phase-change rate, derived from a simplified version of the Rayleigh–Plesset equation, is developed in [24]. Flow parameters (velocity, pressure and turbulence) and pressure properties (saturation pressure, densities, and surface tension) influence these rates [24].

The applied turbulence model was recently found to be crucial in effectively predicting the unsteady process. Using a Reynolds average Navier–Stokes’s equations (RANS) method with a standard 2-equation model, such as $k-\epsilon$ or $k-\omega$, generally results in unrealistic flow stabilizations [25, 26]. Modifications are frequently added to these turbulence models to achieve commendable results for unsteady cavitation characteristics. Wu et al. proposed to use a filter-based $k-\epsilon$ model, which was first created by Johansen et al. [27]. The grid size specifies the filter in this approach, which avoids undue dissipation in slight moves while having a negative impact on substantial flow characteristics. Coutier-Delgosha et al. demonstrated that to produce periodic cavitation behaviours, it is required to estimate the impact of compressibility on the turbulence flow structures in the multiphase environment. The turbulent viscosity of the liquid/vapour mixture is slightly reduced because of these processes [27, 28, 19]. The shear stress transport As stated in the equation, the vapour volume fraction α is used to calculate the fluid density ρ and dynamic viscosity μ (2)-(3). The equations of the continuity and momentum are represented using index notation as follows:

$$1 - \alpha_v = \alpha_l = \frac{v_l}{v} \tag{1}$$

$$\rho_m = \alpha_v \rho_v + (1 - \alpha_v) \rho_l \tag{2}$$

$SST k-\omega$ model is one of the most prominent turbulence models (the model pretends to be $k-\epsilon$ as it moves away from the wall boundary surface while it pretends to be $k-\omega$ near the wall boundary condition) which gives better results for the flow characteristics of unsteady cavitation. [29]. The Reynolds-averaged Navier–Stokes (RANS) approach, which uses nonlinear eddy viscosity models, has been proved to improve prediction accuracy. The typical RANS approach fails to accurately estimate the shed-off cavity owing to the overestimation of the turbulent dynamic viscosity. Zhang et al. developed a hybrid RANS/LES model that accurately simulated the complex cloud cavitation stage. As an alternative or substitute, some of the RANS approach's traditional limitations may be resolved by using large eddy simulation (LES) or detached eddy simulation (DES) approaches, such as its inability to account for significant flow separation. This type of model is supposed to produce better computations of large-scale turbulent eddies, which will lead to more accurate predictions of large-scale flow unsteadiness. [30, 31].

In this study, $k-\epsilon$ and $k-\omega$ SST model in RANS methods were used for the simulation procedure. Even for large pressure gradient flows, standard two-equation models miss the separation and anticipate attached flow. The advantage of the $k-\omega$ SST model is that being one of the most reliable two-equation models for separation prediction. Compared to other approaches, the RANS method can achieve commendable results in less time, while LES and DES require a lot of computational time and cost. Moreover, considering the ease of application in 3-dimensional complex geometries in the following study, the RANS method was decided to use.

II. MATERIALS AND METHODS

2.1. Numerical Model

The numerical model resolves the equations of Reynolds averaged Navier–Stokes’s (RANS) method. The solver operates the turbulence model which is combined with a cavitation model. The solver’s features and equations are detailed in the hereafter.

The homogeneous equilibrium two-phase mixture method is implemented for the flow in a two-phase environment. The fluid is uniform in the vapour/liquid mixture model; therefore, the velocity and pressure of the multiphase fluid components should be consistent.

$$\mu_m = \alpha_v \mu_v + (1 - \alpha_v) \mu_l \tag{3}$$

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_m u_i) = 0 \tag{4}$$

$$\frac{\partial (\rho_m u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_m u_i u_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu_m + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \right] \tag{5}$$

where ρ represents the fluid density of mixture; α signifies the volume fraction for each phase; l , m , and v are the subindexes of the liquid, mixture, vapour phases; μ_m denotes the laminar viscosity of mixture; μ_t indicates the turbulence dynamic viscosity; and i , j , and k symbolize the subindexes of the cartesian coordinate system.

2.2. Turbulence Model

The $k-\omega$ SST (shear stress transport) turbulence model is used in this work. This model provides $k-\varepsilon$ and $k-\omega$ models to be utilized in combination in the same model. Thanks to the blending function in the formulations, the model acts like a $k-\omega$ near the wall boundary, while it acts like a $k-\varepsilon$ model as it moves away from the wall surface. This model was discovered to ensure appropriate simulation results of boundary layer detachment characteristics, which was verified for the estimation of cavitation characteristics around the NACA66 hydrofoil. [29]

2.3. Physical Model of Cavitation

The vapour volume fraction mass transfer equation is used to simulate the cavitation process. The Schnerr-Sauer cavitation model [23], offered in the **interPhaseChangeFoam** solver, was applied for the numerical process. The vapour volume fraction is identified in equation (1). In equation (6) the transport equation is described. Significantly, \dot{m}^+ and \dot{m}^- respectively indicate the process of evaporation and condensation during multi-phase flow. [31]

$$\frac{\partial(p_v a_v)}{\partial t} + \frac{\partial(p_v a_v u_i)}{\partial t} = \dot{m}^+ + \dot{m}^- \quad (6)$$

The source terms \dot{m}^+ and \dot{m}^- are defined in the following way:

$$\dot{m}^+ = C_v \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} a_v (1 - a_v) \frac{3}{R} \sqrt{\frac{2(p_v - p)}{3\rho_l}} \quad (7)$$

$$\dot{m}^- = C_c \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} a_v (1 - a_v) \frac{3}{R} \sqrt{\frac{2(p - p_v)}{3\rho_l}} \quad (8)$$

where C_c and C_v are coefficients relating to condensation and vaporization processes, and the suggested values are 2 and 1, respectively [31].

The Schnerr-Sauer cavitation model needs bubble number (N) value, which in this study was set to 1.6×10^{13} . The bubble radius (R) was then calculated with bubble number (N) and vapour volume fraction (α_v) as given in equations (9)-(10):

$$\alpha_v = \frac{N \frac{4\pi}{3} R^3}{1 + \frac{4\pi}{3} R^3} \quad (9)$$

$$R = \sqrt[3]{\frac{3\alpha_v}{4\pi N(1-\alpha_v)}} \quad (10)$$

2.4. Numerical Setup

For the numerical procedure, the notional free stream velocity V_{ref} was set 5.33 m/s, relating to a formulation of the Reynolds number, $Re = V_{ref} \times c / \nu = 0.8 \times 10^6$, where ν indicates the kinematic viscosity of water and c denotes the hydrofoil's chord length. The actual incidence angles were set to 6° and 8° .

The flow conditions, which include the velocity of inlet flow V_{ref} , the pressure P_∞ in the out of the domain, the cavitation number $\sigma = (P_\infty - P_{vap}) / (0.5\rho V_{ref}^2)$, (P_{vap} signifies the water's saturation pressure; 2300 Pa, $0.5\rho V_{ref}^2$ represents the dynamic pressure and ρ denotes the density of water) was successfully set in according to the angle of attacks.

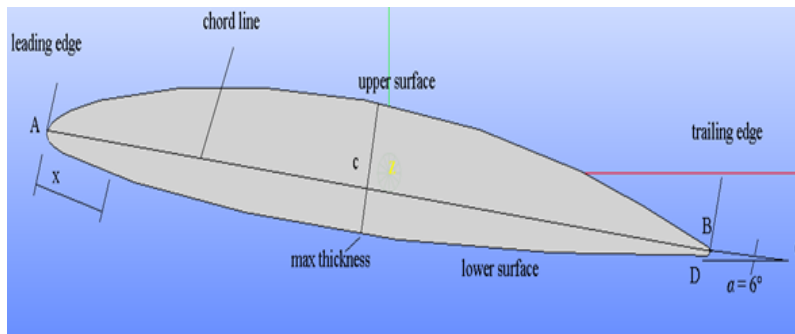
The experimental process in [8, 17] is examined to guide the computational approach for obtaining cavitating flow. To prevent flow vaporization and step input effect computation is started with a higher-pressure value than it is in the outlet. The outlet pressure is reduced according to the desired σ value after the cavitation get completely lost and steady state condition occurs. It can be considered with examining pressure contours and alpha water values around the hydrofoil. Following that, the operating(exit) value is held constant, the computation is completed until one or two oscillation cycle is observed [17].

2.5. Hydrofoil and Computational Domain

The numerical investigations were implemented on the NACA66 hydrofoil, devised by the National Advisory Committee for Aeronautics (NACA).

During the numerical procedure, the hydrofoil is set with attack angles $\alpha = 6^\circ$ and 8° . The arrangements are considered as case 1 and case 2. The cases were decided according to the **procedure in** [17]. The hydrofoil's chord length (c) is 0.15m. The readers are encouraged to look at figure 1 for a detailed description of the NACA66 hydrofoil. It illustrates the view of the hydrofoil profile with the $\alpha = 6^\circ$ incidence angle, whereas figure 2 demonstrates the computational domain.

The computations are performed in a 2D domain. As indicated in figure 2, the inlet is placed $3c$ upstream of the hydrofoil centre of mass and the outflow is placed $11c$ downstream of the hydrofoil centre of mass. The width of the domain box is $5c$. The hydrofoil's chord (c) is 0.150 m, while the hydrofoil span is selected at 0.01 m to generate the 2D domain.



The relative maximum thickness of the hydrofoil is $\tau = 12\%$ at 45% chord length from the leading edge, and the relative maximum camber ratio is 2% at 50% chord length from the leading edge. The hydrofoil's chord length (c) is 0.15m.

Figure 1. Illustration of 2d NACA66(mod) hydrofoil

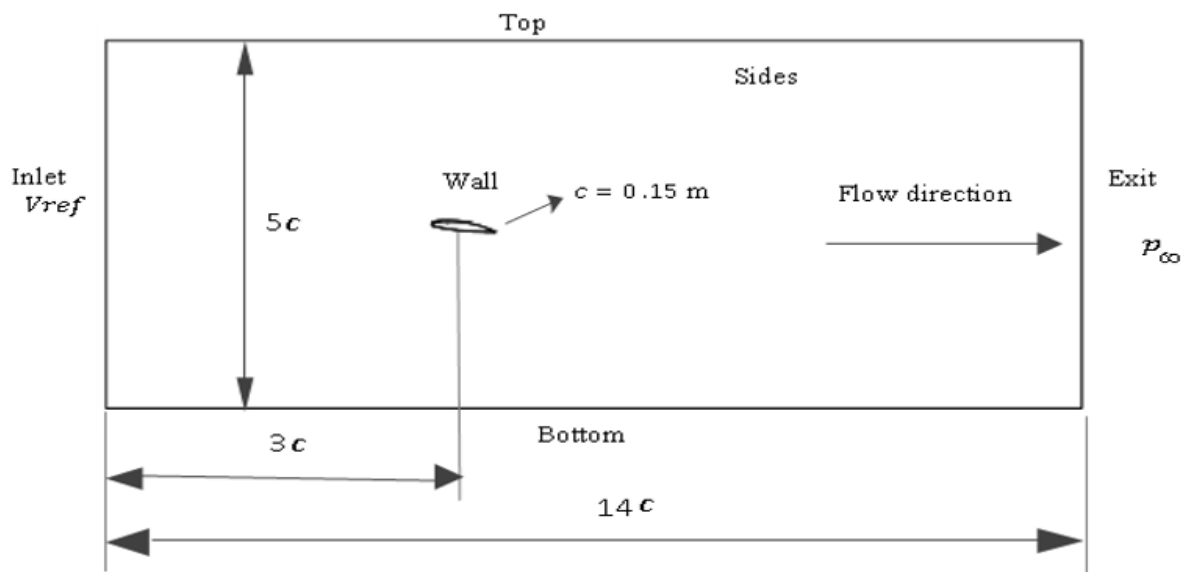


Figure 2. Computational domain

2.6. Boundary Conditions and Mesh

The boundary surfaces and the case conditions are defined in also figure 2 and table 1.

Figure 3 illustrates the meshes for the domain that were constructed with extra refinement near the hydrofoil's wall boundaries. Mesh generation was done utilizing SALOME (<https://www.salome-platform.org/>). SALOME is open-source software with fascinating capabilities for pre-processing and post-processing of simulation. The characteristics of CAD and meshing are combined to create a structured or unstructured grid for exporting in OpenFOAM®. The final points are about 490,000 with the type of prism cells.

The **kqRWallFunction** boundary condition was applied for turbulent kinetic energy (k), whereas the **nutUSpaldingWallFunction** boundary condition was applied for turbulence viscosity (μ_t) at wall boundary surfaces. The non-dimensional wall distance y^+ was calculated by the **postProcess** utility in OpenFOAM®. The maximum y^+ values vary between 30-50; These values were evaluated according to the values obtained from all time steps.

2.7. OpenFOAM® and Solver

Flow simulations involving cavitation are very challenging due to the phase alteration in the flow and the resulting sudden and high-density changes. Therefore, the solver that will be used for this study, must have the capacity to examine such multiphase flows. OpenFOAM® (<https://www.openfoam.com/>) offered some multiphase solvers in its library. Suitable solvers will be considered and used in the numerical procedure.

As an example, the **interPhaseChangeFoam** solver of the OpenFOAM® using the Volume of Fluid (VoF) method, has these properties and was previously used for cavitation analysis. It has been developed for the flow simulation of incompressible and immiscible fluids, involving phase change in an isothermal environment. [32]. Implicit Euler method was used for time derivatives and the unsteady solution of the equations. The Courant number (Co) was kept below 1.2 for the phase change flow visualization. The tolerances were set to 1.0e-8 for the pressure(p_rgh) and water volume fraction ($\alpha.water$); 1.0e-6 for the velocity, k and ω computations. PIMPLE algorithm was arranged to operate five repetitions for

the convergence control.

Table 1. Boundary Conditions

| Case Dynamics | Inlet | Exit | Top and bottom (far field) | Front and back. (sides) | Hydrofoil surface |
|--|--|------------------------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------|
| Case 1(6° angle of attack $\sigma = 1.07$) | Velocity $V_{ref} = 5.33\text{m/s}$ | Pressure $p_{\infty} = 17.499$ kPa | empty | empty | wall |
| Case 2(8° angle of attack $\sigma = 1.25$) | Velocity $V_{ref} = 5.33\text{m/s}$ | Pressure $p_{\infty} = 20.055$ kPa | empty | empty | wall |

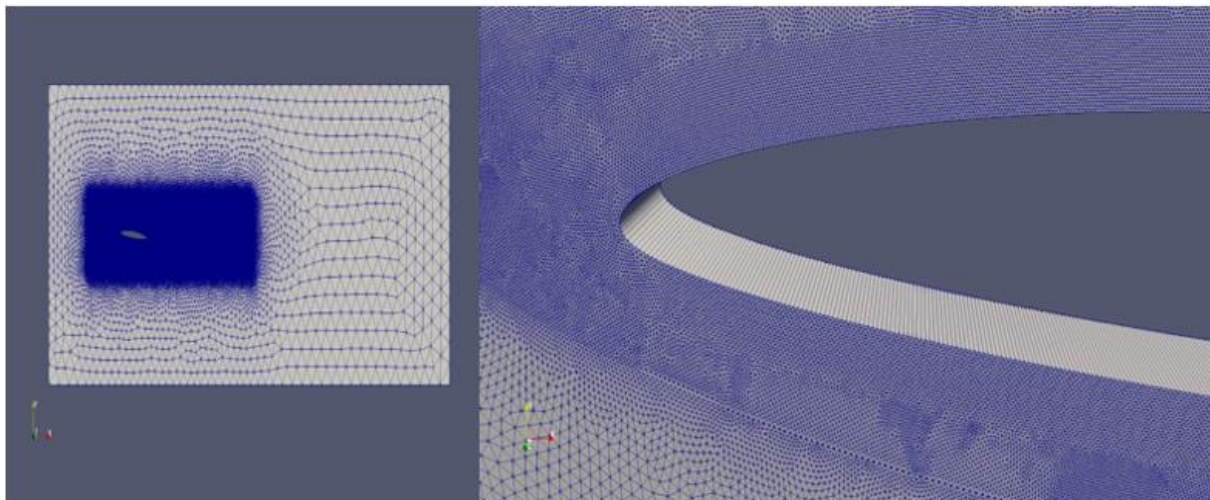


Figure 3. The view of unstructured mesh and mesh refinement around 2d hydrofoil

III. RESULTS AND DISCUSSION

In this study, computational investigations have been carried out to simulate the flow characteristics of cavitation around the 2D NACA 66 (MOD) profile. Initially, numerical simulations were performed with both $k-\varepsilon$ and $k-\omega$ SST turbulence models by applying the same cavitation model (Schnerr Sauer). Solutions corresponding to the total real-time of 0.3 seconds are evaluated.

The water volume fractions obtained at different times are shown in figure 4. If this ratio is zero, it indicates that there is completely vapour in the region, and a ratio of one indicates that there is completely water. In the pictures, it is seen that the cavitation zone is getting wider and moving in the direction of the current. In previous experimental and numerical studies for this configuration [8, 17], the cavitation zone was separated from the hydrofoil surface during the growth phase and instantaneous cavitation decreases were observed on the hydrofoil surface. Readers are encouraged to look at figure 7 and 8 in [17] to examine the images that had been taken from different perspectives during the

experiment and check the comparison of instantaneous void fractions for the cavitation dynamics. Although such characteristics are not observed in the results obtained with $k-\varepsilon$, it is thought that the reason for the difference seen with the experimental studies in the literature is that the boundary layer cannot be fully resolved, and the turbulence model used may be insufficient. As illustrated in figure 4, At the same time, the cyclic behaviours of cavitating flow characteristics could not be successfully simulated in the $k-\varepsilon$ model. Flow separations, primary and secondary cloud ruptures were not observed in comparison to the solutions with the $k-\omega$ SST trial.

Numerical simulations were repeated with $k-\omega$ SST for both incidence angles (6° and 8°). The obtained results were compared with the numerical and experimental studies of Leroux et. al. [8, 17]. There were two unique cyclic behaviours specified as case 1 and case 2.

For case 2, the oscillation cycle was defined in accordance with the observations of the experiments by Leroux et. al. [17] as follows: cavity expansion with a

shiny contact up to roughly 60% of the chord length. Then the cavity is cut at about 10% of the chord by a re-entrant jet, moving upstream, which leads to the roll-up of the cloud. After the roll-up finishes, the cloud detachment occurs. Finally, the cloud collapses while the remnant cavity develops again. The numerical calculation accurately reproduces the fully unsteady process, as illustrated in figure 5. The volume fraction of water was demonstrated during the process. The red areas represent the vapour phase, and the blue areas represent the water phase. In Figures 1-4, blue regions were observed between the red regions. These blue regions clearly show the re-entrant jet formation and flow separations where the water phase divide between the two cavitated regions. Picture 2 in figure 5 shows

us the cavity break-off, following pictures 3 and 4 demonstrate cloud detachment. Picture 5-8 represents the stage of the remnant cavity growth after cloud separation. The new red area growth from the hydrofoil's trailing edge to the mid chord can be seen while the other sizeable, red-zoned bubble clusters detach in pictures 5-8. Both the periodical behaviour and the maximum attached cavity length are in good agreement with [17]. The computational results demonstrate that the cloud separation is triggered by a re-entrant jet: when it reaches the cavity's forefront and destroys the contact surface of multiphase interaction, the cavity breaks off.

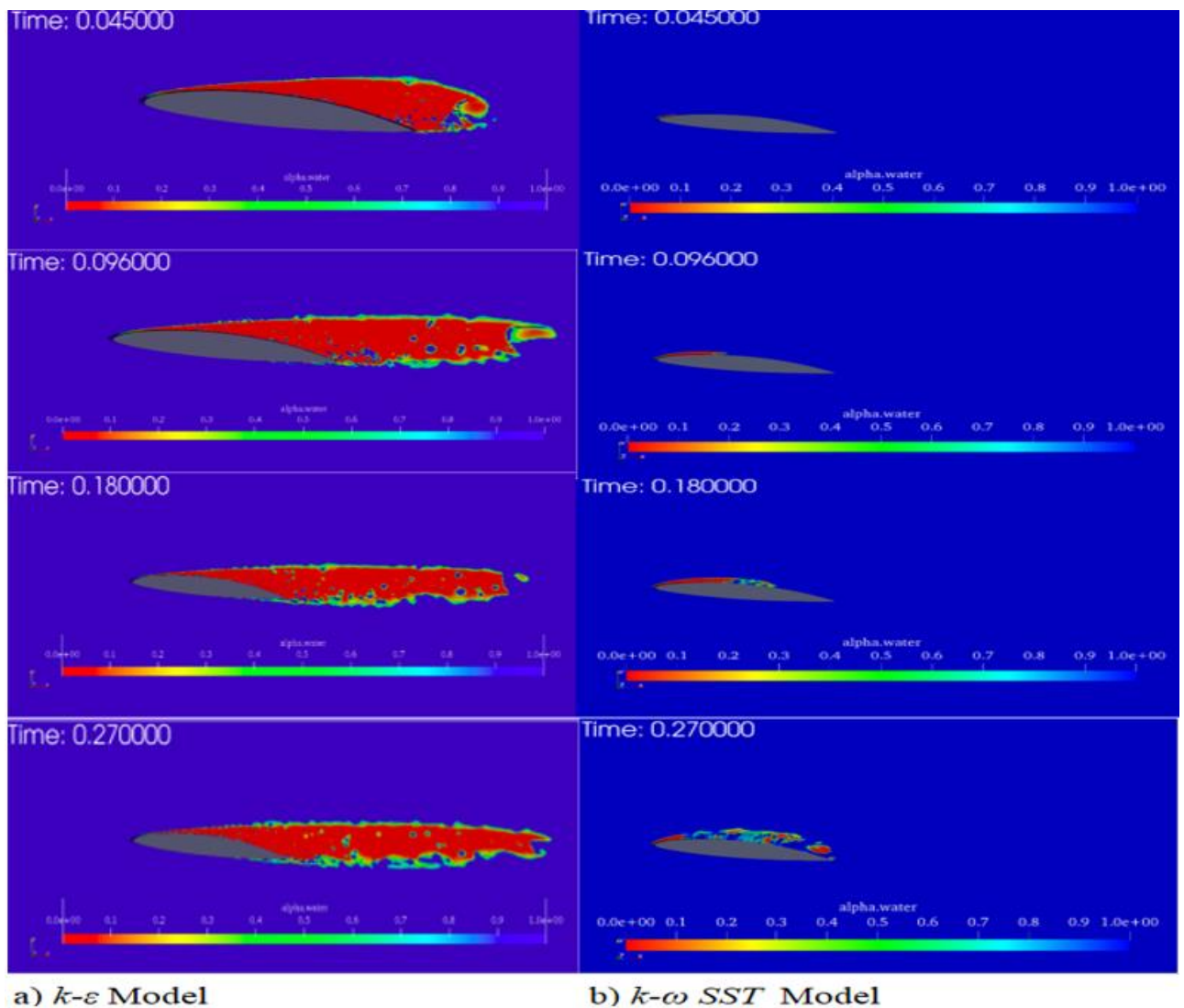


Figure 4. The comparison of the water volume fraction fields solutions for two different turbulence models.

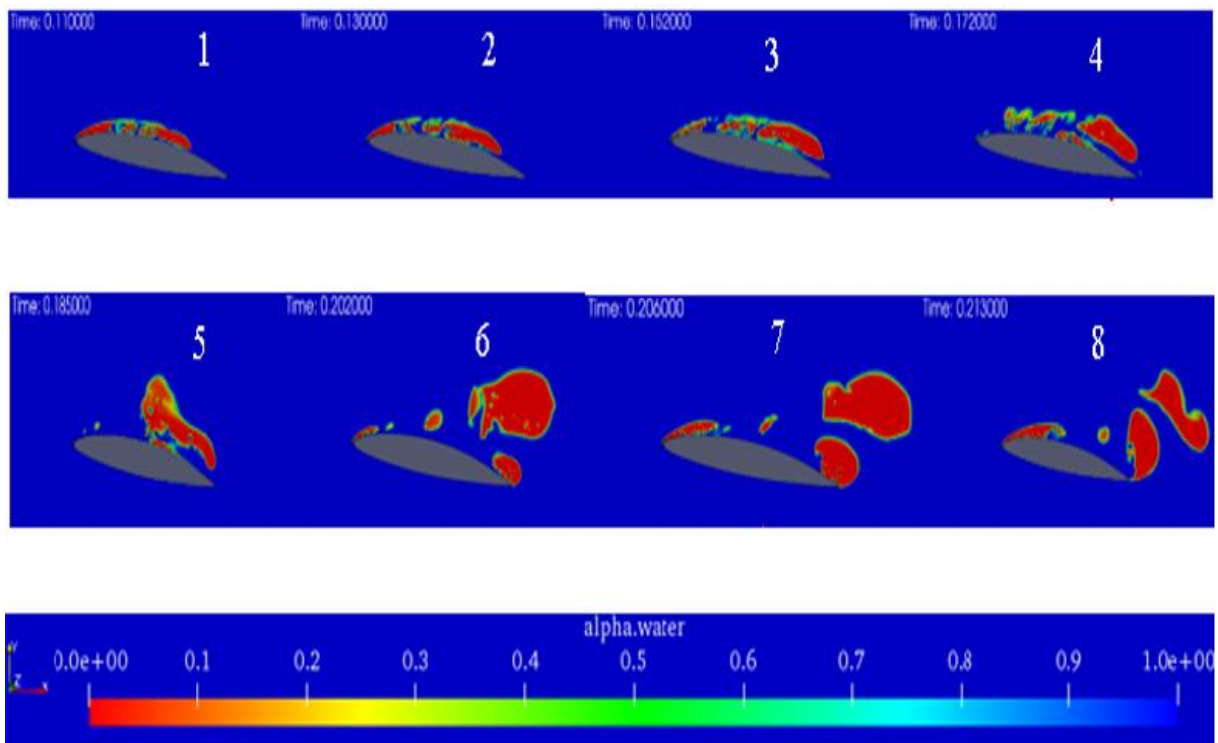


Figure 5. The illustration of primary and secondary cloud collapse in case 2 (8° incidence angle, $V_{ref} = 5.33 \text{ m/s}$, $\sigma = 1.25$)

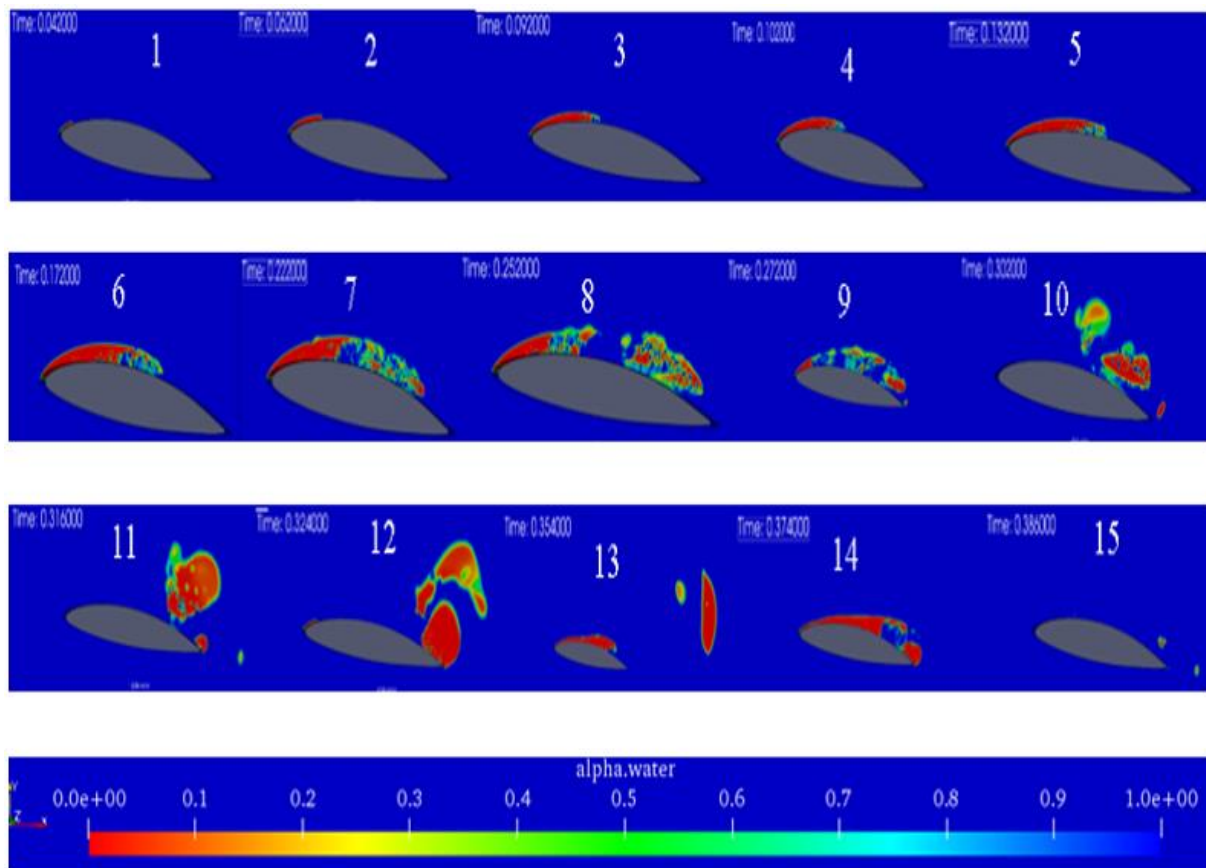


Figure 6. The unsteady periodical cycle of case 1 (6° incidence angle, $V_{ref} = 5.33 \text{ m/s}$, $\sigma = 1.07$)

Cyclic vapour cloud shedding is still observable for case 1. The periodical behaviour of case 1 was also described in [17]. The cavity behaviour is more complex, as shown in figure 6. It can be explained by two steps: The cavity expands up to 60% of the chord, after which it is decelerated and is counterbalanced by the exuviating of vapour formations (secondary cloud) in the eddy. According to the comprehensive flow simulations, the peeling of the minor vapour clouds is assumed to be triggered by the collaboration of the re-entrant jet and the cavity junction in the cavity's rear half. The exuviation of a major vapour cluster (primary cloud) emerges following the exuviation of subsidiary clouds. The primary cloud rolls up and convects while the remnant cavity grows. After the cavity break-off, the second step takes place. Indeed, the expansion of the residual cavity comes to a halt practically simultaneously with the main cloud collapse, and the residual cavity virtually vanishes. The cavity subsequently begins to grow again, creating cavitation finger patterns that eventually merge to create cavitating patches and finally cavitation. The extra step before the next cavity grows causes a cycle delay.

Similar cavitating conditions were investigated numerically. Commendable results are obtained for case 1 in terms of the periodical behaviour and the maximum attached cavity length. Water volume fraction fields are given in figure 6 during the oscillation cycle. Colour zones between blue and red indicate that the volume fraction of water is between 0 and 1. The slow increase of the cavity length step is successfully illustrated (picture 1-6). Between picture 1-6 red zones which represents the cavitated vapour region gradually expands towards the mid-chord and reaches approximately 60% of the chord length. From this moment on, it is clearly illustrated in picture 7 that the red-coloured cavitated areas are separated by the blue-coloured water-phase areas. It means that the re-entrant jet, along with flow separations, caused the stage for secondary vapour collapse. The secondary vapour shedding (picture 8 and 9) transforms into the biggish red zones which represent largish vapour bulks in picture 10 and starts the stage of main cloud detachment (picture 11). They are also in the correct order. The following stage of primary cloud collapse is the regrowth of the red-coloured region from the trailing edge as the largish bubble clusters peel off. (pictures 12,13) Then finally the abrupt disappearance of the cavity once the vapour cloud collapses (pictures 14,15) are also accurately captured. It is seen that the cavitating red-coloured vapour region has completely left its place in the blue-coloured region on the hydrofoil surface.

Nevertheless, the simulation estimates a higher growth of the remaining cavity against the experimental studies by Leroux et. al. [8, 17]. Finally, even though the re-entrant jet could not be captured during the experiments, simulations show that it is still in charge of cavity cut-off from the contact surface and primary

cloud separation Velocity profiles during the vapour cloud separations are illustrated in figure 7. Close to the hydrofoil wall, the opposite flow is observed travelling upstream until its head surpasses the cavitation sheet's border near the leading edge. Readers are encouraged to look at figures 7 and 9 in [17] to assess the results and similarities in the pictures.

Numerical simulations were completed successfully without any diverging problems. The maximum Courant number was set to 1.2 and accordingly, the analysis time step is 1.0 e-05. As explained in the previous sections, the necessary relaxation tolerances for the Gauss-Seidel algorithm were given in the solver settings. For robust convergence control, the PIMPLE algorithm was set to repeat with 5 outer correctors iteration during each time step of the analysis for pressure calculations. Limiter iteration number had also been arranged the value of 5 for the water volume fraction calculations. Residuals were plotted after the simulation is completed. As can be seen in figure 8, the number of iterations for "alpha.water" and "p_rgh" is 5 times larger than for "k" and "omega". In addition, it is also noticed that the tolerance values set are different.

In this study, a mesh refinement study was performed to investigate the effect of the mesh number on the hydrofoil region on the cavitating flow characteristics and flow conditions. In Case 1, mesh refinement was applied to an elliptical area, including the hydrofoil wall surface area. In the first case, the mesh contains approximately 317,000 thousand prism cells and is called "mesh". The second condition, together with the mesh refinement applied to an elliptical zone which consists of the wall surface of the hydrofoil, contains around 490,000 prism cells and is called "refined mesh". Finally, in the third condition, mesh refinement was made in the intense hydrofoil region, increasing the total number of prism cells to 980,000 and it was named "refined mesh2".

When a cross-section is taken from the wall surface of the hydrofoil after the first refinement, it is observed that the pressure values on the cross-section and the water volume ratio values for the two conditions match and show the compatibility up to the moment $t=0.17$. The comparison is illustrated in figure 9. After $t=0.17$, the "refined mesh" condition had estimated the pressure fluctuations more accurately than the first mesh. This can be decided by examining the alpha water fields. It was observed that the cavitating flow characteristics could not be observed for the first mesh condition after $t=0.17$ and the cavity extending up to the mid chord length did not transform into another cavitation dynamics until the end of the analysis. This is primarily due to the inadequacy of estimating the pressure values for the first mesh. However, the results obtained with the "refined mesh" were found to be sufficient when the cyclic behaviour of cavitating flow patterns was evaluated.

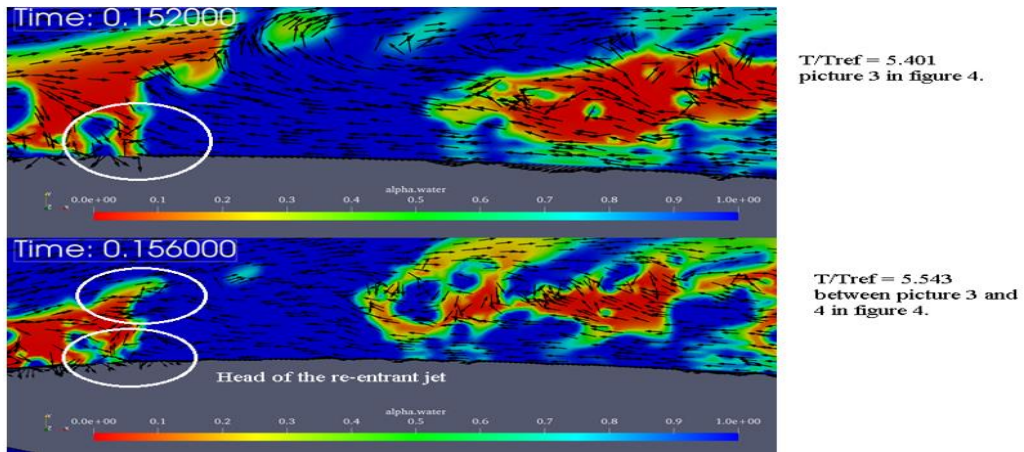


Figure 7. Flow separations and cavity break-off (case 2: 8° incidence angle, $V_{ref} = 5.33 \text{ m/s}$, $\sigma = 1.25$)

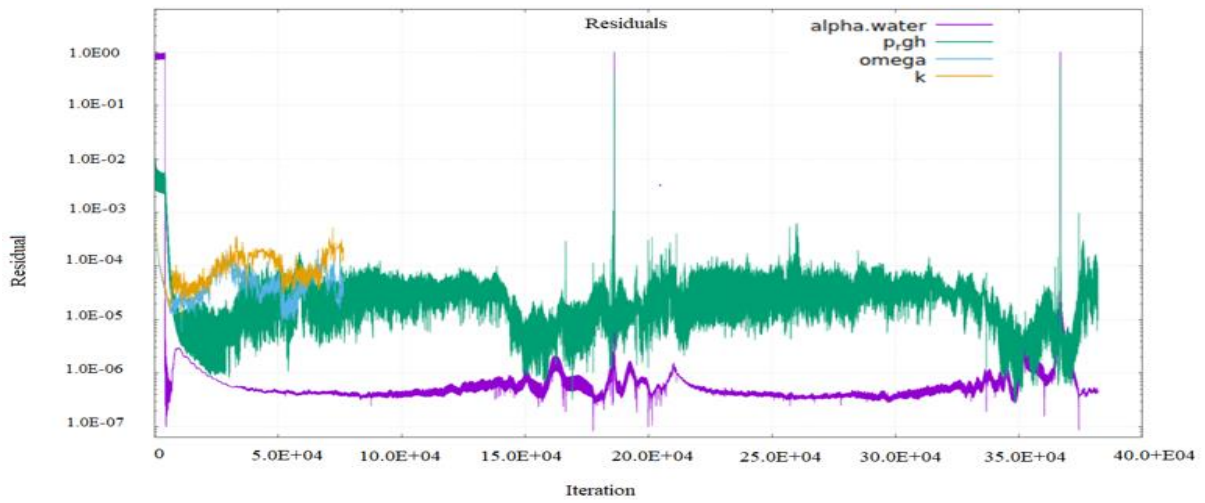


Figure 8. Residuals of the analysis

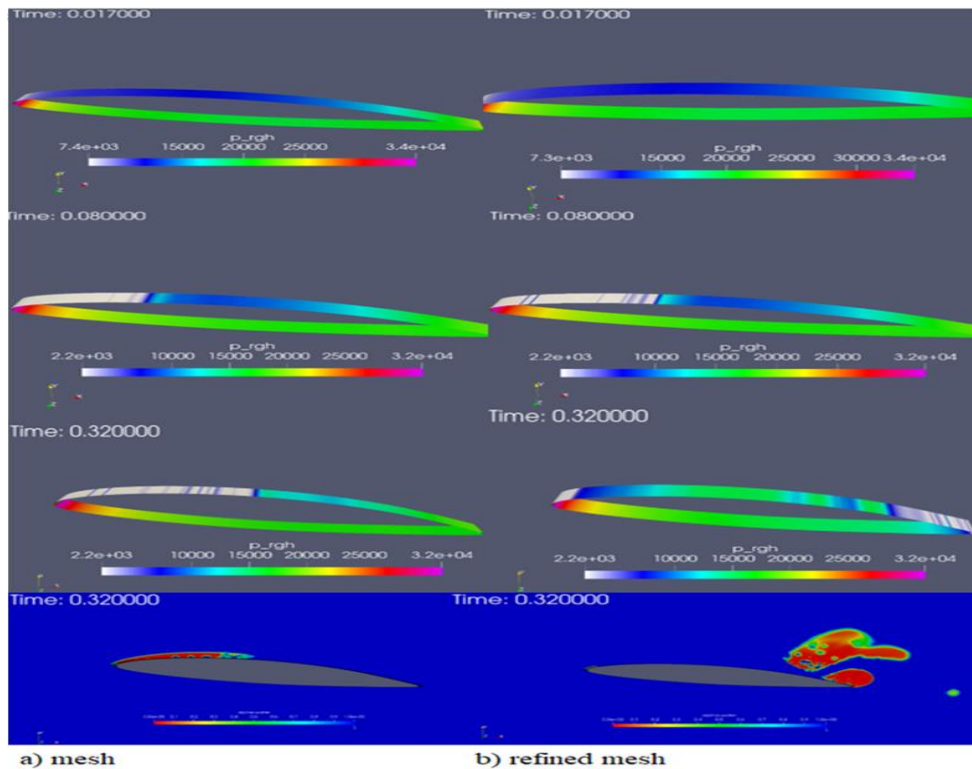


Figure 9. Pressure distribution and alpha water fields comparison for two different mesh

After the second refinement, the results were expected to be better than the previous one, but at the beginning of the simulation, noticeable changes and differences in the pressure values were detected. The fact that these values are so different compared to the previous predictions completely changes the cavitating flow behaviour. Looking at the graphs in figure 10, pressure fluctuations graphs are given for all 3 conditions. The yellow line in the graph represents the pressure values obtained with the initial mesh, and the green line represents the pressure values obtained with the refined mesh for the first time. The dark red line in the graph shows the pressure values obtained after the last refinement. The initial and final mesh conditions are called "mesh", "refined mesh" and "refined mesh2" in the legend bars, respectively. As can be seen from the graph, the cavitation process could not start correctly despite the mesh being refined for the second time. This can be understood by looking at the previous "mesh" and "refined mesh" values. It is thought that the reason for this uncertainty in the mesh refinement study may be due to the unstable, completely turbulent and chaotic problem of cavitation, as well as the pressure reduction method applied for simulations.

According to the investigations, cavitation disappears after a while after the start time of the simulation for the formation of cyclic cavitation characteristics. We can understand this by looking at the fact that the alpha water values between $t=0.010-0.017$ in the analysis are 1 and the interface Courant number values are 0. During the studies, cavitation disappears after $t=0.01$ in the "mesh" and "refined mesh" conditions. After monitoring the pressure values between $0.01-0.017$ and making sure that they do not change and that cavitation does not start, the high-pressure value given at first is adjusted to the outlet pressure value calculated according to the required cavitation number and the simulation continues from where it left off. After a certain time from this moment, the cavitation proceeds from the leading edge in a healthy way. However, in the "refined mesh2" condition, the intense mesh applied to the hydrofoil surface region causes the cavitation to disappear for a short time at a value of approximately $t=0.0161$ between $t=0.016-0.017$ and to start again in the timesteps after $t=0.017$. Since the pressure values could not reach the steady-state condition within a certain time interval, cavitation could not be formed properly. The cavitation process was failed to start, resulting in a complete change in cavitating flow patterns. As a result, it was decided to make all the evaluations in this article according to the results in the "refined mesh" condition containing approximately 490,000 prism cells.

The pressure distributions on the hydrofoil surface are the most important parameters for the correct observation of unsteady cavitating flow structures. Pressure values affect cavitation formation and therefore water volume fraction values. In figure 11

pressure distribution comparisons between numerical and computation studies are illustrated. The comparison has been investigated for $\sigma=1.25$ and $\alpha=6^\circ$ incidence angle. The experimental values were obtained from figure 10 in [8]. Readers are encouraged to look at figure 1b in [8] to check the pressure measurement locations for the experimental setup. As can be seen from the graph in figure 11, the reason for the initial pressure being overestimated is due to the high initial pressure given by the method applied. After a short time, the pressure value in the simulation came to values close to the results in the experiment. In this respect, commendable results were obtained between numerical computation and experiments. However, the pressure values were not only investigated quantitatively in this paper. The transition relations between the peak values of pressure fluctuations and the stages of cavitating flow dynamics were evaluated and compared qualitatively by examining the studies in the literature [17]. Experimental results for pressure fluctuations could not be used quantitatively in these comparisons. The reason why numerical value comparison could not be applied can be explained as follows. First, the criterion value used for pressure fluctuations in the study in the literature is different. Experimental and computational pressure data were compared according to the criteria called "wall pressure fluctuations" is defined $p' = p - p_{moy}$. Readers are encouraged to examine figure 12 in [17] to check how the p' values can vary. It is noticed that p' (Pa) can take negative values, so the criterion is different. Secondly, the differences in cycle periods can be shown as another reason.

Pressure fluctuations were also considered qualitatively for both cases. The pressure values are examined for the different locations (which are respectively 30%, 50%, 70%) on the chord length. The pressure values demonstrate the periodic behaviour of cavitation dynamics. Figure 12 shows the pressure values (on three different locations in terms of x/c) obtained from simulations until the beginning of the second cycle. Due to the complicated cavity behaviour, four sequences have been recognized for each period: the growth of the cavity (1), separation of primary cloud (2), the following cavity development (3), and sudden disappearance owing to cloud collapsing (4). According to the results in [17], the residual cavity shows a little rise at every x/c on the chord length, but the calculation anticipates a greater increase. Moreover, the start and end times of the sequences do not exactly match the numerical and experimental results by Leroux et. al. [8, 17]. This difference is due to the approach used for numerical simulation. Because to make calculations in a system where steady-state conditions have been reached and to eliminate input effects, the pressure was given at a value higher than the required one and the pressure was applied after the desired conditions were reached. In addition, the pressure reduction method after the first given pressure

will also affect the formation of the desired conditions and, accordingly, the start time of the cavitation cycle and stages. Giving the desired pressure too high and gradually decreasing it or giving less and then suddenly pulling to the desired value and continuing the simulation can completely delay the cavitation start time and all other sequences. Furthermore, the turbulence model used can also affect the time of the cycle steps. The $k-\epsilon$ *RNG* model had been used for calculations in [17], readers are encouraged to check the graphics of figures 12 and 14 in [17] to see the discrepancies between computational and experimental results. The important thing here is that the *SST k- ω*

turbulence model was able to show the cavitation characteristics and oscillation cycle steps acceptably, as can be seen from the graphics in figure 12. After the pressure in the graphs is at its highest ($t=0.385$), the pressure values suddenly decrease while the cavitation suddenly disappears. To explain the relationship the pressure fields and water volume fraction values were examined in detail in the range of 3-4 sequences. It is illustrated in figures 13 and 14. It has been noticed that there is a mechanism that causes the pressure to peak between the progression of the remaining cavity and the sudden decrease in cavitation.

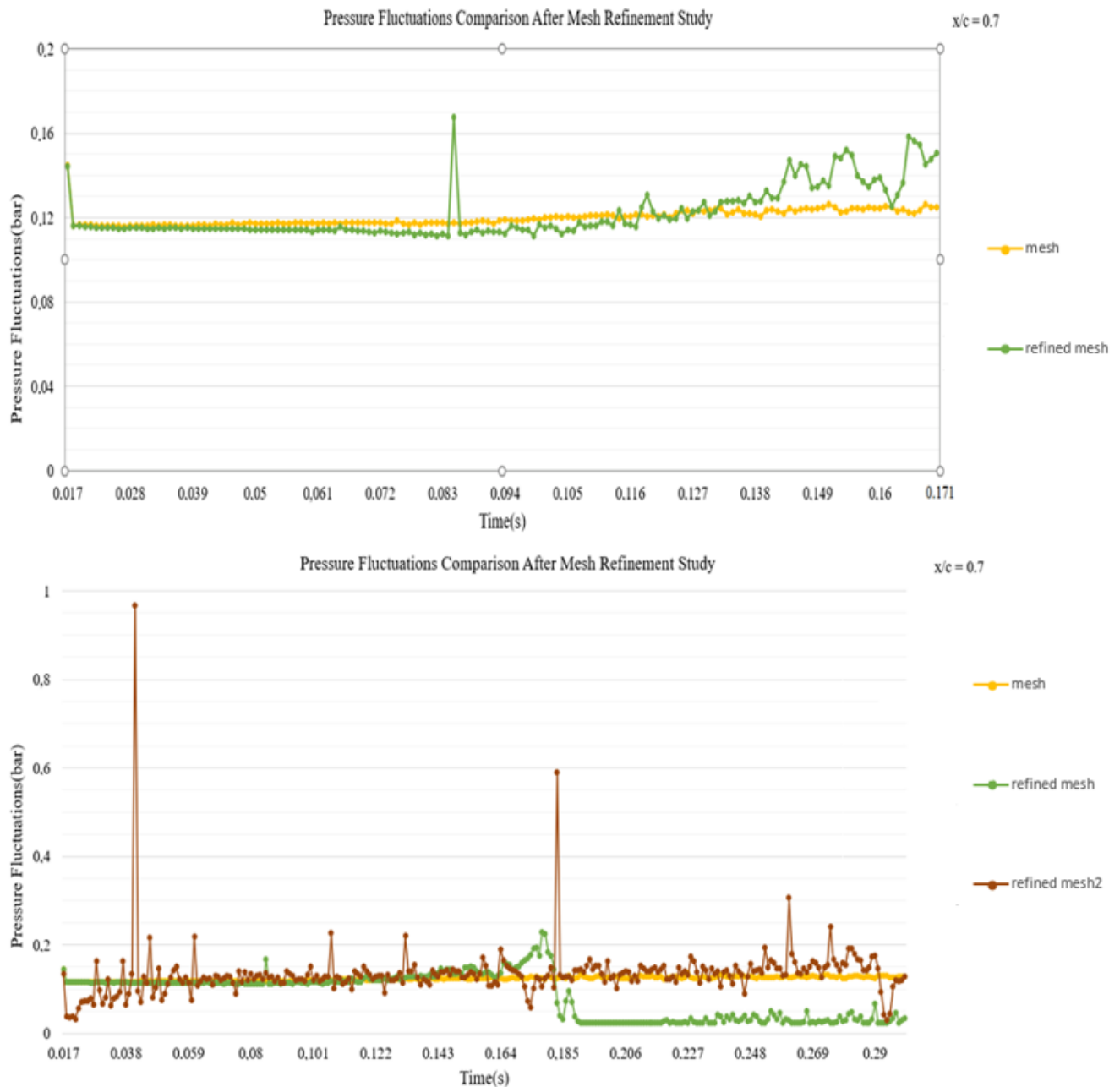


Figure 10. Pressure fluctuation comparison after the mesh refinement study

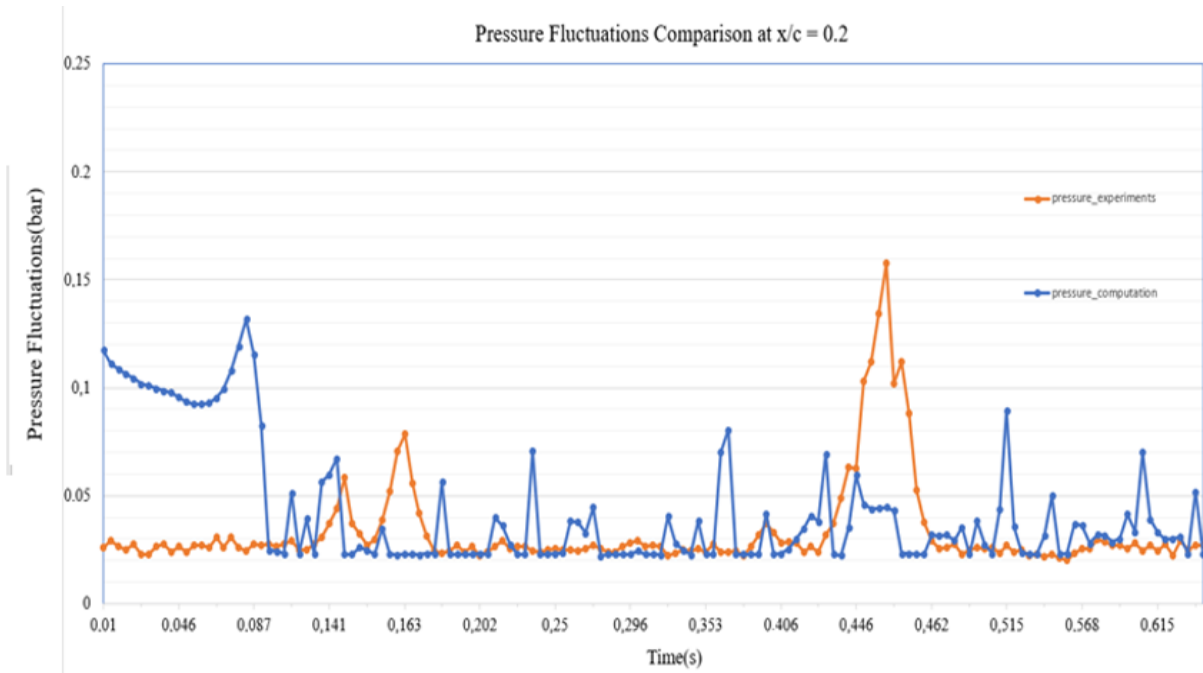


Figure 11. Pressure fluctuation values comparison, $\sigma=1.25$ and $\alpha = 6^\circ$ incidence angle

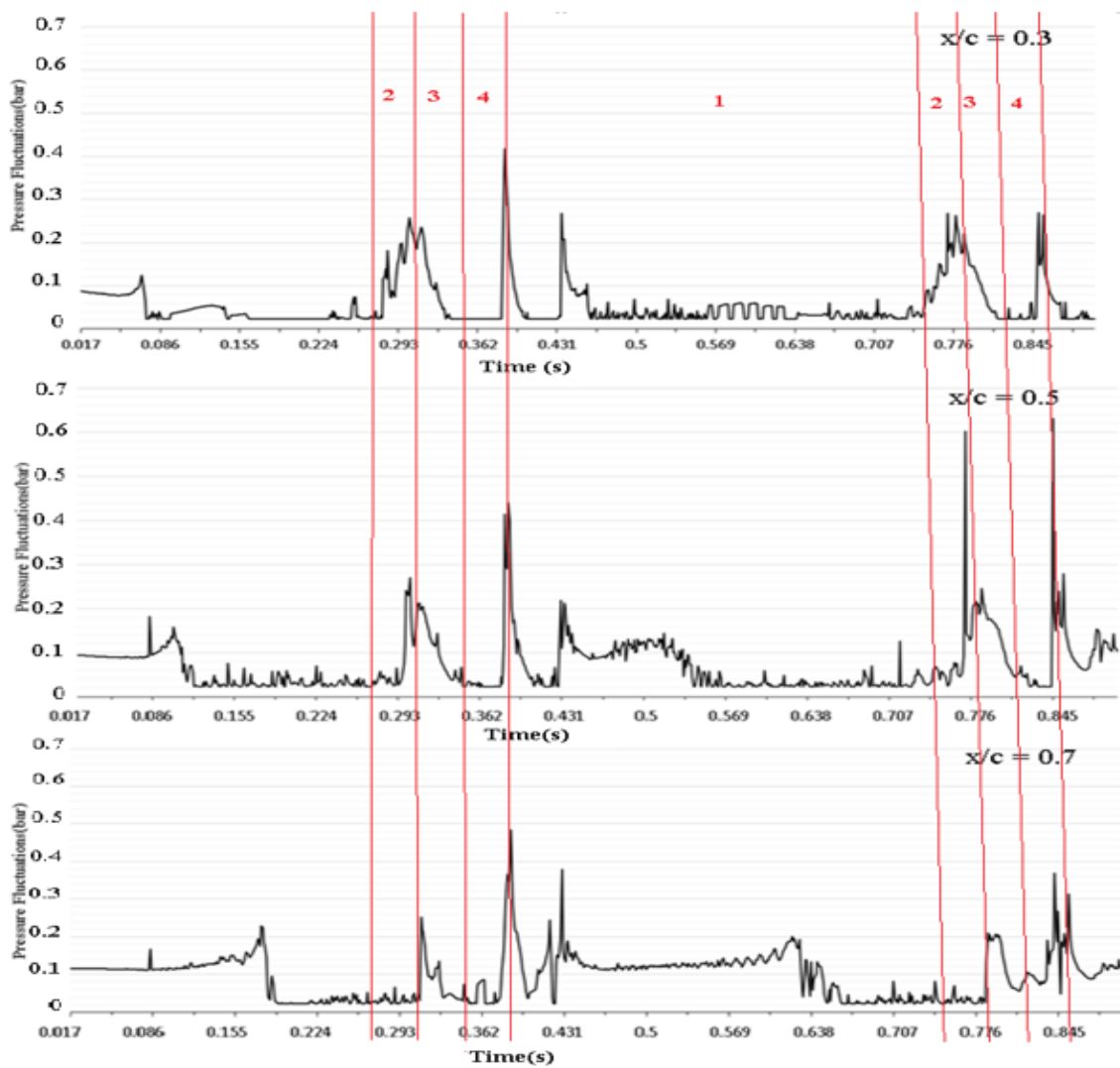


Figure 12. Pressure values overtime on the different locations of the hydrofoil's suction surface for case 1

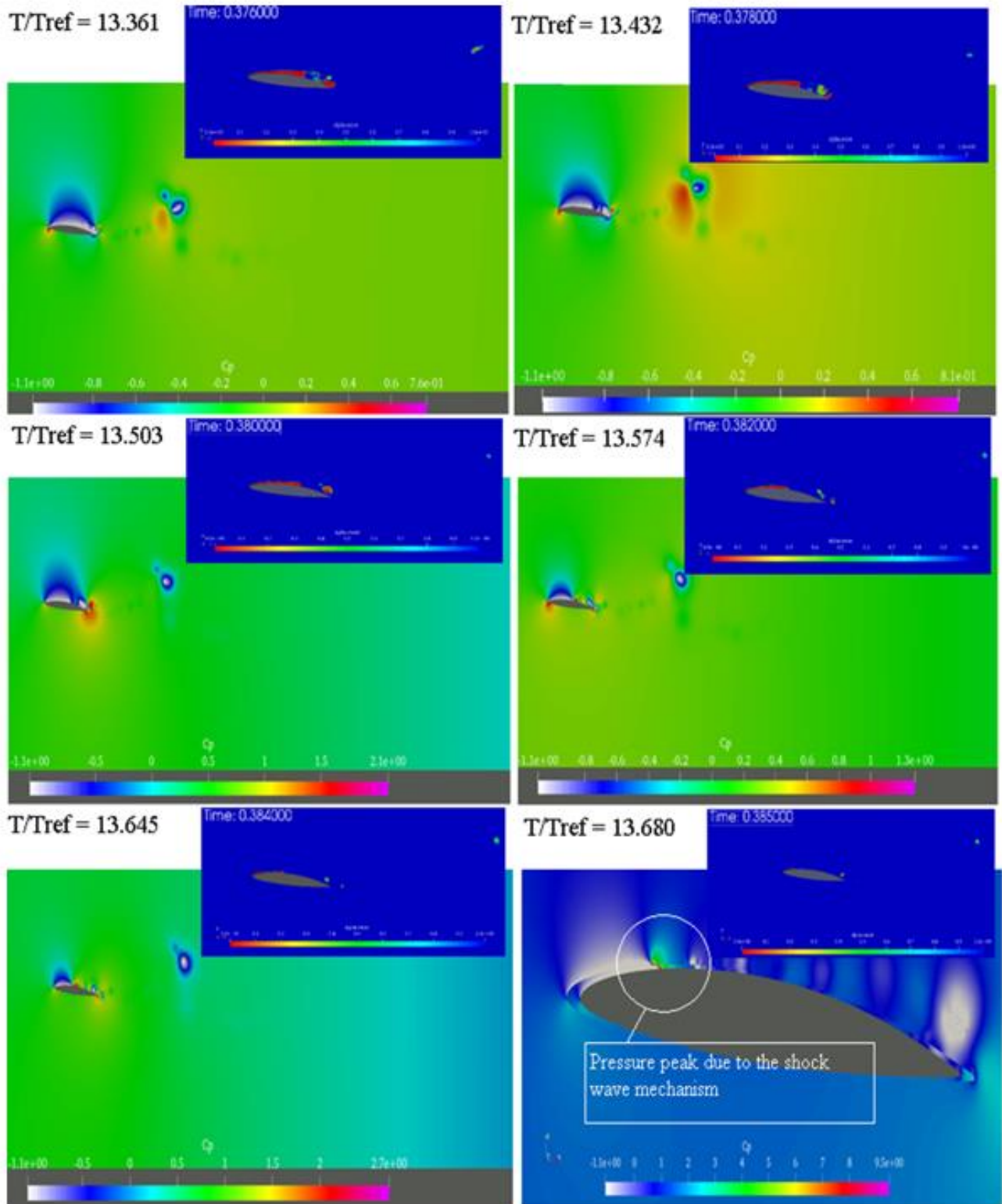


Figure 13. Pressure and alpha water distributions during the vapour cloud collapse and the abrupt disappearance of the cavity. Case 1(6° incidence angle, $V_{ref} = 5.33 \text{ m/s}$, $\sigma = 1.07$)

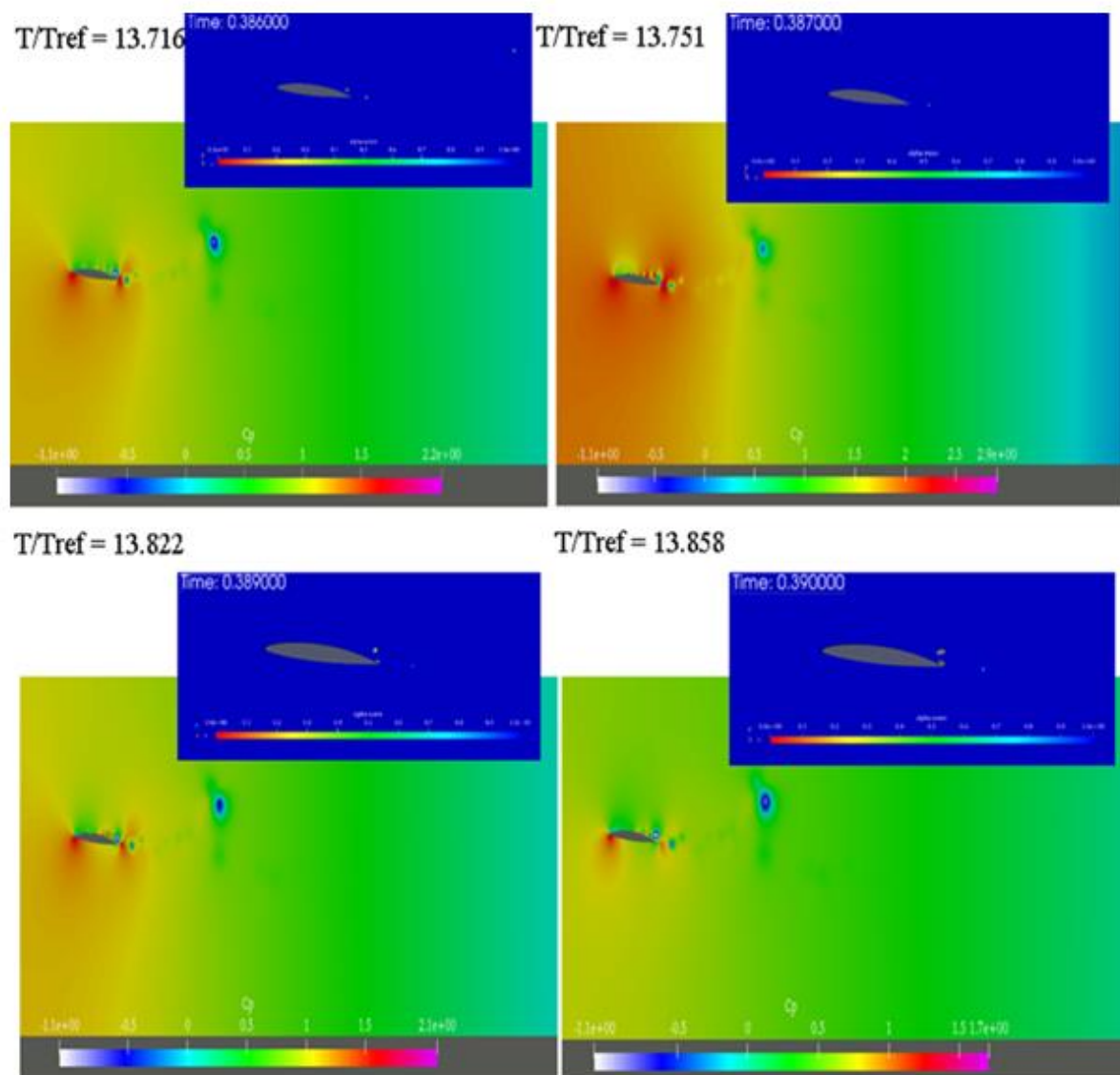


Figure 14. Pressure and alpha water distributions after the abrupt disappearance of the cavity. Case 1(6° incidence angle, $V_{ref} = 5.33 \text{ m/s}$, $\sigma = 1.07$)

IV. CONCLUSIONS

In this paper, flow structures and the dynamics of unsteady cavitation have been numerically simulated. Firstly, the $k-\epsilon$ model and then the $SST k-\omega$ model were used for turbulence and their performance for cavitation prediction is compared. After it is concluded that the flow physics could be better captured with the $SST k-\omega$ model, the following calculations were carried out with this model in the 2D hydrofoil section arrangement. Cavitating vapour detachment for two individual dynamic cycles (case 1 and case 2) was obtained at respectively 6 and 8 degrees of attack. They are defined by two separate periodical behaviour. The process is more complicated for case 1. When the cavity expansion reached nearly 50%-60% of the chord, it was decelerated and alternated by the cloud shedding. The secondary clouds formed as a result of an interplay for both the re-entrant jet and the contact surface in the growing cavity's rear side. (as in case 2.) The cavity

closure oscillated during secondary cloud shedding until a substantial disruption emerged, dividing the cavity into two separate components: 1) a remnant cavity growing until approximately 20% of the hydrofoil chord length and 2) sizeable cavitating vapour phase (primary cloud) evolved downstream. The remaining cavity regrows until it completely disappears, as also observed in [17]. Although the re-entrant jet was not clearly illustrated by pressure fluctuations results, numerical simulations revealed that it played the leading role in flow separation and formation of primary cavitating cloud.

This is believed to be the result of the major cloud collapse closed to the trailing edge, causing a "shock wave" effect. The rapid decrement of the remnant cavity appears to be linked to the major cloud collapse, according to both experimental and numerical observations. The pressure evolutions on the hydrofoil's suction surface, as well as the consecutive

stages of the unsteady processes, were found to correspond well together with experiments and numerical computations. The numerical results were examined to express the differences in behaviour between the two cases. The collapsing process was studied to seek probable cavity dynamic feedback from the vapour implosion. It was observed that a pressure wave spreads with a high level of velocity when the cavitation suddenly disappears. It travelled from the collapsing point to the direction of the domain outlet. This phenomenon was observed in both cases.

In conclusion, it has been shown that the $k-\omega$ SST turbulence model can be used to determine cavitating flow characteristics on a 2D hydrofoil using OpenFOAM®. The $k-\omega$ SST model has proven superiority over the other two-equation $k-\varepsilon$ model in simulating flow separations, cavity dynamics and re-entrant jet formation. The numerical procedure will be utilized in the following work to simulate unsteady structures for cavitation dynamics in a three-dimensional geometry of an axial flow water jet pump. With this study, it was desired to make sure that the cavitation cycles and periodical behaviours in [17] could be obtained with the interaction of the solver in OpenFOAM® and the models chosen, and it was successful. This study will provide an adequate numerical procedure for future cavitation studies related to marine engineering applications.

REFERENCES

- [1] R. A. Furness and S. P. Hutton, "Experimental and Theoretical Studies of Two-Dimensional Fixed-Type Cavities," *J. Fluids Eng.*, pp. 515-521, 1975.
- [2] P. A. Lush and P. I. Peters, "Visualisation of the cavitating flow in a venturi type duct using high-speed cine photography," *In Proceedings of the International Association of Hydraulic Engineering and Research Conference on Operating Problems of Pump Stations and Power Plants*, pp. 1-13, Amsterdam 1982.
- [3] B. Stutz and J.-L. Riboud, "Experiments on unsteady cavitation," *Exp. Fluids* 21, pp. 191-198, 1997.
- [4] Y. Kawanami, H. Kato, H. Yamaguchi, M. Tanimura and Y. Tagaya, "Mechanism and Control of Cloud Cavitation," *Journal of Fluids Engineering*, vol. 119, no. 4, pp. 788-794, 1997.
- [5] R. A. Arndt, C. S. Song, M. Kjeldsen and A. Keller, "Instability of Partial Cavitation: A Numerical/Experimental Approach," *In: Proceedings of 23rd Symposium on Naval Hydrodynamics, Office of Naval Research*, pp. 599-615, Val De Ruil France (National Academic Press, Washington, DC) 2000.
- [6] K. R. Laberteaux and S. L. Ceccio, "Partial cavity flows. Part 1. Cavities forming on models without spanwise variation," *J. Fluid Mech.*, vol. 431, pp. 1-41, 2001.
- [7] J.-A. Astolfi, J.-B. Leroux, P. Dorange, J.-Y. Billard, F. Deniset and S. de La Fuente, "An Experimental Investigation of Cavitation Inception and Development on a Two-Dimensional Hydrofoil," *J. Ship Res.*, vol. 44, no. 04, pp. 259-269, 2000.
- [8] J.-B. Leroux, J. A. Astolfi and J. Y. Billard, "An Experimental Study of Unsteady Partial Cavitation," *J. of Fluids Eng.*, vol. Vol., no. 126, pp. 94-101, 2004.
- [9] B. Stutz and J.-L. Reboud, "Measurements within unsteady cavitation," *Experiments in Fluids*, vol. 29, no. 6, pp. 545-552, 2000.
- [10] Q. Le, J.-P. Franc and J.-M. Michel, "Partial cavities : global behaviour and mean pressure distribution," *J. of Fluids Eng.*, pp. 243-248, 1993.
- [11] P. A. Lush and S. R. Skipp, "High Speed Cine Observations of Cavitating Flow in a Duct," *Int. J. Heat and Fluid Flow*, vol. Vol., no. 7, pp. 283-290, 1986.
- [12] S. Gopalan and J. Katz, "Flow structure and modeling issues in the closure region of attached cavitation," *Phys. Fluids*, vol. 12, no. 4, pp. 895-911, 2000.
- [13] M. Callenaere, J.-P. Franc, J.-M. Michel and M. Riondet, "The cavitation instability induced by the development of a re-entrant jet," *J. Fluid Mech.*, pp. 223-256, 2001.
- [14] D. De Lange, G. J. Bruin and L. Van Winjngaarden, "On the Mechanism of Cloud Cavitation-Experiment and Modelling," *In: Proceedings 2nd Int. Symp. on Cavitation*, pp. 45-49, 1994.
- [15] P. A. Lush and P. I. Peters, "Visualisation of the cavitating flow in a venturi type duct using high-speed cine photography," *In: Proceedings of the International Association of Hydraulic Engineering and Research Conference on Operating Problems of Pump Stations and Power Plant*, pp. 1-13, Amsterdam 1982.
- [16] C. Song and Q. Qin, "Numerical Simulation of Unsteady Cavitating Flows," *In: Proceedings of the Fourth International Symposium on Cavitation*, 20-23 June 2001.
- [17] J.-B. Leroux, O. Coutier-Delgosha and J.-A. Astolfi, "A joint experimental and numerical study of mechanisms associated to instability of partial cavitation on two-dimensional hydrofoil," *Phys. Fluids*, vol. 17, no. 5, pp. 1-20, 2005.
- [18] A. Kubota, H. Kato and H. Yamaguchi, "A new modelling of cavitating flows: a numerical study of unsteady cavitation on a hydrofoil section," *J. Fluid Mech.*, vol. Vol., no. 240, pp. 59-96, 1992.
- [19] O. Coutier-Delgosha, R. Fortes-Patella and J.

- Reboud, "Evaluation of the Turbulence Model Influence on the Numerical Simulations of Unsteady Cavitation," *J. of Fluids Eng.*, vol. Vol., no. 125, pp. 38-45, 2003.
- [20] E. Goncalves and R. F. Patella, "Numerical Simulation of Cavitating Flows with Homogeneous Models," *Computers and Fluids*, vol. 38, no. 2009, pp. 1-58, 2009.
- [21] C. L. Merkle, J. Z. Feng and P. Bueow , "Computational modeling of the dynamics of sheet cavitation," *In: Proceedings of the 3rd International Symposium on Cavitation*, pp. 307-311, 1998.
- [22] F. R. Kunz, A. D. Boger, R. D. Stinebring, T. S. Chyczewski, J. W. Lindau, H. J. Gibeling, S. Venkateswaran and T. R. Govindan, "A preconditioned Navier-Stokes method for two-phase flows with application to cavitation prediction," *Computers & Fluids*, vol. Vol., no. 29, pp. 849-875, 2000.
- [23] G. H. Schnerr and J. Sauer, "Physical and Numerical Modeling of Unsteady Cavitation Dynamics," *In: ICMF-2001, 4th International Conference on Multiphase Flow*, May 27 - June 1 New Orleans, USA, 2001.
- [24] A. Singhal, B. Yu, M. Athavale , H. Li and Y. Jiang, "Mathematical Basis and Validation of the Full Cavitation Model," *J. of Fluids Eng.*, vol. 124, no. 3, pp. 617-624, 2002.
- [25] W. Yuann and G. H. Schnerr, "Optimization of Two-Phase Flow in Injection Nozzles–Interaction of Cavitation and External Jet Formation," *In: Proc.ASME Fluids Engineering Division, Summer Meeting*, 14-18 July, Montreal 2002.
- [26] B. Pouffrey, R. Fortes-Patella and J. Reboud, "Numerical Simulation of Cavitating Flow around a 2D Hydrofoil : "A Barotropic Approach," *In: Fifth International Symposium on Cavitation (CAV2003)*, 1-4 November, Osaka 2003.
- [27] T. S. Johansen, J. Wu and W. Shyy, "Filter-Based Unsteady RANS Computations," Unpublished, Technical Report, University of Florida, 2003.
- [28] J. Wu, Y. Utturkar and W. Shyy , "Assesment of Modelling Strategies for Cavitating Flow Around a Hydrofoil," *In: Fifth International Symposium on Cavitation (CAV2003)*, 1-4 November, Osaka, Japan 2003.
- [29] F. R. Menter, "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications," *AIA A Journal*, vol. 32, no. 8, pp. 1598-1605, 1994.
- [30] G. Zhang , W. Shi, D. Zhang , C. Wang and L. Zhou, "A Hybrid RANS/LES model for simulating time dependent cloud cavitating flow around a NACA66 hydrofoil," *Science China Technological Sciences*, vol. 59, no. 8, pp. 1252-1264, 2016.
- [31] D.-S. Zhang, W. D. Shi, G. Zhang, J. Chen and B. M. van Esch, "Numerical analysis of cavitation shedding flow around a three-dimensional hydrofoil using an improved filter-based model'," *Journal of Hydrodynamics*, vol. 29, no. 2, pp. 361-375, 2017.
- [32] B. Ji, X.-W. Luo, X.-X. Peng, Y. Zhang, Y.-L. Wu and H.-Y. Xu, "Numerical investigation of the Ventilated Cavitating Flow Around and Under-Water Vehicle Based on a Three-Component Cavitation Model," *Journal of Hydrodynamics*, vol. 22, no. 6, pp. 753-759, 2010.
- [33] E. Alpman and E. L. Kavurmacioğlu, "Investigation of Cavitation Noise of Marine Propeller using Computational Fluid Dynamics," *In: Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, pp. 930-937, April 2019.
- [34] B. Stutz and J.-L. Riboud, "Two phase flow structure of sheet cavitation," *Physics of Fluids*, vol. 9, no. 12, pp. 3678-3686, 1997.
- [35] O. Coutier-Delgosha, J.-L. Reboud, B. Pouffary and R. Patella-Fortes, "Numerical Simulations of Unsteady Cavitating Flows : Some Applications and Open Problems," *In: Fifth International Symposium on Cavitation (CAV2003)*, 1-4 November, Osaka, Japan 2003.

Dipole-Dipole Effect to Limits of Entanglement in Multipartite Spin Chain: A Monte Carlo Study

*Çokparçalı Spin Zincirinde Dipol-Dipol Etkileşmesinin Dolaşıklığın Sınırlarına Etkisi:
Monte Carlo Çalışması*

İzzet Paruğ DURU¹ , Şahin AKTAŞ² 

¹*Istanbul Gedik Üniversitesi, Tıbbi Görüntüleme Programı, 34722, İstanbul, Türkiye*
²*Marmara Üniversitesi, Fizik Bölümü, 34722, İstanbul, Türkiye*

Abstract

The entanglement of the ferromagnetically ordered isotropic spin-1/2 chain is discussed. The analytically deriving concurrence of a two-qubit state allows focusing on the effect of dipolar interaction (D). Low fields enable tuning creation/extinction of entangled states, particularly at low temperatures. There is a joint effect of the applied field and dipolar interaction which can't be disregarded. We perform Quantum Monte Carlo simulations on quantifying localizable entanglement (LE) in terms of upper/lower bounds. Findings reveal that D and B_z are decisive parameters on the production of entanglement including creation and extinction. A non-monotonic behavior has occurred under high fields at the critical temperature. However, strong D provides the stability of LE values concerning distance herewith conserving the unity at low temperatures under zero field. Rival regions are observed for the distant nearest neighbors, particularly odd ones.

Keywords: Dipole-dipole interaction, localizable entanglement, concurrence, loop algorithm, Monte Carlo method.

Öz

İzotropik ferromanyetik spin-1/2 zincirinde dolaşıklığın tartışıldığı bu çalışmada 2-kubit dolaşıklığının analitik çözümü yapılarak dipol-dipol etkileşmesine (D) odaklanılmıştır. Harici manyetik alan (B_z), özellikle düşük sıcaklıklarda, dolaşıklığın oluşumunu ve sönümlenmesini kontrol edebilmektedir. Kuantum Monte Carlo simülasyon metodu ile dolaşıklığın alt ve üst sınırları hesaplanarak dipolar etkileşme (D) de harici alanla (B_z) beraber dolaşıklığın oluşması ve yok olması sürecinde karar verici parametreler oldukları sonucuna varılmaktadır. Kritik sıcaklıkta ve yüksek manyetik alan altında monoton olmayan davranış ile karşılaşılmıştır. Ayrıca, uzak spinler arasındaki dolaşıklığın baskın dipolar etki ile kararlı hale geldiği ve düşük sıcaklıklarda 20 komşu spin ile hala dolaşık halde kalsada yüksek sıcaklıklarda uzak komşu dolaşıklığının eriminin azaldığı anlaşılmaktadır. Tek komşu spinler arasında "rival" bölgeler gözlenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Dipol-dipol etkileşmesi, localize dolaşıklık, eşvrelilik, döngü algoritması, Monte Carlo metodu.

I. INTRODUCTION

Entanglement provides a remarkable aspect on performing quantum information processes such as teleportation [1, 2, and 3] and quantum computation [4, 5, 6, 7, and 8] providing a substantial resource of information [9]. Heisenberg and Ising-like models which describe the magnetic behavior of a solid-state system [10 and 11], have been commonly preferred to study entanglement and strong correlations due to its literal and simplistic structure. Furthermore, both experimental and theoretical investigations on behalf of magnetic characterization and spin correlations including simulation studies have been progressed with a broad perspective of researchers in the field reporting either miscellaneous or convergent results [12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, and 19]. Previous works elaborately focused on Heisenberg Hamiltonian describing the quantum spin-1/2 chain, since 1D-spin arrays, greatly incorporating entangled states, can be introduced as a reliable candidate for quantum information processes [20, 21, 22, and 23]. They also focused on the concurrence of the system which refers to the mixed states of two-qubits. Wang studied thermal entanglement for isotropic XY model deducing that zero-field concurrence has unity for low temperatures up to temperature (T), $T = 0.2$ while it vanishes at $T = 1.1$ even if the external field (B) is applied [24]. However quantum phase transition at a critical value of B is observed at $T = 0$ for isotropic XY chain [25]. According to the calculations of Rigolin, entanglement vanished at $T = 0.9$ for isotropic XXX model ($J = 1$) [26]. Besides concurrence measurements of two nearest neighboring spins, the entanglement of multi-particle systems can provide practical information between long-ranged pairs of spins. LE is the most suitable measurement tool for this type of quest. Therefore, Androvitsaneas et.al, investigated the relation between LE and anisotropy of system for XY and XYZ model under external field and/or zero-field reporting singularities herewith resulting in a quantum critical point as $B_z = 0.75$. Moreover, revival regions are shown for the next nearest 10 neighbors [27] under certain magnetic fields and thermal agitations. Sinyagin et al., dressed spherical nanostructures with dipoles to determine the aggregation state of the system [28].

It can be confidently argued that long-distant stably entangled pairs procure a remarkable fact for topological storage [29]. However, the long-range entanglement of two-qubit is studied by [30] revealing the coupling of selected qubits with considerable distances. Additionally, various long-ranged interacted systems have a fabulous potential to study [31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, and 41]. In this manner, dipolar interaction between spins has been taken into consideration to deal with magnetic monopoles [34]. Several experimental studies have been performed to investigate the properties of quasiparticle excitations [39, 40, and 42] by treating low dimensional quantum-spin models. The first demonstration of entangled spins separated with 220 250Å distance in a bulk material is evaluated by Sahling at very low temperatures [43]. In the theoretical aspect, quantum phase transitions should be clearly understood from the sight of quantum information in the area of condensed matter physics [44, 45, and 46]. Bravo et al. emphasized the significance of dipolar interactions on antiferromagnetic spin chains under transverse magnetic field stressing a quantum phase transition [46]. Previously, we have focused on a spin-chain ordered as AFM considering dipolar interaction (D) and external magnetic field (B) observing rival regions related to the temperature for certain D and B values [47].

This study brings out the effect of dipole-dipole interaction (D) to upper and lower limits of entanglement in isotropic ferromagnetic spin-1/2 Heisenberg chain under uniform external magnetic field (B_z) along the z-axis. LE is a suitable tool to investigate entanglement in multipartite systems via quantifying bipartite entanglement. Hence, it indicates the maximized entanglement between two parts of the system on average by carrying local measurements out the rest of the system [51]. Concurrence and thermal entanglement of two-qubit Heisenberg Hamiltonian including dipolar interaction is well measured respectively, before evaluating LE based on the calculation of correlation functions (Q_{ij}). Loop algorithm, embedded in ALPS package [48], is used to determine LE [49 and 50] in terms of upper and lower bounds. Note that LE is related to the entanglement of assistance (EoF). Simulation data is post-processed by a Python script developed by the authors. We aimed not only to deal with the effect of dipolar interaction on entanglement both analytically and numerically but also to quantify the entanglement of the distant spins (long-ranged) in multipartite systems.

In Section 2, Hamiltonian of the spin chain and the procedure of calculating expectation values applying loop algorithm with Quantum Monte Carlo methodology were explained. Thermal entanglement of two-spin as two-qubits state was investigated via concurrence analytically in Section 3.1. Section 3.2 focused on localizable entanglement determining the

upper and lower bounds considering temperature, spin-spin length, strength of the dipolar interaction and external magnetic field. Results were summarized in Section 4.

II. MODEL

The Hamiltonian of the N-qubit one-dimensional spin chain with dipole-dipole interaction term and magnetic field along z-direction is given by,

$$\hat{H} = -\sum_{i=1}^N [J_x \hat{\sigma}_i^x \hat{\sigma}_{i+1}^x + J_y \hat{\sigma}_i^y \hat{\sigma}_{i+1}^y + J_z \hat{\sigma}_i^z \hat{\sigma}_{i+1}^z + B_z (\hat{\sigma}_i^z)] + \hat{H}_D \quad (1)$$

$$\hat{H}_D = \frac{D}{2} \sum_{i=1}^N \left[\frac{\hat{\sigma}_i \hat{\sigma}_{i+1}}{r_{i+1}^3} - 3 \frac{(\hat{\sigma}_i \cdot \mathbf{r}_{i+1})(\hat{\sigma}_{i+1} \cdot \mathbf{r}_{i+1})}{r_{i+1}^5} \right] \quad (2)$$

where J_α ($\alpha: x, y, z$) are exchange coupling constants, B_z denotes magnetic field along z-axis and D represents the strength of dipole interaction (r_{ij} : two-spin distance vector) in dipolar Hamiltonian \hat{H}_D . Only nearest neighboring spin, interactions are taken into account, in which periodic boundary conditions (PBC) are satisfied $\sigma_1 = \sigma_{N+1}$. A clear illustration of the model is given in Figure 1.

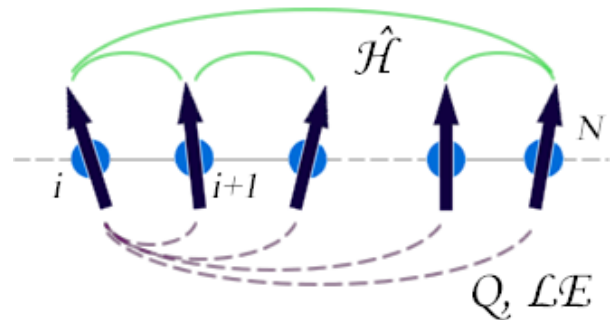


Figure 1. Illustration of spin chain: Green narrow and wide rounded lines represent the interacted spin pairs and PBC, respectively, while purple dashed lines are used to specify the spin pairs

Various measurement techniques such as entanglement witness, concurrence, negativity, entanglement entropy help us to quantify entanglement. Moreover, thermal entanglement provides plenty of worthy pipelines, in which entanglement can be related to temperature. Therefore, we found an analytical solution of interested Hamiltonian (including dipolar term) that is operative for the two-qubit state, calculating density matrix, $\tilde{\rho}$.

We are interested in LE since it is a clear way to determine maximum entanglement between two parts of the system by measuring the rest parts locally. However, a tight relation has been built up among classical correlations and entanglement phenomena. Popp et al. proposed a primrose path to quantify entanglement in terms of upper and lower bounds. The latter is related to the classical two-point correlation function. According to Popp et al., the correlation function can be described as [51],

$$Q_{\alpha\beta}^{ij}(|\psi\rangle\langle\psi|) = \langle\psi|\hat{\sigma}_{\alpha}^i \otimes \hat{\sigma}_{\beta}^j|\psi\rangle - \langle\psi|\hat{\sigma}_{\alpha}^i|\psi\rangle\langle\psi|\hat{\sigma}_{\beta}^j|\psi\rangle \quad (3)$$

In spin-1/2 systems, a connection between concurrence and LE can be generalized to higher-dimensional spin systems, realized by unrolling the equation $LE_{ij}(\psi) \geq \max |Q_{\alpha\beta}^{ij}(\psi)|$ for a given pure state $|\psi\rangle$ of N qubits. The right side of the inequality belongs to the lower bound of entanglement (LE_{ij}^{lb}). On the other hand, the upper bound is revealed by using entanglement of assistance (EoA). Thus, the bounds of entanglement can be easily described by the following equation.

$$\max(|Q_{xx}^{ij}|, |Q_{yy}^{ij}|, |Q_{zz}^{ij}|) \leq LE_{i,j} \leq \frac{\sqrt{x_+^{ij}} + \sqrt{x_-^{ij}}}{2} \quad (4)$$

Note that, the right side of the equation represents the upper bound of the entanglement (LE_{ij}^{ub}).

$$x_{\pm}^{ij} = (1 \pm \langle\sigma_z^i \sigma_z^j\rangle)^2 - (\langle\sigma_z^i\rangle \pm \langle\sigma_z^j\rangle)^2 \quad (5)$$

As a substantial way to simulate quantum spin systems loop algorithms introduce a powerful methodology based on clustering spins on discrete imaginary time. In contrast to the traditional Markov Chain Monte Carlo (MCMC), the Markov process presents a continuous cycle in transition probabilities between the spin (S) and graph configurations (G). Introducing spin-1/2 lattice with exchange coupling interactions and Heisenberg Hamiltonian of the model has been followed by the simulation process. Applying loop algorithm by lowering the temperature with small steps during thermalization to decrease long equilibration times. Thermalization cost 10^3 of Monte Carlo steps

before the measurement process of physical quantities. Here we focused on the energy as a function of temperature based on the generalization of clustering process updating spin system (MC updates). Suzuki-Trotter decomposition was used to obtain a path-integral representation of Z and weight of world-line graphs C ($W(C)$).

$$Z = \sum_C W(C)P(C) \quad (6)$$

P is the projection operator evolving C during imaginary time direction and a continuous imaginary time scheme was chosen. The weight P(C) is related to the projection operator; note that, $W(C)$ is the counterpart of the path-integral picture of our model constructed on our Hamiltonian. Certain spin configurations and plaquettes in which a group of spins is pictured in graphs and flipping spins by a probability. This process is also consistent with a detailed balance condition. A transition probability of spins in chosen plaquette leads to break-ups forming clusters through the loop. New spin configurations can be created by spin flipping in a cluster with a probability (shown in Figure 2). A detailed description of the loop algorithm can be found in [52].

The $Q_{\alpha\beta}^{ij}$ and X_{\pm}^{ij} are calculated with the aid of simulated data. We performed QMC simulations with parallel processing for parameters D, kT and B_z , *exempli grati*, at a temperature scale $kT \in (0,4]$. This corresponds to a large number of physical conditions. Obtaining the expected value of an A observable, it is crucial to represent through an estimator related to the $W(C)$.

$$\langle A \rangle = \frac{\sum_C A(C)W(C)}{\sum_C W(C)} \quad (7)$$

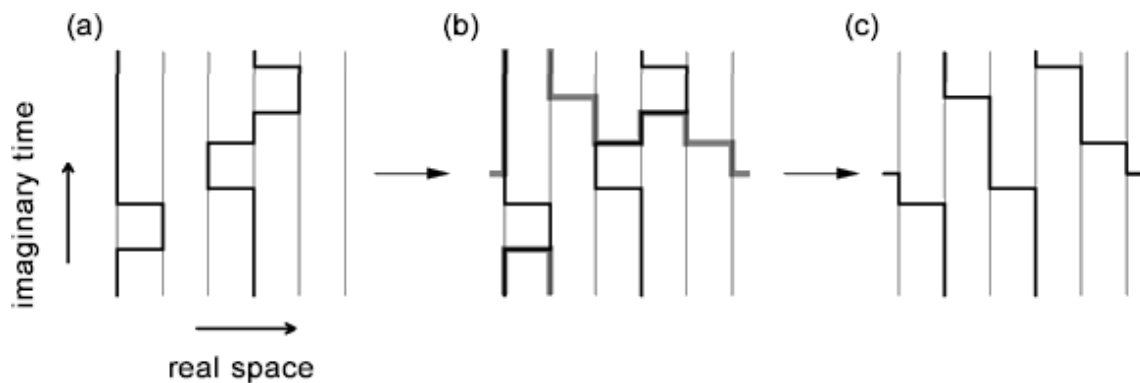


Figure 2. Evolution of spins in space: A set of spin flips draw the spin orientations in graphs along the continuous imaginary-time direction. Three arbitrary pictures at the end of several spin flips are given in (a), (b), and (c).

III. FINDINGS AND DISCUSSION

3.1 Thermal entanglement of two-qubit ground state

In the case of spin-1/2 chain including an only nearest-neighbor dipolar interaction term, Heisenberg Hamiltonian operator of bipartite spin system takes the form as expressed in Equation (8) where r denote

distance between spins, and D is related to dipolar constant.

$$\hat{H} = -\left(\frac{J_x}{2} + \frac{D}{r^3}\right)\hat{S}_1^x\hat{S}_2^x + \left(\frac{D}{2r^3} - \frac{J_y}{2}\right)\hat{S}_1^y\hat{S}_2^y + \left(\frac{D}{2r^3} - \frac{J_z}{2}\right)\hat{S}_1^z\hat{S}_2^z - \frac{B_z}{2}(\hat{S}_1^z + \hat{S}_2^z) \quad (8)$$

J_x, J_y and J_z represent exchange couplings where negative (positive) values/sign corresponds to FM

(AFM) interaction; $\hat{\sigma}_\alpha^\beta$ are known as Pauli spin matrices operating to up/down spin in the basis $|\uparrow\uparrow\rangle, |\uparrow\downarrow\rangle, |\downarrow\uparrow\rangle, |\downarrow\downarrow\rangle$. For simplicity (to operate \hat{H} easily), we reorganized \hat{H} in terms of raising and lowering operators, $\hat{S}^\pm = \hat{\sigma}^x \pm i\hat{\sigma}^y$.

$$\hat{H} = \left(-\frac{3D}{2r^3} - \frac{J_x}{2} + \frac{J_y}{2}\right) (\hat{\sigma}_1^+ \hat{\sigma}_2^+ + \hat{\sigma}_1^- \hat{\sigma}_2^-) + \left(-\frac{D}{2r^3} - \frac{J_x}{2} - \frac{J_y}{2}\right) (\hat{\sigma}_1^+ \hat{\sigma}_2^- + \hat{\sigma}_1^- \hat{\sigma}_2^+) + \left(\frac{D}{2r^3} - \frac{J_z}{2}\right) \hat{\sigma}_1^z \hat{\sigma}_2^z - \frac{B_z}{2} (\hat{\sigma}_1^z + \hat{\sigma}_2^z) \tag{9}$$

Matrix form of the \hat{H} were given in Equation (10) with a worthy reduced format since we only handled the isotropic ferromagnetic state where $J_\alpha = J$; herewith γ and τ are set to $\frac{D}{2r^3} - \frac{J}{2}$ and $-\frac{3D}{2r^3}$ respectively.

$$\hat{H} = \begin{bmatrix} \gamma - B_z & 0 & 0 & \tau \\ 0 & -\gamma & -\gamma - \frac{3J}{2} & 0 \\ 0 & -\gamma - \frac{3J}{2} & -\gamma & 0 \\ \tau & 0 & 0 & \gamma + B_z \end{bmatrix} \tag{10}$$

Eigenvalues and corresponding eigenstates of the Hamiltonian (Equation (10)) used to calculate the density matrix of the interested system, were given in Table 1, where $\eta^+ = (\epsilon^2 + 1)^{-1/2}$ and $\eta^- = (\delta^2 + 1)^{-1/2}$ are normalization constants, while $\epsilon = \frac{(B_z^2 + \tau^2)^{1/2} - B_z}{\tau}$ and $\delta = -\frac{(B_z^2 + \tau^2)^{1/2} + B_z}{\tau}$.

Table 1. Eigenvalues and corresponding eigenvectors of \hat{H}

| Eigenvalues | Eigenvectors |
|---|---|
| $E_1 = \gamma + (B_z^2 + \tau^2)^{1/2}$ | $ \psi_1\rangle = \eta^+ (\epsilon \uparrow\uparrow\rangle + \downarrow\downarrow\rangle)$ |
| $E_2 = \gamma - (B_z^2 + \tau^2)^{1/2}$ | $ \psi_2\rangle = \eta^- (\delta \uparrow\uparrow\rangle + \downarrow\downarrow\rangle)$ |
| $E_3 = \frac{3J}{2}$ | $ \psi_3\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (\uparrow\downarrow\rangle - \downarrow\uparrow\rangle)$ |
| $E_4 = -\frac{3J}{2} - 2\gamma$ | $ \psi_4\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (\uparrow\downarrow\rangle + \downarrow\uparrow\rangle)$ |

The density matrix of the system, $\tilde{\rho}$ can be constructed by $\tilde{\rho} = \frac{\sum_{i=1}^4 e^{-\beta E_i} |\psi_i\rangle\langle\psi_i|}{Z}$ where $Z = Tr[e^{-\beta\hat{H}}]$. For a pair of qubits, average of entanglement of density matrix $\tilde{\rho}$ is a monotonically increasing function of the concurrence C. When C = 1 we have maximally entangled states and when C = 0 we do not have entanglement.

Concurrence can be calculated by $C \equiv \max(0, \lambda_1 - \lambda_2 - \lambda_3 - \lambda_4)$, where λ_i is equal to the square roots of eigenvalues of $V_\rho = \tilde{\rho}(\sigma_1^y \otimes \sigma_2^y) \tilde{\rho}^*(\sigma_1^y \otimes \sigma_2^y)$. The asterisk denotes complex conjugate. If C = 1, the state is maximally entangled else if C = 0, it is disentangled, while concurrence values of (0, 1) interval indicates the strength of entanglement.

$$\tilde{\rho} = \begin{bmatrix} u & 0 & 0 & v \\ 0 & x & y & 0 \\ 0 & y & x & 0 \\ v & 0 & 0 & w \end{bmatrix} \tag{11}$$

$$u = \frac{1}{Z} \left(\frac{\epsilon^2}{\epsilon^2 + 1} e^{-\beta(\gamma + \epsilon\tau + B_z)} + \frac{\delta^2}{\delta^2 + 1} e^{-\beta(\gamma - \epsilon\tau - B_z)} \right) \\ v = \frac{1}{Z} \left(\frac{\epsilon}{\epsilon^2 + 1} e^{-\beta(\gamma + \epsilon\tau + B_z)} + \frac{\delta}{\delta^2 + 1} e^{-\beta(\gamma - \epsilon\tau - B_z)} \right) \\ w = \frac{1}{Z} \left(\frac{1}{\epsilon^2 + 1} e^{-\beta(\gamma + \epsilon\tau + B_z)} + \frac{1}{\delta^2 + 1} e^{-\beta(\gamma - \epsilon\tau - B_z)} \right) \tag{12} \\ x = \frac{1}{Z} e^{\beta\gamma} \cosh\left(3\beta\frac{J}{2} + \beta\gamma\right) \\ y = \frac{1}{Z} e^{\beta\gamma} \sinh\left(3\beta\frac{J}{2} + \beta\gamma\right)$$

Partition function, $Z = 2[e^{\gamma\beta} \cosh(1.5\beta J + \gamma\beta) + e^{-\gamma\beta} \cosh(\eta\tau + B_z)]$. Square roots of eigenvalues of V_ρ and concurrence were calculated numerically by setting $J = 1$. Note that $B_z, D,$ and T possess real numbers as $B_z \in (0, 5), D \in (0, 4), T \in (0, 2)$.

$$\tilde{V}_\rho = \begin{bmatrix} uw^* + vv^* & 0 & 0 & uv^* + vu^* \\ 0 & xx^* + yy^* & xy^* + yx^* & 0 \\ 0 & xy^* + yx^* & xx^* + yy^* & 0 \\ vv^* + ww^* & 0 & 0 & vv^* + ww^* \end{bmatrix} \tag{13}$$

The state is disentangled under zero-field (B=0) in the FM case [53]. When the applied field is strengthened the number of $|\uparrow\uparrow\rangle$ states increases with inhibiting the creation of entanglement. There is no magnetic and thermal entanglement achieved for a two-qubit state when $D = 0$. That's why we focused on the effect of dipolar interaction. We intriguingly encountered that concurrence vanished in the absence of external field by numerical calculation, even if dipolar interaction has been taken into account. Concurrence vanished for high temperatures which depend on strength of the applied field. Low field ($B_z=0.5$) yielded a creation/extinction behavior (non-monotonicity) particularly originated from distinct dipolar strengths at certain low temperatures such as $T=0.5$ (Figure 3). However, strong D eliminated the hashing influence of temperature (Figure 4(a) and Figure 4(b)). Entanglement can be controlled via both D and T tuning entangled/disentangled states especially under slightly applied fields.

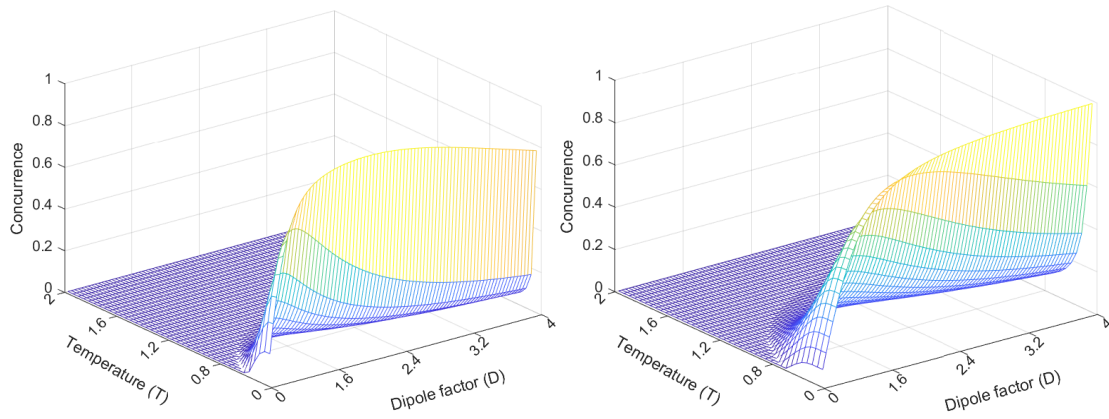


Figure 3. Concurrence as a function of temperature (T) and D for certain external magnetic fields (a) B=0.5 (b) B=1.

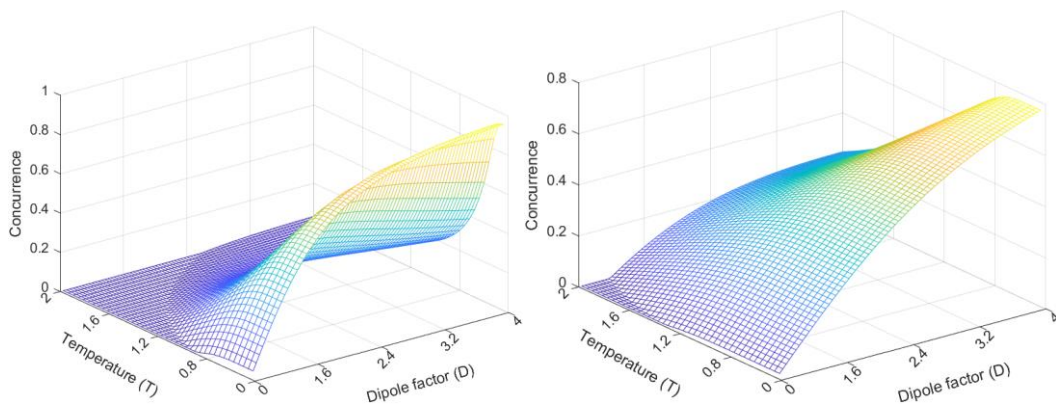


Figure 4. Concurrence as a function of temperature (T) and D for certain external magnetic fields (a) B=2 (b) B=5.

3.2. Localizable entanglement, upper and lower bounds: A Monte Carlo study

QMC simulations were performed to depict the bounds of LE for spin-1/2 particles spatially separated by identical distances. $2E+6$ of steps are used for thermalization while $2E+7$ sweeps were sufficient. We dealt with $L = 40$ spin ensuring the system can be approximated as an infinite chain. Findings of thermodynamic quantities (magnetization, energy) of XY and XYZ models are compared with existing results both analytical and numerical ones in the absence of dipole-dipole interaction.

Exchange coupling constants; J_x, J_y and J_z are set as $J_\alpha = 1$ ($\alpha = 0,1,2$) during the simulation process for the ferromagnetic isotropic model. We began by neglecting the dipole-dipole term ($D = 0$) to investigate the effect of both exchange and Zeeman interactions. Bounds of entangled pairs are determined in the absence of external magnetic field, under zero/low fields ($B_z = [0,0.5]$), relatively low/strong fields ($B_z = (0.5,2]$), and strong fields ($B_z = (2,5]$). Note that a strong external magnetic field enhancing the Zeeman term should dominate the rest by imposing the single spin to be aligned along its direction. It also affects the bound values since LE measurements have been predicated to two spin and single spin expectations. Moreover,

exchange and dipolar interactions spontaneously specify two-qubit states in parallel with correlations which are also calculated by mentioned expectation values. In this study, although exchange coupling constants have been set to unity, we assigned values to dipolar constant D and external field B_z to satisfy the relative dominancy of every interaction.

Results of firstlings indicate that LE_{ij}^{lb} has the lowest values under zero-field (Figure 5(a)); on the contrary, LE_{ij}^{ub} preserved unity for the entire temperature regime (Figure 5(b)). When the exchange interaction is only the commander of spins, the lower bound of entanglement between nearest neighbors (LE_{ij}^{lb}) has the lowest values for all temperatures (kT) as $kT \in (0,4]$. On the other hand, LE_{ij}^{ub} is maximized under zero-field. Moreover, it has not been affected via increasing temperature and remains almost unchanged. According to Figure 5, LE_{ij}^{lb} is increased by strengthening the applied field as Arnesen et al. have already reported [20]. $B_z = 0.5, B_z = 1$ and zero-field lower bound entanglement values started to overlap for $kT > 2$. However LE_{ij}^{ub} is lowered by the strong field herewith an increasing trend started at $T = 0.75$ prominently. Bounds of two nearest qubits are explicitly directed by B_z under certain temperatures in the absence of dipolar term.

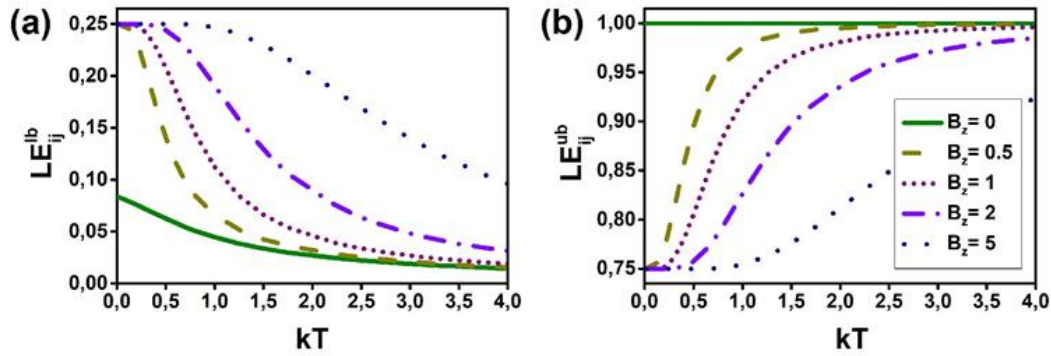


Figure 5. (a) LE_{ij}^{lb} and (b) LE_{ij}^{ub} as a function of temperature under $B_z = 0.5, B_z = 1, B_z = 2, B_z = 5$ and zero-field.

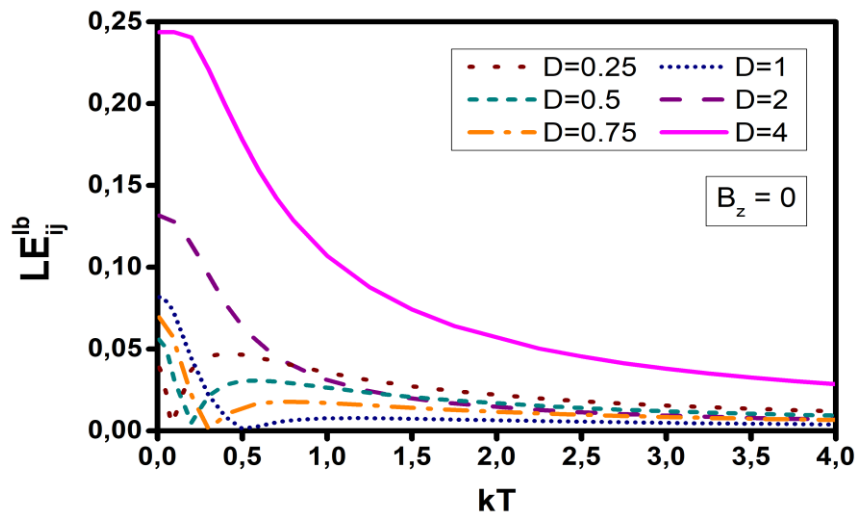


Figure 6. LE_{ij}^{lb} as a function of temperature for certain D strengths in the absence of an external field.

We now focused on the zero-field case for $N = 40$ spin-1/2 system incorporating the dipolar interaction strengthened by the times of dipole-dipole constant D . LE_{ij}^{ub} remains unchanged under thermal agitations since increasing temperature should not seduce the upper bound measured via two-spin and single spin expected values on the z basis (not shown here). Note that it is exactly not related to the observations of the x and y basis. As already stated, low-temperature values of the upper bound have an ascending trend under higher magnetic fields either for ferromagnetic or antiferromagnetic cases. On the other hand, Figure 6 shows that LE_{ij}^{lb} decreases monotonically via increasing temperature for every $D > 1$. However, we observed a non-linear change on values of LE_{ij}^{lb} by increasing kT when the strength of dipolar interaction diminishes for $D \leq 1$. Besides, the lower bound has distinct critical kT values which impose the spin pairs to become untangled for $D = 1$, herewith $D \in \{0.25, 0.5, 0.75, 1\}$ point to the singularities of the system. LE_{ij}^{lb} of $D = 1$ vanishes at $kT = 0.5$ and afterwards entanglement of two-qubit is created at $kT > 0.5$ having lowest values unchanged. Additionally, $D = 0.75$ points a similar condition at temperature $kT = 0.3$. Furthermore, LE_{ij}^{lb} , increases while D values are increasing monotonically at $kT \rightarrow 0$ and $B_z = 0$.

Figure 7 displays the conduct of LE_{ij}^{lb} (a) and LE_{ij}^{ub} (b) under $B_z = 0.5$ magnetic field. LE_{ij}^{lb} shows a decreasing behavior via increasing temperature kT for whole D strengths except $D = 4$. LE_{ij}^{lb} is lowered whereby increasing D values up to $D = 2$. In contrast, $D = 4$, strong dipolar interaction implicitly pulls up the lower bound above $D = 0.25$ curve. That is to say dipolar term dominates the system below high temperatures since reasonable high temperatures assure lower bound values to overlap. $LE_{ij}^{lb} = 0.16(D = 1)$, $LE_{ij}^{lb} = 0.07(D = 2)$ and others have nearly the same value as 0.25, shortly, resulting in distinct lower bound values at kT that stands very close to $kT \rightarrow 0$. Upper bound, LE_{ij}^{ub} reaches unity for all D strengths at $kT > 2$. Upper bound converges to unity for $D = 2$ and $D = 4$ at all temperatures. A linear relation exists for all D values, adversely to the lower bound, under $B_z = 0.5$. Therefore LE_{ij}^{ub} of $D = 4$ is not significantly influenced by thermal agitations conserving almost unity. LE_{ij}^{lb} vanishes at $kT = 1.7$ and converges to zero for $D = 2$ under external magnetic field $B_z = 1$.

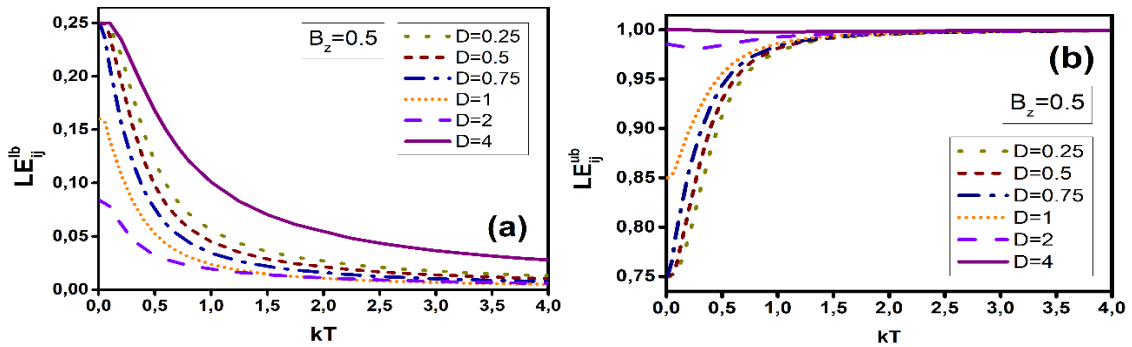


Figure 7. (a) LE_{ij}^{lb} and (b) LE_{ij}^{ub} as a function of temperature for certain D strengths under $B_z = 0.5$.

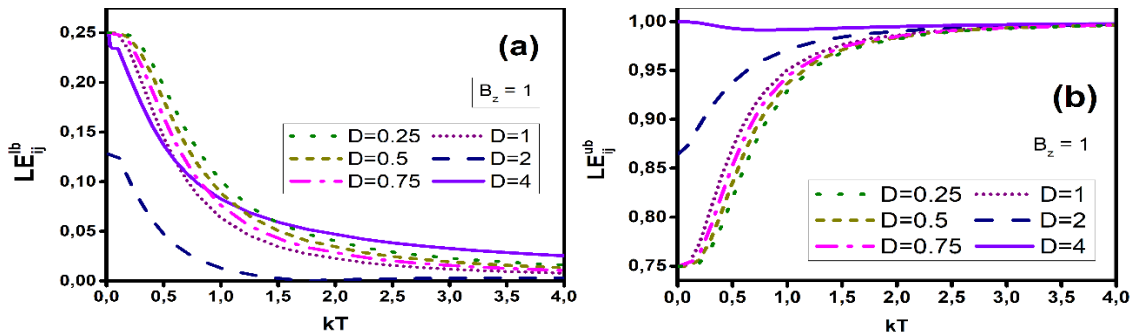


Figure 8. (a) LE_{ij}^{lb} and (b) LE_{ij}^{ub} as a function of temperature for certain D strengths under $B_z = 1$.

Besides, entanglement never disappears for the rest strengths of D's although LE_{ij}^{lb} shows a decrement trend through increasing temperature kT under magnetic field $B_z = 1$. In the same manner, LE_{ij}^{lb} decrease via increasing dipolar strength between $D \in \{0.25, 0.5, 0.75, 1, 2\}$. The behavior of LE under $B_z = 0.5$ (see Figure 7) and $B_z = 1$ (see Figure 8) are very similar but $D = 4$ values are getting lowered for latter case. At low temperatures LE_{ij}^{lb} takes value between $D = 2$ and $D = 1$ but they intersect with $D = 0.25, 0.5, 0.75$ and $D = 1$ values one by one at different temperatures having higher values rather than the others at temperatures as $kT > 1.75$. According to Figure 8(b), LE_{ij}^{ub} exhibits the similar behavior as if $B_z = 0.5$ applied. In other words, it directly increases via increasing dipolar strength under $B_z = 1$.

Thus far, the non-linear behavior of strong dipolar interaction $D = 4$ exists under relatively low magnetic fields ($B_z < 2$). We calculated values of lower and upper bounds under higher magnetic fields $B_z > 1$ to figure out if this behavior is dependent on the external magnetic field or not. Figure 8(a) and Figure 9 (a) displays LE_{ij}^{lb} values obtained under $B_z = 1$ and $B_z = 2$ external fields, respectively. A critical point as $kT = 0.5$ which entanglement vanishes even though neighboring spins entangle again for $kT > 0.5$ is indicated under $B_z = 2$. Moreover, LE_{ij}^{lb} values decrease via increasing dipolar constant D under magnetic field $B_z = 2$ but only immediately after a sharp drop entanglement vanished and entangled pairs emerge for $kT > 0.5$. LE_{ij}^{ub} shows similar behavior as stated for lower magnetic fields. The only difference is

strong dipolar interaction, briefly, $D = 4$, lead upper bound to lost unity. LE_{ij}^{lb} decrease by increasing temperature under $B_z = 2$. However, they diverge to zero at higher kT temperatures (increasing kT). Strong applied field inhibited to vanish entanglement at higher kT values.

$B_z = 5$ strictly regulated the upper and lower bounds, especially LE_{ij}^{lb} , inducing a monotonic behavior according to D strengths (see Figure 10). LE_{ij}^{lb} shows a descending behavior via increasing D values with non-vanishing character whereas non-unity values of LE_{ij}^{ub} increases by ascending D values. However, the bounds preserve temperature-related behavior as is under $B_z = 0.5, 1, 2$ although $D = 4$ violates it indicating a critical point at $kT = 0.5$. Zeeman term dominates the exchange interaction so classical correlations which have been calculated by two-spin and single spin expected values become directly dependent on the single spin measurement.

However, dipolar term loose efficiency is directly related to the distance of two spins in the lattice. In this manner, it will be dominated as exchange interaction even if distance-induced fluctuations exist. These fluctuations affect the system at certain temperatures for relatively weak fields ensuring critical points. Figure 11 summarizes the B-T relation of the lower limit between nearest neighboring spins for D values from $D = 1$ to $D = 4$ ($D < 1$ plot not shown in the text). According to Figure 11(c) ($D = 4$), there is non-monotonic LE_{ij}^{lb} values pointing "revival regions" at low temperatures under low magnetic fields.

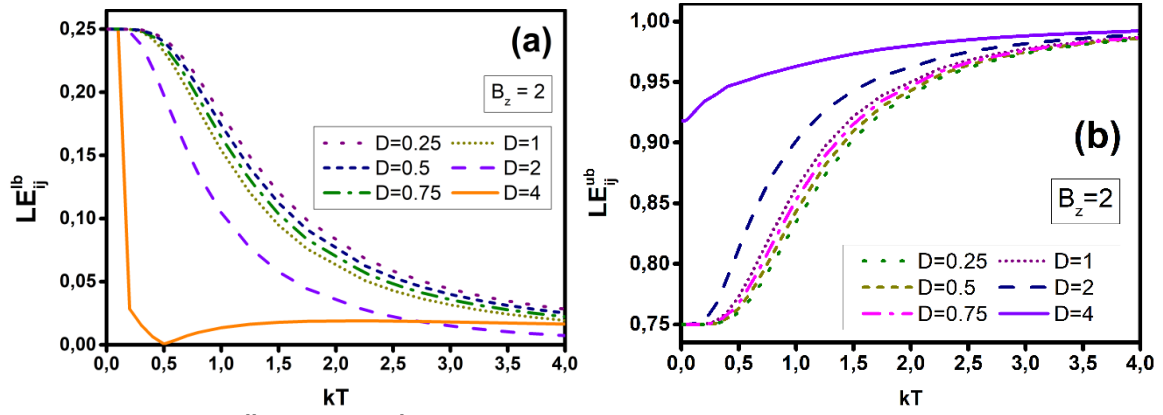


Figure 9. (a) LE_{ij}^{lb} and (b) LE_{ij}^{ub} as a function of temperature for certain D strengths under $B_z = 2$.

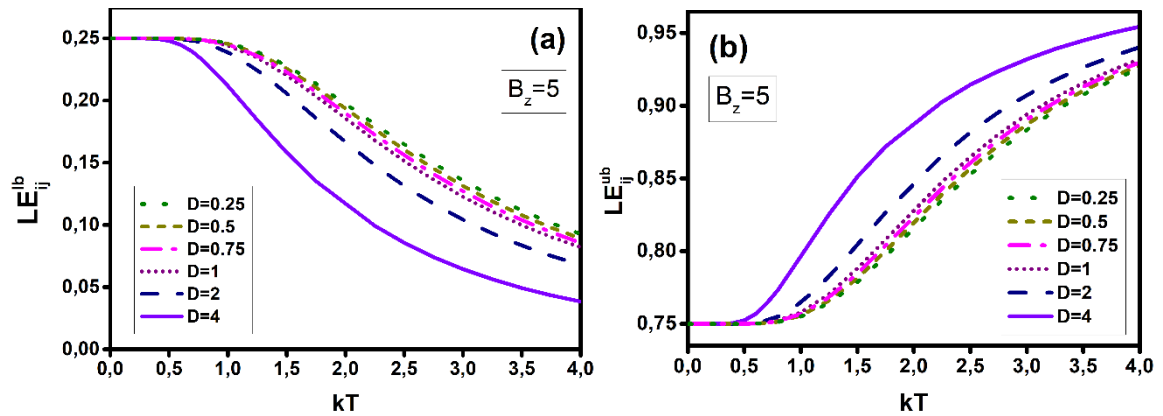


Figure 10. (a) LE_{ij}^{lb} and (b) LE_{ij}^{ub} as a function of temperature for certain D strengths under $B_z = 5$.

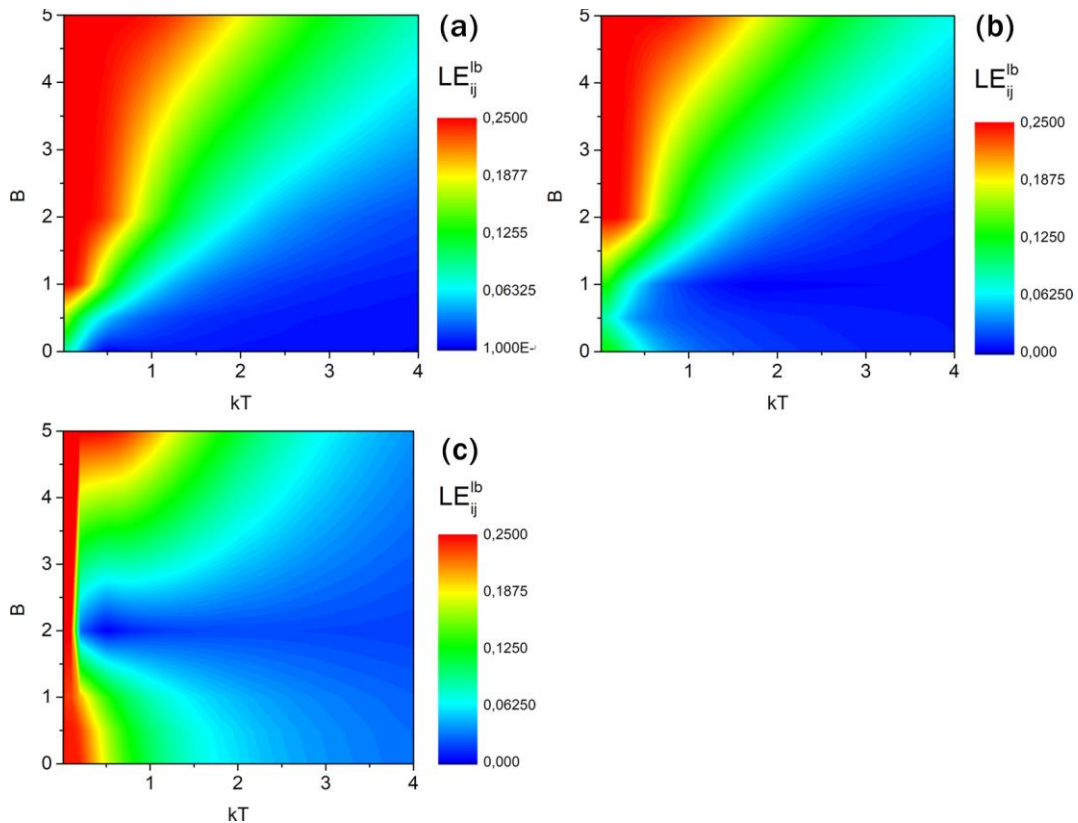


Figure 11. LE_{ij}^{lb} between two spin as a function of temperature and magnetic field B_z for (a) $D = 1$ (b) $D = 2$ (c) $D = 4$.

Lower limits are calculated up to the 20th nearest neighbors to investigate the distance-dependent behavior of LE_{ij}^{lb} at certain temperatures in which dipolar interaction is included or not. Figure 12(a) displays the zero-field ($B_z = 0$) $LE_{ij}^{lb}(n)$ values corresponding to the latter circumstance ($D = 0$). n denotes the n th nearest neighboring spin where $j = i + n$ and $n = 20$. At very low-temperature regime as $kT = 0.05$, $LE_{ij}^{lb}(n)$ never vanishes for any neighboring spins in the absence of dipolar interaction and external magnetic field herewith having the lowest values (Figure 12(a)). $LE_{ij}^{lb}(n)$ showed a similar behavior in case of $D = 4$ counter to $D = 1$ and $D = 2$. Furthermore, increasing temperature tell us $LE_{ij}^{lb}(n)$ vanishes as well as dipolar interaction has been included. According to Figure 12 (d), $LE_{ij}^{lb}(n)$ remained unchanged with possessing similar values.

The dipolar interaction controls both the range and value of the lower bound namely $LE_{ij}^{lb}(n)$ between two spins of the ferromagnetic isotropic chain. Increasing temperature also influences the range of entanglement via agitating the spins thermally since they start to get over the domination of interactions included in the Hamiltonian of the spin-chain. One can deduce that the tightest quantum correlation between the spins would be induced by exchange and dipolar interactions in the absence of an external field. $LE_{ij}^{lb}(n)$ disappears farther in from the second nearest neighboring spin for the dipolar strengths $D = 1$ (Figure 12 (b)) and the third nearest neighboring spin $D = 2$ (Figure 12 (c)) at temperatures $kT \geq 0.5$.

Qi et al. obtained an analytical lower bound of concurrence by multi-qubit monogamy inequality for four-qubit quantum systems [54]. After a while, lower bounds were improved to achieve a more sensitive entanglement measure for $2 \times 2 \times 2^2$ mixed systems by [55]. A monogamous relation for upper bound was discussed including tripartite entanglement of the three-qubit system and multipartite concurrence earlier in the last decade [56]. The existence of long-ranged distant entangled qubits under zero magnetic field has great importance on the quantum information process. Nevertheless, the creation and extinction of entanglement at certain values of either kT and B_z depict critical points of the quantum system. We particularly analyzed distant dependent behavior of the lower bound only at $kT = 0.5$ (see Figure 13 (a)) and $kT = 0.05$ (see Figure 13 (b)) for $D = 0$, $D = 1$, $D = 2$ and $D = 4$ under zero field. At first sight, we must stress the loss of unity at higher temperature $kT = 0.5$ even though long-ranged entanglement has been conserved.

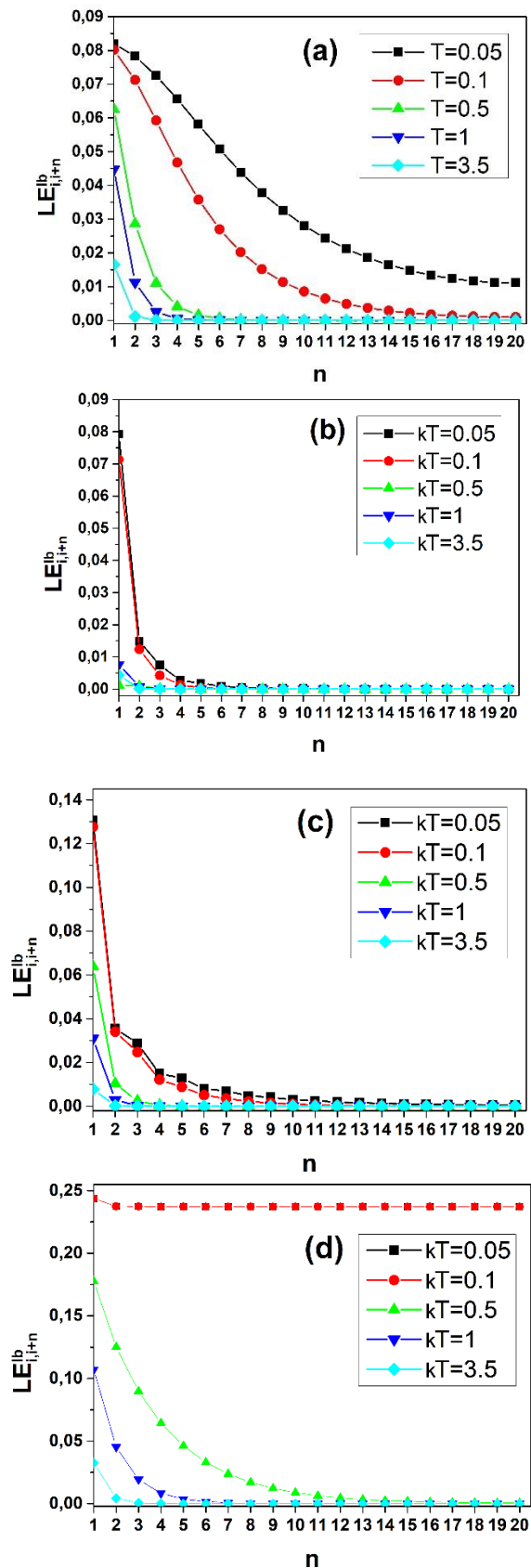


Figure 12. LE_{ij}^{lb} at temperatures $kT = 0.05$, $kT = 0.1$, $kT = 0.5$, $kT = 1$ and $kT = 3.5$ under zero field (a) $D = 0$ (b) $D = 1$ (c) $D = 2$ (d) $D = 4$.

It is a critical point in this study where the non-monotonic behavior of entanglement exists in the case of the special conditions mentioned above. According to Figure 13 (a), $LE_{ij}^{lb}(n)$ of nearest neighbouring qubits has a higher value for $D = 2$ and $D = 4$ than $D = 0$ though $D = 2$ stands very close to $D = 0$ at $kT = 0.5$. Both cases reveal that strengthening dipolar interaction provides highly entangled long-ranged pairs and also thermal agitations reduce the distance which qubits should communicate.

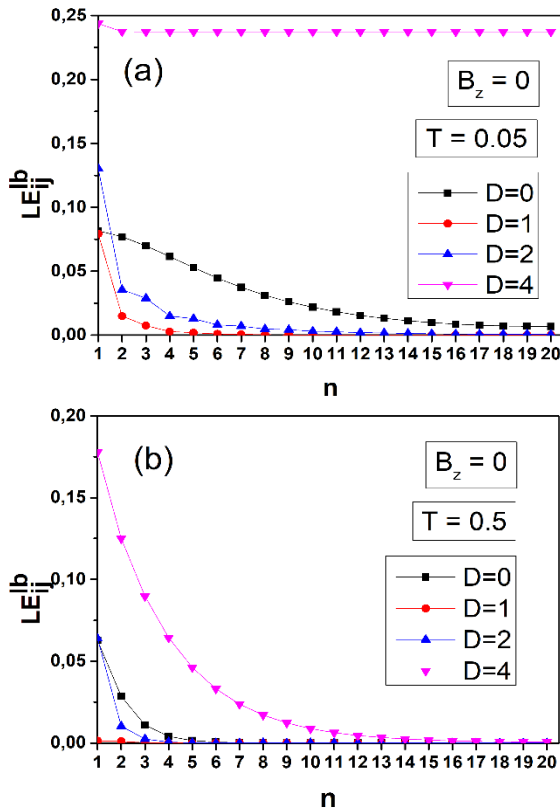


Figure 13. (a) LE_{ij}^{lb} (b) LE_{ij}^{ub} as a function of temperature for certain D strengths under zero field.

In addition, Figure 14 revealed the rival regions for distant odd sites for $n > 1$ under $B_z = 1$ at a low-temperature regime. We did not observe a clear non-monotonic behavior extinction-creation of entangled paired of distanced sites $n > 1$ pointing rival regions at certain temperatures. At very low temperatures as $kT \rightarrow 0$, LE_{ij}^{lb} a long-ranged maximized entanglement exists for $D = 4$ which was also stated. It was previously verified that a strong dipolar interaction (D) enhances long-ranged entanglement explicitly under zero-field unless high temperatures drastically reduced the amount of entanglement and range of communication in an AFM order. In contrast, localizable entanglement showed a non-linear dependency to D as detailed above. This text tried to clarify the effect of magnetic dipolar interaction in a spin system since direct dipole-dipole coupling not only provides valuable structural information but also takes a noteworthy place in modeling the magnetic resonance imaging process.

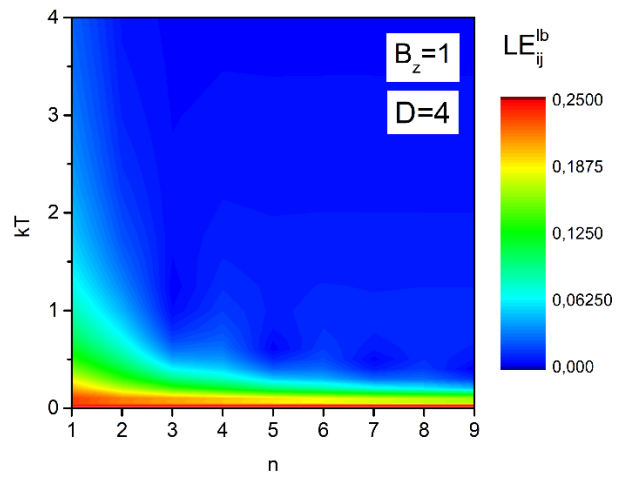


Figure 14. LE_{ij}^{lb} as a function of the distance between sites n and temperature for $D=4$ under $B_z = 1$.

IV. CONCLUSION

The concurrence of a spin-1/2 chain, ordered as FM, was analytically obtained to study thermal entanglement between two qubits. Low field ($B = 0.5$) yielded an extinction/creation behavior (non-monotonicity) that particularly originated from distinct dipolar strengths at certain low temperatures. We revealed upper and lower bounds to measure entanglement between any two parts of the multipartite system. According to QMC simulations, we found that the lower bound shows an increasing trend monotonically by strengthening the applied field when dipole-dipole interaction is neglected. Dipolar interaction affected the spin-1/2 chain, relative to the strength of D, both for nearest neighbor and distant qubits inducing a non-monotonic attitude. A rival region is observed for $D = 4$ under $B = 2$ magnetic field at $kT = 0.5$ in addition to $D = 0.25$, $D = 0.5$, $D = 0.75$ and $D = 1$ (at $kT = (0.5)$) in the absence of an external magnetic field. Moreover, strong dipolar interaction generated rival regions for distant odd sites for $n > 1$ under magnetic field $B = 1$ at low temperatures. In case of $B_z = 5$, lower bound which is the actual reflection of entanglement, decreased by increasing temperature since high magnetic field dominates spin orientation along field direction regarding to the considered temperature range. Besides, dominant external field led the entanglement lowered by increasing dipolar strength (D). Long-range entanglement that should be arranged in eligible solid systems ensures a non-fragile quantum correlation as a prominent tool for the quantum information process.

ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by Scientific Research Projects Commission of Marmara University (FEN-C-DRP-120613-0273). Simulations were performed in the Simulation and Modeling Research Laboratory (Simulab) at the Department of Physics, Marmara University.

REFERENCES

- [1] Modławska, J., & Grudka, A., (2008). Nonmaximally Entangled States Can Be Better for Multiple Linear Optical Teleportation. *Physical Review Letters*, 100, 110503.
- [2] Cavalcanti, D., Skrzypczyk, P., & Šupić, I., (2017). All Entangled States can Demonstrate Nonclassical Teleportation. *Physical Review Letters*, 119, 110501.
- [3] Z.A.Sabegh, R., & Mahmoudi, M., (2018). Spatially dependent atom-photon entanglement. *Scientific Reports*, 8, 13840.
- [4] Loss, D., & DiVincenzo, D., (1998). Quantum computation with quantum dots. *Physical Review A*, 57, 120.
- [5] Jürgen Audretsch (2007), The Quantum Computer. In *Entangled Systems: New Directions in Quantum Physics (pp.219-245)*, Weinheim, Germany: John Wiley and Sons, Ltd.
- [6] Belsley, M. (2014). Introduction to Quantum Information Science, by Vlatko Vedral. *Contemporary Physics*, 55, 124.
- [7] DiVincenzo, D. (1997). Quantum computation and spin physics (invited). *Journal of Applied Physics*, 81, 4602-4607.
- [8] Zheng, S., & Guo, G., (2000). Efficient Scheme for Two-Atom Entanglement and Quantum Information Processing in Cavity QED. *Physical Review Letters*, 85, 2392-2395.
- [9] Bennett, C., & DiVincenzo, D., (2000). Quantum information and computation. *Nature*, 404, 1476-4687.
- [10] Eggert, S., Affleck, I., & Takahashi, M., (1994). Susceptibility of the spin 1/2 Heisenberg antiferromagnetic chain. *Physical Review Letters*, 73, 332-335.
- [11] Hammar, P., Stone, M., Reich, D., Broholm, C., Gibson, P., Turnbull, M., Landee, C., & Oshikawa, M., (1999). Characterization of a quasi-one-dimensional spin-1/2 magnet which is gapless and paramagnetic for $g \mu_B H \lesssim J$ and $k_B T \ll J$. *Physical Review B*, 59, 1008-1015.
- [12] Androvitsaneas, P., Fytas, N., Paspalakis, E., & Terzis, A.F., (2012). Quantum Monte Carlo simulations revisited: The case of anisotropic Heisenberg chains. *Philosophical Magazine*, 92, 4649-4656.
- [13] Barma, M., & Shastry, B., (1978). Classical equivalents of one-dimensional quantum-mechanical systems. *Physical Review B*, 18, 3351-3359.
- [14] Handscomb, D. (1964). A Monte Carlo method applied to the Heisenberg ferromagnet. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 60, 115-122.
- [15] Harada, K., & Kawashima, N., (2001). Loop Algorithm for Heisenberg Models with Biquadratic Interaction and Phase Transitions in Two Dimensions. *Journal of the Physical Society of Japan*, 70, 13-16.
- [16] Huang, Y., & Su, G., (2017). Quantum Monte Carlo study of the spin-1/2 honeycomb Heisenberg model with mixed antiferromagnetic and ferromagnetic interactions in external magnetic fields. *Physical Review E*, 95, 052147.
- [17] Sandvik, A., & Kurkijärvi, J., (1991). Quantum Monte Carlo simulation method for spin systems. *Physical Review B*, 43, 5950-5961.
- [18] Deger, C., Aksu, P., & Yildiz, F., (2016). Effect of Interdot Distance on Magnetic Behavior of 2-D Ni Dot Arrays. *IEEE Transactions on Magnetics*, 52, 1-4.
- [19] Duru, I., Değer, C., Kalaycı, T., & Arucu, M., (2015). A computational study on magnetic effects of $Zn_{1-x}Cr_xO$ type diluted magnetic semiconductor. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 396 pp. 268-274.
- [20] Arnesen, M., Bose, S., & Vedral, V., (2001). Natural Thermal and Magnetic Entanglement in the 1D Heisenberg Model. *Physical Review Letters*, 87, 017901.
- [21] Marchukov, O.V., & Zinner, N., (2016). Quantum spin transistor with a Heisenberg spin chain. *Nature Communications*, 7, 13070.
- [22] Renes, J., Miyake, A., Brennen, G., & Bartlett, S., (2013). Holonomic quantum computing in symmetry-protected ground states of spin chains. *New Journal of Physics*, 15, 025020.
- [23] Apollaro, T., Lorenzo, S., Sindona, A., Paganelli, S., Giorgi, G., & Plastina, F., (2015). Many-qubit quantum state transfer via spin chains. *Physica Scripta*, T165 pp. 014036.
- [24] Wang, X., (2002). Threshold temperature for pairwise and many-particle thermal entanglement in the isotropic Heisenberg model. *Physical Review A*, 66, 044305.
- [25] Wang, X., (2001). Entanglement in the quantum Heisenberg XY model. *Physical Review A*, 64, 012313.
- [26] Rigolin, G., (2004). Thermal entanglement in the two-qubit Heisenberg XYZ model. *International Journal of Quantum Information*, 2, 393-405.
- [27] Androvitsaneas, P., Paspalakis, E., & Terzis, A., (2012). A quantum Monte Carlo study of the localizable entanglement in anisotropic ferromagnetic Heisenberg chains. *Annals of Physics*, 327, 212-223.
- [28] Sinyagin, A., Belov, A., Tang, Z., & Kotov, N., (2006). Monte Carlo Computer Simulation of Chain Formation from Nanoparticles. *Journal of Physical Chemistry B*, 110, 7500-7507.
- [29] Kim, I., (2013). Long-Range Entanglement is Necessary for a Topological Storage of Quantum Information. *Physical Review Letters*, 111, 080503.
- [30] Elman, S., Bartlett, S., & Doherty, A., (2017). Long-range entanglement for spin qubits via quantum Hall edge modes. *Physical Review B*, 96, 115407.

- [31] Bitko, D., Rosenbaum, T., & Aeppli, G., (1996). Quantum Critical Behavior for a Model Magnet. *Physical Review Letters*, 77, 940-943.
- [32] Chakraborty, P., Henelius, P., Kjønsgberg, H., Sandvik, A., & Girvin, S., (2004). Theory of the magnetic phase diagram of LiHoF₄. *Physical Review B*, 70, 144411.
- [33] Bramwell, S., & Gingras, M., (2001). Spin Ice State in Frustrated Magnetic Pyrochlore Materials. *Science*, 294, 1495-1501.
- [34] Castelnovo, C. R., & Sondhi, S., (2008). Magnetic Monopoles in Spin Ice. *Nature*, 451, 42-45.
- [35] Mengotti, E., Heyderman, L., Bisig, A., Fraile Rodríguez, A., Le Guyader, L., Nolting, F., & Braun, H., (2009). Dipolar energy states in clusters of perpendicular magnetic nanoislands. *Journal of Applied Physics*, 105, 113113.
- [36] Lahaye, T., Menotti, C., Santos, L., Lewenstein, M., & Pfau, T., (2009). The physics of dipolar bosonic quantum gases. *Reports on Progress in Physics*, 72, 126401.
- [37] Peter, D., Müller, S., Wessel, S., & Büchler, H., (2012). Anomalous Behavior of Spin Systems with Dipolar Interactions. *Physical Review Letters*, 109, 025303.
- [38] Islam, R., Senko, C., Campbell, W., Korenblit, S., Smith, J., Lee, A., Edwards, E., Wang, C., Freericks, J., & Monroe, C., (2013). Emergence and Frustration of Magnetism with Variable-Range Interactions in a Quantum Simulator. *Science*, 340, 583-587.
- [39] Jurcevic, P., & Roos, C., (2014). Quasiparticle engineering and entanglement propagation in a quantum many-body system. *Nature*, 511, 202-205.
- [40] Richerme, P., & Monroe, C., (2014). Non-local propagation of correlations in quantum systems with long-range interactions. *Nature*, 511 pp. 198-201.
- [41] Mahmoudian S., Rademaker L., Ralko A., Fratini S., & Dobrosavljevic V., (2015). Glassy Dynamics in Geometrically Frustrated Coulomb Liquids without Disorder. *Physical Review Letters*, 115, 025701.
- [42] Bohnet, J., Sawyer, B., Britton, J., Wall, M., Rey, A., Foss-Feig, M., & Bollinger, J., (2016). Quantum spin dynamics and entanglement generation with hundreds of trapped ions. *Science*, 352, 1297-1301.
- [43] Sahling, S., & Lorenzo, E., (2015). Experimental realization of long-distance entanglement between spins in antiferromagnetic quantum spin chains. *Nature Physics*, 15, 255-260.
- [44] Osborne, T., & Nielsen, M., (2002). Entanglement in a simple quantum phase transition. *Physical Review A*, 66, 032110.
- [45] Vidal, G., Latorre, J., Rico, E., & Kitaev, A., (2003). Entanglement in Quantum Critical Phenomena. *Physical Review Letters*, 90, 227902.
- [46] Bravo, B., Cabra, D., Gomez Albarracin, F., & Rossini, G., (2017). Long-range interactions in antiferromagnetic quantum spin chains. *Physical Review B*, 96, 054441.
- [47] Duru, I.P., & Aktas, S., (2019). Localizable entanglement of isotropic antiferromagnetic spin-1/2 chain. *Turkish Journal of Physics*, 43 pp. 272 - 279.
- [48] Bauer, B., Carr, L., Evertz, H., Feiguin, A., Freire, J., Fuchs, S., Gamper, L., Gukelberger, J., Gull, E., Guertler, S., Hehn, A., Igarashi, R., Isakov, S., Koop, D., Ma, P., Mates, P., Matsuo, H., Parcollet, O., Pawłowski, G., Picon, J., Pollet, L., Santos, E., Scarola, V., Schollwöck, U., Silva, C., Surer, B., Todo, S., Trebst, S., Troyer, M., Wall, M., Werner, P., & Wessel, S., (2011). The ALPS project release 2.0: open source software for strongly correlated systems. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2011, P05001.
- [49] DiVincenzo & Uhlmann, A., (1999). Entanglement of Assistance. *Quantum Computing and Quantum Communications*, pp. 247-257.
- [50] Laustsen, T., Verstraete, F., & Van Enk, S., (2003). Local vs. Joint Measurements for the Entanglement of Assistance. *Quantum Information and Computation*, 3, 64-83.
- [51] Popp, M., Verstraete, F., Martin-Delgado, M., & Cirac, J., (2005). Localizable entanglement. *Physical Review A*, 71, 042306.
- [52] Todo, S., & Kato, K., (2001). Cluster Algorithms for General S Quantum Spin Systems. *Physical Review Letters*, 87, 047203.
- [53] Vedral, V., & Plenio, M., (1998). Entanglement measures and purification procedures. *Physical Review A*, 57, 1619-1633.
- [54] Qi, X., Gao, T., & Yan, F., (2017). Lower bounds of concurrence for N-qubit systems and the detection of k-nonseparability of multipartite quantum systems. *Quantum Information Process*, 16, 23.
- [55] Xue-Na Zhu, M., & Fei, S., (2018). A lower bound of concurrence for multipartite quantum systems. *Quantum Information Processing*, 17, 30.
- [56] Cornelio, M., (2013). Multipartite monogamy of the concurrence. *Physical Review A*, 87, 032330.

Yapıların Yüksek Doğruluklu Modal Analizi İçin Otomatik Darbe Tahrik Sistemi

Automated Impact Excitation System for High Accuracy Modal Analysis of Structures

Bekir BEDİZ¹ 

¹ Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Sabancı Üniversitesi, 34956, İstanbul, Türkiye

Öz

Titreşim testi yapıların dinamik davranışlarının bulunmasında veya oluşturulan modellerin doğrulanmasında kullanılan bir yöntemdir. Literatürde kullanım kolaylığı ve hızlı uygulanabilirliğinden dolayı en yaygın olarak darbe testinden yararlanılmaktadır. Bu testte yapıya ucunda bir kuvvet algılayıcısı olan bir darbe çekici ile kuvvet iletimi yapılmaktadır. Sistem dinamiklerinin doğru olarak elde edilmesi için darbenin kalitesi ve yinelenebilirliği büyük bir önem taşımaktadır. Bu çalışmada, yapıların/parçaların titreşim testlerinde kullanılmak üzere yeni otomatik bir darbe tahrik sistemi geliştirilmiştir. Bu kapsamda, özel yapım bir esnek darbe mekanizmasına bir kuvvet algılayıcısı bağlanarak kuvvet ölçümlerinin yapılması sağlanmıştır. Sistem otomasyonunun sağlanması amacıyla esnek darbe mekanizmasını belirli bir başlangıç konumuna getirecek elektromagnetik tabanlı bir sistem entegrasyonu gerçekleştirilmiştir. Uygun darbe için gerekli kontrol parametrelerinin elde edilebilmesi için tasarlanan mekanizma modellenmiş ve ayrıca her darbe sonucu test yapısının dinamiklerinin de hesaba katılabileceği bir simülasyon alt yapısı hazırlanmıştır. Çalışma kapsamında üretilen darbe tahrik sisteminin ve otomasyon yazılımının performansları yapılan testler ile sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: titreşim testi, darbe testi, otonom darbe çekici, yüksek kalite dinamik karakterizasyon.

Abstract

Vibration testing is a method used to find the dynamic behavior of parts and systems used in many engineering fields and applications or to validate the derived analytical/numerical models. One of the most widely used vibration testing methods is impact testing due to the ease of application. In this test, the force is transmitted to the structure with an impact hammer. Therefore, to accurately determine the dynamics of the system, the quality and repeatability of the impact applied is of great importance. The aim of this study is to develop a new automatic impact drive system for vibration tests of structures/parts. In this context, a force sensor is connected to a special flexible impact mechanism. To provide system automation, an electromagnet-based system integration was carried out to bring the flexible impact mechanism to a certain starting position. A simulation framework is constructed to obtain the necessary control parameters for the appropriate impact. The performance of the impact drive system and automation software produced within the scope of the study were presented with case studies.

Keywords: vibration test, impact testing, automated impact hammer, high-quality dynamic characterization.

I. GİRİŞ

Birçok mühendislik alanında ve uygulamasında (havacılık ve uzay, enerji depolama ve dönüştürme, medikal, vb.) kullanılan yapıların dinamik davranışlarının bilinmesi ve modellenmesi, fonksiyonel özellikleri ve performansları açısından oldukça büyük bir önem arz eder. Yapıların karmaşıklığından ve genellikle sönümleme için kullanılan fiziksel modellerin yetersizliğinden ya da doğruluktan uzak olmasından dolayı, analitik veya numerik yöntemler ile bu yapıların hepsinin modellenmesi mümkün değildir. Modellenen yapılar için dahi elde edilmiş modellerin doğruluğunun deneyler ile ispat edilmesi gerekmektedir. Bu sebeple, yapıların dinamik özelliklerinin (doğal frekans, sönümleme katsayısı, vb.) titreşim testi ile bulunması gerekmektedir.

Titreşim testi basit olarak bir yapının bilinen (veya ölçülebilen) bir kuvvetle tahrik edilmesi ve bu tahrik sonucu yapıdaki tepkinin ölçülmesi işlemini kapsar. Daha sonra, tahrik ve tepki sinyallerinin frekans alanında işlenmesi ile yapının dinamik özelliklerinin bulunabileceği frekans tepki fonksiyonları (FTF) elde edilir. Literatürde yapıların titreşim testleri ile ilgili oldukça fazla çalışma yapılmış ve yeni teknolojiler üretilmiştir. Literatürde test yapısının tahrik edilmesi amacıyla darbe çekici ve sallayıcı yöntemleri en çok kullanılan metotlardır. Yapının sallayıcı ile tahrik edilmesi için sallayıcının test parçasına bağlanması ve böylece istenen bir tahrik sinyalinin

sisteme iletiminin sağlanması gerekmektedir. Test yapısı ve sallayıcı bağlantı noktasındaki bir kuvvet algılayıcısı vasıtasıyla da iletilen kuvvetin ölçülmesi sağlanmaktadır [1]. Test aşamasında sistem farklı frekanslarda sallanarak tepkisi ölçüldüğünden, sistemin istenen bir frekans aralığındaki dinamik davranışının çıkarılması oldukça zaman alıcıdır. Ayrıca, sistem (i) çok büyük olduğunda istenen kuvvetlerin yapıya iletimin fiziksel olarak zor olması veya (ii) çok küçük olduğunda (minyatür ve/veya esnek sistemlerde) sallayıcı test edilen yapıya bağlandığından dolayı yapının dinamiklerinin değişmesine yol açtığından bu tahrik sisteminin kullanım alanları oldukça sınırlıdır [2]. Diğer tahrik yöntemi olan darbe çekiçleri 1960'ların ortalarında alternatif bir tahrik yöntemi olarak ortaya çıkmıştır [3]. Süreksiz bir yöntem olduğundan sistem dinamiklerinin oldukça hızlı bir şekilde elde edilmesine olanak sağlar. Bu yöntemde, sisteme uygulanan çok kısa süreli (milisaniye mertebelerini geçmeyen) bir darbe ile sisteme yüksek bir enerji verilerek belli bir bant genişliği içerisindeki tüm biçim şekillerinin uyarılması hedeflenir [3], [4]. Fakat manuel olarak uygulanmasından dolayı birçok zorlukları bulunmaktadır. Öncelikle yüksek hassasiyetli FTF elde etmek için ölçümlerin yinelenebilir bir şekilde yapılması gerekmektedir; fakat darbe çekiçleri manuel olarak uygulandığından bunun sağlanması hemen hemen imkânsızdır. Her ne kadar büyük yapılar için bu hassasiyet az da olsa, test yapısı küçüldükçe yinelenebilir bir şekilde ölçüm yapılması oldukça zordur. Ayrıca test yapısı küçüldükçe fiziksel boyutlarının küçük olmasından kaynaklı yüksek bant genişliklerinde dinamik davranışlar sergilenebilmektedir. Örneğin, mikro üretim sistemlerinde kullanılan minyatür ultra-yüksek-hızlı iş millerinin dinamiklerinin doğru olarak modellenmesi için titreşim testlerinde tahrik sisteminin bant genişliği 25 kHz mertebelerine kadar ulaşmalıdır [5]. Aynı zamanda hassas yapılarda test yapısının zarar görmemesi için tahrik kuvvetinin yapıya zarar vermeyecek bir düzeyde tutulmasını gerektirir; fakat manuel bir uygulamayla bu gereksinimlerin sağlanması mümkün değildir.

Literatürde, yukarıda bahsedilen zorlukların üzerinden gelmek için birtakım çalışmalar yapılmıştır. Yinelenebilir bir şekilde yapının tahrik edilmesi amacıyla değişik mekanizmalar/tasarımlar kullanılabilir. Yapılan ilk çalışmalardan birisi Jacobs ve Bissinger [6] tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmadaki asıl amaç sadece tahrik noktası açısından yinelenebilir darbeler elde edilmesiyle sınırlı kalmıştır ve sadece manuel bir uygulamaya oranla üstünlüğü niteliksel olarak gösterilmiştir. Bu alanda en yaygın olarak kullanılan sistemler sarkaç benzeri

mekanizmalardır [7], [8]. Bu yöntemde her ne kadar darbe/vuruş kuvveti basit modelleme teknikleri (tek serbestlik dereceli modeller) ile tahmin edilebilse de, hem düşük darbe kuvveti ile vuruşların yapılabilmesi hem de vuruş açısının ayarlanması oldukça zordur. Diğer bir yaygın yöntem de darbe çekiçlerinin bir motora bağlanmasıdır. Champoux vd. yaptıkları bir çalışmada bu yöntemi iki minyatür darbe çekicini iki farklı motora bağlayarak sisteme moment tahriki vermekte kullanmışlardır [7]. Fakat düzgün bir darbe profili için (tek vuruştan oluşan) oldukça karmaşık kontrol algoritmalarının kullanılması gerekmektedir. Yapılan testler sonucunda da ancak 1 kHz genliğinde vuruşlar elde edilebilmiştir. Literatürde kullanılan bir diğer yöntem de sarmal bobin (veya ses bobini) kullanarak aynı noktaya yinelenebilir darbeler iletmektir. Bu sistemlerde basitçe sisteme iletilen gerilim ile darbe ucunun hareketi sağlanmaktadır. Aynı noktaya darbe iletimini gerçekleştirmek için oldukça basit bir yöntem olsa da kısa süreli darbeler (yüksek genlikteki darbeler) ve kontrol edilebilir darbe kuvveti için sistemin hareketinin kontrol edilmesi oldukça zordur [9]. Yakın zamandaki bir çalışmada benzer bir sistem Maierhofer vd. tarafından geliştirilmiştir ve kuvvet algılayıcısının hareketi elektromanyetik relüktans eyleyicisi ile sisteme verilen voltaj ayarlanarak kontrol edilebilmektedir [10]. Ama bu sistemde test için uygun parametrelerin belirlenmesinin manuel olarak yapılması gerekmektedir. Bu alandaki en son çalışmalar Bediz ve diğerleri [11] ve Shekhar ve Ozdoganlar [12] tarafından yapılmış ve yeni bir darbe tahrik sistemi tasarlanmıştır. Yapılan bu fizibilite çalışmasında geliştirilen darbe cihazının da dinamik modellenmesi üç boyutlu analitik/numerik modeller kullanılarak yapılmış ve oluşturulan simülasyon ile deneyde cihaz için kullanılacak uygun test parametreleri elde edilmiştir. Fakat uygulanan modelleme yönteminin hesaplama verimsizliğinden dolayı pratikte uygulamak için eksikleri bulunmaktadır. Her ne kadar darbe kuvvetinin büyüklüğü kontrol edilebilse de sistemde ankastre giriş benzeri bir mekanizma kullanıldığından darbe oryantasyonun kontrolü mümkün olamamaktadır.

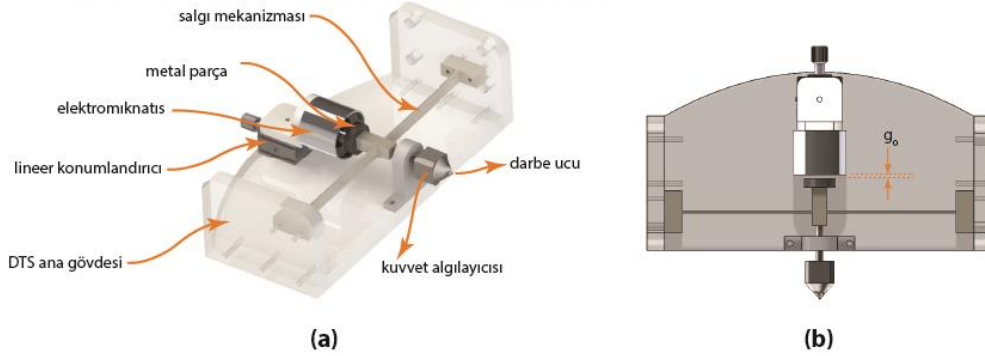
Bu çalışmada yapıların titreşim testlerinde kullanılmak üzere yeni otomatik bir darbe tahrik sisteminin geliştirilmesi ve böylece literatürdeki yapıların/sistemlerin dinamiklerinin titreşim testleri ile hızlı ve yüksek hassasiyetle bulunması yolundaki eksikliklerin giderilmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla öncelikle geliştirilen darbe mekanizmasının basit ve kapalı devre çalışabilecek bir dinamik modeli oluşturulmuştur. İkinci olarak, otomatik bir şekilde çalışması için darbe testi sırasında yapı yüzeyinin bulunması sağlayacak bir algoritma sisteme

eklenmiştir. Üçüncü aşamada da tasarlanan darbe tahrik sisteminin, darbe olayının kendisinin (Hertzian darbe teorisi kullanılarak) ve test yapısının dinamik modellerinin beraber kullanılacağı bir simülasyon alt yapısı oluşturulmuş ve bu alt yapı kapalı devre sistemi uygulamasıyla üretilen sisteme başarılı bir şekilde entegre edilmiştir. Son olarak da geliştirilen sistemin performansının ölçülmesi için de manuel darbe testleri sonuçları ile karşılaştırılması yapılmıştır.

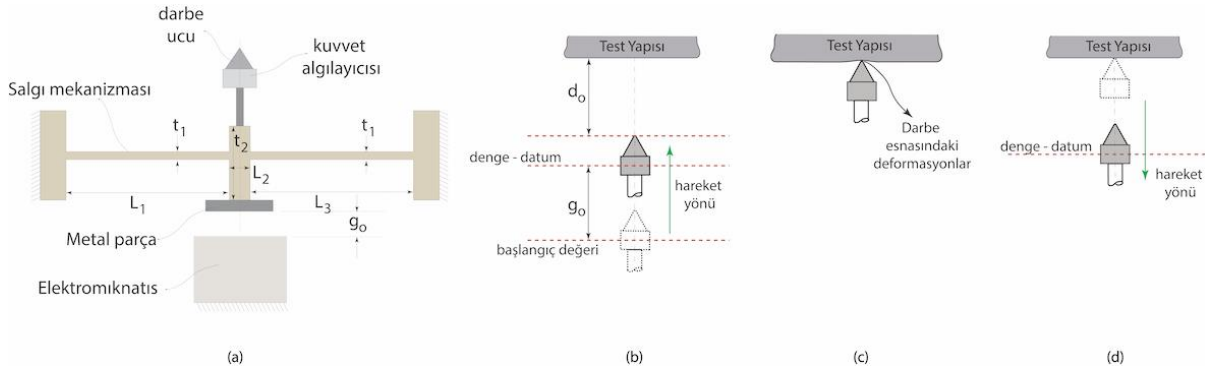
II. MODELLEME VE YÖNTEM

2.1. Darbe Tahrik Sistemi

Şekil 1, tasarlanan darbe tahrik sistemini göstermektedir [13]. Görüldüğü gibi hareket mekanizması özel olarak istenen doğrusal hareketi sağlayacak bir salgı mekanizmasından oluşmaktadır.



Şekil 1. Tasarlanan darbe mekanizmasının CAD modeli.



Şekil 2. Darbe tahrik sisteminde darbe ucunun hareket şeması: (a) darbe tahrik sistemi modelinin üstten görüntüsü, (b) elektromıknatisin yardımıyla geri çekilmiş darbe ucunun konumu, (c) sistem serbest bırakıldıktan sonra hareket ederek test yapısına temas halindeki darbe ucunun hareketi, (d) darbeden sonra test yapısından uzağa ilerlemekte olan darbe ucunun hareketi.

Darbe tahrik sisteminin çalışması şu şekilde basitçe özetlenebilir: Elektromıknatisa gerilim verildiğinde, salgı mekanizmasına bağlı olan metal parçayı kendine doğru çeker ve böylece salgı mekanizmasına bir deformasyon verilmiş olur. Devre kapatıldığında ise, elektromıknatis sistemi serbest bırakır ve yapı belirli bir yolu izleyerek test yapısına doğru hareket etmeye başlar. Darbe tahrik sisteminin ve test yapısının dinamiğine ve darbe mekanizmasına bağlı olarak tek

Test sırasında darbe kuvvetinin ölçülebilmesi için kuvvet algılayıcısı (Kistler 9712B – Quartz kuvvet algılayıcısı) kullanılmıştır. Darbe mekanizmasının otomatik bir şekilde çalışması için salgı mekanizmasına bir başlangıç deformasyonu verilmesi gerekmektedir. Böylece salgı mekanizmasında depolanan potansiyel enerji sistem serbest bırakıldığında kinetik enerjiye dönüşecek ve darbe ucu Şekil 2’de belirtilen şekilde test yapısına doğru hareket edecektir. Bu amaçla sisteme

Şekil 1’de görüldüğü gibi bir elektromıknatis entegre edilmiştir. Elektromıknatisin salgı mekanizmasını gerilim verildiğinde çekebilmesi için salgı mekanizmasına bir metal disk takılmıştır.

bir darbe veya çoklu darbe gerçekleşir. Test sırasında darbe ucunun test yapısına arasındaki mesafenin (d_0) ve/veya salgı mekanizmasına bağlı metal parça ile elektromıknatis arasındaki mesafenin (g_0) kolaylıkla kontrol edilebilmesinden dolayı tek bir darbe elde etmek ve darbe kuvvetinin ve genişliğinin ayarlanmasında bu iki parametre kontrol parametreleri olarak seçilmiştir.

2.2. Darbe Mekanizması Modeli

Titreşim testi kapsamında darbe kuvvetinin doğru bir şekilde tahmini yapılabilmesi ve kontrol parametrelerinin (d_o ve g_o) hızlı bir şekilde ayarlanabilmesi için PMMA'den üretilen salgı mekanizmasının eş değer tek serbestlik dereceli bir modeli oluşturulmuştur [14]. Tek serbestlik dereceli dinamik model için öncelikle eş değer kütle ve esneklik değerlerinin bulunması gerekmektedir. Eş değer model bulunurken yapı iki simetrik kısma ayrılmıştır ve her kısım için ucunda konsantre kütle bulunan ankastre giriş için olan eş değer formülasyonlar kullanılmıştır. Yalnız salgı mekanizmasının kütlesi de bu eşdeğer modeline dahil edilmiştir. Bu yaklaşımla eş değer sistem parametreleri

$$k_{eq} = \frac{192 E I}{(2 L_1 + L_2)} \quad (1)$$

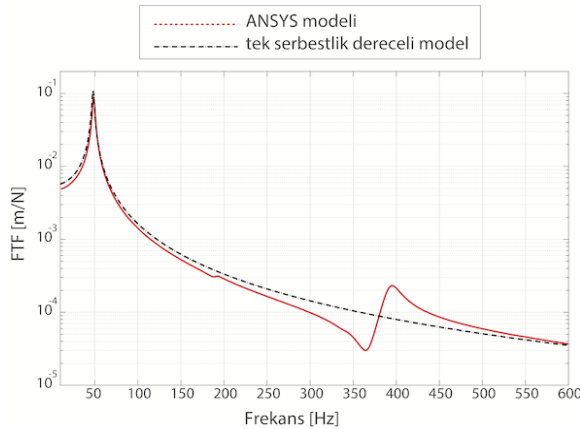
$$m_{eq} = 2 [0.24 \rho w_1 t_1 (2 L_1 + L_2)] + \rho w_2 L_2 (t_2 - t_1) \quad (2)$$

şeklinde hesaplanabilir. Burada t ve w salgı mekanizmasının kalınlığını ve genişliğini belirtmektedir. Salgı mekanizmasının geometrik parametreleri Tablo 1'te verilmiştir.

Tablo 1. Salgı mekanizması geometrik parametreleri.

| Geometrik Parametre | Değerler [mm] |
|---------------------|---------------|
| L_1 | 74 |
| L_2 | 8 |
| L_3 | 74 |
| t_1 | 1.2 |
| t_2 | 22 |
| t_3 | 1.2 |
| $w_1 = w_2 = w_3$ | 8 |

Modelin doğruluğunu test etmek için aynı mekanizma sonlu elemanlar yöntemi ile de modellenmiştir. Tek serbestlik dereceli model ve sonlu eleman modeli ile sistemin temel rezonans frekansı sırasıyla 48.6 Hz ve 48 Hz olarak hesaplanmıştır. Frekans tepki fonksiyonları karşılaştırması da Şekil 3'te görülmektedir. Sistem dinamiğinde en baskın kısım birinci titreşim biçiminden geldiğinden tek serbestlik dereceli model de oldukça doğru sonuçlar verecektir.



Şekil 3. Salgı mekanizması darbe ucu için hesaplanan frekans tepki fonksiyonu.

2.3. Darbe Modeli

Darbe ucu test yapısına temas ettikten sonra darbe kuvvetinin bulunabilmesi için bir darbe modeli oluşturulması gereklidir. Şekil 2(b)'de de gösterildiği gibi darbe sırasında iki ana aşama bulunmaktadır: (i) deformasyon ve (ii) önceki duruma gelme. Darbe test yapısına temas ettiğinde sahip olduğu hız ve momentum sayesinde test yüzeyinde bir elastik girinti başlar. Girinti ilerledikçe darbe ucu ve test yüzeyi arasında bir kuvvet oluşmaktadır. Darbe dinamiği üzerine literatürde oldukça fazla çalışma bulunmaktadır. Bu alandaki modellerden en önemlisi Hertz teorisidir [15]–[18]. Bu teori başlangıçta iki küresel cismin çarpışmasını modellemek için geliştirilmiştir. Temelde Hertz teorisi, çarpışma sırasında doğrusal olmayan bir kuvvet-deformasyon ilişkisine sahiptir. Darbe sırasındaki kuvvet aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$F_{darbe} = K \delta^n \left\{ 1 + \frac{3(1-e^2)}{4} \frac{\delta}{U_o} \right\} \quad (3)$$

Bu denklemde K darbe sertliğini, e geri getirme katsayısını, U_o darbe ucunun ilk temas hızını δ ve δ' da girinti miktarını ve hızını, n de doğrusal olmayan katsayıyı belirtmektedir ve bu değer 1.5 olarak alınmıştır [17], [19]. Geri getirme katsayısının değeri literatürden bulunabilir. Bununla birlikte, karmaşık geometriler için deneylerden belirlenmesi gerekir. Darbe sertliği de

$$K = \frac{4}{3\pi(k_i+k_j)} \sqrt{\frac{r_i r_j}{r_i+r_j}} \quad (4)$$

formülü kullanılarak hesaplanabilir. Burada r_i ve r_j çarpışan yüzeylerin yarıçapını k_i ve k_j de çarpışan yapıların malzeme özelliklerini göstermektedir ve aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$k_l = \frac{1-\nu_l^2}{\pi E_l}, \quad l = i, j \quad (5)$$

Burada ν Poisson katsayısını, E de elastisite modülünü belirtmektedir.

2.4. Elektromıknatis Ampirik Modeli

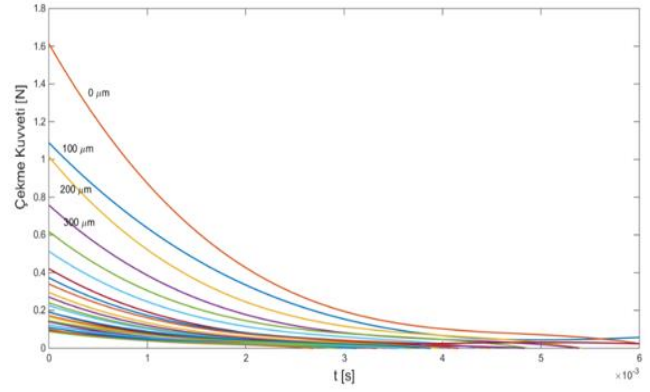
Elektromıknatisa voltaj verilmesi ile bir manyetik alan oluşmaktadır ve bu manyetik alan salgı mekanizmasına sabit bir şekilde takılmış metal parçayı kendisine doğru çekmektedir. Elektromıknatisa verilen voltajın kesilmesi ile manyetik alan yok olmaya ve böylece sistem salgı mekanizmasında depolanmış gerinim enerjisi ile hareket etmeye başlamaktadır. Burada önemli olan manyetik alanın voltaj kesildiği anda tamamen kaybolmamasıdır.

Elektromıknatisa verilen voltajın $t=0$ anından kesildiğini varsayarsak hareketin başlaması $t=t_i$ zamanında olmaktadır. Yani yavaş yavaş zayıflayan manyetik alan kuvveti bir noktada ($t=t_i$ anında),

gerinmiş haldeki salgı mekanizmasını yerinde tutmaya yetmemektedir ve böylece salgı mekanizmasının test yapısına doğru hareketi başlamaktadır. Fakat salgı mekanizmasının hareketinin bu ilk kısımlarında manyetik kuvvet de sisteme etki etmeye devam etmektedir. Bu yüzden sistemin doğru bir şekilde modellenebilmesi amacıyla elektromıknatis kuvvetinin de modellenmesi gerekmez. Bu kapsamda hem analitik modellerin uygulanmasının zor olmasından ve numerik açıdan verimsiz olmasından dolayı bu çalışma kapsamında daha önce de belirtildiği gibi ampirik bir model oluşturulması üzerine çalışılmıştır. Ampirik model oluşturulmasında elektromıknatisa 9V değeri verilerek elde edilen kuvvet değişimi Şekil 4'teki gibi uzaklığa ve zamana bağlı olarak elde edilmiştir. Simülasyonlarda bu test datasından interpolasyon yöntemi ile salgı mekanizmasına etki eden kuvvet değeri bulunmaktadır.

2.5. Test Yapısının Modeli

Titreşim testine başlanmadan önce test yapısının dinamiği hakkında bir bilgi genelde bulunmamaktadır. Test yapılacak parça yüksek rijitlikte bir parça ise bu aşamaya kadar geliştirilmiş olan simülasyon modeli (darbe tahrik sistemi modeli, darbe modeli ve elektromıknatis modeli) darbe kuvveti ve darbe genliğinin tahmin edilmesi için yeterlidir. Fakat test yapısının esnek olduğu durumlarda, darbe sonucunda test yapısında da esneme/hareket meydana gelmektedir. Denklem 3'ten de görülebileceği gibi darbe kuvveti darbe ucu ve darbe yüzeyi arasındaki rölatif konuma (δ) ve hıza ($\dot{\delta}$) bağlıdır. Dolayısı ile esnek parça üzerinde test yapıldığında darbe kuvvetinden dolayı test yapısında esneme ve bu sebeple rölatif konum ve hız değerlerinde farklılık olmaktadır. Dolayısıyla esnek parçalar üzerinden yapılacak testlerde de darbe kuvvetinin ve genliğinin doğru bir şekilde tahmin edilebilmesi için test yapısı dinamiğinin de simülasyon modeline dahil edilmesi gerekmektedir. Test yapılmadan test dinamiği hakkında bir bilgi sahibi olunması imkânsız olduğu için yapılacak ilk vuruşta test dinamiği rijit olarak kabul edilmesi düşünülmüştür. Böylelikle ilk vuruştan sonra darbe ve tepki verisi kullanılarak hesaplanacak frekans tepki fonksiyonu kullanılarak test yapısının modal parametreleri çıkarılabilecektir. Çıkarılan modal parametreler ile sistem dinamiği de simülasyon modeline dahil edilebilmektedir. Dolayısıyla her vuruştan sonra güncellenen frekans tepki fonksiyonu üzerinden sistem dinamiği çıkarılmakta ve simülasyon modelinde kullanılmaktadır. Oluşturulan bu yinelemeli model sayesinde birkaç vuruştan sonra doğru kuvvet ve genlik tahminleri yapılabilmekte ve esnek parçaların da titreşim testlerinin hızlı bir şekilde elde edilmesi sağlanmış olabilmektedir.



Şekil 4. Elektromıknatis kapandıktan sonra kaybolan manyetik alanın salgı mekanizmasına uyguladığı kuvvet.

2.6. Darbe Tahrik Sistemi Çalışma Simülasyonu

Oluşturulan simülasyon algoritması Şekil 5'te verilmiştir. Görülebileceği gibi yinelemeli bir simülasyon modeli oluşturulmuştur. İlk başta seçilen d_o ve g_o değerleri istenen tek darbe vuruşunu gerçekleştirilemezse bile daha sonraki vuruşlarda test yapısı dinamiği de hesaba katılacağından istenilen vuruşlar sonraki darbelerde elde edilebilecektir ve böylece titreşim testi bittiğinde test dinamiği doğru bir şekilde çıkarılmış olacaktır. Verilen algoritmanın daha iyi anlaşılabilmesi için bu bölümde her kısım detaylıca anlatılmıştır.

Adım 1: Seçilen darbe mekanizması çalışma parametreleri (d_o ve g_o), salgı mekanizması için oluşturulmuş dinamik modelinde zamana bağlı hareketin bulunması için kullanılacaktır. Zaman tabanlı tepkinin tahmin edilmesinde MATLAB yazılımının 'ode' fonksiyonu kullanılmıştır. Bu amaçla sistem modelinin durum uzay modeli oluşturulmuştur. Örneğin tek serbestlik dereceli sistem için bu model aşağıdaki gibi çıkarılabilir:

$$\begin{Bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_n^2 & -2\zeta\omega_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ 1/m_{eq} \end{Bmatrix} F \quad (6)$$

Adım 2: Sistemin hareketinin başlangıcı yukarıda da bahsedildiği gibi salgı mekanizmasının elektromıknatıstan koptuğu andır. Elektromıknatisa verilen voltaj kesildikten sonra manyetik alan biranda yok olmadığından elektromıknatis kuvvet uygulamaya devam etmektedir. Dolayısı ile ilk önce Denklem 6 kullanılarak sistemin ilk harekete başladığı noktanın bulunması gerekmektedir. Buradaki kuvvet (F) elektromıknatıstan dolayı sisteme etki eden çekme kuvvetidir. 'ODE - I' isimli fonksiyon bu amaçla kullanılmaktadır.

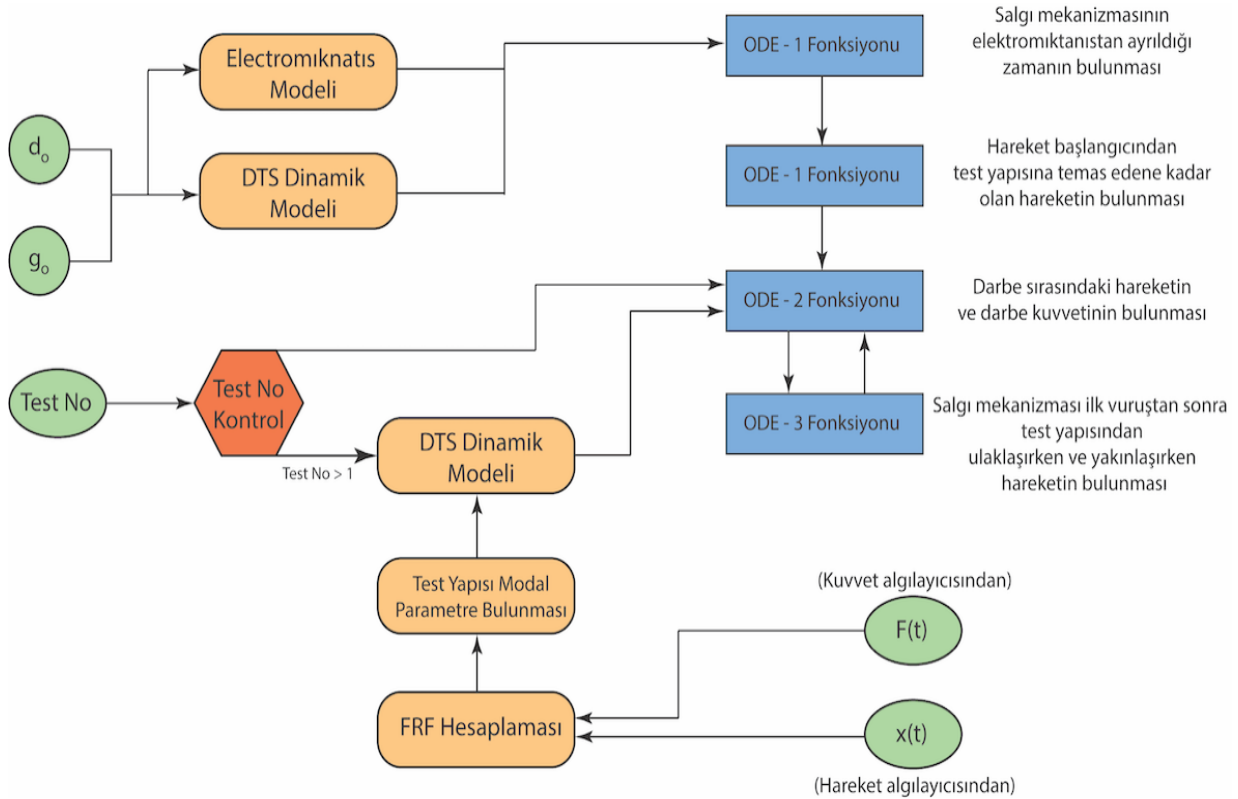
Adım 3: Hareket başladıktan sonra darbe ucunun test yapısına değdiği noktaya kadar sistemin hareketi yine 'ODE - 1' isimli fonksiyon kullanılarak bulunabilir. Belli bir zaman sonra ya da darbe elektromıknatıstan belli bir uzaklığa geldiği noktada sistem üzerine etki eden kuvvet sıfır olacağından sistem serbest salınımına geçecektir. Bu üçüncü adımda ayrıca sistemin her zaman aralığında pozisyonu kontrol edilerek test yapısının bulunduğu konuma gelip gelmediği kontrol edilmektedir.

Adım 4: Darbe ucu test yapısının yüzeyi ile temasa geçtiği noktadan itibaren Şekil 2'de belirtilen deformasyon ve geri gelme fazları oluşacağından test yapısı ve darbe ucu arasında bir kuvvet oluşumu gerçekleşecektir. Bu kısım için oluşturulan 'ODE - 2' isimli fonksiyon içerisinde Denklem 3 kullanılarak darbe kuvveti hesabı yapılmakta ve yine Denklem 6 kullanılarak sisteme etkisi tahmin edilebilmektedir. Test yapısı üzerinde ilk test gerçekleştirildikten sonra (eğer test yapısı esnekse istenilen darbe elde edilmeyebilir) hesaplanan frekans tepki fonksiyonu kullanılarak eğri uydurma yöntemi ile test yapısının dinamikleri için de Denklem 6'daki benzer durum uzay denklemleri çıkarılabilir. Böylece ikinci veya daha sonraki testlerde hem darbe sisteminin hem de test yapısının beraber zamana bağlı tepki simülasyonu gerçekleştirilmektedir.

Adım 5: Darbe tamamlandıktan sonra sistem test yapısından uzaklaşmaya başlamaktadır. Bu durumda sisteme etki eden bir kuvvet olmadığı için hareketi bulunurken Denklem 6'da kuvvet kısmı tepki hesabına katılmamaktadır ve buna uygun olarak 'ODE - 3' isimli fonksiyon kullanılmaktadır. Bu fonksiyon sonucunda tekrar test yapısına temas olması durumunda hareketin çözülmesi için 'ODE - 2' isimli fonksiyonun kullanımına geçilmektedir.

Adım 6: Frekans tepki fonksiyonu hesabı için yeterli miktarda vuruş yapıldıktan sonra kuvvet ve hareket algılayıcılarından gelen veriler kullanılarak sistem dinamikleri bulunabilir.

Şekil 6, sistem için oluşturulan bu simülasyon alt yapısı ile elde edilmiş bu adımları göstermektedir. Sistem hareketinde tüm bu adımların hesaplandığı kısımlar şekil üzerinde gösterilmiştir. Burada dikkat edilmesi gereken bir diğer unsur da ilk vuruştan sonra geri gelen darbe ucunun kendi salınımindan kaynaklı olarak tekrar gidip test yapısına vurabileceğidir; test süresinin darbe mekanizmasının salınım periyodundan fazla olması durumunda bu oluşan çoklu darbe sorun yaratacaktır. Geliştirilen simülasyon yapısı bunun da tespitini yapabilmektedir. Bulgular ve Tartışma bölümünde bu simülasyon yapısı kullanılarak elde edilen sonuçlardan örnekler verilmiştir.



Şekil 5. Darbe Tahrik Sistemi Çalışma Simülasyonu.

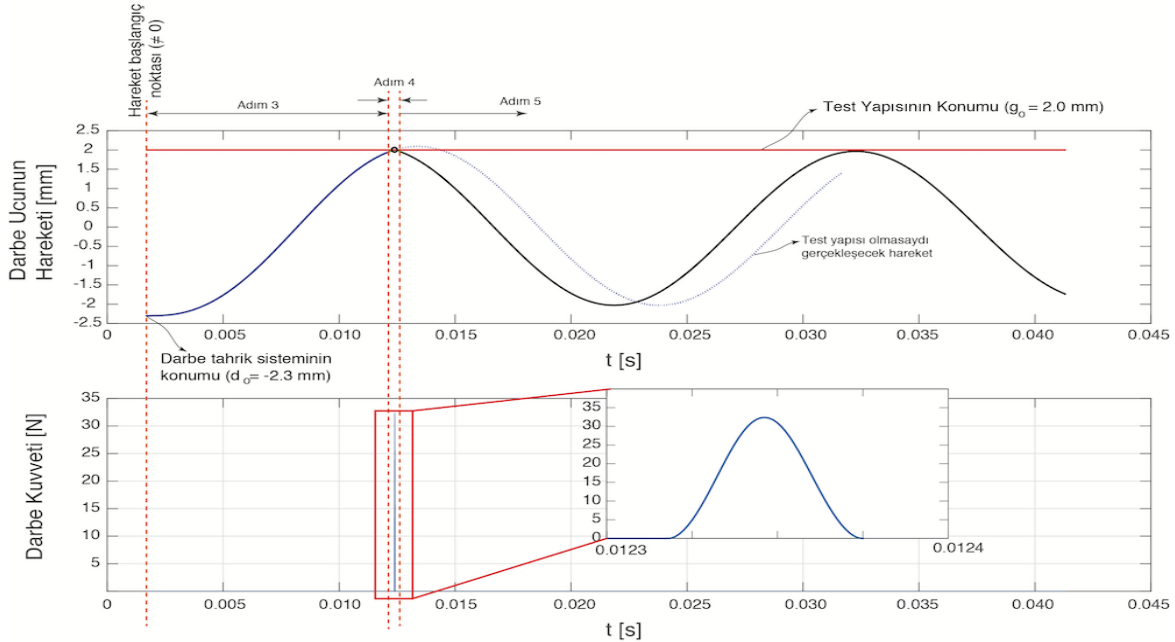
III. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Başlangıç Test Parametresi Seçimi ve Güncellenmesi

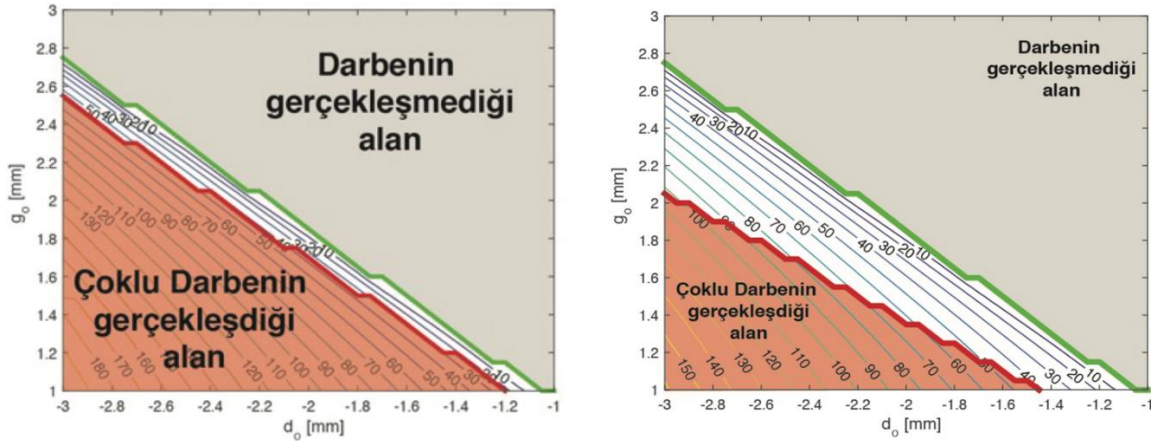
Oluşturulan simülasyon alt yapısı ile yapılacak herhangi bir test için darbe mekanizmasının çalışmasında kullanılacak parametreler (d_0 ve g_0) için başlangıç değerleri bulunabilir. Örneğin Şekil 7(a)'da testin yapılacağı yüzeyin düz olduğu çelik bir yapı için darbe kuvvetinin bu başlangıç parametrelerine bağlı değişimi çıkarılmıştır. İlk vuruşlardan sonra yapının esnek olduğu durumlarda (darbe kuvveti tahminlerde hata olma ihtimali yüksek olabileceğinden) elde edilen frekans tepki fonksiyonu kullanılarak test yapısının dinamiği de simülasyon modeli dahil edilerek (Şekil 5'te gösterildiği gibi) darbe mekanizma için kullanılacak değerlerin güncellenmesi yapılabilir. Örneğin test yapısının dinamikleri dahil edilerek Şekil 7(a)'daki parametre haritası güncellenmiştir. Bu kapsam test yapısı için modal parametreler $m_{eq} =$

$0.005 kg$, $\omega_n = 10 Hz$, $\zeta = 0.01$ olarak kabul edilmiştir. Güncellenen parametre haritası Şekil 7'de verilmiştir.

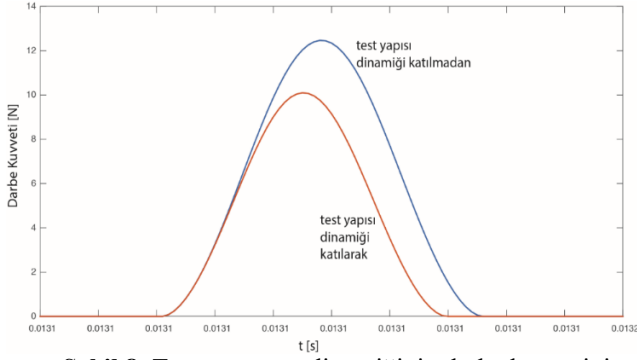
Şekil 7 incelendiğinde test yapısının dinamiklerinin eklenmesinin iki ana sonucu olduğu görülebilir. Birincisi aynı parametre değerlerinde (g_0 ve d_0 için) test yapısının dinamikleri simülasyona dâhil edildiğinden darbe kuvvetinden dolayı test yapısı da hareket edeceğinden daha düşük darbe kuvvetleri oluşmaktadır (bakınız Şekil 8). Bunun sonucu olarak da ikincisi, darbenin olmadığı, tek darbenin gerçekleştiği ve çoklu darbenin gerçekleştiği alanların sınırları değişmiştir. Yalnız burada dikkat edilmesi gereken nokta, test yapısının dinamiğine göre çoklu darbe alanının küçülebileceğidir. Bu örnekte esnek parçanın ana salınım frekansı darbe yapısınınkinden daha düşük olduğundan test yapısı salınımı sırasında tekrar test yapısına çarpmamıştır.



Şekil 6. Darbe tahrik sistemi hareket simülasyonu.



Şekil 7. Darbe kuvvetinin g_0 ve d_0 değerine göre değişimi: (a) test yapısı dinamiği katılmadan, (b) test yapısı dinamiği katılarak.



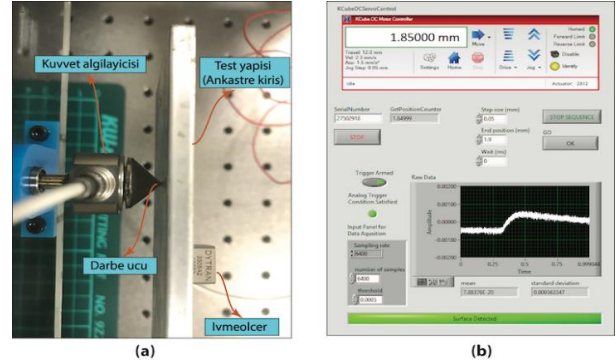
Şekil 8. Test yapısının dinamiğinin darbe kuvvetini etkisi.

3.2. Test Yüzeyi Tespiti

Öncelikler testler sırasında oluşturulan simülasyon algoritması ile darbe mekanizması için kullanılacak parametreler bulunmuştur; fakat bu parametreleri testler sırasında uygulayabilmek için darbe ucunun test yapısına uzaklığının doğru ve hassas bir şekilde ayarlanması gerekmektedir. Bunu sağlamak amacıyla öncelikle test yüzeyinin bulunmasını sağlayacak bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemde sistemde hali hazırda kullanılan motorize lineer konumlandırıcı ve kuvvet algılayıcısından yararlanılmıştır. Darbe tahrik sistemi, test için kurulduktan sonra lineer konumlandırıcı sayesinde tüm sistem yavaş yavaş test yapısına doğru harekete geçirilmektedir. Böylece test yapısı ile temasa geçtiği anda kuvvet algılayıcısından okunan veride bir değişim görülmektedir. Bu işlemin otomatik olarak gerçekleştirilmesi için Labview yazılımı kullanılarak bir arayüz programı hazırlanmıştır:

Arayüz programında kuvvet algılayıcının test yapısına temasını algılamak için iki farklı yöntem kullanılmıştır. Her iki yöntemde de kuvvet algılayıcısından gelen voltaj değerinden yararlanılmıştır. Birincisi yukarıda da bahsedildiği gibi eşik üstü değeri tanımlanması ve böylece sinyal seviyesindeki değişimden temas algılanmaktadır. Fakat yapılan testlerde hareket adımı olarak 50 mikrometre kullanıldığında eşik değeri tanımlama ile yüzey bulunmasında sorunlar olabildiği görülmüş; bu sebeple ikinci bir yöntem daha arayüze dâhil edilmiştir. Bu ikinci yöntemde okunan verinin sürekli olarak standart sapması hesaplanmaktadır. Temas olması halinde standart sapmanın en az bir merteye değiştiği görülmüştür. Böylece daha küçük yaklaşma adımlarında dahi temas oldukça kolay bir şekilde saptanmıştır. Şekil 9'da temas olduğu durumdaki test sistemi ve arayüz programı gösterilmektedir.

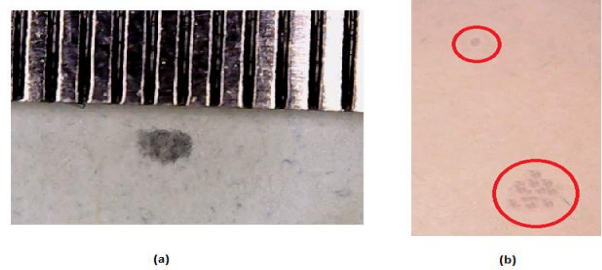
Temas tespit edildikten sonra proje kapsamında geliştirilmiş simülasyon modeli yardımıyla darbe tahrik sistemi için elde edilmiş d_0 değeri motorize konumlandırıcı sayesinde sisteme uygulanmaktadır. Böylece sistem ilk test için hazır hale gelmektedir.



Şekil 9. Temas olduğu andaki (a) test düzeneği ve (b) arayüz programı.

3.3. Darbe Noktası Kararlılığı

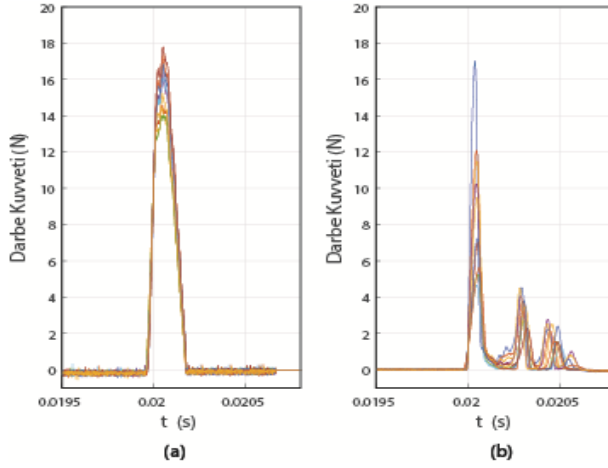
Darbe noktasının yinelenebilirliğinin test edilmesi için vuruş yapılacak yüzeyde basınca duyarlı bir kağıt kullanılmış ve böylece darbe noktalarının dağılımı elde edilmiştir. Karşılaştırma için aynı test manuel bir darbe çekici kullanılarak da yapılmıştır. Şekil 10'da elde edilen darbe alanları MATLAB görüntü işleme paketi ile incelendiğinde darbe tahrik sistemi ve manuel vuruşlar ile elde edilen darbe alanlarının yaklaşık olarak 1 mm² ve 10 mm² olduğu gözlemlenmiştir. Manuel vuruşlar yapılırken darbe çekici ile daha önce vuruş yapmış bir kişinin elde ettiği en iyi performans kullanılmıştır. Görülebileceği gibi darbe tahrik sistemi ile aynı noktaya tekrarlanabilir vuruşlar kolaylıkla yapılabilmektedir ve manuel vuruşlara göre darbe noktasından dolayı oluşabilecek gürültüler minimum düzeye indirgenebilecektir.



Şekil 10. (a) Darbe tahrik sistemi ile 15 vuruş sonrası oluşan darbe alanı, (b) darbe tahrik sistemi ve manuel vuruş ile elde edilen darbe alanı karşılaştırması.

3.4. Darbe Kuvvetinin Yinelenebilirliği

Darbe tahrik sistemi için bir diğer önemli konu da test yapısına iletilen darbenin yinelenebilir olmasıdır. Böylece darbe tahrik sistemi bir kez test için kurulduğunda test yapısına hep aynı kuvvet profilini aktarmalıdır. Özellikle minyatür yapılarda test yaparken kuvvet büyüklüğü yapıya zarar verecek mertebelere çıkabilir. Şekil 9'da gösterilen deney düzeneği kullanılarak hem darbe tahrik sistemi ile hem de manuel olarak test yapısına aynı noktaya 10 kez vuruş yapılmıştır. Yapılan testlerden elde edilen darbe kuvveti grafikleri Şekil 11'de gösterilmiştir.

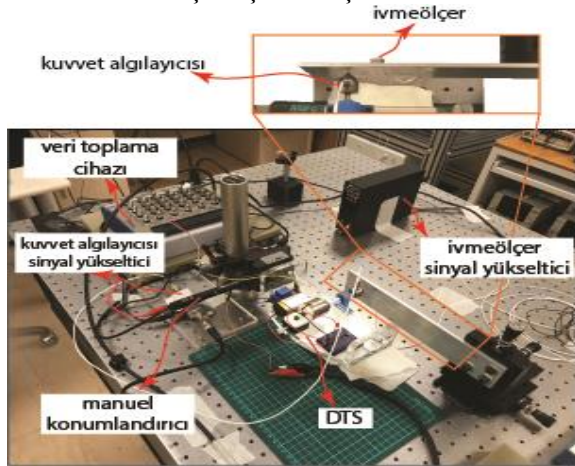


Şekil 11. (a) Darbe tahrik sistemi ve (b) manuel titreşim test sonucu elde edilen tahrik kuvvetlerinin profili.

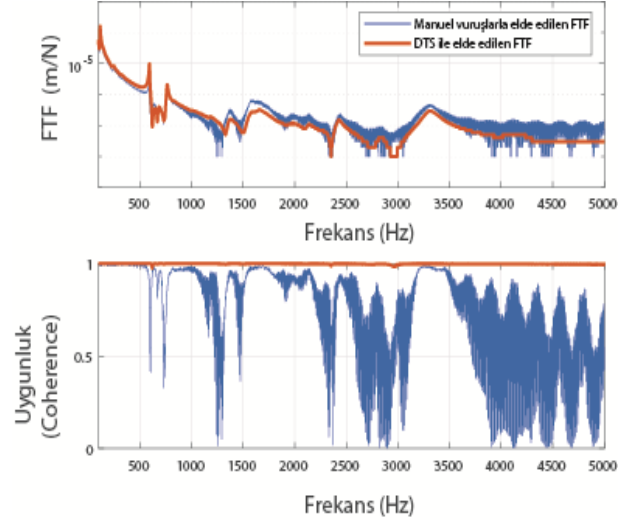
Darbe tahrik sistemi ile yapıya aynı kuvvet profilleri ile vuruş yapılırken, manuel olarak yapılan vuruşlarda 5 – 18 N arasında büyük bir değişkenlikteki darbe kuvvetleri elde edilmiştir. Ayrıca yapı ince bir ankastre kiriş olduğundan manuel vuruşlarda çoklu darbe olayı da gözlemlenmektedir. Sonuç olarak geliştirilen darbe tahrik sistemi yinelenabilir olarak tek darbe kuvvet profilleri elde edilmesini sağlamıştır.

3.5. Esnek Ankastre Kiriş Üzerinde Titreşim Testi

Geliştirilen darbe tahrik sistemi Şekil 12’de belirtilen düzenek kullanılarak ankastre kiriş üzerinde titreşim testi yapılmış ve elde edilen frekans tepki fonksiyonları manuel uygulama ile elde edilenlerle karşılaştırılmıştır. Frekans tepki fonksiyonları elde edilirken 10 vuruş yapılmıştır, örnekleme frekansı 1e6 Hz, toplam örnek sayısı 1e5 olarak seçilmiştir. Şekil 13’te hem DTS ile elde edilen hem de manuel vuruşlar ile elde edilen FTF ve uyumluluk (coherence) grafikleri verilmiştir. Uyumluluk grafiğinden de görüldüğü üzere DTS ile 5000 Hz’e kadar yüksek doğrulukla sistem dinamiği çıkarılmıştır. Fakat manuel vuruşlarda, darbelerdeki sorunlardan dolayı oldukça gürültülü sonuçlar elde edilmiş ve sistem dinamikleri ancak 1000 Hz’e kadar kabul edilebilir ölçüde çıkarılmıştır.

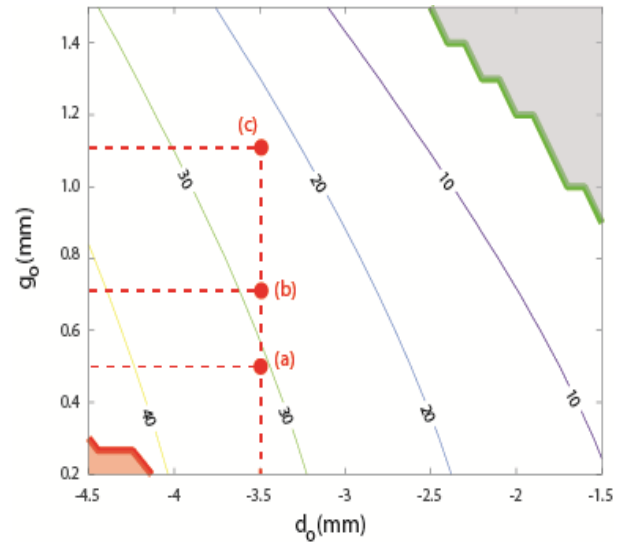


Şekil 12. Titreşim testi deney düzeneği.



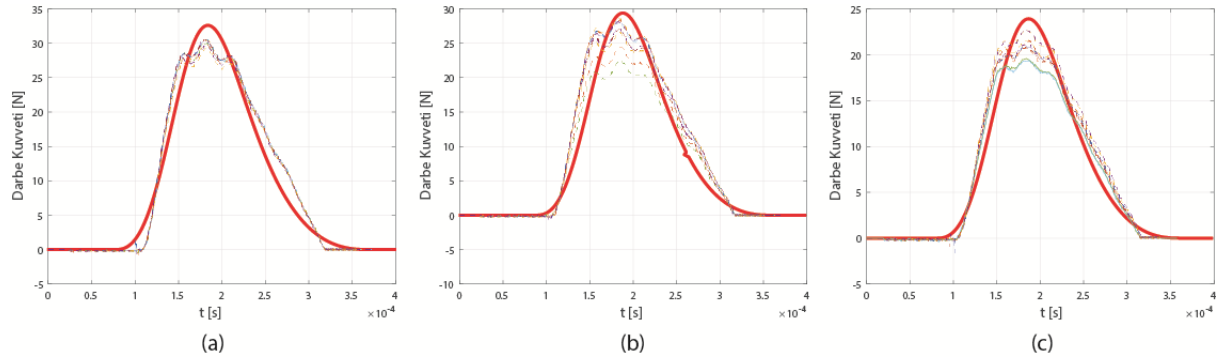
Şekil 13. Manuel ve DTS ile yapılan vuruşlar ile elde edilen frekans tepki fonksiyonu (FTF) ve uygunluk (coherence) grafiği.

Titreşim testi sırasında yapısı dinamiği hesaba katılarak darbe kuvvetinin d_o ve g_o parametrelerine bağlı değişimini gösteren harita Şekil 14’te verilmiştir. Bu proses haritası kullanılarak belirli noktalarda testler yapılmış ve simülasyonlardan elde edilen darbe kuvvetleri deneysel olarak elde edilenlerle karşılaştırılmıştır. Şekil 15’ten de görüldüğü gibi simülasyon modeli kullanılarak darbe kuvvetinin doğru bir şekilde tahmin edilebildiği görülmüştür. Darbe kuvvetlerindeki hata miktarı ortalama %5 civarında hesaplanmıştır.



Şekil 14. Ankastre kiriş testi için test yapısı dinamikleri dâhil edilerek çıkarılan parametre haritası.

Sonuç olarak geliştirilen darbe tahrik sistemi ile yinelenabilir ve tek vuruş özelliğinde darbeler üretilebilmekte ve test yapısı dinamikleri manuel vuruşa kıyasla daha yüksek frekans genliklerinde daha doğru bir şekilde hesaplanabilmektedir.



Şekil 15. Test (kuvvet algılayıcısından) ve simülasyon sonucu elde edilen darbe kuvveti karşılaştırması (Kırmızı çizgi simülasyondan elde edilen kuvvet profili, kesikli çizgiler deneyden elde edilen darbe kuvveti profilleri):
(a) $g_o = 0.5$ mm, (b) $g_o = 0.7$ mm, (c) $g_o = 1.1$ mm.

SONUÇ

Yapıların dinamiklerinin test yoluyla doğru bir şekilde elde edilmesi birçok mühendislik alanında ihtiyaç duyulan bir gereksinimdir ve dolayısı ile bu alandaki çalışmalar sürekli devam etmektedir. Bu çalışmada, titreşim testlerinin daha hızlı ve hassas bir şekilde yapılabilmesi için bir darbe tahrik sistemi tasarlanmış ve üretilmiştir. Çalışmanın temel bulguları şu şekilde özetlenebilir:

- Darbe tahrik sisteminin prototipi başarılı bir şekilde üretilmiştir ve yapılan testlerde istenen darbe kuvveti ile aynı noktaya yinelenabilir şekilde darbeler elde edildiği gösterilmiştir.
- Üretilen darbe tahrik sisteminin teorik modeli oluşturulmuştur ve bu model darbe modeli ve test yapısı modelleri ile birleştirilerek otomasyon sağlanmıştır. Simülasyon modelinin doğrulanması testler ile gerçekleştirilmiş ve darbe kuvvetini yüksek hassasiyet ile tahmin edilebildiği gözlemlenmiştir.
- Esnek ankastre kiriş benzeri bir sistemde testler gerçekleştirilmiş ve manuel darbe ile edilen frekans tepki fonksiyonları ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Böylece üretilen sistemin performans değerlendirmesi yapılabilmektedir.

Geliştirilen bu darbe tahrik sistemi özellikle yüksek hassasiyet istenen titreşim deneylerinin ve daha da önemlisi esnek veya kırılabilir bir yapıya sahip sistemlerin testlerinin kolaylıkla yapılmasını sağlayacaktır. İleride oluşturulan simülasyon modelinin doğruluğunu daha da artırmak amacıyla simülasyon modeli sürekli sistemler yöntemleri ile çıkarılabilir ve test yazılımı için oluşturulan arayüz programına entegre edilebilir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Bilimsel ve Teknolojik Türkiye Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) 117M813 sayılı proje kapsamında desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Schwarz, B. J., & Richardson, M. H. (1999). Experimental modal analysis. *CSI Reliability Week*, 35(1), 1–12.
- [2] Dytran. (1995). Introduction to impulse hammers. In *DYTRAN General Catalogue & Instrumentation Handbook*.
- [3] Brown, D. L., Allemang, R. J., & Phillips, A. W. (2015). Forty Years of Use and Abuse of Impact Testing: A Practical Guide to Making Good FRF Measurements. *International Modal Analysis Conference*, 25.
- [4] Ewins, D. J. (1984). *Modal Testing: Theory and Practice*, 1984. In Hertfordshire, England: Research study press LTD.
- [5] Bediz, B., Gozen, B. A., Korkmaz, E., & Ozdoganlar, O. B. (2014). Dynamics of ultra-high-speed (UHS) spindles used for micromachining. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 87, 27–38.
- [6] Jacobs, K., & Bissinger, G. (1998). An electro-mechanical actuator for a miniature force Hammer. *SPIE Proceedings Series*, 1309–1312.
- [7] Champoux, Y., Cotoni, V., Paillard, B., & Beslin, O. (2003). Moment excitation of structures using two synchronized impact hammers. *Journal of Sound and Vibration*, 263(3), 515–533.
- [8] Brüggemann, T., Biermann, D., & Zabel, A. (2015). Development of an automatic modal pendulum for the measurement of frequency responses for the calculation of stability charts. *Procedia CIRP*, 33(August 2016), 587–592.
- [9] Norman, P. E., Jung, G., Ratcliffe, C., Crane, R., & Davis, C. (2012). Development of an Automated Impact Hammer for Modal Analysis of Structures.
- [10] Maierhofer, J., Mahmoudi, A. el, & Rixen, D. J. (2020). Development of a Low Cost Automatic Modal Hammer for Applications in Substructuring (pp. 77–86).
- [11] Bediz, B., Korkmaz, E., & Ozdoganlar, O. B. (2014). An impact excitation system for repeatable, high-bandwidth modal testing of miniature structures. *Journal of Sound and Vibration*, 333(13), 2743–2761.
- [12] Shekhar, S., & Burak Ozdoganlar, O. B. (2022). Dynamics of Miniature and High-Compliance

- Structures: Experimental Characterization and Modeling. *Experimental Mechanics*, 62(2), 299–312.
- [13] Bediz, B. (2021). Yapı analizinde kullanılmaya uygun bir darbe tahrik sistemi (TR 2020 05454 A1). Turkey: Turk Patent
- [14] Meirovitch, L. (2001). *Fundamentals of vibrations*. McGraw Hill.
- [15] Akay, A., & Hodgson, T. H. (1978). Acoustic radiation from the elastic impact of a sphere with a slab. *Applied Acoustics*, 11(4), 285–304.
- [16] Guran, D. (2000). Inelastic collision and the Hertz theory of impact. *American Journal of Physics*, 68(10), 920–924.
- [17] Goldsmith, W. (1960). *Impact - The theory and physical behaviour of colliding solids*.
- [18] Shekhar, S, Nahata, S., & Ozdoganlar, O. B. (2018). Analysis of contact dynamics using controlled impact excitations. *International Modal Analysis Conference*.
- [19] Lankarani, H. (1994). Continuous contact force models for impact analysis in multibody systems. *Nonlinear Dynamics*, 5, 193–207.

Kitlesel İmalat Sistemlerinde Dijital İkiz Kullanılarak Gerçek Zamanlı Üretim Çizelgeme ve Tekstil Sektöründe Bir Uygulama

Real Time Production Scheduling with Digital Twin in Mass Production Systems and an Application in Textile Industry

Alperen BAL¹ , Hilal GEVREK² , Sedefnur DEMİR² 

¹ American University of the Middle East, College of Engineering and Technology, Kuveyt

² Yalova Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 77200, Yalova, Türkiye

Öz

Üretim ortamının dinamik yapısı planlanmayı güçleştirmektedir. Gelişen teknolojiyle birlikte dijital ikiz, üretim süreçlerine etkin çözümler sunabilmek amacıyla artan bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Bu çalışmada, kitlese imalat sistemlerinde üretimin planlanması amacıyla simülasyon temelli dijital ikiz kullanılarak bir çizelgeme modeli önerilmiştir. Böylece çözümü zor olan üretim çizelgeme problemlerine yenilikçi ve uygulanabilir bir yaklaşım geliştirilmesi amaçlanmıştır. Üretim hattının bir kopyası olan ve gerçek zamanlı veri ile entegre edilmiş model, hammadde stokları, üretim süreleri, hazırlık süreleri, vardiya değişimleri ve mola zamanları, bakım ve arıza kaynaklı duruşlar gibi birçok üretim parametresini dikkate almaktadır. Önerilen yaklaşımın gerçek hayat uygulamasını göstermek amacıyla, kumaş imalatı yapan bir tekstil işletmesinde üretim hattının dijital ikizi oluşturulmuş ve örgü makineleri için işlerin sıraları belirlenmiştir. Model ile her bir siparişin zamanında tamamlanma olasılığı belirlenerek risk analizi yapılabilmektedir. Böylece yüksek riske sahip siparişler yeniden çizelgenerek olası gecikmelerden kaçınılabilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Dijital ikiz, kitlese imalat, risk analizi, simülasyon, üretim çizelgeme, tekstil

Abstract

The dynamic nature of production environment makes planning activities difficult. In parallel with the technological advancements, digital twin has been increasingly used in order to offer effective solutions to production processes. This study proposes a simulation-based digital twin scheduling model for production planning in mass production systems. Thus, we aim to propose an innovative and practical approach to production scheduling which is hard to implement on the shop floor. The model is the digital counterpart of the production line and is integrated with real time production data. It considers many production parameters such as raw material stocks, production cycle times, setup times, shifts and break times, maintenance, and downtimes. We provide a novel approach by combining process planning and scheduling together. In order to elaborate how the proposed model is applied to real life, we present step by step implementation of the digital twin in a fabric manufacturer textile company and determine production sequences of the jobs for knitting machines. The model makes risk analysis by considering the risk of not delivering the orders on due dates. Thus, potential delays can be avoided by rescheduling high-risk tasks.

Keywords: Digital twin, mass production, production scheduling, risk analysis, simulation, textile

I. GİRİŞ

Üretim ortamında nesnelere interneti, büyük veriye dayalı veri analitiği, bulut bilişim, eklemeli imalat, akıllı robotlar ve sanal gerçeklik gibi yeni nesil teknolojilerin hızlı bir şekilde kullanılmaya başlanmasıyla üretim yönetiminde ciddi bir dönüşüm yaşanmaktadır. Bu dönüşümü tetikleyen teknolojilerin önde gelenlerinden birisi de dijital ikizdir. Dijital ikiz, üretim ortamındaki fiziksel bir nesnenin veya sürecin dijital bir profilini oluşturarak, yani davranışlarını gerçek zamanlı veri ile modelleyerek performansı optimize etmeye yardımcı olur [1]. Endüstri 4.0'ın anahtar teknolojilerinden birisi olan dijital ikiz siber fiziksel sistemlerin uygulanabilmesi için en önemli aşamalardan birisi olarak kabul edilmektedir [2]. 2019 yılında yayınlamış olduğu bir raporda Deloitte [3] Amerika Birleşik Devletleri'ndeki üreticilerin %86'sının 2025'e kadar olan süreçte bahsedilen yeni nesil teknolojilerin fabrikalarda kullanımının rekabetin kilit unsuru olacağına inandığını belirtmektedir. Bunun yanında üreticilerin %83'ü bu teknolojilerin uygulanmasıyla ürünlerin üretim şeklinin değişeceğini düşünmektedir [3].

Son yıllarda dijital ikizin üretim alanında sıklıkla uygulandığı görülmektedir [4], [5]. Bu çalışmalar; arıza teşhisini [6], montajı [2], makine ve cihazların sanallaştırılmasını [7], üretim ortamında bilginin entegrasyonunu [8], üretim ortamındaki varlıkların simülasyonunu [9] kapsayan üretimin çeşitli aşamalarında görülmektedir. Dijital ikiz, toplu üretim planlarından günlük üretim çizelgelerinin oluşturulmasına kadar olan süreçleri kapsayan alanlarda uygulanabilir çözümler sunmaktadır.

İş çizelgeleme üretim ortamındaki en önemli optimizasyon problemlerinden birisidir. İş sırasını belirleyen bu problem klasik çizelgeleme yaklaşımı ile çözüldüğünde elde edilen sonucun gerçek hayatta uygulanması genellikle mümkün değildir [10]. Makinelerin sınırlı kullanılabilirliği ve gerçek zamanlı olarak yaşanan çeşitli sıkıntılar başlangıç planının dinamik olarak güncellenmesini ve yeniden çizelgeler oluşturulmasını gerektirmektedir. Makinelerin kullanılabilir olmaması, makine arızalarından ve makine bileşenlerinin yıpranmasından kaynaklanmaktadır. Çevrim süresindeki değişkenlikler ve acil işlerin gelmesi gibi diğer sıkıntılar ise oluşturulan ilk üretim çizelgesini etkilemektedir. Çizelgelerin sık yenilenmesi üretim planında sorunlar oluşturmakta ve kararsızlığa yol açmaktadır. Belirtilen sebepler nedeniyle bu çalışmada üretim çizelgelemede dijital ikizin önemini açıklamak ve kitlesel imalat sistemleri için ne şekilde kullanılabileceğine dair bir model geliştirmek amaçlanmıştır.

Önerilen simülasyon tabanlı dijital ikiz modeli ile süreçlerdeki değişkenlikler göz önünde bulundurularak dinamik bir üretim çizelgeleme yaklaşımı sunulmuştur. Makine bakım planları, çalışan vardiyaları ve yetkinlik düzeyleri, ham madde stokları gibi kısıtları göz önüne alan model, gerçek zamanlı veriye dayalı üretim çizelgeleri oluşturulabilmektedir. Ayrıca, çizelgelerin risk analizleri yapılarak, olasılıksal olarak önerilen planların gerçekleştirilebilirliği analiz edilebilmektedir. Simio Risk Planning and Scheduling (Simio-RPS) yazılımı kullanılarak geliştirilen modelin uygulaması kitlesel imalat yapan bir tekstil fabrikasında üretim hattının bir bölümünün dijital ikizi oluşturularak yapılmıştır.

Bu bölümün devamında yazın taraması yer almaktadır. Üçüncü bölümde ise ele alınan çizelgeleme probleminin ve önerilen dijital ikizin çerçevesi tanımlanmıştır. Dördüncü bölüm dijital ikizin gerçek hayat uygulamasını sunmaktadır. Makalenin son bölümünde ise sonuçlar ve gelecek çalışma önerileri bulunmaktadır.

II. YAZIN TARAMASI

Çizelgeleme problemleri; modelde kullanılan parametreler açısından deterministik (belirli) ya da stokastik (belirsiz) olarak, geliş süreci açısından durağan (statik) ya da dinamik olarak, modelde

kullanılan makine sayısı açısından tek makineli ya da çok makineli olarak değişen çeşitli kategorilerde ele alınmaktadır [11]. Genellikle sonlu sayıda makine ile modellenen çizelgeleme problemlerinde n iş sayısını, m ise makine sayısını temsil etmektedir [12].

Üretim sistemlerinin çizelgelenmesinde ilk olarak statik modeller geliştirilmiştir [13]. İlk matematiksel modelleme temelli yaklaşımlardan birisi Manne [14] tarafından önerilmiştir. Yıllar içerisinde gerçek hayat kısıtlarına göre birçok model ve çözüm yaklaşımı geliştirilmiştir. Saraç ve Sipahioğlu [15] paralel makine çizelgeleme modelini çalışmıştır. Sırt çantası problemi temelli geliştirdikleri yaklaşımda kalıp kullanımlarını dikkate alan bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Akyol ve Saraç [16] kitlesel imalat yapan bir işletmede çizelgeleme problemini montaj hatlarının optimizasyonu için çalışmışlardır. Önerdikleri matematiksel modellerde tek makine ile çizelgeleme ve özdeş paralel makineler ile çizelgeleme problemlerine çözümler geliştirmişlerdir. Modellerin çözümü için GAMS yazılımını ve CPLEX çözücüsünü kullanmışlardır. Bulunan sonuçları mevcut üretim çizelgeleri ile kıyaslayarak performans değerlendirmesi yapmışlardır. Kasımoğlu vd. [17] makine hazırlık sürelerini modellerine dahil ederek paralel makineler için sıraya bağımlı bir çizelgeleme modeli geliştirmişlerdir. Önerdikleri modeli kitlesel imalat yapan bir işletmede uygulamışlardır. Modelin çözümü ile etkin sonuçlar üretilebilmiştir ancak çözüm süresi 10 saati bulmuştur. Yazarlar çizelgelenmesi gereken iş sayısı arttığında hızla artan çözüm süresi ve üretim ortamının dinamik yapısı nedeniyle modeli uygulamanın güçlüğüne vurgulamışlardır.

Çizelgeleme problemlerini tek amaçlı olarak modelleyen çalışmaların yanında çok amaçlı olarak modelleyen çalışmalar da bulunmaktadır. Kaya ve Fırlı [18], [19], esnek atölye tipi çizelgeleme problemi için çok amaçlı modeller geliştiren çalışmalar üzerine yayın taraması yapmışlardır ve farklı çözüm yaklaşımlarını değerlendirmişlerdir. Moradi vd. [20] esnek atölye tipi problem için önleyici bakım stratejilerini göz önüne alan çok amaçlı bir optimizasyon modeli geliştirmişlerdir. Bir amaç fonksiyonu üretim tamamlama süresini minimize ederken diğeri ise bakım sebebiyle sistemin kullanılabilir olmaması durumunu minimize etmektedir. Problemin çözümü için çeşitli çok amaçlı çözüm algoritmaları kullanılmış ve çözüm kalitesi için diğer çalışmalar ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Yılmaz ve Durmusoglu [21] hibrit imalat sistemleri için ortalama akış süresini, maksimum çalışan sayısını ve çalışan değişimini minimize eden bir model geliştirmişlerdir.

Gelişmiş modellerin çözümünün zorluğu sebebiyle araştırmacılar sezgisel çözüm algoritmalarından sıklıkla faydalanmışlardır. Eren ve Güner [11], toplam tamamlanma zamanını ve maksimum gecikme süresini

minimize eden paralel iki özdeş makineli çizelgeleme problemini ele almışlardır. Problemin NP-zor yapıda olması nedeniyle farklı sezgisel yöntemler ile büyük boyutlu problemlerin verimli bir şekilde çözümünü sağlamışlardır. Kaya ve Fırlalı [18], [19] yaptıkları çalışmada belirledikleri problem veri setleri için meta sezgisel yöntemler ile çözüm önerilerinde bulunmuşlardır. Sağır ve Okul [22] önerdikleri sıra bağımlı melez esnek akış tipi atölye çizelgeleme problemine hazırlık sürelerini dahil ederek sezgisel yaklaşım ile büyük ölçekli problem için çözüm geliştirmişlerdir.

Bu modeller kitlesel imalat yapan sistemlerin üretim hatları için çözümler sunabilse de, bu modellerin beklenmedik durumlar ile başa çıkabilme kabiliyetleri kısıtlıdır. Gelişen teknolojiler ile birlikte çizelgelemede yeni yaklaşımlar uygulanmaya başlanmıştır. Böylece, büyük veri, yapay zeka ve dijital ikiz gibi teknolojilerden faydalanan modeller verimli çizelgeler üretebilmek amacıyla araştırmacılar tarafından önerilmeye başlanmıştır. Zhang vd. [23] radyo frekansı ile tanımlama (RFID) cihazlarını kullanarak gerçek zamanlı bir üretim çizelgeleme yöntemi önermişlerdir. Bu amaçla her makinenin kapasitesini ve kullanılabilirliğini değerlendirebilmek için gerçek zamanlı üretim bilgilerini toplamışlardır. Freitag ve Hildebrandt [24] üretim sistemlerinde iş ataması yapmak için simülasyon tabanlı çok amaçlı bir sezgisel yöntem önermişlerdir. Yarı iletken endüstrisinde uygulanan model ile verimli sonuçlar üretmişlerdir. Ji ve Wang [13] veri analitiği yaklaşımı ile büyük veriyi kullanarak makineler iş atamayı sağlayan bir çizelgeleme modeli geliştirmişlerdir. Model aynı zamanda süreç planlama ile çizelgelemeyi birleştirerek işlem gören parçalardaki kusurlu parça oranını düşürmeyi amaçlamaktadır. Kan vd. [25] endüstriyel nesnelerin interneti (IIoT) teknolojisini kullanarak büyük ölçekli makineler için bir arıza teşhis yöntemi önermişlerdir. Böylece bu yöntem ile makine çizelgelemeyi optimize etmeyi amaçlamışlardır. Türker vd. [26] simülasyonu kullanarak çizelgeleme performansını değerlendirmek için sanal modeller geliştirmişlerdir ve bu modeller ile geciken işlerin sayısı, ortalama bekleme süresi, iş istasyonlarının kullanımı ve üretim süresi gibi performans göstergelerini değerlendirmişlerdir. Zhang vd. [27] yaptıkları çalışmada dijital ikizden faydalanarak iki aşamalı üretim çizelgeleme yöntemi önermiştir. İlk olarak dijital ikiz tabanlı makine kullanılabilirliği tahmini, arıza tespiti ve performans değerlendirmesi yapmışlardır. Ardından, dijital ikiz ile geliştirilmiş bir dinamik çizelgeleme modeli sunmuşlardır. Elde ettikleri sonuçlar ile iş tamamlama sürelerinde ve gecikmelerde önemli ölçüde iyileştirmeler sağlamışlardır.

Çizelgeleme yıllara dayanan geniş bir yazına sahip olmasına rağmen yeni nesil bilgi ve iletişim teknolojilerinin kullanımı bu alanda yapılması gereken

güncel çalışmalara ihtiyaç doğurmuştur. Özellikle son yıllarda yapılan araştırmalara bakıldığında bu teknolojilerden faydalanan yeni modellerin araştırmacıların ilgisini çektiği görülmektedir. Erişilen literatür incelendiğinde kitlesel imalat sistemlerinde süreç planlama ile çizelgelemeyi birleştirerek simülasyon tabanlı dijital ikiz ile çizelgeleme yapan çalışmaya rastlanmamıştır. Bu nedenle, çalışmada gerçek veriye dayalı olarak üretim çizelgeleri oluşturabilen ve üretim risklerini analiz edebilen dijital ikiz modeli önerilmesi amaçlanmıştır.

III. PROBLEMİN TANIMLANMASI

Problemin yaşandığı üretim işletmesi tamamen pamuklu ve pamuk-polyester karışımı kumaşların imalatını gerçekleştirmektedir. Çeşitli tiplerde üretilen kumaşlar, kumaş topları halinde müşterilere gönderilmektedir. İşletmede çizelgeleme, işlerin müşteriye teslim zamanları ve müşteri önceliği gözeticilerle herhangi bir gecikmeyi mümkün olduğunca önleyecek şekilde planlama sorumlusunun tecrübelerine dayalı olarak yapılmaktadır. Bu süreçte herhangi bir sistematik yaklaşım kullanılmamaktadır. İşletmede sipariş tipi üretim yapılmaktadır ve günlük kumaş üretim kapasitesi 45 tondur. İşletme, 24 saat esasına göre 3 vardiya olarak çalışmaktadır. Kumaş (son ürün) üretiminde her tipteki kumaş, içeriğinde farklı tipte ve oranlarda iplik (hammadde) barındırmaktadır. İnterlok, ribana, süprem, iki iplik ve üç iplik olmak üzere bu 5 farklı tipteki kumaşlardan her biri ilgili makinede işlem görmektedir. İmalat işlemini gerçekleştiren 5 farklı tipte 147 adet makine bulunmaktadır. İnterlok ve ribana ile süprem ve iki iplik aynı makinelerde işlenebilmektedir. Üç iplik ise yalnızca üç iplik makinesinde işlenebilmektedir. Makinelerde ürün değişimi hazırlık süresi gerektirmektedir. Bu nedenle işletme benzer işlerin mümkün olduğunca arka arkaya çizelgenmesini istemektedir.

Sıklıkla yeni siparişler geldiği ve sipariş iptalleri olabildiği için üretim planındaki devamlı şekilde değişiklikler yapılması gerekmektedir. Ancak bu değişiklikler yapılırken verimli bir plan oluşturulamamaktadır. Aynı zamanda çalışan verimlilik faktörünün örme makinesi kurulum ve bakım sürelerine olan etkisi dolayısıyla çalışana göre üretim süreleri uzayabilmekte, fazla fire oluşmakta ve makinelerde üretim yavaşlamaktadır. Üretimde bir aksama olması durumunda ise tekrar bir teslim tarihi belirlemek ve tüm senaryolara hazırlıklı olabilmek genellikle mümkün olmamaktadır.

İşletmedeki bir diğer büyük problem kaynağını stok kontrolündeki yetersizlik oluşturmaktadır. İşletme nihai ürün (kumaş) stoğu tutmamaktadır. Buna karşın hammadde stoğu tutmaktadır ve özellikle en çok kullanılan hammaddelerin sürekli stokta bulunması istenmektedir. Bu durumda hammadde stoklarının

kontrolünün sağlanması firma için oldukça önemli bir husustur.

Örgü makinelerinde işlemler tamamlanan ürünlere kalite kontrolü yapılmaktadır ve ardından tartım işlemi uygulanmaktadır. Tartım işlemi yapılan ürüne barkod bilgisi eklenerek ürün teslimata gönderilmektedir. Örgü makinelerine işlerin atanmasını sağlayan simülasyon tabanlı dijital ikiz modelinin uygulama adımları Şekil 1'de gösterilmektedir.

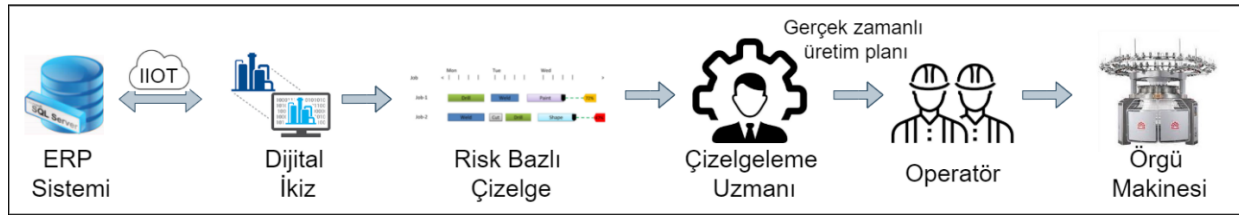
Dijital ikizin istenildiği şekilde çalışabilmesi için gerçek zamanlı veri ile entegrasyonunun sağlanması gerekmektedir. Böylece kurumsal kaynak planlama sistemi (ERP)'ye entegre hale gelen dijital ikiz ile iptal edilen ya da üzerinde herhangi bir değişiklik yapılan siparişler olması durumunda ilgili tablolar anlık olarak modelde güncellenerek, yenilenen çizelgeler ile siparişlere yeni teslim tarihi atanabilmektedir. Ayrıca önerilen dijital ikizin elde ettiği çıktılarının fiziksel fabrikadaki üretim çıktıları ile karşılaştırılması ve modelin doğrulanması önem arz etmektedir. Bu sayede elde edilen sonuçların fiziksel fabrikanın tam bir temsili olması sağlanmaktadır. Ayrıca model ile risk

bazlı çizelgeler üretilerek senaryolar test edilebilmektedir.

Gerçekleştirilen çalışmada temel hedef belirtilen üretim problemlerinin üstesinden gelmektir. Bu sayede alınan siparişlerin gerçek zamanlı olarak üretim planı oluşturulabilmekte, siparişler için risk analizi yapmak mümkün hale gelmekte, stok kontrolü sağlanabilmekte, üretim tamamlanma süresi ve diğer tüm performans göstergelerinde iyileştirmeler yapılabilmektedir.

Çalışmada ele alınan çizelgeleme probleminin aşağıdaki varsayımları bulunmaktadır:

- Makinelerin ve işlerin tamamı başlangıçta hazırdır.
- Bir makine aynı anda yalnızca bir iş yapabilir.
- Bir iş yalnızca bir makineye atanabilir.
- Özdeş olmayan makineler bulunmaktadır.
- İşler arasında öncül ve ardıl ilişkiler yoktur.
- Bir makinede yapılmaya başlanan iş, makine arızası olmadıkça durdurulamaz.
- Birim işlem çevrim süresi ve makine hazırlık sürelerinin dağılımları önceden bilinmektedir.



Şekil 1. Dijital ikizin üretime uygulanma adımları

IV. UYGULAMA

İşletmedeki örgü makineleri için üretim çizelgelerinin oluşturulmak istendiği çalışmada yaşanan en büyük güçlüklerden biri dinamik üretim ortamında verimli ve etkin olarak üretim planları oluşturabilmektir. Geliştirilen model işletmenin kumaş örme bölümünde uygulanmıştır. Modelde çalışanlar için vardiya bilgileri, verimlilik faktörleri, mola saatleri ve makineler için bakım çizelgeleri tanımlanmıştır. Makineler için arıza ve onarım süreleri rassal değişkenler olarak tanımlanmıştır. Tüm hammaddeler için yeniden sipariş noktası ve yeniden sipariş miktarı değerleri hammadde kıtlığına göre belirlenmiştir. Dijital ikiz uygulama adımları Şekil 2'de gösterilmiştir.

1. *adım: Gerçek zamanlı veri entegrasyonu:* Firmanın üretim bilgileri SQL Server veri tabanı yönetim sisteminde tutulmaktadır. Geliştirilen dijital ikiz modeli, işletmenin sipariş ve stok bilgilerine erişim sağlamak amacıyla kurumsal kaynak planlama sistemi ile entegre edilmiştir. Firmanın veri tabanında yapılan değişiklikler anlık olarak dijital ikize düşmektedir. Dolayısıyla siparişin iptal edilmesi, miktarında değişiklik yapılması gibi durumlarda çizelgeleme güncel veriler doğrultusunda yapılmaktadır.

2. *adım: Stok kontrolü:* İnterlok, ribana, süprem, iki iplik ve üç iplik olmak üzere 5 farklı kumaş tipi baz alınmıştır. Kumaşları birbirinden farklı kılan temel sebep hammadde içeriğidir. Dolayısıyla her bir kumaşa gerekli hammadde bilgileri tanımlanmıştır. Bu sayede stok kontrolünü sağlamak mümkün hale gelmiştir. Dijital ikizin sunmuş olduğu çizelgelerden işletmenin tüm siparişler için belirlemiş olduğu teslim tarihlerinin ne kadar güvenilir olduğunu görmek mümkün hale gelmektedir. Stoklar için sunulan grafik ve tablolar yardımıyla işletmenin stoklar üzerindeki hakimiyetini sağlamak mümkün hale gelmektedir.

3. *adım: Siparişlerin makinelere atanması:* Belli kumaş tipleri yalnızca belli makinelerde işlenebilmektedir. Tablo 1'de bu durum özetlenmiştir. Bu özel durum, dijital ikize Simio RPS'in sağlamış olduğu fonksiyonlardan olan Math.If'in çoklu seçim koşulu ile tanımlanmıştır.

Tablo 1. Kumaşların işlem görebileceği makine türleri

| Kumaş Tipi | İşlem Görebileceği Makine Türü |
|------------------------------|--------------------------------|
| İnterlok (Interlock) | ÖM1, ÖM2 |
| Ribana (Rib) | ÖM1, ÖM2 |
| Süprem (Single Jersey) | ÖM3, ÖM5 |
| İki İplik (Two Yarn Fleece) | ÖM3, ÖM5 |
| Üç İplik (Three Yarn Fleece) | ÖM4 |

Siparişin özelliğine göre bazı siparişlerin tamamlanması oldukça uzun zaman alabilmektedir. Tablo 1’de de belirtildiği üzere aynı makinelerde işlem görebilen kumaş tipleri bulunmaktadır. Aynı makinede farklı bir kumaş tipinin işlem görebilmesi için belirli ayarların yapılması gerekmektedir. Bu kurulum (iş geçiş süresi) için gerekli süreler saat cinsinden Tablo 2’de belirtilmiştir.

Tablo 2. Makinelerdeki kumaş tipi değişimlerinde gerekli hazırlık süreleri

| | İnterlok | Ribana | Süprem | İki İplik | Üç İplik |
|-----------|----------|--------|--------|-----------|----------|
| İnterlok | 0 | 8 | - | - | - |
| Ribana | 8 | 0 | - | - | - |
| Süprem | - | - | 0 | 4 | - |
| İki İplik | - | - | 4 | 0 | - |
| Üç İplik | - | - | - | - | 0 |

Kurulum, çalışanlar tarafından yapılmakta olup çalışanlara atanan verimlilik değerlerine göre kurulum süresi değişkenlik gösterebilmektedir. Benzer şekilde işlem süreleri de makinelere atanan verimlilik değerine göre değişkenlik gösterebilmektedir.

- 4. adım: Çizelgelerin elde edilmesi:* Tüm adımların gerçekleşmesi sonucunda siparişlerin çizelgeleme başlangıç, bitiş tarihleri makinelerin tüm duraksamaları (kurulum ve boşta bekleme zamanları), kullanım oranları ve süreç darboğazları belirlenebilmektedir. Elde edilen grafikler, şemalar ve tablolar ile üretimdeki akışı incelemek ve yorumlamak oldukça kolay hale gelmektedir.
- 5. adım: Kalite kontrol:* Üretimi tamamlanan siparişler kalite kontrol sürecine girmektedir. Kumaşlar bu süreç için tanımlanan sürede kalite kontrolden geçerek bir sonraki adıma veya ikinci kalite kumaş bölümüne

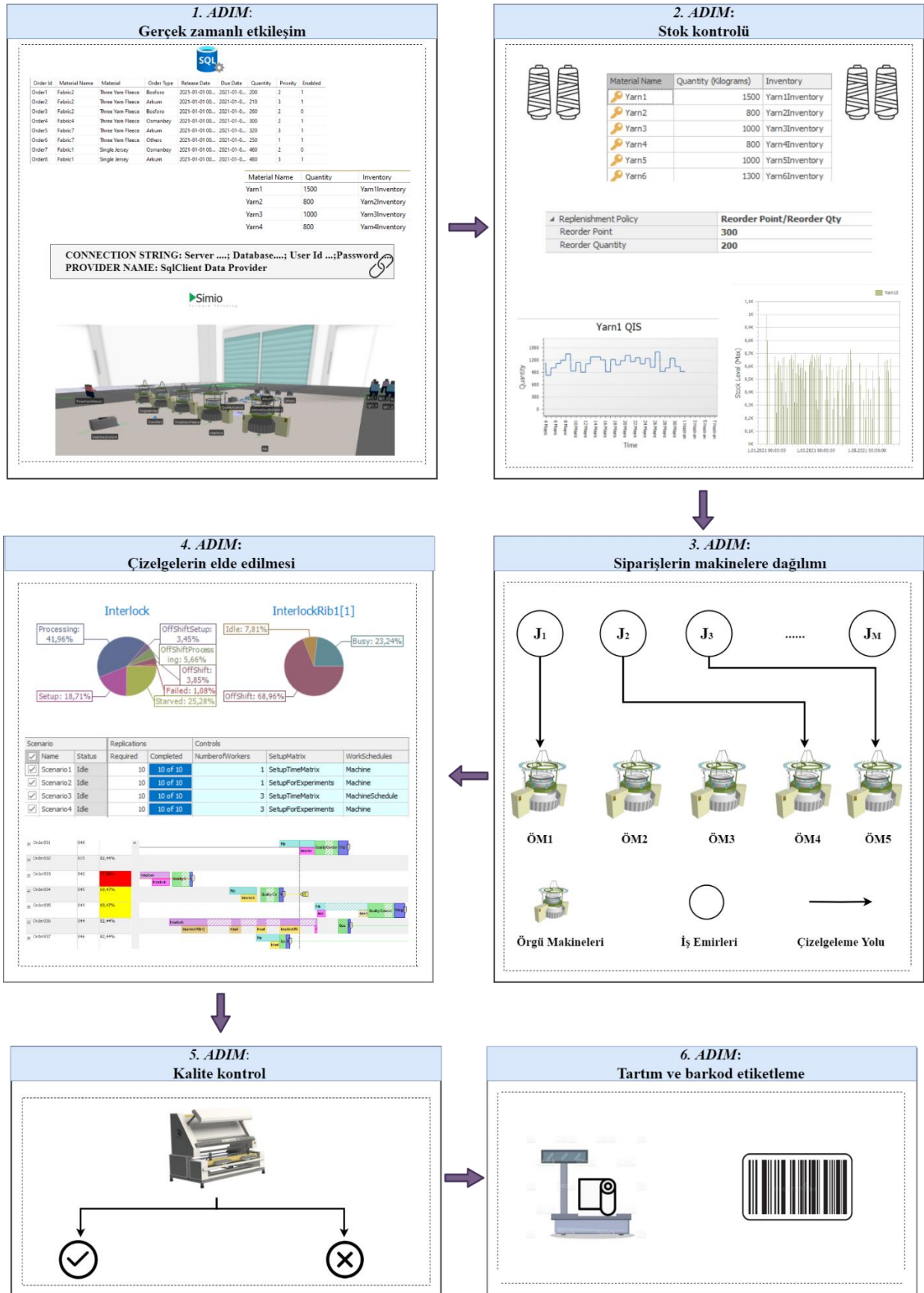
gitmektedir. İstatistiksel değerlendirmeler sonucunda fabrikadaki ürünlerin %95’i kalite kontrolden geçerken %5’i geçemeyip ikinci kalite kumaş bölümüne gitmektedir. Bir sipariş için yapılan kalite kontrol işleminde aynı anda 3 çalışan iş görmektedir. Dijital ikize tanımlanan işgören aynı anda yalnızca 1 siparişin kalite kontrolünü yapabilecek şekilde kısıtlandırılmıştır.

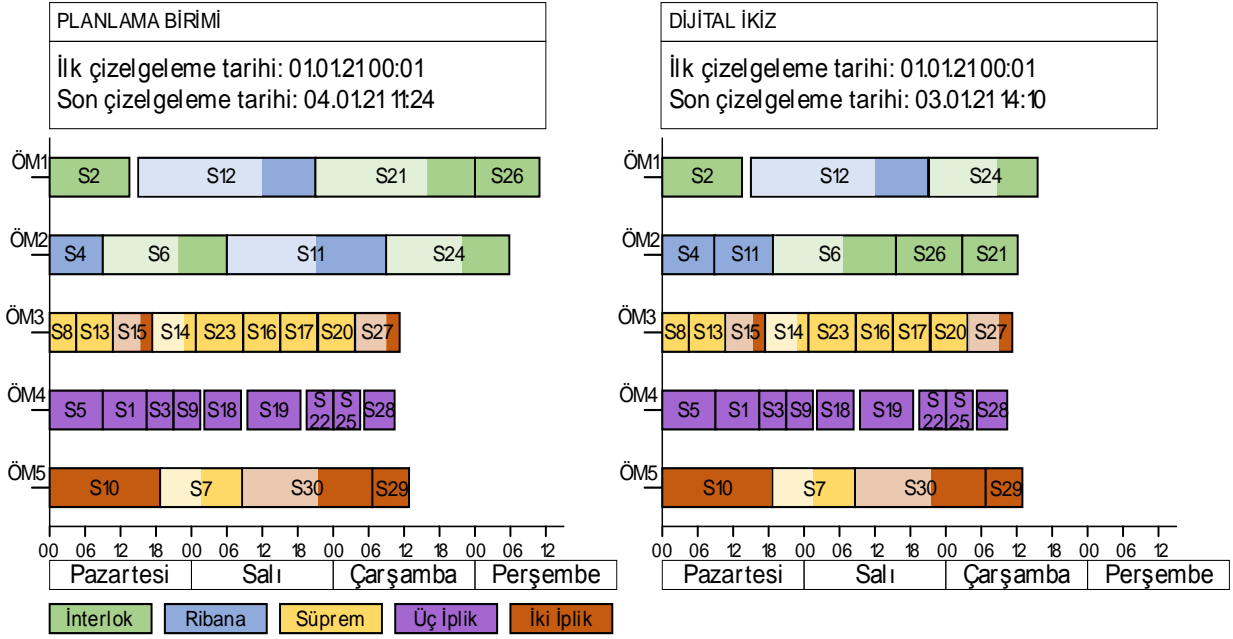
- 6. adım: Tartım ve barkod etiketleme:* Kalite kontrolden onay alan tüm ürünler son işlem olan tartım ve barkod etiketleme kısmına gelerek işgörene tanımlanan süre içerisinde tartım ve barkod etiketleme işlemini gerçekleştirmektedir. Bu kısımda da bir sipariş aynı anda 3 çalışan tarafından yapılacak şekilde tanımlanmıştır. Son olarak, tüm siparişlerin müşterilere teslim edileceği tarih belirlenerek sipariş veren firmalara göre teslimatının yapılması için uygun şekilde araçlara yüklemesi yapılmaktadır. Böylelikle süreç tamamlanmaktadır.

4.1. Modelin Çıktıları

Geliştirilen simülasyon tabanlı dijital ikiz modelinin başarısını gösterebilmek için öncelikle firma kayıtlarından alınan küçük ölçekli bir sipariş için çizelge oluşturulmuştur. Daha sonra yüksek sayıda sipariş içeren bir üretim için modelin verimliliği araştırılmıştır. Küçük ölçekli modelde makinenin işlem süreleri belirlenen dağılımlara uygun rastgele değişkenler olarak tanımlanmıştır. Modelin bu değerlerle çalıştırılması sonucunda elde edilen çıktı değerlerinin, işlenen sipariş sayısının, işlem süresinin ve üretilen çizelgeye göre doğru sonuçların olup olmadığı kontrol edilmiştir. Simülasyonun belirtilen periyotlar için çalıştırılması sonucunda çıktı değerleri doğrulanarak prototip model oluşturulmuştur. Bu prototip modelde örnek modeldeki kontrollere ek olarak çalışanın doğru makinede çalışıp çalışmadığı, siparişlerin sisteme girdiği tarih, kurulum ve işlem görme süreleri kontrol edilmiştir. Ayrıca stok miktarlarının belirtilen noktada ve miktarda artıp azalması simülasyon boyunca gözlemlenmiştir. Bu şekilde modelin doğrulanması ve geçerliliği sağlanmıştır.

Şekil 3’te 30 siparişten oluşan planlama sorumlusu tarafından uygulanmış örnek bir çizelge dijital ikiz ile çalıştırılmış ve elde edilen yeni çizelge karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Şekilde S harfi sipariş numaralarını, sipariş renkleri üzerindeki opak kısımlar makine kurulum sürelerini temsil etmektedir. 5 farklı tipteki örme makinesi için iş ataması yapılan kumaş tipleri farklı renklerle gösterilmiştir. Siparişler arasındaki boşluklar makinelerde işler arasındaki gerekli olan bakım sürelerinden kaynaklanmaktadır.





Şekil 3. Planlama sorumlusu tarafından tecrübeye dayalı olarak ve dijital ikiz ile gerçek zamanlı veri kullanılarak oluşturulan iş çizelgeleri

Şeklin sol tarafında planlama biriminin kayıtlarından alınan gerçekleşmiş üretim görülmektedir. Bu üretim planı 83 saat 24 dakikada tamamlanmıştır. Dijital ikiz ile elde edilen çizelgede interlok ve ribana makinelerindeki işlerin bazılarının yerleri değişmiş ve ürün değişimi nedeniyle oluşan hazırlık süreleri (opak beyaz renk ile gösterilen kısımlar) azalmıştır. Böylelikle üretim süresi kısalmıştır. Böylece aynı miktardaki sipariş 62 saat 10 dakikada tamamlanabilir hale gelmiştir.

Az sayıdaki siparişlerde planlama sorumlusu tarafından tecrübeye dayalı hazırlanan çizelgeler kullanılabilir olsa da büyük ölçekli siparişlerde bunu yapmak mümkün değildir. Tablo 4'te 2 aylık üretim periyodu için işletmenin veri tabanından alınan 1180 adetlik siparişin planlama birimi tarafından uygulanmış hali ve dijital ikiz ile oluşturulan üretim çizelgesinin karşılaştırmalı analizi sunulmuştur.

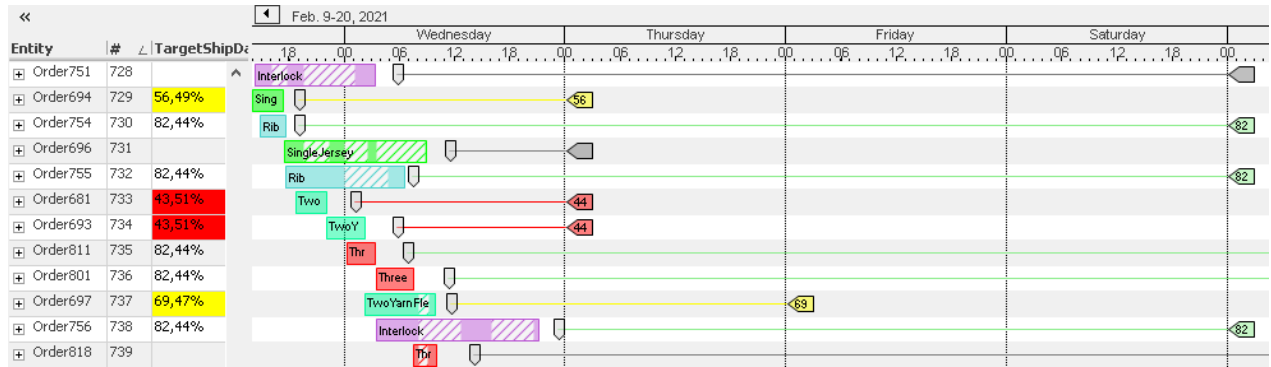
Sonuçların değerlendirilmesinde kullanılan ana performans göstergelerine bakıldığında dijital ikiz ile oluşturulan üretim çizelgesi toplam üretim süresini 2020,98 saatten 1637 saate düşürerek %19'lük bir gelişme sağlamıştır. Makine kullanım oranları ise %26 oranında artış göstermiştir ve makineler bazında daha dengeli bir kullanım oranı elde edilmiştir. Sistemden alınan siparişlerden toplamda 22 tanesi sonradan müşteri tarafından iptal edilmiştir. Kalan 1158 siparişten %19,49'u müşteriye teslim tarihinden sonra teslim edilmiştir. Buna karşın oluşturulmuş olan modelde siparişlerin yalnızca %2,49'u müşteriye geç teslim edilmiştir. Ayrıca önerilen model ile büyük ölçekli siparişlerin çizelgelenmesi sağlanmakta ve siparişlerin gerçekleştirilebilirlik riski analiz edilebilmektedir. Böylece üretimde olabilecek

aksaklıklar göz önünde bulundurularak hangi siparişlerin teslimatta gecikeceği öngörülmektedir. Şekil 3, iş emirleri için üretim planını ve risk analizlerini göstermektedir. Siparişler örme makinelerinde işlem görmekte, ardından kalite kontrol ve tartım işlemlerini tamamladıktan sonra teslimata gönderilmektedir.

Şekil 4'te taralı olarak gösterilen kısımlar arıza, bakım, vardiya değişimi gibi çeşitli nedenlerden kaynaklanan beklemleri göstermektedir. Arıza kayıtlarına bakıldığında makinelerin ortalama olarak 720 saatte bir arıza verdiği ve tamir süresinin üçgensel dağılıma uyduğu (random.triangular(7,8,9)) tespit edilmiştir. Bunun yanında, makineler çalışırken her yarım saatte bir durdurularak makinelerde temizlik işlemi yapılmaktadır. Siparişler için üretim çizelgesine bakıldığında 696, 751 ve 818 numaralı siparişler (Order 696, Order751 ve Order 818) için bir risk görünmemektedir. 751 numaralı siparişte İnterlok üretimi ÖM1'de tamamlandıktan sonra kalite kontrol ve tartım işlemlerinden geçerek siparişin teslimatı yapılabilecektir. 681 ve 693 numaralı siparişler (Order681 ve Order693) %43,51 olasılık ile istenilen tarihte tamamlanabilecektir. Her bir siparişin tamamlanma olasılığı ilgili sütunda görülebilmektedir. Böylece bu çizelgeden kırmızı renk ile işaretlenen 681 ve 693 numaralı siparişlerin büyük olasılıkla istenilen zamanda teslim edilemeyeceği anlaşılmaktadır. Sarı renk ile işaretlenen 694 ve 697 numaralı siparişler (Order694 ve Order697) orta düzeyde riske sahiptir. 754, 755, 756, 801 ve 811 numaralı siparişler ise düşük riske sahiptir ve yüksek ihtimalle istenilen tarihte tamamlanabilecektir.

Tablo 4. Büyük ölçekli siparişlerde sonuçların karşılaştırılması

| Planlama yaklaşımı | Üretim süresi (saat) | Makine kullanım oranı (%) | | | | | İş gecikmeleri (%) | | | | |
|--------------------|----------------------|---------------------------|-------|-------|-------|-------|--------------------|--------|--------|-----------|----------|
| | | ÖM1 | ÖM2 | ÖM3 | ÖM4 | ÖM5 | İnterlok | Ribana | Süprem | İki İplik | Üç İplik |
| Planlama birimi | 2020,98 | 69,02 | 50,79 | 70,23 | 57,87 | 49,79 | 7,50 | 8,59 | 1,00 | 2,40 | 0,00 |
| | | Ortalama (%): 59,54 | | | | | Toplam (%): 19,49 | | | | |
| Dijital ikiz | 1637,00 | 73,02 | 72,43 | 79,03 | 74,76 | 77,48 | 1,03 | 1,29 | 0,00 | 0,17 | 0,00 |
| | | Ortalama (%): 75,34 | | | | | Toplam (%): 2,49 | | | | |

**Şekil 4.** İş emirlerinin tamamlanma olasılıklarını gösteren üretim çizelgesi

V. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada üretim çizelgelerinin oluşturulması ve çizelge risklerinin analiz edilmesi için dijital ikiz temelli bir yaklaşım önerilmiştir. Geçmiş sipariş verileri ile doğrulanan model, anlık olarak sipariş verisini alıp çizelgeler üretebilir düzeydedir. Önerilen çözümün en büyük avantajlarından bir tanesi üretim ortamındaki değişkenlikleri dikkate alarak uygulanabilir çizelgeler oluşturmasıdır. Böylece birçok kısıt ve büyük problem boyutu nedeniyle gerçek hayata uygulanamayan çizelgeleme modellerine alternatif bir çözüm sunulabilmektedir. Ayrıca, risk analizi ile üretimde olabilecek aksaklıklar göz önünde bulundurularak hangi siparişin teslimatta gecikebileceği öngörülmektedir. Çizelgelerin dijital ikiz ile üretilmesindeki en önemli hususlardan başlıcaları uzman kimselerce (çizelge uzmanı) modelin oluşturulması gerekliliği ve firma veri tabanında verilerin düzgün olarak tutulmasıdır. Aksi takdirde hatalı bir çalışmanın işletme bazında uygulamaya geçirilmesi durumunda küçük hatalar işletme için çok büyük zararlara neden olabilecektir.

Literatürde bu çalışmada kullanılan problem boyutundan büyük ölçekli problemler çalışılmıştır. Dolayısıyla model daha büyük ölçekli problemler için test edilebilir ve performansını değerlendirilebilir. Ayrıca model sipariş verilerini gerçek zamanlı olarak kullanabilse de ekipman erişilebilirlikleri gerçek zamanlı değildir. Dijital ikiz modeli bu verinin de entegrasyonu ile geliştirilebilir. Bir başka aşama olarak hammadde ve çalışan maliyetleri modele eklenebilir. Böylece dijital ikize hedef maliyet ve kısıtlar

tanımlanarak toplam maliyeti minimize eden çizelgeler elde edilebilir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

TEŞEKKÜR

Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) bu çalışmayı 2209-B Üniversite Öğrencileri Sanayiye Yönelik Araştırma Projeleri Desteği Programı kapsamında 1139B412000737 başvuru numaralı proje ile desteklemiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Kumaş, E. & Erol, S. (2021). Endüstri 4.0'da anahtar teknoloji olarak dijital ikizler. *Politeknik Dergisi*, 24(2), 691–701.
- [2] Zhuang, C., Liu, J. & Xiong, H. (2018). Digital twin-based smart production management and control framework for the complex product assembly shop-floor. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 96(4), 1149–1163. doi: 10.1007/s00170-018-1617-6.
- [3] Wellener, P., Shepley, S., Dollar, B., Laaper, S., & Manolian, H. (2019). Deloitte and MAPI Smart Factory Study. https://deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/6276_2019-Deloitte-and-MAPI-Smart-Factory-Study/DI_2019-Deloitte-and-MAPI-Smart-Factory-Study.pdf.
- [4] Tao, F, Zhang, M., Liu, Y. & Nee, A.Y.C. (2018). Digital twin driven prognostics and health

- management for complex equipment. *CIRP Ann.*, 67(1), 169–172. doi: 10.1016/j.cirp.2018.04.055.
- [5] Tao, F., Zhang, H., Liu, A. & Nee, A.Y.C. (2019). Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. *IEEE Trans. Ind. Informatics*, 15(4), 2405–2415. doi: 10.1109/TII.2018.2873186.
- [6] Tao, F., Zhang, M. & Nee, A.Y.C. (2019). Digital Twin Driven Smart Manufacturing. Academic Press.
- [7] Lu, Y. & Xu, X. (2018). Resource virtualization: A core technology for developing cyber-physical production systems. *J. Manuf. Syst.*, 47, 128–140. doi: 10.1016/j.jmsy.2018.05.003.
- [8] Urbina Coronado, P.D., Lynn, R., Louhichi, W., Parto, M., Wescoat, E. & Kurfess, T. (2018). Part data integration in the Shop Floor Digital Twin: Mobile and cloud technologies to enable a manufacturing execution system. *J. Manuf. Syst.*, 48, 25–33. doi: 10.1016/j.jmsy.2018.02.002.
- [9] Schluse, M., Priggemeyer, M., Atorf, L. & Rossmann, J. (2018). Experimentable Digital Twins-Streamlining Simulation-Based Systems Engineering for Industry 4.0. *IEEE Trans. Ind. Informatics*, 14(4), 1722–1731. doi: 10.1109/TII.2018.2804917.
- [10] Saraç, T., Erten, K. & Yılmaz, E. (2018). Kaynak Makinelerinin Vardiya Bazında Çizelgenmesi Problemi İçin İki Aşamalı Bir Çözüm Yaklaşımı. *Endüstri Mühendisliği*, 29(1–2), 2–14.
- [11] Eren, T. & Güner, E. (2002). Tek ve paralel makinalı problemlerde çok ölçütlü çizelgeleme problemleri için bir literatür taraması. *J. Fac. Eng. Archit. Gazi Univ.*, 17(4), 37–69.
- [12] Pinedo, M.L. (2016). Scheduling: theory, algorithms, and systems. 5. baskı. Cham. Springer.
- [13] Ji, W. & Wang, L. (2017). Big data analytics based fault prediction for shop floor scheduling. *J. Manuf. Syst.*, 43, 187–194. doi: 10.1016/j.jmsy.2017.03.008.
- [14] Manne, A.S. (1960) On the Job-Shop Scheduling Problem. *Oper. Res.*, 8(2), 219–223. doi: 10.1287/opre.8.2.219.
- [15] Sipahioglu, A. & Saraç, T. (2009) The performance of the modified subgradient algorithm on solving the 0-1 quadratic knapsack problem. *Informatica*, 20(2), 293-304. doi: 10.15388/informatica.2009.251.
- [16] Akyol Özer, E. & Saraç, T. (2012). Plastik parçalar üreten bir fabrikanın montaj hatlarının çizelgenmesi. *Endüstri Mühendisliği*, 23(2), 28–41.
- [17] Kasımoğlu, S., Demir, G., Yaz, B.P. & Utku, D.H. (2021). An Application: A Model with Sequence Dependent Setup Times for Parallel Machines for the Die House Station in a White Goods Manufacturing Company. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Derg.*, 4(1), 33–44.
- [18] Kaya, S. & Fırlalı, N. (2013). Multi Objective Flexible Job Shop Scheduling Problems. *Sigma*, 31(4), 605–623.
- [19] Kaya, S. & Fırlalı, N. (2016). Esnek atölye tipi çizelgeleme problemlerinin meta sezgisel yöntemler ile çözümüne yönelik bir inceleme. *SAÜ Fen Bilim. Enstitüsü Derg.*, 20(2), 223-224.
- [20] Moradi, E., Fatemi Ghomi, S.M.T. & Zandieh, M. (2011). Bi-objective optimization research on integrated fixed time interval preventive maintenance and production for scheduling flexible job-shop problem. *Expert Syst. Appl.*, 38(6), 7169–7178. doi: 10.1016/j.eswa.2010.12.043.
- [21] Yılmaz, O.F. & Durmusoglu, M.B. (2019). Multi-objective scheduling problem for hybrid manufacturing systems with walking workers. *Int. J. Ind. Eng. Theory Appl. Pract.*, 26(5), 625–650.
- [22] Sağır, M. & Okul, H.D. (2020). Restricted Enumeration And Machine Grouping Based Approach for Hybrid Flexible Flow Shop Scheduling Problems With Sequence-Dependent Setup Times. *Journal of Industrial Engineering (Turkish Chamber of Mechanical Engineers)*, 31(3).
- [23] Zhang, Y., Huang, G.Q., Sun, S. & Yang, T. (2014). Multi-agent based real-time production scheduling method for radio frequency identification enabled ubiquitous shopfloor environment. *Comput. Ind. Eng.*, 76(1), 89–97. doi: 10.1016/j.cie.2014.07.011.
- [24] Freitag, M. & Hildebrandt, T. (2016). Automatic design of scheduling rules for complex manufacturing systems by multi-objective simulation-based optimization. *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, 65(1), 433–436. doi: 10.1016/j.cirp.2016.04.066.
- [25] Kan, C., Yang, H. & Kumara, S. (2018). Parallel computing and network analytics for fast Industrial Internet-of-Things (IIoT) machine information processing and condition monitoring. *J. Manuf. Syst.*, 46, 282–293. doi: 10.1016/j.jmsy.2018.01.010.
- [26] Turker, A.K., Aktepe, A., Inal, A.F., Ersoz, O.O., Das, G.S. & Birgoren, B. (2019). A decision support system for dynamic job-shop scheduling using real-time data with simulation. *Mathematics*, 7(3), 278. doi: 10.3390/math7030278.
- [27] Zhang, M., Tao, F. & Nee, A.Y.C. (2021). Digital Twin Enhanced Dynamic Job-Shop Scheduling. *J. Manuf. Syst.*, 58, 146–156. doi: 10.1016/j.jmsy.2020.04.008.

The Swept Volume of a Circular Paraboloid End Mill Moving Along a Helical Path

Helisel Bir Yörüngede Hareket Eden Dairesel Paraboloid Parmak Frezenin Süpürme Hacmi

Ahmet DOGRUSADIK¹ 

¹*Dogus University, Department of Mechanical Engineering, 34775, Istanbul, Turkey*

Abstract

To obtain complex part geometries at one pass using machining processes, it is important to employ the tools with non-conventional geometries. A circular paraboloid is a solid of revolution, which can be obtained by rotating a parabola. The swept volume of an end mill can be defined as the unification of all sets of points on the tool for every instant as it moves, and its derivation is an obligation to determine the machined part geometry prior to an actual machining process. After derivation of the swept volume of the tool, machined part geometry is obtained by subtracting the swept volume of the tool from the volume of the initial workpiece. However, derivation of the swept volume of the tool is not a straightforward task. In this work, an analytical model was introduced to derive a complete set of points on the machined part by means of well-defined and constrained tool geometry and tool path. In the model, a plane that passes through the screw axis was used to observe the instant cross-section of the tool as it moves along the helical path. By overlapping the instant cross-sections of the tool in the plane, the final cross-section was derived. Since all cross-sections that pass through the screw axis are identical, the method gives an entire set of points on the machined surface. To validate the model, a computer-aided design program was utilized.

Keywords: Milling, Circular paraboloid end mill, Helical path, Swept volume.

Öz

Talaşlı imalat yöntemlerini kullanarak tek pasoda karmaşık parça geometrileri elde etmek için, geleneksel olmayan geometrilere sahip takımların kullanılması önemlidir. Dairesel paraboloid, bir parabolün döndürülmesiyle elde edilebilen katı bir cisimdir. Bir parmak frezenin süpürme hacmi, takım hareket ettikçe üzerindeki tüm noktaların her an için birleştirilmesi olarak tanımlanabilir ve bunun elde edilmesi gerçek bir talaşlı imalat işleminden önce işlenmiş parça geometrisini belirlemek için bir zorunluluktur. Takımın süpürme hacminin türetilmesinden sonra, işlenmiş parça geometrisi takımın süpürme hacminin ilk iş parçasının hacminden çıkarılmasıyla elde edilir. Ancak takım süpürme hacminin elde edilmesi basit değildir. Bu çalışmada, iyi tanımlanmış ve kısıtlanmış takım geometrisi ve takım yolu kullanılarak işlenmiş parça üzerindeki tüm noktaları elde etmek için analitik bir model sunulmuştur. Modelde takımın helisel yörünge boyunca hareket ederken anlık kesitini gözlemlemek için vida ekseninden geçen bir düzlem kullanılmıştır. Bu düzlemde takımın anlık kesitleri üst üste getirilerek, son kesit elde edilmiştir. Vida ekseninden geçen tüm kesitler özdeş olduğundan, yöntem işlenmiş parça yüzeyi üzerindeki noktaların kümesini vermektedir. Modeli doğrulamak için bilgisayar destekli tasarım programı kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Frezeleme, Dairesel paraboloid parmak freze, Helisel yörünge, Süpürme hacmi.

I. INTRODUCTION

There are several milling processes in which the tool path is a helix. One of them is the helical milling process. The helical milling is usually utilized as an alternative hole-making process that provides some advantages as compared to conventional drilling such as less tool wear, low cutting forces, better chip evacuation, and improved hole quality [1]. Another milling process that uses the helical path is thread milling which brings versatility to the thread-making as compared to thread tapping. Some of the advantages of thread milling are as follows. The threads with different diameters can be produced by the same tool as long as the tool diameter is less than the thread diameter, and thread milling provides better chip evacuation as compared to thread tapping [2]. In addition, spindle speed – feed synchronization is not required in the thread milling, thus higher cutting speeds can be employed [3]. Apart from hole-making and thread-making, a milling process with a helical path can be used to create internal and external helical grooves when the cutting tools that can machine undercuts are employed. A circular paraboloid end mill is one that can achieve this requirement. In a milling process with a helical tool path, the cross-section of the machined part is not merely determined by the tool geometry. An overcut caused by the helical path also affects the cross-section. This issue was pointed out for the thread milling process in which the cutting tool can machine undercuts [4]. A similar overcut occurs when the helical grooves are milled by using a helical path.

Swept volume generation is a common problem for many different areas. It is required for the path planning of the robots [5], collision detection [6], verification of NC machining [7], and solid modeling [8]. In the literature, several approaches have been introduced to derive the swept volumes such as Jacobian rank deficiency method [9], Sweep-envelope differential equation method [10], and Envelope theory [11]. However, the methods based on the solution of complex differential equations are not appropriate in application due to the fact that they require numerical calculations resulting in high computation cost and time [12]. Approximate solution techniques based on time and tool discretization were also proposed for the simulation of machining processes [13, 14]. However, an approximation error exists for such methods. An analytical model for the swept volume of a solid is very difficult to obtain when considering an arbitrary path for the solid. In this work, it was possible due to well-defined and constrained tool geometry and tool path.

The proposed method in this paper gives the equation of the exact cross-sectional profile of the machined surface without numerical calculation when a circular paraboloid end mill is used along a helical path. Since the path is a helix and the tool is axis-symmetrical, every cross-section of the machined part is identical except for a shift in the cross-section along the screw axis. Therefore, the equation of the cross-sectional profile in a plane is once found, this can be used to derive the entire set of points on the machined part surface. The model utilizes a fixed observer plane ($x - y$) that passes through the screw axis. As the tool rotates about the screw axis along the helical path, it intersects the observer plane. At every value of the tool rotation angle, a different cross-section of the tool occurs in the observer plane. The cross-sectional profile of the machined part can be obtained by overlapping the instant cross-sections of the tool.

In the following sections, first, the analytical model was introduced. Then, simulation work was presented. In the results and discussion section, analytical results were compared to those of simulation, and the cross-section of the swept volume was evaluated. Finally, the outcomes of the work were given in the section of conclusions.

II. ANALYTICAL MODEL

Figure 1 illustrates the helical milling with a circular paraboloid end mill for both internal and external helical grooves. The tool contains upper and lower circular paraboloids that are symmetrical about the horizontal axis. For the model, only the upper portion was considered due to symmetry. The general equation of a circular paraboloid is given in Equation (1).

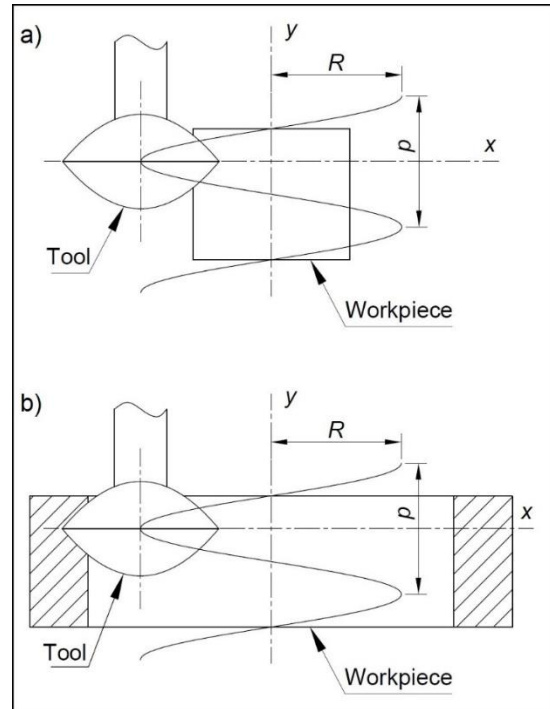


Figure 1. The helical milling with a circular paraboloid end mill. a) External groove. b) Internal groove.

$$(y - y_0) = a(x - x_0)^2 + a(z - z_0)^2 + b \tag{1}$$

where a and b are the paraboloid constants and x_0 , y_0 , and z_0 are center coordinates of the tool. As the tool moves along the helical path, the center coordinates of the circular paraboloid change with respect to the tool rotation angle, φ (Figure 2). These coordinates are expressed as the functions of φ in Equations (2-4).

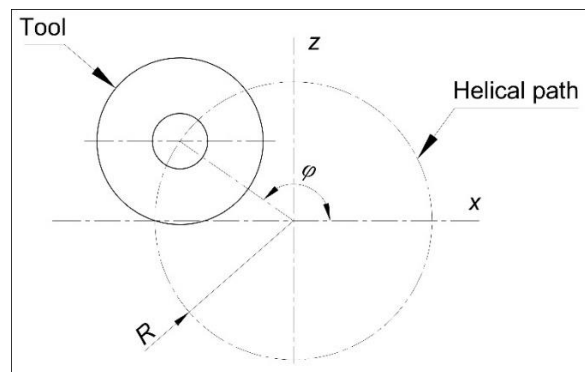


Figure 2. Illustration of the tool rotation angle.

$$x_0 = R \cos \varphi \tag{2}$$

$$y_0 = \frac{p}{2} - \frac{p\varphi}{2\pi} \tag{3}$$

$$z_0 = R \sin \varphi \tag{4}$$

where p is the pitch of the helix and R is the radius of the helix. The first term on the right side of Equation (3) is the initial tool position. Substituting the right sides of the Equations (2-4) into x_0 , y_0 , and z_0 in Equation (1), Equation (5) is derived.

$$\left(y - \frac{p}{2} + \frac{p\varphi}{2\pi}\right) = a(x - R \cos \varphi)^2 + a(z - R \sin \varphi)^2 + b \quad (5)$$

Equation (5) is the equation of the circular paraboloid with the variable center for the helical path. Since the equation of the cross-section of the circular paraboloid is required in $x - y$ plane, z in Equation (5) is set to zero. Finally, Equation (6) is derived by arranging Equation (5).

$$y = ax^2 - 2axR \cos \varphi + aR^2 + b + \frac{p}{2} - \frac{p\varphi}{2\pi} \quad (6)$$

Since the upper portion of the tool is investigated, the constant a must be negative for the concave downward curve. Equation (6) must be constrained along y axis by Equation (7) that passes through the center of the tool. Otherwise, it produces an infinitive curve along the negative direction of y axis.

$$y = \frac{p}{2} - \frac{p\varphi}{2\pi} \quad (7)$$

As φ varies in Equation (6), a different curve occurs in $x - y$ plane belonging to the instant cross-section of the tool. To determine the curve that surrounds the curves, Fermat's theorem was applied to Equation (6). According to this, the critical value of φ that maximizes y value can be found by taking the partial derivative of Equation (6) with respect to φ and then equating to zero in Equation (8). Equation (9) is derived by solving Equation (8) for the second quadrant of $x - y$ plane. Substituting the right side of Equation (9) into φ in Equation (6), the equation of the cross-section of the machined part can be found in Equation (10) for the second quadrant of $x - y$ plane.

$$\frac{\partial y}{\partial \varphi} = 0 \quad (8)$$

$$\varphi = \pi - \sin^{-1}\left(\frac{p}{4\pi a R x}\right) \quad (9)$$

$$y = ax^2 + 2axR \sqrt{1 - \left(\frac{p}{4\pi a R x}\right)^2} + aR^2 + b + \frac{p}{2\pi} \sin^{-1}\left(\frac{p}{4\pi a R x}\right) \quad (10)$$

However, Equation (10) was derived without constraining Equation (6). Therefore, the path of the intersection point of Equation (6) and Equation (7) was used in the second quadrant of $x - y$ plane in order to obtain the remaining portion of the cross-section. φ in Equation (7) was derived as a function of y in Equation (11). Then, the right side of Equation (11) was substituted into φ in Equation (6). Finally, Equation

(12) was derived in the second quadrant of $x - y$ plane, which gives the path of the intersection point.

$$\varphi = \pi - \frac{2\pi}{p} y \quad (11)$$

$$y = \frac{p}{2\pi} \cos^{-1}\left(-\frac{ax^2 + aR^2 + b}{2axR}\right) \quad (12)$$

The entire cross-section of the machined part is mostly formed by Equation (10), and Equation (12) gives the remaining portion. The intersection point of these curves can be found by equating Equation (10) and Equation (12).

III. SIMULATION WORK

Helical milling with a circular paraboloid end mill resembles creating swept volume by using a solid of revolution along a helix in terms of created geometry. Therefore, a computer-aided design program was used to compare the analytical results. Many computer-aided design programs do not have a feature to create the swept volume of a solid. On the other hand, some of them provide the swept volume for limited solids. Solidworks 2016 is one of them that gives the approximate remaining volume after subtracting the swept volume of a solid by means of swept cut command, but the limitation is that the solid must be created by the revolution of lines and arcs rather than a parabola. Since a circular paraboloid is investigated, the command can be used after approximating the parabola. The parabola was created by line segments with constant intervals along x -axis. The interval was chosen as 0.2 mm for the simulation work. According to this value, the maximum deviation from the parabola was 0.0005 mm along y -axis. In Table 1, selected values of the parameters are shown for both analytical model and simulation work.

Table 1. Selected values of the parameters.

| Parameter | Value |
|-----------|-------|
| R (mm) | 20 |
| a (1/mm) | -0.05 |
| b (mm) | 7.2 |
| p (mm) | 20 |

In Figure 3, steps are shown for the simulation work. First, the circular paraboloid was created by rotating the approximated parabola. This was followed by the creation of the helical path. Since the command only works for subtracting the swept volume, an initial workpiece volume was created. Finally, the remaining volume was obtained by using the swept cut command. Calculation time was 558 seconds with an Intel i5 8265 1.6 GHz processor - 8 GB ram computer.

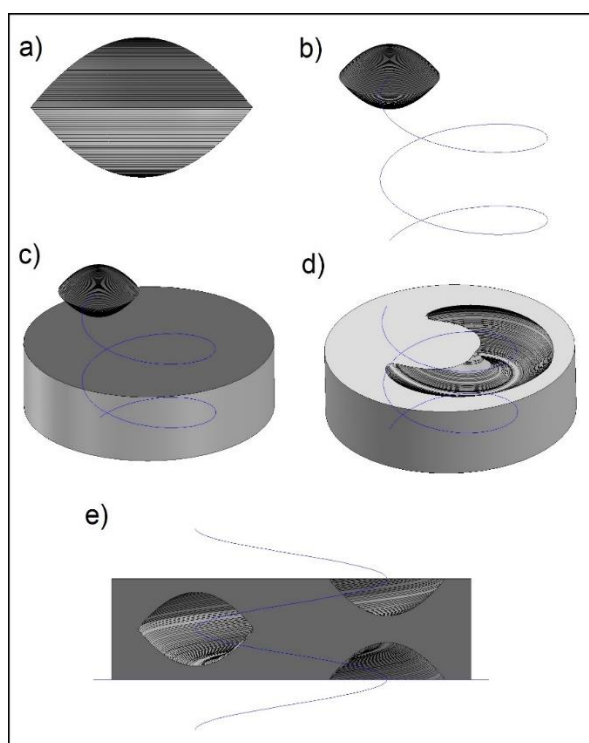


Figure 3. Simulation steps. a) Circular paraboloid was created by rotating the approximated parabola. b) Helical path was created. c) Initial workpiece volume was created. d) After swept cut command. e) Cross-sectional view.

IV. RESULTS AND DISCUSSION

The cross-sections which were obtained by both analytical model and computer-aided design program are shown in Figure 4. Some regions of the overlapped curves are scaled 20 times in the balloons. When the cross-sections are compared, it is observed that a deviation occurs in the cross-section of the swept volume derived by the computer-aided design program. This deviation cannot be attributed to the approximation error for the parabola because the deviation is greater than the approximation error.

The cross-section of the swept volume created by the computer-aided design program consists of the joined splines. Therefore, the form error between the curves created by both methods cannot be compared directly. For the comparison, coordinates of the points which were located with 0.1 mm interval along the horizontal axis on the curve were collected. The comparison was done for the upper portion of the cross-section since it is symmetrical about the horizontal axis. After collecting the points, the sum of squares of the errors along the vertical axis with respect to the curve derived by the analytical model was calculated, and the coefficient of determination (R^2) was obtained as 0.999 which indicates the goodness of the fit. Apart from the fit of the curve, the maximum deviations from the analytical curve were 0.008 mm for the upper bound and 0.052 mm for the lower bound. Another comparison between the curves is the intersection

points of the curve along x-axis, which should be -8 and -32 for the investigated case. However, these values were found as -8.040 and -31.999 in the simulation. The highest relative percentage form error is 0.5% for the end points. Based on these findings, it reveals that the deviation is relatively high in the end portions of the curve with respect to the remaining portions. Generation of swept volume in a CAD program is based on meshing. If the mesh size is decreased, a better approximation can be obtained. However, this increases the calculation time. On the other hand, the introduced model directly gives the cross-section of the swept volume.

Analytical model can be used to investigate the overcuts caused by the helical path. In Figure 5, the cross-section of the circular paraboloid end mill is compared to that of the swept volume. In this figure, overcuts produced by the tool can be observed in grey. Based on this illustration, it can be revealed that although the cross-section of the tool is symmetrical about the vertical axis, the cross-section of the swept volume is not symmetrical about the vertical axis. Besides, the overcut is higher for the external groove. It should be noted that the diameter of the internal groove is higher than that of external groove as seen in Figure 1.

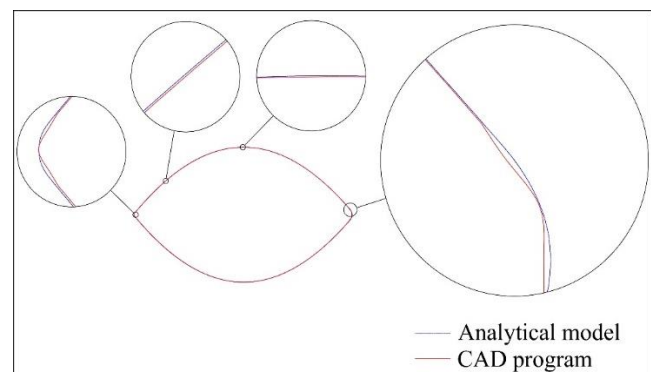


Figure 4. Overlapped image of the cross-sectional profiles derived by analytical model and computer-aided design program.

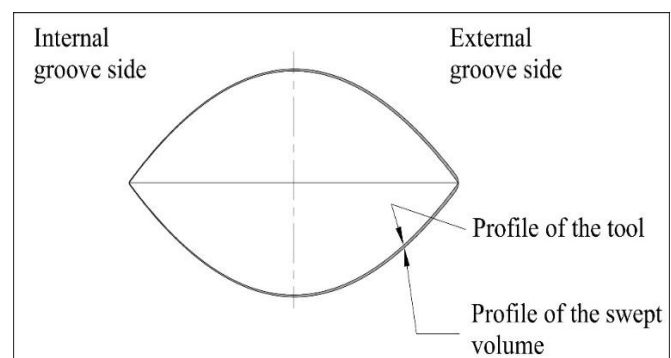


Figure 5. Overlapped image of the cross-section of the circular paraboloid end mill and the cross-section of the swept volume.

Although the helical path of the cutting tool was considered in this work, Equation 10 can be used to obtain the cross-section of the swept volume for the cutting tool moving along a circular path by substituting 0 into p . The approach can also be applicable to the case in which the tool path is linear. In such a case, the linear tool path should be fitted by a helix to obtain the cross-section of the swept volume approximately.

V. CONCLUSIONS

In this work, swept volume of the circular paraboloid end mill for a helical path was derived analytically. A case study was also presented for the selected values of the parameters of the circular paraboloid end mill and tool path. A computer-aided design program was used to evaluate the analytical model. It was observed that the calculation time was very high, 558 seconds for the generated swept volume when a computer-aided design program was used. The reason for the high calculation time was that the parabolic tool profile was approximated by using lines. On the other hand, the exact profile of the swept volume could be derived immediately by using the introduced model. It was found that a deviation occurs in the cross-section of the swept volume when the computer-aided design program is used. The analytical model also enables the investigation of the overcuts.

REFERENCES

- [1] Bruno Dutra Pereira, R., Brandão, L., Paiva, A., Ferreira, J., & Davim J., (2017). A review of helical milling process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 120, 27-48.
- [2] Araujo, A.C., Silveira, J.L., Jun, M.B., Kapoor, S.G., & DeVor, R., (2006). A model for thread milling cutting forces. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46, 2057-65.
- [3] Fromentin, G., & Poulachon, G., (2010). Geometrical analysis of thread milling—part 1: evaluation of tool angles. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 49, 73-80.
- [4] Fromentin, G., & Poulachon, G., (2010). Modeling of interferences during thread milling operation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 49, 41-51.
- [5] Perrin, N., Stasse, O., Baudouin, L., Lamiroux, F., & Yoshida, E., (2011). Fast humanoid robot collision-free footstep planning using swept volume approximations. *IEEE Transactions on Robotics*, 28, 427-39.
- [6] Täubig, H., Bäuml, B., & Frese, U., (2011). Real-time swept volume and distance computation for self collision detection. *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, San Francisco, CA, USA, 25-30 September 2011.
- [7] Weinert, K., Du, S., Damm, P., & Stautner, M., (2004). Swept volume generation for the simulation of machining processes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44, 617-28.
- [8] Abdel-Malek, K., Yang, J., & Blackmore, D., (2001). On swept volume formulations: implicit surfaces. *Computer-Aided Design*, 33, 113-21.
- [9] Abdel-Malek, K., & Yeh, H-J., (1997). Geometric representation of the swept volume using Jacobian rank-deficiency conditions. *Computer-Aided Design*, 29, 457-68.
- [10] Blackmore, D, Leu, M-C., & Wang, L.P., (1997). The sweep-envelope differential equation algorithm and its application to NC machining verification. *Computer-Aided Design*, 29, 629-37.
- [11] Pottmann, H., & Peternell, M., (2000). Envelopes-computational theory and applications. *Proceedings of Spring Conference on Computer Graphics*, 3-23, Comenius University, Bratislava, Slovakia.
- [12] Aras, E., (2019). Tracing sub-surface swept profiles of tapered toroidal end mills between level cuts. *Journal of Computational Design and Engineering*, 6(4), 629-649.
- [13] Boz, Y., Erdim, H., & Lazoglu, I., (2015). A comparison of solid model and three-orthogonal dexelfield methods for cutter-workpiece engagement calculations in three- and five-axis virtual milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 81, 811-23.
- [14] Nishida, I., Okumura, R., Sato, R., & Shirase, K., (2018). Cutting force simulation in minute time resolution for ball end milling under various tool posture. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 140(2), 021009.

Assessment of the Antibacterial Potency of *Usnea* sp. against Foodborne Pathogens

Usnea sp.'nin Antibakteriyel Etkisinin Gıda Kaynaklı Patojenlere Karşı Değerlendirilmesi

Orcun TOKSOZ¹ , Ipek TURKMENOGLU² , Didem BERBER³ , N. Cenk SESAL² 

¹Marmara University, Department of Biology, Institute of Pure and Applied Sciences, 34722, Istanbul, Turkey.

²Marmara University, Department of Biology, Faculty of Arts and Sciences, 34722, Istanbul, Turkey.

³Maltepe University, Fine and Arts Faculty, Gastronomy and Culinary Department, 34857, Istanbul, Turkey.

Abstract

The increase in the incidence of foodborne diseases has been demonstrated by epidemiological studies, and the adverse impact on the socio-economic development of countries has been also reported by health authorities. The combat against foodborne pathogens through the use of natural biosources has become the focus of recent research. Lichens produce several secondary metabolites with various biological activities including antibacterial, antifungal, anti-cancer etc. due to competition with other living things in their surrounding environment. In this perspective, we aimed to investigate the antibacterial properties of *Usnea* sp. that collected from Kastamonu, Turkey against five foodborne pathogens in the present study. These tested bacteria included both Gram-positive and Gram-negative ones. Our data demonstrated that the acetone extracts of *Usnea* sp. had antibacterial efficiencies especially against Gram-positive bacteria tested (*Clostridium perfringens*, *Staphylococcus aureus*, and *Bacillus cereus*) at varying percentages. This potential antibacterial activity of *Usnea* sp. suggests that it can be used in the food industry. Since it has already been reported to be used in dishes or ingredients of bread, it gives the idea that it may be used as a food additive (such as a preservative, extending shelf life). However, detailed studies for its toxicity or the dosages that do not be toxic should be done.

Keywords: Foodborne pathogen, lichen, *Usnea*, antibacterial.

Öz

Gıda kaynaklı hastalıkların görülme sıklığındaki artış, epidemiyolojik çalışmalarla ortaya konulmuş ve bu nedenle ülkelerin sosyoekonomik kalkınmalarına olan olumsuz etkisi de sağlık otoriteleri tarafından rapor edilmiştir. Doğal biyokaynakların kullanımı yoluyla gıda kaynaklı patojenlere karşı mücadele, son yıllardaki araştırmaların odak noktası haline gelmiştir. Likenler, çevrelerindeki diğer canlılarla rekabet etmeleri nedeniyle antibakteriyel, antifungal, anti-kanser vb. gibi çeşitli biyolojik aktivitelere sahip birçok ikincil metabolit üretirler. Bu açıdan, bu çalışmada Türkiye, Kastamonu'dan toplanan *Usnea* sp.'nin beş gıda kaynaklı patojene karşı antibakteriyel özelliklerini araştırmayı amaçladık. Bu bakteriler hem Gram-pozitif hem de Gram-negatif olanları içermiştir. Verilerimiz, *Usnea* sp.'nin aseton özütlelerinin özellikle test edilen Gram-pozitif bakterilere (*Clostridium perfringens*, *Staphylococcus aureus*, ve *Bacillus cereus*) karşı değişen oranlarda antibakteriyel etkinliğe sahip olduğunu göstermiştir. *Usnea* sp.'nin bu potansiyel antibakteriyel aktivitesi, gıda endüstrisinde kullanılabileceğini düşündürmektedir. Daha önce yemeklerde veya ekme malzemelerinde kullanıldığı bildirildiğinden, gıda katkı maddesi (koruyucu, raf ömrünü uzatan gibi) olarak kullanılabileceği fikrini vermektedir. Ancak toksisitesi veya toksik olmayan dozları için detaylı çalışmalar yapılmalıdır.

Anahtar Kelimeler: Gıda kaynaklı patojen, liken, *Usnea*, antibakteriyel.

I. INTRODUCTION

Foodborne diseases are of great importance in terms of public health because they cause many complications and death. The Centers for Disease Control and Prevention (2018) declared that 47.8 million people suffer from foodborne diseases, and amongst them, 128.000 hospitalizations and 3.000 deaths are reported each year in the United States [1]. Considering the epidemiology of foodborne diseases, some reasons for the worldwide increase of foodborne illness are attributed to large-scale production and distribution of food, increase in international food trade, rapid population increase, tourism increase, microbial adaptation, and antimicrobial resistance, etc. [2]. Foodborne diseases are considered as related to destitution in undeveloped countries, the danger for the transport of contaminated food across countries leads to increased cases of foodborne diseases. On the other hand, the exact incidence ratios of food poisoning cases cannot always be monitored and surveillance by public healthcare systems due to unreported cases or outbreaks [3, 4]. Unfortunately, there is not sufficient statistical data even in developing countries. To evaluate the incidence of foodborne illness requires some skill practices in food microbiology, chemistry, epidemiology, etc. Although these competencies can be provided in developing countries, there is some

lack of monitoring and surveillance systems for foodborne diseases [5]. Also, it is sometimes difficult to distinguish which diarrheal disease is food-related because all gastroenteritis is not food-related every time. Therefore, the precise global incidence of foodborne diseases is being investigated in several studies [4]. Foodborne pathogens such as *Escherichia coli* O157:H7, *Staphylococcus aureus*, *Listeria monocytogenes*, *Campylobacter jejuni*, *Clostridium perfringens*, and *Pseudomonas aeruginosa* are responsible from various diseases via contaminated by food or food processing equipment [6]. These bacteria are reported to be associated with acute such as abdominal pain, diarrhea, fever, malaise, sometimes bloody stools, dehydration, exhaustion, headache, and chronic complications such as erythema nodosum, hemolytic uremic syndrome, chronic kidney disease, Guillain-Barré syndrome (GBS), hemolytic-uremic syndrome, meningitis, pancreatitis etc. [7].

The pivotal importance of food safety has been emphasized in nutrition and food security since the primary affected group from these diseases are infants, young children, the elderly, and the sick [8]. These facts prompted the researchers to investigate the ways to combat food-related pathogen microorganisms and to prolong the shelf life of processed food to both protect the consumers' health and also ensure waste management [9]. Although more emphasis is placed on food processing technologies, transport, hygiene rules, and people know more about foodborne pathogenic microorganisms, governments cannot avoid economic losses and medical costs [10]. In addition, concerns about outbreaks associated with foodborne illnesses emphasize the importance of food safety. In order to ensure food safety, the use of alternative natural resources in food processing has come into prominence. In this respect, there are many studies investigating potential antimicrobial agents which have positive effects on shelf life, microbial degradation, oxidation reactions, etc. [11-15]. Natural biosources such as plants, lichens, animals, etc. are known to have unique compounds with properties of medicinal and numerous biological activities [16].

Lichens are symbiotic living organisms that are composed of their algae or cyanobacteria (photobiont) and fungal (mycobiont) partners that show mutualistic beneficial relationships among themselves [17]. They are one of the natural resources with many biological activities. Lichens can survive in various geographic areas, sometimes even in extreme conditions [18]. From ancient times, lichen species have been utilized for food and ethnomedicinal purposes in various countries. In addition, it has been reported that lichens have abundant nutrients (carbohydrate, crude fiber, and ash) that vary according to the species [19]. On the other hand, various pharmacological activities of lichens such as antioxidant, anticancer, antimicrobial, anti-inflammatory, antidiabetic etc. have been reported in the literature. The health benefits of these organisms

are attributed to various secondary metabolites [18]. It has been stated that 2.000 of the 20.000 species belonging to various lichens are localized in different regions in Turkey. Different biological activities of these lichen species were investigated in various studies [20, 21]. It has been reported that some species of lichens such as *Cetraria islandica*, *Cladonia rangiferina*, *Platismatia glauca*, *Usnea barbata*, *Usnea longissima*, etc. have been included in some dishes such as salads or in bread as well as incorporated into traditional healing practices such as poultice and tea [19]. In India, Dagad Phool (Stone Flowers) spice mixture containing various *Parmeliaceae* species (especially *Parmotrema* and *Everniastrum* species) also with *Ramalina* and *Usnea* species. These lichens were also reported to be added to curry as a bulking agent and preservative. The taste of *Usnea* sp. (beard lichen) is sweet to bitter with high carbohydrate (83.5-93%), protein (2-7.5%), and fat source (9%). This fructose lichen is distributed all over the world. The utilization of *Usnea* sp. as a bulking agent in soups, stews, and curries has been reported. For medicinal properties such as analgesic, antibacterial, antifungal, anti-inflammatory, anti-pyretic, anti-tumor, and antiviral etc. of this lichen species, dried, tincture or oil forms are used [22]. The utilization of *Usnea* species as decocted tea in Traditional Chinese Medicine (TCM) was reported in the literature. The usage dose was indicated as 60-120 mg usnic acid from 6-9 g of dried lichen per day [23]. This lichen is not very water-soluble; solvents are used to make an extract of *Usnea* sp. [22]. Usnic acid, a secondary metabolite found in *Usnea*, has been reported to be used in pharmaceuticals and cosmetics sectors with trade names such as Omnigran, Barba de la Piedra and etc., for the treatment of ailments or for personal care in different countries [23]. Based on the antibacterial activities of lichens against various bacteria, the potential to be used as a food additive or to provide hygienic conditions should be evaluated in the food industry.

From this point of view, our goal was to evaluate the potential antibacterial efficacies of the acetone extracts of *Usnea* sp. against five foodborne pathogens, *Bacillus cereus*, *Salmonella* sp., *S. aureus*, *E. coli* O157:H7, and *C. perfringens*, in this study. It was thought that the possible antibacterial effect would be meaningful for the food industry.

II. MATERIAL AND METHODS

2.1. Lichen Samples

The lichen samples belonging to *Usnea* sp. were harvested from Kastamonu province, Turkey weighing 20-30 gr. The identification of samples was performed by the classical taxonomic method via microscopic (stereomicroscope and light microscope) examination [24].

Usnea sp.: Turkey, Kastamonu province, Kapaklı Village, 41.24492, 34.18330, G. Cobanoglu.

2.2. The Preparation of Lichen Extracts

The samples were weighed and pulverized by liquid nitrogen in a porcelain mortar following the washing and drying steps. The samples (10 g) were kept in acetone solvent (100 mL) for 24 h, in a dark place and then, filtration was performed through filter paper. Evaporation of acetone was achieved with a rotary evaporator to obtain crude extracts.

2.3. Bacterial strains

In this study, *B. cereus*, *Salmonella* sp., *S. aureus*, *E. coli* O157:H7, and *C. perfringens* were tested. These bacterial strains were isolated from food samples by Eurofins Scientific Food Analysis Laboratory.

2.4. Antibacterial Test

B. cereus, *Salmonella* sp., *S. aureus*, *E. coli* O157:H7, and *C. perfringens* were grown in Tryptic Soy Agar at 37 °C for 24 h. The antibacterial tests of *Usnea* sp. extracts against test bacteria were performed in Tryptic Soy Broth via 96-well microplates (Greiner Bio-One, CellStar, F-bottom, with lid). The overnight bacterial cultures were adjusted to an optical density (OD) 0.01 at 600 nm in a 96-well plate. The extracts of *Usnea* sp. were applied for 12 dilutions. Control (untreated), blank wells, gentamicin and chloramphenicol as positive controls were also included in the experiments.

As stated in the literature, positive controls were chosen because they had good *in vitro* antibacterial activity against the bacteria tested. Experiments were done in triplicate. The absorbance of bacterial growth was measured for each bacterium for twenty-four hours using Cytation 3 multimode microplate reader (Biotek) at intervals of every 20 minutes.

III. RESULTS AND DISCUSSION

The antibacterial potency of the extracts of *Usnea* sp. was evaluated against *B. cereus* and our data showed inhibitory effects of test materials at the concentrations of 240, 120, 60, 30 and 15 µg/mL by the inhibition rates of 98.22±0.037, 96.03±0.015, 97.20±0.016, 90.71±0.012 and 94.70±0.014%, respectively. There were moderately suppressive effects at the tested concentrations of 7.5 µg/mL and 3.75 µg/mL with the inhibition percentages of 47.53±0.066 and 41.94±0.205, respectively. Other concentrations tested had no antibacterial effect against *B. cereus*. The

positive control (gentamicin) was also tested and completely killed this bacterium (Figure 1).

There was no noteworthy antibacterial effect against *Salmonella* sp. except first applied concentration (240 µg/mL). The other tested concentrations were not effective to inhibit bacterial growth of *Salmonella* sp. The positive control (gentamicin) had an inhibitory effect by the percentage of 98.91 (Figure 2).

We observed a remarkably suppressive effect on the bacterial growth of *S. aureus*. The inhibition percentages were recorded as 100, 100, 98.77±0.008, and 97.18±0.019 for the first four concentrations (240, 120, 60, and 30 µg/mL), respectively. Moderate antibacterial efficacy was detected at a concentration of 15 µg/mL with an inhibition rate of 47.81±0.26%. A very slight inhibition for the growth of *S. aureus* was determined at the concentrations of 7.5, 3.75 and 1.875 µg/mL (26.13±0.072%, 21.36±0.032% and 12.52±0.038%, respectively). For the concentrations of 0.9375 and 0.46875 µg/mL, there was no antibacterial effect against test bacterium. On the other hand, lower concentrations of the extracts of *Usnea* sp. had a stimulating effect on the bacterial growth of *S. aureus*. Chloramphenicol was tested as a positive control and the inhibition rate was calculated as 97.29% (Figure 3).

On the other hand, we did not observe any inhibitory effect against *E. coli* O157:H7. While no antibacterial effect was observed with the inhibition rates remaining at very low percentages such as 1.5% and 3%, even an increase in bacterial growth was observed at some concentrations, albeit at a very low rate. Gentamicin had an inhibitory effect on the bacterial growth by the percentage of 99.52 (Figure 4).

The antibacterial activity of *Usnea* sp. extract against *C. perfringens* was determined from 240 µg/mL to a concentration of 0.23 µg/mL for the eleven dilutions tested. The inhibition percentages were recorded as 46.74±0.053, 48.82±0.057, 47.77±0.023, 38.15±0.076, 35.42±0.183, 34.21±0.06, 52.71±0.028, 44.06±0.03, 42.11±0.013, 43.75±0.024, and 45.02±0.03. At the twelfth concentration, the inhibition ratio was detected as 21.63±0.05%. The antibiotic gentamicin was also tested in the experiments and the inhibition percentage was calculated as 99.95 (Figure 5).

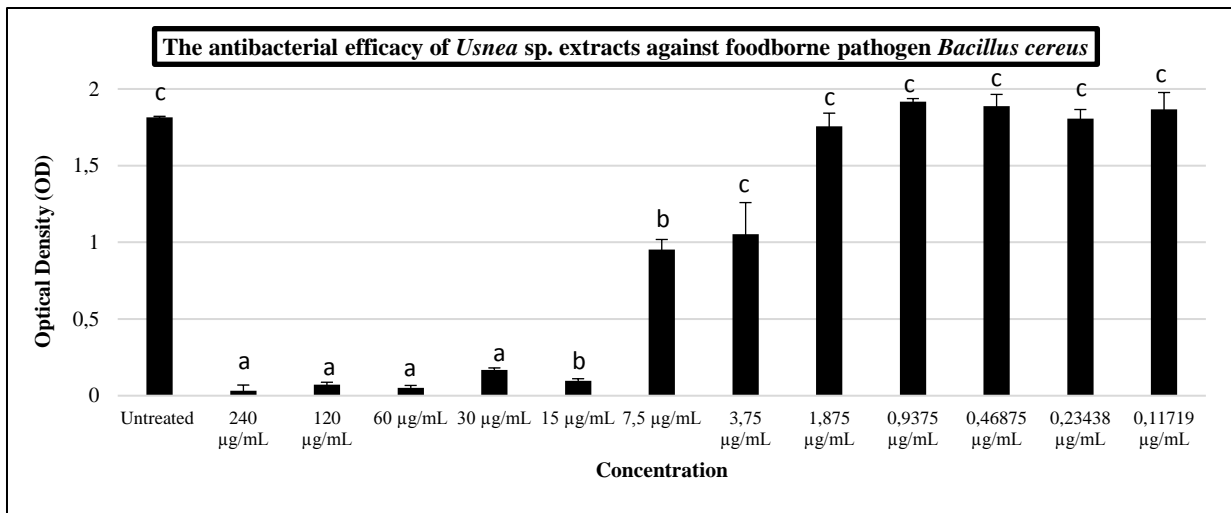


Figure 1. The antibacterial efficacy of extracts of *Usnea* sp. against *B. cereus*.

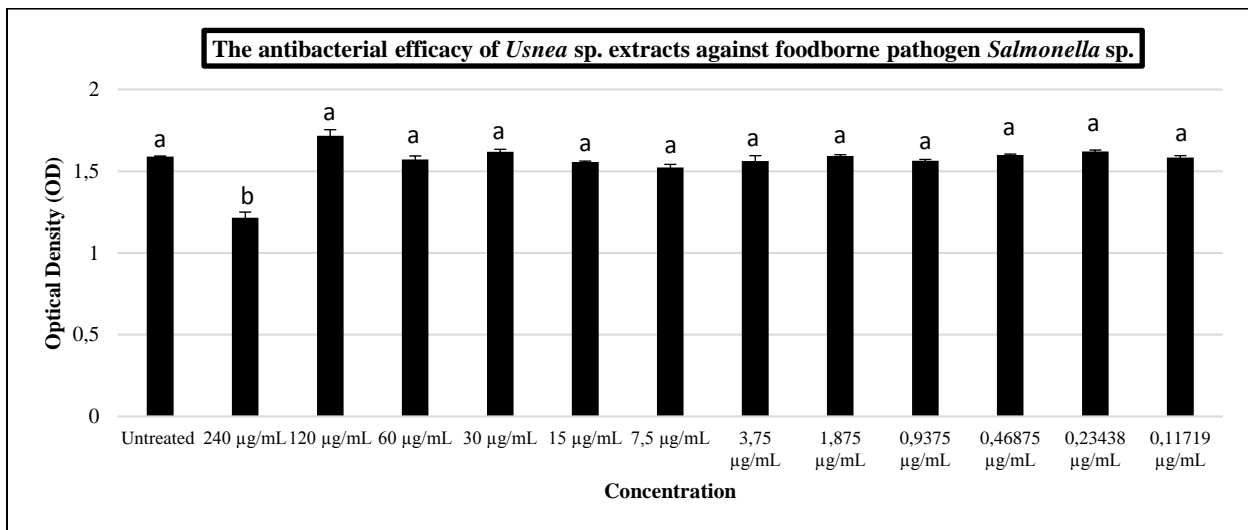


Figure 2. The antibacterial efficacy of extracts of *Usnea* sp. against *Salmonella* sp.

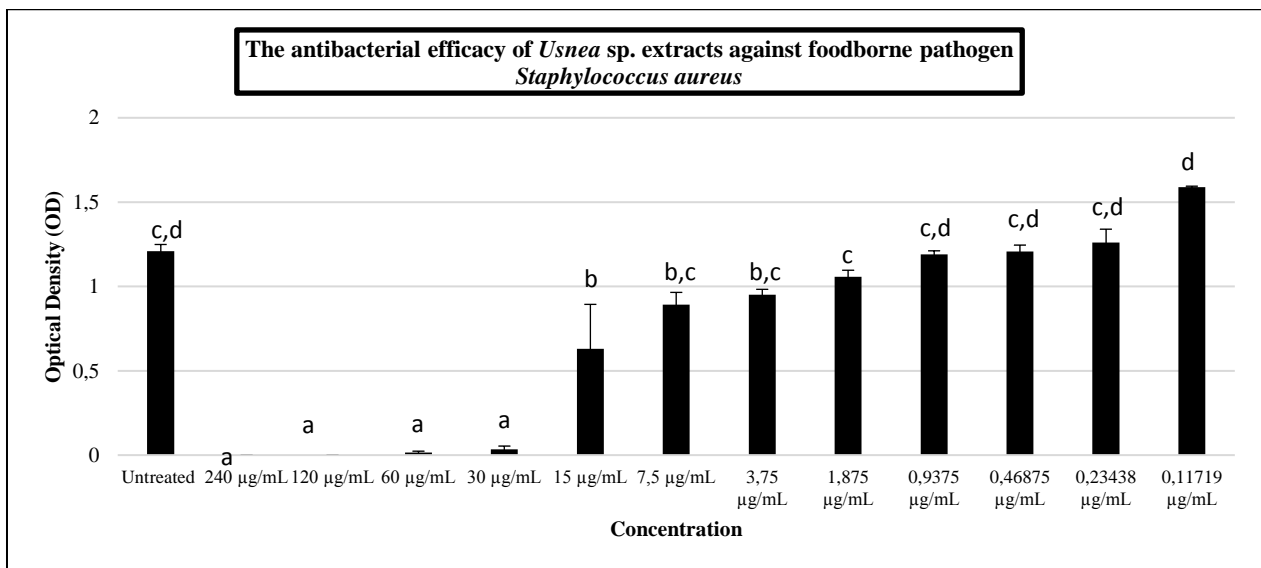


Figure 3. The antibacterial efficacy of extracts of *Usnea* sp. against *S. aureus*.

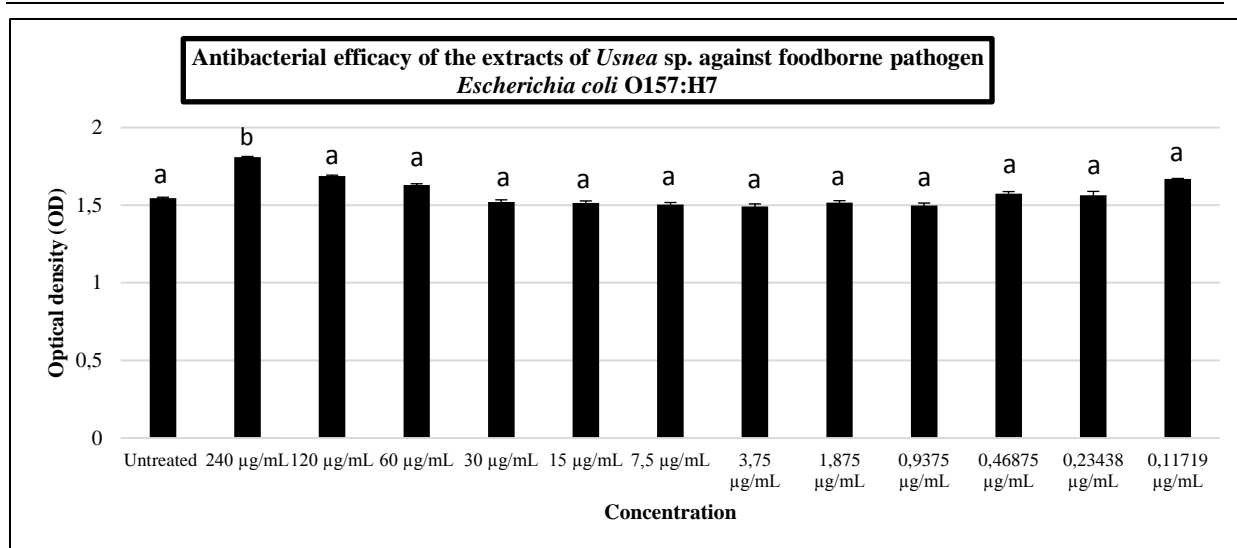


Figure 4. The antibacterial efficacy of extracts of *Usnea* sp. against *E. coli* O157:H7.

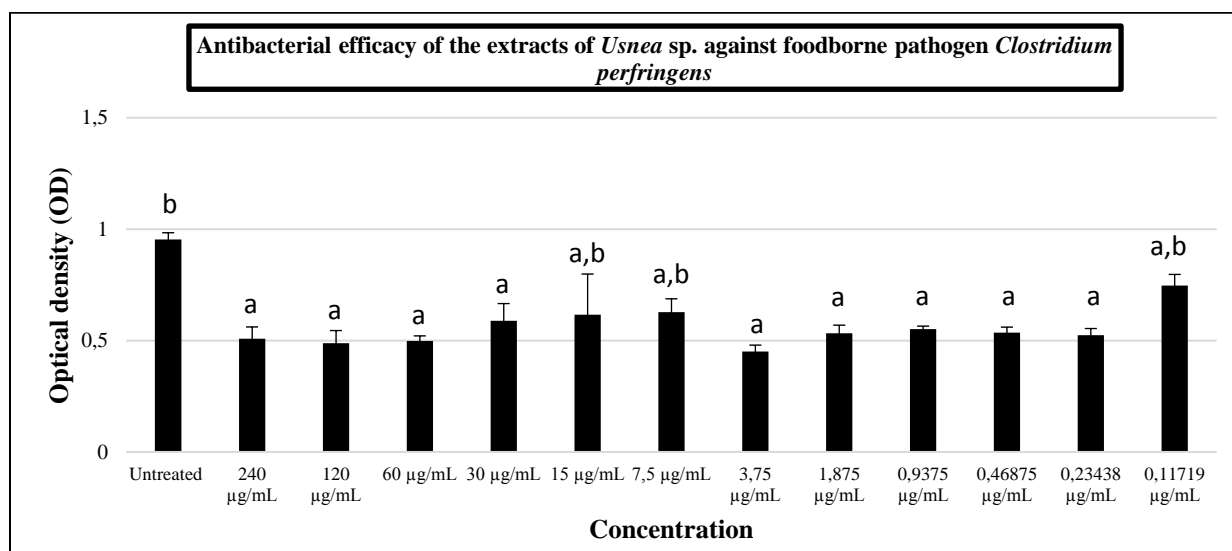


Figure 5. The antibacterial efficacy of extracts of *Usnea* sp. against *C. perfringens*.

In our study, we detected that *Usnea* sp. had inhibitory effects on the bacterial growth of *B. cereus*, *S. aureus*, and *C. perfringens* at varying percentages. Particularly, we selected the five foodborne pathogens, Gram-positive (*B. cereus*, *S. aureus*, and *C. perfringens*) and Gram-negative bacteria (*Salmonella* sp., and *E. coli* O157:H7) to compare the results. We observed the potential antibacterial efficiency against Gram-positive ones. On the other hand, we could not find any activity against Gram-negative bacteria that we tested. In accordance with our data, similar results were also emphasized in the literature. The differences in the cell membranes of these bacterial groups were indicated by the researchers as the reason for the different results between the two groups in studies where antibacterial potencies were tested [25]. Madamombe and Afolayan (2003) studied the antimicrobial efficacy of *U. barbata* against several bacteria and reported less activity against Gram-negative bacteria [26, 27]. Several solvents such as methanol, ethanol, ethyl acetate,

hexane, or acetone are used to obtain the secondary metabolites of lichens. In our study, we preferred to test acetone solvent due to its properties to provide wide-ranging extraction of the polar and semipolar constituents. In a study investigating the comparative effects of various solvents conducted by Bharti et al. (2022), less antibacterial activity was reported against Gram-negative bacteria (*E. coli*, *Klebsiella pneumoniae*, and *P. aeruginosa*) by the acetone, methanol, and 70% hydroalcoholic extracts of *U. longissima* [28]. Londoño-Bailon et al. (2019) evaluated the antibacterial potency of the extracts of *U. antarctica* and *U. aurantiaco-atra* against *S. aureus*, *Vibrio alginolyticus*, and *P. aeruginosa* and they detected antibacterial efficacy against *S. aureus* amongst tested bacteria [29]. Sepahvand et al. (2021) reported the more prominent antimicrobial effect of *Usnea* sp. against some Gram-positive including *S. aureus*, *B. subtilis*, *B. cereus*, and *Mycobacterium tuberculosis* whereas less activity against Gram-

negative bacteria [30]. These results show consistency with our results. For example, the MIC (minimum inhibitory concentration) value for methanol extracts of *U. ghattensis* against *B. subtilis* was reported to be 0.625 mg/mL [31]. Behera et al. (2005) found that the extracts of *U. ghattensis* that obtained via different solvents were effective against three *Bacillus* species, and *S. aureus* at the concentration of 5-10 µg/mL [32]. Similarly, we demonstrated the considerably high antibacterial effect of acetone extracts of *Usnea* sp. at 240 µg/mL concentration with the inhibition percentage of 98.22. Even at lower concentrations including 120, 60, 30 and 15 µg/mL, we observed the continuation of the effect with inhibition rates of 96.03%, 97.20%, 90.71% and 94.70%. We also observed efficacy at concentrations of 7.5 µg/mL and 3.75 µg/mL with inhibition percentages of 47.53 and 41.94, respectively. Furthermore, in accordance with our results, Shrestha (2015) reported no antibacterial effect of *U. hirta*, *U. lapponica*, and *U. strigosa* against *E. coli* [33]. However, the antibacterial potential of *Usnea* sp. against *E. coli* was reported in a study of Manoharachary and Nagaraju (2016) [34]. Bate et al. (2018) reported MIC value of methanol extract of *U. articulata* as 6 mg/mL [35]. These differences may be due to the type of lichen, the solvents used, the dosages applied, the geographical differences of the lichens harvested, the type of bacteria, and the secondary metabolites contained in the lichens. In the literature, it has been indicated that several extracts of *Usnea* sp. which obtained various solvents (*Umbilicaria americana*, *Usnea articulata*, *U. baileyi*, *U. barbata*, *U. ceratina*, *U. corallina*, *U. esperantiana*, *U. filipendula*, *U. florida*, *U. fulvovireagens*, *U. ghattensis*, *U. hirta*, *U. intermedia*, *U. lapponica*, *U. longissima*, *Umbilicaria mammulata*, *U. pectinate*, *U. rigida*, *U. strigosa*, *U. subflorida*, *U. subscabrosa*, *U. undulata*) had antibacterial effects against *S. aureus* [30]. Likewise, we also detected antibacterial potential against *S. aureus* at the concentrations of 240, 120, 60, and 30 µg/mL in our study. Weckesser et al. (2007) reported antibacterial efficacy of *U. barbata* extract against *C. perfringens* ATCC 13124 at low concentrations (MIC, 0.4 µg/mL) [36]. Our results showed moderate activity against foodborne pathogen *C. perfringens*, with the inhibition ratios ranging from 52.71% to 34.21%.

These antibacterial activities were attributed to the secondary metabolites of various lichen species such as depsides, depsidones, dibenzofurans, or xanthenes [37]. Phytochemical researches revealed the presence of various many chemicals in different *Usnea* species such as usnic acid, zeorin, ergosterol peroxide, psoromic acid, methyl-β-orcinolcarboxylate, atranorin, barbatic acid, usnic acid, diffractaic acid, usneaceratin A and B, evernic acid, constictic acid, sekikaic acid, squamatic acid, stictic acid, thamnolic acid, norstictic acid, β-orcinol, salazinic acid, protocetraric acid, chloroatranorin, barbatolic acid, lobaric acid, etc. [30, 38, 39]. In particular, usnic acid, a yellowish pigment

of *Usnea* sp., has been studied for its potential biological activities. Cansaran et al. (2006) studied six *Usnea* species against various Gram-positive and Gram-negative bacteria. *U. subflorida* was reported to have high antibacterial activities due to its abundant usnic acid content by the researchers [40]. In this study, since we could not detect any efficacy against Gram-negative bacteria, we may consider that potential antibacterial efficiency against Gram-positive bacteria may be due to other aforementioned chemicals. Unfortunately, it would be wrong to draw a definite conclusion from these results. In this respect, further studies have to be performed to analyze which chemicals of *Usnea* species, collected from different geographical regions, are responsible for this efficacy.

IV. CONCLUSION

In the present study, we demonstrated the antibacterial action of *Usnea* sp., collected from Kastamonu-Turkey, against Gram-positive *B. cereus*, *S. aureus*, and *C. perfringens*. Recently, the demands of customers in the food sector are directed towards natural food products. Natural biosources such as extracts or chemicals especially from plants are being investigated for utilization in food science by means of preserving foods (chicken, meat, etc.) or extending the shelf-life of foods. Foodborne diseases have great importance over the world due to the increasing numbers of patients affected by various food pathogens. Controlling these microorganisms means also handling foodborne diseases. Taking into consideration the potential of lichens for antibacterial activities, lichen-based products may be utilized in the food industry for preservation or extending the shelf-life of foods or beverages as food additives or providing hygiene conditions.

ACKNOWLEDGMENT

We are grateful to Prof. Gulsah Cobanoglu for identification of lichen species.

REFERENCES

- [1] The Centers for Disease Control and Prevention (CDC). (2018). Estimates of foodborne illness in the United States. <https://www.cdc.gov/foodborneburden/index.html>. (Accessed Nov 5, 2018).
- [2] İrfan, E. (2016). Yeni ve yeniden önem kazanan gıda kaynaklı bakteriyel zoonozların epidemiyolojisi. *Veteriner Hekimler Derneği Dergisi*, 87(2), 63-76.
- [3] Kearney, G.D. (2018). Introduction to Foodborne Illness Outbreak Investigation, Environmental Public Health: The Practitioner's Guide 2018, *American Public Health Association*. DOI: 10.2105/9780875532943ch13.
- [4] World Health Organization. (2008). Foodborne disease outbreaks: guidelines for

- investigation and control. World Health Organization.
- [5] Akhtar, S., Sarker, M.R., Hossain, A., (2014). Microbiological food safety: a dilemma of developing societies. *Critical Reviews in Microbiology*, 40(4), 348-359.
- [6] Miao, J., Liang, Y., Chen, L., Wang, W., Wang, J., Li, B., ... & Xu, Z., (2017). Formation and development of *Staphylococcus* biofilm: with focus on food safety. *Journal of Food Safety*, 37(4), e12358.
- [7] Buzby, J.C., Roberts, T., Lin, C.T.J., & MacDonald, J.M., (1996). Bacterial foodborne disease: medical costs and productivity losses. (No. 1473-2016-120748).
- [8] World Health Organization (WHO). (2020). World Health Organization. Food safety and foodborne illness. In World Health Organization fact sheet. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/food-safety>. (Accessed March 21, 2022).
- [9] Pisoschi, A.M., Pop, A., Georgescu, C., Turcuş, V., Olah, N.K., Mathe, E., (2018). An overview of natural antimicrobials role in food. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 143, 922-935.
- [10] Bouarab-Chibane, L., Forquet, V., Lantéri, P., Clément, Y., Léonard-Akkari, L., Oulahal, N., Degraeve, P., Bordes, C., (2019). Antibacterial properties of polyphenols: characterization and QSAR (Quantitative structure–activity relationship) models. *Frontiers in Microbiology*, 10, 829.
- [11] Baptista, R.C., Horita, C.N., Sant'Ana, A.S., (2020). Natural products with preservative properties for enhancing the microbiological safety and extending the shelf-life of seafood: A review. *Food Research International*, 127, 108762.
- [12] Jafarzadeh, S., Nafchi, A.M., Salehabadi, A., Oladzad-Abbasabadi, N., Jafari, S.M., (2021). Application of bio-nanocomposite films and edible coatings for extending the shelf life of fresh fruits and vegetables. *Advances in Colloid and Interface Science*, 291, 102405.
- [13] Sayyari, Z., Rabani, M., Farahmandfar, R., Esmaeilzadeh Kenari, R., Mousavi Nadoshan, R. (2021). The effect of nanocomposite edible coating enriched with *Foeniculum vulgare* essential oil on the shelf life of *Oncorhynchus mykiss* fish fillets during the storage. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 30(5), 579-595.
- [14] Kanatt, S. R., Chander, R., Sharma, A. (2010). Antioxidant and antimicrobial activity of pomegranate peel extract improves the shelf life of chicken products. *International Journal of Food Science & Technology*, 45(2), 216-222.
- [15] Márquez-Rodríguez, A. S., Nevárez-Baca, S., Lerma-Hernández, J. C., Hernández-Ochoa, L. R., Nevárez-Moorillon, G. V., Gutiérrez-Méndez, N., Muñoz-Castellanos, L.N., Salas, E. (2020). *In vitro* antibacterial activity of *Hibiscus sabdariffa* L. phenolic extract and its *in situ* application on shelf-life of beef meat. *Foods*, 9(8), 1080.
- [16] Raja, A., Gajalakshmi, P., Raja, M., Mahroop, M. (2010). Drugs from the natural bio sources for human disease. *International Journal of Pharmacology*, 6(4), 360-363.
- [17] Ivančević, B., Matavuly, M., & Karaman, M. (2012). Fungi (mushrooms and lichens) in Serbian legislation. *Biologia Serbica*, 34(1-2).
- [18] Molnár, K., Farkas, E. (2010). Current results on biological activities of lichen secondary metabolites: a review. *Zeitschrift für Naturforschung C*, 65(3-4), 157-173.
- [19] Zhao, Y., Wang, M., Xu, B. (2021). A comprehensive review on secondary metabolites and health-promoting effects of edible lichen. *Journal of Functional Foods*, 80, 104283.
- [20] John V, Turk A. (2017). Türkiye Likenleri Listesi [A checklist of the lichens of Turkey]. Istanbul: Nezahat Gokyigit Botanik Bahcesi Yayını.
- [21] Gökalsın, B., Berber, D., Özyiğitoğlu, G. Ç., Yeşilada, E., & Sesal, N. C. (2020). Quorum sensing attenuation properties of ethnobotanically valuable lichens against *Pseudomonas aeruginosa*. *Plant Biosystems-An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*, 154(6), 792-799.
- [22] Fowler, K. D. (2013). Journey to Enlichenment: Lichens in the Atlantic World Food Chain.
- [23] Guo, L., Shi, Q., Fang, J. L., Mei, N., Ali, A. A., Lewis, S. M., Leakey, J.E.A., Frankos, V. H. (2008). Review of usnic acid and *Usnea barbata* toxicity. *Journal of Environmental Science and Health, Part C*, 26(4), 317-338.
- [24] Smith, C. W., Aptroot, A., Coppins, B. J., Fletcher, A., Gilbert, O. L., James, P. W., Wolseley, P. A. (2009). The Lichens of Great Britain and Ireland. British Lichen Society, London. 1046 pp.
- [25] Srivastava, P., Upreti, D. K., Dhole, T. N., Srivastava, A. K., Nayak, M. T. (2013). Antimicrobial property of extracts of Indian lichen against human pathogenic bacteria. *Interdisciplinary Perspectives on Infectious Diseases*, 2013.
- [26] Madamombe, I. T., Afolayan, A. J. (2003). Evaluation of antimicrobial activity of extracts from South African *Usnea barbata*. *Pharmaceutical Biology*, 41(3), 199-202.
- [27] Popovici, V., Bucur, L., Calcan, S. I., Cuculea, E. I., Costache, T., Rambu, D., ... & Badea, V.

- (2021). Elemental Analysis and In Vitro Evaluation of Antibacterial and Antifungal Activities of *Usnea barbata* (L.) Weber ex FH Wigg from Călimani Mountains, Romania. *Plants*, 11(1), 32.
- [28] Bharti, S., & Nayaka, S. (2022). Evaluation of some traditional therapeutic properties of *Usnea longissima* (Ascomycota, lichenized fungi): antimicrobial, antiquorum and antioxidant. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, 11(4), e3163-e3163.
- [29] Londoño-Bailon, P., Sánchez-Robinet, C., Alvarez-Guzman, G. (2019). *In vitro* antibacterial, antioxidant and cytotoxic activity of methanol-acetone extracts from Antarctic lichens (*Usnea antarctica* and *Usnea aurantiaco-atra*). *Polar Science*, 22, 100477.
- [30] Sepahvand, A., Studzińska-Sroka, E., Ramak, P., Karimian, V. (2021). *Usnea* sp.: Antimicrobial potential, bioactive compounds, ethnopharmacological uses and other pharmacological properties; a review article. *Journal of Ethnopharmacology*, 268, 113656.
- [31] Prashith Kekuda, T.R., Mesta, A. R., Vinayaka, K. S., Darshini, S. M., & Akarsh, S. (2016). Antimicrobial activity of *Usnea ghattensis* G. Awasthi and *Usnea undulata* Stirt. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 8(12), 83-88.
- [32] Behera, B. C., Verma, N., Sonone, A., Makhija, U. (2005). Antioxidant and antibacterial activities of lichen *Usnea ghattensis* *in vitro*. *Biotechnology Letters*, 27(14), 991-995
- [33] Shrestha, G. (2015). Exploring the antibacterial, antioxidant, and anticancer properties of lichen metabolites. Brigham Young University.
- [34] Manoharachary, C., Nagaraju, D. (2016). Antimicrobial and antifungal activity of *Leptogium javanicum* mont. and *Usnea ghattensis* awasthi. *Int. J. Mod. Chem. Appl. Sci*, 3, 444-445.
- [35] Bate, P. N. N., Oroock, A. E., Nyongbela, K. D., Babiaka, S. B., Kukwah, A., Ngemenya, M. N. (2020). *In vitro* activity against multi-drug resistant bacteria and cytotoxicity of lichens collected from Mount Cameroon. *Journal of King Saud University-Science*, 32(1), 614-619.
- [36] Weckesser, S., Engel, K., Simon-Haarhaus, B., Wittmer, A., Pelz, K., & Schempp, C. Á. (2007). Screening of plant extracts for antimicrobial activity against bacteria and yeasts with dermatological relevance. *Phytomedicine*, 14(7-8), 508-516.
- [37] Pandey, A. (2017). Lichens: a resource chest of herbal antimicrobial compounds. *Int J Theoretic Appl Sci.*, 9, 137-146.
- [38] Žugić, A., Tadić, V., Kundaković, T., & Savić, S. (2018). Chemical composition and biological activities of the extracts and secondary metabolites of lichens belonging to the genus *Usnea*, Parmeliaceae. *Lekovite sirovine*, (38), 68-80.
- [39] Bui, V. M., Huynh, B. L. C., Pham, N. K. T., Nguyen, T. A. T., Nguyen, T. T. T., Nguyen, K. P. P., Nguyen, T. P. (2021). Usnaceratins A and B, two new secondary metabolites from the lichen *Usnea ceratina*. *Natural Product Research*, 1-6.
- [40] Cansaran, D., Kahya, D., Yurdakulol, E. and Atakol, O. (2006). Identification and quantitation of usnic acid from the lichen *Usnea* species of Anatolia and antimicrobial activity. *Zeitschrift für Naturforschung C.*, 61(11-12): 773–776.