

## Mandibular Asimetri ve Aseptomatik Denekler Arasındaki Temporomandibular Eklemde Biyomekanik Karşılaştırmanın Modifiye Sonlu Elemanlar Modellerini Kullanarak Yapılması

*The Biomechanical Comparison of The Temporomandibular Joint Between Mandibular Asymmetry and Asymptomatic Subjects Using Modified Finite Element Models*

Oğuz KAYABAŞI<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, 81620 Konuralp, Düzce

### Öz

Mandibular asimetri ve aseptomatik denekleri olan hastalar arasındaki temporomandibular eklemlerdeki (TME) gerilme dağılımlarının farklılıkları, modifiye üç boyutlu (3D) sonlu elemanlar (SE) modelleri kullanılarak karşılaştırıldı. 10 aseptomatik denek ve on mandibular asimetrik hasta sırasıyla Kontrol ve Vaka grubunu oluşturulmuştur. Homojen olmayan malzeme özellikleri, bilgisayarlı tomografiye (CBCT) göre yeniden yapılandırılan mandibula ve maksilla SE modellerinde kullanılmıştır. Etkileşim yüzeyleri temas elemanları olarak işlem görmüştür. Kuvvetler ve sınır şartları, iki tıkanmaya karşılık gelen iki gruba uygulanmıştır. Simülasyon, olgu grubundaki merkezi ve ön oklüzyonlar altında TME'lerin gerilmesindeki sapma olmayan ve sapma tarafları arasındaki anlamlı farkları ortaya koymuştur ( $p < 0.05$ ). Vaka grubundaki von Mises gerilmeleri, özellikle sapmamış taraftaki Kontrol grubundakilerden anlamlı derecede daha yüksek oluştu. Hastaların TME'sinde anormal dağılımlar ve stres konsantrasyonu da bulunmuştur. Sonuç olarak, modifiye SE modelleri, maksillofasiyal sistemi simüle etmek için daha gerçekçi bir yol sağlamıştır. Ayrıca, mandibular asimetri, TME'nin gerilmesini artırabilir. Mandibular asimetrisi olan hastalarda TME'nin aşırı gerilmeleri temporomandibular bozukluklarla (TMD) ilişkili olduğu gözlemlendi.

**Anahtar Kelimeler:** Mandibular asimetri, Temporomandibular eklem (TME), Sonlu elemanlar yöntemi, Temporomandibular bozukluklar (TMD).

### Abstract

The differences in stress distributions in the temporomandibular joints (TME) between patients with mandibular asymmetry and asymptomatic subjects were compared using modified three-dimensional (3D) finite element (SE) models. 10 asymptomatic subjects and ten mandibular asymmetric patients were formed the Control and Case group, respectively. Non-homogeneous material properties were used in mandible and maxilla SE models, which were reconstructed according to computed tomography (CBCT). Interaction surfaces were treated as contact elements. Forces and boundary conditions were applied to two groups corresponding to two blockages. Simulation revealed significant differences between the deviation of the TMJs under the central and anterior occlusions in the case group and between the deviation sides ( $p < 0.05$ ). The stresses of von Mises in the case group were significantly higher than those in the Control group on the non-deviating side. Abnormal distributions and stress concentrations were also found in the TMJ of the patients. As a result, modified SE models provided a more realistic way to simulate the maxillofacial system. Also, mandibular asymmetry can increase the tension of the TMJ. In patients with mandibular asymmetry, overstress of TMJ was observed to be associated with temporomandibular disorders (TMD).

**Keywords:** Mandibular asymmetry, Temporomandibular joint (TMJ), Finite element method, Temporomandibular disorders (TMD).

### I.GİRİŞ

Sadece insanın kafasındaki eklemler gibi temporomandibular eklemler (TME) günlük çiğneme, konuşma ve yutma üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Diğer eklemlerden farklı olarak, çalışma sırasında TME'ler bağlanmıştır. Farklı hareketler nedeniyle, tek TME oklüzyon ve mandibular deformeden etkilenir. Mandibular asimetri% 8.7 -% 23.3 arasında değişen belirgin bir prevalansı olan yaygın bir maksillofasiyal deformedir [1-4]. Mandibular asimetriye eşlik eden anormal konfigürasyon ve temporomandibular bozukluklar (TMD) bulunmuştur [5-8]. TME'deki

morfolojik farklılıklar, aseptomatik denekler ile mandibular asimetrik hastalar arasında bulunmuştur [6,7,9] ve erken dönem mandibular asimetriyi teşhis etmek için standart olarak düşünülebilir. Biyomekanik ortamdaki farklılıklar hafif mandibular asimetriyi tedavi etmek için önemli bir yaklaşım sağlayabilir. Bununla birlikte, ilgili biyomekanik analizin yetersizliği olmuştur.

Stomatolojide sonlu elemanlar (SE) analizi yoğun olarak geliştirilmiştir [10,11]. Oral bilim dalı olarak, TME'de SE yöntemleri de kullanılmıştır. Statik ve dinamik durumlarda sağlıklı bireyler için eklem disk veya eklem kırıkdağının stres ve yer değiştirme dağılımını simüle etmek için iki boyutlu FE modelleri kullanılmıştır [12,13]. Daha sonra, distraksiyon osteogenezinden önce ve sonra hastaların biyomekanik tepkisini elde etmek için 3D modeller geliştirilmiştir [14]. Ayrıca, aseptomatik denekler ve disk kayması olan hastalar için TME'nin kırıkdağ dokularının biyomekanik davranışlarını araştırılmıştır [15]. Mandibular asimetrik hastalarda mekanik değişiklikler ile iç düzensizliğin prevalansı arasında belirgin bir ilişki vardır [16]. Bununla birlikte, yukarıdaki çalışmalar homojen malzemeler olarak mandibula ve maksilla olarak kabul edilmiştir. Hepimizin bildiği gibi, mandibula homojen olmayan malzemelere aitti ve boş alanı, spongiosis ve diğer yapıları homojen malzemelerle doğru şekilde simüle edilemedi [17]. Bu nedenle, kemik yapılarını simüle etmek için homojen olmayan malzeme özellikleri gereklidir.

Bu çalışmada aseptomatik bireylerin ve mandibular asimetrik hastaların biyomekanik davranışlarını karşılaştırmak amacıyla SE modellerini yeniden oluşturmak için homojen olmayan malzeme özellikleri kullanılmıştır. Ayrıca, TME'deki stres dağılımları ile TMD semptomları arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Mandibular asimetri ve TMD için yeni bir tedavi stratejisi sağlayabilir.

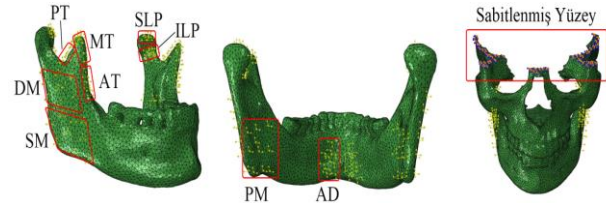
## II. MATERYAL VE YÖNTEM

Mandibular asimetri tanısı alan 10 aseptomatik denek (4 kadın, 6 erkek,  $26,7 \pm 4,8$  yaşında) ve 10 hasta (5 kadın ve 5 erkek,  $24,6 \pm 4,8$  yaşında) sırasıyla Kontrol ve Olgular grubu olarak görev yapmıştır. Daha önce TME ile ilişkili prosedürleri olmayan ve fasyal orta hattın sapan 5 mm'den fazla olan 18 yaşın üzerindeki hastalar bizim mandibula asimetrik hastaları olarak kabul edilmiştir. Sağlıklı bir fiziksel durumu olan, hiç TMD belirtisi olmayan, dejeneratif hastalık ve yüz simetrisine sahip olmayan kişiler önceden TME ile ilgili prosedürler olmadan Kontrol grubundan oluşuyordu. Ayrıca, klinik olgular TMD'li 7 hasta gösterdi ve bunların hepsinde TMJ klikası vardı, 5'inde eklem ağrısı, 6'sında eşzamanlı bilateral eklem hareketi ve 3'ünde ağız açıklığı sınırlıydı. Tüm bireylere yazılı bilgilendirilmiş onay verilmiş ve amaçlar için insan etik onayı alınmıştır. Solda mandibular sapma olan sekiz hasta vardı. Bir önceki çalışmaya göre [18], sağ ve sol

taraf sapmış ve sapmamış taraf olarak tanımlanmıştır. Kalan sağa mandibular sapma olan iki hasta, sağa mandibular sapma olan hastaların sol ve sağ tarafları sırasıyla, sapma tarafı ve sapma olmayan taraf olarak tanımlanmıştır.

Tüm SE modelleri, 400 x 400 piksel çözünürlükte CT'den (CBCT) elde edilmiştir. Her CBCT için dilim artışı 0.4 mm'dir. CBCT taramalarından mandibula, maksilla ve disk ayırt edildi ve diğer yapılardaki farklı gri değerlere göre SE modellerinde üretimiştir. Bu çalışmada, tüm kemik yapıları doğrusal elastik, izotropik homojen olmayan malzemeler olarak kabul edilmiştir. MIMICS'deki (Materialize, Leuven, Belgium) homojen olmayan malzeme özelliklerini simüle etmek için Young modülü ile Hounsfield birimleri arasındaki ilişkilere dayanan ampirik formüllerden 100 malzeme alınmıştır [19-23]. Poisson'un disk ve kemik yapılarının oranı ABAQUS'ta (Dassault SIMULIA, ABD) sırasıyla 0.4 ve 0.3 olarak tanımlanmıştır. Etkileşen yüzeyler, 0,001 [24] sürtünme katsayısına sahip bir temas modu olarak işlenmiştir. Temas bölgelerinde C3D10M eleman tipi kullanılmıştır. Modellerin diğer yapıları için C3D4 eleman tipi kullanılmıştır. Tüm modeller yaklaşık 210.000 elemandan oluşmuştur.

İki grubun modellerine merkezi ve anterior oklüzyonlara karşılık gelen yükler yapılmıştır. Dokuz ana kas kuvvetinin yönleri ve değerleri önceki çalışmalardan elde edilmiştir [25-27]. Ve üst yüzeyin altı serbestlik derecesi sınırlandırılmıştır. SE modeli Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Yükleme ve sınır şartları.

Çalışmamızda Von Mises gerilme seçilmiştir. Kontrol grubu için sol ve sağ taraflar arasında veya Durum grubu için sapma ve sapma olmayan taraflar arasındaki gerilmeler sırasıyla eşleştirilmiş örneklem t testi ile karşılaştırılmıştır. Ek olarak, Vaka ve Kontrol grupları arasındaki gerilmeler bağımsız örneklem t testi ile gerçekleştirilmiştir.

## III. BULGULAR

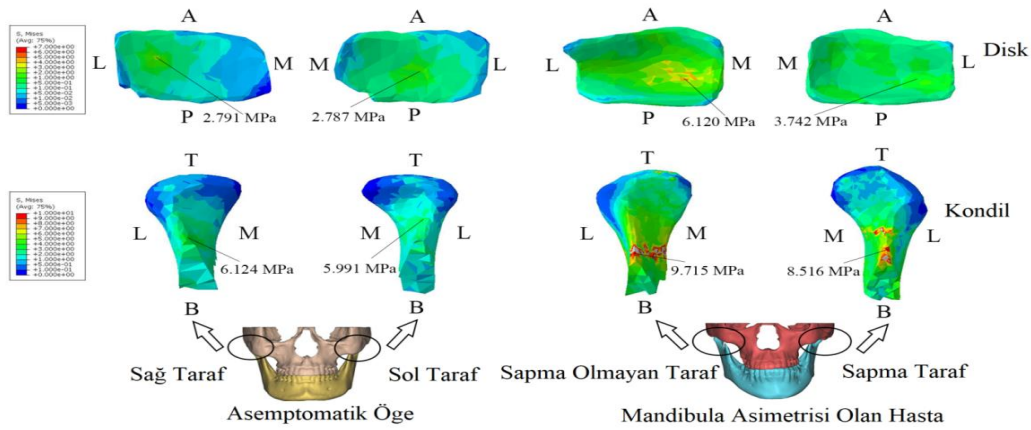
Sapmış olmayan taraftaki TME'nin Von Mises gerilmesi, iki oklüzyon altında Olgular grubunun sapmış taraftakilerden anlamlı derecede daha yüksek oluştu ( $p < 0.05$ ) (Tablo 1) (Şekil 2 ve Şekil 3). Bununla birlikte, Kontrol grubundaki TME'nin sol ve sağ tarafları arasındaki gerilme için iki oklüzyon altında anlamlı bir fark bulunmamıştır. Değerler Tablo 1'de gösterilmektedir.

**Tablo 1.** Mandibular asimetri ve santral ile anterior oklüzyonlar altındaki aseptomatik deneklerde temporomandibular eklemlerde von Mises gerilmenin (MPa) ortalama ve standart sapması.

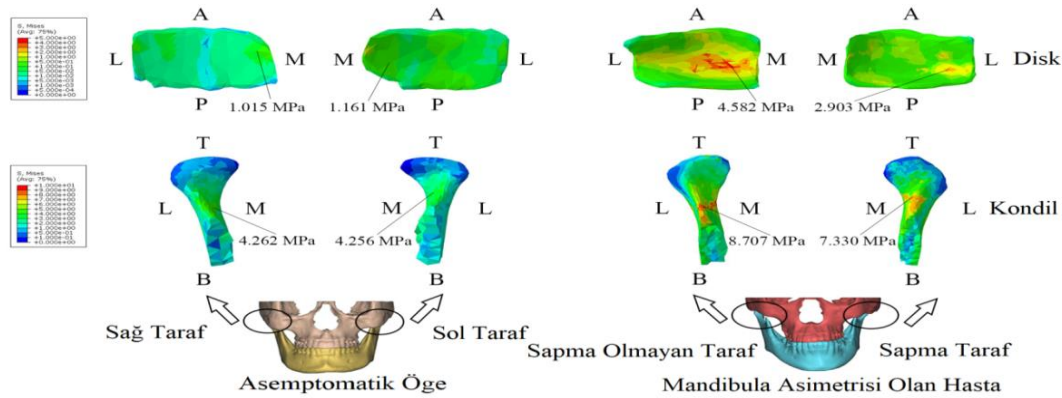
Vaka		Sapma olmayan taraf	Sapma taraf
Merkez oklüzyon	Disk	4.221±1.065	3.055±1.378*
	Kondil	9.669±2.659	6.934±1.159*
	Şakak kemiği	5.999±3.067	3.724±1.516*
Anterior oklüzyon	Disk	3.534±1.473	2.379±0.899*
	Kondil	8.253±2.620	6.628±2.050*
	Şakak kemiği	5.452±3.400	3.260±2.323*
<b>Kontrol</b>		<i>Sol taraf</i>	<i>Sağ taraf</i>

Merkez oklüzyon	Disk	2.165±1.287	2.198±1.043
	Kondil	5.782±0.915	5.559±1.006
	Şakak kemiği	2.399±2.753	2.435±2.489
Anterior oklüzyon	Disk	1.574±0.913	1.533±1.173
	Kondil	4.887±0.787	5.027±0.875
	Şakak kemiği	2.117±3.160	2.185±3.562

Not: NS anlamlı değil demektir. \* İkili numuneler t-testi ile sapmamış taraf ile sapmış taraf arasındaki istatistiksel olarak anlamlı fark ( $p < 0.05$ ). \*\* Eşleştirilmiş numuneler t-testi ile sapmayan taraf ile sapan taraf arasındaki istatistiksel olarak anlamlı fark ( $P < 0.01$ )



**Şekil 2.** von Mises, aseptomatik bir konunun ve merkezi tıkanıklık altındaki mandibular asimetrik bir hastanın kondillerinin disk ve gerilme dağılımlarını göstermektedir. A, ön; P, arka; M, medial; L, yan; T, üst; B, alt.



**Şekil 3.** von Mises, aseptomatik bir konunun ve ön oklüzyon altında bir mandibular asimetrik hastanın disklerinin ve kondillerinin gerilme dağılımlarını göstermektedir. A, ön; P, arka; M, medial; L, yan; T, üst; B, alt.

Simetrik gerilmeler nedeniyle, Tablo 2'de gösterilen Kontrol grubundaki gerilmelerin büyüklükleri her iki TME'nin ortalaması olarak oluşmuştur. Sonuçlar, Vaka grubundaki TME'lerin von Mises gerilmesi kontrol grubundakilerden daha yüksek olduğunu göstermiştir (Tablo 2). Vaka grubundaki TME'lerin sapma olmayan taraflarındaki gerilme, iki oklüzyon altındaki Kontrol grubundakilere göre anlamlı ya da yüksek derecede anlamlıydı ( $p < 0.05$ ). Vaka grubunun sapmış taraflarında, von Mises, Vaka grubu için disklerin stresleri, ön oklüzyon altındaki Kontrol grubundakilerden anlamlı derecede daha gerçekteştir (Tablo 2).

**Tablo 2.** Merkez ve anterior oklüzyonlar altındaki çalışma ve kontrol grupları için emporomandibular eklemden von Mises gerilmesinin (MPa) ortalama ve standart sapması.

		Vaka		
		Kontrol	Sapma olmayan taraf	Sapma taraf
Merkez oklüzyon	Disk	2.182± 1.145	4.221± 1.065**	3.055± 1.378
	Kondil	5.671± 0.924	9.669± 2.659**	6.934± 1.159†
	Şakak kemiği	2.417± 2.505	5.999± 3.067*	3.724± 1.516
Anterior oklüzyon	Disk	1.553± 0.844	3.534± 1.473**	2.379± 0.899†
	Kondil	4.957± 0.779	8.253± 2.620**	6.628± 2.050
	Şakak kemiği	2.151± 3.356	5.452± 3.400*	3.260± 2.323

Not: Olgu; mandibula asimetrisi olan hastalar; Kontrol: normal konular.  $p > 0.05$ , anlamlı değil. \* Olgu grubunun ve kontrol grubunun sapmayan tarafları arasındaki bağımsız örneklem t testi ile istatistiksel olarak anlamlı fark bulundu ( $p < 0.05$ ). \*\* Olgu grubunun sapmamış tarafı ile Kontrol grubu arasındaki bağımsız örneklem t-testi ile istatistiksel olarak anlamlı fark. ( $P < 0.01$ ). † Bağımsız örneklem t-testi ile vaka grubunun ve kontrol grubunun sapmış tarafı arasındaki istatistiksel olarak anlamlı fark ( $p < 0.05$ ). †† Bağımsız örneklem t-testi ile olgu grubunun ve Kontrol grubunun sapmış tarafı arasında istatistiksel olarak anlamlı fark. ( $P < 0.01$ ).

TME'lerin von Mises gerilme dağılımlarına gelince, maksimum von Mises gerilmeleri, kontrol grubundaki iki tikanıklık altında esas olarak diskin orta bölgesinde bulunmuştur. Ancak, hastalar için diskin maksimum von Mises gerilme dağılımları Kontrol grubundakilerden farklı oluşmuştur (Tablo3).

**Tablo 3.** Vaka grubunda diskteki maksimum von Mises stresi yerleri.

	Orta bölge	Posterior bölge	Anterior bölge
Disk			
Sapma olmayan taraf	6	4	0
Sapma taraf	6	2	2

#### IV. TARTIŞMA

Önceki çalışmalar, mandibular asimetrisi olan hastalarda TME'nin morfolojisi ve konumlarının normal deneklerden farklı olduğunu doğrulamıştır [5,6]. Bununla birlikte, normal denekler ve hafif belirtileri ve semptomları iyileştirmede altın kriter haline gelebilecek olan TME'nin gerilme dağılımındaki mandibular asimetrik hastalar arasındaki biyomekanik farklılıklar hala net değildir. Bu nedenle, TME'deki gerilme dağılımlarının mandibular asimetrisi olan hastalar ve normal denekler arasındaki farkları analiz etmek için gereklidir.

Maksillofasiyal modeller önceki çalışmalarda her zaman homojen malzemeler olarak düşünülmüştür [28,29]. Çalışmamızda karmaşık TME yapısını simüle etmek için tek bir malzeme özelliğini kullanmak yanlış oldu. Gri değer ile tanımlanan malzeme özelliklerinin kemiğin simülasyonunda oldukça doğru olduğu gösterilmiştir. Gri değere ve Hounsfield ünitelerine dayanan ampirik ilişkiler, farklı Young modüllerini TME'deki homojen olmayan kemik yapıları simüle etmek için atamak için kullanılmıştır [19]. Mandibula ve maksillaya, sırasıyla ilgili formüllere göre 100 farklı malzeme atanmıştır. Spongiosis ve boş alanlar tek malzeme özelliklerinde genellikle göz ardı edilmiş, homojen olmayan malzemeler kemik yapısını simüle etmek için daha doğru bir yol sağlanmıştır [17]. Ek olarak, disk ve kondil arasındaki, disk ve geçici kemikler arasındaki ve üst ve alt dişler arasındaki yüzeylerin, 0.001 sürtünme katsayısı ile temas ettiği kabul edilmiştir. 3D baskı modellerinin deneyleri, TME yapılarındaki etkileşimlerin simülasyonu için sürtünmeli temasın makul ve güvenilir olduğunu doğrulamıştır [30]. Bu nedenle, değiştirilmiş modeller çalışmamızda daha gerçekçi bir simülasyon sunmuştur.

Kontrol grubu için her iki TME arasında simetrik gerilme dağılımları karşılaştırıldığında, TME'nin gerilme dağılımları, merkezi tıkanma veya ön tıkanma ne olursa olsun, mandibular asimetrik hastalar için anlamlı derecede asimetrik olmuştur (Tablo 1). Sonuçlar, asimetrik geometrinin, TMJ'nin asimetrik stres dağılımına yol açacağını göstermiştir. Bu arada, von Mises TMJ'nin sapmamış tarafındaki stresler sapmış taraftakilerden önemli ölçüde daha büyüktü. TME'nin, eklemde sapma tarafında ciddi sıkışmalara yol açan hastalar için sapma olmayan tarafta daha fazla

gerginlik ve kompresyona sahip olduğu açıktır. TMJ'nin bu asimetrik stres dağılımları, TMJ'nin uyumsuz fizyolojik fonksiyonlarına katkıda bulunmuştur. Klinik olgu kayıtlarında sınırlı ağız açıklığı (10 hastanın 3'ü) ve eşzamanlı bilateral eklem hareketi (10 hastanın 6'sı) bulundu.

Vaka grubundaki TME'lerin ortalama en yüksek von Mises gerilmeleri, Kontrol grubundakilerden açıkça daha büyüktür. TME'deki tüm parçaların von Mises gerilmelerinde, Vaka grubundaki ve Kontrol grubundaki iki taraf arasında sapma olmayan taraf arasında anlamlı farklılıklar vardı. Bu sonuçlar, mandibular asimetrinin, sapmamış yan TME'lerin gerilme seviyesini açıkça artırabileceğini göstermiştir. Stresin artması ayrıca hastaların disklerinde ciddi sıkışmalara neden olmuştur. Önceki çalışmalar, mandibula asimetrisinin TME eklem alanlarını azaltacağını ve ayrıca eklem ağrısına, tıklamaya, disk perforasyonuna ve diğer TMD semptomlarına neden olacağını göstermiştir [9,31,32]. Bu çalışmada, bu çalışmaya alınan hastaların vaka kayıtları da oklüzyon tanısı alan 7 hasta ve eklem ağrılı 5 hasta gösterdi. Tıklama ve eklem ağrısını öne süren sonuçlar, TME'lerin aşırı stresi ile de ilişkiliydi. Stresi azaltmak ve tikanıklığı arttırmak için oklüzal atel ile eklem boşluklarını arttırmak, eklem ağrısını iyileştirmede ve ciddi çene-yüz deformasyonu olmayan hastalarda kliklenmenin uygun olduğunu göstermiştir.

Mandibular asimetri, sadece asimetrik ve arttırılmış pik streslere yol açmaz, aynı zamanda TME'de anormal stres konsantrasyonuna neden olur. Daha önceki sonlu elemanlar çalışmasında von Mises gerilmesinin en büyük değerlerinin Kontrol grubumuzda olduğu gibi normal denekler için orta bölgeye yerleştirildiği görülmüştür [33]. Bununla birlikte, posterior disk bantı her zaman düşük verim stresi için diskin en zayıf kısmı olarak kabul edilmiştir [34]. 4 hastanın sapma olmayan diskleri ve 2 hastanın sapma diskleri için arka disk bantı maksimum gerilmeyi sürdürmüştür. Hastalar için anormal pik gerilme de TME'nin diğer semptomları için potansiyel bir risk faktörüdür. Zamanında iyileşmezse, daha fazla TMD belirtisi yavaş yavaş ortaya çıkacaktır. Ayrıca, gerilme yoğunluğu hastalarda, özellikle kondil ve disk için zararlı olanlarda da bulunmuştur. Kondiler rezorpsiyon ve disk incilmesi riskini yükseltmiştir [30]. Bu nedenle, mandibular asimetri için ileri işlem, asimetrik gerilme dağılımlarını düzeltmeli, gerilme seviyesini düşürmeli, anormal tepe gerilmesini iyileştirmeli ve TME'deki stres konsantrasyonunu ortadan kaldırmalıdır.

## V. SONUÇLAR

Homojen olmayan özellikleri simüle etmek için her yapı için 100 farklı malzeme içeren modifiye SE modelleri, çene-yüz sistemi modellemesi için daha gerçekçi bir yol sağlar. Modifiye FSE modelleri ile mandibular asimetrisi olan hastalar için her iki TME'de asimetrik gerilme dağılımları bulunmuştur. Ayrıca,

TMD semptomları ile ilişkili olarak, semptomsuz subjelere kıyasla TME gerilmesi de artabilir.

## KAYNAKLAR

- [1] Bergersen EO (1980) Enlargement and distortion in cephalometric radiography – compensation tables for linear measurements. *Angle Orthodontist* 50:230-244
- [2] Bishara SE, Burkey PS, Kharouf JG (1994) Dental and facial asymmetries - a review. *Angle Orthodontist* 64:89-98
- [3] Ramirez-Yanez GO, Stewart A, Franken E, Campos K (2011) Prevalence of mandibular asymmetries in growing patients. *European journal of orthodontics* 33:236-242
- [4] Haraguchi S, Iguchi Y, Takada K (2008) Asymmetry of the face in orthodontic patients. *The Angle orthodontist* 78:421-426
- [5] Goncalves JR, Wolford LM, Cassano DS, da Porciuncula G, Paniagua B, Cevidanes LH (2013) Temporomandibular joint condylar changes following maxillomandibular advancement and articular disc repositioning. *Journal of oral and maxillofacial surgery : official journal of the American Association of Oral and Maxillofacial Surgeons* 71:1759 e1751-1715. doi:10.1016/j.joms.2013.06.209
- [6] Ueki K, Moroi A, Sotobori M, Ishihara Y, Marukawa K, Yoshizawa K, Kato K, Kawashiri S (2012) Changes in temporomandibular joint and ramus after sagittal split ramus osteotomy in mandibular prognathism patients with and without asymmetry. *The Journal of craniofacial surgery* 40:821-827. doi:10.1016/j.jcems.2012.03.003
- [7] Sanromán JF, González JMG, del Hoyo JA (1998) Relationship between condylar position, dentofacial deformity and temporomandibular joint dysfunction: An mri and ct prospective study. *The Journal of craniofacial surgery* 26:35-42
- [8] Ueki K, Nakagawa K, Marukawa K, Takatsuka S, Yamamoto E (2005) The relationship between temporomandibular joint disc morphology and stress angulation in skeletal Class III patients. *European journal of orthodontics* 27:501-506. doi:10.1093/ejo/cji029
- [9] Yang HJ, Hwang SJ (2014) Change in condylar position in posterior bending osteotomy minimizing condylar torque in BSSRO for facial asymmetry. *The Journal of craniofacial surgery* 42:325-332. doi:10.1016/j.jcems.2013.05.021
- [10] Liu Z, Qian Y, Liu D, Yang J, Fan Y (2010) Stress analysis of first permanent mandibular molar with class I restorations of different cement bases by occlusive load: A finite element analysis. *International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering*

- 26:1371-1379. doi:10.1002/cnm.1395
- [11] Qian Y, Liu Z, Fan Y (2010) Numerical simulation of canine bodily movement. *International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering*:n/a-n/a. doi:10.1002/cnm.1179
- [12] Chen J, Akyuz U, Xu L, Pidaparti RMV (1998) Stress analysis of the human temporomandibular joint. *Medical engineering & physics* 20:565-572
- [13] Qihong L, Shuang R, Cheng G, Haiyan S, Hong L, Yinzhong D, Qiguo R (2014) Effect of jaw opening on the stress pattern in a normal human articular disc: finite element analysis based on MRI images. *Head & face medicine* 10
- [14] Reina-Romo E, Sampietro-Fuentes A, Gomez-Benito MJ, Dominguez J, Doblare M, Garcia-Aznar JM (2010) Biomechanical response of a mandible in a patient affected with hemifacial microsomia before and after distraction osteogenesis. *Medical engineering & physics* 32:860-866. doi:10.1016/j.medengphy.2010.05.012
- [15] Abe S, Kawano F, Kohge K, Kawaoka T, Ueda K, Hattori-Hara E, Mori H, Kuroda S, Tanaka E (2013) Stress analysis in human temporomandibular joint affected by anterior disc displacement during prolonged clenching. *Journal of oral rehabilitation* 50:230-244
- [16] Buranastidporn B, Hisano M, Soma K (2006) Effect of biomechanical disturbance of the temporomandibular joint on the prevalence of internal derangement in mandibular asymmetry. *European journal of orthodontics* 28:199-205
- [17] Kopp S, Kuzelka J, Goldmann T, Himmlova L, Ihde S (2011) Modeling of load transmission and distribution of deformation energy before and after healing of basal dental implants in the human mandible. *Biomedizinische Technik Biomedical engineering* 56:53-58. doi:10.1515/BMT.2010.053
- [18] Ueki K, Nakagawa K, Takatsuka S, Shimada M, Marukawa K, Takazakura D, Yamamoto E (2000) Temporomandibular joint morphology and disc position in skeletal class III patients. *The Journal of craniofacial surgery* 28:362-368. doi:10.1054/jcms.2000.0181
- [19] Shu JH, Yao J, Zhang YL, Chong DYR, Liu Z (2018) The influence of bilateral sagittal split ramus osteotomy on the stress distributions in the temporomandibular joints of the patients with facial asymmetry under symmetric occlusions. *Medicine* 97:e11204. doi:10.1097/MD.00000000000011204
- [20] Ciarelli MJ, Goldstein SA, Kuhn JL, Cody DD, Brown MB (1991) Evaluation of orthogonal mechanical properties and density of human trabecular bone from the major metaphyseal regions with materials testing and computed tomography. *J Orthop Res* 9:674-682
- [21] Harp JH, Aronson J, Hollis M (1994) Noninvasive determination of bone stiffness for distraction osteogenesis by quantitative computed tomography scans. *Clin Orthop Relat Res*:42-48
- [22] Kopperdahl DL, Morgan EF, Keaveny TM (2002) Quantitative computed tomography estimates of the mechanical properties of human vertebral trabecular bone. *J Orthop Res* 20:801-805
- [23] Rho JY, Hobatho MC, Ashman RB (1995) Relations of mechanical properties to density and ct numbers in human bone. *Medical engineering & physics* 17:347-355
- [24] Liu Z, Fan Y, Qian Y (2008) Comparative evaluation on three-dimensional finite element models of the temporomandibular joint. *Clinical biomechanics* 23 Suppl 1:S53-58. doi:10.1016/j.clinbiomech.2007.12.011
- [25] Koriath TW, Hannam AG (1994) Deformation of the human mandible during simulated tooth clenching. *Journal of dental research* 73:56-66
- [26] Pruim GJ, de Jongh HJ, ten Bosch JJ (1980) Forces acting on the mandible during bilateral static bite at different bite force levels. *Journal of biomechanics* 13:755-763
- [27] Weijs WA, Hillen B (1984) Relationship between the physiological cross-section of the human jaw muscles and their cross-sectional area in computer tomograms. *Acta Anatomica* 118:129-138
- [28] Liu Z, Qian YL, Zhang YL, Fan YB (2016) Effects of several temporomandibular disorders on the stress distributions of temporomandibular joint: A finite element analysis. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering* 19:137-143
- [29] Qi XD, Ma LM, Zhong SZ (2012) The influence of the closing and opening muscle groups of jaw condyle biomechanics after mandible bilateral sagittal split ramus osteotomy. *The Journal of craniofacial surgery* 40:e159-164. doi:10.1016/j.jcms.2011.07.024
- [30] Zhang YL (2017) The Effect of Bilateral Sagittal Split Ramus Osteotomy on Temporomandibular Joints in Patients with Facial Asymmetry: a Morphologic and Biomechanical Study. PhD Thesis, Sichuan University, Chengdu
- [31] Zhang Y, Xu X, Liu Z (2017) Comparison of Morphologic Parameters of Temporomandibular Joint for Asymptomatic Subjects Using the Two-Dimensional and Three-Dimensional Measuring Methods. *Journal of Healthcare Engineering* 2017:1-8. doi:10.1155/2017/5680708
- [32] Ueki K, Yoshizawa K, Moroi A, Iguchi R, Kosaka A, Ikawa H, Saida Y, Hotta A, Tsutsui

- T (2015) Changes in computed tomography values of mandibular condyle and temporomandibular joint disc position after sagittal split ramus osteotomy. *The Journal of craniofacial surgery* 43:1208-1217. doi:10.1016/j.jcms.2015.05.007
- [33] Beek M, Koolstra JH, van Ruijven LJ, van Eijden TMGJ (2000) Three-dimensional finite element analysis of the human temporomandibular joint disc. *Journal of biomechanics* 33:307-316
- [34] Kang H, Bao GJ, Qi SN (2006) Biomechanical responses of human temporomandibular joint disc under tension and compression. *International journal of oral and maxillofacial surgery* 35:817-821. doi:10.1016/j.ijom.2006.03.005

## Yüksek Hızlı FPGA ile LFSR Tabanlı 32-Bit Kayan Noktalı Yeni Bir Sözde Rastgele Sayı Üretici Tasarımı

*A New Pseudo Random Number Generator Design with LFSR Based 32-Bit Floating Point  
with High-Speed FPGA*

Serkan DERELİ<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Bilgisayar Teknolojileri ve Programlama Bölümü, Adapazarı, Sakarya

### Öz

Bu çalışmada FPGA temelli IEEE 754 kayan noktalı sayı standardına uygun sözde rasgele sayı üretici tasarımı gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen tasarım doğrusal geri beslemeli kayan yazmaç (LFSR) yöntemini kullanarak 32-bit uzunluğunda ve [0, 1] arasında ondalık sayılar üretmektedir. 32-bitlik bu sayılara bakıldığında en değerli 4-bitin (28-31) tamamında aynı değeri alması nedeniyle işlemler 28-bit üzerinden gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada bahsi geçen tasarımın en önemli özelliği üretilen rasgele sayının doğrudan kayan noktalı bir değer olmasıdır. Bu nedenle üretilen rasgele sayının [0, 1] aralığında olmaması durumunda sayı üretme işlemi tekrar baştan başlatıldığından dolayı her sayının işlem zamanı farklı olabilmektedir. VHDL tasarım dili ile oluşturulan sayısal devre Vivado arabiriminde simülasyon ile test edildikten sonra Xilinx Nexys 4 DDR FPGA aygıtı ile gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar üretilen rasgele sayıların dağılımı ve üretilme süreleri bakımından analiz edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Rastgele Sayı Üretici, Doğrusal Geri Beslemeli Öteleyen Kaydedici, VHDL, FPGA, Kayan Noktalı Sayı

### Abstract

In this study, pseudo random number generator design which is based on FPGA based IEEE 754 floating point number standard has been realized. The realized design generates floating-point numbers of 32-bit length and between 0 to 1 using the linear feedback floating register (LFSR) method. Looking at these 32-bit numbers, operations are performed on 28-bits since the most valuable 4-bits (28-31) all have the same value. The most important feature of the design mentioned in this study is that the generated random number is a direct floating point value. Therefore, if the generated random number is not in the range of 0 to 1, the computation time of each number may be different since the number generation process is restarted from the beginning. The digital circuit created by VHDL design language was tested by simulation on Vivado interface and implemented with Xilinx Nexys 4 DDR FPGA device. The results were analyzed in terms of distribution and generation times of random numbers generated.

**Keywords:** Random Number Generator, Linear Feedback Shift Register, VHDL, FPGA, Floating Point Number

## I. GİRİŞ

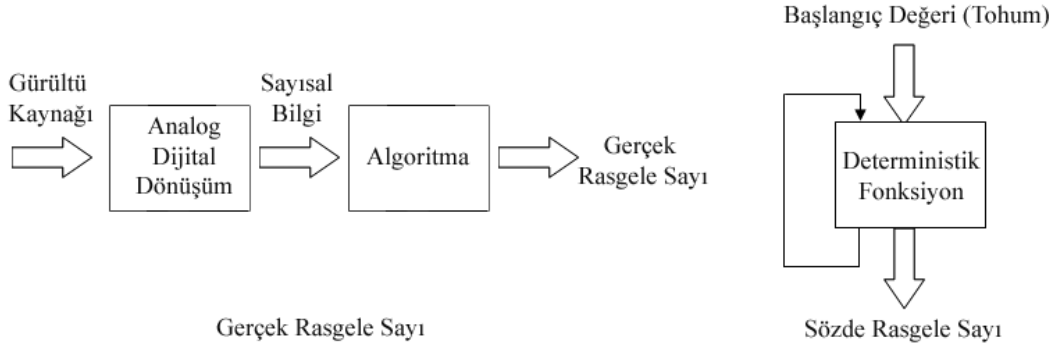
Oyun programlama [1], kriptoloji [2] ve yapay zeka optimizasyon teknikleri [3] başta olmak üzere pek çok hesaplamalı bilim dalında yaygın bir şekilde kullanılan rasgele sayılar araştırma dünyasında büyük bir öneme sahiptir. Rasgele sayılar, aralarında belli bir ilişki bulunmayan ve tahmin edilmesi zor olan sayılar olduklarından dolayı kriptolojide anahtar olarak, oyun programlamada ekrana gelecek sahnenin oluşturulması için ve yapay zekâda çözüm uzayından rasgele başlangıç çözümü seçmek için kullanılmaktadır.

Rasgele sayı üreticilerinin tarihi gelişimine bakıldığında ilk olarak Knuth'un yazdığı "The Art of Programming" isimli eseri ile karşılaşılacaktır [4]. 1983 yılına gelindiğinde Ripley küçük kişisel bilgisayar kullanıcıları için yetersiz olan rasgele sayı üreticilerinin daha etkili hale gelebilmesi için üstel ve normal dağılıma sahip diziler üretmiştir [5]. 1990 yılında James, Monte Carlo hesaplamaları için çeşitli rasgele sayı üreticileri üzerine çalışmalar gerçekleştirmiştir [6]. Aynı yıl Lagarias sayı teorisini esas alan çalışmaları neticesinde rasgele sayı üreticilerini kriptolojide yaygınca kullanılan gizli anahtarlar üretmek için kullanmıştır [7].



Literatürde “gerçek rasgele sayı üretici (True Random Number Generator)” ve “sözcü rasgele sayı üretici (Pseudo Random Number Generator)” olmak üzere rasgele sayı üreticileri iki gruba ayrılmıştır. Belli bir matematiksel fonksiyon yardımıyla yani deterministik olarak rasgele sayı üreticilerine “sözcü rasgele sayı üretici” adı verilmektedir. Bu üreticilerde bir başlangıç değeri vardır ve bu değer üzerinden rasgele sayılar üretilir. Başlangıç değeri değiştirilerek farklı rasgele sayı dizileri elde edilmektedir [8]. Gerçek

rasgele sayı üreticileri ise gerçek fiziksel değerler baz alınarak sayı üretme işlemidir ve bunun için gerçek yaşamda var olan gürültü kaynakları rasgele sayılar üretmek için fiziksel değer kaynağı olarak kullanılmaktadırlar. Termal ve atmosferik gürültü, nükleer bozulma, ses, video, EEG (Elektroensefalografi), ECG (Electrocardiogram) gibi gürültü kaynakları rasgele sayı üretiminde fiziksel değer olarak kullanılmaktadır [9].



Şekil 1. Gerçek ve Sözcü rastgele sayı üreticileri blok şeması

Genç ve Tuncer yaptıkları çalışmalarında insan hareketlerinden elde ettikleri gürültü değerleriyle gerçek rasgele sayı üretici tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Bunun için GPS ve ivme sensörünü kullanarak elde ettikleri verileri fiziksel büyüklük olarak tasarladıkları sisteme aktarmışlar ve bu sayede normal dağılıma sahip rasgele sayılar üretmişlerdir [10]. Khalique ve arkadaşları sistem saati ve iki büyük asal sayı parametrelerini kullanarak sözcü rasgele sayı üretici tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Sistem saati ile başlangıç değerini gerçek bir değerden elde etmek suretiyle üretilen rasgele sayının tahmin edilemez bir şekilde kavuşmasını, iki büyük asal sayı parametresi ile de üretilen sayıların rassallığını sağlamışlardır [11]. Özkaynak yaptığı çalışmada rasgele sayı üreticilerine genel bakış yaparak tarihçesi ve hali hazırda kullanım şekilleri üzerine araştırma gerçekleştirmiştir. Ayrıca kriptolojik uygulamalarda rasgele sayı üreticilerinin ihtiyaç duyduğu gereksinimler ile bu gereksinimleri karşılayacak mimariler üzerine bir araştırma yapmıştır [12]. Aydın ve Dalkılıç yaptıkları çalışmada nesnelerin interneti gibi cihazların ihtiyaç duyduğu rasgele sayıları üretmek için bir algoritma geliştirmişlerdir. Algoritmada öncelikle C dilinde rasgele beş adet 16-bitlik sayılar üreterek başlamaktadır. Devamında bu sayıların ilk dördü ikiyeşerli olarak gruplandırılıp doğrusal geri beslemeli kayan yazmaçtan geçirildikten sonra birleştirilerek 32-bitlik sayılar elde edilmiştir. Sonrasında ise elde edilen bu 32-bitlik iki adet sayı ile ilk başta elde edilip kullanılmayan 16-bitlik sayılar bir fonksiyon dâhilinde birleştirilerek 32-bitlik yeni bir sayı üretilmektedir [13]. Falih yaptığı çalışmada basit bir metot olarak

isimlendirdiği sözcü rasgele sayı üretici tasarlamıştır. Bu üretic, rasgele sayı üretmek için hem doğrusal geri beslemeli öteleyen kaydediciyi hem de kaos teorisini kullanmaktadır. Kaos teorisi üretilen sayıların doğrusallığını ve tekrarlanabilirliğini ortadan kaldırmak için kullanılmıştır [14]. Masoodi ve arkadaşları, akış şifreleme yönteminde kullanılan doğrusal geri beslemeli öteleyen kaydedici (LFSR) tabanlı rasgele sayı üretme mekanizmalarını ve onların uygulamalarını kapsamlı bir şekilde analiz etmiştir [15].

Panda ve arkadaşları doğrusal geri beslemeli öteleyen kaydedici tabanlı 8, 16 ve 32-bit rasgele sayılar üreten devreleri VHDL ile geliştirmişler ve FPGA aygıtında test işlemini gerçekleştirmişlerdir. Üç farklı uzunlukta rasgele sayı üreten devreler performans ve rassallık açısından karşılaştırılmıştır. Nihayetinde FPGA’da geliştirilen devreler mantıksal elemanlarla oluşturulduğundan bit sayısı arttıkça eleman sayısı da arttığından dolayı en düşük bit sayısına sahip devrenin rasgele sayı üretme süresi daha az ancak en uzun bit sayısına sahip devrenin ise periyodu daha uzun olduğundan dolayı rassallığı çok daha gelişmiştir [16]. Rezk ve arkadaşları FPGA tabanlı kaotik özellikli sözcü rasgele sayı üretici tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Kaotik özelliğini rasgele sayılara dâhil eden sistemde Lorez ve Lü kaotik sistemleri beraber kullanılmıştır. Bunun için dört farklı etki elemanının biri Lorez sistemine göre oluşturulurken diğerleri Lü sistemine göre oluşturulmuştur [17]. Stanchieri ve arkadaşları gürültü kaynağı jitter ve metastability olan gerçek rasgele sayı üreticini gerçekleştirebilir karakterizasyonun raporunu

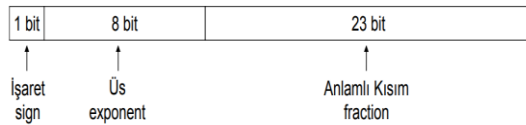
ortaya koyan bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Geliştirilen rasgele sayı üreticini gerçekleştirdikleri FPGA tasarımı mantık elemanları, LUT (Look Up Table) tablosu, çalışma frekansı ve flip-flop sayısı bakımından analiz etmişlerdir [18]. Koyuncu ve Özcerit yaptıkları çalışmada kaotik osilatör gürültüleri ile elde ettikleri gerçek rasgele sayı üreticini sayısal, Pspice ve FPGA ile ayrı ayrı modelleyerek her üç platformda da gerçekleştirmişler ve aradaki farkları ortaya koymuşlardır. Bunlar arasında FPGA ile modelledikleri sistemin diğer platformlara göre daha fazla avantaj ortaya koyduğunu göstermişlerdir [19].

Bu çalışmada ise yüksek hızlı işlemler için önemli bir platform olan FPGA tabanlı donanımsal rasgele sayı üretici “0” ve “1” arasında 32-bit kayan noktalı sayılar üretmek için kullanılmıştır. Özellikle pek çok optimizasyon algoritmasında kullanılan bu sayılar aynı zamanda kullanıldığı algoritmanın en temel parametreleri arasındadır. Çalışmanın bundan sonraki bölümü üç alt bölüme ayrılmıştır. Birinci alt bölümde 0 ile 1 arasındaki 32-bitten oluşan sayıların analizi yapılarak geliştirilen devrenin optimize edilmesi için yollar aranmıştır. İkinci alt bölümde geliştirilen sayısal devrenin blok şeması verilerek detaylı bir şekilde sunumu gerçekleştirilmiştir. En son üçüncü alt bölümde ise elde edilen simülasyon ve gerçekleştirme sonuçları verilmiştir.

## II. MATERYAL VE YÖNTEM

### 2.1. “0” ile “1” Arasındaki Kayan Noktalı Sayıların Analizi

Bu çalışmada 1985 yılında kabul edilen IEEE 754 kayan noktalı sayı standardını temel alan bir sistem tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu standarda göre ondalıklı sayılar tek hassasiyetli (single precision) 32-bit ve çift hassasiyetli (double precision) 64-bit uzunlukta olmak üzere iki farklı gösterime sahiptir [20]. IEEE 754 standardına göre kayan noktalı bir sayı işaret (1-bit), üs (8-bit) ve anlamlı kısım (23-bit) olmak üzere üç bölüme ayrılmaktadır [21].



Şekil 2. 32-bit kayan noktalı sayı formatı bölümleri

Şekil 2’de görüldüğü üzere sayı tek hassasiyetli kayan noktalı sayılar 32-bitten oluşmaktadır ve en değerli biti (MSB) işaret biti olarak isimlendirilir. Eğer sayı negatifse bu bit değeri “1” aksi halde bu bit değeri “0” dir. Sayısal bir sistemin bilgiyi temsil ederken kolaylık

sağlaması adına ikilik tabana çevrildikten sonra yapılan kaydırma sayısı “Üs (exponent)” olarak isimlendirilir. 32-bit gösterimde sayının en son oluşan ondalık kısmına ise “anlamlı kısım (fraction)” adı verilir [22].

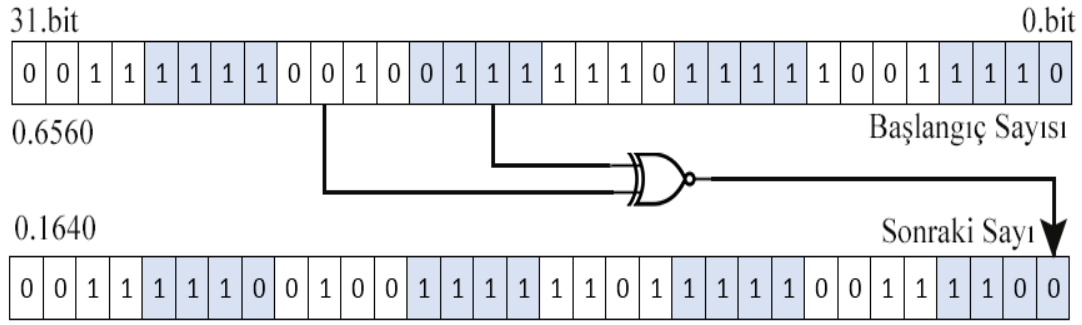
Tablo 1. 0 ile 1 arasındaki sayıların 10’luk ve 16’lık tabandaki gösterimi

10’luk Taban	16’lık Taban	10’luk Taban	16’lık Taban	10’luk Taban	16’lık Taban
0.1	3DCC CCCD	0.4	3ECC CCCD	0.7	3F33 3333
0.2	3E4C CCCD	0.5	3F00 0000	0.8	3F4C CCCD
0.3	3E99 999A	0.6	3F19 999A	0.9	3F66 6666

Tablo 1’de verilen “0” ile “1” arasındaki kayan noktalı sayılar incelendiğinde tamamında soldan ilk basamağın “3” olduğu açıkça görülmektedir. Dolayısıyla 2’lik taban olarak bakıldığında 28-31 arası bitler sabit yani “0011” olmalıdır. 27-24 arası bitlere bakıldığında ise bir adet “D - 1101”, üç adet “E - 1110” ve beş adet “F - 1111” olmak üzere on altı değerden sadece üç değer aldıkları görülmektedir. Ayrıca değerlerin “0.1” den daha küçük ve “1.0” dan daha büyük olmaması gerekmektedir. O nedenle, literatürdeki diğer çalışmalardan farklı olarak gerçekleştirilecek tasarımda bu koşullar dikkate alındığında MSB 8-bit dışında kalan ilk 24-bit LFSR tekniğinin uygulanabileceği bitlerdir. 27-24 arası bitler normal dağılım yapılarak 0-3 arası bitlerin almış olduğu değere göre üç değer arasından seçilerek LFSR işleminden geçirilen 24-bitin MSB tarafına ilave edilmektedir. Geriye kalan 4-bit ise “3 - 0011” olarak en son aşamada 28-bitin MSB tarafına ilave edilerek 32-bitlik kayan noktalı sayı elde edilmektedir.

### 2.2. Doğrusal Geri Beslemeli Öteleyen Kaydedici (LFSR)

Doğrusal geri beslemeli öteleyen kaydedici, iyi istatistikî özellikleri, geniş tekrarlama periyodu ve yapısının basit ama kullanışlı olması nedeniyle güvenlik algoritmalarındaki anahtar oluşumu ve oturma yönetiminden en basit rasgele sayı oluşturma uygulamalarına kadar çok geniş kullanım alanına sahiptir [23, 24]. Bu çalışmanın konusu olan “0” ile “1” arasından rasgele sayı seçme işlemi ise yapay zeka optimizasyon tekniklerinde çözüme ulaşırken hesaplanan değere esneklik katmak amacıyla sıklıkla kullanılmaktadır ve bu algoritmaların en önemli parametreleri arasındadır [25].



Şekil 3. Bu çalışmada kullanılan LFSR tekniği

Şekil 3'te bu çalışmada kullanılan doğrusal geri beslemeli öteleyen kaydedicinin çalışma şekli görülmektedir. 31-28 arası bitler sabit kalmakta, 27-24 arası bitlerde 0-3 arası bitlerin değerine göre "D - 1101", "E - 1110" veya "F - 1111" değerlerinden biri seçilmektedir. 3-0 arası bitlerin hangi değerlerine karşılık 27-24 arası bitlerin alabileceği değerler Tablo 2'de gösterilmiştir. 22'nci ve 17'nci bitlerin EXNOR işlemine tabi tutularak elde edilen değer 0'nci bite

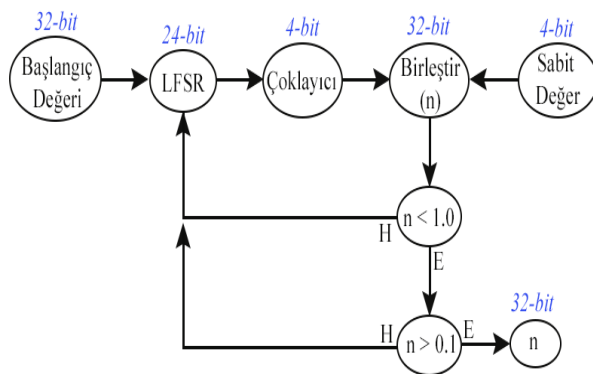
ve bu bitten itibaren 24 bitin sola kaymasıyla yeni rasgele sayı elde edilmektedir. Şekil 3'te başlangıçtaki sayı 0,6560 ve bir sonraki aşamada ortaya çıkan sayı ise 0,1640 olarak görülmektedir. Bu şekilde de görüldüğü gibi gerçekleştirilen tasarım sözde rasgele sayı üretici olduğundan dolayı elde edilecek rasgele sayı dizisi başlangıç değerine bağlıdır.

Tablo 2. 27-24 arası bitlerin alabileceği değerler

3:0 bit değeri	27:24 bit değeri	3:0 bit değeri	27:24 bit değeri	3:0 bit değeri	27:24 bit değeri	3:0 bit değeri	27:24 bit değeri
0000	1101 – D	0100	1110 – E	1000	1111 – F	1100	1111 – F
0001	1101 – D	0101	1110 – E	1001	1111 – F	1101	1111 – F
0010	1110 – E	0110	1110 – E	1010	1111 – F	1110	1111 – F
0011	1110 – E	0111	1111 – F	1101	1111 – F	1111	1111 – F

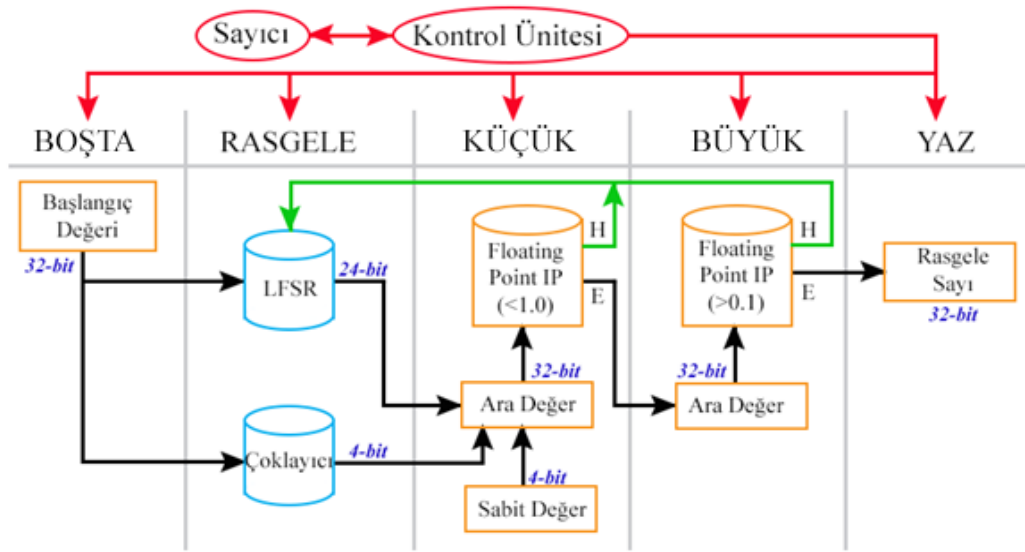
### 2.3. Önerilen Rasgele Kayan Noktalı Sayı Üretici

Bu çalışmada önerilen sözde rasgele sayı üretici, hem doğrusal geri beslemeli öteleyen kaydedici (LFSR) işlemi hem de çoklayıcı (Multiplexer) işlemi birlikte harmanlayarak gerçekleştirmektedir. Ancak sözde rasgele sayı üreticilerinin özelliklerinden biri olan başlangıç değeri ile sayı üretmektedir.



Şekil 4. Önerilen sözde rasgele kayan noktalı sayı üretici

Şekil 4'te MF-PRNG ismi verilen ve bu çalışmada önerilen rasgele sayı üreticinin akış şeması görülmektedir. Başlangıç değeri ile algoritma başlamaktadır ve bu değer 32-bit uzunluğundadır. Başlangıç değerinin LSB 24-biti doğrusal lineer öteleyen kaydedici işleminden geçerken MSB ilk 4-biti sabit bırakılıp sonraki 4-biti ise LSB ilk 4-bitin değerine göre bir çoklayıcı sayesinde "D", "E" ve "F" değerlerinden herhangi birini seçmektedir. Böylece son noktada bu bitler birleştirilerek yine 32-bitlik bir değer elde edilmektedir. Ancak bu değer "0" ile "1" arasında olup olmadığı belli olmadığından geliştirilen algorithmada elde edilen 32-bitlik değer öncelikle 1'den küçük olup olmadığı sorgulanmaktadır. Eğer bu değer 1'den küçük değilse tekrar başa yani LFSR aşamasına geçilmektedir. Yok, eğer 1'den küçükse bu durumda sayının 0,1'den büyük olup olmadığına sorgulandığı aşamaya geçilmektedir. Burada da benzer şekilde sayı 0,1'den büyük değilse algoritma LFSR aşamasına tekrar dönmektedir. Aksi halde elde edilen değer "0" ile "1" arasında olduğundan dolayı çıkış işlemi gerçekleştirilmektedir.



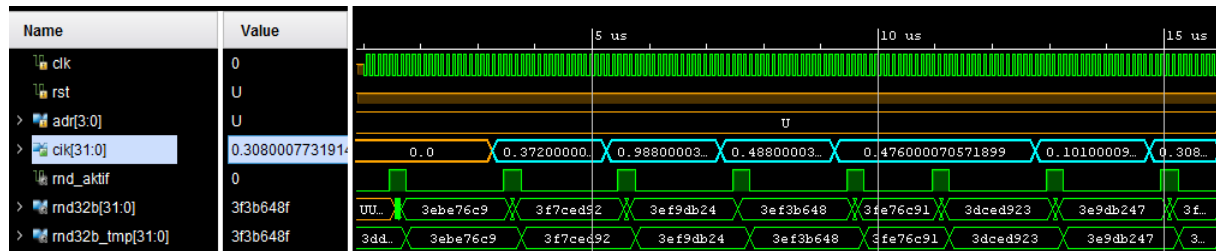
Şekil 5. Önerilen rasgele sayı üreticisine ait FPGA blok şeması

Şekil 5'te, önerilen söзде rasgele sayı üreticinin FPGA'da gerçekleştirilen blok şeması görünmektedir. FPGA'da geliştirilen sayısal devre ardışıl bir çalışma özelliğine sahip olduğundan dolayı sonlu durum makineleri kullanılarak VHDL ile geliştirilmiştir. Şekil 5'te sonlu durumlar makinesi için kullanılan durumlar görünmektedir. BOSTA durumu tasarımı başlangıç bölümüdür ve bu tasarımda rasgele üretilecek sayı dizisine başlangıç için 32-bit uzunluğunda sabit bir değerin atandığı durumdur. RASGELE durumunda başlangıç değerinden gelen sayının ilk 24-bit'i LFSR işleminden geçirilmektedir. 0-3 arası bitler ise çoklayıcı işleminden geçerek 24-27 arası bitlerin değerini elde etmektedir. Sonunda bu değerler, sabit değer ile birlikte bir ara değerde 32-bit olarak birleştirilerek "Floating IP Core" ile "1,0" değerinden küçük olup olmadığı sorgulanmaktadır.

Sonrasında ise yine başka bir "Floating IP Core" ile "0,1" sayısından büyük olup olmadığı sorgulanmaktadır. En son aşamada ise 32-bit uzunluğunda üretilen söзде rasgele kayan noktalı sayı çıkışa aktarılmaktadır. Burada bahsi geçen "Floating IP Core" üretici firma tarafından geliştirilen ve kayan noktalı sayılarla işlem yapabilmeyi kolaylaştıran bir alt devredir.

#### 2.4. Simülasyon ve Gerçekleme Sonuçları

VHDL tasarım dili ile FPGA aygıtı için geliştirilen rasgele sayı üretici sayısal devresi Xilinx firması tarafından geliştirilen Vivado IDE arabirimi ile tasarlanmış ve yine bu simülasyon aracı ile de test edilmiştir. Test işleminin başarıyla tamamlanmasının ardından yine Xilinx firması tarafından geliştirilen Nexys 4 DDR FPGA aygıtında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6. Önerilen tasarım için Vivado test ekranı

Şekil 6'da ki simülasyon ekranında önerilen rasgele sayı üretici için geliştirilen devrenin ürettiği sayılar buz mavisi renkte görünmektedir. Bu sayılardan bazıları kısa saat darbesinde bazıları ise daha uzun saat darbelerinde üretilmiştir. Bunun sebebi

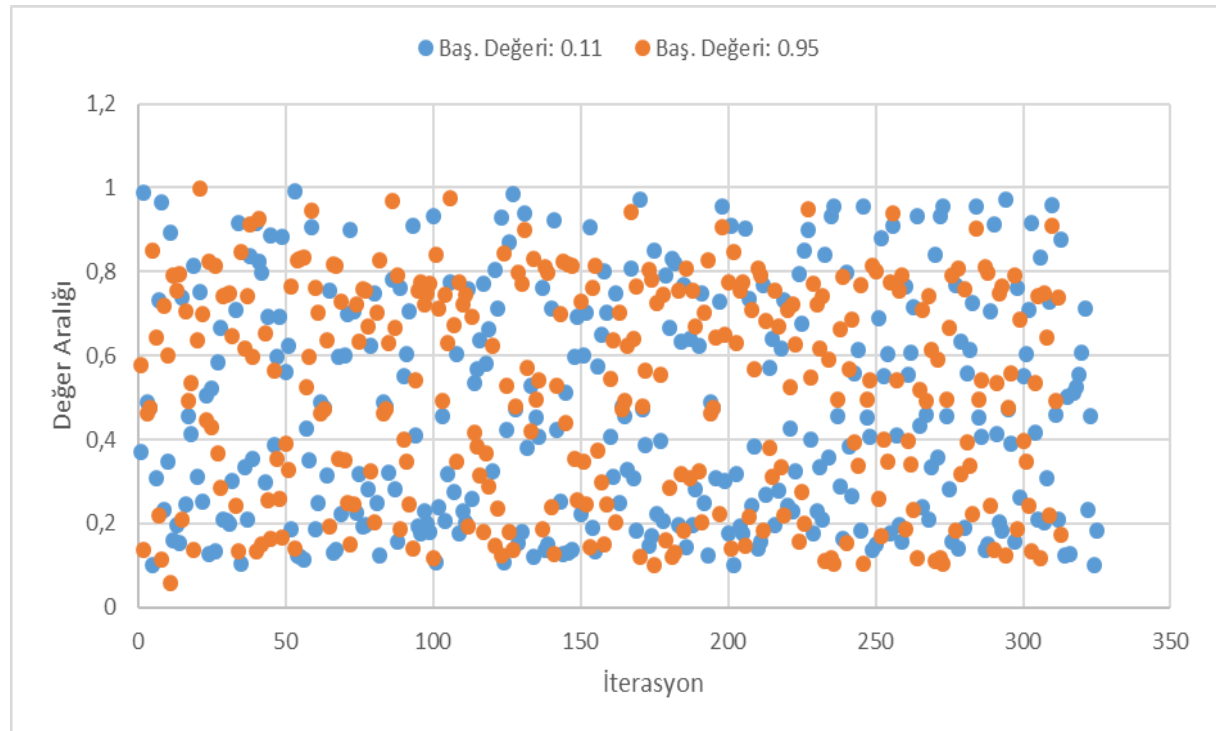
"0" ile "1" arasında olmayan sayıların çıkışa gönderilmeyip tekrar sayı üretilmesi için başa dönmesi nedeniyle. Bu durumla ilgili detaylı veriler Çizelge 3'de verilmektedir.

**Tablo 3.** Geliştirilen FPGA tabanlı devrenin “0” ile “1” arasında ürettiği örnek sayılar ve üretme süreleri

Test-1. Başlangıç Değeri: 0.11				Test-2. Başlangıç Değeri: 0.95			
Test No	Saat Darbesi	16'lık Taban	Kayan Nokta	Test No	Saat Darbesi	16'lık Taban	Kayan Nokta
1	38	3ebe76c9	0.3720	1	53	3e9d14e7	0.3068
2	20	3f7ced92	0.9880	2	20	3f3a29cf	0.7272
3	20	3ef9db24	0.4880	3	20	3f74539e	0.9544
4	35	3ef3b648	0.4760	4	115	3ea73c07	0.3266
5	20	3dced923	0.1010	5	20	3f4e780e	0.8065
6	20	3e9db247	0.3080	6	35	3f39e03b	0.7260
7	20	3f3b648f	0.7320	7	20	3f73c077	0.9521
8	65	3f76c91e	0.9640	8	65	3f3c077e	0.7334
9	35	3e6c91ea	0.2310	9	20	3f780efd	0.9689
10	20	3eb247a8	0.3482	10	50	3ec077e8	0.3759

Tablo 3'te FPGA aygıtı için geliştirilen sayısal devrenin başlangıç değerleri farklı iki testte arka arkaya ürettiği 10 rasgele sayı ve her bir sayı için devrenin kullandığı saat darbeleri verilmektedir. Normal bir akışta rasgele sayı üretmek için tasarlanan devre 20 saat darbesi kullanılmaktadır. En fazla saat darbesi birinci testte 65, ikinci testte ise 115 saat darbelerdir. Birinci testin başlangıç değerinden sonra ürettiği sayı için 38 saat darbesi kullanılırken aynı durum ikinci testte 53 saat darbesi olarak görülmektedir. Birinci testte 10 adet rasgele sayı üretmek için kullanılan toplam süre 293 saat darbesi iken benzer durum için

ikinci test 418 saat darbesi süresi kullanmıştır. Üretilen rasgele sayılardaki saat darbelerinin bu derece farklı olmasının nedeni üretilen sıradaki sayının [0,1, 1,0] değer aralığında olmamasıdır. Örneğin 0.95 başlangıç sayısı ile başlatılan ikinci testte dördüncü sayı 115 saat darbesi sonucunda elde edilebilmiştir. Çünkü bu arada 1.0 sayısından daha büyük dört, 0.1 değerinden ise daha küçük altı farklı sayı üretilmiştir. Bu durumda üretilen bu sayılar kabul edilmediğinden işlem algoritmanın en başından yeniden başlatılmaktadır.

**Şekil 7.** Gerçekleştirilen tasarım vasıtasıyla 500 test ile üretilen rasgele sayıların dağılımı

Şekil 7’de bu çalışma kapsamında FPGA aygıtı için geliştirilen rasgele sayı üretici tasarımı simülasyon ekranında üretilen 500 adet “0” ve “1” arasında rasgele kayan noktalı sayının iki farklı başlangıç değerine sahip test için dağılım grafiği görülmektedir. 0.11 başlangıç sayısı ile üretilen 500 adet sayıdan 325 tanesi [0, 1] aralığında iken 175 tanesi bu aralığın dışında kalmıştır. 0.95 başlangıç sayısı ile üretilen sayılardan ise 313 tanesi [0, 1] aralığında iken 187 tanesi bu aralığın dışında kalmıştır. O nedenle Şekil 7’de ki dağılım grafiğinde aralık dışında elde edilen sayılar görünmemektedir. Grafikte de görüldüğü üzere sayıların normal bir şekilde 0 ile 1 arasında dağıldığı, dolayısıyla da herhangi bir devre, sistemde veya algoritmada rahatlıkla kullanılabilir düzeyde olduğu açıktır. Test işleminde elde edilen 500 adet rasgele sayı ile ilgili istatistiksel bilgiler Tablo 4’te verilmiştir. Burada değer aralığının başından (0.11),

ortasından (0.55) ve sonundan (0.95) olmak üzere seçilen değerler ile toplamda 500 adet rasgele sayı üretilmiştir. “Toplam Saat Darbesi” sütunu bu 500 adet sayının üretilmesi için geçen süreyi, “Ortalama Saat Darbesi” ise 500 sayıdan [0, 1] değer aralığında olanların elde edilebilmesi için kullanılan saat darbesinin ortalama değerini göstermektedir. “Aralıktaki Sayı Adeti” sütunu 500 sayıdan [0, 1] değer aralığında olanların sayısını, “Aralık Dışındaki Sayı Adeti” sütunu ise 500 sayıdan [0, 1] aralığı dışında olanların sayısını göstermektedir. [0, 1] değer aralığında üretilip çıkışa aktarılan en fazla işlem süresini “Mak. Saat Darbesi” sütunu en az kullanılan işlem süresini ise “Min. Saat Darbesi” sütunu ifade etmektedir. Tablo 4’te görüldüğü üzere ortaya çıkan değerler birbirine yakın olarak kabul edilebilir ölçüdedir. Hiçbir testte olağan dışı bir fark görünmemektedir.

**Tablo 4.** Test ile elde edilen 500’er adet rasgele sayı ile ilgili istatistikler

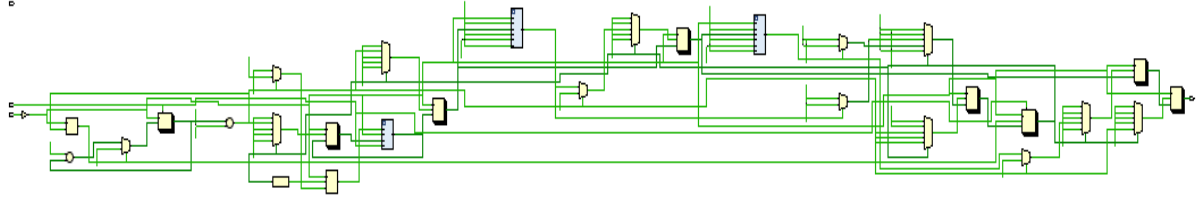
Test	Baş. Değeri	İterasyon	Aralıktaki Sayı Adeti	Aralık Harici Sayı Adeti	Toplam Saat Darbesi	Mak. Saat Darbesi	Min. Saat Darbesi	Ortalama Saat Darbesi
1	0.11	500	325	175	11387	95	20	35
2	0.55	500	296	204	11233	134	20	38
3	0.95	500	313	187	11352	115	20	36

Şekil 8’de FPGA tabanlı gerçekleştirilen sayısal devrenin RTL şeması yani devrenin mantıksal elemanlardan oluşan hali görülmektedir. Bu şekildeki sarı renkli olanlar mantıksal elemanlar olup Vivado arabiriminde “Leaf Cell” olarak adlandırılırken mavi renkli olanlar ise alt devrelerdir. Bu devrenin sentezlenmesi sonucunda elde edilen devrenin büyüklüğünü de ifade eden devre elemanları sayısı Tablo 5’te görülmektedir.

**Tablo 5.** Devrenin büyüklüğünü ifade eden elemanların sayısı

Devre	LUT Sayısı	FF Sayısı
Ana Devre (main)	22	86
RASGELE SAYI	29	113
SAYIDAN_BUYUK_MU	47	75
SAYIDAN_KUCUK_MU	44	70
TOPLAM	142	344

Şekil 8’de mavi renkte görünen elemanlar “RASGELE\_SAYI”, “SAYIDAN\_BÜYÜK\_MÜ” ve “SAYIDAN\_KÜÇÜK\_MÜ” etiketleriyle oluşturulan alt devrelerdir. “RASGELE\_SAYI” alt devresi isminden de anlaşılacağı üzere LFSR tabanlı sözcü rasgele sayıları üreten alt devredir ve 40 adet mantıksal hücre ile 68 ara bağlantıdan oluşmaktadır. Ara bağlantı olarak bahsi geçen elemanlar ise Şekil 8’de yeşil renkte görünen ve mantıksal blok içerisinde oluşturulan öğeleri birbirine bağlayan hatlardır. “SAYIDAN\_BÜYÜK\_MÜ” alt devresi ise Xilinx firması tarafından tasarlanıp tasarımcıların projelerinde kayan noktalı sayılarla olan işlemlerinde kullanmaları için kütüphaneye eklenmiş bir “IP-CORE” dur ve üretilen rasgele sayının “0,1” den büyük olup olmadığını kontrol etmektedir. “SAYIDAN\_KÜÇÜK\_MÜ” alt devresi de benzer şekilde bir “IP-CORE” dur ve üretilen rasgele sayının “1.0” dan küçük olup olmadığını kontrol eder. Aslında hem “SAYIDAN\_BÜYÜK\_MÜ” hem de “SAYIDAN\_KÜÇÜK\_MÜ” alt devreleri aynı “Floating IP-Core” yapısında olup sadece çıktıları farklı seçilmektedir.



Şekil 8. Geliştirilen sayısal devrenin RTL şeması

Tablo 6, bu çalışmaya benzer şekilde farklı yöntemlerle, farklı uzunlukta ve farklı tipte üretilen söзде rasgele sayılar temelinde gerçekleştirilen literatür karşılaştırmasını vermektedir. Açıkça görülmektedir ki, FPGA’da ondalık sayıları üretmek için daha fazla kaynak tüketilmektedir. Elbette bu tüketimde kullanılan teknikte büyük önem

kazanmaktadır. Zira [1 ve 2] nolu çalışmalar söзде rasgele sayı üretimi için kaotik temelli bir teknik kullanırken bu çalışma kapsamında LFSR tekniğinden istifade edilmiştir. Dolayısıyla yapısının basit olması nedeniyle LFSR daha az sayıda kaynak tüketimini beraberinde getirmiştir.

**Tablo 6.** Literatürdeki farklı çalışmalara ait devre büyüklükleri karşılaştırması

No	Çalışma	Üretilen Sayı Türü	Üretilen Sayı	LUT Sayısı	FF Sayısı
1	Khanzadi ve arkadaşları [26]	Ondalıklı (Real)	32-bit	428	688
2	De la Fraga ve arkadaşları [27]	Ondalıklı (Fixed)	32-bit	575	-
3	Cerda ve arkadaşları [28]	Tamsayı (Integer)	8-bit	32	-
4	Justin ve arkadaşları [29]	Tamsayı (Integer)	16-bit	47	52
5	Tian ve Benkrid [30]	Tamsayı (Integer)	32-bit	213	193
6	Rezk ve arkadaşları [31]	Tamsayı (Integer)	32-bit	276	-

### III. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, doğrusal geri beslemeli öteleyen kaydedici temelli söзде rasgele sayı üretici tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu söзде rasgele sayı üreticinin en belirgin farkı ürettiği sayıların “0” ve “1” arasında 32-bitlik hassasiyete sahip kayan noktalı sayılar olmasıdır. O nedenle üretilen sayıların 0.1’den büyük ve 1.0’dan küçük olması sağlanmıştır. Geliştirilen rasgele sayı üretici VHDL tasarım dili ile kodlanarak sayısal devresi oluşturulmuş ve testleri Xilinx firmasına ait Vivado IDE simülasyon yazılımında ve Artix7 işlemcili Nexys 4 DDR aygıtında gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında başlangıç değerleri değiştirilerek üç farklı test gerçekleştirilmiştir. Bu başlangıç değerleri özellikle [0, 1] değer aralığının başından, ortasından ve sonundan seçilerek bu durumun üretilen doğru rasgele sayı adetine, toplam ve ortalama işlem sürelerine etkisi incelenmiştir. Her üç başlangıç değerleriyle üretilen toplam rasgele sayı adetinin üretilme süreleri (Toplam Saat Darbesi) ve geçerli ([0, 1] aralığında) sayıların ortalama üretim süreleri birbirine oldukça yakındır. Üretilen sayıların işlem sürelerinin birbirinden farklı olmalarının sebebi her üretilen sayının değil 0 ile 1 aralığında olan sayıların kabul edilerek devre çıkışına aktarılmasıdır. Eğer sayı belirlenen aralıkta değilse tekrar başa dallanma sağlanır. Bu da işlem süresinin artmasına sebebiyet vermektedir. Bu çalışma ile [0, 1] aralığında üretilen

sayıların bu aralıkta normal bir şekilde dağıldığı herhangi bir değerde kümelenmediği açıkça görülmektedir. Üretilen sayıların dağılımının normal olması, algoritma yapısının basit ve anlaşılır olması ve günümüzde hız aygıtı olarak öne çıkan FPGA’da uygulanmış ve kullanılabilir düzeyde olması nedeniyle bu söзде rasgele sayı üretici araştırmacılar tarafından [0, 1] aralığında rasgele sayıya ihtiyaç duyulan herhangi bir sistemde rahatlıkla kullanılabilir.

### KAYNAKLAR

- [1] Hendrik, M., Meijer, S., Velden, J.V.D., & Iosup, A., (2013). Procedural content generation for games: A survey. *ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications*.
- [2] Özkaynak, F., (2014). Cryptographically secure random number generator with chaotic additional input. *Nonlinear Dynamics*, 78, 2015-2020.
- [3] Çavuşlu, M., Karakuzu, C., & Şahin, S., (2010). Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritması ile Yapay Sinir Ağı Eğitiminin FPGA Üzerinde Donanımsal Gerçeklenmesi. *Politeknik Dergisi*, 13, 83-92.
- [4] Knuth, D., (1997). *The Art of Programming*, 3th Edition, Addison Wesley Lognman, Boston, USA.
- [5] Ripley, B., (1983). *Computer Generation of*

- Random Variables: A Tutorial. *International Statistical Review*, 51, 301-3019.
- [6] James, F., (1990). A review of pseudorandom number generators. *Computer Physics Communications*, 60, 329-344.
- [7] Lagarias, J., (1990). Pseudorandom Number Generators in Cryptography and Number Theory. *Advanced Mathematics*, 42, 115-143.
- [8] Akhshani, A., Akhavan, A., Mobaraki, A., Lim, S., & Hassan, Z., (2014). Pseudo random number generator based on quantum chaotic map. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 19, 101-111.
- [9] Koyuncu, İ., Özcerit, A., Pehlivan, İ., & Avaroglu, E., (2014). Design and implementation of chaos based true random number generator on FPGA. *Signal Processing and Communications Applications Conference*.
- [10] Genç, Y., & Tuncer, S., (2019). İnsan Hareketleri Tabanlı Gerçek Rasgele Sayı Üretimi. *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 8, 261-269.
- [11] Khaliq, A., Lone, A., & Ashraf, S., (2015). A Novel Unpredictable Temporal based Pseudo Random Number Generator. *International Journal of Computer Applications*, 117, 975-987.
- [12] Özkaynak, F., (2015). Kriptolojik Rasgele Sayı Üreteçleri. *Türkiye Bilişim Vakfı Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği Dergisi*, 8, 37-44.
- [13] Aydın, Ö., & Dalkılıç, G., (2016). Nesnelerin İnterneti için Sözcük Rasgele Sayı Üretici: Birleştirilmiş Doğrusal Geri Beslemeli Öteleyici Saklayıcı. *Akıllı Teknoloji & Akıllı Yönetim*, İzmir, Gülermat Matbaacılık, 121-129.
- [14] Falih, S., (2016). A Pseudorandom Binary Generator Based on Chaotic Linear Feedback Shift Register. *Iraq J. Electrical and Electronic Engineering*, 12, 155-160.
- [15] Masoodi, F., & Alam, S., (2012). An Analysis of Linear Feedback Shift Registers in Stream Ciphers. *International Journal of Computer Applications*, 46, 46-49.
- [16] Panda, A., Rajput, P., & Shukla, B., (2012). FPGA implementation of 8, 16 and 32 bit LFSR with maximum length feedback polynomial using VHDL. *International Conference on Communication Systems and Network Technologies*, Rajkot.
- [17] Rezk, A., Madian, A., Radwan, A., & Soliman, A., (2019). Reconfigurable chaotic pseudo random number generator based on FPGA. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 98, 174-180.
- [18] Stanchieri, G., Marcellis, A., Palange, E., & Faccio, M., (2019). A true random number generator architecture based on a reduced number of FPGA primitives. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 105, 15-23.
- [19] Koyuncu, İ., & Özcerit, A., (2017). The design and realization of a new high speed FPGA-based chaotic true random number generator. *Computers & Electrical Engineering*, 58, 203-214.
- [20] George, A., Sharma, R., & Rao, S., (2019). IEEE 754 floating-point addition for neuromorphic architecture. *Neurocomputing*, 366, 74-85.
- [21] Melquiond, G., (2012). Floating-point arithmetic in the Coq system. *Information and Computation*, 216, 14-23.
- [22] Parte, R., & Jain, J., (2015). Analysis of Effects of using Exponent Adders in IEEE-754 Multiplier by VHDL. *International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies*, Nagercoil.
- [23] Lin, Y., Wang, F., & Liu, B., (2018). Random number generators for large-scale parallel Monte Carlo simulations on FPGA. *Journal of Computational Physics*, 360, 93-103.
- [24] George, S. N., & Pattathil, D. P. (2014). A secure LFSR based random measurement matrix for compressive sensing. *Sensing and Imaging*, 15(1), 85.
- [25] Dereli, S., & Köker, R., (2018). IW-PSO approach to the inverse kinematics problem solution of a 7-DOF serial robot manipulator. *Sigma J Eng Nat Sci*, 36, 77-85.
- [26] Khanzadi, H., Eshghi, M., & Borujeni, S. E., (2015). Design and FPGA Implementation of a Pseudo Random Bit Generator Using Chaotic Maps. *ETE Technical Review*, 32, 304-310.
- [27] de la Fraga, L. G., Torres-Pérez, E., Tlelo-Cuautle, E., & Mancillas-López, C. (2017). Hardware implementation of pseudo-random number generators based on chaotic maps. *Nonlinear Dynamics*, 90(3), 1661-1670.
- [28] Cerda, J. C., Martinez, C. D., Comer, J. M., Hoe, D. H. K., (2012). An efficient FPGA random number generator using LFSRs and cellular automata. *IEEE 55th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)*.
- [29] Justin, R., Mathew, B. K., Abe, S., (2015). FPGA Implementation of High Quality Random Number Generator Using LUT Based Shift Registers," *Procedia Technology*, 24, 1155-1162.
- [30] Tian, X., & Benkrid, K., (2009). Mersenne Twister Random Number Generation on FPGA, CPU and GPU. *NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems*.
- [31] Rezk, A. A., Madian, A. H., Radwan, A. G., Soliman, A. M., (2019). Reconfigurable chaotic pseudo random number generator based on



FPGA. International Journal of Electronics and Communications, 98, 174-180.

## Değişken Kuvvetli EMG Sinyallerinin Çok Değişkenli Görgül Kip Ayrışımı ile Analizi ve Sınıflandırılması

*Analysis and Classification of Variational Force EMG Signals with Multivariate Empirical Mode Decomposition*

Fatih ONAY<sup>1</sup> , Ahmet MERT<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Elektrik Elektronik Mühendisliği, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Urla, 35430, İzmir

<sup>2</sup> Mekatronik Mühendisliği, Bursa Teknik Üniversitesi, Yıldırım, 16310, Bursa

### Öz

Elektromiyografi (EMG) sinyalleri, insan-makine etkileşimli akıllı el protezlerinin kontrolünde önemli bir rol oynamaktadır. Kas aktivesinin bir sonucu olarak ortaya çıkan EMG sinyalleri, yapılan aktiviteye dair özel bilgileri kendi içerisinde ihtiva etmektedir. Dolayısıyla akıllı el protezlerinin işlevselliğinin artırılması, kas bölgesinden toplanan EMG sinyalinin doğru bir şekilde analiz edilip yorumlanmasına önemli ölçüde bağlıdır. Bu konseptte uygun olarak, akıllı el protezi hareketlerinin karar verme sürecinde, EMG sinyallerinin güvenilir bir şekilde kullanılabilmesi için, var olan yöntemlerin geliştirilmesi ya da bu yöntemlere üstünlük sağlayacak yeni yöntemler önerilmesi gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında, çok kanallı EMG sinyallerinin analizinin geliştirilmesi amacıyla, çok değişkenli görgül kip ayrışımı (ÇDGKA) tabanlı öznelik çıkarma yöntemi, geleneksel metotlara alternatif olarak sunulmuştur. Sinyali adaptif olarak salınım modlarına ayıran ÇDGKA yöntemi kullanılarak, EMG sinyalinden daha anlamlı bilgi edinilmesi amaçlanmıştır. ÇDGKA tabanlı özneliklerin farklı el ve parmak hareketlerini ayırt etme performansı ve farklı kuvvet seviyelerine karşı gösterdiği performans incelenmiştir. Bu amaçla ampute katılımcıların artık uzuvlarından toplanan düşük, orta ve yüksek kuvvet seviyelerine ait EMG sinyalleri üzerinde ÇDGKA yöntemi uygulanarak özgül kip fonksiyonları (ÖKF) elde edilmiştir. Elde edilen ÖKF'lerden çıkarılan öznelikler kullanılarak altı farklı el ve parmak hareketi, en yakın komşu ( $k$ -NN), doğrusal ayırım analizi (LDA) ve destek vektör makinesi (SVM) sınıflandırıcıları kullanılarak sınıflandırılmıştır. Aynı kuvvet seviyesinde eğitilip test edilerek (Senaryo 1) ve tüm kuvvet seviyelerinde eğitilip tek bir kuvvet seviyesinde test edilerek (Senaryo 2) gerçekleştirilen sınıflandırmalar neticesinde, önerilen ÇDGKA tabanlı özneliklerin ham sinyal tabanlı özneliklere göre, senaryo 1 için %10 - %15, senaryo 2 için %18'e kadar üstünlük sağladığı belirlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Elektromiyografi, Çok değişkenli görgül kip ayrışımı, İnsan-Makine Etkileşimi, El protezi, Kontrol.

### Abstract

Electromyography (EMG) signals play an important role in the control of human-machine interfaced smart hand prostheses. The EMG signals emerged as a result of muscle activity contain specific information about the activity. Therefore, enhancing the functionality of intelligent hand prostheses significantly depends on the precise analysis and interpretation of the EMG signals that are collected from the muscle region. In accordance with this concept, in order to use EMG signals reliably in the decision-making process of smart hand prosthesis movements, it is necessary to improve present methods or to propose new methods to be superior to these methods. In this study, multivariate empirical decomposition (MEMD) based feature extraction method is presented as an alternative to traditional methods to improve the analysis of multichannel EMG signals. It is aimed to obtain more meaningful information from EMG signals by using the MEMD method which separates the signal into adaptive oscillation modes. The performance of discriminating hand and finger movements at different force levels of the MEMD based features was investigated. For this purpose, intrinsic mode functions (IMF) were obtained by using the MEMD method on surface EMG signals of low, medium and high force levels collected from the amputated participants. The features which are extracted from IMFs, classified by  $k$  nearest neighbors ( $k$ -NN), linear discriminant analysis (LDA) and support vector machines (SVM) to discriminate six hand and finger movements. Training and testing at same force level (Scheme 1) and training the classifier with all levels of force and testing it with a single level of force (Scheme 2) classification operations were performed. The proposed MEMD based features have outperformed raw signal-based features, 10% -15% for Scheme 1 and up to 18% for Scheme 2.

**Keywords:** Electromyography, Multivariate Empirical Mode Decomposition, Human-Machine Interface, Hand Prosthesis, Control.

## I. GİRİŞ

İnsan vücudunda meydana gelen uzuv kayıpları; doğuştan, sonradan yaşanan kazalar ve hastalıklar sebebiyle meydana gelebilmekte ve bunun sonucu olarak da engelli insan sayısı her geçen gün artmaktadır. Dolayısıyla, engelli insanların yaşam kalitesini arttırmak için araştırmacılar, basit ve doğal insan-makine etkileşimli cihazların gerekliliğini düşünmektedir. İnsan-makine etkileşimi için özel bir dokudan, organdan veya sinir sisteminden elde edilen elektroensefalografi (EEG) [1], elektrookülografi (EOG) [2] veya elektromiyografi (EMG) gibi çeşitli biyolojik sinyaller kullanılabilir. EMG sinyallerinin diğer biyolojik sinyallere göre daha yüksek sinyal-gürültü oranına sahip olması sebebiyle, insan-makine etkileşimli güçlendirilmiş akıllı protezlerin kontrolünde EMG sinyali tercih edilir [3].

Ampute bireylerin artık uzuvlarından alınan EMG sinyalleri ile protez kontrolü gerçekleştirmek mümkündür. EMG sinyalleri, akıllı protezlerin kullanıcıya sağladığı sezgisel kontrol sayesinde karmaşık görevlerin gerçekleştirilmesine olanak sağlar. Bu karmaşık kontrol sürecinin geliştirilmesi oldukça önemlidir. Bu yüzden ampute bireylerin gündelik hayatta çok fonksiyonlu el ve parmak hareketlerini gerçekleştirebilmeleri için halen pratik protezlerin geliştirilmesine ihtiyaç vardır [4]. EMG sinyali, insan kasları içerisinde bulunan bireysel motor ünitelerinin aktivitesi sonucu ortaya çıkan bir işarettir. Bu işaret kas bölgelerindeki deri üzerine yerleştirilen yüzey elektrotları ya da kas dokusuna batırılan iğne benzeri elektrotlar yardımıyla toplanabilir [5]. Yapılan çalışmalar invaziv yöntemlerle invaziv olmayan yöntemlerin benzer doğrulukta sonuçlar verdiğini göstermiştir [6]. Yüzey EMG (sEMG) yöntemi, invaziv yöntemlere göre daha kolay kullanıma sahip olması nedeniyle güçlendirilmiş protezlerin kontrolünde ihtiyaç olan sinyalin toplanması için tercih edilir.

Deri yüzeyine elektrotlar yerleştirilerek toplanan EMG sinyallerini belirtmek için kullanılan sEMG, birden fazla elektrod kullanılarak da toplanabilir ve çok kanallı sEMG halini alır. sEMG sinyallerinin zaman düzlemindeki analizinde, genlik ve enerji gibi temel sinyal analiz yöntemleri kullanılırken, frekans düzlemi analizinde ise Fourier dönüşümü (FD) ve dalgacık dönüşümü (DD) gibi sinyal işleme yöntemleri kullanılmaktadır. Farklı kas hareketleri ile elde edilen işaretler arasındaki farkları tespit etmek için gelişmiş sinyal işleme teknikleri kullanılmalıdır. Ayrıca, birden fazla kas grubunun aynı anda çalıştığı hareketler için de ayırt edici özelliklerin bulunması gerekmektedir.

Akıllı el protezlerinin kontrolünde, işlem hızı bakımından zaman tabanlı özniteliklerin kullanılması tercih edilir. Fakat farklı kuvvet seviyelerindeki kas hareketlerini ayırt etme performansı bakımından, ham sinyal tabanlı özniteliklerin geliştirilmeye ihtiyacı

olduğu görülmektedir [7]. Kuvvet seviyesi değişimi ile birlikte, yapılan harekete ait kas grubundaki aktif olan motor ünitesi sayısının değişmesi, aynı hareket için farklı işaretlerin ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Bir akıllı protezin, farklı kuvvet seviyelerinde yapılan el hareketlerini doğru bir şekilde taklit edebilmesini sağlayacak gürbüz yöntemler geliştirmek önemli bir ihtiyaçtır.

Bu çalışmada, doğrusal olmayan ve durağan olmayan sinyallerin işlenmesinde taban fonksiyonuna ihtiyaç duyan analitik sinyal işleme yöntemlerine alternatif olarak geliştirilen çok değişkenli görgül kip ayrışımı yöntemi (ÇDGKA) kullanılacaktır. EMG sinyali gibi doğrusal olmayan ve durağan olmayan sinyaller, önceden belirlenen bir taban fonksiyonunun karakteristiğinden farklı bir yapıya sahip olabilir bu da analizin doğru olarak yapılamamasına sebep olabilmektedir. Bu çalışmanın amacı ise, farklı kas gruplarının eş zamanlı çalışması neticesinde oluşan çok kanallı sEMG sinyallerinin ayırt edici analizini, güncel ve gelişmiş sinyal işleme yöntemi olan ÇDGKA ile gerçekleştirmektir. Ampute bireylerden toplanan çok kanallı sEMG sinyallerinin ÇDGKA ile analizi gerçekleştirilerek, sinyalin özgül kip fonksiyonları (ÖKF) elde edilecektir. Farklı bir frekans bantlarını temsil eden ÖKF'lerden çıkarılan zaman tabanlı özniteliklerin kullanılmasıyla sınıflandırma işlemi yapılacaktır. Bunun neticesinde altı farklı el ve parmak hareketini temsil eden sEMG sinyallerinin daha doğru bir şekilde ayırt edilebilmesi amaçlanmıştır. Tüm bu işlemler gerçekleştirilerek ÇDGKA tabanlı özniteliklerin, farklı kuvvet seviyelerinde gerçekleştirilen kas hareketlerini ayırt etme performansı incelenecektir.

## II. MATERYAL ve YÖNTEM

### 2.1. Veri Seti

Bu çalışma için kullanılan veri seti tek taraflı amputasyona sahip dokuz bireyden (7'si travmatik, 2'si doğuştan) elde edilmiştir. Tablo 1'de verilerin toplandığı katılımcılara ait yaş, cinsiyet ve amputasyon türüne ait bilgiler verilmiştir. En az sekiz kanallı, örnekleme frekansı 2000 Hz ve çözünürlüğü 16 bit olan EMG edinim sisteminin (USB-6210, National Instruments) kullanımıyla, toplamda altı farklı kavrama ve parmak hareketine ait işaretleri içeren veri seti oluşturulmuştur. Kazanç faktörü 1000 olan çok kanallı EMG yükseltici ile her bir kanal için elde edilen sinyal yükseltilmiştir. Altı farklı parmak hareketi için her bir katılımcıdan beş ila sekiz adet kayıt alınmıştır.

**Tablo 1.** Çalışmada yer alan katılımcıların bilgisi.

Katılımcı	Yaş	Cinsiyet	Ampute Türü
Ampute 1	25	E	Travmatik
Ampute 2	33	E	Travmatik

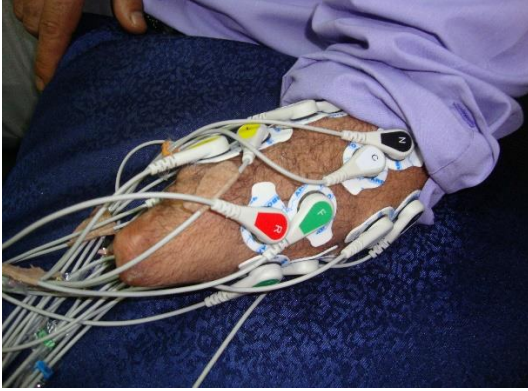
Ampute 3	30	E	Travmatik
Ampute 4	27	E	Travmatik
Ampute 5	35	E	Travmatik
Ampute 6	29	E	Travmatik
Ampute 7	57	E	Travmatik
Ampute 8	19	K	Doğuştan
Ampute 9	31	K	Doğuştan

Veri setindeki 6 el hareketi Şekil 1'de gösterildiği gibidir. Sırasıyla; başparmak (BP), işaret parmağı (İP), çimdik (ÇK), tripod kavrama (TK) kanca kavrama (KK) ve küresel kavrama (KÜK) hareketleri için toplam 9 amputeden 54 farklı EMG sinyali örneği içeren veri seti bu çalışmada kullanılmıştır.



Şekil 1. Altı sınıflı veri seti el hareketleri (1: BP, 2: İP, 3: ÇK, 4:TK, 5: KK, 6:KÜK).

Elektrodlar yerleştirilmeden önce katılımcıların derileri alkol ve aşındırıcı cilt hazırlama jeli ile temizlenmiştir. Sonrasında 8 çift Ag/AgCl yüzey elektrodu SENIAM (Surface ElectroMyoGraphy for the Non-Invasive Assessment of Muscles) tarafından belirlenen kıstaslara göre katılımcıların artik uzuvları üzerine tek ya da iki sıra halinde yerleştirilmiştir. Ampute 2 katılımcısına ait elektrodun yerleşimi Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Ampute 2 katılımcısına ait örnek elektrodun yerleşimi

Veri toplama işlemi sırasında, katılımcılar amputasyona uğramış uzuvlarını kullanarak istenilen hareketi yapabilmek için, bir yandan zarar görmemiş olan sağlam elleriyle de hareketleri gerçekleştirmişlerdir. Bunun yanında PC ekranında EMG kanallarını gözlemleyebilmelerini sağlayacak görseller kullanılmıştır. Böylelikle, katılımcıların istenilen kuvvet seviyesindeki hareketleri

yapabilmeleri desteklenmiştir. Bu veri setinde düşük, orta ve yüksek kuvvet seviyelerine ait sinyallerin her biri için kayıtlar bulunmaktadır. Her bir el ve parmak hareketlerinin, tüm kuvvet seviyelerine ait işaretleri bu çalışma kapsamında kullanılacaktır.

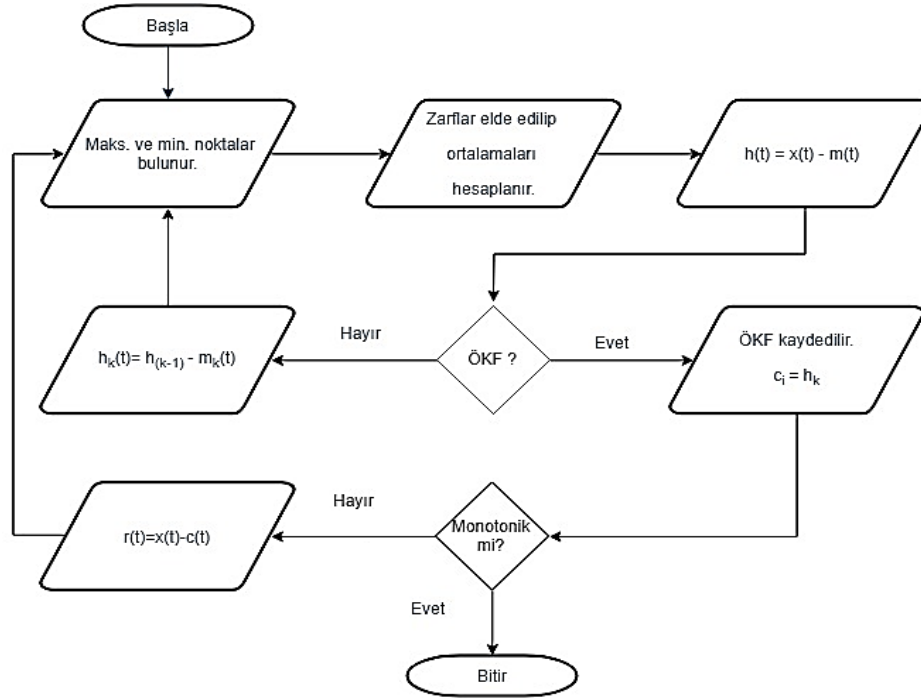
## 2.2. Görgül Kip Ayırışımı

GKA Huang ve arkadaşları [8] tarafından geliştirilmiş olup doğrusal olmayan ve durağan olmayan sinyallerin işlenmesinde başarılı sonuçlar veren bir sinyal ayırışırma algoritmasıdır. Sinyali, kendi içinde barındırdığı sonlu sayıda genlik ve frekans modüleli özgül kip fonksiyonlarına (ÖKF) ayırıştıran ve doğal salınım kiplerini gösteren bir eleme sürecidir. Fourier analizinde sinüs ve kosinüs dalgalarıyla temsil edilen salınım kipleri, GKA algoritmasında özgül kip fonksiyonları ile temsil edilmektedir. GKA ile eleme süreci neticesinde elde edilen fonksiyonların özgül kip fonksiyonu olması için gerek ve yeter iki şart şu şekildedir;

1. Tüm zaman serisi boyunca mevcut olan yerel maksimum ve yerel minimum nokta sayısı sıfır geçiş sayısına eşit olmalı ya da aralarında en fazla bir fark olmalıdır.
2. Yerel maksimum noktalarının oluşturduğu üst zarf ile yerel minimum noktalarının oluşturduğu alt zarfın ortalaması sıfıra eşit olmalıdır.

Yukarıda verilen şartlar ampirik olarak elde edilir bu yüzden elde edilecek ÖKF'lerin bant aralığı ve sayısı önceden kestirilemez. İkinci şartta ifade edilen yerel maksimum ve yerel minimum noktalarının ortalaması, zarf boyunca noktasal olarak hesaplanan yerel ortalamayı belirtmektedir. ÖKF'ler orijinal sinyalin farklı frekans bantlarını ve zaman ölçeklerini gösteren fonksiyonlardır. ÖKF'ler sinyalin yerel ortalamalarının hesaplanmasıyla bulunur ve böylelikle yerel ölçekte sinyalin analizi gerçekleştirilebilir. GKA algoritmasını örnek bir  $x(t)$  sinyaline etkili bir şekilde uygulamak için, eleme süreci olarak adlandırılan işlem yerine getirilmelidir. İzlenmesi gereken adımlar şu şekildedir;

- i. Örnek bir  $x(t)$  sinyalinin tüm yerel maksimum noktaları  $M(k)$ ,  $k=1,2,3...$  ve tüm yerel minimum noktaları  $M(i)$ ,  $i = 1,2,3...$  sırasıyla tespit edilir.
- ii. Kübik spline interpolasyonu uygulanarak yerel maksimum ve yerel minimum noktaları birleştirilir ve sinyalin üst ve alt zarfları  $e_{\max}(t)$  ve  $e_{\min}(t)$  bulunur.
- iii. Bulunan üst ve alt zarfların ortalaması  $m t = e_{\min} t + e_{\max} t / 2$  hesaplanır.



Şekil 3. GKA Algoritması Akış Diyagramı

- iv.  $m(t)$  değeri ÖKF şartlarını sağlıyorsa  $c(t) = m(t)$  ÖKF olarak saklanır. (Akış diyagramında  $m(t)$ 'nin ÖKF şartlarını sağlamadığı varsayılmıştır)
- v. ÖKF şartlarını sağlamaması durumunda  $m(t)$  fonksiyonu sinyalin kendisinden çıkarılır.  $h_1(t) = x(t) - m_1(t)$  elde edilir.
- vi. Bulunan  $h_1(t)$  ÖKF olma şartlarını yerine getirmese,  $h_k(t) = h_{k-1}(t) - m_k(t)$  işlemi yapılarak ilk adıma dönülür ( $k=1$  için  $h_{k-1}(t) = x(t)$ ) ve  $h_1(t)$  üzerinde ÖKF şartları sağlanıncaya kadar eleme süreci devam eder. Böylece  $h_1(t)$  yeni veri olarak kabul edilir.

Eleme sürecinden ÖKF elde etme işlemi monotonik bir fonksiyon olan  $r(t)$  ifadesi elde edilinceye dek sürdürülür. Eleme sürecinin tamamlanmasıyla birlikte orijinal sinyal şu formda yazılabilir;

$$x(t) = \sum_{k=1}^L c_k(t) + r(t) \quad (1)$$

GKA algoritması, tek-kanal tabanlı bir analiz işlemi gerçekleştirmek için elverişlidir. Fakat çok kanallı sinyaller üzerinde uygulanması durumunda, kanallar arasındaki ilişkiyi dikkate almaz ve bu sebeple çok kanallı sinyallerin tutarlı bir analizini gerçekleştirmek mümkün olmayabilir. Çok kanallı sinyaller üzerinde uygulanabilecek daha kapsamlı ve tutarlı sonuçlar verebilecek bir algoritma olan ÇDGKA yöntemi bu sebeple geliştirilmiştir. Bu yöntem, n-boyutlu bir

uzayda eleme sürecinin gerçekleştirilmesiyle bulunan ÖKF bileşenlerinin kullanılmasını esas almıştır.

### 2.3. Çok Değişkenli Görgül Kip Ayırımı

GKA algoritması, tek-kanal tabanlı bir analiz yöntemi olup, çok kanallı EMG sinyallerini işlemek için doğrudan uygulanamaz. Ayrıca GKA algoritması, çok kanallı sinyaller için ayrıştırılmış ÖKF'lerin sayısının eşitliğini garanti etmez ve bu da çok kanallı EMG sinyal analizlerinin fiziksel olarak anlamsız olmasına neden olabilir.

Çok kanallı sinyallerin analizinde yetersiz kalan GKA yöntemine alternatif olarak Rehman ve Mandic tarafından [9] geliştirilen çok değişkenli görgül kip ayrışımı yöntemi (ÇDGKA), tüm kanallardaki sinyallerden aynı sayıda ÖKF elde edilmesine olanak sağlar. ÇDGKA yöntemi, çok boyutlu sinyallerin salınım modlarının ortak analizini yaparak mod-hizalama sorununu çözmeye yardımcı olur. Bu da farklı kanallardaki aynı indeksli ÖKF'ler arasındaki frekans bantlarının tutarlılığının sağlanmasıyla gerçekleştirilir. Ayrıca frekans bantlarının birbiriyle tutarlı olması aynı sayıda ÖKF elde edilmesine katkı sağlayarak çok boyutlu sinyalin genel analizini yapmayı kolaylaştırır ve daha doğru bilgi elde edilmesini sağlar.

GKA algoritması, yerel ekstremum noktalarının interpolasyonu ile elde edilen üst ve alt zarfların ortalamasını alarak, yerel ortalama değerini kolaylıkla hesaplayabilir. Fakat çok değişkenli sinyallerin direkt olarak yerel ekstremum noktalarını bulmak kolay bir işlem değildir. Bu işlemin üstesinden gelebilmek amacıyla, ÇDGKA yöntemi, çok kanallı sinyallerin n-boyutlu bir uzayda farklı doğrultulardaki gerçek değerli iz düşümlerini kullanır. Çok kanallı sinyalin farklı doğrultulardaki bu iz düşümleri genliği temsil

eder. Bu iz düşümler kullanılarak sinyalin her bir kanalındaki zarfları elde edilir.

Farklı doğrultular boyunca uzanan bu zarfların, n-boyutlu uzaydaki integralinin hesaplanmasıyla yerel ortalama bulunabilir. Bu şekilde bulunan yerel ortalamalar kullanılarak daha gürbüz bir eliminasyon işlemi yapılmış olur.

#### 2.4. Öznitelik Çıkarma ve Sınıflandırma

EMG sinyalleri aracılığıyla, farklı el hareketlerinin ayrıştırılması için yapılması gereken önemli işlemlerden birisi de uygun öznitelikleri çıkarmaktır. Sınıflandırma işleminin sonucu, sınıflandırıcının kendisinden çok, kullanılan özniteliklerin etkisine bağlıdır. Öznitelik çıkarma işlemi, verinin içerisinde barındırdığı faydalı bilgileri elde etmek için kullanılan bir yöntemdir. Sinyalin kendisinden daha küçük boyutlu öznitelik vektörü elde etmek sınıflandırıcının hızını artırarak, gerçek zamanlı uygulamaların daha iyi bir performans sergilemesini sağlayacaktır. sEMG sinyalinden çıkarılacak öznitelikler zaman tabanına, frekans tabanına ve zaman-frekans tabanına dayanan öznitelikler olmak üzere üç ana gruba ayrılabilir [10]. Zaman tabanlı öznitelikler herhangi bir transformasyon gerektirmeksizin ham EMG sinyalinden direkt olarak elde edilir. Bu özniteliklerin uygulanması kolaydır ve düşük hesaplama yükü gerektirir. Öte yandan, frekans tabanlı öznitelikle ise genellikle EMG sinyalinin güç spektral yoğunluğunun istatistiksel özelliklerini yansıtmaktadır ve kompleks işlem yükü fazladır. Protez uygulamalarında zaman tabanlı özniteliklerin iyi sonuçlar verdiği literatürde geçmiş çalışmalarda gözlemlenmiştir. [11]

Öznitelikler doğrudan EMG sinyalinin kendisinden elde edilebileceği gibi, sinyalin ayrıştırılması sonucu ortaya çıkan bileşenler kullanılarak da elde edilebilir. Fakat el hareketleri sonucunda ortaya çıkan EMG işaretleri doğrusal olmayan ve durağan olmayan bir zaman serisi olarak kabul edildiğinden, doğrusallığı ve durağanlığı varsayan ayrıştırma algoritmaları yanlıcı sonuçlar verebilmektedir [12]. Bu yüzden ayırt edilmesi kolay öznitelikleri kullanabilmek için, EMG sinyalinin karakteristik özelliklerini dikkate alan teknikler kullanarak öznitelikler elde edilmelidir. ÇDGKA, EMG sinyallerine uygulanabilecek potansiyel bir yöntemdir. Sinyali adaptif olarak bileşenlerine ayıran ÇDGKA yöntemi, sinyalden ilgili özniteliklerin çıkarılmasına olanak sağlar ve aynı zamanda arkaplan gürültüsünün bastırılmasında ve motor ünitelerinin tespit edilmesinde de işlevsel bir rol oynar [12, 13].

Sonuç olarak ÇDGKA yönteminin kullanılması neticesinde elde edilen özgül kip fonksiyonlarından çıkarılan özniteliklerin performansı bu çalışma kapsamında incelenecektir.

Bu çalışmada kullanılan özniteliklere ait kısa tanımlamalar aşağıda verilmiştir.

**Varyans ( $\sigma^2$ ) :** Sinyalin ortalamadan ne kadar uzaklaştığının bir ölçüsü olan standart sapmanın karesidir. Varyans, bu dalgalanmanın gücünü temsil eder. N elemanlı bir dizinin varyans hesabı;

$$\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N |x_i - \mu|^2 \quad (2)$$

**Dalga Formu Uzunluğu (WL):** EMG sinyalinin her bir segmentindeki karmaşıklık ölçüsünü ifade eden bir özniteliktir. Sinyalin ardışık genlikleri  $x_n$  ve  $x_{n-1}$  arasındaki mutlak farkların toplamına eşittir.

$$WL = \sum_{n=1}^N |x_n - x_{n-1}| \quad (3)$$

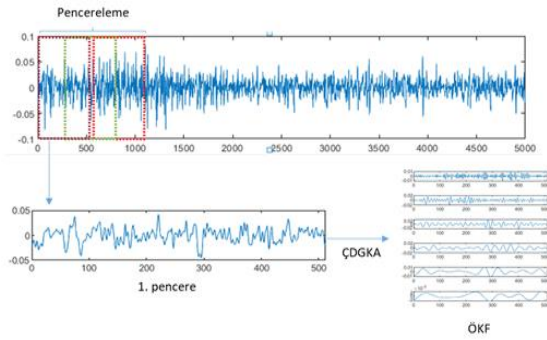
**Etkin Değer (RMS) :** Kasılma esnasında motor ünitelerdeki fizyolojik aktivitelerin seviyesini yansıttığı için sık seçilen bir parametredir.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |x_n|^2} \quad (4)$$

Yukarıda verilen zaman tabanlı öznitelikler sEMG sinyallerinin analizinde sıkça kullanılmaktadır. Bu özniteliklerin ham sinyalden elde edilmiş halleri ve ÇDGKA analizi neticesinde ÖKF'lerden elde edilmiş halleri k-NN, SVM ve LDA sınıflandırıcıları kullanılarak sınıflandırılıp ÇDGKA tabanlı özniteliklerin sınıflandırma başarısına olan etkileri gözlemlenecektir.

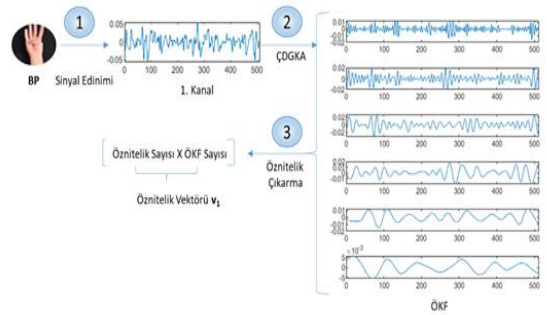
ÇDGKA yöntemi sinyali frekans bantlarına ayırırken, ortaya çıkacak frekans bantlarının sayısı analiz edilen sinyalin uzunluğuna bağlıdır. Bu sebeple ilk olarak sinyalin içerdiği mümkün olan tüm frekans bantlarının elde edilmesi için N adet örnek uzunluğunda sEMG sinyalleri kullanılmıştır. Bu işlem sonucunda elde edilen K adet ÖKF bileşeninin herbirine ait ortalama frekans değerleri hesaplanır. Düşük frekans bandındaki hareket artefaktlarını bastırmak adına literatürde 10 Hz veya 20 Hz altındaki frekans bileşenlerinin filtrelenmesi önerilmiştir [14,15,16]. Bu yüzden ortalama frekans değeri 20 Hz altında olan 'e' adet ÖKF bileşeni öznitelik çıkarma sürecine dahil edilmemiştir. Böylelikle tek bir harekete ait öznitelik vektörünün uzunluğu, **kanal sayısı × ÖKF sayısı × öznitelik sayısı** olarak bulunur. Şekil 4'te pencereleyen sinyalden elde edilen ÖKF'lere ait örnek gösterilmiştir.

Veri setinde yer alan toplamda altı el ve parmak hareketine ait sinyallere pencereleme işleminin uygulanmasıyla birlikte uygun uzunluktaki sinyaller ÇDGKA yöntemi ile salınım modlarına ayrıştırılır.



Şekil 4. Sinyale uygulanan pencereleme işlemi.

Tüm ÖKF'lerden öznelik çıkarılmasıyla öznelik vektörü elde edilir. Şekil 5'te BP hareketine ait pencerelenmiş çok kanallı sEMG sinyalinin birinci kanalına ait öznelik çıkarma süreci gösterilmiştir. Örnek sinyal, ÇDGKA ile ÖKF'lerine ayrıştırılır ve her bir ÖKF'nin varyans, RMS, WL öznelikleri çıkarılarak tek bir hareket örneğine ait öznelik vektörü elde edilir.



Şekil 5. Tek bir kanal için öznelik vektörünün elde edilmesi.

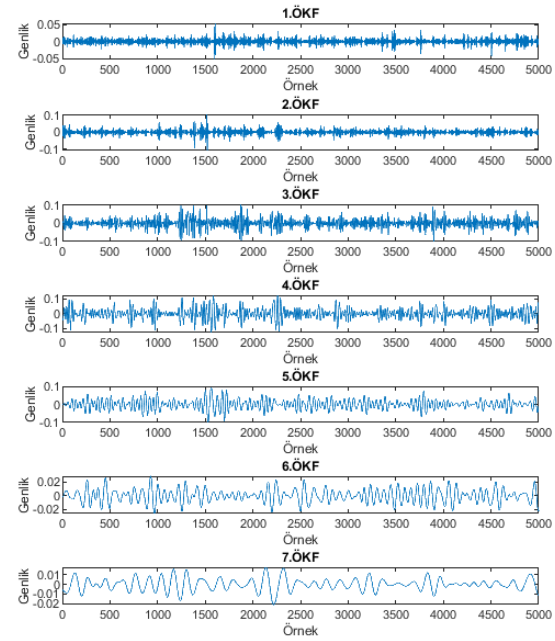
### III. DENEYSEL SONUÇLAR

#### 3.1. ÇDGKA ile ÖKF'lerin Bulunması ve Eliminasyonu

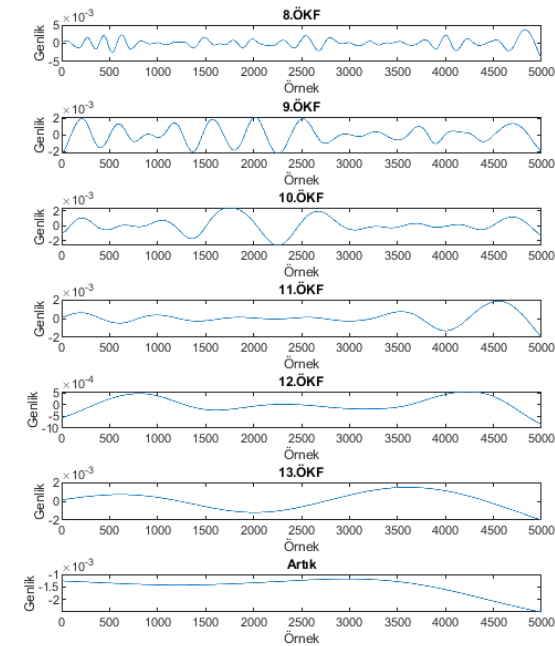
Öznelik çıkarma ve sınıflandırma algoritmaları sEMG sinyallerinden elde edilen ÖKF'lere uygulanarak sonuçlar elde edilmiştir. Bu çalışmada etkin değer, varyans ve dalga formu uzunluğu olmak üzere üç adet zaman tabanlı öznelik kullanılmıştır. Sınıflandırma işlemi için k-en yakın komşu ( $k$ -NN), destek vektör makineleri (SVM) ve doğrusal ayırt etme analizi (LDA) algoritmaları uygulanıp test edilmiş ve doğruluk sonuçları karşılaştırılmıştır.

Şekil 6 ve Şekil 7'de ÇDGKA ile analiz edilmiş örnek bir sEMG işaretinin tek bir kanalına ait ÖKF'ler yer almaktadır. İlk ÖKF'den son ÖKF'ye doğru gidildikçe bileşenlerin periyotlarındaki değişimin artma eğiliminde olduğu görülmektedir. Her ÖKF, orijinal

sinyalin farklı frekans bantlarındaki salınımlarını temsil etmektedir.



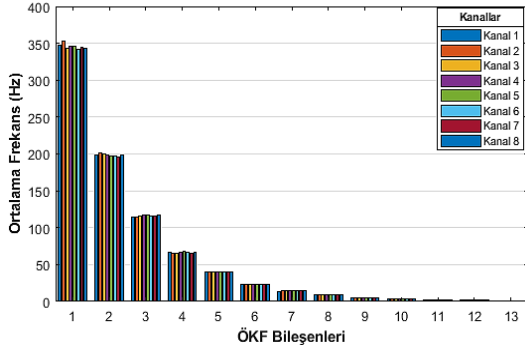
Şekil 6. İlk amputeden alınan orta kuvvet seviyesindeki BP hareketinin, birinci kanal sEMG sinyaline ait ilk 7 ÖKF bileşeni.



Şekil 7. İlk amputeden alınan orta kuvvet seviyesindeki BP hareketinin, ilk kanal sEMG sinyaline ait son 6 ÖKF bileşeni ve artık.

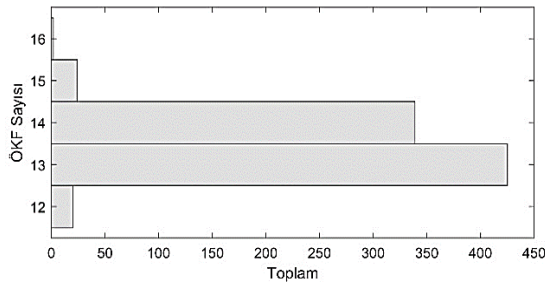
Şekil 8'de orta kuvvet seviyesine ait tüm hareketlerin bütün kanalları için hesaplanan her bir ÖKF'nin ortalama frekans değerleri verilmiştir. sEMG sinyalinin ediniminde kullanılan sekiz kanallı her birinden toplam 13 ÖKF bileşeni ve bir de artık elde edilmiştir. Her ÖKF bileşeninin farklı bir salınım modunu temsil

ettiği verilen şekilde açıkça görülmektedir. Ayrıca ÇDGKA yöntemi kanalların tümünden aynı sayıda ÖKF bileşeni çıkararak, tüm kanalların salınım modlarının aynı ölçekte hizalanmasını da sağlamaktadır. ÇDGKA algoritmasının kanallar arasındaki mod hizalama ve ÖKF'ler arasındaki mod karışımı ölçütlerini uygun bir şekilde yerine getirdiği görülmektedir.



**Şekil 8.** Orta kuvvet seviyesindeki tüm hareketlere ait 8 kanallı sEMG sinyalinin ÇDGKA kullanılarak elde edilen ÖKF'lerinin ortalama frekans değerleri.

Şekil 9'da ÇDGKA analizi neticesinde sEMG sinyallerinden elde edilen ÖKF adetlerinin sayılarının dağılımı verilmiştir. Katılımcılardan toplanan tüm sinyaller aynı uzunlukta olmasına rağmen ÖKF sayıları aynı değildir ve 12 ile 16 arasında bir değişim göstermiştir.



**Şekil 9.** Sinyallerden elde edilen ÖKF sayılarının dağılımı.

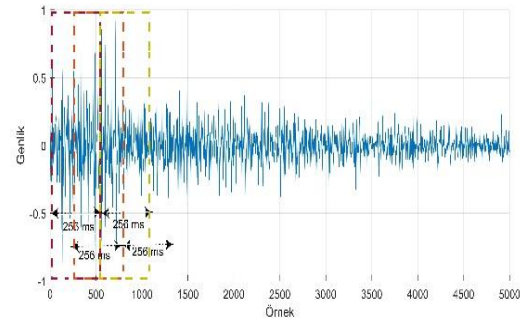
Tablo 2'de, bulunan tüm ÖKF'lerin ortalama frekans değerleri verilmiştir. Ortalama frekans değerleri ÖKF'lerin hangi bant aralığında salınım yaptığına dair bilgi vermektedir. ÇDGKA yöntemi sinyalin ayrıştırılmasında kullanılırken bununla birlikte her ÖKF'nin farklı frekans bandında salınım yapması sebebiyle sinyalin gürültüden temizlenmesi için de kullanılabilir. Özellikle kayıt esnasında ve elektromyetik girişim sebebiyle ortaya çıkan düşük frekans bandındaki gürültülerin temizlenmesi için 20 Hz frekans değeri altında kalan ÖKF'ler sınıflandırma performansını arttırmak için kullanılmamıştır. sEMG sinyali kontrollü bir protez elin pratik olarak uygulamalarda kontrolünü gerçekleştirmek için, kısa örneklili sEMG sinyallerinin analizinin yapılması gerekmektedir. Bu kısımda ÇDGKA yönteminin bu amaca yönelik uygulanması ve performansı

incelenecektir. Bir önceki kısımda sEMG sinyali üzerinde uygulanan ÇDGKA yöntemi ile bulunan ÖKF'lerin ortalama frekans değerleri incelenmiştir.

**Tablo 2.** Bütün kuvvet seviyelerinden elde edilen ÖKF'lerin ortalama frekans değerleri.

Toplam ÖKF Sayısı	Düşük Kuvvet (Hz)	Orta Kuvvet (Hz)	Yüksek Kuvvet (Hz)
1	348,96	345,85	345,26
2	199,55	198,36	198,37
3	116,56	115,82	115,90
4	66,60	66,38	66,33
5	40,57	40,44	40,36
6	23,29	23,60	23,63
7	14,02	14,24	14,21
8	8,75	8,76	8,65
9	5,32	5,34	5,32
10	3,37	3,34	3,35
11	2,17	2,16	2,15
12	1,51	1,52	1,47
13	1,02	1,01	0,98

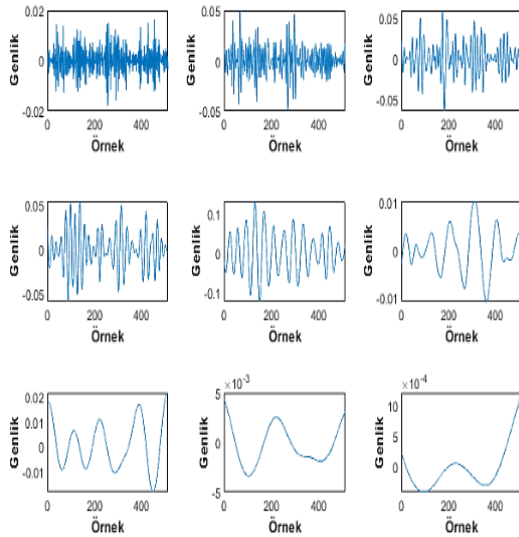
Elde edilen sonuçlara göre ilk 6 ÖKF'nin sınıflandırma performansında en iyi sonucu almak için yeterli olduğu gözlemlenmiştir. Bu sebeple en az 6 ÖKF elde etmeyi sağlayacak uzunluktaki sinyali kullanmak hem hesaplama yükünü azaltmaktadır hem de ÇDGKA tabanlı örnekleme tanıma modelinin gerçek zamanlı olarak uygulanabilmesine yönelik performansı arttırmaktadır. Ampirik olarak gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda 256 ms uzunluğundaki sinyalin en az 6 ÖKF bileşeni çıkarmayı temin ettiği görülmüştür. Pencereleme bitişik olarak değil birbirleriyle 128 ms'lik bir kısımda örtüşecek biçimde ilerletilmiştir. Bu işleme ait süreç Şekil 10'da gösterilmiştir.



**Şekil 10.** Yüksek kuvvet sEMG işaretine uygulanan pencereleme işlemi.

Pencerelenen sinyaller ÇDGKA ile ÖKF bileşenlerine ayrıştırılmıştır. Şekil 11'de tek bir kanalın, bir penceresinden çıkarılan ÖKF bileşenleri gösterilmiştir. Elde edilen ÖKF'ler kanalın içerdiği salınım modlarını sırasıyla, en yüksekten başlayarak en düşük olana doğru sıralamıştır. Böylelikle sinyalin farklı salınım modları üzerinde doğrudan işlem yapabilme imkânı elde edilmiştir. Bu işlem her bir kanal için tekrarlanarak, her bir kanalın salınım modları ayrı ayrı bulunmuştur.





**Şekil 11.** Tek bir pencereden elde edilen ÖKF bileşenleri.

Ayrıca bu sinyale ait ÖKF'lerin her birine ait ortalama frekans ( $Fr_m$ ) değerleri Tablo 3'te yer almaktadır. Buna göre, ilk 6 ÖKF'nin 20 Hz üzerindeki frekans bileşenlerini temsil ettiği açıkça görülmektedir.

**Tablo 3.** ÖKF'lerin ortalama frekans değerleri.

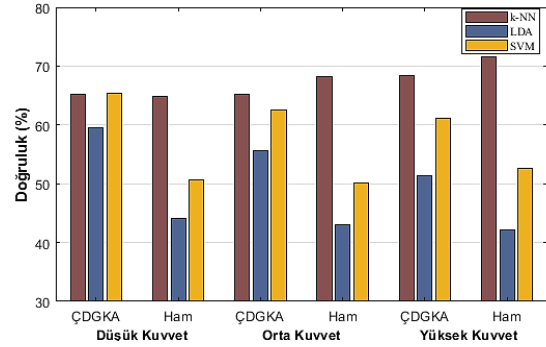
ÖKF	1. ÖKF	2. ÖKF	3. ÖKF	4. ÖKF	5. ÖKF	6. ÖKF	7. ÖKF	8. ÖKF
$Fr_m$ (Hz)	374.8	216.5	126.8	78.2	44.6	24	15.1	7.51

Sinyal uzunluğu kısalmasına rağmen ÇDGKA yöntemi sEMG sinyalinden halen ihtiyaç duyulan frekans bantlarını çıkarabilmektedir. Sinyalin kısalması sadece düşük frekans bantlarındaki bileşenlerin elde edilememesine sebep olmuştur fakat bu bantlar sEMG sinyali analizi için gereken bileşenler değildir. Çalışmalar neticesinde pencerelerden en az 7 en fazla 11 ÖKF bileşeni elde edilmiştir ve bu da öznelik çıkarma işlemi için uygun olan bantları kullanmak için elverişli bir imkân sunmaktadır.

### 3.2. Sınıflandırma Sonuçları

Bu kısımda pencerelenen sinyallerden elde edilen ÖKF'ler ve bu ÖKF'lerden elde edilen özneliklerin, aynı kuvvet seviyesinde eğitilip test edilerek (Senaryo 1) ve tüm kuvvet seviyelerinde eğitilip tek bir kuvvet seviyesinde test edilerek (Senaryo 2) sınıflandırma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Her bir hareket için katılımcılardan beş ile dokuz arasında farklı oturumda kayıt toplanmıştır. Sınıflandırma işleminde ise bu oturumlardan ikisi test için kullanılırken geri kalanlar ise eğitim verisi olarak kullanılmıştır.

Şekil 12'de ÇDGKA tabanlı ve ham sinyal tabanlı özneliklerin Senaryo 1 için sınıflandırma sonuçları k-NN, LDA ve SVM için üç farklı kuvvet seviyesine göre gösterilmiştir.

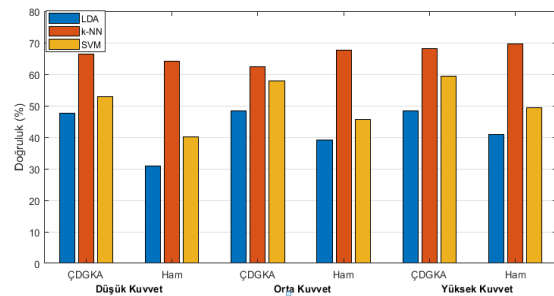


**Şekil 3.** Aynı kuvvet eğitim ve test kümesi kullanılarak elde edilen sınıflandırma sonuçları.

Tablo 4'te pencereleme yöntemiyle elde edilen örnekler kullanılarak yapılan sınıflandırma sonuçlarının sayısal değerleri verilmiştir. Tüm kuvvet seviyeleri için, ÇDGKA tabanlı öznelik çıkarma yönteminin, ham veriden doğrudan öznelik çıkarma yöntemine göre LDA ve SVM sınıflandırıcısı için ortalama %12 daha başarılı olduğu görülmektedir. Düşük kuvvet seviyesinde k-NN sınıflandırıcısının ÇDGKA tabanlı öznelikleri ayırt etme performansı önde olsa da orta ve yüksek kuvvetlerin ayrıştırılmasında ÇDGKA tabanlı öznelikler daha kötü bir performans göstermiştir.

Farklı kuvvet seviyelerinde ortaya çıkan sEMG işaretinin ayrıştırılmasına yönelik yapılan sınıflandırma işlemlerinde kullanılan özneliklerin performansı, Senaryo 2 için de ayrıca test edilmiştir. Tüm kuvvet seviyelerine ait öznelikler kullanılarak eğitim işlemi yapılmış ve tek bir kuvvet seviyesine ait öznelikler ile test edilerek sınıflandırma işlemi gerçekleştirilmiştir.

Şekil 13'te ÇDGKA tabanlı ve ham sinyal tabanlı özneliklerin Senaryo 2 için sınıflandırma sonuçları k-NN, LDA ve SVM için üç farklı kuvvet seviyesine göre gösterilmiştir.



**Şekil 13.** Tüm kuvvet eğitim ve tek kuvvet test kümesi kullanılarak elde edilen sınıflandırma sonuçları.

Tablo 5'te ham sinyal tabanlı özneliklerin ve ÇDGKA tabanlı özneliklerin sınıflandırılması neticesinde bulunan sonuçlar üç farklı kuvvet seviyesi için verilmiştir. İlk senaryoya benzer bir şekilde tüm kuvvet seviyelerinde geçerli olmak üzere ÇDGKA tabanlı öznelikler, ham tabanlı özneliklere göre LDA sınıflandırıcısı için ortalama %12 ve SVM sınıflandırıcısı için ortalama %11 daha başarılı bir performans göstermiştir. Düşük kuvvet seviyesinde k-NN ile

yapılan ayırt etme işleminde ÇDGKA tabanlı öznelikler, ham tabanlı özneliklere üstünlük sağlamış olsa da orta ve yüksek kuvvet seviyelerinde geride kalmıştır.

**Tablo 5.** Tüm kuvvet seviyeleri ile eğitim ve tek bir kuvvet seviyesi ile test için sınıflandırma sonuçları.

Kuvvet	Yöntem	k-NN	LDA	SVM
Düşük Kuvvet	ÇDGKA	<b>66,46</b>	<b>47,69</b>	<b>52,78</b>
	Ham	64,04	30,86	40,17
Orta Kuvvet	ÇDGKA	<b>62,45</b>	<b>48,46</b>	<b>57,77</b>
	Ham	67,54	39,09	45,73
Yüksek Kuvvet	ÇDGKA	<b>68,06</b>	<b>48,41</b>	<b>59,41</b>
	Ham	69,75	40,95	49,28

Şekil 14'te ise sırasıyla LDA ve SVM sınıflandırıcılarına ait düşük, orta ve yüksek kuvvetlerin genel sınıflandırma sonuçları verilmiştir. Her bir el hareketinin, ÇDGKA tabanlı ve ham tabanlı özneliklere göre sınıflandırma sonuçları karışıklık matrislerinde yer almaktadır.

		Karışıklık Matrisi						
Tahmin		BP	İP	ÇK	TK	KK	KÜK	
		BP	535 488	18 78	271 319	19 54	32 117	142 199
İP	25 63	555 423	52 104	204 248	196 297	142 135	47.3% 33.3%	
ÇK	223 160	55 61	487 300	15 37	50 54	74 115	53.9% 41.3%	
TK	27 107	112 146	8 37	469 419	75 84	25 83	65.5% 47.8%	
KK	35 45	132 237	42 65	159 140	438 361	263 275	41.0% 32.1%	
KÜK	127 109	100 27	112 147	106 74	181 59	326 165	34.2% 28.4%	
		55.0% 50.2%	57.1% 43.5%	50.1% 30.9%	48.3% 43.1%	45.1% 37.1%	33.5% 17.0%	48.2% 37.0%
		BP	İP	ÇK	TK	KK	KÜK	
		Gerçek						

(a) LDA sınıflandırma

		Karışıklık Matrisi						
Tahmin		BP	İP	ÇK	TK	KK	KÜK	
		BP	590 499	31 55	237 284	12 31	42 45	83 135
İP	9 54	575 495	53 64	109 145	182 198	123 201	54.7% 42.8%	
ÇK	233 217	38 70	549 456	34 59	52 108	87 142	55.3% 43.3%	
TK	27 84	137 147	25 45	673 569	116 168	42 88	66.0% 51.7%	
KK	43 45	128 145	35 50	87 111	449 363	169 160	49.3% 41.5%	
KÜK	70 73	63 60	73 73	57 57	131 90	468 246	54.3% 41.1%	
		60.7% 51.3%	59.2% 50.9%	56.5% 46.9%	69.2% 58.5%	46.2% 37.3%	48.1% 25.3%	56.7% 45.1%
		BP	İP	ÇK	TK	KK	KÜK	
		Gerçek						

(b) SVM sınıflandırma

**Şekil 14.** Üç Kuvvet için ortalama sınıflandırma sonuçları

#### IV. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışma kapsamında, EMG sinyallerini işlemek ve özelliklerini tespit etmek için kullanılan ÇDGKA yöntemi ile elde edilen öznelikler, el ve parmak hareketlerini ayırt etme performansı bakımından ham sinyal tabanlı öznelikler ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmanın sonucunda elde edilen sonuçlar, protez ellerin kontrolüne yönelik EMG sinyallerini ayırtmak ve analiz etmek için yeni bir yöntemin geliştirilmesine olanak sağlamıştır.

EMG sinyallerinin çok kanallı olarak analizini gerçekleştirmek ve farklı kuvvet seviyelerindeki el hareketlerine ait sinyalleri de kullanarak altı farklı hareketi ayırt edebilmek için, özneliklerin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu sebeple sinyaller ÇDGKA yöntemi ile özgül kip fonksiyonlarına ayrıştırılarak, sinyalin yerel ölçekte her bir salınım modunun analizini yapmak mümkün kılınmıştır. Sinyale ait tüm salınım modları ayrı ayrı öznelik çıkarmak için kullanılmıştır. Ayrıca farklı salınım modları arasında meydana gelebilecek mod karışımından kaçınıldığı ve kanallar arası mod hizalamasının düzgün bir şekilde gerçekleştirildiği gözlemlenmiştir.

ÇDGKA yönteminin, sinyalin uzunluğuna göre farklı sayıda ÖKF çıkarması sebebiyle, sinyalin lokal bilgilerini kaybetmeden uygun uzunluktaki sinyali seçmek için EMG gerekli minimum ÖKF sayısı tespit edilerek işlem hızlandırılmıştır. ÖKF'lerin her birinden öznelikler çıkarılmıştır. Bu şekilde genel bir şablon oluşturularak, ÇDGKA yönteminin gerçek zamanlı uygulamalarda, her işleme aşamasında sinyale ait en uygun ÖKF'lerin belirlenmesine yönelik işlem yoğunluğundan kaçınılması amaçlanmıştır. ÇDGKA tabanlı öznelikler ile sınıflandırılan farklı kuvvet seviyelerindeki çok kanallı sEMG sinyalleri, ham sinyal tabanlı özneliklere göre senaryo 1 için %10-%15, senaryo 2 için %18'e kadar üstünlük sağlamıştır.

Sonuç olarak ÇDGKA yöntemi tabanlı özneliklerin işlevselliği sınıflandırma performansı açısından gösterilmiştir.

Bu özneliklerin, ham sinyal tabanlı özneliklere sağladığı üstünlük açıkça gösterilmiştir. Fakat bu üstünlüğe rağmen ÇDGKA yöntemi tabanlı öznelik çıkarma yönteminin, halen geliştirilmeye ihtiyacı olduğu görülmektedir. Bunun yanında gerçek zamanlı uygulamalara yönelik hesaplama yükünün azaltılması için de çalışmalara ihtiyaç vardır. Böylelikle akıllı el protezlerinin güvenilirliğinin artırılması ve geleceğe yönelik olarak bu protezlerin, ampute bireyler için uzuv kayıplarının eksikliğini temin etmesi umulmaktadır.

#### V. TEŞEKKÜR

Bu çalışma Bursa Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri 182L21 numaralı yüksek lisans tez

projesi ile desteklenmiştir.

## KAYNAKLAR

- [1] Bright, D., Nair, A., Salvekar, D., & Bhisikar, S. (2016). EEG-based brain controlled prosthetic arm. In *Conference on Advances in Signal Processing, CASP 2016*.
- [2] Barea, R., Boquete, L., Mazo, M., Lopez, E., & Bergasa, L. M. (2000). EOG guidance of a wheelchair using neural networks. *Proceedings 15th International Conference on Pattern Recognition. ICPR-2000*.
- [3] Hakonen, M., Piitulainen, H., & Visala, A. (2015). Current state of digital signal processing in myoelectric interfaces and related applications. *Biomedical Signal Processing and Control, 18*, 334–359.
- [4] Bock, O. (2006). Myoelectric Control Of Powered Upper- Limb Prostheses.
- [5] Stashuk, D. (2001). EMG signal decomposition: How can it be accomplished and used. *Journal of Electromyography and Kinesiology, 11(3)*, 151–173.
- [6] Hargrove, L. J., Englehart, K., & Hudgins, B. (2007). A comparison of surface and intramuscular myoelectric signal classification. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 54(5)*, 847-853
- [7] Al-Timemy, A. H., Khushaba, R. N., Bugmann, G., & Escudero, J. (2016). Improving the Performance Against Force Variation of EMG Controlled Multifunctional Upper-Limb Prostheses for Transradial Amputees. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 24(6)*, 650–661.
- [8] Huang, N. E., Shen, Z., Long, S. R., Wu, M. C., Shih, Zheng. (1998). The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 454(1971)*, 903–995.
- [9] Rehman, N., & Mandic, D. P. (2010a). Multivariate empirical mode decomposition. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 466(2117)*, 1291–1302.
- [10] Altamirano, A. A. (2017). EMG Pattern Prediction for Upper Limb Movements Based on Wavelet and Hilbert-Huang Transform. (Doctoral dissertation, Université de Lorraine; Instituto Politécnico Nacional (México)).
- [11] Phinyomark, A., Quaine, F., Charbonnier, S., Serviere, C., Tarpin-Bernard, F., & Laurillau, Y. (2013). EMG feature evaluation for improving myoelectric pattern recognition robustness. *Expert Systems with applications, 40(12)*, 4832-4840.
- [12] Sapsanis, C., Georgoulas, G., Tzes, A., & Member, S. (2013). A. EMG Data Collection, 716–722
- [13] Ruiz-Olaya, A. F., & Lopez-Delis, A. (2013). Surface EMG signal analysis based on the empirical mode decomposition for human-robot interaction. In *Symposium of Signals, Images and Artificial Vision - 2013, STSIVA 2013*.
- [14] Sapsanis, C., Georgoulas, G., Tzes, A., & Lymberopoulos, D. (2013). Improving EMG based Classification of basic hand movements using EMD. *2013 35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 5754–5757*.
- [15] De Luca, C. J., Donald Gilmore, L., Kuznetsov, M., & Roy, S. H. (2010). Filtering the surface EMG signal: Movement artifact and baseline noise contamination. *Journal of Biomechanics, 43(8)*, 1573–1579.
- [16] Myers, L. J., Lowery, M., O'Malley, M., Vaughan, C. L., Heneghan, C., St. Clair Gibson, A., Sreenivasan, R. (2003). Rectification and non-linear pre-processing of EMG signals for corticospinal analysis. *Journal of Neuroscience Methods, 124(2)*, 157–165.

## $\mathbb{R}^3$ de k- Vektör İçin $R(x_1, x_2, \dots, x_k)^{S(3)}$ Cisminin Üreteçleri

*The generators of the field  $R(x_1, x_2, \dots, x_k)^{S(3)}$  for k- vectors given in  $\mathbb{R}^3$*

Muhsin İNCESU<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Muş Alparslan Üniversitesi, Eğitim Fakültesi, Matematik Eğitimi ABD, Güzeltepe Kampusu 49100 Muş

### Öz

k- bilinmeyenli reel kaysayı tüm G- invaryant rasyonel fonksiyonların kümesi  $R(x_1, x_2, \dots, x_k)^G$  ile gösterilir. Üç boyutlu  $\mathbb{R}^3$  Öklid uzayında benzerlik dönüşümleri grubu  $G = S(3)$  olmak üzere, bu çalışmada  $\mathbb{R}^3$  de verilen ve k vektörden oluşan  $A = \{x_1, x_2, \dots, x_k\}$  kümesinin rasyonel  $S(3)$ -invariantlarını tam olarak belirleyebilmek için G grubuna göre invaryant rasyonel fonksiyonlar cismi olan  $R(x_1, x_2, \dots, x_k)^G$  cisminin üreteç kümesi ifade edilmiştir. Böylece A kümesinin herhangi bir  $S(3)$  invaryantı bu üreteç kümesinin elemanlarının bir fonksiyonu olarak ifade edilebilecektir.

**Anahtar kelimeler:**G-invariant fonksiyonlar, benzerlik dönüşümü, üreteç invariantlar,  $S(3)$ -invariant rasyonel fonksiyonlar.

### Abstract

The field of the G-invariant rational functions with k- variables  $x_1, x_2, \dots, x_k$  is denoted by  $R(x_1, x_2, \dots, x_k)^G$ . In this paper the generator set of the field of G-invariant rational functions denoted by  $R(x_1, x_2, \dots, x_k)^G$  is obtained to determine completely all  $S(3)$ -invariants of the set  $A = \{x_1, x_2, \dots, x_k\}$  consisted of k- vector variables in  $\mathbb{R}^3$  where  $G = S(3)$  which is the similarity transformations' group in 3 dimensional Euclidean space  $\mathbb{R}^3$ . So any  $S(3)$ -invariant of the set A can be stated by the functions of the generator set of the field  $R(x_1, x_2, \dots, x_k)^G$ .

**Keywords:** G- invariant functions, similarity transformation, generator invariants,  $S(3)$ -invariant rational functions

### I. GİRİŞ

İnvaryant teori alanındaki çalışmaların temelinde  $R[x]^G$ -invariant fonksiyonlar halkasının sonlu üreteçli olup olmadığının incelenmesi problemi vardır. Bu problem ilk defa 1860 lı yıllarda binary formları için verilmiştir. 1900 de David Hilbert, Paris'teki uluslararası konferansta sunduğu 23 problemde 14. de, bu üreteçlerin ne zaman sonlu olması gerektiği problemini ortaya koymuştur. Daha sonra 1962 de M. Nagata  $R[x]^G$ - nin, G- nin lineer reduktif olması koşulunda sonlu üreteçli olduğunu göstermiştir. Lineer reduktif olmayan G grupları için  $R[x]^G$  nin sonlu üreteçli olabilmesinin şartları da Khadjiev D. [1] ve Grosshans F. [2] çalışmalarında verilmiştir.

İnvaryant teorisinin gelişimi matematiğin farklı alanlarını etkilemiştir. Felix Klein'e gelinceye kadar, sadece belli başlı geometriler bilinmekteydi. 1872 de F.Klein, Erlangen programı ile grup kavramının geometrilerin önemli yapı taşları olduğunu göstermiştir. Buna göre benzerlik geometrisi, benzerlik dönüşümleri grubu ve altgruplarının invariantlar teorisidir. Klein'e göre bir geometride iki eleman birbirlerine denktir, ancak ve ancak geometriyi oluşturan dönüşüm grubundan öyle bir dönüşüm alınabilir ki elemanlardan birini diğerine dönüştürür [3].

O(n) grubu için noktaların tam invaryant sistemini 1897 de E. Study vermiştir. Daha sonra bunu Hermann Weyl geliştirmiştir [4]. 1988 de, D. Khadjiev, R. Aripov tüm Öklid hareketlerinin grubu E(n) için bu problemi çözmüştür [5]. Bu alandaki çalışmalar Khadjiev ile birlikte [6-20] çalışmalarla devam etmiştir. Bu çalışmalara örnek olarak affın uzaylarda parametrik eğrilerin diferensiyel invariantları konusunda Y.Sağiroğlu ve Ö. Pekşen[7,8,9], noktaların Öklid invariantları konusunda M. Karataş [12], Lorentz uzayında alt uzayların invariantları, Öklid geometride eğrilerin diferensiyel invariantları, Unitar uzaylarda izometri grubunun invariantları ve Taxicab geometride eğrilerin invariantları konularında İ.Ören, D. Khadjiev, Ö.Pekşen ve H.A. Çoban [10,11,17,18,19,20], benzerlik geometrisinde noktaların ve Bézier eğrilerinin invariantları konularında M.İncesu ve O. Gürsoy [6,13,14,15] çalışmaları verilebilir.

## 2. MATERYAL VE METOT

### 2.1. Benzerlik Dönüşümleri Grubu S(3)

**Tanım 2.1:**  $R^3$  Öklid uzayı olsun. Her  $\forall x, y \in R^3$  için

$$\|F(x) - F(y)\| = \lambda \|x - y\| \quad (1)$$

olacak şekilde bir  $\lambda \in R, \lambda > 0$  bulunabilirse  $F: R^3 \rightarrow R^3$  dönüşümüne bir Benzerlik Dönüşümü denir. Buradaki  $\lambda$  sayısına F benzerlik dönüşümünün ölçeği ya da kısaca benzerlik ölçeği denir ve  $\lambda_F$  ile gösterilir.  $R^3$  uzayında tanımlı tüm benzerlik dönüşümlerinin kümesi S(3) ile gösterilir.

**Tanım 2.2:** F benzerlik dönüşümü lineer ise F' ye lineer benzerlik dönüşümü denir.  $R^3$  uzayında tanımlı tüm lineer benzerlik dönüşümlerinin cümlesini LS(3) ile gösterelim.

**Sonuç 2.1:** LS (3) değişmeli olmayan bir gruptur.

**Tanım2.3:**  $a \in R^3$  ve  $\lambda > 0$  olmak üzere  $\forall x \in R^3$  için

$$F(x) = a + \lambda (x - a) \quad (2)$$

olarak tanımlanan  $F: R^3 \rightarrow R^3$  dönüşümüne a merkezli,  $\lambda$  ölçekli homoteti denir.  $R^3$  üzerinde tanımlı tüm homotetilerin cümlesini H(3) ile gösterelim.

**Önerme 2.1:** Keyfi  $F(x) = a + \lambda (x - a)$  homoteti dönüşümü  $\lambda$  ölçekli benzerlik dönüşümüdür.

**İspat:**  $F(x) - F(y) = [a + \lambda (x - a)] - [a + \lambda (y - a)] = \lambda (x - y)$  olduğundan  $\|F(x) - F(y)\| = \lambda \|x - y\|$  olacağından homoteti dönüşümü  $\lambda$  ölçekli benzerlik dönüşümüdür.

**Önerme 2.2:**  $F \in H(3)$ , a merkezli ve  $\lambda$  ölçekli homoteti dönüşümü lineerdir  $\Leftrightarrow a = 0$  ya da  $\lambda = 1$  dir.

**İspat:** F lineer olsun. O halde  $F(x+y) = a + \lambda (x+y - a) = a + \lambda x + \lambda y - \lambda a$  dir. Öte yandan  $F(x) + F(y) = [a + \lambda (x - a)] + [a + \lambda (y - a)] = 2a + \lambda x + \lambda y - 2\lambda a$  bulunur. Buradan  $a(1 - \lambda) = 0$  bulunur. Böylece,  $a = 0$  ya da  $\lambda = 1$  elde edilir.

Tersine  $a = 0$  ise  $F(x) = a + \lambda (x - a) = \lambda x$  olur ki bu radyal dönüşümdür ve lineerdir. Gerçekten  $\lambda (x + y) = \lambda x + \lambda y$  dir ve  $\lambda (cx) = c \lambda (x)$  sağlanır.  $\lambda = 1$  ise  $F(x) = a + \lambda (x - a) = x$  dönüşümü birim dönüşümdür. Özel bir radyal dönüşümdür. Bu dönüşüm de lineerdir.

**Sonuç 2.2:** F lineer homotetidir  $\Leftrightarrow F(x) = \lambda x ; \lambda > 0$  dir.  $R^3$  üzerinde tanımlı tüm lineer homotetilerin kümesini LH(3) ile gösterelim.

**Sonuç 2.3:** LH(3) değişmeli gruptur.

**Sonuç 2.4:** LH(3)  $\subset$  LS (3) altgruptur.

**Önerme 2.3:** h, keyfi lineer homoteti ve f keyfi izometri olmak üzere  $F = h \circ f$  dönüşümü bir benzerlik dönüşümüdür. Tersine, her  $\lambda$  ölçekli F benzerlik dönüşümü için bir  $h \in LH(3)$  lineer homoteti dönüşümü ve bir  $f \in E(3)$  izometrisi tek türlü olarak vardır, öyleki  $F = h \circ f$  dir.

**İspat:** [17].

**Sonuç 2.5:**  $F: R^3 \rightarrow R^3, \lambda$  ölçekli lineer benzerlik dönüşümü ise  $\forall x \in R^3$  için

$$F(x) = \lambda gx, \lambda > 0, g \in O(3) \quad (3)$$

olarak tek türlü yazılabilir.

**Sonuç 2.6:**  $F: R^3 \rightarrow R^3, \lambda$  ölçekli benzerlik dönüşümü ise  $\forall x \in R^3$  için

$$F(x) = \lambda gx + b, \lambda > 0, b \in R^3, g \in O(3) \quad (4)$$

olarak tek türlü yazılabilir.

**Tanım 2.4:** G bir grup ve G:X etkisi verilsin.  $x_1, x_2 \in X$  için  $x_2 = gx_1$  olacak şekilde bir  $g \in G$  mevcutsa  $x_1, x_2 \in X$  noktalarına G-denk noktalar denir ve kısaca  $x_1 \stackrel{G}{\approx} x_2$  şeklinde gösterilir [6].

**Tanım 2.5:**  $\{x_1, x_2, \dots, x_k\}, \{y_1, y_2, \dots, y_k\} \subset X$  ve  $G: X$  etkisi verilsin.  $i=1, 2, \dots, k$   $y_i = gx_i$  olacak şekilde bir  $g \in G$  bulunabilirse  $\{x_1, x_2, \dots, x_k\}$  ve  $\{y_1, y_2, \dots, y_k\}$  kümelerine G- denk denir ve  $\{x_1, \dots, x_k\} \stackrel{G}{\approx} \{y_1, \dots, y_k\}$  şeklinde gösterilir [6].

**Tanım 2.6:** G bir grup,  $f: X \rightarrow R$  fonksiyonu ve  $G: X$  etkisi verilmiş olsun. Eğer,  $x_1 \stackrel{G}{\approx} x_2$  olduğunda  $f(x) = f(y)$  ise ya da  $\forall g \in G$  ve  $\forall x \in X$  için  $f(gx) = f(x)$  ise f fonksiyonuna G- invaryant fonksiyon denir [6].

**Tanım 2.7:** G bir grup,  $H \subset G$  bir altgrup ve  $f: R^3$  de tanımlı bir reel fonksiyon olsun. Bir  $\lambda: H \rightarrow \mathbb{R}$ , reel değerli fonksiyonu için

$$f(hx) = \lambda(h)f(x), \forall h \in H, \forall x \in R^3 \quad (5)$$

ise, f 'ye nispi invaryant fonksiyon denir.  $\lambda$  fonksiyonuna da f nin çarpanı denir.

**Tanım 2.8:** f, nispi O(3)- invaryant polinom olmak üzere  $\forall g \in O(3)$  için  $\lambda(g) = 1$  ise f 'ye çift (mutlak) invaryant polinom denir.

**Örnek:**  $x = (x_1, x_2, x_3) \in \mathbb{R}^3$  vektörü verilsin. Bu durumda;

$$\langle x, x \rangle = x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 = P(x_1, x_2, x_3) = f(x)$$

fonksiyonu bir çift invariant polinomdur. Çünkü  $\forall g \in O(3)$  için

$$f(gx) = \langle gx, gx \rangle = \langle x, x \rangle = f(x)$$

sağlanır. Bu fonksiyon 3 reel değişkenli ikinci dereceden bir polinomdur. Yani  $f \in R[x_1, x_2, x_3]$  dir. Ancak bir vektör değişkenli bir fonksiyondur.

**Örnek:**  $x = (x_1, x_2, x_3), y = (y_1, y_2, y_3) \in \mathbb{R}^3$  vektörleri verilsin. Bu durumda;

$\langle x, y \rangle = x_1y_1 + x_2y_2 + x_3y_3 = P(x_1, x_2, x_3; y_1, y_2, y_3) = f(x, y)$  fonksiyonu bir çift invariant polinomdur. Çünkü  $\forall g \in O(3)$  için

$$f(gx, gy) = \langle gx, gy \rangle = \langle x, y \rangle = f(x, y)$$

sağlanır. Benzer şekilde bu fonksiyon 6 reel değişkenli ikinci dereceden bir polinomdur. Yani  $f \in R[x_1, x_2, x_3; y_1, y_2, y_3]$  dir. Ancak iki vektör değişkenli bir fonksiyondur.

Çalışmanın bundan sonraki kısmında

$x_i = (x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}) \in \mathbb{R}^3$  vektörü, indislerin karıştırılmaması için  $x^{(i)} = (x_1^{(i)}, x_2^{(i)}, x_3^{(i)})$  biçiminde kullanılacaktır.

**Örnek:**

$$f(x^{(1)}, x^{(2)}, x^{(3)}) = 2\langle x^{(1)}, x^{(2)} \rangle^3 \langle x^{(1)}, x^{(3)} \rangle - 3\langle x^{(1)}, x^{(1)} \rangle^2 \langle x^{(2)}, x^{(2)} \rangle^3$$

fonksiyonu çift  $O(3)$ - invariant polinomdur. Bu polinom 9 reel değişkenli 10. dereceden bir polinomdur.

**Örnek:** Keyfi bir çift  $O(3)$ - invariant polinom  $x^{(i)}, x^{(j)} \in \mathbb{R}^3$  için;

$$\langle x^{(i)}, x^{(j)} \rangle; i, j = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

lerin polinomu olarak ifade edilebilir. Yani,

$$f(x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(m)}) = \sum_k \prod_{i,j=1}^m a_{ijk} \langle x^{(i)}, x^{(j)} \rangle^{n_{ijk}}$$

[4].

**Tanım 2.9:**  $f$ , nispi  $O(3)$ - invariant polinom olmak üzere  $\forall g \in O(3)$  için  $\lambda(g) = \det g$  ise  $f$ 'ye tek invariant polinom denir.

**Örnek:**

$$x^{(1)} = (x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, x_3^{(1)}),$$

$$x^{(2)} = (x_1^{(2)}, x_2^{(2)}, x_3^{(2)}),$$

$$x^{(3)} = (x_1^{(3)}, x_2^{(3)}, x_3^{(3)}) \in \mathbb{R}^3 \text{ olmak üzere}$$

$$f(x^{(1)}, x^{(2)}, x^{(3)}) = \det(x^{(1)}x^{(2)}x^{(3)}) = [x^{(1)}x^{(2)}x^{(3)}]$$

$$= \det \begin{bmatrix} x_1^{(1)} & x_1^{(2)} & x_1^{(3)} \\ x_2^{(1)} & x_2^{(2)} & x_2^{(3)} \\ x_3^{(1)} & x_3^{(2)} & x_3^{(3)} \end{bmatrix} = x_1^{(1)}(x_2^{(2)}x_3^{(3)} - x_2^{(3)}x_3^{(2)})$$

$$+ x_1^{(2)}(x_2^{(3)}x_3^{(1)} - x_2^{(1)}x_3^{(3)}) + x_1^{(3)}(x_2^{(1)}x_3^{(2)} - x_2^{(2)}x_3^{(1)})$$

Fonksiyonunu ele alalım. Bu fonksiyon 9 reel değişkenli üçüncü dereceden bir polinomdur.

$$f(g \cdot x^{(1)}, g \cdot x^{(2)}, g \cdot x^{(3)}) = [g \cdot x^{(1)}g \cdot x^{(2)}g \cdot x^{(3)}] = \det g \cdot [x^{(1)}x^{(2)}x^{(3)}]$$

olduğundan  $[x^{(1)}x^{(2)}x^{(3)}]$  polinomu tek invariant polinomdur.

**Önerme 2.4:**

1-Çift invariant polinomların toplamı çift invariant polinomdur.

2-  $f$ , çift invariant polinom ve  $\lambda \in \mathbb{R}$  olmak üzere  $\lambda f$  polinomu çift invariant polinomdur.

3-Çift invariant polinomların çarpımı çift invariant polinomdur.

İspat: [12]

**Önerme 2.5:**

1-Tek invariant polinomların toplamı tek invarianttır.

2-  $f$ , tek invariant polinom ve  $\lambda \in \mathbb{R}$  olmak üzere  $\lambda f$  polinomu tek invariant polinomdur.

3-Tek invariant polinomların çarpımı çift invariant polinomdur.

4-Tek ve çift invariant polinomların çarpımı tek invariant polinomdur.

İspat: [12]

**Örnek:**

$$\varphi_1(x^{(1)}, x^{(2)}, x^{(3)}, x^{(4)}) = 2\langle x^{(1)}, x^{(3)} \rangle^2 \langle x^{(2)}, x^{(4)} \rangle$$

ve

$$\varphi_2(x^{(1)}, x^{(2)}, x^{(3)}, x^{(4)}) = 3\langle x^{(1)}, x^{(4)} \rangle^3 \langle x^{(2)}, x^{(3)} \rangle$$

çift  $O(3)$ - invaryant polinomları göz önüne alınsın. Bu takdirde

$$\begin{aligned} & f(x^{(1)}, x^{(2)}, x^{(3)}, x^{(4)}) \\ &= [x^{(1)}x^{(2)}x^{(4)}]\varphi_1(x^{(1)}, x^{(2)}, x^{(3)}, x^{(4)}) \\ &+ [x^{(2)}x^{(3)}x^{(4)}]\varphi_2(x^{(1)}, x^{(2)}, x^{(3)}, x^{(4)}) \end{aligned}$$

fonksiyonu tek  $O(3)$ - invaryant polinomdur.

**Önerme 2.6:** Keyfi bir tek  $O(3)$ - invaryant polinom;  $\varphi(x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(m)})$  çift invaryant polinom olmak üzere;

$$\begin{aligned} & [x^{(i_1)}x^{(i_2)}x^{(i_3)}] \cdot \varphi(x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(m)}); \\ & i_1, i_2, i_3 = 1, \dots, m; i_1 < i_2 < i_3 \end{aligned}$$

şeklindeki tek invaryant polinomların toplamı olarak ifade edilebilir. Yani,

$$\begin{aligned} & f(x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(m)}) \\ &= \sum_k [x^{(i_1)}x^{(i_2)}x^{(i_3)}] \prod_{i,j=1}^m a_{ijk} \langle x^{(i)}, x^{(j)} \rangle^{n_{ijk}} \end{aligned}$$

İspat: [4,12].

$G$  bir grup ve  $G: X$  etkisi verilmiş olsun. k-bilinmeyenli reel katsayılı tüm  $G$ - invaryant rasyonel fonksiyonların kümesi  $R(x_1, x_2, \dots, x_k)^G$  ile gösterilir.

**Önerme 2.7:**

$R(x_1, x_2, \dots, x_k)^G$  bir cisimdir.

İspat:  $f, g, h \in R(x_1, x_2, \dots, x_k)^G$  olsun. Bu durumda  $f, g, h: X \rightarrow R$  fonksiyonlardır öyleki  $\forall r \in G$  ve için  $\forall x_1, x_2, \dots, x_k \in X$  için

$$\begin{aligned} f(rx_1, rx_2, \dots, rx_k) &= f(x_1, x_2, \dots, x_k), \\ g(rx_1, rx_2, \dots, rx_k) &= g(x_1, x_2, \dots, x_k) \end{aligned}$$

ve

$$h(rx_1, rx_2, \dots, rx_k) = f(x_1, x_2, \dots, x_k)$$

olur. Şimdi, öncelikle  $f$  ve  $g$ ,  $G$ -invaryant olduğundan

$$\begin{aligned} \text{i) } (f + g)(rx_1, rx_2, \dots, rx_k) &= \\ f(rx_1, rx_2, \dots, rx_k) + g(rx_1, rx_2, \dots, rx_k) &= \\ = f(x_1, x_2, \dots, x_k) + g(x_1, x_2, \dots, x_k) &= \\ = (f + g)(x_1, x_2, \dots, x_k) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ii) } (cf)(rx_1, rx_2, \dots, rx_k) &= \\ cf(rx_1, rx_2, \dots, rx_k) = c f(x_1, x_2, \dots, x_k) &= \\ (cf)(x_1, x_2, \dots, x_k) \end{aligned}$$

sağlandığından toplama ve skaler ile çarpma işlemine göre kapalıdır.

$$\begin{aligned} \text{iii) } (f \cdot g)(rx_1, rx_2, \dots, rx_k) &= \\ f(rx_1, rx_2, \dots, rx_k) \cdot g(rx_1, rx_2, \dots, rx_k) &= \\ = f(x_1, x_2, \dots, x_k) \cdot g(x_1, x_2, \dots, x_k) &= \\ = (f \cdot g)(x_1, x_2, \dots, x_k) \end{aligned}$$

sağlandığından çarpma işlemine göre de kapalıdır.

Toplama işlemine göre abelyen grup olduğunu gösterelim.

$f, g, h: X \rightarrow R$  olduğundan ve reel sayılar cisim olduğundan

$$\begin{aligned} \text{i) } [f + (g + h)](rx_1, rx_2, \dots, rx_k) &= \\ f(x_1, x_2, \dots, x_k) + (g + h)(x_1, x_2, \dots, x_k) &= \\ f(x_1, x_2, \dots, x_k) + [g(x_1, x_2, \dots, x_k) + & \\ h(x_1, x_2, \dots, x_k)] &= \\ = [f(x_1, x_2, \dots, x_k) + g(x_1, x_2, \dots, x_k)] &+ \\ + h(x_1, x_2, \dots, x_k) &= \\ = [(f + g) + h](rx_1, rx_2, \dots, rx_k) \end{aligned}$$

elde edilir ve bu da toplama işlemine göre  $R(x_1, x_2, \dots, x_k)^G$  nin asosyatif olduğunu gösterir.

ii)  $\forall x_1, x_2, \dots, x_k \in X$  için  $f = 0$  fonksiyonu  $G$ -invaryant fonksiyondur ve toplamaya göre birimdir.

iii)  $\forall f \in R(x_1, x_2, \dots, x_k)^G$  için  $-f \in R(x_1, x_2, \dots, x_k)^G$  dir ve  $f + (-f) = 0 = e$  dir.

$$\begin{aligned} \text{iv) } (f + g)(rx_1, rx_2, \dots, rx_k) &= \\ f(rx_1, rx_2, \dots, rx_k) + g(rx_1, rx_2, \dots, rx_k) &= \\ = f(x_1, x_2, \dots, x_k) + g(x_1, x_2, \dots, x_k) &= \\ = g(x_1, x_2, \dots, x_k) + f(x_1, x_2, \dots, x_k) &= \\ = g(rx_1, rx_2, \dots, rx_k) + f(rx_1, rx_2, \dots, rx_k) &= \\ = (g + f)(rx_1, rx_2, \dots, rx_k) \end{aligned}$$

elde edilir ve bu da toplama işlemine göre  $R(x_1, x_2, \dots, x_k)^G$  nin komütatif olduğunu gösterir. Bunun sonucu  $R(x_1, x_2, \dots, x_k)^G$  abelyen gruptur.

$$\begin{aligned} \text{v) } [f \cdot (g \cdot h)](rx_1, rx_2, \dots, rx_k) &= \\ f(x_1, x_2, \dots, x_k) \cdot (g \cdot h)(x_1, x_2, \dots, x_k) &= \\ = f(x_1, x_2, \dots, x_k) \cdot [g(x_1, x_2, \dots, x_k) \cdot h(x_1, x_2, \dots, x_k)] \end{aligned}$$

$$= [f(x_1, x_2, \dots, x_k) \cdot g(x_1, x_2, \dots, x_k)] \cdot h(x_1, x_2, \dots, x_k)$$

$$= [(f \cdot g) \cdot h](rx_1, rx_2, \dots, rx_k)$$

elde edilir ve bu da çarpma işlemine göre  $R(x_1, x_2, \dots, x_m)^G$  nin asosiyatif olduğunu gösterir.

$$\text{vi) } [f \cdot (g + h)](rx_1, rx_2, \dots, rx_k) =$$

$$f(rx_1, rx_2, \dots, rx_k) \cdot (g + h)(rx_1, rx_2, \dots, rx_k)$$

$$= f(rx_1, rx_2, \dots, rx_k) \cdot [g(rx_1, rx_2, \dots, rx_k) + h(rx_1, rx_2, \dots, rx_k)]$$

$$= f(x_1, x_2, \dots, x_k) \cdot g(x_1, x_2, \dots, x_k) + f(x_1, x_2, \dots, x_k) \cdot h(x_1, x_2, \dots, x_k)$$

$$= [f \cdot g](rx_1, rx_2, \dots, rx_k) + [f \cdot h](rx_1, rx_2, \dots, rx_k)$$

elde edilir benzer şekilde

$$[(f + g) \cdot h](rx_1, rx_2, \dots, rx_k)$$

$$= [f \cdot h](rx_1, rx_2, \dots, rx_k) + [g \cdot h](rx_1, rx_2, \dots, rx_k)$$

elde edilir ve bu da toplama işleminin çarpma işlemi üzerine dağılma özelliğinin olduğunu gösterir. Böylece  $R(x_1, x_2, \dots, x_k)^G$  bir halkadır.

vii)  $\forall x_1, x_2, \dots, x_k \in X$  için  $f = 1$  fonksiyonu G-invariant fonksiyondur ve çarpmaya göre birimdir. Buna göre  $R(x_1, x_2, \dots, x_k)^G$  birimli halkadır.

$$\text{viii) } (f \cdot g)(rx_1, rx_2, \dots, rx_k) =$$

$$f(rx_1, rx_2, \dots, rx_k) \cdot g(rx_1, rx_2, \dots, rx_k)$$

$$= f(x_1, x_2, \dots, x_k) \cdot g(x_1, x_2, \dots, x_k)$$

$$= g(x_1, x_2, \dots, x_k) \cdot f(x_1, x_2, \dots, x_k)$$

$$= g(rx_1, rx_2, \dots, rx_k) \cdot f(rx_1, rx_2, \dots, rx_k)$$

$$= (g \cdot f)(rx_1, rx_2, \dots, rx_k)$$

olduğundan çarpma işlemine göre komütatif olduğunu gösterir. Dolayısıyla  $R(x_1, x_2, \dots, x_k)^G$  birimli komütatif bir halkadır.

ix)  $\forall f \in R(x_1, x_2, \dots, x_m)^G$  ve  $f \neq 0$  için  $f^{-1} = \frac{1}{f}$  fonksiyonu da G-invarianttır ve

$$(f^{-1})(rx_1, rx_2, \dots, rx_k) = \frac{1}{f}(rx_1, rx_2, \dots, rx_k)$$

$$= \frac{1}{f(rx_1, rx_2, \dots, rx_k)} = \frac{1}{f(x_1, x_2, \dots, x_k)}$$

olduğundan

$$(f \cdot (f^{-1}))(rx_1, rx_2, \dots, rx_k) =$$

$$(f \cdot (f^{-1}))(x_1, x_2, \dots, x_k) = 1$$

sağlanır. Yani sıfırdan farklı her elemanın çarpmaya göre tersi vardır. Buna göre  $R(x_1, x_2, \dots, x_k)^G$  bir cisimdir.

**Tanım 2.10:**  $F$  bir cisim olsun.  $X$ ,  $F$ 'nin herhangi bir alt kümesi olsun.  $F$ 'nin  $X$ 'i kapsayan tüm alt cisimlerinin arakesiti yine  $F$ 'ye eşit oluyorsa  $F$ ,  $X$  tarafından üretilir denir.  $X$  kümesine de  $F$ 'nin üreteç kümesi denir. Üreteç küme, bir anlamda span kümesidir. Cismin keyfi elemanı, üreteç kümenin elemanlarının cisimde tanımlanan toplama, çarpma, skaler ile çarpma işlemleri kullanılmasıyla elde edilebilir.

**Teorem 2.1** [12]:  $G = O(3)$  olsun. Bu takdirde;

i)  $k \leq 3$  ise,

$$\langle x^{(i)}, x^{(j)} \rangle; \quad i, j = 1, 2, \dots, m; \quad i \leq j$$

sistemi  $R(x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(k)})^{O(3)}$  cisminin üreteç sistemidir.

ii)  $k > 3$  ise,

$$\langle x^{(i)}, x^{(j)} \rangle; \quad i, j = 1, 2, 3; \quad i \leq j$$

$$\langle x^{(i)}, x^{(p)} \rangle; \quad i = 1, 2, 3; \quad p = 4, 5, \dots, k$$

sistemi  $R(x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(k)})^{O(3)}$  cisminin üreteç sistemidir.

### 3. $R(x_1, x_2, \dots, x_k)^{S(3)}$ CİSMİ VE ÜRETEÇLERİ

Tüm bir bilinmeyenli reel katsayılı G-invariant polinomların kümesi  $R[x]^G$  ile, tüm bir bilinmeyenli reel katsayılı G-invariant rasyonel fonksiyonların kümesi de  $R(x)^G$  ile gösterilir.  $x_1, x_2, \dots, x_k$  bilinmeyenler olmak üzere k-bilinmeyenli reel katsayılı tüm G-invariant polinomların kümesi  $R[x_1, x_2, \dots, x_k]^G$  ile ve k-bilinmeyenli reel katsayılı tüm G-invariant rasyonel fonksiyonların kümesi de  $R(x_1, x_2, \dots, x_k)^G$  ile gösterilir.

**Tanım 3.1:**  $f$ , nispi LS(3)-invariant polinom olmak üzere eğer  $f(x) = \lambda gx$  yazılımında  $g \in O(3)$  çift invariant ise  $f$ 'ye çift (mutlak) LS(3)-invariant polinom denir.

**Tanım 3.2:**  $f$ , nispi LS(3)-invariant polinom olmak üzere eğer  $f(x) = \lambda gx$  yazılımında  $g \in O(3)$  tek invariant ise  $f$ 'ye tek LS(3)-invariant polinom denir.

**Önerme 3.1:**  $x = x_1, x_2, x_3 \in R^3$  olmak üzere bir tane vektör için derecesi n olan

1.  $O(3)$ -invariant polinom



$$P(x) = P(x_1, x_2, x_3) = \sum_{i=0}^n a_i(x_1^2 + x_2^2 + x_3^2)^i = \sum_{i=0}^n a_i \langle x, x \rangle^i$$

2. Keyfi nispi O(3)- invaryant polinom

$$f(x) = \sum_{i=0}^n a_i \langle x, x \rangle^i$$

şeklindedir.

İspat: Teorem 2.1 de verilen ifadeler invaryant fonksiyonların üreteçleri olduğundan bu durum (6) ve Teorem 2.1. in bir sonucudur. Yani tek vektör değişkenli durumda nispi O(3)- invaryant polinom ile O(3)-invaryant polinom aynıdır.

**Önerme 3.2:**  $k > 1$  olmak üzere

$$\begin{aligned} x^{(1)} &= (x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, x_3^{(1)}); \\ x^{(2)} &= (x_1^{(2)}, x_2^{(2)}, x_3^{(2)}); \dots; \\ x^{(k)} &= (x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, x_3^{(k)}) \text{ k tane vektör için} \end{aligned}$$

1. nispi **tek** O(3)- invaryant polinom

$$f(x^{(1)}, \dots, x^{(k)}) = \sum_{\substack{i, j, r=1 \\ i < j < r}}^k [x^{(i)} x^{(j)} x^{(r)}] \cdot L$$

dir. Burada

$$L = \sum_{i_1, \dots, i_k} a^{(i)(j)(r)} \dots B$$

ve

$$B = A_{i(1)} A_{i(2)} \dots A_{i(k-1)} A_{i(k)}$$

olmak üzere

$$A_{i(1)} = \left( \prod_{s=1}^k \langle x^{(1)}, x^{(s)} \rangle^{i_1^s} \right),$$

$$A_{i(2)} = \left( \prod_{t=2}^k \langle x^{(2)}, x^{(t)} \rangle^{i_2^t} \right), \dots,$$

$$A_{i(k-1)} = \left( \prod_{p=k-1}^k \langle x^{(k-1)}, x^{(p)} \rangle^{i_{k-1}^p} \right),$$

$$A_{i(k)} = \langle x^{(k)}, x^{(k)} \rangle^{i_k^k}$$

dir.

2. nispi **çift** O(3)- invaryant polinom

$$\begin{aligned} f(x^{(1)}, \dots, x^{(k)}) &= \\ &= \sum_{i_1^{(1)} \dots i_k^{(1)} i_1^{(2)} \dots i_k^{(2)} \dots i_1^{(k-1)} \dots i_k^{(k-1)} i_1^{(k)} \dots i_k^{(k)}} a^{(i)(j)(r)} B \end{aligned}$$

biçimindedir. Burada  $B$  yukarıdaki gibidir.

İspat: Önerme 2.6 ve Teorem 2.1 in bir sonucudur.

**Teorem 3.1:** 1.  $k$  tane vektör için LH(3)- invaryant polinom sabit polinomdur.

2.  $k$  tane vektör için **nispi** LH(3)- invaryant polinom  $x^{(1)} = (x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, x_3^{(1)})$ ;

$$\begin{aligned} x^{(2)} &= (x_1^{(2)}, x_2^{(2)}, x_3^{(2)}); \dots; \\ x^{(k)} &= (x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, x_3^{(k)}) \text{ olmak üzere} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f(x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(k)}) &= \\ &= \sum_{i_1^{(1)}+i_2^{(1)}+i_3^{(1)}+\dots+i_1^{(k)}+i_2^{(k)}+i_3^{(k)}=m} a_{i_1^{(1)}i_2^{(1)}i_3^{(1)}\dots i_1^{(k)}i_2^{(k)}i_3^{(k)}} M \end{aligned}$$

dir. Burada

$$M = (x_1^{(1)})^{i_1^{(1)}} (x_2^{(1)})^{i_2^{(1)}} (x_3^{(1)})^{i_3^{(1)}} \dots (x_1^{(k)})^{i_1^{(k)}} (x_2^{(k)})^{i_2^{(k)}} (x_3^{(k)})^{i_3^{(k)}}$$

dir.

İspat: 1.  $x^{(1)} = (x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, x_3^{(1)})$ ;

$$\begin{aligned} x^{(2)} &= (x_1^{(2)}, x_2^{(2)}, x_3^{(2)}); \dots; \\ x^{(k)} &= (x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, x_3^{(k)}) \end{aligned}$$

olmak üzere

$$\begin{aligned} f(\lambda x^{(1)}, \lambda x^{(2)}, \dots, \lambda x^{(k)}) &= f(\lambda x_1^{(1)}, \lambda x_2^{(1)}, \lambda x_3^{(1)}, \lambda x_1^{(2)}, \lambda x_2^{(2)}, \lambda x_3^{(2)}, \dots, \lambda x_1^{(k)}, \lambda x_2^{(k)}, \lambda x_3^{(k)}) \\ &= f(\lambda x_1^{(1)}, \lambda x_2^{(1)}, \lambda x_3^{(1)}, \lambda x_1^{(2)}, \lambda x_2^{(2)}, \lambda x_3^{(2)}, \dots, \lambda x_1^{(k)}, \lambda x_2^{(k)}, \lambda x_3^{(k)}) \end{aligned}$$

olduğundan  $R^3$  de  $k$  tane vektör için LH(3)- invaryant polinom Sonuç 2.2 den

$$\begin{aligned} f(\lambda x_1^{(1)}, \lambda x_2^{(1)}, \lambda x_3^{(1)}, \lambda x_1^{(2)}, \lambda x_2^{(2)}, \lambda x_3^{(2)}, \dots, \lambda x_1^{(k)}, \lambda x_2^{(k)}, \lambda x_3^{(k)}) &= f(x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, x_3^{(1)}, x_1^{(2)}, x_2^{(2)}, x_3^{(2)}, \dots, x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, x_3^{(k)}) \end{aligned}$$

sağlamalıdır. O halde

$$\begin{aligned} &\sum_{i_1^{(1)}i_2^{(1)}i_3^{(1)}\dots i_1^{(k)}i_2^{(k)}i_3^{(k)}} a_{i_1^{(1)}i_2^{(1)}i_3^{(1)}\dots i_1^{(k)}i_2^{(k)}i_3^{(k)}} \lambda^{i_1^{(1)}+i_2^{(1)}+i_3^{(1)}+\dots+i_1^{(k)}+i_2^{(k)}+i_3^{(k)}} M \\ &= \sum_{i_1^{(1)}i_2^{(1)}i_3^{(1)}\dots i_1^{(k)}i_2^{(k)}i_3^{(k)}} a_{i_1^{(1)}i_2^{(1)}i_3^{(1)}\dots i_1^{(k)}i_2^{(k)}i_3^{(k)}} M \end{aligned}$$

olur. Her  $i_1^{(1)} i_2^{(1)} i_3^{(1)} \dots i_1^{(k)} i_2^{(k)} i_3^{(k)}$  için

$$a_{i_1^{(1)}i_2^{(1)}i_3^{(1)}\dots i_1^{(k)}i_2^{(k)}i_3^{(k)}} \lambda^{i_1^{(1)}+i_2^{(1)}+i_3^{(1)}+\dots+i_1^{(k)}+i_2^{(k)}+i_3^{(k)}} - 1 = 0$$

bulunur.

Her

$$i_1^{(1)} + i_2^{(1)} + i_3^{(1)} + \dots + i_1^{(k)} + i_2^{(k)} + i_3^{(k)} \neq 0$$

için  $a_{i_1^{(1)}i_2^{(1)}i_3^{(1)} \dots i_1^{(k)}i_2^{(k)}i_3^{(k)}} = 0$  olur.

$$i_1^{(1)} + i_2^{(1)} + i_3^{(1)} + \dots + i_1^{(k)} + i_2^{(k)} + i_3^{(k)} = 0$$

durumunda ise polinom

$$P(x) = a_{0000 \dots 00}$$

biçiminde sabit polinom olur.

$$2- x^{(1)} = (x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, x_3^{(1)});$$

$$x^{(2)} = (x_1^{(2)}, x_2^{(2)}, x_3^{(2)}); \dots;$$

$$x^{(k)} = (x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, x_3^{(k)})$$

olmak üzere k tane vektör için nispi LH(3)-invariant polinom Sonuç 2.2. den  $\forall \lambda \in R^+$  için

$$f \lambda x_1^{(1)}, \lambda x_2^{(1)}, \lambda x_3^{(1)}, \lambda x_1^{(2)}, \lambda x_2^{(2)}, \lambda x_3^{(2)}, \dots, \lambda x_1^{(k)}, \lambda x_2^{(k)}, \lambda x_3^{(k)} \\ = \varphi \lambda f x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, x_3^{(1)}, x_1^{(2)}, x_2^{(2)}, \dots, x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, x_3^{(k)}$$

sağlamalıdır. Buna göre

$$\sum_{i_1^{(1)}i_2^{(1)}i_3^{(1)} \dots i_1^{(k)}i_2^{(k)}i_3^{(k)}} a_{i_1^{(1)}i_2^{(1)}i_3^{(1)} \dots i_1^{(k)}i_2^{(k)}i_3^{(k)}} \lambda^{i_1^{(1)}+i_2^{(1)}+i_3^{(1)}+\dots+i_1^{(k)}+i_2^{(k)}+i_3^{(k)}} M \\ = \varphi \lambda \sum_{i_1^{(1)}i_2^{(1)}i_3^{(1)} \dots i_1^{(k)}i_2^{(k)}i_3^{(k)}} a_{i_1^{(1)}i_2^{(1)}i_3^{(1)} \dots i_1^{(k)}i_2^{(k)}i_3^{(k)}} M$$

eşitliği yazılabilir. Buradan her  $i_1^{(1)}i_2^{(1)} \dots i_1^{(k)}i_2^{(k)}$  ve

$\forall \lambda \in R^+$  için

$$a_{i_1^{(1)}i_2^{(1)}i_3^{(1)} \dots i_1^{(k)}i_2^{(k)}i_3^{(k)}} \lambda^{i_1^{(1)}+i_2^{(1)}+i_3^{(1)}+\dots+i_1^{(k)}+i_2^{(k)}+i_3^{(k)}} \\ = \varphi \lambda a_{i_1^{(1)}i_2^{(1)}i_3^{(1)} \dots i_1^{(k)}i_2^{(k)}i_3^{(k)}}$$

dir. Bu eşitliği

$$a_{i_1^{(1)}i_2^{(1)}i_3^{(1)} \dots i_1^{(k)}i_2^{(k)}i_3^{(k)}} \lambda^{i_1^{(1)}+i_2^{(1)}+i_3^{(1)}+\dots+i_1^{(k)}+i_2^{(k)}+i_3^{(k)}} - \varphi \lambda = 0$$

biçiminde yazabiliriz. Buradan

$$i_1^{(1)} + i_2^{(1)} + i_3^{(1)} + \dots + i_1^{(k)} + i_2^{(k)} + i_3^{(k)} \neq 0$$

olan her  $i_1^{(1)}i_2^{(1)}i_3^{(1)} \dots i_1^{(k)}i_2^{(k)}i_3^{(k)}$  ve  $\forall \lambda \in R^+$  için

$$a_{i_1^{(1)}i_2^{(1)}i_3^{(1)} \dots i_1^{(k)}i_2^{(k)}i_3^{(k)}} = 0$$
 ya da

$$\lambda^{i_1^{(1)}+i_2^{(1)}+i_3^{(1)}+\dots+i_1^{(k)}+i_2^{(k)}+i_3^{(k)}} = \varphi \lambda$$

elde edilir. Buna göre her  $i_1^{(1)}i_2^{(1)}i_3^{(1)} \dots i_1^{(k)}i_2^{(k)}i_3^{(k)}$  ve

$\forall \lambda \in R^+$  için  $a_{i_1^{(1)}i_2^{(1)}i_3^{(1)} \dots i_1^{(k)}i_2^{(k)}i_3^{(k)}} = 0$  ise k tane vektör için nispi LH(3)-invariant polinom sabit polinomdur. Eğer

$\exists i_1^{(1)}, i_2^{(1)}, i_3^{(1)}, \dots, i_1^{(k)}, i_2^{(k)}, i_3^{(k)}$  öyle ki

$$a_{i_1^{(1)}i_2^{(1)}i_3^{(1)} \dots i_1^{(k)}i_2^{(k)}i_3^{(k)}} \neq 0$$
 ise

$$\lambda^{i_1^{(1)}+i_2^{(1)}+i_3^{(1)}+\dots+i_1^{(k)}+i_2^{(k)}+i_3^{(k)}} = \varphi \lambda$$

dır. Bunu yukarıdaki nispi invariant polinom ifadesinde yerine yazarsak,

$$\sum_{i_1^{(1)}i_2^{(1)}i_3^{(1)} \dots i_1^{(k)}i_2^{(k)}i_3^{(k)}} a_{i_1^{(1)}i_2^{(1)}i_3^{(1)} \dots i_1^{(k)}i_2^{(k)}i_3^{(k)}} \lambda^{i_1^{(1)}+i_2^{(1)}+i_3^{(1)}+\dots+i_1^{(k)}+i_2^{(k)}+i_3^{(k)}} M = \\ = \lambda^{i_1^{(1)}+i_2^{(1)}+i_3^{(1)}+\dots+i_1^{(k)}+i_2^{(k)}+i_3^{(k)}} \sum_{i_1^{(1)}i_2^{(1)}i_3^{(1)} \dots i_1^{(k)}i_2^{(k)}i_3^{(k)}} a_{i_1^{(1)}i_2^{(1)}i_3^{(1)} \dots i_1^{(k)}i_2^{(k)}i_3^{(k)}} M$$

elde edilir. Buradan her  $i_1^{(1)}i_2^{(1)}i_3^{(1)} \dots i_1^{(k)}i_2^{(k)}i_3^{(k)}$  ve

$\forall \lambda \in R^+$  için

$$a_{i_1^{(1)}i_2^{(1)}i_3^{(1)} \dots i_1^{(k)}i_2^{(k)}i_3^{(k)}} \left( \begin{array}{l} \lambda^{i_1^{(1)}+i_2^{(1)}+i_3^{(1)}+\dots+i_1^{(k)}+i_2^{(k)}+i_3^{(k)}} \\ - \lambda^{i_1^{(1)}+i_2^{(1)}+i_3^{(1)}+\dots+i_1^{(k)}+i_2^{(k)}+i_3^{(k)}} \end{array} \right) = 0$$

elde edilir. Buna göre

$$\lambda^{i_1^{(1)}+i_2^{(1)}+i_3^{(1)}+\dots+i_1^{(k)}+i_2^{(k)}+i_3^{(k)}} = m$$

dersek

$$i_1^{(1)} + i_2^{(1)} + i_3^{(1)} + \dots + i_1^{(k)} + i_2^{(k)} + i_3^{(k)} \neq m$$

için  $a_{i_1^{(1)}i_2^{(1)}i_3^{(1)} \dots i_1^{(k)}i_2^{(k)}i_3^{(k)}} = 0$  bulunur. Böylece ispat tamamlanır.

**Önerme 3.3:** k tane vektör için LS(3)-invariant polinom sabit polinomdur.

İspat: k tane vektör için LS(3)-invariant polinom aynı zamanda LH(3)invariant olması gerektiğinden Teorem 3.1 e göre sabit polinomdur.

**Önerme 3.4:**  $H \subset S(3)$  bir altgrup ve  $f, H$ -invariant rasyonel fonksiyon olsun. Bu durumda  $f$

$$f(x) = \frac{P(x)}{Q(x)}, \quad Q(x) \neq 0$$

olacak şekilde çarpanları eşit iki nispi invaryant polinomun bölümü biçiminde yazılabilir.

İspat:  $f(x)$ , H- invaryant olduğundan  $\forall h \in H$  için  $f(hx) = f(x)$  dir.  $f$  rasyonel fonksiyon olduğundan,  $P$  ve  $Q$  aralarında asal polinomlar olmak üzere

$$f(x) = \frac{P(x)}{Q(x)}$$

şeklinde yazılabilir. Buradan

$$f(hx) = \frac{P(hx)}{Q(hx)} = \frac{P(x)}{Q(x)} = f(x)$$

dir. Bu eşitlikten,  $P(hx)Q(x) = P(x)Q(hx)$  elde edilir.  $P(x)$  ve  $Q(x)$  polinomları aralarında asal ve

$$P(hx) = \frac{P(x)Q(hx)}{Q(x)}$$

polinomuna bölünecektir. Yani, bir  $\phi(x, h)$  polinomu mevcut öyleki,  $Q(hx) = \phi(x, h)Q(x)$  olacaktır. Polinomların eşitliğinden her iki tarafın derecesi eşit olacaktır. Bu durumda  $\phi(x, h)$  polinomu sadece  $h$  ye bağlı olmalıdır. O halde

$$Q(hx) = \phi(h)Q(x)$$

dir. Bu eşitliği yukarıda yerine yazarsak,

$$P(hx) = \frac{P(x)\phi(h)Q(x)}{Q(x)}$$

olacağından

$$P(hx) = \phi(h)P(x)$$

dir.

**Teorem 3.2:**  $k$  tane vektör için  $m$ . dereceden nispi LS(3)- invaryant polinom

1.  $k=1$  ise  $P(x) = a_m \langle x, x \rangle^m$  biçimindedir.

2.  $k \geq 2$  ve  $f$  çift invaryant ise,

$$f(x^{(1)}, \dots, x^{(k)}) = \sum_{\substack{i_1^{(1)} + \dots + i_k^{(1)} + \\ + i_2^{(2)} + \dots + i_k^{(2)} + \\ + \dots + \\ + i_k^{(k-1)} + i_k^{(k)} = m}} a_{i_1^{(1)} \dots i_k^{(1)} i_2^{(2)} \dots i_k^{(2)} \dots i_k^{(k-1)} i_k^{(k)}} B \quad (7)$$

3.  $k \geq 2$  ve  $f$  tek invaryant ise,

$$f(x^{(1)}, \dots, x^{(k)}) = \sum_{\substack{i < j < s \\ i_1^{(1)} + \dots + i_k^{(1)} + \\ + i_2^{(2)} + \dots + i_k^{(2)} + \\ + \dots + \\ + i_k^{(k-1)} + i_k^{(k)} = m}} a_{i_1^{(1)} \dots i_k^{(1)} i_2^{(2)} \dots i_k^{(2)} \dots i_k^{(k-1)} i_k^{(k)}} B \quad (8)$$

(8)

biçimindedir. Burada

$$B = A_{i_1^{(1)}} A_{i_2^{(2)}} \dots A_{i_{k-1}^{(k-1)}} A_{i_k^{(k)}}$$

ve

$$A_{i_1^{(1)}} = \left( \prod_{s=1}^k \langle x^{(1)}, x^{(s)} \rangle^{i_1^{(1)}} \right), \quad A_{i_2^{(2)}} = \left( \prod_{t=2}^k \langle x^{(2)}, x^{(t)} \rangle^{i_2^{(2)}} \right), \dots, \\ A_{i_{k-1}^{(k-1)}} = \left( \prod_{p=k-1}^k \langle x^{(k-1)}, x^{(p)} \rangle^{i_{k-1}^{(k-1)}} \right), \quad A_{i_k^{(k)}} = \langle x^{(k)}, x^{(k)} \rangle^{i_k^{(k)}}$$

dir.

İspat:  $k$  tane vektör için  $m$ . dereceden nispi LS(3)- invaryant polinom hem nispi O(3)- invaryant ve hem de nispi LH(3)- invaryant olacağından Önerme 3.2 ve Teorem 3.1 den görülebilir.

**Teorem 3.3:**  $k$  tane vektör için LS(3)- invaryant rasyonel fonksiyonlar cisminin yani  $R(x_1, x_2, \dots, x_n)^{LS(3)}$  üreteç kümesi

$$\left\{ \frac{\langle x^{(i)}, x^{(j)} \rangle}{\langle x^{(1)}, x^{(1)} \rangle}, i, j = 1, \dots, k ; i \leq j \right\} \quad (9)$$

dir.

**İspat:**  $k$  tane vektör için çift LS(3) invaryant rasyonel fonksiyon, Önerme 3.4.' e göre çarpanları eşit olan iki çift nispi LS(3)- polinomun oranı şeklinde yazılabilir. Teorem 3.2' ye göre de çift nispi LS(3)- polinomlar terimlerinin dereceleri toplamı  $m$  olan polinomlar olduğundan  $k$  tane vektör için çift LS(3) invaryant rasyonel fonksiyon dereceleri aynı olan iki nispi invaryant polinomun oranı biçiminde olacaktır. Buna göre

$$f(x^{(1)}, \dots, x^{(k)}) = \frac{\sum_{\substack{i_1^{(1)} + \dots + i_k^{(1)} + \\ + i_2^{(2)} + \dots + i_k^{(2)} + \\ + \dots + \\ + i_k^{(k-1)} + i_k^{(k)} = m}} a_{i_1^{(1)} \dots i_k^{(1)} i_2^{(2)} \dots i_k^{(2)} \dots i_k^{(k-1)} i_k^{(k)}} B}{\sum_{\substack{i_1^{(1)} + \dots + i_k^{(1)} + \\ + i_2^{(2)} + \dots + i_k^{(2)} + \\ + \dots + \\ + i_k^{(k-1)} + i_k^{(k)} = m}} b_{i_1^{(1)} \dots i_k^{(1)} i_2^{(2)} \dots i_k^{(2)} \dots i_k^{(k-1)} i_k^{(k)}} B}$$

biçimindedir. Burada  $\langle x^{(1)}, x^{(1)} \rangle \neq 0$  olmak üzere pay ve paydayı  $\langle x^{(1)}, x^{(1)} \rangle^m$  sayısına bölersek,

$$i_1^{(1)} + \dots + i_k^{(1)} + i_2^{(2)} + \dots + i_k^{(2)} + \dots + i_k^{(k-1)} + i_k^{(k)} = m$$

olduğundan daha sade biçimde

$$f(x^{(1)}, \dots, x^{(k)}) = \frac{\sum_{\substack{i_1^{(1)} + \dots + i_k^{(1)} + \\ + i_2^{(2)} + \dots + i_k^{(2)} + \\ + \dots + \\ + i_k^{(k-1)} + i_k^{(k)} = m}} a_{i_1^{(1)} \dots i_k^{(1)} i_2^{(2)} \dots i_k^{(2)} \dots i_k^{(k-1)} i_k^{(k)}} U$$

$$= \frac{\sum_{\substack{i_1^{(1)} + \dots + i_k^{(1)} + \\ + i_2^{(2)} + \dots + i_k^{(2)} + \\ + \dots + \\ + i_k^{(k-1)} + i_k^{(k)} = m}} b_{i_1^{(1)} \dots i_k^{(1)} i_2^{(2)} \dots i_k^{(2)} \dots i_k^{(k-1)} i_k^{(k)}} U$$

ile ifade edilebilir. Burada

$$U = N_{i^{(1)}} N_{i^{(2)}} \dots N_{i^{(k-1)}} N_{i^{(k)}}$$

ve

$$N_{i^{(1)}} = \prod_{s=1}^k \left( \frac{\langle x^{(1)}, x^{(s)} \rangle}{\langle x^{(1)}, x^{(1)} \rangle} \right)^{i_s^{(1)}}, N_{i^{(2)}} = \prod_{t=2}^k \left( \frac{\langle x^{(2)}, x^{(t)} \rangle}{\langle x^{(1)}, x^{(1)} \rangle} \right)^{i_t^{(2)}},$$

$$\dots, N_{i^{(k-1)}} = \prod_{p=k-1}^k \left( \frac{\langle x^{(k-1)}, x^{(p)} \rangle}{\langle x^{(1)}, x^{(1)} \rangle} \right)^{i_p^{(k-1)}}, N_{i^{(k)}} = \left( \frac{\langle x^{(k)}, x^{(k)} \rangle}{\langle x^{(1)}, x^{(1)} \rangle} \right)^{i_k^{(k)}}$$

dir. Burada  $i, j = 1, \dots, k$  ve  $i \leq j$  için  $\frac{\langle x^{(i)}, x^{(j)} \rangle}{\langle x^{(1)}, x^{(1)} \rangle}$  LS(3)-invariant rasyonel fonksiyonlardır. İnvaryant bir fonksiyonun keyfi toplamı, çarpımı ve bölünmesi de invarianttır. Dolayısıyla  $k$  tane vektör için LS(3)-invariant rasyonel fonksiyon  $i, j = 1, \dots, k$  ve  $i \leq j$  için  $\frac{\langle x^{(i)}, x^{(j)} \rangle}{\langle x^{(1)}, x^{(1)} \rangle}$  ile üretilebilir.

Şimdi  $f$  tek olsun. Benzer şekilde **tek** LS(3) invariant rasyonel fonksiyon, Önerme 3.4.' e göre çarpanları eşit olan iki tek nispi LS(3)- polinomun oranı şeklinde yazılabilir. Teorem 3.2' ye göre de tek nispi LS(3)- polinomlar terimlerinin dereceleri toplamı  $m$  olan polinomlar ile vektörlerin üçerli determinant değerlerinin çarpımlarından oluştuğundan  $k$  tane vektör için tek LS(3) invariant **rasyonel fonksiyon**,

$$f(x^{(1)}, \dots, x^{(k)}) = \frac{\sum_{\substack{i_1^{(1)} + \dots + i_k^{(1)} + \\ + i_2^{(2)} + \dots + i_k^{(2)} + \\ + \dots + \\ + i_k^{(k-1)} + i_k^{(k)} = m}} [x^{(i)} \ x^{(j)} \ x^{(s)}] \sum_{i < j < s} a_{i_1^{(1)} \dots i_k^{(1)} i_2^{(2)} \dots i_k^{(2)} \dots i_k^{(k-1)} i_k^{(k)}} B$$

$$= \frac{\sum_{\substack{i_1^{(1)} + \dots + i_k^{(1)} + \\ + i_2^{(2)} + \dots + i_k^{(2)} + \\ + \dots + \\ + i_k^{(k-1)} + i_k^{(k)} = m}} [x^{(i)} \ x^{(j)} \ x^{(s)}] \sum_{i < j < s} b_{i_1^{(1)} \dots i_k^{(1)} i_2^{(2)} \dots i_k^{(2)} \dots i_k^{(k-1)} i_k^{(k)}} B$$

biçiminde yazılabilir. Burada  $[x^{(1)} \ x^{(2)} \ x^{(3)}] \neq 0$  ve  $\langle x^{(1)}, x^{(1)} \rangle \neq 0$  olmak üzere pay ve paydayı  $[x^{(1)} \ x^{(2)} \ x^{(3)}]$  ve  $\langle x^{(1)}, x^{(1)} \rangle^m$  sayılarına ayrı ayrı bölersek,

$$i_1^{(1)} + \dots + i_k^{(1)} + i_2^{(2)} + \dots + i_k^{(2)} + \dots + i_k^{(k-1)} + i_k^{(k)} = m$$

olduğundan daha sade biçimde

$$f(x^{(1)}, \dots, x^{(k)}) = \frac{\sum_{\substack{i_1^{(1)} + \dots + i_k^{(1)} + \\ + i_2^{(2)} + \dots + i_k^{(2)} + \\ + \dots + \\ + i_k^{(k-1)} + i_k^{(k)} = m}} [x^{(i)} \ x^{(j)} \ x^{(s)}] \sum_{i < j < s} a_{i_1^{(1)} \dots i_k^{(1)} i_2^{(2)} \dots i_k^{(2)} \dots i_k^{(k-1)} i_k^{(k)}} U$$

$$= \frac{\sum_{\substack{i_1^{(1)} + \dots + i_k^{(1)} + \\ + i_2^{(2)} + \dots + i_k^{(2)} + \\ + \dots + \\ + i_k^{(k-1)} + i_k^{(k)} = m}} [x^{(i)} \ x^{(j)} \ x^{(s)}] \sum_{i < j < s} b_{i_1^{(1)} \dots i_k^{(1)} i_2^{(2)} \dots i_k^{(2)} \dots i_k^{(k-1)} i_k^{(k)}} U$$

ile ifade edilebilir. Burada,

$$\frac{[x^{(i)} \ x^{(j)} \ x^{(s)}]}{[x^{(1)} \ x^{(2)} \ x^{(3)}]} ; i, j, s = 1, \dots, k; i < j < s$$

ve

$$i, j = 1, \dots, k \text{ ve } i \leq j \text{ için } \frac{\langle x^{(i)}, x^{(j)} \rangle}{\langle x^{(1)}, x^{(1)} \rangle}$$

fonksiyonları LS(3)-invariant rasyonel fonksiyonlardır. İnvaryant bir fonksiyonun keyfi toplamı, çarpımı ve bölünmesi de invarianttır. Dolayısıyla  $k$  tane vektör için LS(3)-invariant rasyonel fonksiyon

$$\frac{[x^{(i)} \ x^{(j)} \ x^{(s)}]}{[x^{(1)} \ x^{(2)} \ x^{(3)}]}, i, j, s = 1, \dots, k; i < j < s$$

ve

$$\frac{\langle x^{(i)}, x^{(j)} \rangle}{\langle x^{(1)}, x^{(1)} \rangle} i, j = 1, \dots, k \text{ ve } i \leq j$$

ile üretilebilir. Burada

$$\frac{[x^{(i)} \ x^{(j)} \ x^{(s)}]}{[x^{(1)} \ x^{(2)} \ x^{(3)}]}, i, j, s = 1, \dots, k; i < j < s$$

ifadesini incelediğimizde  $i, j, s = 1, \dots, k; i < j < s$  için

$$\frac{[x^{(i)} \ x^{(j)} \ x^{(s)}]}{[x^{(1)} \ x^{(2)} \ x^{(3)}]} = \frac{[x^{(i)} \ x^{(j)} \ x^{(s)}]}{[x^{(1)} \ x^{(2)} \ x^{(3)}]} \cdot 1$$

$$= \frac{[x^{(i)} \ x^{(j)} \ x^{(s)}] \cdot [x^{(1)} \ x^{(2)} \ x^{(3)}]}{[x^{(1)} \ x^{(2)} \ x^{(3)}]^2}$$

olur. Böylece,  $[x^{(i)} \ x^{(j)} \ x^{(s)}]$  ve  $[x^{(1)} \ x^{(2)} \ x^{(3)}]$  determinantları tek invariant polinom ve iki tek invariant polinomun çarpımı çift

invariant polinom olduğundan bu ifade iki çift invariant polinomun oranı biçiminde olur ki bu da

$$\frac{[x^{(i)} \ x^{(j)} \ x^{(s)}]}{[x^{(1)} \ x^{(2)} \ x^{(3)}]}, \ i, j, s = 1, \dots, k; \ i < j < s$$

ifadesinin de

$$\frac{\langle x^{(i)}, x^{(j)} \rangle}{\langle x^{(1)}, x^{(1)} \rangle} \ i, j = 1, \dots, k \ \text{ve} \ i \leq j$$

ile üretilebilir olduğunu gösterir.

**Teorem 3.4:**  $k$  tane vektör için tanımlı bir  $f(x^{(1)}, \dots, x^{(k)})$  rasyonel fonksiyonu  $S(3)$ - invariant ise

$$g(x^{(1)}, \dots, x^{(k)}) = f(0, x^{(2)} - x^{(1)}, \dots, x^{(k)} - x^{(1)})$$

rasyonel fonksiyonu  $LS(3)$ - invarianttır. Tersine,

$$f(x^{(1)}, \dots, x^{(k)}) = h(x^{(2)} - x^{(1)}, \dots, x^{(k)} - x^{(1)})$$

biçiminde yazılsın.  $h$ ,  $LS(3)$ - invariant ise,  $f(x^{(1)}, \dots, x^{(k)})$   $S(3)$ - invarianttır.

**İspat:**  $k$  tane vektör için tanımlı bir fonksiyon  $f$ ,  $S(3)$ - invariant olsun.

$$g(x^{(1)}, \dots, x^{(k)}) = f(0, x^{(2)} - x^{(1)}, \dots, x^{(k)} - x^{(1)})$$

fonksiyonunun  $LS(3)$  invariant olduğunu gösterelim.  $f$ ,  $S(3)$ - invariant olduğundan her  $\lambda w \in LS(3)$  ve her  $b \in R^3$  için

$$f(\lambda w x^{(1)} + b, \dots, \lambda w x^{(k)} + b) = f(x^{(1)}, \dots, x^{(k)})$$

dir. Özel olarak  $b = 0$  için de doğrudur. Dolayısıyla

$$f(\lambda w x^{(1)}, \dots, \lambda w x^{(k)}) = f(x^{(1)}, \dots, x^{(k)})$$

sağlanır.  $g$  nin tanımından dolayı her  $\lambda w \in LS(3)$  için

$$\begin{aligned} g(\lambda w x^{(1)}, \dots, \lambda w x^{(k)}) &= \\ &= f(0, \lambda w(x^{(2)} - x^{(1)}), \dots, \lambda w(x^{(k)} - x^{(1)})) \\ &= f(0, x^{(2)} - x^{(1)}, \dots, x^{(k)} - x^{(1)}) = g(x^{(1)}, \dots, x^{(k)}) \end{aligned}$$

olur ki bu durum  $g$ ' nin  $LS(3)$  invariant olduğunu gösterir.

Tersine,  $k$  tane vektör için tanımlı bir fonksiyon  $f(x^{(1)}, \dots, x^{(k)}) = h(x^{(2)} - x^{(1)}, \dots, x^{(k)} - x^{(1)})$  biçiminde yazılsın ve  $h$ ,  $LS(3)$  invariant olsun.  $f$  nin  $S(3)$ - invariant olduğunu gösterelim. Burada  $f$  nin tanımından ve  $h$ ,  $LS(3)$  invariant olduğundan her  $\lambda w \in LS(3)$  ve her  $b \in R^3$  için

$$\begin{aligned} f(\lambda w x^{(1)} + b, \dots, \lambda w x^{(k)} + b) &= \\ &= h((\lambda w x^{(2)} + b) - (\lambda w x^{(1)} + b), \dots, (\lambda w x^{(k)} + b) - (\lambda w x^{(1)} + b)) \\ &= h(\lambda w(x^{(2)} - x^{(1)}), \dots, \lambda w(x^{(k)} - x^{(1)})) \\ &= h(x^{(2)} - x^{(1)}, \dots, x^{(k)} - x^{(1)}) \\ &= f(x^{(1)}, \dots, x^{(k)}) \end{aligned}$$

olduğu görülür. Dolayısıyla  $f$ ,  $S(3)$ - invarianttır.

Bu teoremin bir sonucu olarak aşağıdaki teorem verilebilir:

**Teorem 3.5:**  $k$  tane vektör için  $S(3)$  invariant rasyonel fonksiyon

$f$  çift ise,

$$f(x^{(1)}, \dots, x^{(k)}) = \frac{\sum_{\substack{+i_2^{(2)} + \dots + i_k^{(2)} + \\ + \dots + \\ +i_k^{(k-1)} + i_k^{(k)} = m}} a_{i_2^{(2)} \dots i_k^{(2)} \dots i_k^{(k-1)} i_k^{(k)}} Y}{\sum_{\substack{+i_2^{(2)} + \dots + i_k^{(2)} + \\ + \dots + \\ +i_k^{(k-1)} + i_k^{(k)} = m}} b_{i_2^{(2)} \dots i_k^{(2)} \dots i_k^{(k-1)} i_k^{(k)}} Y}$$

$f$  tek ise,

$$f(x^{(1)}, \dots, x^{(k)}) =$$

$$= \frac{\sum_{\substack{i,j,s=1 \\ i < j < s}}^k [x^{(i)} - x^{(1)} \ x^{(j)} - x^{(1)} \ x^{(s)} - x^{(1)}] D}{\sum_{\substack{i,j,s=1 \\ i < j < s}}^k [x^{(i)} - x^{(1)} \ x^{(j)} - x^{(1)} \ x^{(s)} - x^{(1)}] E}$$

biçimindedir. Burada

$$D = \sum_{\substack{i_1^{(1)} + \dots + i_k^{(1)} + \\ +i_2^{(2)} + \dots + i_k^{(2)} + \\ + \dots + \\ +i_k^{(k-1)} + i_k^{(k)} = m}} a_{i_1^{(1)} \dots i_k^{(1)} i_2^{(2)} \dots i_k^{(2)} \dots i_k^{(k-1)} i_k^{(k)}} Y$$

$$E = \sum_{\substack{i_1^{(1)} + \dots + i_k^{(1)} + \\ +i_2^{(2)} + \dots + i_k^{(2)} + \\ + \dots + \\ +i_k^{(k-1)} + i_k^{(k)} = m}} b_{i_1^{(1)} \dots i_k^{(1)} i_2^{(2)} \dots i_k^{(2)} \dots i_k^{(k-1)} i_k^{(k)}} Y$$

dir.

Ayrıca

$$Y = L_{i(2)}L_{i(3)} \dots L_{i(k-1)}L_{i(k)}$$

ve

$$L_{i(2)} = \prod_{s=2}^k ((x^{(2)} - x^{(1)}, x^{(s)} - x^{(1)}))^{i_s^{(2)}}$$

$$L_{i(3)} = \prod_{t=3}^k ((x^{(3)} - x^{(1)}, x^{(t)} - x^{(1)}))^{i_t^{(3)}, \dots,}$$

$$L_{i(k)} = ((x^{(k)} - x^{(1)}, x^{(k)} - x^{(1)}))^{i_k^{(k)}}$$

dir.

İspat: Bu durum Teorem 3.3 ve Teorem 3.4 ün bir sonucudur.

**Teorem 3.6:**  $k$  tane vektör için  $S(3)$  invaryant rasyonel fonksiyonlar cisminin üreteç kümesi

1.  $k \leq 2$  ise 1 dir.

2.  $k \geq 3$  ise

$$\left\{ \frac{\langle x_i - x_1, x_j - x_1 \rangle}{\langle x_2 - x_1, x_2 - x_1 \rangle} \right\}$$

$$i = 2, \dots, k, j = 2, \dots, k \text{ ve } i \leq j \quad (10)$$

dir.

İspat: Teorem 3.3 ün ispatında olduğu gibi tek  $LS(3)$ -invaryant polinomlarda iki determinant değerinin oranı biçimindeki fonksiyon çift  $LS(3)$ -invaryant olacağından ispat kolayca görülebilir.

## KAYNAKLAR

- [1] Khadjiev Dj. (1967), Some Questions in the Theory of Vector Invariants, *Math. USSR- Sbornic*, 1 (3): 383-396.
- [2] Grosshans F. (1973), Observeable Groups and Hilbert's Problem, *American Journal of Math.*, 95:229-253.
- [3] Klein F. (1893), A comperative review of recent researches in geometry ( Dr. M.W. Haskell, trans.) *Bulletin of the New York Mathematical Society*, 2 : 215-249.
- [4] Weyl H. (1946), The Classical Groups, Their Invariants and Representations, 2nd ed., with suppl., *Princeton University Press*, Princeton.
- [5] Khadjiev Dj. (1988), An Application of the Invariant Theory to the Differential Geometry of Curves, Fan, Tashkent ( in Russian ).

[6] Incesu M. (2008), The Complete System of Point Invariants in the Similarity Geometry, *Phd. Thesis, Karadeniz Technical University, Trabzon.*

[7] Sagirolu Y. (2011), "The Equivalence Problem For Parametric Curves In One-Dimensional Affine Space", *International Mathematical Forum*, 6: 177-184.

[8] Sagirolu Y. (2015), "Equi-affine differential invariants of a pair of curves", *TWMS Journal of Pure and Applied Mathematics*, 6 : 238-245.

[9] Sagirolu Y., Peksen O. (2010), "The Equivalence Of Centro-Equiaffine Curves", *Turkish Journal of Mathematics*, 34: 95-104.

[10] Ören İ. (2016), "Complete System of Invariants of Subspaces of Lorentzian Space", *Iranian Journal of Science and Technology Transaction A-Science*, 40(3): 1-8.

[11] Khadjiev D., Ören İ., Peksen O. (2013) , "Generating systems of differential invariants and the theorem on existence for curves in the pseudo-Euclidean geometry", *Turkish Journal of Mathematics*, 37: 80-94.

[12] Karataş M. (2005), Noktalar Sisteminin Öklid İnvaryantları, Y. Lisans Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.*

[13] Incesu M., Gürsoy O. (2017), "LS(2)-Equivalence Conditions of Control Points and Application to Planar Bezier Curves" *New Trends in Mathematical Science*, 5 (3), 70-84.

[14] Incesu M., Gürsoy O. (2017) "Düzlemsel Bezier Eğrilerinin S(2)- Denklik Şartları", *Muş Alparslan University Journal of Science*, 5 (2), 471-477.

[15] İncesu M., (2017) , "THE SIMILARITY ORBITS IN  $R^3$ " *Modelling and Application & Theory*, 2 (1), 28-37.

[16] Nikulin V. And Shafarevich I.R. (1994), *Geometries and Groups*, Springer, NewYork.

[17] Ören, İ.(2018) On the control invariants of planar Bezier curves for the groups  $M(2)$  and  $SM(2)$ . *Turkish Journal of Mathematics and Computer Science*, 10, 74-81.

[18] Ören İ.(2018), "Equivalence conditions of two Bézier curves in the Euclidean geometry", *Iranian Journal of Science and Technology Transaction A-Science*, 42(3),1563-1567.

[19] Çoban H.A.(2019), "Complete System of Invariants of Vectors for Isometry Group in n-dimensional Unitary Space", *Communications Faculty of Sciences University of Ankara-Series A1. Mathematics and Statistics*, 68, 362-370.

[20] Ören İ, Çoban H.A. (2014), "Some Invariant Properties of Curves in the Taxicab Geometry",

Missouri Journal of Mathematical Sciences, 26(2), 107-114.

## Antibacterial Effects of *Parmelia sulcata* and *Hypogymnia tubulosa* Acetone Extracts Against Isolates From Soak Liquors

*Parmelia sulcata* ve *Hypogymnia tubulosa* Aseton Özütlelerinin İslatma Sıvılarından Elde Edilen İzolatlar Üzerine Antibakteriyel Etkileri

Didem BERBER<sup>1,2</sup> 

<sup>1</sup> Marmara University, Department of Biology, Faculty of Arts and Sciences, Istanbul, Turkey

<sup>2</sup> Maltepe University, Fine and Arts Faculty, Gastronomy and Culinary Department, Marmara Eğitim Koyu, Istanbul, Turkey

### Abstract

It is well known that there are halophilic or non-halophilic bacteria in salt, soak liquors, salted and soaked hides/skins in high numbers in the leather industry. These bacteria have several hydrolytic enzymes which cause irreversible defects on finished leather product. Although antimicrobial agents are utilized to control the bacterial population in the soaking process, these agents have not sufficient efficacy due to inadequate application of these agents or the presence of antimicrobial-resistant bacterial strains in soak liquors. In this respect, alternative agents or strategies may be helpful for controlling the bacterial population. For this purpose, *Bacillus toyonensis*, *B. mojavensis*, *B. subtilis*, *B. amyloliquefaciens*, *B. velezensis*, *B. cereus* and *B. licheniformis*, which were isolated from soak liquor samples of different tanneries in the previous study, were tested in the present study and the antibacterial effects of acetone extracts of *Parmelia sulcata* and *Hypogymnia tubulosa* were evaluated on these isolates. The pure cultures of the isolates were confirmed by colony morphologies on agar plates and Gram staining. Moreover, antibacterial activities for acetone extracts of *Parmelia sulcata* and *Hypogymnia tubulosa* against these isolates were tested at certain concentrations of 240, 120, 60 and 30 µg/ml. *Hypogymnia tubulosa* extracts were found to be more successful in comparison to the extracts of *Parmelia sulcata* on tested isolates. These tested lichen species can be used to control the population of bacteria in the soaking process and also to prevent potential defects on the hide/skin that may be seen in subsequent tanning processes due to the development of these bacteria.

**Keywords:** soak liquor, lichen, *Parmelia sulcata*, *Hypogymnia tubulosa*, acetone extract, antibacterial.

### Öz

Deri endüstrisinde tuzda, tuzlanmış ve ıslatılmış büyükbaş ve küçükbaş hayvan derilerinde, ve ıslatma sıvılarında çok fazla sayıda halofil veya halofil olmayan bakterilerin bulunduğu bilinmektedir. Bu bakteriler bitmiş deri ürününde geri dönüşümü olmayan kusurlara neden olan birkaç hidrolitik enzime sahiptir. İslatma işleminde bakteri popülasyonu kontrol etmek için antimikrobiyal ajanların kullanılmasına rağmen, bu ajanların yetersiz uygulanmalarına veya ıslatma sıvılarında antimikrobiyallere dirençli bakteri suşlarının bulunmasına bağlı olarak yeterli etkinliğe sahip değildir. Bu bağlamda, bakteri popülasyonunu kontrol etmek için alternatif ajanlar veya stratejiler yardımcı olabilir. Bu amaçla, bir önceki çalışmada farklı tabakhanelerden toplanan ıslatma çözeltisi örneklerinden izole edilen *Bacillus toyonensis*, *B. mojavensis*, *B. subtilis*, *B. amyloliquefaciens*, *B. velezensis*, *B. cereus* ve *B. licheniformis* test edilmiştir ve *Parmelia sulcata* ve *Hypogymnia tubulosa*'nın aseton özütlelerinin antibakteriyel etkileri bu izolatlar üzerinde değerlendirilmiştir. İzolatların saf kültürleri, agar plakaları üzerinde koloni morfolojileri ve Gram boyamaları ile doğrulanmıştır. Ayrıca, *Parmelia sulcata* ve *Hypogymnia tubulosa*'nın aseton özütlelerinin bu izolatlar üzerine antibakteriyel aktiviteleri, 240, 120, 60 ve 30 µg/ml konsantrasyonlarında test edilmiştir. *Hypogymnia tubulosa* özütlelerinin *Parmelia sulcata* özütlere kıyasla test edilen izolatlar üzerinde daha başarılı olduğu bulunmuştur. Bu test edilen liken türleri, ıslatma işleminde bakteri popülasyonunu kontrol etmek için ve ayrıca ileriki tabaklama işlemlerinde bu bakterilerin gelişimine bağlı olarak görülebilecek deri üzerindeki potansiyel kusurları engellemek amacıyla kullanılabilir.

**Anahtar Kelimeler:** ıslatma sıvısı, liken, *Parmelia sulcata*, *Hypogymnia tubulosa*, aseton özütü, antibakteriyel.

## I. INTRODUCTION

The bacterial population subsequently changes after the flaying process and some species of bacteria easily colonize on hide/skin surfaces (1-3). This bacterial contamination may be originated from slaughterhouses, warehouses, or tanneries (4). The presence of major components such as water, proteins, and lipids in the



structure of hides/skins, blood, dirt, and higher temperature, etc. provides excellent growth conditions for non-halophilic, salt-resistant or salt-tolerant bacteria, halophilic bacteria and extremely halophilic archaea (5, 6). It has been reported that moderately halophilic bacteria from salted goat skin secrete several enzymes such as protease, catalase, lipase,  $\beta$ -galactosidase, oxidase, urease, caseinase, amylase, lecithinase and cellulase (7). Especially proteolytic and lipolytic archaea may cause red heat, bad odor, pinpricks, disruption of collagen fibers, hair loosening, hair loss, hole formation, irreversible damage on grain surface, abraded appearance, uneven dyeing etc. As a result of these bacterial activities, the deterioration on hides/skins becomes inevitable and the leather quality is adversely affected (1, 6, 8-10). Therefore, adequate preservation methods against possible harmful bacterial activities during transportation and storage of the hides/skins have to be implemented.

Fresh hides/skins are traditionally preserved by the salt-or brine-curing method (1, 4, 6, 8). The cured raw hides/skins are soaked to remove excess salt, blood, soluble proteins, dirt, and manure in the soaking (first stage of tanning) process. The excessively prolonged soaking process results in harmful bacterial activities. The duration of soaking process is 24-36 h for dry salt-cured raw hides and 36-72 h for air-dried raw hides. This long soaking time can loosen hair follicles and cause hair loss which are unwanted situations for fur production (11). The effects of antibacterial agents in soak liquors may differ according to the type of microorganism. Many Gram positive and Gram negative bacteria may survive and grow during this process due to their resistance properties. Most strains may become resistant to these antibacterial agents due to prolonged utilization and in inadequate dosages (9, 12-14). Since antimicrobial agents may not always have the expected effect, novel agents with low toxicity, biodegradable, and biocompatible properties have to be investigated. As expected, natural antimicrobials derived from plants, animals, algae, and microorganisms, etc. are preferred for ecological and toxicological aspects. Plant based formulations and lichen derived extracts from *Pseudevernia furfuraceae* (L.) Zopf. have also been reported in the leather industry (15). Lichens, also called lichenized fungi, are symbiotic organisms between a fungus (mycobiont) and one or more green algae or cyanobacterium (photobiont). They produce various lichen secondary metabolites with low molecular weight (16, 17). The potential antibacterial effects of various lichen extracts against several bacteria species were reported in the literature (18-21).

There is a crucial need for controlling the bacterial population in the leather industry. For this purpose, lichen species with potential antibacterial properties may be an effective solution when compared to

industrially utilized antimicrobial agents. The aim of this study was to investigate the antibacterial effects of acetone extracts of *Parmelia sulcata* and *Hypogymnia tubulosa* lichen species on eight isolates obtained from soak liquors collected from different tanneries.

## II. MATERIAL AND METHODS

### 2.1. Bacterial strains

In the present study, *Bacillus toyonensis*, *B. mojavensis*, *B. subtilis*, *B. amyloliquefaciens*, *B. velezensis*, *B. cereus* and *B. licheniformis*, which were isolated from soak liquor samples of different tanneries in the previous study, were tested. The identification of the test organisms was performed by Gram Staining, oxidase and catalase tests, bacterial growth on several selective media, protease and lipase activities, and comparative partial 16S rRNA gene sequence analyses in the previous study. It was detected that test bacteria were Gram positive, rod-shaped, protease positive, and mostly catalase positive (22). The test isolates were stored at  $-80^{\circ}\text{C}$ . The pure cultures of test bacteria were confirmed by colony morphologies on agar plates as well as Gram staining, and then they were utilized in the experiments.

### 2.2. Lichen Samples

The lichen samples belonging to *Parmelia sulcata* and *Hypogymnia tubulosa* were collected from fir trees of Kastamonu province in the north-west of Turkey. They were identified through classical taxonomic methods by microscopic examination (23, 24). Voucher specimens were deposited with the lichen collection of Marmara University Herbarium (MUFE). *Parmelia sulcata* and *Hypogymnia tubulosa*: Turkey, Kastamonu province, Kapaklı Village, 41.24492, 34.18330, G. Çobanoğlu.

### 2.3. Extraction of Lichen Samples

The lichen samples were washed, dried on air, and weighed. After the samples were taken into sterile bottles, acetone (ACS, ISO, Reag. Ph Eur) was added and kept in a dark place for 24 h followed by filtration through filter paper. The acetone was evaporated in a rotary evaporator and crude lichen acetone extracts were obtained (25).

### 2.4. Determination of antibacterial efficacies

Antibacterial tests were performed in 96-well microplates (Greiner Bio-One, Cell Star, F-bottom, with lid). Tryptic soy broth was added to each well and four-fold serial dilutions of the acetone extracts of *P. sulcata* and *H. tubulosa* were made. Final concentrations of both lichen extracts were 240, 120, 60, and 30  $\mu\text{g}/\text{ml}$ . Overnight cultures of eight isolates were added to obtain a total volume of 100  $\mu\text{l}$  with an OD 600 nm of 0.02. The experiments included untreated (the broth medium and test bacteria) and blind wells (only the broth medium). The tests were performed in three replicates. The inhibitory effect of

the acetone extracts on bacterial growth was evaluated at 20<sup>th</sup> hour using Cytation 3 multimode microplate reader (Biotek), by measuring the absorbance. The antibacterial effects of the extracts of *P. sulcata* and *H. tubulosa* against the test bacteria were compared with the untreated ones.

### III. RESULTS

#### 3.1. Colony Morphology

The colony morphology was concentric surfaced, undulate edged, and cream-white colored in isolate 1 (*B. tonoyensis*). Isolate 2 (*B. mojavensis*) had convex surfaced, undulate edged, and cream-white colored colonies. In isolates 3 (*B. cereus*) and 5 (*B. cereus*), colonies were large, flat surfaced, entire edged, dull and cream-white colored. The colony morphology in isolate 4 (*B. velezensis*) was observed as cream-white colored, rough and lobate edged colonies. The convex surfaced, opaque, lobate edged, rough and wrinkled colonies were recorded in isolate 6 (*B. licheniformis*). The colony morphology of isolate 7 (*B. amyloliquefaciens*) was detected to have rough, mucoid, cream-white colored colonies with irregular

edges. The isolate 8 (*B. subtilis*) had opaque, convex surfaced, lobate edged, and rough colonies. The morphological appearances of eight isolates on agar plates are given in Figure 1.

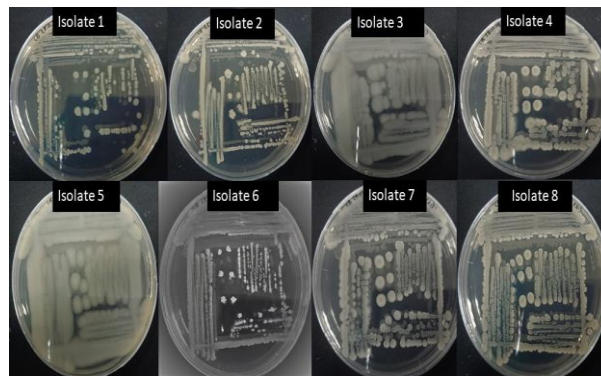


Figure 1. The morphological appearances of eight isolates on agar plates.

#### 3.2. Gram Staining

The isolates were all Gram positive and rod-shaped. The microscopic appearances are given in Figure 2.

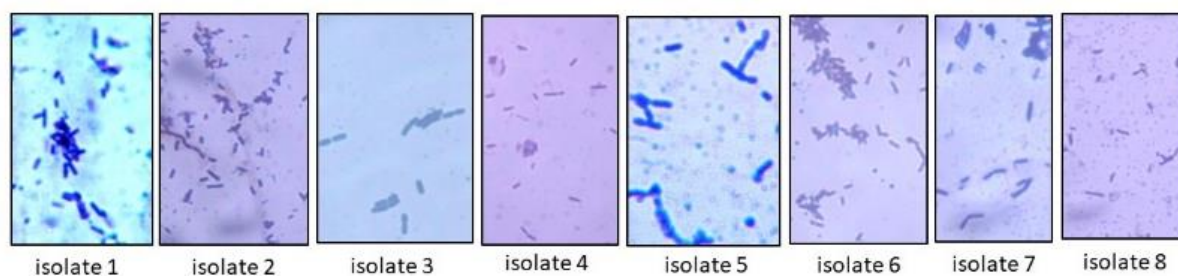


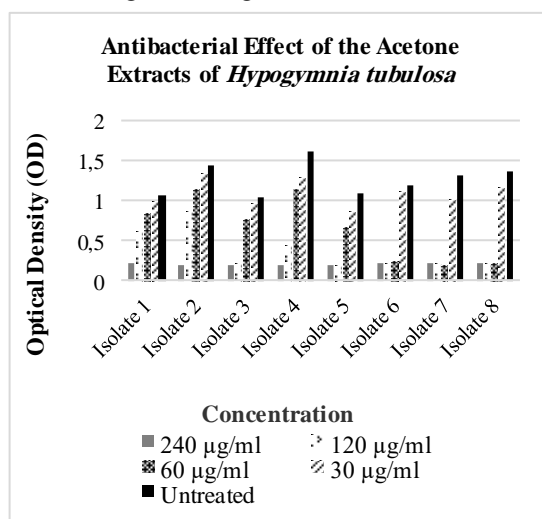
Figure 2. The microscopic appearances for Gram staining of eight isolates.

#### 3.3. Antibacterial Efficacies of the Extracts

Compared to untreated groups, a great inhibition was detected in the bacterial growth of all isolates which were tested with the acetone extracts of *H. tubulosa* at the concentration of 240 µg/ml. The inhibition ratios were recorded as 80.24-88.65 % for this test concentration against eight test isolates. In this respect, we obtained similar inhibition ratios for the concentration of 240 µg/ml, and the highest antibacterial effect was observed in isolate 4 (*B. velezensis*). However, some differences were determined in other test concentrations depending on the isolates. The potential antibacterial effect was also detected at the concentration of 120 µg/ml in most of the isolates. The inhibition percentages for the isolates 3 (*B. cereus*), 4 (*B. velezensis*), 5 (*B. cereus*), 6 (*B. licheniformis*), 7 (*B. amyloliquefaciens*), and 8 (*B. subtilis*) were detected as 79.38, 72.44, 81.26, 82.29, 83.14 and 83.55, respectively. On the other hand, isolate 1 (*B. tonoyensis*) and isolate 2 (*B. mojavensis*) were not sufficiently inhibited by the extracts at the concentration of 120 µg/ml and inhibition ratios were

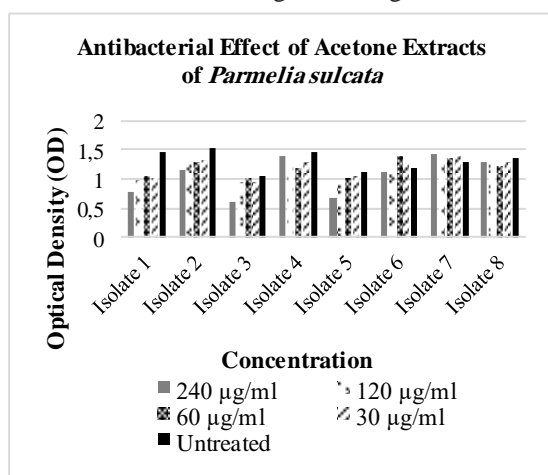
recorded as 42.70 and 40.36 %, respectively. The extracts showed also antibacterial effects against isolates 6 (*B. licheniformis*), 7 (*B. amyloliquefaciens*), and 8 (*B. subtilis*) at the concentration of 60 µg/ml, while other isolates were not inhibited. The inhibition percentages of the isolates 6, 7 and 8 at the concentration of 60 µg/ml were calculated as 79.93, 84.38 and 84.16, respectively. There was no noteworthy effect at the concentration of 30 µg/ml. The percentages of inhibition for 30 µg/ml test group were varied between 23.01 and 6.59 except isolate 4 (*B. velezensis*). Based on these results, it was determined that the extracts had very high antibacterial effects at the concentration of 240 µg/ml against isolates 1 (*B. tonoyensis*), and 2 (*B. mojavensis*). There was no inhibition at the other test concentrations for these isolates. On the other hand, isolate 3 and 5 (*B. cereus*) and isolate 4 (*B. velezensis*) were also inhibited at the concentration of 120 µg/ml as well as 240 µg/ml. The isolates 6 (*B. licheniformis*), 7 (*B. amyloliquefaciens*), and 8 (*B. subtilis*) were highly inhibited at the concentrations of 240, 120 and

60  $\mu\text{g/ml}$  but not effectively inhibited at 30  $\mu\text{g/ml}$ . The data are given in Figure 3.



**Figure 3.** The antibacterial effects of the extracts against the isolates treated with acetone extracts of *H. tubulosa* at the certain concentrations of 240, 120, 60 and 30  $\mu\text{g/ml}$  at 20th hour. Data are shown as optical absorbance over OD 600 nm.

The acetone extracts of *P. sulcata* were also tested against eight isolates. According to the data, these extracts were not effective when compared to the extracts of *H. tubulosa*. The extracts of *P. sulcata* had slightly inhibitory effects against the isolates 1, 3, and 5 in comparison with the untreated groups. The inhibition ratios at the concentration of 240  $\mu\text{g/ml}$  were recorded as 46.69, 44.34 and 40.09 for these isolates, respectively. The inhibition ratios was detected similar in isolate 1 at the concentrations of 120, 60 and 30  $\mu\text{g/ml}$  (32.09, 29.36, and 30.28 %, respectively). There was no inhibitory effect on other test isolates. The data are given in Figure 4.



**Figure 4.** The antibacterial effects of the extracts against the isolates treated with acetone extracts of *P. sulcata* at the certain concentrations of 240, 120, 60 and 30  $\mu\text{g/ml}$  at 20th hour. Data are shown as optical absorbance over OD 600 nm.

## IV. DISCUSSION

In the leather industry, application mistakes in preservation and soaking processes can affect finished product quality seriously. Therefore, many criteria must be taken into consideration to produce the best quality and high added value leather. Whereas hide/skin preservation is generally provided by the application of salt, it has been suggested that salt may also cause bacterial contamination of hides/skins. In a study evaluating the bacterial numbers found in salt samples from Tuz Lake, Kaldırım, Kayacık Salterns, and Tuzköy Mine, high numbers of extremely halophilic archaea were reported (3, 26). Hide damages caused by proteolytic halophilic bacteria in salt samples were also recorded (1, 2, 10, 27-29). For this reason, several researchers have focused on controlling halophilic and non-halophilic bacterial population especially in salt, raw hides/skin, and soaking process. In previous studies, non-halophilic and halophilic bacteria and archaea were isolated from salted, and soaked animal hides and soak liquor samples (29-35). Inadequate salt-curing applications and soaking processes are considered to lead increased number of bacteria and also serious damages on leather due to bacterial activities.

Berber et al. (2010) reported high numbers of non-halophilic bacteria from soak liquor samples despite the utilization of antimicrobial agents. They evaluated the efficacy of antimicrobial agent (the active content, didesylldimethylammonium chloride) in soak liquors at a concentration of 0.4 g/l and they detected a high number of total non-halophilic, proteolytic and lipolytic non-halophilic bacteria in soak liquor samples. In the same study, the inhibition in bacterial growth was provided by doubling the concentration of the antimicrobial agent in soak liquor (36). Also, several antimicrobial agents were tested against various bacteria isolated from soak liquor samples in different concentrations (36, 37).

Although antimicrobial agents are applied in the soaking process, they seem to be not effective and bacterial population cannot be controlled. The ineffectiveness of antimicrobials may be due to the resistant bacteria since these bacteria can easily transfer their resistance genes via horizontal gene transfer. In this respect, alternative agents or strategies may be helpful. *B. toyonensis*, *B. mojavensis*, *B. subtilis*, *B. amyloliquefaciens*, *B. velezensis*, *B. cereus*, and *B. licheniformis* were isolated from soak liquor samples of different tanneries (22). In this study, the possible antibacterial effects of the acetone extracts of *P. sulcata* and *H. tubulosa* lichen species were evaluated against these isolates. It is well known that many biological activities (antimicrobial, antifungal etc.) of lichens have been known for many years. While many studies have reported that lichen substances are more effective against Gram positive bacteria, some lichen species have also been shown to

have antibacterial effects against Gram negative bacteria such as *Pseudomonas aeruginosa* and *Escherichia coli* (19, 38-42).

However, there are not many studies evaluating the efficacy of lichen extracts in the leather industry. Türkan et al. (2013) reported that acetone and chloroform extracts of *P. furfuracea* (L.) Zopf on raw skin and chrome-tanned leather samples against *Bacillus subtilis*, *B. cereus*, *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Enterococcus faecalis*, *Klebsiella pneumoniae*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Aspergillus niger*, *A. fumigatus*, *A. candidus*, *A. flavus*, *Penicillium jensenii*, *Geotrichum candidum* and *Candida albicans* (15). In the previous study, the antibacterial efficacies of the acetone extracts of *Hypogymnia physodes*, *Evernia divaricata*, *Pseudevernia furfuracea*, and *Usnea* sp. against *B. toyonensis*, *B. mojavensis*, *B. subtilis*, *B. amyloliquefaciens*, *B. velezensis*, *B. cereus*, and *B. licheniformis* at different concentrations were reported (22). Furthermore, the potential anti-biofilm properties of the acetone extracts of *Usnea* sp. were reported against biofilm-forming *B. subtilis*, *B. amyloliquefaciens*, and *B. velezensis* from soak liquor samples (43). In this meaning, the extracts and/or the constituents of other lichen species may also have potential effects against bacterial population in leather industry. There are many studies for several biological activities of *P. sulcata* and *H. tubulosa*. Altuner et al. (2011) examined antimicrobial activities of methanol extracts of *Letharia vulpine*, *P. furfuracea* and *Evernia divaricata* collected from Kastamonu province against *Salmonella enterica*, *E.coli*, *Shigella flexneri* and *B. megaterium*. They did not observe any activity of *H. tubulosa* on tested microorganisms (44). On the other hand, Cansaran-Duman et al. (2010) tested three species of *Hypogymnia* for their antibacterial effects on some Gram positive and Gram negative bacteria and they observed highest activity in *H. tubulosa* extracts. Furthermore, *B. subtilis* was found to be most susceptible against acetone extracts of *H. vittata*, *H. physodes* and *H. tubulosa* species (45). In this study, considerable antimicrobial efficacy was also detected for *H. tubulosa* against test isolates from soak liquor samples. Similarly, the antibacterial efficacy of acetone extracts of *H. physodes* was demonstrated in the previous study (22). Therefore, it can be suggested that the species belonging to *Hypogymnia* may have potential antibacterial effects against *Bacillus* species from soak liquor samples. There is no study evaluating the antibacterial properties of *P. sulcata* against the bacterial population in the soak liquor. To our knowledge, *P. sulcata* has been firstly tested against *B. toyonensis*, *B. mojavensis*, *B. subtilis*, *B. amyloliquefaciens*, *B. velezensis*, *B. cereus* and *B. licheniformis* isolated from soak liquor samples of different tanneries. However, there are studies

evaluating the antimicrobial effect of *P. sulcata* against several bacteria. Rankovic et al. (2007) reported the antimicrobial effect of acetone and methanol extracts of *P. sulcata* against several Gram positive and Gram negative bacteria except *S. aureus* (46). Moreover, Candan et al. (2007) showed antimicrobial activities of the acetone, chloroform, diethyl ether, and methanol extracts of *P. sulcata* collected from Eskişehir province against some Gram positive and Gram negative bacteria (47). On the contrary, *P. sulcata* was not successful against test isolates in this study.

While it was reported that both *H. tubulosa* and *P. sulcata* had antimicrobial activities against several bacterial species in several studies (39, 45-47), *H. tubulosa* was determined to have considerable antibacterial activity when compared to *P. sulcata* on tested isolates in this study. This result may be due to the differences in bacterial strains, applied extract concentrations and collection localities of lichen species. Considering these data, *H. tubulosa* extracts or their constituents may be utilized in the soaking process to control the bacterial population and also their potential defects on leather in further tanning processes. Since lichen extracts are natural and eco-friendly sources, they may be alternative antibacterial agents according to commonly used synthetic antimicrobial agents in the leather industry.

## V. CONCLUSIONS

The bacterial population in soak liquor samples is one of the major problems in the leather industry. These bacteria cannot be eliminated easily by the antimicrobial application. This may be due to the antimicrobial resistance properties of some bacteria due to the ability to transfer resistance genes. For this purpose, alternative agents or strategies have to be investigated for controlling the bacterial population in soak liquors. In this study, the acetone extracts of *H. tubulosa* was determined to have antibacterial activities against *B. toyonensis*, *B. mojavensis*, *B. subtilis*, *B. amyloliquefaciens*, *B. velezensis*, *B. cereus* and *B. licheniformis* obtained from different soak liquor samples at the concentration of 240 µg/ml at the 20<sup>th</sup> hour. On the other hand, the prominent antibacterial or inhibitory effect of *P. sulcata* extracts could not be detected on tested isolates. These data suggest that the acetone extracts of *H. tubulosa* may be utilized in the soaking process to control the bacterial population.

## ACKNOWLEDGEMENT

I express very profound gratitude to Professor Meral BİRBİR for her tremendous supports and continuous encouragement throughout my academic career. I am thankful to Assoc. Prof. Nüzhet Cenk SESAL for his great guidance and valuable comments in every aspect

of the study. I would like to thank Assoc. Prof. Gülşah Çobanoğlu ÖZYİĞİTOĞLU for the taxonomic identification of the tested lichen species. Also, I am grateful to Professor Filiz VARDAR for the use of a microscope during the experiments.

## REFERENCES

- [1] Dahl, S. (1956). Prevention of microbiological deterioration of leather. *Leather Chem. Ass.*, 51, 103-117.
- [2] Birbir, M. and Ilgaz, A. (1996). Isolation and identification of bacteria adversely affecting hide and leather quality. *Journal of the Society of Leather Technologists and Chemists*, 80, 147-153.
- [3] Birbir, M., Calli, B., Mertoglu, B., Elevi Bardavid, R., Oren, A., Ogmen, M.N. and Ogan, A. (2007). Extremely halophilic archaea from Tuz Lake, Turkey, and the adjacent Kaldirim and Kayacık Salterns. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 23, 309-316.
- [4] Bailey, D.G. (2003). The preservation of hides and skins. *The Journal of the American Leather Chemists Association*, 98, 308-319.
- [5] Kallenberger, E.W. (1984). Halophilic bacteria in brine curing. *The Journal of the American Leather Chemists Association*, 79, 104-114.
- [6] Bailey, D.G. and Birbir, M. (1996). The impact of halophilic organisms on the grain quality of brine cured hides. *The Journal American Leather Chemists Association*, 91 47-51.
- [7] Caglayan, P., Birbir, M., Sánchez-Porro, C., and Ventosa, A. (2018). Detection of industrially potential enzymes of moderately halophilic bacteria on salted goat skins. *Turkish Journal of Biochemistry*, 43(3), 312-322.
- [8] Haines, M.B. (1984). Quality rawstock. *The Journal of the American Leather Chemists Association*, 4, 164-173.
- [9] Birbir, M. and Bailey, D.G. (2000). Controlling the growth of extremely halophilic bacteria on brine cured cattle hides. *Journal of the Society of Leather Technologists and Chemists*, 84 (5), 201-204.
- [10] Bailey, D.G. and Birbir, M. (1993). A study of the extremely halophilic microorganisms found on commercially brine-cured cattle hides. *The Journal of the American Leather Chemists Association*, 88, 285-293.
- [11] Puvanakrishnan, R., Sivasubramanian, S., and Hemalatha, T. (2019). *Microbes and Enzymes: Basics and Applied*. MJM Publisher.
- [12] Vivian, G.W. (1969). The preservation of hides and skins against bacterial damage. *The Journal of the American Leather Chemists Association*, 64 (10) 489-500.
- [13] Weiss, E.F. and Thornton, R.L. (1984). Growth and control of microbiological activity during hide curing process, Buckman Laboratories Inc., 18.
- [14] Birbir, Y., Uğur, G., and Birbir, M. (2008). Inactivation of bacterial population in hide-soak liquors via direct electric current. *Journal of Electrostatics*, 66 (7-8), 355-360.
- [15] Türkan, M.F., Aslan, A., Yapici, A.N., Yapici, B.M., and Bilgi, S.T. (2013). Assessment of antimicrobial activity of natural leathers treated with *Pseudevernia furfuracea* (L.) Zopf extracts. *Tekstil ve Konfeksiyon*, 23 (2), 176-180.
- [16] Nash, III TH. (2008). *Lichen Biology*. Cambridge University Press.
- [17] Molnár, K. and Farkas E. (2010). Current results on biological activities of lichen secondary metabolites: a review. *Zeitschrift für Naturforschung C*, 65 (3-4), 157-173.
- [18] Paudel, B., Bhattarai, H. D., Lee, J. S., Hong, S. G., Shin, H. W., and Yim, J. H. (2008). Antibacterial potential of Antarctic lichens against human pathogenic Gram-positive bacteria. *Phytotherapy Research*, 22(9), 1269-1271.
- [19] Çobanoğlu, G., Sesal, C., Gökmen, B., and Çakar, S. (2010). Evaluation of the antimicrobial properties of some lichens. *South Western Journal of Horticulture*, 1(2), 153-158.
- [20] Ranković, B., Ranković, D., Kosanić, M., and Marić, D. (2010). Antioxidant and antimicrobial properties of the lichens *Anaptychia ciliaris*, *Nephroma parile*, *Ochrolechia tartarea* and *Parmelia centrifuga*. *Central European Journal of Biology*, 5(5), 649-655.
- [21] Sweidan, A., Chollet-Krugler, M., Sauvager, A., Van de Weghe, P., Chokr, A., Bonnaure-Mallet, M. and Bousarghin, L. (2017). Antibacterial activities of natural lichen compounds against *Streptococcus gordonii* and *Porphyromonas gingivalis*. *Fitoterapia*, 121, 164-169.
- [22] Berber, D. (2020). Antibacterial activities of lichen derived extracts against different *Bacillus* species from soak liquor samples. *Journal of the American Leather Chemists Association*, 115(03), 96-104.
- [23] Wirth, V., *Die Flechten Baden-Württembergs: Teil 1*, Stuttgart, Germany, Eugen Ulmer GmbH and Co. 1995.
- [24] Smith, C.W., Aptroot, A., Coppins, B.J., Fletcher, A., Gilbert, O.L., James, P.W. and Wolseley, P.A. *The Lichens of Great Britain and Ireland*. The British Lichen Society, London, UK. 2009.
- [25] Gökalsın, B., Berber, D., Özyiğitoğlu, G. Ç., Yeşilada, E., and Sesal, N.C.; Quorum Sensing Attenuation Properties of Ethnobotanically Valuable Lichens against *Pseudomonas aeruginosa*. *Plant Biosyst.* 1–13, 2019.
- [26] Birbir, M., Ogan, A., Calli, B. and Mertoğlu, B. (2004). Enzymatic characteristics of extremely halophilic archaeal community in Tuzkoy Salt Mine, Turkey. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 20, 613-621.
- [27] Birbir, M. (1997). Investigation of salted-cured France and Russian hides for halophilic bacteria. *Journal of Turkish Microbiological Society*, 27, 68-73.

- [28] Birbir, M., Kallenberger, W., Ilgaz, A. and Bailey, G. (1996). Halophilic bacteria isolated from brine cured cattle hides. *Journal of the Society of Leather Technologists and Chemists*, 80, 87-90.
- [29] Berber, D. and Birbir, M. (2010). Examination of bacterial populations in salt, salted hides, soaked hides and soak liquors. *The Journal of the American Leather Chemists Association*, 105 (10), 320-326.
- [30] Aslan, E., and Birbir, M. (2011). Examination of Gram positive bacteria on salt-pack cured hides. *The Journal of the American Leather Chemists Association*, 106 (12), 372-380.
- [31] Aslan, E. and Birbir, M. (2012). Examination of Gram-Negative bacteria on salt-pack cured hides. *The Journal of the American Leather Chemists Association*, 4 (107), 106-115.
- [32] Akpolat, C., Ventosa, A., Birbir, M., Sánchez-Porro, C. and Caglayan, P. (2015). Molecular identification of moderately halophilic bacteria and extremely halophilic archaea isolated from salted sheepskins containing red and yellow discolorations. *The Journal of the American Leather Chemists Association*, 110, 211-220.
- [33] Caglayan, P., Birbir, M., Sanchez-Porro, C. and Ventosa, A. (2017). Screening of industrially important enzymes produced by moderately halophilic bacteria isolated from salted sheepskins of diverse origin. *The Journal of the American Leather Chemists Association*, 112 (6), 207-216.
- [34] Ulusoy, K., and Birbir, M. (2015). Identification and metabolic activities of bacterial species belonging to the *Enterobacteriaceae* on salted cattle hides and sheep skins. *The Journal of the American Leather Chemists Association*, 110, 86-199.
- [35] Birbir, M., Yazici, E., Caglayan, P., Birbir, Y., and Goebel, R.A. (2019). Elimination of antibiotic resistant *Enterobacteriaceae* via combined application of direct electric current, alternating electric current and 2-thiocyanomethylthio benzothiazole. *Journal of the Society of Leather Technologists and Chemists*, 103(2), 85-90.
- [36] Berber, D., Birbir, M., and Hacıoglu, H. (2010). Efficacy assessment of bactericide containing didecyltrimethylammonium chloride on bacteria found in soak liquor at different exposure times. *The Journal of the American Leather Chemists' Association*, 105(11), 354-359.
- [37] Veyselova, C., Birbir, M., and Berber, D. (2013). Minimal bactericidal concentration for a quaternary ammonium compound used in soak liquors. *Journal of the Society of Leather Technologists and Chemists*, 4(97), 166-171.
- [38] Gulluce, M., Aslan, A., Sokmen, M., Sahin, F., Adiguzel, A., Agar, G., Sokmen, A. (2006). Screening the antioxidant and antimicrobial properties of the lichens *Parmelia saxatilis*, *Platismatia glauca*, *Ramalina pollinaria*, *Ramalina polymorpha* and *Umbilicaria nylanderiana*. *Phytomedicine* 13 (7), 515-521.
- [39] Rankovic, B., and Kosanic, M. (2012). Antimicrobial activities of different extracts of *Lecanora atra*, *Lecanora muralis*, *Parmelia saxatilis*, *Parmelia sulcata* and *Parmeliopsis ambigua*. *Pak. J. Bot.* 44:429-33.
- [40] Çobanoğlu, G., Sesal, C., Açıkgoz, B., and Karaltı, I. (2016). Evaluation of antimicrobial activity of the lichens *Physcia aipolia*, *Xanthoria parietina*, *Usnea florida*, *Usnea subfloridana* and *Melanohalea exasperata*. *Modern Phytomorphology*, 10, 21-26.
- [41] Mitrović T., Stamenković S., Cvetković V., Tošić S, Stanković M., Radojević I., Stefanović O., Čomić L, Dačić D., Ćurčić M., and Marković S. (2011). Antioxidant, Antimicrobial and antiproliferative activities of five lichen species. *International Journal of Molecular Sciences*, 12, 5428- 5448.
- [42] Kıran, F., Yıldız, A., and Osmanağaoğlu, Ö. (2013). Determination of antimicrobial properties of some lichen samples. *Türk Mikrobiyoloji Cemiyeti Dergisi*, 43 (3), 97-103. doi:10.5222/TMCD.2013.097
- [43] Berber, D., Türkmenoğlu, İ., Birbir, M., and Sesal, N.C.; Efficacy of *Usnea* sp. Extracts in Preventing Biofilm Formation by *Bacillus* Species Isolated from Soaking Liquor Samples. 2020, in press.
- [44] Altuner, E.M., Ceter, T., Demirkapı, D., Ozkay, K., Hayal, U., and Eser, G. (2011). Investigation on antimicrobial effects of some lichen species collected from Kastamonu region. *Communications Faculty of Sciences University of Ankara Series C: Biology*, 23 (1-2), 21-31.
- [45] Cansaran-Duman, D., Cetin, D., Simsek, H., and Coplu, N. (2010). Antimicrobial activities of the lichens *Hypogymnia vittata*, *Hypogymnia physodes* and *Hypogymnia tubulosa* and HPLC analysis of their usnic acid content. *Asian Journal of Chemistry*, 22 (8), 6125.
- [46] Rankovic, B., Mistic, M., and Sukdolak, S. (2007). Evaluation of antimicrobial activity of the lichens *Lasallia pustulata*, *Parmelia sulcata*, *Umbilicaria crustulosa*, and *Umbilicaria cylindrica*. *Микробиология*, 76 (6), 817-821.
- [47] Candan, M., Yılmaz, M., Tay, T., Erdem, M., and Türk, A.Ö. (2007). Antimicrobial activity of extracts of the lichen *Parmelia sulcata* and its salazinic acid constituent. *Zeitschrift für Naturforschung C*, 62 (7-8), 619-621.

## Kitosanın Özellikleri, Uygulama Alanları, Bitki Sistemlerine Etkileri

*Properties of Chitosan, Application Areas, Effects on Plant Systems*

Gamze KURTULUŞ<sup>1</sup> , Filiz VARDAR<sup>2</sup> 

<sup>1,2</sup> Marmara Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Biyoloji Bölümü, 34722, Göztepe, İstanbul

### Öz

Tarımda ürün eldesi sırasında meydana gelen ekonomik kayıpları azaltmak için uzun yıllardır kullanılan kimyasal yöntemler, insan sağlığı ve ekolojik dengeyi olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle son yıllarda çevreye zararsız iyileştirme yöntemleri ile ilgili araştırmalar artmıştır. Kimyasal ürünlere alternatif olarak tercih edilen doğal iyileştiricilerden birisi de kitosandır. Kitosan, çoğunlukla yengeç, ıstakoz, karides gibi kabuklu su canlılarının iskeletinde yaygın olarak bulunan kitinden deasetilasyon yöntemiyle elde edilmektedir. Kitosan antiviral, antibakteriyel ve antifungal özelliğe sahip olmasının yanında, bitkilerin savunma sistemini de teşvik ederek hastalıkların kontrolü ve yayılmalarının azaltılmasında da etkili bir ajandır. Bunun yanında bulunduğu ortamda (su, toprak vb.) metal iyonlarını şelatlaması ve bitkilerin toksik etkili metallerin alınımını engellemesi nedeniyle tarım alanında iyileştirmede de kullanılmaya başlanmıştır. Yapılan çok sayıda çalışmaya rağmen kitosanın bitkilerdeki etki mekanizması tam olarak aydınlatılamamıştır. Kitosanla ilgili detaylı çalışmaların artması, tarımsal alanlarda kitosan kullanımı ile ürünlerden yüksek verim alınabilmesi için yardımcı olacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Kitin; Kitosan; Biyopolimer; Tarım; Bitki

### Abstract

Chemical methods that have been used for many years to reduce the economic losses during agricultural production have an adverse effect on human health and ecological balance. Therefore, in recent years, researches about harmless environmental improvement methods have increased. One of the preferred natural conditioners as an alternative to chemical products is chitosan. Chitosan is obtained from the chitin deacetylation method, which is commonly found in the skeleton of shellfish such as crab, lobster, shrimp. Besides having antiviral, antibacterial and antifungal properties, chitosan is an effective agent in controlling and reducing the spread of diseases by promoting the defense system of plants. In addition to this, it has been started to be used in the agricultural field as it chelates metal ions in its environment (water, soil, etc.) and prevents the ingestion of toxic effective metals by the plants. Despite many studies, the mechanism of action of chitosan in plants has not been fully elucidated. The increase in detailed studies on chitosan will help to obtain high yields of products with the use of chitosan in agricultural fields.

**Keywords:** Chitin; Chitosan; Biopolymer; Agriculture; Plant

## I. GİRİŞ

Yeryüzünde selülozdan sonra en sık rastlanan polisakkarit kitindir. Kitinin en önemli türevlerinden biri olan kitosan ise kitinin alkali ortamda kısmen ya da tamamen deasetilasyonu (organik bir bileşikten asetil fonksiyonel grubunun çıkarılması) ile elde edilen polikationik özellikte bir biyopolimerdir [1,2]. Kitosanın enzimatik hidrolizinden ise kitosan oligosakkaritleri oluşmaktadır. Mantar, kerevit, karides ve yengeçlerin dış iskeleti gibi kitin içeren birçok doğal kaynaktan bol miktarda elde edilebilen kitosan, organizmalar için toksik özellik içermemesi, biyolojik olarak kolay parçalanması ve biyoyoumluk gibi özellikleri bakımından kitin dahil diğer biyopolimerlerden daha avantajlıdır [3,4]. Bu nedenle kitosan başta gıda, medikal, eczacılık, kozmetik, ziraat, atık su arıtması ve tekstil gibi birçok endüstriyel alanda kullanılan doğal, güvenli ve hammaddesi ucuz bir biyopolimerdir [5]. Kitosan antiviral, antibakteriyel ve antifungal özelliğe sahip olmasının yanında, bitkilerin savunma sistemini de teşvik ederek hastalıkların kontrolü ve yayılmalarının azaltılmasında da etkili bir ajandır. Bunun yanında bulunduğu ortamda (su, toprak vb.) metal iyonlarını şelatlaması ve bitkilerde toksik etkili metallerin alınımını engellemesi nedeniyle tarım alanında iyileştirmede de kullanılmaya başlanmıştır [6,7].

1980'li yıllardan itibaren tarımda biyofertilizer, biyopestisit, tohum ve meyveler için kaplama maddesi olarak kitosandan faydalanılmaktadır [4]. Küresel pazarda kitosan üretimi ve kullanımı özellikle Kuzey Amerika, Avrupa ve Asya-Pasifik, Güney Amerika, Orta Doğu ve Afrika'da daha yaygındır. Kitosan kullanımı dünya genelinde özellikle Çin, ABD, Avrupa ve Japonya'da yoğunlaşmıştır. 2015 yılında Çin ve Avrupa, sırasıyla

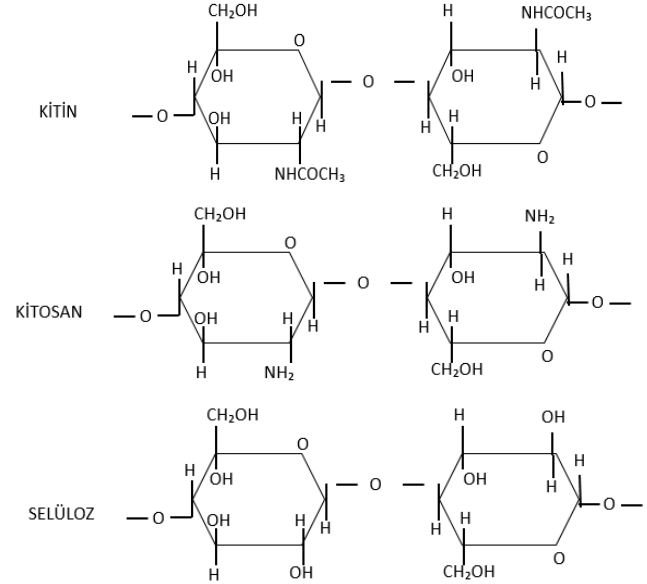
%43.32 ve %22.22'lik üretim pazar payı ile 5401 megaton ve 2770 megaton üretime ulaşmıştır. ABD ise 2015 yılında üretim pazar payı %17.63 olan bir diğer önemli kitosan üretim bölgesidir. Son araştırmalara göre kitosanın dünya pazarının önümüzdeki beş yıl içinde yaklaşık % 3.3'lük oranında yıllık büyüme oranı beklenmektedir. Yapılan yeni çalışmalara göre 2019 yılında 330 milyon ABD doları olan kitosan pazarlama payının, 2024'te 400 milyon ABD dolarına ulaşması beklenmektedir [8]. Türkiye'de ise kitosanın değerlendirilmesiyle ilişkin bir veri henüz bulunmamaktadır. TÜİK 2018 verilerine göre yaklaşık 4500 ton kerevit, karides, yengeç ve istakoz avlanırken bu kabuklu su ürünlerinin %20'si yenilmekte ve %80'i atık olmaktadır. Yaklaşık 3500 tonluk su ürünleri atığı uygun bir şekilde değerlendirilerek ortadan kaldırılabilir. Bu doğrultuda bu atıkların kitin veya kitosan gibi katma değeri yüksek ve sanayinin birçok dalında kullanılabilir bir ürüne dönüştürülmesi ülke ekonomisine katkı sağlayabilir [9].

Özellikle, antimikrobiyal etkileri sebebiyle çeşitli patojenlere karşı kullanılan kitosan uygulaması bitki hücrelerinde lignin birikimi, kallos oluşumu, hücre içi iyon miktarı değişimi, sitoplazmada asidikleşme, zar depolarizasyonu, protein fosforilasyonu, kitinaz ve glukanaaz aktivasyonu, fitoaleksinlerin biyosentezi, reaktif oksijen türlerinin üretimi, jasmonik asit sentezi ve savunma ile ilgili genlerin ekspresyonu gibi değişikliklere neden olarak bitki savunma sistemini teşvik eder. Kitosanın bitki savunmasını güçlendirmeye yardımcı olması, patojenlere ve çeşitli stres faktörlerine karşı etkili olması ve ürünlerde verimin artırılmasına yardımcı olması gibi özellikleri nedeniyle son yıllarda bu konular üzerinde araştırmalar artmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda, birçok alanda yaygın olarak kullanılan kitosan ve kitooligosakkaritlerin aktivitelerinin polimerizasyon derecesi, deasetilasyon derecesi, pH, sıcaklık, konsantrasyon, uygulama yöntemi (direkt toprağa karıştırma, yapraktan uygulama, tek başına veya başka ajanlarla birlikte kullanma), viskozite ve saflık oranı gibi pek çok faktörden etkilendikleri gösterilmiştir [7,10].

## II. KİTOSANIN KİMYASAL YAPISI VE ÖZELLİKLERİ

Kitin önemli bir polisakkarit olup, temel olarak poli- $[\beta-(1,4)\text{-2-asetamid-2-deoksi-}\beta\text{-D-glukopiranoz}]$  kimyasal yapısına sahiptir ve az miktarda 2-amino-2-deoksi- $\beta\text{-glukopiranoz}$  monomerlerini de içermektedir [11]. Kitosanın temel yapısı ise, poli- $[\beta-(1,4)\text{-2-amino-2-deoksi-}\beta\text{-D-glukopiranoz}]$  şeklindedir (Şekil 1). Kitin ve kitosan kimyasal yapı açısından selüloza oldukça benzemektedirler. Selülozun ikinci karbon atomunda hidroksil (-OH) grubu bağlı iken, kitinde

asetamid (-NHCOCH<sub>3</sub>), kitosanda ise amin (-NH<sub>2</sub>) grubu yer almaktadır [12].



Şekil 1. Kitin, kitosan ve selülozun kimyasal yapıları.

Kitinden kitosan elde edilmesi genel olarak dört aşamadan oluşmaktadır: (1) deproteinizasyon, (2) demineralizasyon, (3) dekolorizasyon (renksizleştirme) ve (4) deasetilasyon [13]. İlk üç basamakta ham kitin izole edilmekte ve son basamak olan deasetilasyonda ise kitosan elde edilmektedir. Kitosan eldesi için sıklıkla kullanılan kabuklu deniz hayvanları öncelikle birkaç kez yıkanıp sterilize edilmeli, kurutulmalı ve öğütülerek toz haline getirilmelidir. Kitosan eldesi için sıklıkla kullanılan kabuklu deniz hayvanları %30-40 oranında protein de bulundurmaktadır. Özellikle biyomedikal ve gıda alanındaki kullanımlarda kitosanın içerdiği proteinin alerjik reaksiyonlara sebep olmasından dolayı kitinin yapısındaki proteinlerin kovalent bağları, deproteinizasyon işlemi ile koparılmaktadır. Bu işlem sırasında en uygun madde olan sodyum hidroksit (NaOH) kullanılmaktadır. NaOH kitinin deasetillenmesine ve protein içeriğinin %1 oranına kadar düşmesine yardımcı olur. Kalan proteinin uzaklaştırılması için pepsin, tripsin gibi proteolitik enzimler de ayrıca kullanılmaktadır. Demineralizasyon aşamasında ise yapıda yer alan CaCO<sub>3</sub> gibi mineralleri çıkarmak için HCl gibi asitler kullanılır. Kitin bu aşamalardan sonra astaksantin pigmentinin varlığından dolayı açık pembe renktedir. Renksizleştirme aşamasında aseton, NaOCl, KMnO<sub>4</sub> gibi çeşitli organik çözücüler kullanılır. Bu işlemden sonra gerçekleştirilen deasetilasyon işlemi, kitinin yapısındaki aminoasetil gruplarından asetil grubunun uzaklaştırılması ve geriye yalnızca amin grubu bırakılmasıyla gerçekleştirilir. Deasetilasyon derecesi ise glukozaminin, N-asetil glukozamin ünitelerine oranıdır. Kitinin NaOH ile deasetillenmesi ve hidrolize edilmesi sonucunda, moleküler ağırlıkta



kayıplar olur. Bu işlemler sonucunda elde edilen ürün kitosandır. Elde edilen biyopolimer son olarak %2'lik asetik asit çözeltisinde çözüldükten sonra filtrasyon ile saflaştırılır, çöktürme ve kurutma aşamalarından sonra depolanır [14].

Kitinin hidrofobik özelliği ve birçok organik çözücüde çözünememesi canlı sistemlerdeki kullanımını sınırlar [11]. Kitosan pH 6.3'te primer amin grupları taşıması sebebiyle alkali yapıda sayılmaktadır. Bu nedenle pH 6.0'dan düşük olan asetik asit, formik asit ve laktik asit gibi seyreltik asitlerde çözünebilmektedir. Kitosan, formik asitin sulu çözeltilerinde kolaylıkla çözüldüğü halde en yaygın kullanılan çözücü, pH 4-5 aralığındaki %1-2'lik asetik asittir [15]. Kitosan amin ve hidroksil grupları içermesi sebebiyle, kitine göre daha kolay çözünen, fiziksel ve kimyasal etkileşimlerde daha aktif bir polimerdir. Düşük pH değerlerinde içerdiği serbest amin grupları sayesinde, kitosan kuarterner amonyum tuzlarına dönüşebilmektedir [16].

Kitosan, düşük pH'larda polikasyonik özelliktedir (pK= 6,2- 6,8). Kimyasal yapısındaki NH<sub>2</sub> grubu asidik ortamda pozitif yüklü -NH<sub>3</sub><sup>+</sup> şeklinde bulunmakta ve böylece negatif yüklü iyonlar ile etkileşebilmektedir. Örneğin, mekanik olarak parçalanmış kitosan nanofibrilleri bakır (Cu), kurşun (Pb), nikel (Ni), çinko (Zn), krom (Cr), alüminyum (Al) ve kadmiyum (Cd) gibi metal iyonlarını şelatlama maddeleri olarak kullanılmışlardır [17, 18]. Kitosan, bu şelatlama özelliği sayesinde toksik ağır metallerin ayrıştırılmasında kullanılabilir. Bunun yanında abiyotik stres faktörlerinden olan su stresi ve ağır metallerden kadmiyum stresinin iyileştirilmesi için de farklı konsantrasyonlarda kitosanın etkili olduğu belirlenmiştir [19, 20, 21].

Kitosan bitkilerde tohuma, yaprağa, meyveye uygulanarak etki ettiği gibi bitkinin yetiştirildiği ortama, toprağa ve suya uygulandığında da etki etmektedir. Örneğin; marulda yaprak biyokütle miktarını artırmak [22], Daikon turpunda sürgün ve kök gelişimini artırmak [23], çarkıfelek meyvesinde çiçeklenme süresini hızlandırmak ve çiçek sayısını artırmak [24], *Eustoma grandiflorum*'un büyümesini ve çiçeklenme zamanını hızlandırmak [25] için de kullanılmıştır. Kitosan ve kitooligosakkaritler metal şelatlama özelliklerine sahip olmalarından dolayı fitoremediasyon (bitkisel arıtma) ve biyofortifikasyon (yenilebilir bitkilerin besin değerlerinin artırılması) işlemlerinde de kullanılabilir [6]. Su kültürü ortamına eklenen kitooligosakkaritler fasulye kök uzunluğunda, mineral birikiminde ve sürgün biyokütlesinde değişiklikler meydana getirmiştir [26].

Kitosanın tüm bu farklı kimyasal ve fiziksel özellikleri, aktiviteleri ve etki mekanizmaları ile yakın ilişkilidir. Fiziksel özellik olarak; toz halindeki kitosan oldukça yumuşaktır ve rengi beyaz veya açık sarı

tonlarındadır. Kitosan diğer özelliklerinin yanında en çok moleküler ağırlığı ile karakterize edilen bir biyopolimerdir. Elde edildiği kaynak materyaline ve hazırlama metoduna bağlı olarak (deasetilasyon koşulları, sıcaklık, zaman ve NaOH konsantrasyonu vb.), ticari kitosanın moleküler ağırlığı 10-100.000 kDa arasında değişir [27]. Kitosanın moleküler ağırlığı yoğunluk, su tutma kapasitesi, biyolojik bozunabilirlik, termal stabilitesi gibi bazı fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerini etkilemektedir [28]. Kitosanın saflık derecesi biyolojik özelliklerini etkilerken aynı zamanda çözünürlük ve stabilitesini de önemli derecede etkileyen bir faktördür. Çözünürlükleri de diğer fiziksel özelliklerine, çözücünün türüne, sıcaklık ve pH'ya bağlı olarak etkilenmektedir. Kitosanın kitinden elde edilmesi aşamasında yüksek sıcaklıktan kaçınılmalıdır, çünkü sıcaklık, polimerin fizikokimyasal yapısını bozabilmektedir [29]. Kitosan elde edildikten sonra da oda sıcaklığında uzun süre muhafaza edilmeyip +4°C'de saklanmalıdır. Bunların yanında başlangıçtaki ve saklama koşullarındaki nem seviyesi, kitosanın yapısında bulunan reaktif grupları kolayca kimyasal modifikasyona uğratıp fiziksel özelliklerini değiştirebilmektedir.

### III. KITOSANIN BİTKİLERDE BİYOTİK VE ABİYOTİK STRESE KARŞI KULLANIMI

Kitosan diğer polimerlerle karşılaştırıldığında biyoyoumluluk, biyobozunurluk ve toksik olmayan özellikleri sebebiyle sağlık, gıda, endüstri ve tarım gibi birçok alanda sıklıkla tercih edilmektedir [30]. Kitosanın tarım alanında kullanımı diğer endüstriyel alanlara oranla yaklaşık %12'dir ve bu oranın hızla arttığı bilinmektedir [31].

Son zamanlarda ziraatsal faaliyetlerdeki uygulamaları yaygınlaşan kitosan, antiviral, antibakteriyel ve antifungal özelliklere sahip olduğundan hastalıkları kontrol altına almak veya yayılmalarını azaltmak, besin maddelerini ve mineralleri şelatlamak, patojenlerin yayılmasını önlemek veya bitki doğal savunmalarını geliştirmek için sıklıkla kullanılmaktadır. Biyotik strese karşı bitkiyi koruma amaçlı kullanımı iki biçimde olmaktadır: (1) Ürünü kaplayarak patojenlerden korumak ya da (2) Muhtemel enfeksiyon öncesi bitkilere uygulayarak dayanıklılık mekanizmasını harekete geçirmek [32]. Bitkide hastalıklara karşı direnç artıran çok önemli bir polisakkarit olarak görülen kitosanın domates, şeftali, kivi, armut gibi meyvelerde hasat sonrası patojen sebepli bozulmaları azalttığı gösterilmiştir [33]. *Botrytis cinerea* ve *Rhizopus stolonifer* bulaştırılmış çilek meyvelerinin 10 µg/ml ve 15 µg/ml kitosan solüsyonuna daldırılarak kaplanması 14 gün sonra depolama sırasında meyvelerde çürümenin önemli derecede azaldığı rapor edilmiştir [34]. Ayrıca antibiyotik içeren yenilebilir kitosan filmlerinin,

yiyeceklerde bozulmaya yol açabilen birçok bakteriyel ve fungal etmeni engelleyebilir özellikle olduğu belirlenmiştir [35]. Bağlarda meyve tutumundan itibaren 3 kez uygulanan kitosanın, depolanmış üzümelerde *Botrytis* sp. enfeksiyonlarını azalttığı ve kaliteyi yükselttiği belirlenmiştir [36]. Üzümlere hasat öncesi 5 gün üst üste püskürtülen %1 oranındaki kitosanın, hasat sonrası inoküle edilen *B. cinerea*'nin enfeksiyonlarını da önemli derece de azalttığı görülmüştür [37]. Kirazlarda depo çürüklüğüne neden olan *Molinilia laxa*, *B. cinerea*, *R. stolonifer*, *Alternaria* sp. ve *Penicillium* sp.'nin gelişimini önlemek amacıyla hasattan üç gün önce ve hasat sonrası uygulanan kitosan, meyveleri +20 ±1° C'de 10 gün ve +0.5±1° C'de 14 gün boyunca depoda korumuştur [38].

Kitosanın bitkilerde patojenlere dayanıklılık ile ilişkili genleri aktive ettiği düşünülmektedir [39]. Kitosanın oligomerlerinin değişik moleküler ağırlıklara ve asetilasyon derecelerine sahip olmaları, bitkiye uygulandıklarında gerçekleşen fitoaleksinlerin sentez ve birikiminin farklı düzeylerde olmasını etkilemektedir. En yüksek fitoaleksin birikimine 48 saat içinde molekül ağırlığı 1500 kDa olan ve %20 asetilasyon derecesindeki kitosanın yol açtığı rapor edilmiştir. Ancak yüksek molekül ağırlığındaki oligomerlerin daha düşük etkili olduğu belirlenmiştir. Bunun yanında düşük yoğunluktaki bakır sülfatla birlikte uygulanmalarının etkilerini artırdığı da saptanmıştır [40]. Buna karşın fasulyelerde ve bezelyelerde *Fusarium solani* f. sp. phaseoli ile *F. solani* f. sp. pisi'ye karşı ise yüksek molekül ağırlığındaki kitosanın daha etkili olduğu ve bezelyelerde fitoaleksin üretiminin başlatılmasındaki etkisiyle hastalık direncinde merkezi bir rol oynadığı bildirilmektedir [41]. Yer fıstığında pas hastalığına ve portakallarda *Penicillium digitatum*'a karşı kitosanın antifungal özellikteki hidrolazları artırarak dayanıklılık sağlamakta olduğu ortaya çıkarılmıştır [42]. Tütün yapraklarına uygulanan kitosan antioksidan enzim aktivitesinde artışlara neden olmuştur [35]. Bağlara uygulanan kitosan ise depolanmış üzümelerde endokitinaz aktivitesini artırmış, ancak reaktif oksijen türlerinden biri olan hidrojen peroksit içeriğini azaltmıştır [36].

Kitosan, doğal veya değiştirilmiş yapısına, polimerizasyon derecesine, konakçıya, substratların kimyasal ve/veya besin kompozisyonuna ve çevresel koşullara bağlı olarak çeşitli antimikrobiyal aktiviteler sergilemektedir [10]. Yapılan çalışmalara göre, kitosanın moleküler ağırlığı arttıkça antimikrobiyal aktivitesinin de arttığı ve bakterilere oranla mantar ve algelere karşı daha hızlı antimikrobiyal aktivite gösterdiği görülmüştür [43]. Kitosanın fitoaleksinler [44], kaloz [45], lignin [46], patojenle ilişkili proteinler (PR) ve proteinaz inhibitörleri [10] gibi

çeşitli antimikrobiyal bileşiklerin biyosentezini indüklediği de bilinmektedir.

Birçok araştırmacı, kitosan ve kitosan türevlerinin bitkinin; bakterilere [47, 48], mantarlara [49] ve nematodlara [50, 51] karşı savunmasını artırmak için kullanılabileceğini rapor etmiştir. Bitkilerde kitosanın antipatojen olarak kullanıldığı ilk çalışmada mantarlardaki farklı hücre duvarı bileşimleri üzerindeki fungisidal etkileri bildirilmiştir [52].

Kitosanın bitkide virüslerin ve viroidlerin sistemik yayılımlarını da inhibe ettiği ve konakçıda enfeksiyona karşı aşırı duyarlı yanıt (hypersensitive response) yol açtığı görülmüştür [53, 54]. Örneğin, fasulye bitkisinde kitosan, fasulye adi mozaik nekroz virüsüne karşı direnç oluşturmaya yardımcı olur [43]. Araştırmacılar viral enfeksiyonların önlenmesinin kitosanın moleküler ağırlığına göre değişkenlik gösterdiğini belirlemişlerdir [55].

Kitosan geniş bir antimikrobiyal aktivite spektrumuna sahip olmasına rağmen, farklı mantarlara, Gram pozitif ve Gram negatif bakterilere karşı farklı inhibisyon verimliliği sergilemektedir [56]. Mevcut kanıtlara dayanarak, bakteriler genel olarak mantarlara göre kitosanın antimikrobiyal etkisine karşı daha az duyarlıdır.

Kitosanın çok çeşitli bakterilerin büyümesini engelleyici özelliği vardır [57]. Türlerle bağlı olarak kitosanın büyüme önleyici konsantrasyonları değişiklik göstermektedir. Antibakteriyel aktivite, farklı hücre yüzeyi özelliklerinden dolayı Gram pozitif ve Gram negatif bakteriler arasında değişen karmaşık bir süreçtir. Birçok çalışmada, kitosanın Gram negatif bakterilere Gram pozitif bakterilere oranla daha kuvvetli antibakteriyel aktivite gösterdiği belirlenmiştir [13, 58].

Özellikle asidik pH'da N, N, N-trimetilkitosan, N-propil-N, N-dimetilkitosan ve N-furfuril-N, N-dimetilkitosan gibi kitosanın kuaterner amonyum tuzlarının *Escherichia coli*'nin büyümesini ve gelişimini inhibe ettiği görülmüştür [59]. Benzer şekilde, kitin ve kitosanın birkaç türevinin, *E.coli*, *Staphylococcus aureus* ve bazı *Bacillus* türlerinin gelişimlerini engellediği gösterilmiştir [60].

Kitosanın çoğu mantar ve oomycetes türüne karşı antifungal aktivite gösterdiği saptanmıştır [44, 57]. Kitosanın antifungal aktivitesi düşük pH değerlerinde daha fazladır [61]. Kitosan antifungal etkisini sporülasyonu ve spor çimlenmesini bastırarak gösterir [62]. Örneğin; kitosan armutta *Alternaria kikuchiana* ve *Phylospora piricola*'nın çimlenmesini ve büyümesini tamamen engeller [63]. Benzer şekilde pirinçte ise bulaşıcı bir patojen olan *Rhizoctonia solani*'ye karşı etkin antifungal aktivite gösterir [17].

Mısır örtü hastalığına neden olan dimorfik mantar *Ustilago maydis*'in hücre gelişimi kitosan ve glikol kitosan tarafından inhibe edilmiştir [64]. Bunun yanında kitosan uygulaması, patates ve domatesin mantar patojeni olan *Fusarium eumartii* sporlarında hücre ölümüne yol açmıştır [65]. Kitosan uygulamasının, *Penicillium* spp. kaynaklı küf hastalıklarından limon (*Citrus limon*) meyvesini koruduğu da belirlenmiştir [7].

Bitkilerde biyotik streslere karşı kullanılan kitosan, bunun yanında bitki büyüme düzenleyicisi ve abiyotik streslere karşı bitkiyi korumak amacıyla da kullanılmaktadır. Bitki hücre veya doku kültürlerinde hızlı bir şekilde üretimin sağlanmasında, verimin artırılmasında ve sekonder metabolitlerin üretilmesinde abiyotik elisitör (uyarıcı) olarak kullanılmaktadır [66]. Örneğin, *Linum usitatissimum* L.(keten) hücre kültürlerinde kullanılan kitosan (10mg/L) farmakolojik olarak önemli bir polifenol olan lignan biyosentezini düzenleyerek üretimini artırmıştır [67]. Yapılan bir diğer çalışmaya göre ise *Solanum tuberosum* L. (patates) bitkisinde kitosanın yapraktan uygulanmasının büyümeye ve kuraklık stresine karşı olan etkileri analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, sürgün yüksekliğinde ve nodların sayısında gelişme, bunun yanında klorofil, karotenoidler, prolin ve total şeker miktarlarında önemli ölçüde artış gözlenmiştir. Ayrıca kitosan, kuraklık stresine karşı antioksidan ve savunma enzimlerini indükleyerek katalaz, peroksidaz, superoksit dismutaz enzimlerinde artışı sağlamıştır [68]. *Triticum aestivum* L. (buğday) ve *Zea maize* L. (mısır) bitkilerinde tuzluluk stresine karşı, tohumların 3 saat kitosan çözeltisi ile muamele edildikten sonra yetiştirilmeleri, antioksidan enzim aktivitesini ve prolin içeriğini artırarak MDA (Malondialdehit) birikimini azaltmıştır. Sonuç olarak tuzluluk stresi altındaki bitkilerin büyüme performanslarını artırarak strese karşı iyileştirici etki göstermiştir [69].

### 3.1. Kitosanın Tohum Kaplama Maddesi Olarak Uygulanması

Tohumların kitosan ile kaplanması sırasında dikkat edilmesi gereken birçok faktör vardır, ancak kaplama solüsyonlarının konsantrasyonları ile kaplama sırasındaki zaman ve sıcaklık en önemlileri arasındadır [70]. Buğday tohumlarında yapılan çalışmaya göre, kitosan ile kaplanan tohumlarda bazı patojenlerin oluşturduğu hastalıklara karşı direncin arttığı ve tohumların kalitesinde ve/veya çimlenme yeteneklerinde gelişme olduğu bildirilmiştir [71]. Kitosan ile nemlendirilmiş yer fıstığı tohumlarında ise çimlenme oranında, ATP sentezinde, lipaz aktivitesinde, gibberellik asit ve indol asetik asit seviyelerinde artış olduğu gösterilmiştir [72]. Kitosan ile kaplanmış pirinç tohumlarıyla yapılmış olan çalışmada kitosan etkisi ile çimlenmelerinde ve stres koşullarına karşı tolerans geliştirmelerinde artış olduğu gösterilmiştir [73]. Havuçta ise tohum

kaplamasının *Sclerotinia sclerotiorum*'un sebep olduğu beyaz çürüklük hastalığının gelişimini engellemeye yardımcı olduğu rapor edilmiştir [74]. Kitosan solüsyonları ile kaplanan mısır tohumlarıyla yapılan çalışmada, kitosanın mısır tohumlarında çimlenme hızını, sürgün ve kök gelişimini artırmasının yanında membran bütünlüğünü ve antioksidan enzim aktivitelerini de artırarak soğuğa tolerans mekanizmasını hızlandırdığı ortaya koyulmuştur [75].

### 3.2. Kitosanın Yaprak İyileştirme Ajanı Olarak Uygulanması

Kitosanın iyileştirme ajanı olarak yapraklara uygulanmasının bitkisel sistemlerde olumlu sonuçlara yol açtığı birçok çalışma ile gösterilmiştir. Örneğin, pentamer kitosanın soya fasulyesi ve mısır yapraklarına uygulanmasından bir gün sonra net fotosentez oranında değişiklikler saptanmıştır [76]. Kitosanın fasulye bitkisi yapraklarına spreyle uygulanması ile transpirasyonun azaldığı belirlenmiştir [77]. Bu durumun kitosan uygulaması sonucunda yapraklardaki absisik asit (ABA) içeriğindeki artış ile ilişkili olduğu ortaya konulmuştur. ABA içeriğinin artması sonucu stomalarda kapanma meydana geldiği ve su buharı giriş çıkışının engellendiği, dolayısıyla transpirasyon oranında bir azalma olduğu ortaya çıkarılmıştır.

Kitosan ayrıca virüsleri, bakterileri, mantarları ve zararlıları içeren birçok hastalığın büyümesini, yayılımını ve gelişimini kontrol etmek amacıyla da yaygın olarak yapraktan uygulama şeklinde kullanılmaktadır [78]. Örneğin, arpa yapraklarına spreyle uygulanan kitosan ile patojen *Blumeria graminis f. sp. hordei* tarafından sistemik olarak meydana gelen enfeksiyon indirgenmiştir [53]. Kitosanın yaprağa uygulanmasının, fasulyede su stresi belirtilerini azaltmada, büyüme ve verim oranını artırmada olumlu etkileri olduğundan umut verici bir tarımsal strateji olabileceği öne sürülmektedir [19].

### 3.3. Kitosanın Toprak İyileştirici Ajan Olarak Uygulanması

Kitosan toprağa uygulandığında topraktaki *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Actinomyces*, *Mycorrhiza* ve *Rhizobacteria* gibi faydalı mikroorganizmaların aktivitesini harekete geçirerek, rizosferdeki zararlı bitki patojenlerine karşı mikrobiyal dengeyi değiştirmektedir. Kitosan ayrıca toprak kaynaklı patojenlere karşı bitkide savunma yanıtlarını artırmaktadır [79].

Toprak iyileştiricisi olarak kullanılan kitosanın birçok bitki türünde *Fusarium* türleri tarafından oluşturulan solgunlukları kontrol altına aldığı gösterilmiştir [78]. Tarlada yetiştirilen mısır ve yer fıstığındaki *Aspergillus flavus* da toprağa uygulanan kitosan ile tamamen inhibe edilmiştir [34]. Kitosanın toprağa uygulanması bitkinin patojenlere tolerans geliştirmesinde olumlu etkilere sebep olurken,

vejetatif büyümeyi de olumlu etkilediğine dair sonuçlar elde edilmiştir. Araştırmacılar *Eustoma grandiflorum*'da bitki büyümesi ve çiçek kalitesine kitosan etkilerini araştırmak için toprağa kitosan uygulamışlardır. Elde edilen sonuçlara göre, kitosan uygulaması çiçeklenmeyi hızlandırmış, çiçek sayısı, yaprak uzunluğu, yaprak genişliği, sürgün boyunda da artışa sebep olmuştur [25]. Kitosanın toprağa ilavesi, *Capsicum annuum*'da gövde uzunluğu, kanopi çapı (bitkinin üzerine tam tepeden ışık vurduğunda bitkinin gölgesinin oluşturduğu alanın birbirine en uzak olan uçları arasındaki uzaklık) ve yaprak alanında artışa sebep olmuştur [80].

#### IV. BİTKİ HASTALIKLARININ AZALTILMASINDA KİTOSANIN ETKİ MEKANİZMALARI VE BİTKİLERİN VERDİĞİ FİZYOLOJİK YANITLAR

Kitosanın, konsantrasyon, bitkinin türü ve gelişim aşamasına bağlı olarak, sayısız biyokimyasal ve fizyolojik tepkiyi indükleyen doğal bir biyopolimer olduğu bilinmektedir. Bunun yanında hastalıkları kontrol altına almak veya yayılmalarını azaltmak, besin maddelerini ve zararlı iyonları şelatlamak, patojenlerin farklı dokulara erişmesini önlemek veya bitki doğal savunmalarını geliştirmek için sıklıkla tarımda kullanılmaktadır. Bitki savunmasını arttırmak için kullanıldığında, kitosan hem monokotillerde hem dikotillerde konakçı savunma tepkilerini uyandırır. Temelde bu yanıtlar; ligninleşme [46], iyon değişimi, sitoplazmik asidifikasyon, zar depolarizasyonu, protein fosforilasyonu [81], fitoaleksin biyosentezi [45], reaktif oksijen türlerinin üretilmesi [82], jasmonik asidin biyosentezi [83], özgül erken yanıt veren savunma ile ilişkili genlerin ekspresyonunu [84] içerir.

Kitosanın bitki hastalıklarını azaltmasındaki etki mekanizmasının basamakları tam olarak anlaşılammış olmasına rağmen, doğrudan toksisite veya patojenlerin besin maddeleri ve minerallerin şelatlanması yoluyla olabileceğini gösteren kanıtlar vardır. Bunun yanında kitosanın bitki dokularına uygulanması, patojenlerin penetrasyon bölgelerinde fiziksel bariyerler oluşturmasına sebep olarak diğer sağlıklı bitkisel dokulara yayılmasını önleyebilmektedir [10].

##### 4.1. Kitosan ile Besinlerin ve Minerallerin Şelatlanması

Kitosan bitki hastalıklarını kontrol altına almak ve yayılmalarını engellemek, patojenlerin erişmesini önlemek ve bitki savunmasını geliştirmek dışında besin ve mineralleri şelatlamak (metalleri bağlama) amacıyla da kullanılmaktadır. Daha çok tatlı ve tuzlu su arıtma sürecinde metal iyonlarının, pestisitlerin,

fenollerin tutulmasında kullanılan kitosan Fe, Cu gibi besin maddelerini ve mineralleri şelatlayarak patojenlerin bunlara erişimini engelleyebilir ve patojen kaynaklı bitki hastalıklarını önleyebilir [10]. Aynı zamanda bu polisakkaritlerin konakçı dokularda zarara yol açan mitotoksinlere bağlanarak zararı azalttıkları bildirilmiştir [85]. İçecek endüstrisinde kullanılan kitosanın şelatlama özelliği ise antimikrobiyal etkisi ile mantar sebepli bozulmayı azaltır. Yapılan bir çalışmaya göre kitosan ile şelatlanmış bakır, bitkinin fazla miktarda bakır almasını ve toprak kirlenmesini önleyerek bitki hastalıklarının tedavisinde başarılı bir şekilde kullanılmıştır [86].

Kitosanın diğer doğal polimerler ile karşılaştırıldığında daha iyi bir şelatlayıcı olduğu belirtilmiştir [87]. Bu sebeple farklı endüstriyel alanlarda metal iyonlarını uzaklaştırmada ve/veya geri kazanmada yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek deasetilasyon derecesine sahip kitosan türevlerinin  $Cu^{+2}$  için yüksek şelatlama kapasitesine sahip olduğu gösterilmiştir. Buna ek olarak suda çözünebilir kitosan, asitte çözünebilir kitosandan daha yüksek şelatlama kapasitesi göstermiştir. Araştırmacılar bunun sakkaritlerden ekstra fonksiyonel grubun (örn; amino grup) eklenmesiyle ilgili olabileceğini belirtmişlerdir [88]. Fe ve Zn, dünya nüfusunun %30'undan fazlasını etkileyen, beslenmeyle ilişkili en önemli mineral elementlerden ikisidir ve dolayısıyla bu iki elementin birikimi canlılar için önemlidir [89]. Kitosan ve türevlerinin,  $Cu^{+2}$ 'den sonra en çok  $Fe^{+2}$ 'i şelatladığı ve bunun yanında  $Zn^{+2}$  için şelatlama kapasitesinin daha zor olduğu anlaşılmıştır [90]. Pozitif yüklü kitosan moleküllerinin negatif yüke sahip hücre membranına bağlanarak yapısını bozduğu ve hücrenin içeriğinin dışarıya sızmasına neden olarak antimikrobiyal aktivite sergilediği belirtilmiştir. Ayrıca hem temel besin elementleri ile hem de iz elementlerle şelat oluşturup bunların hücre içine taşınmasını engelleyerek mikrobiyal gelişimi önlediği bildirilmiştir [91, 92].

##### 4.2. Kitosan ve Hücre İçi Sinyal İletimi

Bitkilerde kitosan tedavisinin abiyotik ve biyotik streslere karşı savunma yanıtlarını artırarak sinyal yollarındaki birkaç geni düzenlediği belirtilmiştir. Örneğin, kitosan uygulaması bitkilerde birkaç geni aktive ederek proteinlerin ve fenolik bileşiklerin üretimini artırmış ve patojenlere karşı toleransı geliştirmiştir [93]. Ayrıca süs bitkilerinin çiçeklenme yeteneklerini artırmada gen yolu düzenlemesinde önemli rol oynadığı gösterilmiştir [94]. Buna ek olarak kitosanın PR (Pathogenesis Related) genlerini indüklediği belirtilmiştir [95].

Kitosan molekülünün belirli hücre reseptörleri tarafından tanınmasından sonra, fizyolojik tepkilerin uyarılması için ikincil habercilerin (sekonder

metabolitler) sinyal iletilmesinde rol oynaması gerekmektedir. Kitosan aracılı sinyalizasyon yolunda hidrojen peroksit ( $H_2O_2$ ) gibi reaktif oksijen türleri (ROT),  $Ca^{+2}$ , nitrik oksit (NO) ve fitohormonlar gibi moleküller rol almaktadır [96,97].

Bitki dokularında patojen kaynaklı enfeksiyona karşı oluşan aşırı duyarlı yanıt sırasında savunma amacıyla ROT üretilmektedir. Yapılan bir çalışmaya göre, bitkide patojen saldırısı boyunca bir bitki hormonu olan salisilik asit (SA) sentezlenmekte ve sistemik kazanılmış direnç (SAR) gerçekleştirmek için sinyal oluşumuna katılarak  $H_2O_2$ 'i parçalayan katalaz enzimini bloke etmekte, böylece  $H_2O_2$ 'in üretiminin devamını sağlamaktadır [98]. SA ve jasmonik asit (JA) bitki savunmasında gerekli sinyal iletiminde iki farklı yolakta rol oynayan bitki hormonlarıdır [99, 100]. SA, SAR'e aracılık ederken JA uyarılmış sistemik dirence (ISR) aracılık eder. SA ve JA sinyal yolları birbirlerini sinerjik ve antagonistik etkileşim ağıyla etkilemektedirler [101, 102]. Kitosan oligosakkariti uygulaması sonucu domates, pirinç ve kolza tohumunda JA sinyal yolu aktivitesi ile JA üretimi indüklenmiş ve bitki bağışıklığı aktive edilmiştir [103, 104]. Benzer olarak, kitosan oligosakkaritinin SA sinyal yolunun aktivasyonu ile tütün mozaik virüsüne (TMV) karşı direnç oluşturduğu bildirilmiştir [105]. Tütün yapraklarında yapılan bir diğer çalışmada ise kitosan oligosakkaritlerinin sırasıyla kloroplast, nükleus, sitosol ve hücre membranında NO oluşumunu indükleyerek bazı savunma ile ilgili enzimlerin aktivitelerini düzenleyebildiği gösterilmiştir [106]. Kitosan uygulanmış farklı bitki ve bitki hücre kültürlerinde  $H_2O_2$  birikimi ile oksidatif patlama gözlenmiştir [107, 108]. Böylece, bir hücre içi sinyal olan  $H_2O_2$  birçok bitki türünde, bitki savunma enzimlerinin indüklenmesine, polifenolikler, lignin, flavonoidler ve fitoaleksinler gibi sekonder metabolitlerin sentezine yol açmaktadır [7]. Bu türlerden bazıları; ayçiçeği (*Helianthus annuus*), papaya (*Carica papaya*), çın ağacı meyvesi (*Litchi chinensis*), üzüm (*Vitis vinifera*), soya fasulyesi (*Glycine max*), domates (*Solanum lycopersicum*), kayısı (*Prunus armenica*)'dır [63, 96, 109, 110].  $Ca^{+2}$  molekülleri ise hem monokotillerde hem dikotillerde kitosana yanıt olarak kalloz oluşumu aktivitesini düzenlemektedir [76].

## V. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Modern tarımın en büyük hedefi, dünya nüfusundeki artışa bağlı olarak çevresel etkileri göz önünde bulundurarak kaliteli ve yeterli miktarda gıdayı üretmektir [111]. Tarımsal üretimde birçok zararlı etmenler ve hastalıklar sonucu bitki verimi ciddi derecede etkilenmektedir. Uzun yıllar boyunca, bu problemlerle yüzleşmek ve verimi artırmak için kimyasal gübre ve pestisitler kullanılmıştır [7]. Bu ürünlerin kullanımı toprakta artık madde birikimine,

dirençli zararlıların gelişmesine, çevre kirlenmesine ve insan sağlığını tehdit edici sorunlara sebep olmuştur. Bu nedenle araştırmacılar son yıllarda, tarımsal verimliliği artırmak ve zararlı unsurları azaltmak doğrultusunda zararsız ve alternatif yöntemlere yönelmişlerdir. Kitosan ve türevlerinin kullanılması bu alternatif yöntemlerden birisidir. Elde edilmesi ve uygulanması maliyetli olmayan bir biyopolimer olan kitosan, endüstriyel alanda oldukça sık kullanılırken son yıllarda tarımsal uygulamaları oldukça yaygınlaşmıştır. Kitosan biyoçözünürlük ve biyoyoumluluk gibi birçok olumlu biyolojik özelliğe sahiptir. En büyük avantajı yenilenebilir bir kaynak ve doğa dostu olmasıdır. Kitosanın etkisi kimyasal yapısına, moleküler ağırlığına, konsantrasyonuna, bitkinin türüne ve uygulama şartlarına bağlı olarak değişirken, bitkide strese karşı dayanıklılık ve artan verim gibi sayısız biyolojik tepkiyi de aktive eder. Ancak yapılan çok sayıda çalışmaya rağmen kitosanın etki mekanizması tam anlamıyla aydınlatılabilmemiş değildir. Daha detaylı moleküler çalışmalar ile kitosanın bitki sistemleri üzerindeki etki mekanizmaları aydınlatılabilir ve böylece bitki hastalıklarının kontrolünde daha iyi bir kullanım sağlanabilir. Kitosana ilgili biyoteknolojik çalışmaların gittikçe artması ve birçok alanda kimyasal, fiziksel özellikleri gereği kolayca kullanılabilmesi, geleceğe umut verici bir uygulama alanı sunmaktadır.

## KAYNAKLAR

- [1]Kumar, M. N. R. (2000). A review of chitin and chitosan applications. *Reactive and functional polymers*, 46(1), 1-27.
- [2]Pandey, P., Verma, M. K., & De, N. (2018). De N. Chitosan in agricultural context—a review. *Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Sciences*, 7(4), 87-96.
- [3]Dutta, P. K., Ravikumar, M. N. V., & Dutta, J. (2002). Chitin and chitosan for versatile applications. *Journal of Macromolecular Science, Part C: Polymer Reviews*, 42(3), 307-354.
- [4]Malerba, M., & Cerana, R. (2019). Recent applications of chitin-and chitosan-based polymers in plants. *Polymers*, 11(5), 839.
- [5]Demir, A., & Seventekin, N. (2009). Kitin, kitosan ve genel kullanım alanları. *Tekstil Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 3(2), 92-103.
- [6]Vasconcelos, M. W. (2014). Chitosan and chitooligosaccharide utilization in phytoremediation and biofortification programs: current knowledge and future perspectives. *Frontiers in plant science*, 5
- [7]Malerba, M., & Cerana, R. (2016). Chitosan effects on plant systems. *International journal of molecular sciences*, 17(7), 996.
- [8]Chitosan Market Share, Size 2020: Company Profiles, Emerging Technologies, Trends, Industry Growth, Segments, Landscape and Demand by

Forecast to 2024 (2019, Aralık). Market Watch. Erişim adresi:

<https://www.marketwatch.com/press-release/chitosan-market-share-size-2020-company-profiles-emerging-technologies-trends-industry-growth-segments-landscape-and-demand-by-forecast-to-2024-2019-12-02>

[9]Su Ürünleri İstatistikleri (2018). *Türkiye İstatistik Kurumu*. Erişim adresi:

[http://www.tuik.gov.tr/PreTablo.do?alt\\_id=1005](http://www.tuik.gov.tr/PreTablo.do?alt_id=1005)

[10]El Hadrami, A., Adam, L. R., El Hadrami, I., & Daayf, F. (2010). Chitosan in plant protection. *Marine drugs*, 8(4), 968-987.

[11]Park, B. K., & Kim, M. M. (2010). Applications of chitin and its derivatives in biological medicine. *International journal of molecular sciences*, 11(12), 5152-5164.

[12]Koç, B. E., & Özkan, M. (2011). Gıda endüstrisinde kitosanın kullanımı. *Gıda Dergisi*, 36(3).

[13]No, H. K., Park, N. Y., Lee, S. H., & Meyers, S. P. (2002). Antibacterial activity of chitosans and chitosan oligomers with different molecular weights. *International journal of food microbiology*, 74(1-2), 65-72.

[14]Szymańska, E., & Winnicka, K. (2015). Stability of chitosan—a challenge for pharmaceutical and biomedical applications. *Marine drugs*, 13(4), 1819-1846.

[15]Yi, H., Wu, L. Q., Bentley, W. E., Ghodssi, R., Rubloff, G. W., Culver, J. N., & Payne, G. F. (2005). Biofabrication with chitosan. *Biomacromolecules*, 6(6), 2881-2894.

[16]Akbulut, Y., & Bulut, M. O. (2015). Tekstilde Kullanılan Bazı Biyopolimerlerin Tarıma Uygulanabilirliği. *SDÜ Yekarum e-Dergi*, 3(1).

[17]Liu, H., Tian, W., Li, B., Wu, G., Ibrahim, M., Tao, Z., ... & Sun, G. (2012). Antifungal effect and mechanism of chitosan against the rice sheath blight pathogen, *Rhizoctonia solani*. *Biotechnology letters*, 34(12), 2291-2298.

[18]Liu, D., Li, Z., Zhu, Y., Li, Z., & Kumar, R. (2014). Recycled chitosan nanofibril as an effective Cu (II), Pb (II) and Cd (II) ionic chelating agent: adsorption and desorption performance. *Carbohydrate polymers*, 111, 469-476.

[19]Abu-Muriefah SS (2013) Effect of chitosan on common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plants grown under water stress conditions. *Int Res J Agri Sci Soil Sci* 3: 192- 199.

[20]Zong H, Liu S, Xing R, Chen X, Li P (2017) Protective effect of chitosan on photosynthesis and antioxidative defense system in edible rape (*Brassica rapa* L.) in the presence of cadmium. *Ecotox. Environ Safe* 138: 271-278.

[21]Kurtuluş, G. (2019) *Buğday (Triticum aestivum L.)'da Alüminyum Toksisitesine Karşı Kitosan Uygulamasının Etkileri*. (Yayımlanmamış Yüksek

Lisans Tezi). Marmara Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul

[22]Benavides-Mendoza, A., Alonso-Velasco, R., Romero-García, J., Ledesma-Pérez, A. S., & Raygoza-Castro, J. M. (2001). LA APLICACION FOLIAR DE QUITOSAN EN ACIDO ACETICO AUMENTA LA BIOMASA DE LA LECHUGA. *XXX VBBBO NY5*, 190.

[23]Tsugita, T. (1993). The application of chitin/chitosan for agriculture. In *Proc. of the Special Sess. 7th Symposium on Chitin and Chitosan, 1993* (pp. 21-22). Jap. Soc. for Chitin and Chitosan.

[24]Utsunomiya, N., Kinai, H., Matsui, Y., & Takebayashi, T. (1998). The effects of chitosan oligosaccharides soil conditioner and nitrogen fertilizer on the flowering and fruit growth of purple passionfruit (*Passiflora edulis* Sims var. *edulis*). *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*, 67(4), 567-571.

[25]Ohta, K., Taniguchi, A., Konishi, N., & Hosoki, T. (1999). Chitosan treatment affects plant growth and flower quality in *Eustoma grandiflorum*. *HortScience*, 34(2), 233-234.

[26]Chatelain, P. G., Pintado, M. E., and Vasconcelos, M. W. (2014). Evaluation of chitooligosaccharide application on mineral accumulation and plant growth in *Phaseolus vulgaris*. *Plant Sci*. 215–216, 134–140. doi: 10.1016/j.plantsci.2013.11.009

[27]Tsai, M. L., & Chen, R. H. (2003). The effect of reaction time and temperature during heterogenous alkali deacetylation on degree of deacetylation and molecular weight of resulting chitosan. *Journal of applied polymer science*, 88(13), 2917-2923.

[28]Dash, M., Chiellini, F., Ottenbrite, R. M., & Chiellini, E. (2011). Chitosan—A versatile semi-synthetic polymer in biomedical applications. *Progress in polymer science*, 36(8), 981-1014.

[29]Majekodunmi, S. O. (2016). Current development of extraction, characterization and evaluation of properties of chitosan and its use in medicine and pharmaceutical industry. *American Journal of Polymer Science*, 6(3), 86-91.

[30]Muzzarelli C, Muzzarelli RAA (2003) Chitin related food science today (and two centuries ago). *Agrofood Ind. Hi-Tech* 1: 39-42

[31]Cosgrove, J. (2010, Şubat). The Global Chitosan Market. *Nutraceuticals World*. Erişim adresi: [https://www.nutraceuticalsworld.com/contents/view\\_online-exclusives/2010-12-02/the-global-chitosan-market-](https://www.nutraceuticalsworld.com/contents/view_online-exclusives/2010-12-02/the-global-chitosan-market-)

[32]Muzzarelli RAA (1986) Filmogenic properties of chitin /chitosan. In: Muzzarelli RAR, Jeuniaux, Gooday CW (eds) *Chitin in nature and Technology*. Pp. 389-396. Plenum Press, NewYork.

[33]Struszczyk H, Orlikowski BL, Skrzypczak C. (2001) Chitosan in the control of soil-borne pathogens. *Chitin Enzymology*; 197–205.

- [34]El Ghaouth, A., Arul, J., Asselin, A., & Benhamou, N. (1992). Antifungal activity of chitosan on post-harvest pathogens: induction of morphological and cytological alterations in *Rhizopus stolonifer*. *Mycological research*, 96(9), 769-779.
- [35]Falcon-Rodriguez AB, Costales D, Cabrera JC, Martinez-Tellez MA (2011) Chitosan physico-chemical properties modulate and resistance in tobacco plants against the oomycete *Phytophthora nicotianae*. *Pestic. Biochem. Phys.* 100: 221-228.
- [36]Feliziani E, Smilanick JL, Morgosan DA, Mansour MF, Gu S, Gohil HL, Ames ZR (2013) Preharvest fungicide potassium sorbat or chitosan use on quality and storage decay of table grapes. *Plant Dis.* 97: 307-314.
- [37]Romanazzi, G., Gabler, F. M., & Smilanick, J. L. (2006). Preharvest chitosan and postharvest UV irradiation treatments suppress gray mold of table grapes. *Plant Disease*, 90(4), 445-450.
- [38]Feliziani E, Santini M, Landi L, Romanazzi G (2013) Pre- and Post-harvest treatment with alternatives to synthetic fungicides to control postharvest decay of sweet cherry. *Post harvest Biol Tec.* 78: 133-138.
- [39]Doares SH, Syrovets T, Elmar EW, Weiler W, Ryan CA (1995) Oligogalacturonase and chitosan activate plant defensive genes through the octadecanoid pathway. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA* 92: 4095-4098.
- [40]Aziz A, Trotel-Aziz P, Dhuciq L, Jeandet P, Couderchet M, Vernet G (2006) Chitosan oligomers and copper sulfate induce grapevine defense reactions and resistance to gray mold and downy mildew. *Phytopathology* 96: 1188-1194.
- [41]Kenra DF, Hadwiger LA (1984) Characterization of the smallest chitosan oligomer that is maximally antifungal to *Fusarium solani* and elicits pisatin formation in *Pisum sativum*. *Exp. Mycol.* 8: 276-281.
- [42]Sathiyabana M, Balasubramanian R (1998) Chitosan induces resistance components in *Arachis hypogaea* against leaf rust caused by *Puccinia arachidis*. *Spag. Crop Prot.* 17: 307-313.
- [43]Kulikov, S. N., Chirkov, S. N., Il'ina, A. V., Lopatin, S. A., & Varlamov, V. P. (2006). Effect of the molecular weight of chitosan on its antiviral activity in plants. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 42(2), 200-203.
- [44]Vasyukova, N. I., Chalenko, G. I., Gerasimova, N. G., Perekhod, E. A., Ozeretskoykaya, O. L., Il'ina, A. V., ... & Albulov, A. I. (2000). Chitin and chitosan derivatives as elicitors of potato resistance to late blight. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 36(4), 372-376.
- [45]Ren, H., Endo, H., & Hayashi, T. (2001). Antioxidative and antimutagenic activities and polyphenol content of pesticide-free and organically cultivated green vegetables using water-soluble chitosan as a soil modifier and leaf surface spray. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 81(15), 1426-1432.
- [46]Barber, M. S., Bertram, R. E., & Ride, J. P. (1989). Chitin oligosaccharides elicit lignification in wounded wheat leaves. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 34(1), 3-12.
- [47]Tikhonov, V. E., Stepnova, E. A., Babak, V. G., Yamskov, I. A., Palma-Guerrero, J., Jansson, H. B., et al. (2006). Bactericidal and antifungal activities of a low molecular weight chitosan and its N-/2(3)-(dodec-2-enyl)succinoyl/- derivatives. *Carbohydr. Polym.* 64, 66-72. doi: 10.1016/j.carbpol.2005.10.021
- [48]Rabea, E. I. ve Steurbaut, W. (2010). Chemically modified chitosans as antimicrobial agents against some plant pathogenic bacteria and fungi. *Plant Protect. Sci.* 46, 149-158.
- [49]Trotel-Aziz, P., Couderchet, M., Vernet, G., and Aziz, A. (2006). Chitosan stimulates defense reactions in grapevine leaves and inhibits development of *Botrytis cinerea*. *Eur. J. Plant Pathol.* 114, 405-413. doi: 10.1007/s10658-006-0005-5.
- [50]Khalil, M. S., and Badawy, M. E. (2012). Nematicidal activity of a biopolymer chitosan at different molecular weights against root-knot nematode, *Meloidogyne incognita*. *Plant Protect Sci.* 48, 170-178.
- [51]Nunes da Silva, M., Cardoso, A. R., Ferreira, D., Brito, M., Pintado, M. E., and Vasconcelos, M. W. (2014). Chitosan as a biocontrol agent against the pinewood nematode (*Bursaphelenchus xylophilus*). *Plant Pathol.* 62, 1398-1406. doi: 10.1111/ppa.12037.
- [52]Allan, C. R., & Hadwiger, L. A. (1979). The fungicidal effect of chitosan on fungi of varying cell wall composition. *Experimental mycology*, 3(3), 285-287.
- [53]Faoro, F., Sant, S., Iriti, M., Maffi, D., & Appiano, A. (2001). Chitosan-elicited resistance to plant viruses: a histochemical and cytochemical study. *Chitin Enzymology*, 22, 57-62.
- [54]Chirkov, S. N. (2002). The antiviral activity of chitosan. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 38(1), 1-8.
- [55]Pospieszny, H., Chirkov, S., & Atabekov, J. (1991). Induction of antiviral resistance in plants by chitosan. *Plant Science*, 79(1), 63-68.
- [56]Kong, M., Chen, X. G., Xing, K., & Park, H. J. (2010). Antimicrobial properties of chitosan and mode of action: a state of the art review. *International journal of food microbiology*, 144(1), 51-63.
- [57]Muzzarelli, R., Tarsi, R., Filippini, O., Giovanetti, E., Biagini, G., & Varaldo, P. E. (1990). Antimicrobial properties of N-carboxybutyl chitosan. *Antimicrobial agents and chemotherapy*, 34(10), 2019-2023.
- [58]Chung, Y. C., Wang, H. L., Chen, Y. M., & Li, S. L. (2003). Effect of abiotic factors on the antibacterial activity of chitosan against waterborne pathogens. *Bioresource technology*, 88(3), 179-184.
- [59]Jia, Z., & Xu, W. (2001). Synthesis and antibacterial activities of quaternary ammonium salt of chitosan. *Carbohydrate research*, 333(1), 1-6.

- [60]Kim, J. H., Shin, J. H., Lee, H. J., Chung, I. S., & Lee, H. J. (1997). Effect of chitosan on indirubin production from suspension culture of *Polygonum tinctorium*. *Journal of fermentation and bioengineering*, 83(2), 206-208.
- [61]Roller, S., & Covill, N. (1999). The antifungal properties of chitosan in laboratory media and apple juice. *International Journal of Food Microbiology*, 47(1), 67-77.
- [62]Hernandez-Lauzardo, A. N., Bautista-Baños, S., Velázquez-Del Valle, M. G., Méndez-Montealvo, M. G., Sánchez-Rivera, M. M., & Bello-Perez, L. A. (2008). Antifungal effects of chitosan with different molecular weights on in vitro development of *Rhizopus stolonifer* (Ehrenb.: Fr.) Vuill. *Carbohydrate Polymers*, 73(4), 541-547.
- [63]Meng, X., Yang, L., Kennedy, J. F., & Tian, S. (2010). Effects of chitosan and oligochitosan on growth of two fungal pathogens and physiological properties in pear fruit. *Carbohydrate Polymers*, 81(1), 70-75.
- [64]Olicón-Hernández, D. R., Hernández-Lauzardo, A. N., Pardo, J. P., Peña, A., Velázquez-del Valle, M. G., & Guerra-Sánchez, G. (2015). Influence of chitosan and its derivatives on cell development and physiology of *Ustilago maydis*. *International journal of biological macromolecules*, 79, 654-660.
- [65]Terrile, M. C., Mansilla, A. Y., Albertengo, L., Rodríguez, M. S., & Casalongué, C. A. (2015). Nitric-oxide-mediated cell death is triggered by chitosan in *Fusarium eumartii* spores. *Pest management science*, 71(5), 668-674.
- [66]Hidangmayum, A., Dwivedi, P., Katiyar, D., & Hemantaranjan, A. (2019). Application of chitosan on plant responses with special reference to abiotic stress. *Physiology and molecular biology of plants*, 25(2), 313-326.
- [67]Ahmad, W., Zahir, A., Nadeem, M., Garros, L., Drouet, S., Renouard, S., ... & Abbasi, B. H. (2019). Enhanced production of lignans and neolignans in chitosan-treated flax (*Linum usitatissimum* L.) cell cultures. *Process biochemistry*, 79, 155-165.
- [68]Muley, A. B., Shingote, P. R., Patil, A. P., Dalvi, S. G., & Suprasanna, P. (2019). Gamma radiation degradation of chitosan for application in growth promotion and induction of stress tolerance in potato (*Solanum tuberosum* L.). *Carbohydrate polymers*, 210, 289-301.
- [69]Shams Peykani, L. (2018). Effect of chitosan on antioxidant enzyme activity, proline, and malondialdehyde content in *Triticum aestivum* L. and *Zea mays* L. under salt stress condition. *Plant Physiology*, 9(1), 2661-2670.
- [70]Khan, A. A. (1992). Preplant physiological seed conditioning. *Horticultural reviews*, 13(1), 131-181.
- [71]Bhaskara Reddy, M. V., Arul, J., Angers, P., & Couture, L. (1999). Chitosan treatment of wheat seeds induces resistance to *Fusarium graminearum* and improves seed quality. *Journal of Agricultural and Food chemistry*, 47(3), 1208-1216.
- [72]Zhou, Y. G., Yang, Y. D., Qi, Y. G., Zhang, Z. M., Wang, X. J., & Hu, X. J. (2002). Effects of chitosan on some physiological activity in germinating seed of peanut. *Journal of Peanut Science*, 31(1), 22-25.
- [73]Ruan, S., & Xue, Q. (2002). Effects of chitosan coating on seed germination and salt-tolerance of seedling in hybrid rice (*Oryza sativa* L.). *Zuo wu xue bao*, 28(6), 803-808.
- [74]Cheah, L. H., & Page, B. B. C. (1997, August). *Trichoderma* spp. for potential biocontrol of clubroot of vegetable brassicas. In *Proceedings of the New Zealand Plant Protection Conference* (pp. 150-153). NEW ZEALAND PLANT PROTECTION SOCIETY INC.
- [75]Guan, Y. J., Hu, J., Wang, X. J., & Shao, C. X. (2009). Seed priming with chitosan improves maize germination and seedling growth in relation to physiological changes under low temperature stress. *Journal of Zhejiang University-Science B*, 10(6), 427-433.
- [76]Faoro, F., Maffi, D., Cantu, D., & Iriti, M. (2008). Chemical-induced resistance against powdery mildew in barley: the effects of chitosan and benzothiadiazole. *Biocontrol*, 53(2), 387-401.
- [77]Iriti, M., Picchi, V., Rossoni, M., Gomarasca, S., Ludwig, N., Gargano, M., & Faoro, F. (2009). Chitosan antitranspirant activity is due to abscisic acid-dependent stomatal closure. *Environmental and Experimental Botany*, 66(3), 493-500.
- [78]Rabea, E. I., Badawy, M. E. T., Stevens, C. V., Smaghe, G., & Steurbaut, W. (2003). Chitosan as antimicrobial agent: applications and mode of action. *Biomacromolecules*, 4(6), 1457-1465.
- [79]Murphy, J. G., Rafferty, S. M., & Cassells, A. C. (2000). Stimulation of wild strawberry (*Fragaria vesca*) arbuscular mycorrhizas by addition of shellfish waste to the growth substrate: interaction between mycorrhization, substrate amendment and susceptibility to red core (*Phytophthora fragariae*). *Applied Soil Ecology*, 15(2), 153-158.
- [80]Chookhongkha, N., Miyagawa, S., Jirakiattikul, Y., & Photchanachai, S. (2012, November). Chili growth and seed productivity as affected by chitosan. In *Proceedings of the International Conference on Agriculture Technology and Food Sciences (ICATFS'2012), Manila, Philippines* (pp. 17-18).
- [81]Kuchitsu, K., Yazaki, Y., Sakano, K., & Shibuya, N. (1997). Transient cytoplasmic pH change and ion fluxes through the plasma membrane in suspension-cultured rice cells triggered by N-acetylchitoooligosaccharide elicitor. *Plant and cell physiology*, 38(9), 1012-1018.
- [82]Kuchitsu, K., Kosaka, H., Shiga, T., & Shibuya, N. (1995). EPR evidence for generation of hydroxyl radical triggered by N-acetylchitoooligosaccharide



- elicitor and a protein phosphatase inhibitor in suspension-cultured rice cells. *Protoplasma*, 188(1-2), 138-142.
- [83]Nojiri, H., Sugimori, M., Yamane, H., Nishimura, Y., Yamada, A., Shibuya, N., ... & Omori, T. (1996). Involvement of jasmonic acid in elicitor-induced phytoalexin production in suspension-cultured rice cells. *Plant Physiology*, 110(2), 387-392.
- [84]Takai, R., Hasegawa, K., Kaku, H., Shibuya, N., & Minami, E. (2001). Isolation and analysis of expression mechanisms of a rice gene, EL5, which shows structural similarity to ATL family from Arabidopsis, in response to N-acetylchitooligosaccharide elicitor. *Plant Science*, 160(4), 577-583.
- [85]Bornet, A., & Teissedre, P. L. (2008). Chitosan, chitin-glucan and chitin effects on minerals (iron, lead, cadmium) and organic (ochratoxin A) contaminants in wines. *European Food Research and Technology*, 226(4), 681-689.
- [86]N. Ben-Shalom, in R. Brzezinski, I. Boucher, A. Retnakaran (Eds.), Chitosan-metal complex as a natural agricultural product against plant diseases, in: Proceedings of the 9th International Chitin-Chitosan Conference, Montréal, Canada, August 27-30, 2003.
- [87]Varma, A. J., Deshpande, S. V., & Kennedy, J. F. (2004). Metal complexation by chitosan and its derivatives: a review. *Carbohydrate Polymers*, 55(1), 77-93.
- [88]Muzzarelli, R. (1992). Depolymerization of methyl pyrrolidinone chitosan by lysozyme. *Carbohydrate polymers*, 19(1), 29-34.
- [89]Vasconcelos, M., Datta, K., Oliva, N., Khalekuzzaman, M., Torrizo, L., Krishnan, S., et al. (2003). Enhanced iron and zinc accumulation in transgenic rice with the ferritin gene. *Plant Sci*. 164, 371-378. doi: 10.1016/S0168-9452(02)00421-1
- [90]Chung, Y. C., Kuo, C. L., & Chen, C. C. (2005). Preparation and important functional properties of water-soluble chitosan produced through Maillard reaction. *Bioresource Technology*, 96(13), 1473-1482.
- [91]Bostan, K., Aldemir, T., & Aydın, A. (2007). Kitosan ve antimikrobiyal aktivitesi. *Türk Mikrobiyal Cem Dergisi*, 37(2), 118-127.
- [92]Kurt, Ş., & Zorba, Ö. (2005). Kitin (Chitin), Kitosan (Chitosan) ve Türevlerinin Gıdalarda Kullanım Olanakları. *GIDA/THE JOURNAL OF FOOD*, 30(6).
- [93]Hadwiger, L. A., Kendra, D. F., Fristensky, B. W., & Wagoner, W. (1986). Chitosan both activates genes in plants and inhibits RNA synthesis in fungi. In *Chitin in nature and technology* (pp. 209-214). Springer, Boston, MA.
- [94]Limpanavech, P., Chaiyasuta, S., Vongpromek, R., Pichyangkura, R., Khunwasi, C., Chadchawan, S., ... & Bangyeekhun, T. (2008). Chitosan effects on floral production, gene expression, and anatomical changes in the Dendrobium orchid. *Scientia Horticulturae*, 116(1), 65-72.
- [95]Hadwiger, L. A. (2013). Multiple effects of chitosan on plant systems: solid science or hype. *Plant science*, 208, 42-49.
- [96]Cho, M. H., No, H. K., & Prinyawiwatkul, W. (2008). Chitosan treatments affect growth and selected quality of sunflower sprouts. *Journal of food science*, 73(1), S70-S77.
- [97]Singh, S. (2016). Enhancing phytochemical levels, enzymatic and antioxidant activity of spinach leaves by chitosan treatment and an insight into the metabolic pathway using DART-MS technique. *Food chemistry*, 199, 176-184.
- [98]Levine, A., Tenhaken, R., Dixon, R., & Lamb, C. (1994). H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> from the oxidative burst orchestrates the plant hypersensitive disease resistance response. *Cell*, 79(4), 583-593.
- [99]Loake, G., & Grant, M. (2007). Salicylic acid in plant defence—the players and protagonists. *Current opinion in plant biology*, 10(5), 466-472.
- [100]Janda, M., & Ruelland, E. (2015). Magical mystery tour: salicylic acid signalling. *Environmental and Experimental Botany*, 114, 117-128.
- [101]Koornneef, A., & Pieterse, C. M. (2008). Cross talk in defense signaling. *Plant physiology*, 146(3), 839-844.
- [102]Zhang, S., Li, X., Sun, Z., Shao, S., Hu, L., Ye, M., ... & Shi, K. (2015). Antagonism between phytohormone signalling underlies the variation in disease susceptibility of tomato plants under elevated CO<sub>2</sub>. *Journal of Experimental Botany*, 66(7), 1951-1963.
- [103]Rakwal, R., Tamogami, S., Agrawal, G. K., & Iwahashi, H. (2002). Octadecanoid signaling component “burst” in rice (*Oryza sativa* L.) seedling leaves upon wounding by cut and treatment with fungal elicitor chitosan. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 295(5), 1041-1045.
- [104]Yin, H., Li, Y., Zhang, H. Y., Wang, W. X., Lu, H., Grevsen, K., ... & Du, Y. (2013). Chitosan oligosaccharides-triggered innate immunity contributes to oilseed rape resistance against *Sclerotinia Sclerotiorum*. *International Journal of Plant Sciences*, 174(4), 722-732.
- [105]Jia, X., Meng, Q., Zeng, H., Wang, W., & Yin, H. (2016). Chitosan oligosaccharide induces resistance to Tobacco mosaic virus in Arabidopsis via the salicylic acid-mediated signalling pathway. *Scientific reports*, 6, 26144.
- [106]Zhang, H., Zhao, X., Yang, J., Yin, H., Wang, W., Lu, H., & Du, Y. (2011). Nitric oxide production and its functional link with OIPK in tobacco defense response elicited by chitooligosaccharide. *Plant cell reports*, 30(6), 1153-1162.
- [107]Malerba, M., Crosti, P., & Cerana, R. (2012). Defense/stress responses activated by chitosan in sycamore cultured cells. *Protoplasma*, 249(1), 89-98.
- [108]Iriti, M., & Varoni, E. M. (2015). Chitosan-induced antiviral activity and innate immunity in plants. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(4), 2935-2944.

[109]Ghasemnezhad, M., & Shiri, M. A. (2010). Effect of chitosan coatings on some quality indices of apricot (*Prunus armeniaca* L.) during cold storage. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 8(1), 25-33.

[110]Ali, A., Muhammad, M. T. M., Sijam, K., & Siddiqui, Y. (2011). Effect of chitosan coatings on the physicochemical characteristics of Eksotika II papaya (*Carica papaya* L.) fruit during cold storage. *Food chemistry*, 124(2), 620-626.

[111]FAO Statistical Yearbook 2013. (2014, 16 Eylül).

Erişim adresi:

<http://www.fao.org/docrep/018/i3107e/i3107e00.htm>

## N<sup>1</sup>,N<sup>4</sup>-Bis(Alilkarbamoil) Terefitalamid Molekülünün Deneysel ve Teorik Karakterizasyonu

*The Experimental and Theoretical Characterization of N<sup>1</sup>, N<sup>4</sup>-bis(alilkarbamoil) Terefitalamide Molecule*

Uğur SOYKAN<sup>1</sup> , Sedat ÇETİN<sup>2</sup> , Gürcan YILDIRIM<sup>3</sup> 

<sup>1</sup> Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Yeniçağa Yaşar Çelik Meslek Yüksekokulu, Gıda İşleme Bölümü, 14280, Yeniçağa, Bolu.

<sup>2</sup> Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, 14280, Merkez, Bolu.

<sup>3</sup> Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 14280, Merkez, Bolu.

### Öz

Bu multidisipliner çalışmada sentezlenen yeni N<sup>1</sup>,N<sup>4</sup>-bis(alilkarbamoil) terefitalamid molekülü (C<sub>16</sub>H<sub>18</sub>N<sub>4</sub>O<sub>4</sub>) hem deneysel yöntemlerle hem de teorik hesaplamalarla karakterize edilmiştir. Molekül dialilik yapıda olduğundan çapraz bağlayıcı özelliğe ve mezojenik gruplar içerdiği için sıvı kristal özellik gösterme potansiyeline sahiptir. FTIR ve <sup>1</sup>H-NMR'dan elde edilen deneysel sonuçlar bileşiğin saf şekilde sentezlendiğini doğrulamıştır ve reaksiyon verimi %95 olarak belirlenmiştir. DSC sonuçları, molekülün erime sıcaklığının 216°C olduğunu göstermiştir. Ayrıca, molekülün enerji düzeyindeki optimize uzaysal moleküler yapısı belirlenerek, bağ uzunlukları ve bağ açıları temel seviyede DFT/B3LYP/6-31G(d,p) ve HF/6-31G(d,p) yöntemleri kullanılarak hesaplandı ve ayrıca metotların uyumlulukları belirlendi. Bunlara ilaven, molekülün HOMO, LUMO, elektronegatiflik, kimyasal sertlik, yumuşaklık, elektrofilik indeks, moleküler elektrostatik potansiyel (EMP) ve elektrostatik potansiyel (ESP) özellikleri ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** N<sup>1</sup>,N<sup>4</sup>-bis(alilkarbamoil) terefitalamid, DFT ve HF hesaplamaları, HOMO ve LUMO, MEP ve ESP haritaları.

### Abstract

In this multidisciplinary study, synthesized novel N<sup>1</sup>,N<sup>4</sup>-bis(allylcarbamoyl) terephthalamide molecule (C<sub>16</sub>H<sub>18</sub>N<sub>4</sub>O<sub>4</sub>) was characterized by both experimental methods and theoretical calculations for the first time. The molecule had crosslinking agent property due to its diallylic structure and had potential to show liquid crystal property due to having mesogenic groups. Experimental results obtained from FTIR and <sup>1</sup>H-NMR confirmed that the compound was synthesized without any purification and the reaction yield was found to be 95%. DSC results showed that the melting temperature of the molecule was 216 ° C. Moreover, the bond lengths and bond angles were calculated by using the basic level DFT/B3LYP/6-31G(d,p) and HF/6-31G(d,p) methods by determining the optimized spatial molecular structure of the molecule at molecular energy level and the compatibility of these methods was also determined. In addition, HOMO, LUMO, electronegativity, chemical hardness, softness, electrophilic index, molecular electrostatic potential (EMP) and electrostatic potential (ESP) properties of the molecule were investigated in depth.

**Key words:** N<sup>1</sup>, N<sup>4</sup>-bis(allylcarbamoyl) terephthalamide, DFT and HF calculations, HOMO and LUMO, MEP and ESP maps.

## I. GİRİŞ

Çapraz bağlayıcılar iki veya daha fazla polimerleşme özelliğine sahip fonksiyonel grupları bünyesinde barındıran maddelerdir. Gelişmiş ve üstün özelliklere sahip polimerik malzemeler hazırlamak ve polimerlerin fiziksel karakteristiklerini geliştirmek için matrise değişen oranlarda çapraz bağlayıcılar ilave edilir ve matristeki polimer zincirlerinin çapraz bağ olarak bilinen ara dallar ile çapraz bağlanması sağlanır. Bu şekilde elde edilmiş çapraz bağlanmış polimerler, sadece fiziksel strese ve yüksek sıcaklıklara karşı değil, aynı zamanda sert ağ yapısından dolayı çok çeşitli koşullar altında boyutsal olarak da kararlıdır ve buna bağlı olarak mühendislik malzemelerinin geliştirilmesinde oldukça fazla tercih edilmektedirler (Ođian, 2004).

Çapraz bağlayıcıda bulunan fonksiyonel gruplar ve matris içerisindeki çapraz bağlayıcı konsantrasyonu polimere verilmek istenen özellik açısından oldukça önemlidir. Çapraz bağlayıcıyı oluşturan gruplar modifiye edilerek polimerik malzemelerin farklı özellikler göstermesi sağlanmaktadır. Özellikle, farklı özelliklere sahip polimerik mikroküreciklerin hazırlanmasında çapraz bağlayıcıların önemi oldukça büyüktür (Saralidze ve diğ., 2010). Bunun yanı sıra, mezojenik grupların birbirine bağlanmasıyla oluşturulmuş sert zincir yapıdaki çapraz bağlayıcılar kullanılarak sıvı kristal özelliğe sahip çapraz bağlı polimerler elde edilmektedir. Sıvı kristal polimerler (LCPs) polimer bilimi için oldukça önemli olduğundan mezogen gruplar içeren çapraz bağlayıcılar da bir çok bilim adamının ilgisini çeken bir konu olmuştur. Lineer sıvı kristal polimerler çapraz bağlanma tepkimeleri ile LCP ağırları haline getirilebilirler. Bu yöntemle LCP elastomerleri (LCE) ve sıvı kristal termosetleri (LCT) hazırlanabilir. LCE ve LCT'lerin hazırlanması genellikle iki aşamada gerçekleştirilir. Birinci aşamada lineer sıvı kristal polimer sentezlenir ve ikinci aşamada da polimer zincirleri çapraz bağlanır. LCT and LCE'ler optik, mekanik, ferroelektrik ve piyozoelektrik özellikleri ve çeşitli uygulama alanları ile araştırmacıların ilgisini çeken ilginç polimerik malzemelerdir (Gebhard ve Zentel, 2000; Simons ve diğ. 1982).

Literatüre bakıldığında mezojenik gruplar içeren çapraz bağlayıcı moleküllerin deneysel ve teorik karakterizasyonu ile ilgili çok fazla çalışma yoktur. Jia ve diğ. (2002) hem mezojenik ve hem de çapraz bağlayıcı özellikli çift fonksiyonel gruplu sıvı kristal monomer (4-aliloksi-benzoiloksi-4'-aliloksibifenil) sentezlemiş ve bu monomerin polimetilhidroksisiloksan üzerine aşırı kopolimerleşmesini gerçekleştirerek sıvı kristal elastomer ve termosetler hazırlamışlardır. Jia ve diğ. (2004) başka bir çalışmada mezojenik çapraz bağlayıcıyı (4-hidroksi-4'-undesilenoiloksi-bifenil-4-undesilenoiloksibenzoat) and mezojenik monomeri (4-hidroksi-4'-aliloksibenzoiloksi-benzen-4-butilbenzoat) polisilokzana bağlayarak yan zincir sıvı kristal elastomerler sentezlemiş ve ürünlerin mezomorfik özelliklerini ve faz davranışlarını incelemişlerdir. Zhang ve diğ. (2003) piyozoelektrik özellik göstermesi ihtimali olan (4'-aliloksi-benzoil)-(4''-undek-10-en-1-oilbenzoil)-p-benzendiolat) ve kolesteril-undek-10-en-1-oat gruplarını içeren hafif çapraz bağlı yan zincir kolesterik sıvı kristal elastomerler sentezlemişler ve ürünlerin mezomorfik özelliklerini incelemişlerdir. Acerno ve diğ. (2000) yan süstitüte guruplar olarak alil 6 guruplar içeren sıvı kristal poliesterlerden ağ yapıda sıvı kristal ürünler hazırlamıştır. Çalışmalarında çapraz bağlanma termal olarak aktive edilmiş radikalik tepkimelerle ve uygun aktivatör içeren örneklerin UV ışınlanmasıyla gerçekleştirilmiştir. Caruso ve diğ. (1999) süstitüte

tereftalik asit gurubuna dayalı çapraz bağlanabilir sıvı kristal ko-poliesterleri sentezlemiş ve faz davranışlarını incelemişlerdir. Ağ yapıda ürün oluşumunu tereftalik grup üzerinde reaktif akriloloksi gurubunu içeren farklı monomer miktarları ile çalışmışlardır. Bunlara ilaven kuantumsal hesaplama metotlarıyla elde edilen teorik sonuçlar deneysel verilerle iyi bir uyum gösterdiği için üretilmesi düşünülen mezojenik gruplar içeren çapraz bağlayıcıların fiziksel ve kimyasal özellikleri önceden tahmin edilebilmektedir. Özellikle moleküler yapıların incelenmesinde *ab initio* Hartree-Fock (HF) yaklaşımı ve yoğunluk fonksiyonu teorisi (DFT) literatürde en sık kullanılan teorik hesaplama yöntemleridir. Bu yöntemler kullanılarak araştırmacıların sıvı kristaller üzerine yapmış oldukları teorik çalışmalar da görülmektedir (Marini ve diğ., 2012; Druzicki ve diğ., 2012; Koleva ve Kolev, 2008).

Sunulan bu multidisipliner çalışma ile, mezojenik gruplar içeren çapraz bağlayıcı dialilik bileşiği sentezlenmiş ve hem deneysel hem de teorik yöntemlerle detaylıca karakterize edilmiştir. Bununla birlikte, organik temel haldeki optimize moleküler yapısı, titreşim frekansları, uygun mod tanımları, termodinamik nicelikleri, atomik yükleri farklı temel setli *ab initio* Hartree-Fock (HF) ve yoğunluk fonksiyonu teorisi (DFT) kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen deneysel veriler ile uyumu ayrıntılı bir şekilde değerlendirilmiştir. Farklı sıcaklık ve basınç altındaki termodinamik (entropi, entalpi, termal enerji, vs.) özellikleri de gün yüzüne çıkarılmıştır. Ayrıca sentezlenen molekülün en yüksek dolu orbital (HOMO), en düşük boş orbital (LUMO) enerjileri, moleküler elektrostatik potansiyel (MEP) ve elektrostatik potansiyel incelenmiş, moleküllerin dipol momentleri, kimyasal yumuşaklığı/sertliği, elektronegatifliği, elektrofilite davranışları, geçiş durumları ve enerji bant aralıkları değerlendirilmiştir.

## II. MATERYAL VE YÖNTEM

### 2.1. Malzemeler

Mezojenik gruplar içeren çapraz bağlayıcı molekülün sentezlenmesi için trietilamin ve tereftaloil diklorür Merck A.G. firmasından, N-metil piroldon ve alil üre ise Sigma Aldrich firmasından temin edilmiştir ve herhangi bir saflaştırma işlemi uygulanmadan kullanılmıştır.

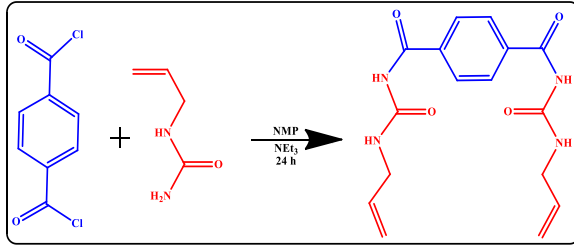
### 2.2. Cihazlar

Ürünlerin FTIR spektrumları potasyum bromür (KBr) ile katı pelet haline getirilerek Shimadzu 8400 S spektrofotometresi ile 400-4000  $\text{cm}^{-1}$  frekans aralığında incelenmiştir. Sentezlenen  $\text{N}^1, \text{N}^4$ -bis(alilkarbamoil) tereftalamid molekülünün  $^1\text{H}$ -NMR spektrumu JEOL-ECS 400 MHz spektrometresi

ile çözücü olarak döteryum kloroform ( $CDCl_3$ ) kullanılarak incelenmiştir. Kimyasal kaymalar ppm (milyonda bir birim) şeklinde iç referans trimetilsilana (TMS) göre değerlendirilmiştir. Ayrıca molekülün termal özellikleri Shimadzu TA-60 WS Difransiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) cihazı ile azot gazı altında dakikada  $10^\circ C$  ısıtma hızında analiz edilmiştir.

### 2.3. Sentez Çalışmaları

$N^1,N^4$ -bis(alilkarbamoil) tereftalamid molekülü trietilamin içeren N-metil piperidon (NMP) içerisinde trimetilamin (TEA) varlığında tereftaloil diklorür (TPC) ile alil ürenin (AU) kimyasal tepkimesiyle elde edilmiştir. İlk olarak 50 mL NMP içerisinde 4,5 mmol TPC çözeltisi hazırlandı ve bu çözelti damlatma hunisine aktarıldı. Sonrasında 9,0 mmol AU, 9 mmol TEA içeren 50 mL'lik NMP çözeltisi erlene konularak manyetik karıştırıcıya konuldu. Önceden hazırlanmış TPC çözeltisi, AU ve TEA içeren çözeltiye damla damla eklendi ve oda sıcaklığında 24 saat boyunca karıştırıldı. Reaksiyon sonunda, reaksiyon çözeltisine su eklenerek hem oluşan ürünün çökmesi hem de ortamda oluşan beyaz renkteki trietilamin hidroklorür tuzunun su içerisinde çözünmesi sağlandı. Su ilavesi ile çözünürlüğü azalan ürün filtre edildi ve su (3x250 mL) ve aseton (1x250 mL) ile yıkandı. Filtrasyon sonunda elde edilen ürün vakum ortamında kurutuldu ve reaksiyon verimi %95 olarak belirlendi. Tereftaloil diklorür alil üre ile tepkimesi Şekil 1'de basitçe gösterilmiştir.



Şekil 1. Tereftaloil diklorürün alil üre ile tepkimesi.

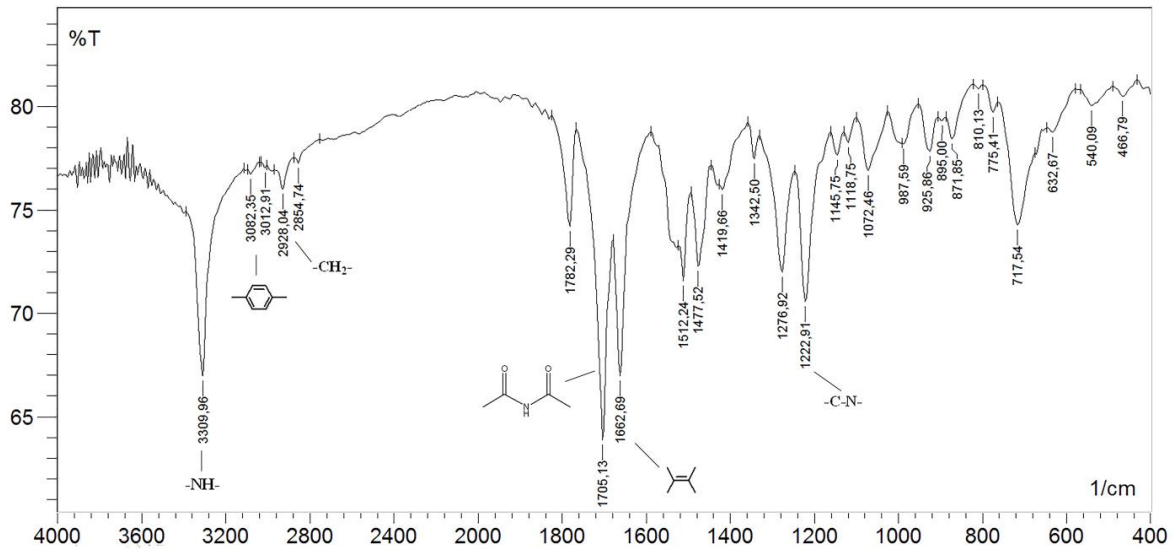
### 2.4. Teorik Çalışmalar

Sentezlenen  $N^1,N^4$ -bis(alilkarbamoil) tereftalamid molekülü hesaplamalı teorik modellemeler ile detaylıca karakterize edildi. Teorik hesaplamalar kişisel bilgisayar üzerinde (DFT) ve ab initio Hartree-Fock (HF) yöntemlerinin 6-31G (d,p) temel setli hesapları Gaussian-09 paket programı kullanılarak yapılmıştır. Molekül görselleştirme için GaussView programı kullanılmıştır. Bileşiğin moleküler geometri karakteristikleri (optimize molekül yapısı, bağ uzunlukları, bağ açıları), elektrokimyasal özellikleri (HOMO-LUMO, elektronegatiflik, kimyasal sertlik, elektrofilik indeks ve yumuşaklık), moleküler elektrostatik potansiyeli (MEP) ve elektrostatik potansiyeli (ESP) yapılan teorik hesaplamalarla belirlenmiştir.

## III. BULGULAR VE TARTIŞMA

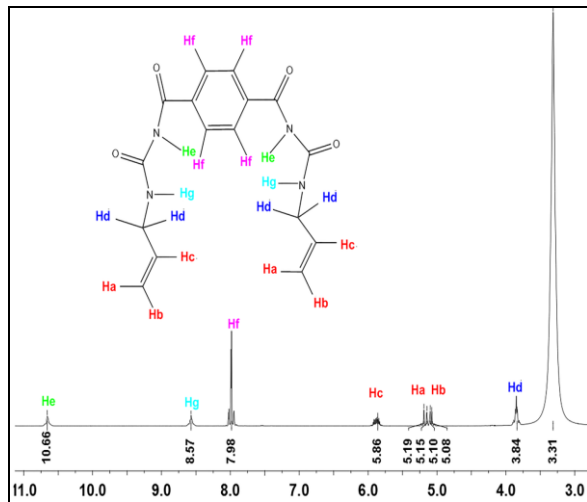
### 3.1. Sentezlenen $N^1,N^4$ -bis(alilkarbamoil) Tereftalamid Molekülünün Deneysel Karakterizasyonu

$N^1,N^4$ -bis(alilkarbamoil) tereftalamid molekülünün FTIR spektrumunu Şekil 2'de gösterilmiştir. 3309  $cm^{-1}$ 'de görülen bant -N-H grubunun gerilme titreşmelerini, 3082  $cm^{-1}$ , 2928  $cm^{-1}$  ve çevresinde görülen bantlar sırasıyla fenil ve -CH<sub>2</sub> grubundaki -C-H gerilme titreşimlerini göstermektedir. 1782  $cm^{-1}$  ve 1705  $cm^{-1}$ 'de görülen güçlü absorpsiyon pikleri amid gruplarının -C=O gerilme titreşmelerini, 1662  $cm^{-1}$ 'deki bant vinilik -C=C gerilme titreşmelerini, 1222 ve 1276  $cm^{-1}$ 'deki gözlenen bantlar aromatic -C-N gerilme titreşmelerini, 1072-871  $cm^{-1}$  aralığında gözlenen bantlar vinilik düzlem dışı C-H bükülme titreşmelerini göstermektedir.



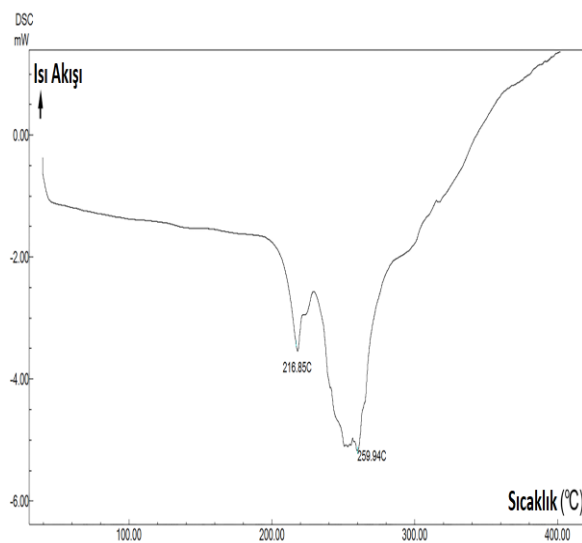
Şekil 2.  $N^1,N^4$ -bis(alilkarbamoil) tereftalamid molekülünün FTIR spektrumu.

N1,N4-bis(alilkarbamoil) tereftalamid molekülünün  $^1\text{H-NMR}$  spektrumunda  $\delta$  5,6'da dörtlü,  $\delta$  5,1 ve  $\delta$  5,2'deki ikili pik  $\text{CH}_2=\text{CH}$ - grubunun protonlarını (Ha, Hb ve Hc),  $\delta$  8,0'da görülen üçlü pik  $-\text{C}_6\text{H}_4$  gruplarında yer alan Hf protonlarını,  $\delta$  10,7 ve 8,2'de görülen geniş tekli pikler  $-\text{NH}$  gruplarındaki sırasıyla He ve Hg protonlarını,  $\delta$  3,8 de görülen pik  $-\text{CH}_2$  gruplarında bulunan Hd protonları göstermektedir, Şekil 3.



Şekil 3. N1,N4-bis(alilkarbamoil) tereftalamid molekülünün  $^1\text{H-NMR}$  spektrumu.

N1,N4-bis(alilkarbamoil) tereftalamid molekülünün azot atmosferinde  $10^\circ\text{C}/\text{dakika}$  ısıtma hızı ile çekilen DSC termogramında  $216^\circ\text{C}$ 'de görülen endoterm molekülünün erimesini göstermektedir.  $250^\circ\text{C}$  çevresinde görülen endotermic ısı akışı ise bu molekülün bozulmaya başladığını sıcaklık olarak belirlenmiştir, Şekil 4.



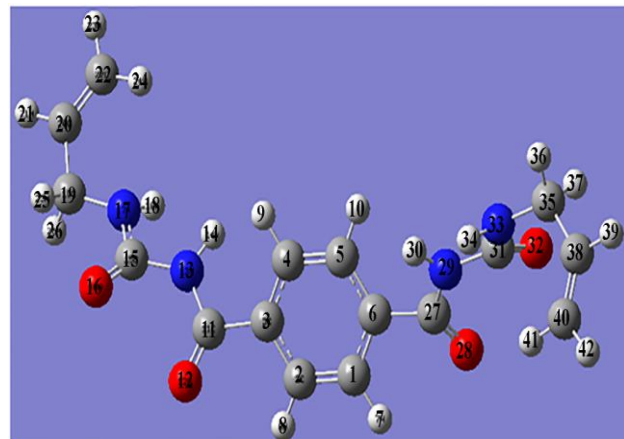
Şekil 4. N1,N4-bis(alilkarbamoil) tereftalamid molekülünün DSC spektrumu.

### 3.2. N1,N4-bis(alilkarbamoil) Tereftalamid Molekülünün Teorik Karakterizasyon

N1,N4-bis(alilkarbamoil) tereftalamid molekülü hesaplamalı teorik modellemelerle ayrıntılı bir şekilde karakterize edilmiştir. Sentezlenen molekülün geometrik özelliklerine ilişkin, DFT ve HF olmak üzere iki farklı yöntemle yapılan hesaplamalardan elde edilen teorik veriler karşılaştırılmıştır ve birbiri ile uyumlulukları incelenmiştir. Buna ilaven, uyumluluğu daha fazla olan model ile teorik hesaplamalar yapılarak sentezlenen bileşiğin elektrokimyasal ve elektrostatik özellikleri de belirlenmiştir.

#### 3.2.1. N1,N4-bis(alilkarbamoil) tereftalamid molekülünün optimizasyonu

N1,N4-bis(alilkarbamoil) tereftalamid molekülünün minimum enerji düzeyindeki optimize uzaysal molekül yapısı teorik olarak belirlenmiştir. Teorik hesaplamalar sonucunda belirlenen molekülün optimize yapısı Şekil 5'de numaralandırılmış halde gösterilmiştir. Şekillerdeki gri renkli büyük toplar karbon atomlarını, küçük beyaz toplar hidrojen atomlarını, kırmızı büyük toplar oksijen atomlarını ve mavi toplar ise azot atomlarını sembolize etmektedir.



Şekil 5. N1,N4-bis(alilkarbamoil) tereftalamid molekülünün optimize moleküler yapısı.

#### 3.2.2. Bağ uzunlukları ve bağ açıları

Sentezlenen N1,N4-bis(alilkarbamoil) tereftalamid molekülünün bağ uzunlukları ve bağ açıları yoğunluk fonksiyonu teorisi (DFT) ve ab initio Hartree-Fock (HF) yöntemlerinin 6-31G(d,p) temel setli hesaplarla belirlenmiştir ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmalı olarak Tablo 1 ve 2'de gösterilmektedir. Hem DFT hem de HF teorik yaklaşımlarında seçilmiş bağ uzunluklarının ve bağ açılarının tümünün birbirleriyle uyum içerisinde olduğu belirlenmiştir. Ancak bu molekülün de DFT hesap yöntemi ile bulunan bağ uzunlukları HF modeli hesaplarından daha büyük olarak gözlenmiştir. Yaklaşımlar arasında oluşan bu farkın temel nedeni DFT model hesaplamalarında korelasyon katsayısını kullanılmasıdır ve bu yüzden DFT model HF modele göre daha doğru sonuç verir.

Yapılan hesaplamalar arasında en büyük farklılıkların C31-O32, C11-O12, C15-O16 ve C27-O28 bağları arasında olduğu bulunmuştur. Bu hesaplamalardaki farklılıkların nedeni atomların (özellikle oksijen atomlarının) üzerinde yoğunlaşan atomik yüklerin farklı olmasından ve DFT model hesaplarında korelasyon kullanmasından dolayıdır. Bağ açı hesaplarına gelindiğinde, her iki modelde bu organik molekülün yapısında bulunan düzgün altıgen (benzen halkasının) yapısının simetrisindeki bozulmalar yüzünden (atomik bağlar üstündeki yük dağılımlarının farklı olması) bağ açıları küçük sapmalar olduğu gözlenmektedir. Benzen halkasındaki C2-C1-C6 ve C1-C2-C3 atomları arasındaki bağ açılarının 120.0178° ve 120.2155° bulunması bu durumu desteklemektedir. Buna ek olarak, iki modelin bağ açıları hesaplamaları arasındaki en büyük fark oksijenin karbon atomları ile çift bağ yaptığı açılarda bulunmuştur. Hatta en büyük hesaplama farkı elektron yoğunluğu fazla olan O32-C31-N33 atomları arasındaki bağ açısında olduğu gözlemlenmiştir. O32-C31-N33 atomları arasındaki bağ açısının B3LYP/6-31G(d,p) teorik hesaplama modelinde 124.5506°, HF/6-31G(d,p) metodu ile hesaplanmasında ise 122.9963° olduğu belirlenmiştir. Yukarıda da bahsedildiği gibi bu temel fark O32-C31-N33 atomları DFT modelinin hesaplarında elektron korelasyon katsayısını kullanmasındandır. Ayrıca, moleküldeki alilik grupların C19-C20-C22 ve C35-C38-C40 atomları arasındaki bağ açıları da B3LYP/6-31G(d,p) metodu ile sırasıyla 126.9838° ve 126.7828°, HF/6-31G(d,p) metodu ile ise 126.2586° ve 127.0036° olarak hesaplanmıştır. Bu andan itibaren sadece korelasyon katsayısını hesaba katan DFT metot ile hesaplanan teorik bulgular verilecektir.

**Tablo 1.** N1,N4-bis(alilkarbamoil) Terefitamid Molekülünün Seçilmiş Bağ Uzunlukları (Å).

Seçilmiş Bağ Uzunlukları (Å)		
	B3LYP/6-31G(d,p)	HF/6-31G(d,p)
C <sub>1</sub> -C <sub>2</sub>	1.3796	1.3702
C <sub>1</sub> -C <sub>6</sub>	1.3910	1.3887
C <sub>1</sub> -H <sub>7</sub>	1.0734	1.0595
C <sub>2</sub> -H <sub>8</sub>	1.0734	1.0595

C <sub>3</sub> -C <sub>11</sub>	1.5041	1.5007
C <sub>11</sub> -O <sub>12</sub>	1.1875	1.1524
C <sub>15</sub> -O <sub>16</sub>	1.1884	1.1537
C <sub>6</sub> -C <sub>27</sub>	1.5044	1.5013
C <sub>27</sub> -O <sub>28</sub>	1.1874	1.1522
C <sub>27</sub> -N <sub>29</sub>	1.3843	1.3810
C <sub>19</sub> -H <sub>25</sub>	1.0819	1.0667
C <sub>15</sub> -N <sub>17</sub>	1.3658	1.3621
N <sub>17</sub> -H <sub>18</sub>	0.9953	0.9836
N <sub>17</sub> -C <sub>19</sub>	1.4486	1.4313
C <sub>19</sub> -C <sub>20</sub>	1.5047	1.5014
C <sub>22</sub> -H <sub>23</sub>	1.0752	1.0609
C <sub>31</sub> -O <sub>32</sub>	1.1883	1.1592
C <sub>31</sub> -N <sub>33</sub>	1.3637	1.3605
N <sub>29</sub> -H <sub>30</sub>	0.9931	0.9827
N <sub>29</sub> -C <sub>31</sub>	1.4017	1.3990
N <sub>33</sub> -H <sub>34</sub>	0.9943	0.9830
N <sub>33</sub> -C <sub>35</sub>	1.4466	1.4279
C <sub>35</sub> -H <sub>36</sub>	1.0866	1.0722
C <sub>35</sub> -C <sub>38</sub>	1.5077	1.5054
C <sub>38</sub> -C <sub>40</sub>	1.3168	1.3088
C <sub>40</sub> -H <sub>41</sub>	1.0751	1.0664

**Tablo 2.** N1,N4-bis(alilkarbamoil) Terefitamid Molekülünün Seçilmiş Bağ Açıları (°).

Seçilmiş Bağ Açıları (°)		
	B3LYP/6-31G(d,p)	HF/6-31G(d,p)
C <sub>2</sub> -C <sub>1</sub> -C <sub>6</sub>	120.0178	120.4403
C <sub>2</sub> -C <sub>1</sub> -H <sub>7</sub>	120.7462	120.5578
C <sub>1</sub> -C <sub>2</sub> -C <sub>3</sub>	120.2155	120.3877
C <sub>2</sub> -C <sub>3</sub> -C <sub>11</sub>	117.6470	118.8875
C <sub>3</sub> -C <sub>11</sub> -O <sub>12</sub>	121.5616	120.3332
C <sub>3</sub> -C <sub>11</sub> -N <sub>13</sub>	114.4395	115.0121

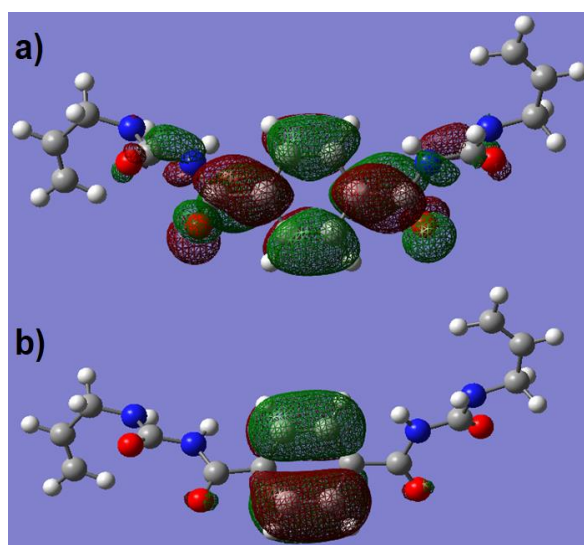
O <sub>12</sub> -C <sub>11</sub> -N <sub>13</sub>	123.9514	124.9105
C <sub>11</sub> -N <sub>13</sub> -H <sub>14</sub>	117.2606	116.5799
N <sub>13</sub> -C <sub>15</sub> -O <sub>16</sub>	123.7540	124.3852
N <sub>13</sub> -C <sub>15</sub> -N <sub>17</sub>	111.7194	112.4008
O <sub>16</sub> -C <sub>15</sub> -N <sub>17</sub>	124.4332	124.4332
C <sub>15</sub> -N <sub>17</sub> -H <sub>18</sub>	116.8270	117.2145
C <sub>19</sub> -C <sub>20</sub> -C <sub>22</sub>	126.9838	126.2586
C <sub>19</sub> -C <sub>20</sub> -H <sub>21</sub>	113.9489	114.3455
H <sub>25</sub> -C <sub>19</sub> -H <sub>26</sub>	106.2841	107.3718
H <sub>41</sub> -C <sub>40</sub> -H <sub>42</sub>	116.5035	116.0012
C <sub>27</sub> -N <sub>29</sub> -H <sub>30</sub>	117.1022	117.8857
C <sub>27</sub> -N <sub>29</sub> -C <sub>31</sub>	125.6824	126.2126
H <sub>30</sub> -N <sub>29</sub> -C <sub>31</sub>	117.2145	117.9193
N <sub>29</sub> -C <sub>31</sub> -O <sub>32</sub>	123.6353	123.1009
O <sub>32</sub> -C <sub>31</sub> -N <sub>33</sub>	124.5506	122.9963
C <sub>31</sub> -N <sub>33</sub> -H <sub>34</sub>	117.7551	117.1761
C <sub>31</sub> -N <sub>33</sub> -C <sub>35</sub>	121.0863	121.8777
C <sub>35</sub> -C <sub>38</sub> -C <sub>40</sub>	126.9828	127.0036
H <sub>39</sub> -C <sub>38</sub> -C <sub>40</sub>	119.2128	118.8933
H <sub>36</sub> -C <sub>35</sub> -H <sub>37</sub>	107.0137	107.6779

### 3.2.3. Elektrokimyasal özellikleri

Teorik çalışmalarının bu kısmında sentezlenen bu organik bileşiğin moleküler arası bağ yapısı yapmaması ya da aktif olup olmaması elde edilen sonuçlar ışığında incelendi. Bulgular, N<sup>1</sup>,N<sup>4</sup>-bis(alilkarbamoil) terefitalamid molekülünün moleküler arası rahatça yük transfer edebileceğini ve buna bağlı olarak kolayca moleküler arası bağ yapabileceğini göstermektedir.

Bilindiği üzere en yüksek dolu moleküler orbital (HOMO) ve en düşük boş moleküler orbital (LUMO) bir molekülün kimyasal reaksiyon potansiyeli, elektrokimyasal, optik ve UV-Vis spektrum özellikleri hakkında bilgi vermektedir. Buna ilaven HOMO ve LUMO moleküllerin birbirleri ile olan etkileşimlerinin tahmin edilmesinde de önemli rol oynamaktadır. N<sup>1</sup>,N<sup>4</sup>-bis(alilkarbamoil) terefitalamid molekülünün DFT/B3LYP/6-31G(d) setinde hesaplanmış 3 boyutlu (3B) HOMO ve LUMO gösterimleri sırasıyla Şekil 6'da ayrıntılı bir şekilde gösterilmiştir. Şekillerde verilen kırmızı renkli baloncuklar pozitif fazı gösterirken yeşil baloncuklar negatif fazı işaret etmektedir. Kimyasal tepkimelerde temel moleküler orbitaller olarak HOMO ve LUMO görev alır. Bir molekülde HOMO elektron verici gibi davranırken LUMO ise elektron alıcı gibi davranır. Bundan dolayı molekülün iyonlaşma enerjisi HOMO ile ilgiliyken,

elektron ilgisi ise LUMO ile ilgilidir. Molekülün kimyasal kararlılığı HOMO ve LUMO enerji farkıyla da direkt alakalıdır. Sentezlenen molekülün HOMO ve LUMO değerleri sırasıyla -0.36619 a.u. (-9.96452 eV) ve 0.06399 a.u. (1.74125 eV) olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, bu molekül için HOMO ve LUMO orbitalleri arasındaki enerji farkı (optik bant boşluk enerjisi) 0.42589 a.u. (11.5890 eV) olarak belirlenmiştir. Bu enerji farkı molekülün kararlı olduğunu ifade etmektedir. Ayrıca, N<sup>1</sup>,N<sup>4</sup>-bis(alilkarbamoil) terefitalamid molekülünün HOMO gösterimi incelendiğinde, elektron geçişlerinin benzen halkası etrafında, komşu atomlar arasında ve benzen halkasına yakın olan iki oksijen atomunda olduğu görülmüştür, Şekil 6.b. LUMO karakteristik özelliği incelendiğinde ise elektronik (kabul edecek yerlerin) geçişlerin etilen grupları dışında tüm molekül üstüne dağıldığı ve geçişlerin komşu atomlar arasında olduğu gözlenmiştir, Şekil 6.a. Bu sonuçlarla ilişkili olarak çalışılan molekülün en düşük ve en yüksek moleküler orbital eigen değerleri sırasıyla -20.55382 a.u. ve 5.27219 a.u. olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar molekülün elektron verme eğiliminin ve kimyasal reaktivitesinin düşük olduğunu göstermektedir.



Şekil 6. N<sup>1</sup>,N<sup>4</sup>-bis(alilkarbamoil) terefitalamid molekülünün 3 boyutlu (3B) a) LUMO ve b) HOMO gösterimi

Aynı zamanda, N<sup>1</sup>,N<sup>4</sup>-bis(alilkarbamoil) terefitalamid molekülünün elektrokimyasal özellikleri (elektronegatiflik, kimyasal sertlik, yumuşaklık ve elektrofilik indeks) HOMO ve LUMO enerjileri kullanılarak hesaplanmıştır ve elde edilen sonuçlar Tablo 3'de verilmiştir. Elektronik özellikleri detaylı olarak incelendiğinde molekülün  $\chi$  ve  $\psi$  değerleri sırasıyla 0.15110 a.u. ve 0.051573 a.u. olarak hesaplanmıştır. Bu durum oksijen atomları üzerinde yoğunlaşmış elektrofilik atak yapabilecek aktif tarafların molekülde var olmasından kaynaklanmaktadır. Bunlara ilaven, sentezlenen bu



yeni molekülün kimyasal sertliği ( $\eta$ ) ve yumuşaklığı ( $\zeta^{-1}$ ) hesaplanmış ve 0.112945 a.u. ve 4,426933 a.u. olarak belirlenmiştir, Tablo 2. Bu sonuçlar molekülün optik ve optoelektronik uygulamalarda kullanılabileceğini göstermektedir.

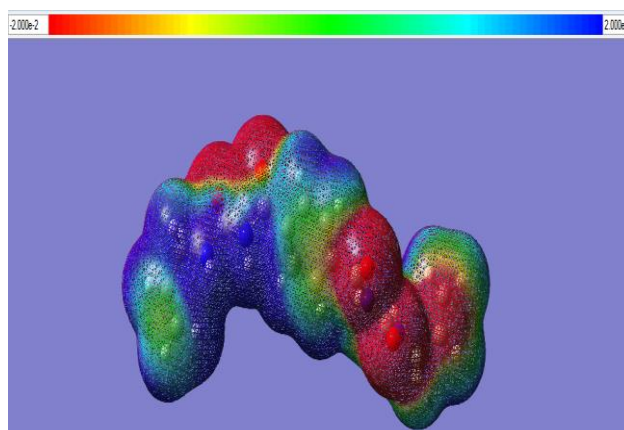
**Tablo 3.** N<sup>1</sup>,N<sup>4</sup>-bis(alilkarbamoil) Terefitalamid Molekülünün hesaplanan elektronik özellik parametreleri

Nicelik (a.u.)	B3LYP/6-31G(d,p)
En Düşük Moleküler Orbital Eigen Değer	-20,55382
En Yüksek Moleküler Orbital Eigen Değer	5,27219
HOMO (En Yüksek Dolu Moleküler Orbital)	-0,36619
LUMO ( En Düşük Boş Moleküler Orbital)	0,06399
HOMO–LUMO optik bant boşluk enerjisi, $ \Delta E $	0,42589
$\chi$ (elektronegatiflik)	0,15110
$\eta$ (kimyasal sertlik)	0,112945
$\zeta$ (yumuşaklık) <sup>-1</sup>	4,426933
$\psi$ (elektrofilik indeks)	0,051573

### 3.2.4. Moleküler elektrostatik potansiyel ve elektrostatik potansiyel analizleri

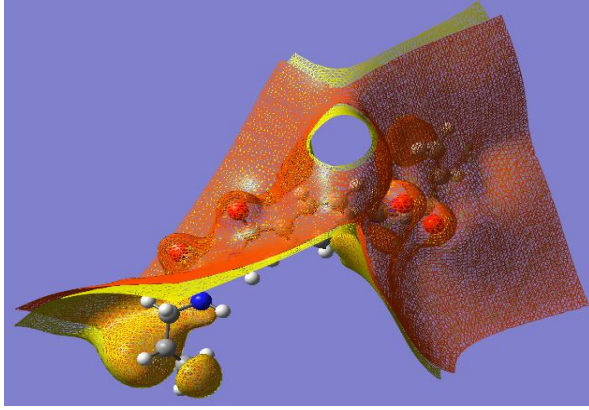
Moleküler elektrostatik potansiyel (MEP) ve elektrostatik potansiyel (ESP) bir molekülün yük dağılımlarını gösteren önemli teorik bir özelliktir. Bu yüzden, sentezlenmiş C<sub>16</sub>H<sub>18</sub>N<sub>4</sub>O<sub>4</sub> molekülün elektrofilik etkileşimi, nükleofilik reaksiyonları, hidrojen-bağı etkileşimleri ve özellikle de diğer moleküllerle nasıl etkileşeceğini belirlemek için bileşiğin moleküler elektrostatik potansiyeli (MEP) ve elektrostatik potansiyeli (ESP) figürler yardımı ile detaylı bir şekilde incelenmiştir. C<sub>16</sub>H<sub>18</sub>N<sub>4</sub>O<sub>4</sub> molekülüne ait 3 boyutlu MEP ve ESP fotoğrafları Şekil 7 ve 8'de gösterilmiştir. MEP, molekülde elektrofilik reaksiyonlar, nükleofilik ataklar ve ayrıca hidrojen bağı etkileşimleri için aktif olan bölgeleri gösterir. Ayrıca molekülün büyüklüğünü ve şeklini

anlamak için MEP karakterizasyonu oldukça önemlidir. Figürde kullanılan kırmızı (negatif, en fazla elektro negatif) bölgeler elektrofilik aktifliği (moleküler arası etkileşimi) belirten mavi (pozitif) bölgeler nükleofilik aktifliği ve yeşil/sarı bölgeler de nötr yerleri göstermektedir. Bir başka deyişle, kırmızı bölgeler elektron yoğunluğunun yüksek olduğu, mavi bölgeler ise elektron yoğunluğunun az olduğu bölgeleri ifade etmektedir. N<sup>1</sup>,N<sup>4</sup>-bis(alilkarbamoil) terefitalamid molekülünün MEP haritası molekülün hem pozitif hem de negatif bölgece zengin alanlara sahip olduğunu göstermiştir, Şekil 7. Elektronca zengin bölgelerin özellikle oksijen ve azot atomlarının etrafında yer aldığı görülmektedir. Bunun yanı sıra, nötr bölgeler benzen ve alilik grupların etrafında yoğunlaşırken, elektron yoğunluğunun az olduğu bölgeler ise -CH<sub>2</sub> grupları etrafında görülmektedir.



**Şekil 7.** N<sup>1</sup>,N<sup>4</sup>-bis(alilkarbamoil) terefitalamid bileşiğini MEP dağılımı

Atomik yükler hesaplanırken, tahmini atomik yükler kullanılarak molekül etrafında çok miktarda nokta belirlenerek elektrostatik potansiyel belirlenir. Elektrostatik potansiyel (ESP) atomlar üzerindeki elektronegatiflik ve kısmi yük dağılım bölgeleri ile ilgilidir. N<sup>1</sup>,N<sup>4</sup>-bis(alilkarbamoil) terefitalamid molekülünün elektrostatik potansiyeli Şekil 8'de verilmiştir. Elektrostatik potansiyel (ESP) figürü incelendiğinde, molekülünün daha fazla negatif ESP bölgesini gösteren sarımsı kabarcıklarının en önemli kısımları kendisinde var olan 4 adet oksijen atomu üzerine yayılmıştır. Diğer bir deyişle, bu malzemede atomik yüklerin negatif bölgeleri organik molekülün oksijenli (daha fazla elektro negatif) kısımlarında toplanmıştır. Şekilde görüldüğü üzere, p-elektronları tamamen karbonil grubu ve yakın atomlar üzerine lokalize olmuştur. Pozitif ESP bölgesi ise organik bileşiğin üzerine yayılmış olarak gözlenmektedir, Şekil 9.



Şekil 8. N<sup>1</sup>,N<sup>4</sup>-bis(alilkarbamoil) tereftalamid bileşiğinin elektrostatik potansiyeli

#### IV. SONUÇ

Bu çalışma ile, N<sup>1</sup>,N<sup>4</sup>-bis(alilkarbamoil) tereftalamid molekülü hem deneysel hem de teorik hesaplamalarla karakterize edilmiştir. Molekül yüksek verimle saf olarak sentezlenmiş ve FTIR, <sup>1</sup>H-NMR ve DSC yöntemleri ile deneysel olarak başarıyla karakterize edilmiştir. FTIR ve <sup>1</sup>H-NMR'dan deneysel olarak elde edilen karakteristik titreşim frekansları ve <sup>1</sup>H-NMR kaymaları molekül fonksiyonel grupları ve protonlarıyla birebir örtüştüğü belirlenmiştir. Ayrıca, DSC analizleri molekülün yüksek erime sıcaklığına (216,85°C) sahip olduğunu ve yaklaşık 250°C'de degradasyona uğradığını göstermiştir. Bu yüksek erime sıcaklığı molekülün yüksek polaritedeki ve esnekliği düşük gruplardan yani polar ve rijit gruplardan meydana gelmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bunlara ilaven, N<sup>1</sup>,N<sup>4</sup>-bis(alilkarbamoil) tereftalamid molekülünün optimize molekül yapısı yoğunluk fonksiyonu teorisi (DFT) ve *ab initio* Hartree-Fock (HF) yöntemlerinin 6-31G (d,p) temel setli hesaplarla belirlenmiş ve molekülün bağ uzunlukları ve bağ açıları hesaplama sonuçları kullanılan her iki metodun da birbiriyle uyumlu olduğunu ortaya çıkarmıştır. Fakat en uygun hesaplama yönteminin elektron korelasyon katsayılarını hesaba katan DFT/B3LYP/6-31G(d,p) yöntemi olduğu belirlenmiştir. Elde edilen teorik sonuçlar ışığında C<sub>16</sub>H<sub>18</sub>N<sub>4</sub>O<sub>4</sub>'ün moleküler arası rahatça yük transferi edebileceğini ve buna bağlı olarak kolayca moleküler arası bağ yapabileceği belirlenmiştir. Moleküle ait elektronik veriler, molekülün HOMO ve LUMO arasındaki enerji farkı biraz yüksek olduğundan, molekülün kararlı bir yapıda olduğunu göstermiştir. Bunlara ilaven, N<sup>1</sup>,N<sup>4</sup>-bis(alilkarbamoil) tereftalamid molekülünün MEP haritası molekülün hem pozitif hem de negatif bölgece zengin alanlara sahip olduğunu, elektronca zengin bölgelerin özellikle oksijen ve azot atomlarının etrafında, nötr bölgelerin ise benzen ve alilik grupların etrafında, elektron yoğunluğunun az olduğu bölgeler ise -CH<sub>2</sub> grupları etrafında yoğunlaştığını göstermiştir.

Molekülün ESP figürü, p-elektronları tamamen karbonil grubu ve yakın atomlar üzerine lokalize olduğunu ve pozitif ESP bölgesinin organik bileşiğin üzerine yayılmış olduğunu göstermiştir. Sentezlenen N<sup>1</sup>,N<sup>4</sup>-bis(alilkarbamoil) tereftalamid molekülü mezojenik gruplar içeren dialilik yapıdadır ve yapılan deneysel ve teorik hesaplamalar çapraz bağlayıcı potansiyelinin yüksek olduğunu göstermektedir.

#### TEŞEKKÜR

Bu çalışma Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi BAP:2014.03.03.686 kodlu proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi Bilimsel Endüstriyel ve Teknolojik Uygulama ve Araştırma Merkezine <sup>1</sup>H-NMR analizlerindeki desteklerinden dolayı teşekkür ederiz.

#### KAYNAKLAR

- [1] Acierno, D., Di Maio, L., Iannelli, P., Spadaro, G. & Valenza, A. (2000). Macro-Oriented Network of Liquid-Crystalline Polyesters: Crosslinking Induced by Gamma-Irradiation and Thermally Activated Reaction. *Polymer*, 41(17), 6647-6654.
- [2] Caruso, U., Hatfull, L., Roviello, A. ve Sirigu, A. (1999) Multi-Oriented and Fibrous Liquid Crystalline Networks Based on Linear Mesogenic Polymers. *Polymer*, 40(24), 6753-6760.
- [3] Druzicki, K., Mikuli, E., Kocot, A., Ossowska-Chrusciel, M. D., Chrusciel, J. ve Zalewski, S. (2012). Complex Vibrational Analysis of an Antiferroelectric Liquid Crystal Based on Solid-State Oriented Quantum Chemical Calculations and Experimental Molecular Spectroscopy. *Journal of Physical Chemistry A*, 116(30), 7809-7821.
- [4] Gebhard, E. ve Zentel, R. (2000). Ferroelectric Liquid Crystalline Elastomers, 1. Variation of Network Topology and Orientation. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 201(8), 902-910.
- [5] Jia, Y. G., Zhang, B. Y., Tian, M. ve Pan, W. (2004). Synthesis and Structure of Polysiloxane Liquid Crystalline Elastomers with a Mesogenic Crosslinking Agent, *Journal of Applied Polymer Science*, 93(4), 1736-1742.
- [6] Jia, Y. G., Zhang, B. Y., Zhou, E. L., Feng, Z. L. ve Zang, B. L. (2002). Synthesis and Characterization of Network Liquid Crystal Elastomers and Thermosets. *Journal of Applied Polymer Science*, 85(5), 1104-1109.
- [7] Koleva, B. B. ve Kolev, T. (2008). Monoclinic and Triclinic Polymorphs of 2-{5,5-dimethyl-3-[2-(2,4,6-trimethoxyphenyl)vinyl]cyclohex-2enylidene} Malononitrile Solid-State Linear-Polarized IR-Spectroscopy, DFT Calculations and Vibrational Analysis. *Spectrochimica Acta*

- 
- Part a-Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 71(3), 786-793.
- [8] Marini, A., Zupancic, B., Domenici, V., Mennucci, B., Zalar, B. ve Veracini, C. A. (2012). A Photosensitive Liquid Crystal Studied by  $^{14}\text{N}$  NMR,  $^2\text{H}$  NMR, and DFT Calculations, *Chemphyschem*, 13(17), 3958-3965.
- [9] Odian, G. (2004) *Principle of Polymerization*, Wiley Interscience, New York.
- [10] Saralidze, K., Koole, L.H. ve Knetsch, M.L.W. (2010). Polymeric microspheres for medical applications. *Materials*. 3(6), 3537-3564.
- [11] Symons, A. J., Davis, F. J. ve Mitchell, G. R. (1999). Side-Chain Liquid Crystalline Elastomers: The Relationship Between the Orientational Ordering of the Polymer Backbone and The Length Of The Coupling Chain, *Polymer*, 40(19), 5365-5370.
- [12] Zhang, B. Y., Hu, J. S., Jia, Y. G. ve Du, B. G. (2003). Side-Chain Cholesteric Liquid Crystalline Elastomers Derived from Nematic Bis-Olefinic Crosslinking Units, *Macromolecular Chemistry and Physics*. 204(17), 2123-2129.

## Plastik Esaslı Kompozit Malzemelerde Kullanılan Bağlantı Elemanlarının Malzeme Ömrü Üzerine Etkisi

*The Effect of Fasteners Used in Plastic Based Composite Materials on Material Life*

Yusuf ÖZBAKIŞ<sup>1</sup>, Fehmi ERZİNCANLI<sup>1</sup>, Ahmet ŞAHİN<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 81620, Düzce, TÜRKİYE  
<sup>2</sup> İnnovasyon Takımı, Ar-Ge Merkezi, Silverline Endüstri A.Ş., 05300, Amasya, TÜRKİYE

### Öz

Bu çalışmada, endüstriyel mutfak ürünlerinin plastik esaslı kompozit parçalarının montajında kullanılan, DIN 7981 standartlarındaki sac vidası yerine plastik vidası kullanılmasının malzeme ömrü üzerine etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Bunun için, beyaz eşya sektöründe kullanılan plastik esaslı PC+ABS V0 hammaddeye sahip kompozit ürün numuneleri alınmıştır. Bu numuneler ile gerçekleştirilecek deneyler için, iki farklı vida türü (plastik S1, sac P2), üç farklı sıkma torku (0,5, 0,7 ve 0,9 Nm) ve üç farklı vida çeşidi (V1:2,9x13 YSB, V2: 2,9x9,5 YSB, V3: 3,5x9,5 YSB) temin edilmiştir. Yapılan çalışmada, farklı vida türü ile gerçekleştirilen deney sonuçları incelendiğinde, en iyi ömür sonucunu 0,5 sıkma torkunda V3 kodlu plastik vida çeşidi, en kötü ömür sonucunu ise 0,7 ve 0,9 sıkma torkunda V1 kodlu sac vida çeşidinin verdiği belirlenmiştir. Taguchi metodu ile gerçekleştirilen analiz sonrasında sinyal gürültü oranları incelendiğinde en ideal ömürde kullanılacak parametrenin vida türü için Seviye 2, sıkma torku için Seviye 1 ve vida çeşidi için Seviye 3 olarak belirlenmiştir. Anova sonuçları incelendiğinde, vida ömründe en etkili parametrenin % 37,66 ile vida çeşidi, ikinci etkili parametrenin %28,11 ile vida türü ve en düşük etkinin ise %20,01 ile vida türü olarak olduğu tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Bağlantı elemanları, Plastik esaslı kompozit malzemeler, Taguchi Metot, Anova

### Abstract

In this study, It is aimed to investigate the effect of plastic screw on material life instead of DIN 7981 standard sheet screw which is used in assembling plastic based composite parts of industrial kitchen products. For this purpose, samples of plastic based PC + ABS V0 raw materials used in the white goods industry were taken. For experiments with these examples, two different types of screws (plastic S1, sheet P2), three different tightening torques (0.5, 0.7 and 0.9 Nm) and three different kinds of screws (V1:2.9x13 PH, V2: 2.9x9.5 PH, V3: 3.5x9.5 PH) are provided. In the study, when the results of the experiments performed with different types of screws were examined, it was determined that the best material life result was given by V3 coded plastic screw kind with 0.5 tightening torque and the worst material life result was given by V1 coded screw kind with 0.7 and 0.9 tightening torque. When the signal-to-noise ratios were analyzed with Taguchi method, the parameter to be used in the ideal material life was determined as Level 2 for screw type, Level 1 for tightening torque and Level 3 for screw kind. When Anova results were analyzed, it was found that the most effective parameter in screw life was screw kind with 37.66%, the second effective parameter was screw type with 28.11% and the lowest effect was screw type with 20.01%.

**Keywords:** Fasteners, Plastic-based composite materials, Taguchi Method, Anova

## I. GİRİŞ

Ülkelerin kalkınması o ülkenin sahip olduğu tüm yeraltı ve yerüstü kaynaklarını en verimli bir biçimde kullanılmasına bağlıdır. Bunu sağlarken de günümüzde çok hızlı bir ilerleme gösteren teknolojik gelişmelerinde gerisinde kalmaması gerekmektedir. Neticede bu konular rekabeti zorunlu hale getirmektedir. Rekabette de başarılı olabilmenin şartı, verimli üretim yapabilmektir.

Son yüzyılda sanayinin hemen hemen bütün alanların da kullanımı giderek yaygınlaşan ve artık günlük hayatımızın vazgeçilmezi olan plastiklerin kullanımı sürekli olarak artmaktadır. Elbette ki bu artış oranı sektörden sektöre göre değişmektedir. Malzeme gruplarına ve özelliklerine bağlı olarak belli hammadde gruplarında ciddi bir birikim var iken, daha az kullanılan ve çok ciddi mekanik özellikleri barındıran plastik türlerinin kullanımı nispeten biraz daha düşük oradadır. Plastik sektörünün gelişimi ile birlikte daha çok mono

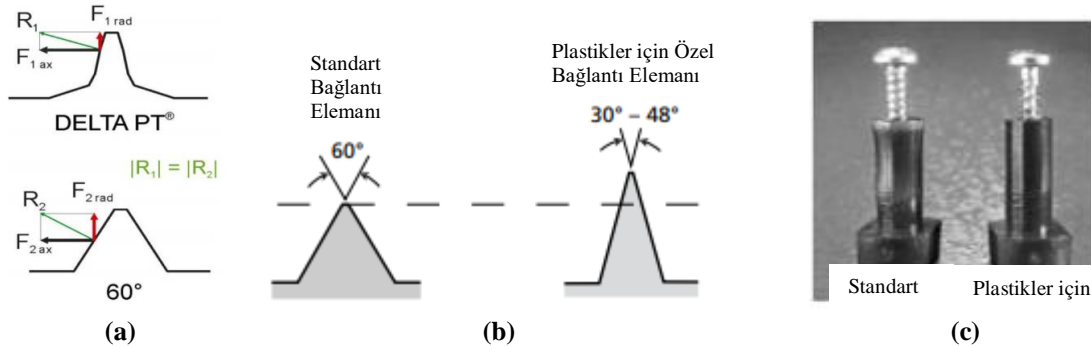
**Sorumlu yazar:** Yusuf ÖZBAKIŞ, Tel: 0507 960 35 55, e-posta: yusufozbakis@hotmail.com

**Gönderilme:** 16.11.2019, **Düzenleme:** 12.05.2020, **Kabul:** 04.06.2020

formdaki yapılar imalatta kullanıldı. Bunlar bugün hepimizin güncel hayatında Polietilen (PE), Polipropilen (PP), Polivinil klorür (PVC), Polistiren (PS), Polyamid (PA), Polietilen tereftalat (PET), Polikarbonat (PC) gibi malzemelerdir. Kuşkusuz ki bu plastik malzeme türleri aynı şekilde bugün de yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Ancak değişen ihtiyaçlar ve beklentiler birçok uygulamada bu mono yapıların tek başına kullanımı yetersiz kıldı. Çünkü aynı ürünün belli bir uygulamada bazı özellikleri çok iyi iken, bazı özellikleri çok zayıf kalmaktaydı ve buda ya ürünün kullanım ömrünü kısaltmakta veya o plastik malzemenin kullanımı sınırlamaktaydı. Yeni bir yol bulunmalıydı ve alternatifler çözümler çok geçmeden geliştirildi. Farklı özellikleri iyi olan plastik hammaddeler karıştırılarak yeni ve çok daha üstün özelliklere sahip malzemeler geliştirilmeye başlandı [1].

Mühendislik plastikleri ve poliolefin (PO) malzemelerinin tamamlayıcı özelliklerini birleştiren daha yüksek performanslı bileşiklerin geliştirilmesi, işlenebilirliği kolaylaştırırken, tasarım esnekliği, daha hafif ağırlık ve sağlam mekanik özelliklerin anahtar olduğu çeşitli endüstrilerde sürekli artan bir gereksinimdir [2].

PC / ABS karışımı (CS), bugüne kadar polikarbonat (PC) veya akrilonitril bütadien stiren (ABS) 'e iyi bir



**Şekil 1. a)** Dişli profili açısının bir fonksiyonu olarak elde edilen kuvvetler, **b)** Özel vida ve standart vida diş profili, **c)** Özel vida ve standart vida diş tasarımlarının ince duvarlı bölgelerde nasıl çalışabileceğini gösteren örnek resim [4].

Dişler üzerine etki eden kuvvetler ve küçük açılı profil avantajları Şekil 1-a' da gösterilmektedir. Farklı açıdaki dişe etki eden aynı net kuvvet karşılaştırılarak küçük açılı diş profiline sahip vidada daha az radyal gerilme olduğu gösterilmiştir. Termoplastiklerde, bu tercih edilen bir davranıştır çünkü radyal bileşen, eksenel bileşen diş oluşturma sırasında malzemenin yer değiştirmesine yardımcı olurken, radyal bileşen vidanın "patlamak" isteyen olumsuz çember gerilmelerine katkıda bulunur. Bu fenomenin net sonucu, tasarımcıların daha ince duvarlara sahip vida yuvaları tasarlayabilmeleri ve bunun sonucunda malzeme ve ağırlık azalması olabilir. Radyal olarak indüklenen stresin etkisini ve profilinin nihai tasarımı üzerinde nasıl bir etkisi olabileceğini göstermektedir. Bu resimde (Şekil 1) gösterilen iki aynı ABS plastik

alternatif olarak kabul edilen en popüler mühendislik plastiklerinden biridir [3].

Vida, esas itibarı ile silindirik bir mil üzerine vida profili adı verilen diş şeklinin helis eğrisi boyunca sarılması ile meydana gelir. Helis eğrisi, uzun dik kenarı, üzerine sarılacağı silindirin taban çevresine eşit olan bir dik üçgenin hipotenüsünün, silindir üzerine sarılışı sırasında oluşturduğu eğridir. Dik üçgenin kısa kenarı ise vidanın adımını göstermektedir ve helisin silindir yüzeyini bir defa dolanışındaki yükselme miktarı olarak tanımlanabilir.

Sac vidalarının ana hammaddesi Cq15-Cq22 ( DIN 1654 ) standartlarda olması gerekir. Bu malzemenin kullanımı DIN kalite normunda üretilir. İki veya daha fazla sacın birbirine bağlanmasında kullanım yerine göre sivri uçlu veya küt uçlu vidalar kullanılır. Bu bağlama işleminin sağlıklı olabilmesi için vidanın akma sınırı, burkulma kabiliyeti en üst düzeyde olmalıdır. Sac vidaları geniş bir kullanım alanına sahiptir. Sert plastikler, alüminyum, pirinç, çeşitli levha ve profiller vb. gibi. Bunun için kullanılan malzemeye göre seçim yapılmalıdır. Birleştirme için kullanılacak vidanın vida diş adımı (hatve) büyük olmamalıdır. İyi üretilmeyen sac vidası kullanıldığında istenmeyen zararlar verebilir.

vida yuvası ve aynı diş çapa sahip iki farklı vida olup sağdaki vida, son teknoloji bir diş profiline ve soldaki vida ise geleneksel bir 60° AB diş profiline sahiptir [4].

Plastik vidaları, otomatik montaj işleminin bir parçası olarak uygun imalatlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu vidaların dişleri malzemenin içine daha fazla kesmek üzere tasarlandığından, dışarı çekilmeye karşı ekstra direnç sağlarlar [5]. Metal harici kompozit malzemeleri birleştirmek için yapılan birçok çalışma bulunmaktadır [6-11].

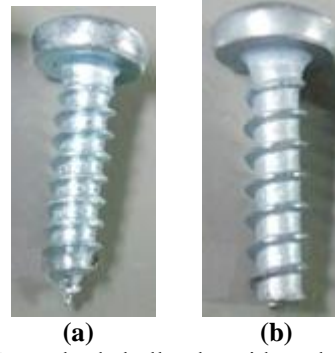
Bu çalışmada endüstriyel mutfak ürünlerinin plastik esaslı kompozit parçalarının montajında kullanılan plastik ve sac vidaların farklı parametreler (üç farklı

sıkma torku (0,5, 0,7 ve 0,9 Nm) ve üç farklı vida çeşidi (V1: 2,9x13 YSB, V2: 2,9x9,5 YSB, V3: 3,5x9,5 YSB) ile gerçekleştirilen deneylerin malzeme (PC+ABS V0) ömrüne etkisinin incelenmesi hedeflenmiştir.

## II. MATERYAL METOD

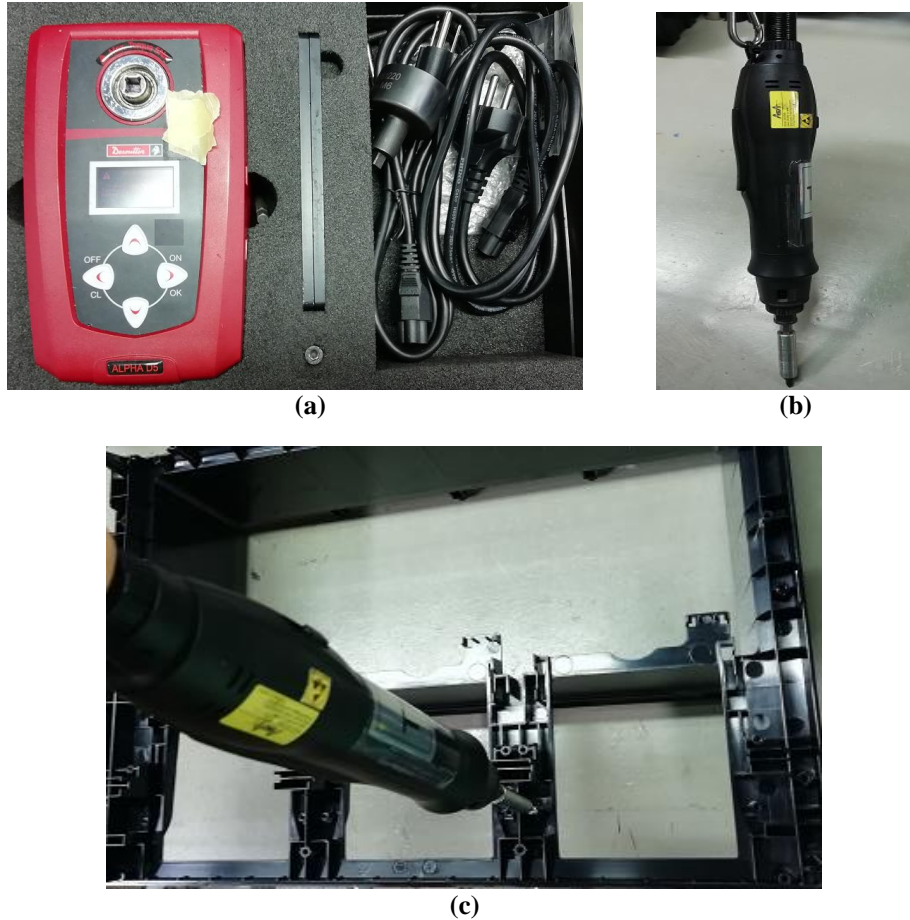
### 2.1. Deneysel Çalışmada Kullanılan Vida Tipleri

Yapılan deneysel çalışmada beyaz eşya sektöründe kullanılan plastik esaslı PC+ABS V0 hammaddeye sahip kompozit ürün numuneleri alınmıştır. Bu numunelerde kullanılan iki farklı türde (sac vidası, plastik vidası) ve üç farklı ölçüdeki (2,9x13 YSB (yıldız silindir başlı), 2,9x9,5 YSB, 3,5x9,5 YSB) vidalar ile üç farklı tork (Nm) değerinde sökmüş ve tekrar sıkılmıştır. Bu şekilde her farklı numune için üç tekrar yapılmıştır. Yapılan deneyler sonrasında ölçülen değerlerin ortalaması alınmıştır. Bu sonuçlar ile farklı vida kullanımının malzeme ömründe (ömür: sök-tak işlemi yapılarak parçanın hasarlanması sonucu kullanılamayacak duruma gelmesi) etkisi araştırılmıştır. Şekil 2’de deneyde kullanılan vida türleri gösterilmektedir.



Şekil 2. Deneylerde kullanılan vida türleri; a) Sac vidası, b) Plastik vidası.

Deneylerde ASA marka elektrikli full otomatik tornavida ve Desoutter marka tork ölçüm cihazı kullanılmıştır. Full otomatik tornavida deneyde belirlenen tork değerine ayarlanarak her çeşit vida için sökme-sıkma testleri yapılmıştır. Deneye ve test cihazlarına ait resimler Şekil 3’ de gösterilmektedir.



Şekil 3. Deney ve test cihazları; a) Desoutter marka tork ölçüm cihazı, b) ASA marka elektrikli full otomatik tornavida, c) Deney düzeneği.

### III. DENEYSEL TASARIM VE OPTİMİZASYON

Deney parametreleri Taguchi  $L_{18}$  ( $2^1 \times 3^2$ ) deney tasarımı yöntemi kullanılarak oluşturulmuş olup parametre ve seviyeleri Tablo 1’ de gösterilmektedir.

**Tablo 1.** Deneysel çalışmada kullanılan parametreler.

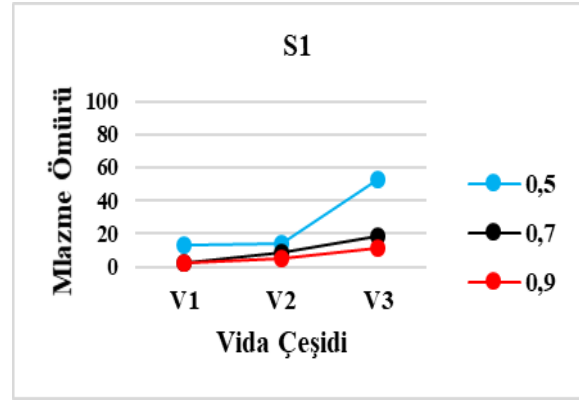
Faktör	Seviyeler	Değerleri	Birim
Vida Türü	2	S1; P2	-
Sıkma Torku	3	0,5; 0,7; 0,9	Nm
Vida Çeşidi	3	V1; V2; V3	-

S1: Saç Vida,  
P2: Plastik Vida,  
V1: 2,9x13 YSB  
V2: 2,9x9,5 YSB,  
V3: 3,5x9,5 YSB

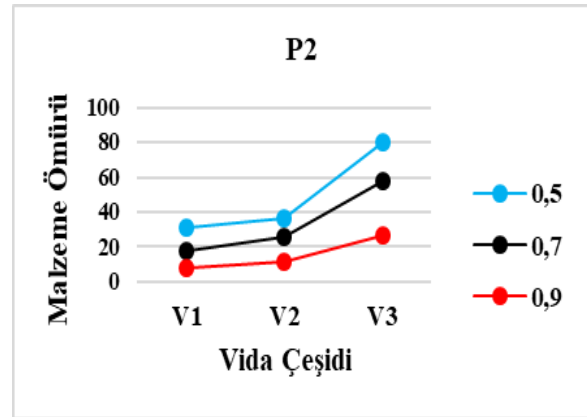
**Tablo 2.** Sac ve plastik vidaların ömür deneyi sonuçları.

Deney No	Vida Türü	Sıkma Torku	Vida Çeşidi	Ömür
1.	S1	0,5	V1	13,33
2.	S1	0,5	V2	14,00
3.	S1	0,5	V3	52,33
4.	S1	0,7	V1	2,33
5.	S1	0,7	V2	8,33
6.	S1	0,7	V3	18,33
7.	S1	0,9	V1	2,33
8.	S1	0,9	V2	5,33
9.	S1	0,9	V3	11,67
10.	P2	0,5	V1	31,00
11.	P2	0,5	V2	36,00
12.	P2	0,5	V3	80,00
13.	P2	0,7	V1	17,33
14.	P2	0,7	V2	25,33
15.	P2	0,7	V3	57,67
16.	P2	0,9	V1	8,33
17.	P2	0,9	V2	11,33
18.	P2	0,9	V3	27,00

Şekil 4’ de vida çeşitliliğinin malzeme ömrü üzerinde etkisi gösterilmiştir. V1 vida türünden V2 vida türüne geçişte malzeme ömrünün bir miktar arttığı görülmüştür. V2 vida türünden V3 vida türüne geçişte vida çapı büyüdükçe malzeme ömründe ciddi iyileşme olduğu (Tablo 2) görülmüştür.



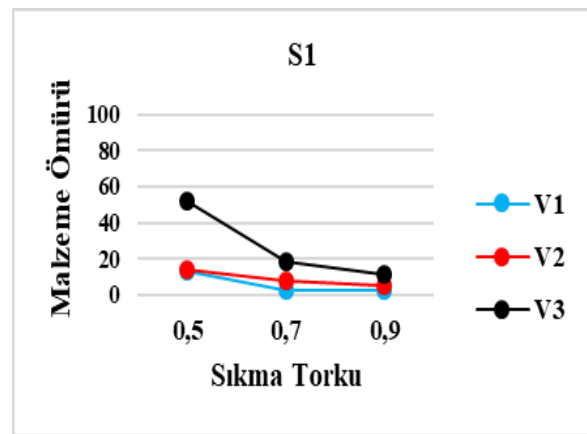
(a)



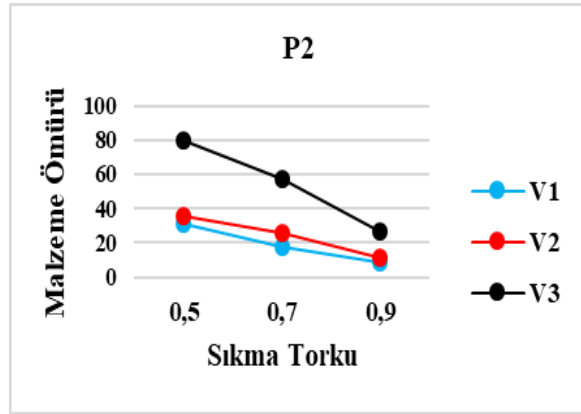
(b)

**Şekil 4. a)** Sac vida çeşitliliğinin malzeme ömür değerleri grafiği, **b)** Plastik vida çeşitliliğinin malzeme ömür değerleri grafiği.

Şekil 5’de vida sıkma torkunun malzeme ömrü üzerinde etkisi gösterilmiştir. Her iki tür vida için sıkma torku malzeme ömrü üzerinde olumsuz etki yapmıştır. Sıkma torku arttıkça malzeme ömrü azalmıştır. Plastik vidası için bu azalma torkla birlikte daha stabil düşmüştür.

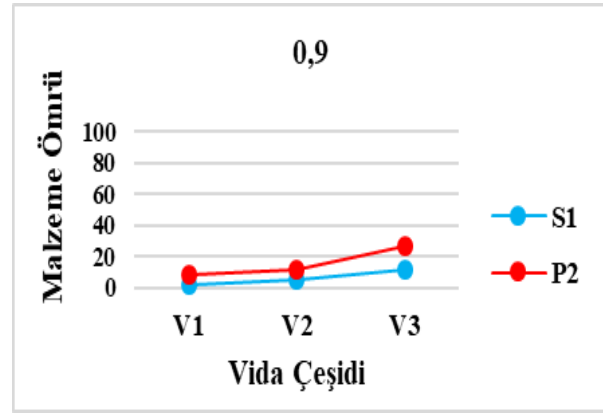


(a)



(b)

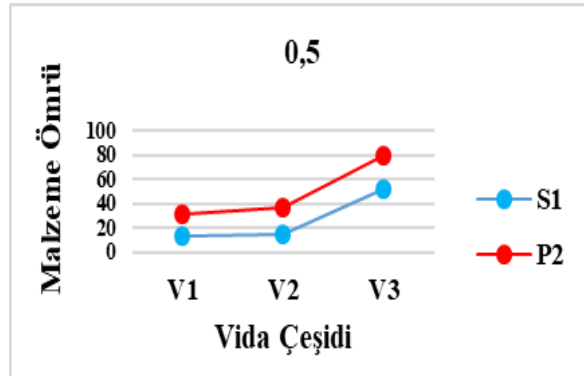
Şekil 5. a) Sac vidalarda farklı tork değerleri için malzeme ömür değerleri grafiği, b) Plastik vidalarda farklı tork değerleri için malzeme ömür değerleri grafiği.



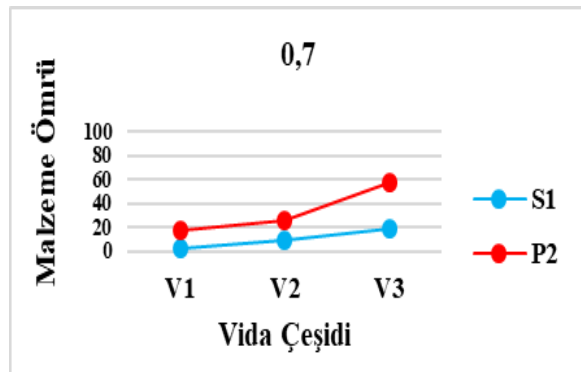
(c)

Şekil 6. a) 0,5 Nm tork değerinde vida çeşitliliğinin malzeme ömür değerleri grafiği, b) 0,7 Nm tork değerinde vida çeşitliliğinin malzeme ömür değerleri grafiği c) 0,9 Nm tork değerinde vida çeşitliliğinin malzeme ömür değerleri grafiği.

Şekil 6'de farklı tork değerlerinde vida çeşitliliğinin malzeme ömrü üzerinde etkisi gösterilmiştir. Üç tork değerinde de vida çeşitliliği ile malzeme ömründe iyileşme olduğu tespit edilmiştir. Tork değerinin artışı ile vida çeşitliliğinin etkisi azalmıştır. Tüm şartlarda plastik vidası kullanımı malzeme ömründe ciddi artışlar sağlamıştır. Bu artış ile montaj ve üretim aşamalarında malzeme hasarlanmaları minimum seviyelerde olacaktır. Bu sayede arızacılık ve üretim aşamalarında hasarlanacak parçaların azalması ile maliyette de iyileşmeler sağlanmış olacaktır.



(a)



(b)

#### 4.1. Taguchi Method

Taguchi yöntemi geleneksel deney tasarımının dikkate almadığı kontrol edilemeyen faktörlerin meydana getirdiği değişkenlerin denetimine izin vermektedir. Taguchi, bu faktörlere karşı kontrol faktörlerinin seviyelerinin performans karakteristiğini ölçmek için amaç fonksiyonu değerlerini sinyal/gürültü (S/N) oranına dönüştürür. S/N oranı, istenilmeyen rastgele gürültü değeri için istenilen sinyal oranı olarak tanımlanmakta olup, deneysel verilerin kalite karakteristiklerini göstermektedir [12]. Ayrıca, kesme parametrelerinin istatistiksel önemini belirlemek için ANOVA uygulanmaktadır. ANOVA ve S/N oranı yardımıyla kesme parametrelerinin optimum kombinasyonu belirlenmektedir [13]. Yüzey pürüzlülüğü için kontrol faktörlerinin her kombinasyonu deney tasarımında ölçülür, kontrol faktörlerinin optimizasyonunda S/N oranları kullanılır. Vida ömrünün uzun olması, ürün kalitesi, maliyeti ve ömrü açısından büyük bir öneme sahiptir [14].

S/N oranlarının hesaplanmasında; karakteristik tipine bağlı nominal en iyidir, en büyük en iyidir, en küçük en iyidir metotları kullanılır. Eşitlik (2)'te "en büyük en iyidir", Eşitlik (3)'te ise "en küçük en iyidir" amaç fonksiyonu verilmiştir [15].

$$\text{En büyük en iyi: } \frac{S}{N} = 10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (1)$$

$$\text{En küçük en iyi: } \frac{S}{N} = 10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (2)$$

Deneysel çalışmada vidaların ömürlerinin en uzun gitmesi istendiğinden en büyük en iyidir amaç fonksiyonunun kullanılması gerekmektedir.



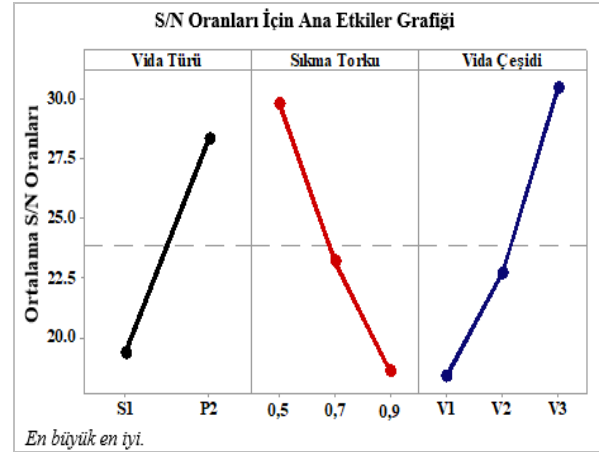
#### 4.2. Sinyal – Gürültü Analizi (S/N)

Kontrol faktörlerinin optimizasyonunda Sinyal/Gürültü kullanılır. Tablo 2’de elde edilen verilerin ve bu verilerin analizi ile elde edilen ömür değerleri için ideal S/N oranları Tablo 3’de gösterilmektedir.

**Tablo 3.** Sinyal gürültü oranları için yanıt tablosu.

Seviye	Vida Türü	Sıkma Torqu	Vida Çeşidi
1	19,34	<b>29,80</b>	18,37
2	<b>28,36</b>	23,19	22,69
3	-	18,56	<b>30,48</b>
Delta	9,02	11,24	12,11
Rank	3	2	1

Tablo 3 incelendiğinde en büyük en iyi amaç fonksiyonuna göre analizler gerçekleştirildiğinde ömür için en ideal parametreler, vida türü için **Seviye 2**, sıkma torqu için **Seviye 1** ve vida çeşidi için **Seviye 3** olarak belirlenmiş olup grafik olarak Şekil 7’de gösterilmiştir. Benzer şekilde çalışmalarda vida tasarımının kompozit malzemelerin bağlanmasındaki etkisi gösterilmiştir [7,10].



**Şekil 7.** En ideal ömür değerleri için ana etkiler grafiği.

#### 4.3. ANOVA

ANOVA deneysel çalışmada kullanılan kontrol faktörlerinin birbirleri ile etkileşimlerini belirlemek için kullanılan istatistiksel bir yöntemdir [14]. Bu çalışmada ömür deneyi için kullanılan parametrelerin bir birleri ile etkileşimlerini incelemek için ANOVA kullanılmıştır. Ömür deneyleri için ANOVA sonuçları Tablo 4’de gösterilmiştir. Bu çalışmada gerçekleştirilen analiz %95 güven ve %5 anlamlılık seviyesinde gerçekleştirilmiştir [17].

**Tablo 4.** Anova varyans analizi.

Kaynak	DF	Seq SS	Katkı %	Adj SS	Adj MS	F-Değer	P-Değer
Regresyon	4	6564	85,78%	6564	1640,91	19,61	0,000020
Vida Türü	1	1531	20,01%	1531	1530,89	18,29	0,000901
Sıkma Torqu	1	2151	28,11%	2151	2151,15	25,70	0,000215
Vida Çeşidi	2	2882	37,66%	2882	1440,80	17,22	0,000222
Hata	13	1088	14,22%	1088	83,69		
Total	17	7652	100%				

**Rq:%85,78**

Tablo 4’de anova varyans analizi sonuçları incelendiğinde vida ömründe en etkili parametrenin % **37,66** ile vida çeşidi, ikinci etkili parametrenin % **28,11** ile vida türü ve en düşük etkinin ise % **20,01** ile vida türü olarak oluştuğu belirlenmiştir.

#### 4.4. Regresyon Analizi

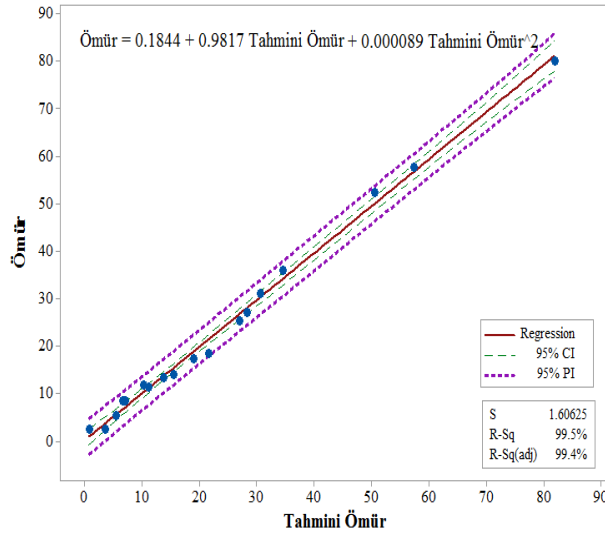
Regresyon analizleri, bir bağımlı değişken ile bir veya daha fazla bağımsız değişken arasındaki ilişkiye sahip çeşitli değişkenlerin modellenmesi ve analizi için gerçekleştirilir [14]. Bu çalışmada vida türü ve çeşidine bağlı ömürleri regresyon analizi ile

hesaplanmıştır. Tahmini eşitlikler lineer olarak hesaplanarak Tablo 5’ de gösterilmektedir.

**Tablo 5.** Vida ömürleri için tahmini eşitlikler.

Vida Türü	Vida Çeşidi	Formüller
S1	V1	Ömür = 50,1 – 66,9 Sıkma Torku
S1	V2	Ömür = 54,4 – 66,9 Sıkma Torku
S1	V3	Ömür = 78,8 – 66,9 Sıkma Torku
P2	V1	Ömür = 68,5 – 66,9 Sıkma Torku
P2	V2	Ömür = 72,8 – 66,9 Sıkma Torku
P2	V3	Ömür = 97,3 – 66,9 Sıkma Torku

Deneyel sonuçlardan elde edilen değerlerin CI (güven aralığı) dahilinde olup olmadığını belirlemek için ikinci dereceden regresyon analizi uygulandı. Bu analiz, deney sonuçları ile tahmini (PI) deney sonuçları arasındaki ilişkiyi belirlemek için Taguchi optimizasyon metodu kullanılarak yapıldı. Sonuçlar değerlendirildiğinde, regresyon analizinde tahmini değerlerin CI sınırında (% 95) olduğu tespit (Şekil 8) edildi.



**Şekil 8.** Gerçek ve tahmini ömür deneyleri grafiği.

## V. SONUÇLAR

Bu çalışmada; Plastik esaslı kompozit malzeme olan PC+ABS V0 hammaddesi ile üretilmiş endüstriyel mutfak ürünlerinde kullanılan bir parçanın, DIN 7981 standartlarına uygun üretilen sac vidaları ve özel tasarım plastik vidaları ile farklı işleme parametreleri ile deneyler gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- En iyi ömür sonucunu plastik vidası için 0,5 sıkma torkunda V3 kodlu vida çeşidi ile oluştuğu
- En kötü ömür sonucunu ise 0,7 ve 0,9 sıkma torkunda V1 kodlu vida türü ile gerçekleştiği
- Sinyal gürültü oranları incelendiğinde en ideal ömürde kullanılacak parametrenin vida türü için Seviye 2, sıkma torku için Seviye 1 ve vida çeşidi için Seviye 3 olarak belirlendiği,
- Anova varyans analizi sonuçları incelendiğinde, vida ömründe en etkili parametrenin % 37,66 ile vida çeşidi, ikinci etkili parametrenin %28,11 ile vida türü ve en düşük etkinin ise %20,01 ile vida türü olarak oluştuğu tespit edilmiştir.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmada hiçbir yardımı esirgemeyen Silverline Endüstri A.Ş.'ye ve çalışanlarına teşekkür ederiz.

## KAYNAKLAR

- [1] Plastik Kompound ve Alaşımalar, (2016). [Online]. Erişim: <http://rustempolat.com/makale-detay/plastik-kompound-ve-alasimlar>
- [2] Plastic Compound, (2019). [Online]. Erişim: <https://www.ngc-nordic.com/plastic-compound/>
- [3] Chiu H. T., Huang J. K., Kuo M. T. and Huang J. H., "Characterisation of PC/ABS blend during 20 reprocessing cycles and subsequent functionality recovery by virgin additives" Journal of Polymer Research, 25: 124, 2018.
- [4] Claus L. and Weitzel S., "Self-Tapping Fasteners for Lightweight Designs," SAE Technical Paper 2014-01-0785, 2014.
- [5] Thread Forming Screws for Plastic, (2019). [Online]. Erişim: <https://www.fastenright.com/products/general-fixings/thread-forming-screws>
- [6] Maleki S., Kazemi Najafi S., Ebrahimi G. and Ghofrani M., "Withdrawal resistance of screws in structural composite lumber made of poplar" Construction and Building Materials 142, 499–505, 2017.
- [7] Smardzewski J., İmirzi H., Lange J. and Podskarbi M., "Assessment method of bench joints made of wood-based composites" Composite Structures 123, 123–131, 2015.
- [8] Chen Y., Zhu S., Guo Y., Liu S., Tu D. and Fan H., "Investigation on withdrawal resistance of screws

in reconstituted bamboo lumber” WOOD RESEARCH 61,799-810, 2016.

[9] İlçe A. C., Budakçı M., Özdemir S., and Akkuş M., “Analysis of Usability in Furniture Production of Wood Plastic Laminated Board”, BioResources 10(3), 4300-4314, 2015.

[10] Pereira A. A. C. and D’Almeida J. R. M., “Geometric Parameters Influence on the Screw Withdrawal Strength of Coir Agglomerates” Journal Of Natural Fibers, 1544-0478, 2019.

[11] Ozcifci A., “The effects of pilot hole, screw types and layer thickness on the withdrawal strength of screws in laminated veneer lumber”, Materials and Design, 30, 2355–2358, 2009.

[12] Kara F., “Optimization of surface roughness in finish milling of AISI P20+S plastic-mold steel” Materials and Technology vol.52 (2), pp. 195, 2018.

[13] Nas E., Argun K. and Zurnacı E., “Invesigation of Effect on Surface Roughness of Parameters at Machining With Graphide Electrode in EDM of AISI

1.2738 Steel” Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 6: pp 574, 581.

[14] Nas E. and Gökkaya H., "Experimental and statistical study on machinability of the composite materials with metal matrix Al/B4C/Graphite", Metallurgical and Materials Transactions A, vol. 48, pp. 5059-5067, 2017.

[15] Nas, E. and Öztürk, B., “Optimization of surface roughness via the Taguchi method and investigation of energy consumption when milling spheroidal graphite cast iron materials,” Mater. Test., Vol. 60, No. 5, pp. 519-524, 2018.

[16] Friedrich C., “Fastening of light weight components with elements made of aluminum”, Sae Technical, 01-1118, 2000.

[17] Paiva JHFG A.P., Peruchi R.S., Leme R.C. and Balestrassi P.P., “A multivariate robust parameter optimization approach based on principal component analysis with combined arrays”, Comput Ind Eng, 74:186–198, (2014).

## Inter-Rater Agreement under Stratified Random Sampling Scheme

*Tabakalı Örnekleme Şeması Altında Değerlendiriciler Arası Uyum*

Ayfer Ezgi YILMAZ<sup>1</sup> , Serpil AKTAŞ ALTUNAY<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Hacettepe University, Department of Statistics, Beytepe, Ankara- Turkey.

### Abstract

Kappa coefficient is a popular statistic to measure the agreement between the classifications of two raters. The estimation of the coefficient and its variance are approximately satisfied by a simple random sampling method. To get more efficient results for confidence interval estimation of kappa, stratified random sampling method can also be used, alternatively. In this study, a bootstrap method under stratified sampling is suggested to use to estimate the confidence interval of the kappa coefficient. The results are discussed over three data sets.

**Keywords:** agreement, bootstrap, kappa coefficient, stratified random sampling.

### Öz

Kappa katsayısı iki değerlendiricinin sınıflandırmaları arasındaki uyumu ölçen popüler bir istatistiktir. Kappa katsayısı ve varyansının tahmini yaklaşık olarak basit rasgele örnekleme yöntemiyle elde edilir. Kappa istatistiğinin güven aralığı tahmininde daha etkin sonuçlar elde edebilmek için tabakalı rasgele örnekleme yöntemi de kullanılabilir. Bu çalışmada, kappa katsayısının güven aralığı tahmin etmek için tabakalı rasgele örnekleme seçimi altında bir bootstrap yöntemi önerilmiştir. Sonuçlar üç veri kümesi üzerinden tartışılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** uyum, bootstrap, kappa katsayısı, tabakalı rasgele örnekleme.

## I. INTRODUCTION

The cross-classification tables where the row and column variables have the same categories are called square contingency tables. These tables are also called  $R \times R$  tables and the variables of these tables are dependent. In medical or behavioral sciences, the tables occur when objects rated independently by two raters or twice by the same rater.

For these kinds of tables, the agreement between the classifications of raters (or time points) is investigated. Agreement coefficients are used to measure the level of agreement. Cohen [1] kappa coefficient as a chance-corrected measure of agreement is one of the most used statistics in literature.

In this study, we focused on estimating the confidence interval for the kappa coefficient with the bootstrap method under stratified random sampling. The bootstrap technique allows the researchers to conclude from data without any assumptions about the data or the statistic being calculated. Sometimes it is needed to estimate the precision of this statistic by resampling techniques such as bootstrap to understand its confidence interval. All of the discussed content is illustrated in three illustrative examples.

Cohen's kappa coefficient is cited in Section 2. Kappa coefficient under stratified random sampling is reviewed in Section 3. Section 4 presents the illustrative examples, followed by conclusions in Section 5.

## II. COHEN'S KAPPA COEFFICIENT

Let  $N_{ij}$  denote the number of observations and  $N$  shows the total number of observations. The cell probabilities are  $P_{ij} = N_{ij} / N$ . For each rater, the category marginal frequencies sum to one. Let  $N_i$  indicates the  $i$ th row total and  $M_j$  indicates the  $j$ th column total, for each rater.  $P_{i.} = N_i / N$  indicates the  $i$ th row total probability and  $P_{.j} = M_j / N$  indicates the  $j$ th column total probability in an  $R \times R$  contingency table. Table 1 represents an  $R \times R$  contingency table.

**Table 1.**  $R \times R$  contingency table with  $N$  observations

Rater 1	Rater 2				Total
	1	2	...	R	
1	$N_{11}$	$N_{12}$	...	$N_{1R}$	$N_1$
2	$N_{21}$	$N_{22}$	...	$N_{2R}$	$N_2$
...	...	...	...	...	...
R	$N_{R1}$	$N_{R2}$	...	$N_{RR}$	$N_R$
Total	$M_1$	$M_2$	...	$M_R$	$N$

Inter-rater agreement is a very important context in many fields. To analyze the inter-rater agreement, the kappa coefficient is suggested by Cohen [1]. The formulas are based on multinomial sampling, which is approximately satisfied by simple random sampling. The kappa coefficient  $\hat{\kappa}$  is

$$\hat{\kappa} = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e} \tag{1}$$

where  $P_o$  is the observed agreement,

$$P_o = \sum_{i=1}^R P_{ii}, \tag{2}$$

and  $P_e$  is the proportion agreement expected by chance,

$$P_e = \sum_{i=1}^R P_i \cdot P_{.i}. \tag{3}$$

The kappa coefficient can be rewritten with respect to the observed frequencies,

$$\hat{\kappa} = \frac{N \sum_{i=1}^R N_{ii} - \sum_{i=1}^R N_i M_i}{N^2 - \sum_{i=1}^R N_i M_i}. \tag{4}$$

Kappa coefficient changes between -1 to 1. When there is a complete agreement between raters  $\kappa = 1$  and there is no agreement between raters  $\kappa = 0$ . Negative values of kappa indicate agreement less than chance.

The approximate asymptotic variance of  $\kappa$  is [2]

$$\hat{V}(\kappa) = \frac{A + B - C}{N(1 - P_e)^2}, \tag{5}$$

where,

$$A = \sum_{i=1}^R P_{ii} (1 - (P_{.i} + P_{i.})(1 - \kappa))^2,$$

$$B = (1 - \kappa)^2 \sum_{i \neq j} P_{ij} (P_{.i} + P_{.j})^2, \tag{6}$$

$$C = \kappa^2 - P_e (1 - \kappa)^2.$$

The confidence interval of  $\kappa$  is

$$\kappa \pm Z_{\alpha/2} \times \sqrt{\hat{V}(\kappa)} \tag{7}$$

where  $Z_{\alpha}$  is the percentile from a standard normal distribution appropriate for the desired confidence probability [1].

Besides simple random sampling, estimation for  $\kappa$  and its variance under stratified random sampling will be focused in the next section.

### III. KAPPA COEFFICIENT UNDER STRATIFIED RANDOM SAMPLING

Unlike the assumption of simple random sampling scheme, Stehman [3] suggested an estimator and variance estimator for estimating the kappa coefficient under stratified random sampling (*KS*). Stehman [3]'s simulation results showed that the estimators have small bias, and confidence intervals perform well, often even at relatively small sample sizes, when compare to the simple random sampling. For the calculation of *KS*, rater 1 in Table 1 is treated as a stratum and, rater 2 as reference. The reason for this assumption is explained by Stehman [3] as

*"Stratified sampling [4] is a potentially useful design for accuracy assessment. In particular, if strata are constructed on the basis of the categories of strata, stratified sampling permits control over the number of sample observations in category. This guarantees that a minimum sample size can be selected in each stratum or category."*

For a stratified sampling design, the row totals  $N_i$  are assumed as known, but the column totals,  $M_j$  are assumed as unknown, and  $N_{ij}$  are also unknown. In stratified random sampling, a simple random sample of observations selected in each stratum.  $n_i$  in Table 2 are the stratum sample sizes which is selected from  $N_i$  observations for  $i = 1, 2, \dots, R$ .

**Table 2.**  $R \times R$  contingency table under stratified sampling

Rater 1	Rater 2				Total
	1	2	...	R	
1	$n_{11}$	$n_{12}$	...	$n_{1R}$	$n_1$
2	$n_{21}$	$n_{22}$	...	$n_{2R}$	$n_2$
...	...	...	...	...	...
R	$n_{R1}$	$n_{R2}$	...	$n_{RR}$	$n_R$
					$n$

The row totals  $n_i$  are fixed by the stratified design, but  $n_{ij}$  depends on the observed sample. In general  $n$  sample is selected from  $N$  observations. Stehman [3]'s estimator of  $\kappa$  for stratified sampling is

$$\widehat{KS} = \frac{N \sum_{i=1}^R \widehat{N}_{ii} - \sum_{i=1}^R N_i \widehat{M}_i}{N^2 - \sum_{i=1}^R N_i \widehat{M}_i}, \tag{8}$$

where  $\widehat{N}_{ii} = \frac{N_i}{n_i} n_{ii}$  is an unbiased estimator of  $N_{ii}$ . For any column  $j = 1, 2, \dots, R$ ,  $\widehat{M}_j = \sum_{i=1}^R \frac{N_i}{n_i} n_{ij}$  is an unbiased estimator of  $M_j$ .  $KS$  is not an unbiased estimator of  $\kappa$ , but it is a consistent estimator and the bias of  $KS$  is shown to be small in the populations examined in the subsequent empirical study [3]. The variance of  $KS$  is

$$\widehat{u}_i = \frac{1}{n_i} \left\{ n_{ii} \left( \frac{N}{N^2 - \widehat{c}} \right) + \frac{N(\widehat{D} - N)}{(N^2 - \widehat{c})^2} \sum_{j=1}^R n_{ij} N_j \right\}, \tag{9}$$

$$u_i^2 = n_{ii} \left\{ \frac{N}{N^2 - \widehat{c}} + \frac{N_i N(\widehat{D} - N)}{(N^2 - \widehat{c})^2} \right\}^2 + N^2 \frac{(\widehat{D} - N)^2}{(N^2 - \widehat{c})^4} \sum_{j=1}^R n_{ij} N_j^2, \tag{10}$$

$$\widehat{V}_i = \frac{u_i^2 - n_i \widehat{u}_i^2}{n_i - 1}, \tag{11}$$

$$\widehat{V}(KS) = \sum_{i=1}^R N_i^2 (1 - f_i) \widehat{V}_i / n_i, \tag{12}$$

where  $\widehat{D} = \sum_{i=1}^R N_{ii}$ ,  $\widehat{c} = \sum_{i=1}^R N_i \widehat{M}_i$ , and the sampling fraction in stratum  $i$  is  $f_i = n_i / N_i$ . For strata in which  $n_i$  is small relative to  $N_i$ , the finite population correction factor  $(1 - f_i)$  may be ignored. A confidence interval for  $KS$  is constructed using  $\widehat{KS} \pm Z_{\alpha/2} \times \sqrt{\widehat{V}(KS)}$ .

Stehman [3] calculated  $KS$  coefficient under equal allocation of samples to strata which is all  $n_i$ 's are equal. In this study, we used the constraint in Equation (13) to get a stratified sampling.

$$\frac{N_i}{N} = \frac{n_i}{n} \quad i = 1, 2, \dots, R \tag{13}$$

#### IV. ILLUSTRATIVE EXAMPLES

Three real-life data sets are utilized to illustrate the performance of the kappa coefficient under simple and stratified random samples.  $3 \times 3$ ,  $4 \times 4$ , and  $5 \times 5$  contingency tables are used. The bootstrap estimations, the bootstrap estimation of the variances,

and the bootstrap estimates of 95% confidence intervals are calculated based on 10,000 replications [6,7].

In the illustrative examples,  $\widehat{\kappa}$  indicates the estimates of kappa coefficient and  $\widehat{V}(\kappa)$  indicates its variance.  $\widehat{\kappa}_B$  and  $\widehat{KS}$  indicate the bootstrap estimates of  $\widehat{\kappa}$  under simple and stratified random sampling, respectively.  $\widehat{V}(\kappa_B)$  and  $\widehat{V}(KS)$  indicate the bootstrap estimation of their variance.  $\widehat{V}(\widehat{\kappa}_B)$  and  $\widehat{V}(\widehat{KS}_B)$  are the variances of bootstrap estimation of  $\widehat{\kappa}_B$  and  $\widehat{KS}$ , respectively.  $\widehat{LB}$  and  $\widehat{UB}$  are the 95% lower and upper bounds of the estimated kappas.

#### 4.1. Diagnosis of Diabetes

Table 3 represents a  $3 \times 3$  contingency table, which is taken from Jiménez-Navarro et al. [8] which refers to the concordance oral glucose tolerance test in patients undergoing percutaneous coronary revascularization.

**Table 3.** Concordance oral glucose tolerance test in patients undergoing percutaneous coronary revascularization

Oral Glucose Tolerance Test at Revascularization	Oral Glucose Tolerance Test at 1 Month			$N_i$
	A	B	C	
A: Normal	17	2	3	22
B: Glucose Intolerance	22	10	4	36
C: Diabetes Mellitus	10	11	9	30
				88

Estimated kappa coefficient, its variance, lower, and upper bounds of the confidence interval of diagnosis of diabetes data are shown in Table 4. There is a "slight agreement" between test results [9].

**Table 4.** Estimated kappa coefficient of diagnosis of diabetes data

$\widehat{\kappa}$	$\widehat{V}(\kappa)$	$\widehat{LB}$	$\widehat{UB}$
0.146	0.0048	0.0108	0.2812

Tables 5 and 6 show bootstrap estimates of  $\kappa$  and  $KS$  and their variance, lower, and upper bounds of 95% confidence intervals, and the biases. The sample sizes are taken as 30, 50, 70, and 87. When the results are compared, the bootstrap estimation of variance for  $KS$  is smaller than the variance for  $\kappa$  for all considered sample sizes. The variances of bootstrap estimation of  $KS$  are found smaller than  $\kappa$ 's. When the bootstrap results are compared to the classical estimation of  $\kappa$ 's results, the bootstrap estimation of the variance of  $\kappa$  is smaller than the variance of classical estimation of  $\kappa$  for  $n = 87$ . However, this value of sample size is  $n = 50$  and the variances gradually decrease with the increasing sample sizes for  $KS$ .

**Table 5.** The bootstrap estimation of  $\hat{\kappa}$ ,  $\hat{V}(\kappa)$ , 95% CI, and the biases under simple random sampling for diagnosis of diabetes data

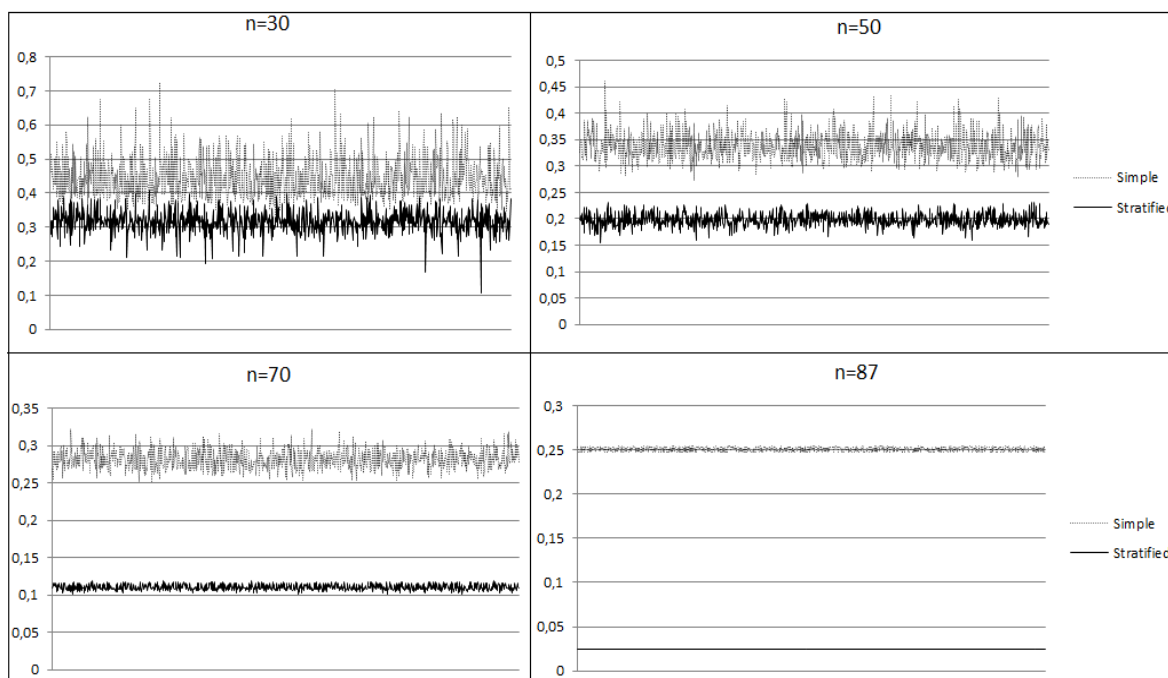
$n$	$\hat{\kappa}_B$	$\hat{V}(\hat{\kappa}_B)$	$\hat{V}(\kappa_B)$	$\hat{LB}$	$\hat{UB}$	Bias	
						$\hat{\kappa}_B$	$\hat{V}(\kappa_B)$
30	0.1445	0.0093	0.0132	-0.0785	0.3675	-0.0015	0.0084
50	0.1446	0.0037	0.0074	-0.0238	0.3131	-0.0014	0.0027
70	0.1462	0.0013	0.0052	0.0054	0.2870	0.0002	0.0004
87	0.1459	0.0001	0.0041	0.0203	0.2716	-0.0001	-0.0007

**Table 6.** The bootstrap estimation of  $\hat{KS}$ ,  $\hat{V}(KS)$ , 95% CI, and the biases under stratified random sampling for diagnosis of diabetes data

$n$	$\hat{KS}$	$\hat{V}(\hat{KS}_B)$	$\hat{V}(KS)$	$\hat{LB}$	$\hat{UB}$	Bias	
						$\hat{KS}$	$\hat{V}(KS)$
30	0.1463	0.0090	0.0066	-0.0120	0.3045	0.0003	0.0018
50	0.1456	0.0035	0.0025	0.0468	0.2443	-0.0004	-0.0022
70	0.1461	0.0011	0.0008	0.0910	0.2012	0.0001	-0.0040
87	0.1459	0.0000	0.0000	0.1334	0.1583	-0.0001	-0.0047

The widths of the 95% confidence intervals of  $\kappa$  and  $KS$  are calculated and summarized in Figure 1. For all sample sizes, the widths of confidence interval (CI) for  $KS$  are narrower than the widths of CI for  $\kappa$ . The

deviation of widths for  $KS$  is also smaller. While the sample size increases, the difference between the widths of these two coefficients increases.



**Figure 1.** The widths of the 95% CI for  $\kappa$  and  $KS$  for diagnosis of diabetes data

**4.2. Left Eye-Right Eye**

The unaided distance vision data in Table 7 is taken from Stuart [10]. Data on unaided distance vision of 3242 men employed in Royal Ordnance factories in

Britain from 1943 to 1946 are used. From the estimated  $\kappa$  in Table 8, there is a “moderate agreement” between left-right eye grades [9].

**Table 7.** Unaided distance vision data of 3242 men in Britain

Right Eye Grade	Left Eye Grade				$N_i$
	Best	Second	Third	Worst	
Best	821	112	85	35	1053
Second	116	494	145	27	782
Third	72	151	583	87	893
Worst	43	34	106	331	514
					3242

**Table 8.** Estimated kappa coefficient of left-right eye data

$\hat{\kappa}$	$\hat{V}(\kappa)$	$\hat{LB}$	$\hat{UB}$
0.574	0.0001	0.5524	0.5956

**Table 9.** The bootstrap estimation of  $\hat{\kappa}$ ,  $\hat{V}(\kappa)$ , 95% CI, and the biases under simple random sampling for left eye-right eye data

$n$	$\hat{\kappa}_B$	$\hat{V}(\hat{\kappa}_B)$	$\hat{V}(\kappa_B)$	$\hat{LB}$	$\hat{UB}$	Bias	
						$\hat{\kappa}_B$	$\hat{V}(\kappa_B)$
50	0.5711	0.0079	0.0069	0.4090	0.7332	-0.0029	0.0068
100	0.5717	0.0038	0.0034	0.4570	0.6863	-0.0023	0.0033
200	0.5738	0.0019	0.0017	0.4927	0.6550	-0.0002	0.0016
500	0.5738	0.0007	0.0007	0.5224	0.6251	-0.0002	0.0006
1000	0.5744	0.0003	0.0003	0.5380	0.6107	0.0004	0.0002
2000	0.5744	0.0001	0.0002	0.5488	0.6001	0.0004	0.00005

**Table 10.** The bootstrap estimation of  $\hat{KS}$ ,  $\hat{V}(KS)$ , 95% CI, and the biases under stratified random sampling for left eye-right eye data

$n$	$\hat{KS}_B$	$\hat{V}(\hat{KS}_B)$	$\hat{V}(KS)$	$\hat{LB}$	$\hat{UB}$	Bias	
						$\hat{KS}_B$	$\hat{V}(KS)$
50	0.4619	0.0059	0.0038	0.3417	0.5818	-0.1121	0.0037
100	0.4635	0.0029	0.0019	0.3793	0.5477	-0.1105	0.0017
200	0.4609	0.0014	0.0009	0.4023	0.5195	-0.1131	0.0008
500	0.4629	0.0005	0.0003	0.4277	0.4980	-0.1111	0.0002
1000	0.4615	0.0002	0.0001	0.4390	0.4839	-0.1125	0.0001
2000	0.4621	0.0001	0.00003	0.4503	0.4740	-0.1119	-0.00008

The bootstrapping results are shown in Tables 9 and 10. The sample sizes are taken as: 50, 100, 200, 500, 1000, and 2000. When the results in Tables 9 and 10 are compared, the bootstrap estimation of  $KS$  is smaller than  $\kappa$  for all sample sizes. The bootstrap estimations of variance and the variance values of bootstrap estimations of  $KS$  are also smaller than  $\kappa$ 's results. When the bootstrap results are compared to the classical estimation of  $\kappa$ 's results, the bootstrap estimation of the variance of  $\kappa$  is greater than the variance of classical estimation of  $\kappa$  for all sample sizes. However,  $\hat{V}(KS)$  is smaller than the classical estimation of  $\hat{V}(\kappa)$  on and after  $n = 1000$ . The widths of the 95% CI for  $\kappa$  and  $KS$  are calculated and summarized in Figure 2. The results are similar to Figure 1.



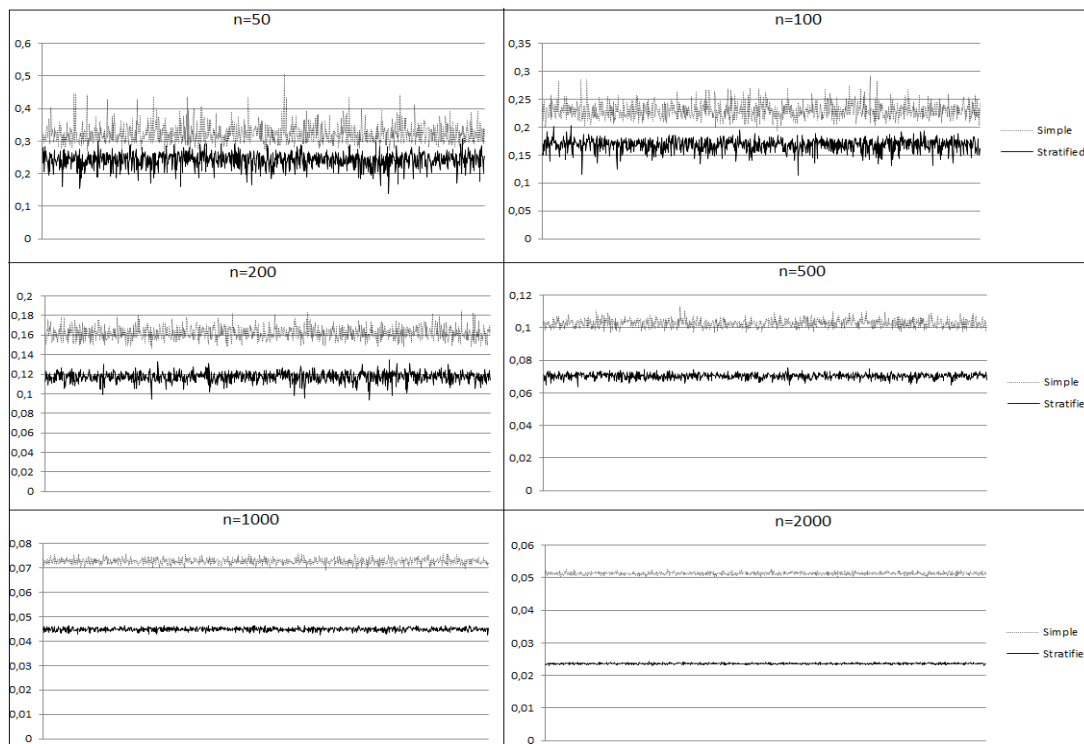


Figure 2. The widths of the 95% CI for  $\kappa$  and  $KS$  for left eye-right eye data

4.3. Blight Data

Table 11 shows a  $5 \times 5$  table with 9660 observations which are generated randomly by Stehman [3]. From the estimated  $\kappa$  in Table 12, there is a substantial agreement” between strata and reference [9].

Table 11. Blight data

Strata	Reference					$N_i$
	1	2	3	4	5	
1	4440	0	30	30	30	4530
2	30	1500	180	0	0	1710
3	240	450	1170	180	0	2040
4	60	90	210	750	30	1140
5	0	0	30	30	180	240
						9660

Table 12. Estimated kappa coefficient of blight data

$\hat{\kappa}$	$\hat{V}(\kappa)$	$LB$	$UB$
0.754	0.00003	0.7442	0.7638

The bootstrapping results are shown in Tables 13 and 14. The sample sizes are taken as 150, 500, 1000, 2000, 3000, and 5000. The bootstrapping results are similar to previous tables. The bootstrap estimation, the variance values of bootstrap estimations, and bootstrap estimations of the variance of  $KS$  are smaller than  $\kappa$  for all considered sample sizes. When the bootstrap results are compared to the classical estimation of  $\kappa$ 's results, the bootstrap estimation of the variance of  $\kappa$  is greater than the variance of classical estimation of  $\kappa$  for all sample sizes. However,  $\hat{V}(KS)$  is smaller than the classical estimation of  $\hat{V}(\kappa)$  on and after  $n = 3000$ .

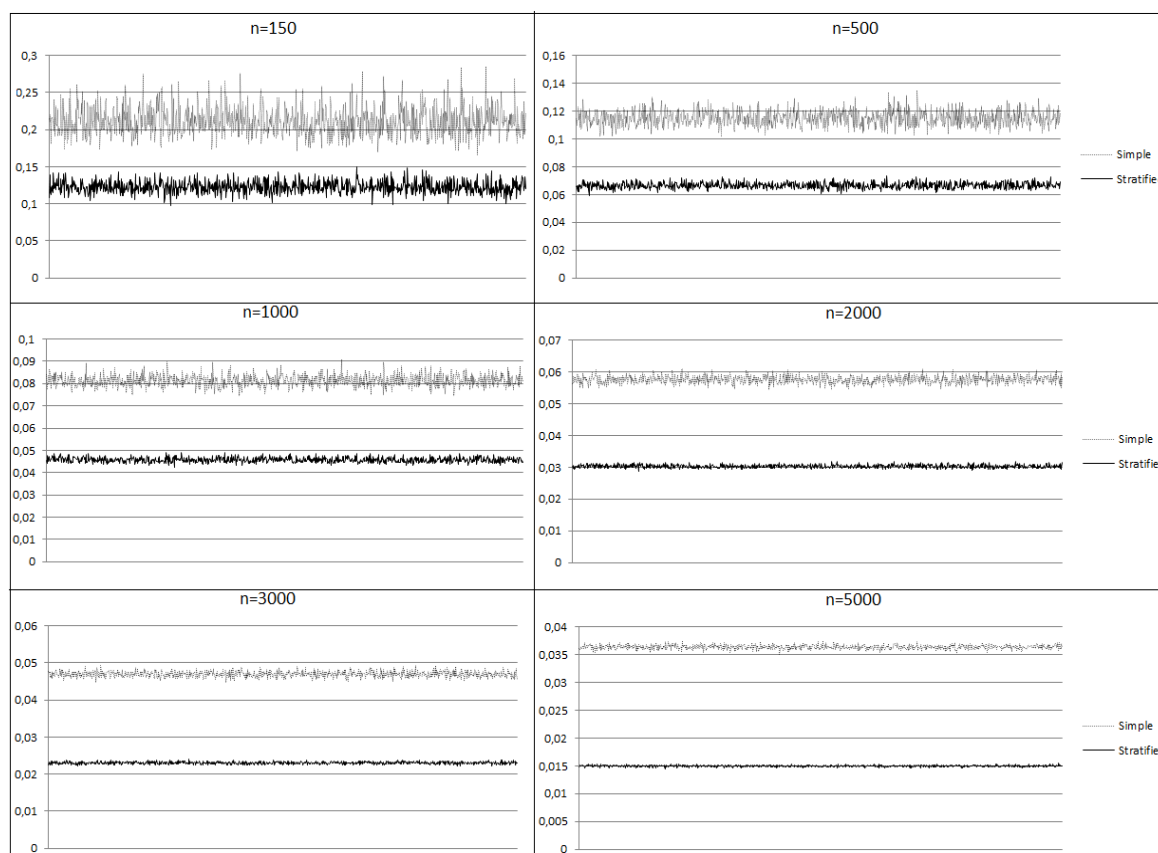
The widths of the 95% CI for  $\kappa$  and  $KS$  are calculated and summarized in Figure 3. The results are similar to Figures 1 and 2.

Table 13. The bootstrap estimation of  $\hat{\kappa}$ ,  $\hat{V}(\kappa)$ , 95% CI, and the biases under simple random sampling for blight data

$n$	$\hat{\kappa}_B$	$\hat{V}(\hat{\kappa}_B)$	$\hat{V}(\kappa_B)$	$LB$	$UB$	Bias	
						$\hat{\kappa}_B$	$\hat{V}(\kappa_B)$
150	0.7532	0.0018	0.0029	0.6479	0.8585	-0.0008	0.0029
500	0.7539	0.0005	0.0009	0.6964	0.8114	-0.0001	0.0008
1000	0.7548	0.0003	0.0004	0.7140	0.7955	0.0008	0.0004
2000	0.7543	0.0001	0.0002	0.7256	0.7831	0.0003	0.0002
3000	0.7544	0.0001	0.00014	0.7309	0.7779	0.0004	0.00012
5000	0.7545	0.0000	0.00008	0.7363	0.7726	0.0005	0.00006

**Table 14.** The bootstrap estimation of  $\widehat{\kappa S}$ ,  $\widehat{V}(\kappa S)$ , 95% CI, and the biases under stratified random sampling for blight data

n	$\widehat{\kappa S}$	$\widehat{V}(\widehat{\kappa S}_B)$	$\widehat{V}(\kappa S)$	$\widehat{LB}$	$\widehat{UB}$	Bias	
						$\widehat{\kappa S}$	$\widehat{V}(\kappa S)$
150	0.6390	0.0010	0.0001	0.5776	0.7005	-0.1150	0.0001
500	0.6414	0.0003	0.0003	0.6081	0.6747	-0.1126	0.0003
1000	0.6402	0.0001	0.0001	0.6173	0.6630	-0.1138	0.0001
2000	0.6402	0.0001	0.00006	0.6250	0.6554	-0.1138	0.00003
3000	0.6400	0.0000	0.00003	0.6285	0.6516	-0.1140	0.00001
5000	0.6404	0.0000	0.00001	0.6329	0.6479	-0.1136	-0.00001



**Figure 3.** The widths of the 95% CI for  $\kappa$  and  $\kappa S$  for blight data

### V. CONCLUSION

In recent studies, inter-rater agreement analysis has been growing extensively. There are different ideas between researchers for agreement between raters' decisions. The main argument of the researchers who prefer to use agreement models reveals pure agreement. In this paper, we present  $\kappa$  coefficient under simple and stratified random samplings for the study of inter-rater agreement. We focus on estimating the kappa coefficient and its variance in terms of the bootstrapping method.

One of the advantages of calculating  $\kappa$  under stratified random sampling is that, after the sampling procedure, the method does not allow a table in which all cells of

a row are zero. However, it cannot be guaranteed for simple random sampling.

Two important characteristics of  $\kappa$  under stratified random sampling used as point estimates of parameters are bias and sampling variability. It is well known that bias refers to whether an estimator tends to either over or underestimates the parameter and sampling variability refers to how much the estimate varies between samples.

In the light of the two characteristics, we also calculated the biases. It is found that the biases of the estimators for entire data sets are quite small. This point to the accuracy of parameter estimation.

The estimated  $\kappa$  under stratified random sampling tends to give a lower agreement than simple random

sampling and classical estimation of  $\kappa$ . The bootstrap estimation of  $\kappa$  under stratified random sampling has a smaller variance than simple random sampling ( $\hat{V}(\bar{\kappa}_B) < \hat{V}(\bar{\kappa}_S)$ ). The bootstrap estimation of variance under stratified random sampling is smaller than simple random sampling ( $\hat{V}(\bar{\kappa}_B) < \hat{V}(\bar{\kappa}_S)$ ). The bootstrap estimation of variance under stratified random sampling is smaller than the classical estimation of  $\kappa$  for some values of  $n$ .

When the sample size increases, the width of confidence interval converges to 0, and the dispersion of width decreases. For all values of  $n$ , the width and dispersion of confidence interval of  $\kappa$  under stratified random sampling are narrower than simple random sampling. Utilizing a stratified sampling method for confidence interval estimation of kappa statistic can lead to a more efficient statistical estimate than those of simple random samples. Calculating  $\kappa$  under stratified sampling provides much information over sample random sampling.

## REFERENCES

- [1] Cohen, J. (1960). A Coefficient of Agreement for Nominal Scales. *Educational and Psychological Measurement*, 20(1), 37-46.
- [2] Fleiss, J.L., Cohen, J., & Everitt, B.S. (1969). Large Sample Standard Errors of Kappa and Weighted Kappa. *Psychological Bulletin*, 72(5), 323-327.
- [3] Stehman, S.V. (1996). Estimating the Kappa Coefficient and Its Variance under Stratified Random Sampling. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62(4), 401-407.
- [4] Cochran, W.G. (1977). *Sampling Techniques*, 3rd ed., John Wiley and Sons, New York.
- [5] Särdaal, C.E., Swensson, B., & Wretman, J. (1992). *Model-assisted survey sampling*, Springer-Verlag, New York.
- [6] Efron, B. & Tibshirani R.J. (1993). *An introduction to the bootstrap*, Monographs on statistics and applied probability, no. 57., Chapman and Hall, London.
- [7] Klar, N., Lipsitz, S.R., Parzen, M., & Leong, T. (2002). An Exact Bootstrap Confidence Interval for  $\kappa$  in Small Samples. *The Statistician*, 51(4), 467-478.
- [8] Jiménez-Navarro, M.F., Garcia-Pinilla, J.M., & Garrido-Sanchez, L., et al. (2010). Poor Reproducibility of the Oral Glucose Tolerance Test in the Diagnosis of Diabetes during Percutaneous Intervention. *International Journal of Cardiology*, 142(3), 245-249.
- [9] Landis, J.R. & Koch, G.G. (1977). The Measurement of Observed Agreement for Categorical Data. *Biometrics*, 33(1), 159-174.
- [10] Stuart, A., (1953). The Estimation and Comparison of Strengths of Association in Contingency Tables. *Biometrika*, 40(1/2), 105-110.

## Investigation of Mixed-Mode Fatigue Crack Growth Phenomenon with a New Computational Procedure

*Karışık Modlu Yorulma Çatlak Büyümesi Olayının Yeni Bir Hesaplamalı Yöntem ile İncelenmesi*

Murat SARIBAY<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> *Istanbul Bilgi University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Mechanical Engineering, 34060, Eyup, Istanbul.*

### Abstract

Analysis of 3-D fatigue crack growth problems with mixed-mode loading has always been an interesting area in the field of fracture mechanics. Fracture failure under the influence of fatigue loading has been a common experience for various industries' products, such as aerospace and automotive components. Any possible failure in these structures can result in high damage to these components or a serious risk for people's health. The analysis of such failures may involve great challenges and complexities for obtaining the accurate solution. The complexities of the problem may not only be related to the loading type, but also to the specific geometry itself. Such problems are hard and costly to analyze with experimental methods. Therefore, it is important to establish the theoretical aspects of the process initially, and then having a computational procedure to solve the problem at hand. The crack growth law used in this procedure is NASGRO-type, and determination of the propagation angle is based on the maximum hoop stress criterion. Hypermesh and ANSYS APDL software are benefited during preprocessing of the propagation steps and application of submodeling procedure. Solution of the problem is performed with FRAC3D program, its enriched element methodology and newly implemented tools for crack growth. A specific example that includes cracking within an aircraft engine compressor blade is shown for demonstration purpose.

**Keywords:** Mixed-mode fatigue crack propagation, NASGRO-type crack growth, enriched elements, submodeling

### Öz

Üç boyutlu ve karışık modlu yorulma çatlak büyümesi problemleri kırılma mekaniği açısından her zaman ilgi çekici bir alan olmuştur. Hava-uzay ve otomotiv gibi endüstrilerdeki ürünlerin yorulmaya bağlı olarak kırılma sonucu meydana gelen hataları oldukça yaygındır. Bu ürünlerdeki herhangi bir hata veya başarısızlık, komponentlerine yüksek bir hasar veya insan sağlığı açısından yüksek risk olarak sonuçlanabilir. Bu tür hata veya arızaların analizi ile doğru sonucu bulmaya çalışmak belli bir zorluk ve karmaşıklık içerebilir. Problemlerdeki karışıklıklar hem yükleme çeşidiyle hem de belli bir geometri ile alakalı olarak ortaya çıkabilir. Bahsi geçen problemlerin deneysel yöntemler kullanarak analizi zor ve maliyetli olabilir. Bu sebeple, başlangıçta sürecin teorik yönlerini kurmak ve sonrasında çözüm için hesaplamalı bir yöntem oluşturmak eldeki problemin çözümü açısından önemlidir. Çalışmada kullanılan çatlak büyüme kanunu NASGRO modelidir ve ilerleme açısının belirlenmesi de maksimum çevresel gerilme kriteriyle gerçekleştirilmektedir. İlerleme aşamalarının ön-işlem sürecinde ve alt modelleme tekniğinin faydalanılmasında Hypermesh ve ANSYS APDL programları kullanılmaktadır. Problemin çözümü kısmı ise FRAC3D programı ve bünyesindeki zenginleştirilmiş elemanlar ile yeni geliştirilmiş çatlak büyüme araçlarıyla yapılmaktadır. Örnekleme amacıyla uçak motorundaki kompresörün kanat kısmındaki çatlakların incelenmesine yer verilecektir.

**Anahtar Kelimeler:** Karışık modlu yorulma çatlak ilerlemesi, NASGRO büyüme modeli, zenginleştirilmiş elemanlar, alt modelleme

## I. INTRODUCTION

The solution of three-dimensional fatigue crack growth problems with finite element methodology is a challenging task for most researchers. As an extension from previous two-dimensional computational procedures, three-dimensional crack propagation has been the subject of many studies especially beginning from two decades ago. A pioneering study in this field was introduced by Dhont [1], in which he presented a simple algorithm for planar crack growth (only mode I) of a 3-D structure. Following that, other notable works were published to demonstrate different techniques related to 3-D crack growth, such as well-known FRANC3D program [2] and ZENCRACK [3]. The latter one used a card-block approach, and the crack fronts were

introduced to the uncracked mesh during every step of the propagation. Besides those already mentioned, Schollman et. al. [4] gave an algorithm for the solution of fatigue crack growth problems with modified crack closure method, and referred to the program as ADAPCRACK3D. Another well-known solution is the extended finite element method [5], which mainly uses tetrahedron elements for meshing purposes. Dundar and Ayhan [6] contributed to this field with a notable study, and they referred to their procedure as ‘Fracture and Crack Propagation Analysis System (FCPAS)’. However, their models were created with tetra elements and it was only applied to simple geometries and loading.

In order to predict the crack propagation path of a cracked structure, one has to benefit from the notions of a crack growth law and a theory that determines the propagation direction. In addition, elements with special formulations have to be created around the crack region to account for the singularities present at the crack tip. Sih [7] introduced his strain energy density theory, which didn’t require any special meshing procedure around the crack front. His solution methodology seemed to be easily applicable, since the calculation of stress intensity factors was not necessary. However, many researchers still rely on Paris-Erdogan [8] crack growth law for the simulation of crack growth phenomenon. NASA [9] has extended Paris-Erdogan law to a more general expression, and presented NASGRO-type crack growth law. To determine the crack propagation angle, maximum hoop (circumferential) stress criterion [10] is still commonly used. This criterion is an effective way to determine the propagation angle during growth simulation.

Enriched element methodology used with FRAC3D program [11, 12] is an effective tool for the analysis of fracture problems. Fracture problems are solved accurately with less number of elements around the crack front, when compared to the other programs available. The reason for the success of FRAC3D program can be attributed to its special formulation for so-called enriched elements created around the crack front. The stress intensity factors are directly included as unknowns within the displacement vector. In [13], three-dimensional fatigue crack growth with enriched elements is discussed in detail, but example problems with tetra element models were accompanied with unidirectional and uniform load. Hence, details shown in [13] did not include any special computational methodology that may deal with a real life problem at hand; in other words, a complex problem in terms of geometry and loading. Besides that, only Paris-Erdogan law was considered as the crack growth law.

The objective of this study is to demonstrate a new methodology that can simulate mixed-mode fatigue crack growth phenomenon for structures with complex

geometry and loading. A more detailed crack growth law, i.e., NASGRO-type growth, is used in this procedure. The propagation direction is determined with respect to the maximum hoop stress criterion. The calculation of stress intensity factors and growth parameters is performed with a newer version of FRAC3D program. Finite element modeling and remeshing are handled with a special procedure, which includes benefiting from Hypermesh and ANSYS APDL software. Submodeling approach is used for the creation of local models with hexahedron elements. The final part is the solution of the problem with FRAC3D program and obtaining stress intensity factors. The newer version of FRAC3D program includes the growth algorithm based on the propagation theories, which are detailed in the following section. As the final output, FRAC3D gives the nodal coordinates of the next steps’ crack front to continue the process.

## II. MATERIALS AND METHODOLOGY

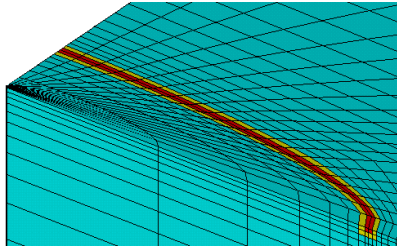
In this section, theoretical aspects and the methodology for the analysis of mixed-mode fatigue crack growth problems will be summarized. Following that, the finite element procedure that was developed for the current objective will be described.

### 2.1 Calculation of Stress Intensity Factors

For any computational procedure that aims to perform a crack growth analysis, the initial task is to determine the stress intensity factor solutions accurately. To do that, finite element methods have been shown to be a useful tool. Since a fracture analysis requires to deal with asymptotic singularities present at the crack tip, the correct evaluation of these parameters is definitely needed. For this purpose, a Fortran 90 software, called FRAC3D, was developed by the author and his colleagues at Lehigh University ME&M Department [11, 12] and has been a remarkable finite element program for the solution of fracture mechanics problems with high complexity (in terms of analysis type, loading, material behavior or geometry). FRAC3D benefits from special enriched elements that account for the asymptotic singularities at the crack tip. These asymptotic fields may be within isotropic or anisotropic materials, or at bi-material interfaces. A newer version of this finite element (FE) code have recently been developed, and it includes the evaluation of crack growth parameters, in addition to the common variables determined for a classical fracture problem, such as stress intensity factors, strain energy release rates, energy density function or the J-integral.

Being an effective tool for the solution of various fracture mechanics problems, FRAC3D benefits from specialized (enriched) elements. Figure 1 shows an example FE model with these enriched elements. Transition elements depicted are used to satisfy displacement compatibility between enriched and regular elements. The main advantage of FRAC3D

over other commercial software is its capability to give the accurate solution with less number of elements used around the crack region, which results in a reduction in total number of DOFs for the entire model. This difference reduces the computational times significantly.



**Figure 1.** Enriched (red) and transition (yellow) elements along the crack front.

The formulation of enriched elements includes the closed form asymptotic field for crack tip displacements, in addition to the usual polynomial interpolation function. Besides that, the stress intensity factors are given as unknowns within the formulation. As a natural result of this representation, stress intensity factors are calculated directly within the displacement array. In enriched element formulation, element displacements take the following form [11]:

$$u(X, \eta, \rho) = \sum_{j=1}^n N_j(X, \eta, \rho) u_j + \{K_I(\Gamma) F_1(X, \eta, \rho) + K_{II}(\Gamma) G_1(X, \eta, \rho) + K_{III}(\Gamma) H_1(X, \eta, \rho)\} Z_0(X, \eta, \rho) \quad (1)$$

$$v(X, \eta, \rho) = \sum_{j=1}^n N_j(X, \eta, \rho) v_j + \{K_I(\Gamma) F_2(X, \eta, \rho) + K_{II}(\Gamma) G_2(X, \eta, \rho) + K_{III}(\Gamma) H_2(X, \eta, \rho)\} Z_0(X, \eta, \rho) \quad (2)$$

$$w(X, \eta, \rho) = \sum_{j=1}^n N_j(X, \eta, \rho) w_j + \{K_I(\Gamma) F_3(X, \eta, \rho) + K_{II}(\Gamma) G_3(X, \eta, \rho) + K_{III}(\Gamma) H_3(X, \eta, \rho)\} Z_0(X, \eta, \rho) \quad (3)$$

where  $u_j$ ,  $v_j$  and  $w_j$  represent the unknown nodal displacements,  $N_j$  are commonly known element shape functions in terms of local coordinates, and  $K_I$ ,  $K_{II}$  and  $K_{III}$  are mode I, II and III stress intensity factors, respectively. In Equations (1) - (3),  $F_i$ ,  $G_i$  and  $H_i$  are the asymptotic displacement functions and  $Z_0$  are the “zeroing” functions that account for the transition elements to ensure compatibility.

For a more detailed description of enriched element formulation, [11] and [12] are highly referenced.

**2.2 Crack Growth Model and Propagation Direction**

In order to simulate a fatigue crack growth problem, a propagation law is necessary. For this purpose, various laws were introduced to the literature in the past. Most of these fatigue crack growth rate laws

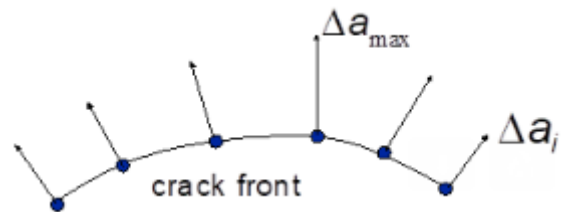
were based on the Paris-Erdogan equation, where the growth rate was given as a function of  $\Delta K$ . The Paris-Erdogan crack growth rate equation can be expressed as [8]

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n \quad (4)$$

where,  $a$  is the crack length,  $N$  the number of cycles, and  $C$  and  $n$  are empirically determined constants. In this study, a more sophisticated crack growth rate expression, NASGRO law that was developed by NASA, will be used, i.e. [9],

$$\frac{da}{dN} = C \left[ \left( \frac{1-f}{1-R} \right) \Delta K \right]^n \frac{(1 - \frac{\Delta K_{th}}{\Delta K})^p}{(1 - \frac{K_{max}}{\Delta K_c})^q} \quad (5)$$

In Equation (5),  $C$ ,  $n$ ,  $p$  and  $q$  are material constants, and  $f$  is the crack opening function. While  $\Delta K_{th}$  is the threshold stress intensity factor,  $\Delta K_c$  is the critical stress intensity factor. In the same equation, the only quantities which should be computed for a specific geometry and loading are  $\Delta K$ , i.e., stress intensity factor range ( $K_{max} - K_{min}$ ), and  $R$  ( $K_{min}/K_{max}$ ) as being the stress ratio. Note that  $K_{max}$  and  $K_{min}$  correspond to the stress intensity factors for maximum and minimum loading cases, respectively.



**Figure 2.** Advancement of crack front based on a given fatigue crack growth rate law.

For the 3-D crack front shown in Figure 2, where the stress intensity factors are known at all points along the crack front, the node with the maximum computed  $\Delta K$  value ( $\Delta K_j$ ) is virtually advanced on a plane by a small distance ( $\Delta a_{max}$ ). The local increment in the number of fatigue cycles for this value of  $\Delta a_{max}$  can be approximated (considering Equation (5)) by

$$\Delta N_j = \frac{\Delta a_{max}}{F(\Delta K_j)} \quad (6)$$

where

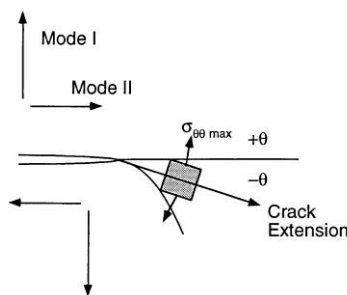
$$F(\Delta K_j) = C \left[ \left( \frac{1-f}{1-R} \right) \Delta K_j \right]^n \frac{(1 - \frac{\Delta K_{th}}{\Delta K_j})^p}{(1 - \frac{K_{max}}{\Delta K_c})^q} \quad (7)$$

As a result, the advancement of all other nodes on the crack front is obtained from Equation (5), i.e.,

$$\Delta a_i = \Delta N_j \cdot F(\Delta K_j) \tag{8}$$

where  $F(\Delta K_j)$  is computed for the  $i^{\text{th}}$  node using Equation (7) with  $\Delta K_j$  substituted for  $\Delta K_i$ . In this manner, the evolution of the crack front can be tracked by moving the crack front nodes to new positions given by  $\Delta a_i$  and new stress intensity factors can be computed to determine the new crack front geometry. In a small-scale 3-D finite element simulation, the crack tip nodes can be moved through small displacements without remeshing. However, once the crack tip elements become severely distorted, remeshing of the geometry around the crack front is required.

Erdogan and Sih [10] showed that if the crack is subjected to mixed-mode loading, the crack will not remain planar, and it will turn out-of-plane by propagating in the direction of the maximum circumferential stress at the crack tip. This is shown schematically in Figure 3.



**Figure 3.** Crack growth under mixed-mode conditions in the direction of the maximum hoop stress [10].

The determination of the propagation direction demonstrated in [10] was used repeatedly in proceeding studies in this field. Erdogan and Sih also stated a mathematical expression for the crack propagation angle, which was given as

$$\left( \tan \frac{\theta_p}{2} \right)_{1,2} = \frac{1}{4} \frac{K_I}{K_{II}} + / - \frac{1}{4} \sqrt{\left( \frac{K_I}{K_{II}} \right)^2 + 8} \tag{9}$$

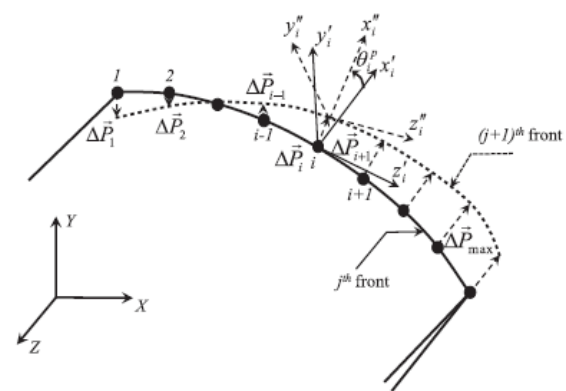
where  $K_I$  and  $K_{II}$  are the mode I and mode II stress intensity factors, respectively. This expression is usually referred to as maximum hoop or circumferential stress criterion in the literature.

For mixed-mode loading conditions, an equivalent form of the stress intensity factor representations is required to be evaluated within the crack growth law. This form can be expressed as [13]

$$K_{\text{equiv}} = \frac{K_I}{4} \left( 3 \cos \left( \frac{\theta_p}{2} \right) + \cos \left( \frac{3\theta_p}{2} \right) \right) - \frac{3K_{II}}{4} \left( \sin \left( \frac{\theta_p}{2} \right) + \sin \left( \frac{3\theta_p}{2} \right) \right) \tag{10}$$

which is a function of the mode I and mode II stress intensity factors and the propagation angle. Using Equation (10), the corresponding equivalent stress intensity factors for maximum and minimum loadings ( $K_{\text{max}}$  and  $K_{\text{min}}$ ) can be calculated. It should be noted that, the equivalent stress intensity factor expression given in Equation (10) does not include any mode III effect. Taking  $K_{III}$  or anti-plane shear into account may not be necessary for the current problem, but is considered as a follow-up study.

In a crack growth simulation procedure, the new geometric form of the crack front after each step should be determined mathematically. This can be realized with the calculation of each crack front node's spatial advancement, with the aforementioned technique. In addition, advanced crack front geometry requires the definition of a new local coordinate system, as shown in Figure 4. In this figure, solid line represent the crack curve formed by the nodes along the front, and dashed line is the propagated crack front. The initial and propagated local coordinate systems are also depicted. By using  $\Delta a_i$  given in Equation (8) and the propagation angle  $\theta_p$  calculated by Equation (9), the local coordinates of the new crack front nodes are determined. More details for this procedure is explained in [13], and will not be restated here.



**Figure 4.** Crack front advancement for a 3-D crack (advanced local CS is also shown) [13].

Having the appropriate crack growth model, propagation direction theory, and the crack front advancement technique discussed, it might be a good idea to continue with the details of the finite element procedure. This subject will be explained in the next section.

### 2.3 Finite Element Modeling and Meshing

#### Procedure

Finite element methodology is an effective tool for the analysis of fracture problems. An experienced finite element analyst should be aware of the importance for choosing his/her model parameters, such as the element type selection or model size. Using more elements can guarantee the accuracy, however, increases the computational times. On the other hand, FE models with tetrahedral elements are easier to create when compared with hexahedron models, but it is a commonly known fact that using hexahedron elements yields more accurate results in fracture problems. Commercial finite element tools such as ANSYS or ABAQUS are not very reliable for the analysis of cracked structures with complexity.

The analysis of complex problems may require a special technique called 'submodeling approach'. This complexity may be in the form of geometry, loading or analysis type. It is even possible that more than one of these complexities may be present at the same time. The analysis of a cracked model under the effect of fatigue mixed-mode loading is an example for these types of problems. If hexahedron elements are used around the crack region and for the entire model, the computational issues become significant. Therefore, the submodeling approach may be benefited to provide an optimum solution to the problem at hand. In this approach, the uncracked global model is run with a relatively coarse mesh. A separate local model is also prepared, with model boundaries being contained within the global model. The local model includes the physical model, and has a finer mesh size than the global model itself. In that way, sufficient mesh size to ensure the accuracy of the cracked region is satisfied. The communication between the global and local models is provided with temperature and cut boundary displacement interpolations. To realize this objective, mesh sizes of global and local models do not need to match. That is essential for applying this approach to the solution of structural problems.

Besides the information given in the preceding paragraphs, the simulation of crack growth phenomenon requires the application of the theories and laws as stated in the previous section. As a result, a new methodology was implemented to perform crack propagation simulation. The new procedure involves the following steps to handle the problem at hand:

- Creation of the global FE mesh with Hypermesh program [14],
- Analysis of the global model with ANSYS Mechanical APDL [15],
- Creation of the local FE mesh with Hypermesh program (with the aid of TCL

scripting tools),

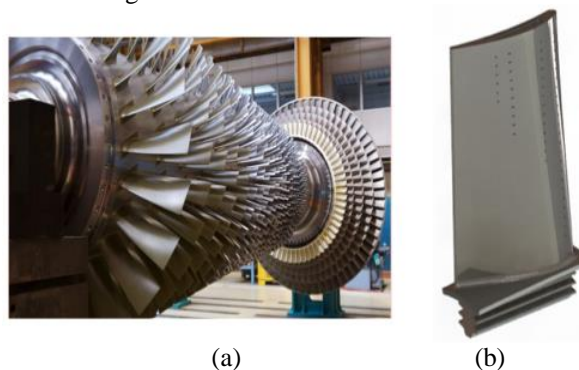
- Applying the submodeling procedure with ANSYS to extract the loading and boundary conditions information for the local model,
- Execution of FRAC3D with local model to perform growth algorithm to determine the new crack front nodes' coordinates.

The first two steps given above are only performed once during the entire simulation. At the end of the last step, remeshing is done in Hypermesh for the newly created model. And the procedure repeats itself by applying the submodeling procedure and running FRAC3D again. There's one important point to mention at this point; FRAC3D has a notable advantage over other growth analysis programs; an outcome related to the mesh size around the crack front. Most of the finite element programs that are specialized in the solution of fracture problems require a lot of elements around the crack front to obtain correct stress intensity factors. However, the same DOF issue is not typical for FRAC3D program; you may use much less number of DOFs, and still keep the accuracy in desired level. The success of FRAC3D program for this matter is related to the enriched element formulation embedded within the software.

### III. RESULTS AND DISCUSSION

The theories and methodology given in the previous section will be used to solve the current example model, i.e., a Ti-6Al-4V compressor blade that forms an integral part of the Bladed Drum (BLUM) compressor assembly.

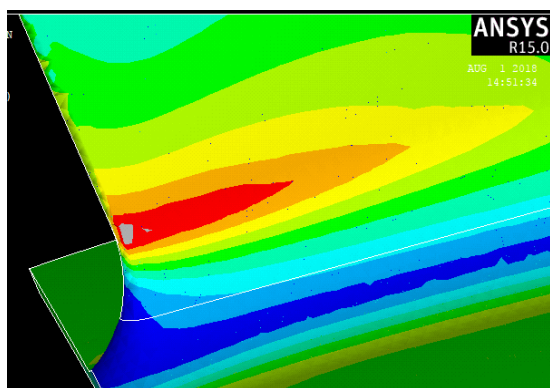
Figure 5(a) shows a typical compressor of an aircraft engine, and multiple blades attached to the compressor. These blades have a curved and complex geometry, and may be subjected to low (LCF) and high cycle fatigue (HCF) loadings. LCF loading may include centrifugal loading, thermal stresses and airfoil pressure. As an addition to those, HCF loading is assumed to vary around LCF fatigue, and seen as the result of vibrational loads. In current analysis, only LCF loading case will be considered.



**Figure 5.** (a) Compressor blades from an aircraft turbine engine [16], (b) CAD model of the blade [17].

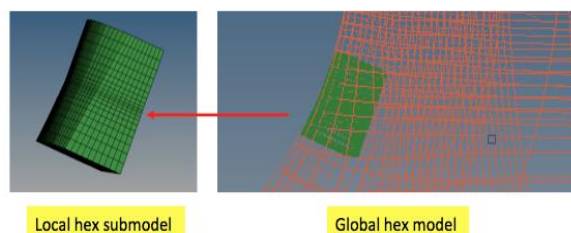


Considering the blade geometry given in Figure 5(b) along with LCF loading explained above, possible cracking may occur at high stress regions at leading and trailing edges of the blade. These regions may be approximately around the bottom of the blade section, which are close locations to the center of the compressor, in other words, to the DRUM region. In such a case, the cracks formed may propagate to the DRUM region, which may end in a serious damage to the functionality of the compressor. Hence, it is essential to determine the propagation directions of such cracks. Figure 6 depicts the high stress regions on the trailing edge of the current blade geometry under the effect of LCF loading. As a result, it is a fundamental requirement to have a crack propagation procedure to analyze this problem with complex geometry and loading. It will be described that there are many criteria that affects the solution of such problems both effectively and accurately.



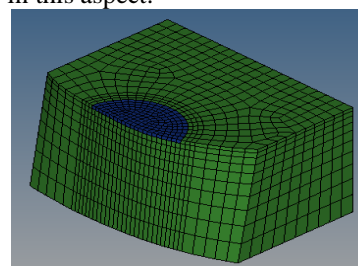
**Figure 6.** Maximum Von Mises stress region on the trailing edge of the blade.

Before going further with the results of the analysis, it is significant to give some details about the blade's finite element model. On the left of Figure 7, the submodel or local model that contains the initial crack is shown. The close-up view of the global model around the trailing edge of the blade (local model embedded just for visualization purposes) is demonstrated on the right of the same Figure. Both global and local models were created with hexahedron elements. It is harder to mesh structures with hex elements when compared to models with tetra elements, especially for the examples with high geometric complexity. Besides that, the solution of fracture problems requires a sufficient mesh density around the crack region, not to lose from the accuracy of the results. This is an expected feature of cracked structures, due to the singularities present at the crack tip. To ensure sufficient density around the crack region, most of the fracture software uses a high number of elements around the crack region. In addition, a typical crack growth simulation may require more than 100 steps to reach to the targeted crack length. That may bring very long computational times, which will be an important issue for the analyst.



**Figure 7.** Local and global models.

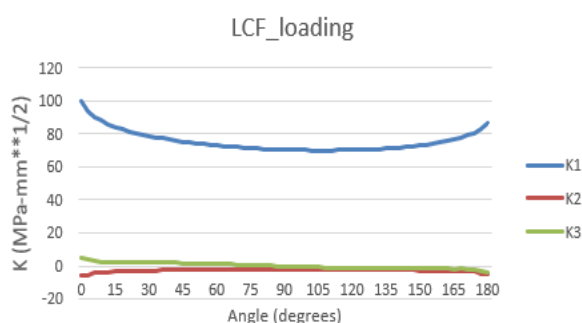
In contrast to the various fracture software that are capable of solving mixed-mode fatigue crack growth problems, FRAC3D uses less number of DOFs around the crack front, meaning a low element density for the same region. In that way, the same level of accuracy can still be attained with FRAC3D's theory and tools. The local model that includes the initial crack (Figure 7), can be detailed more to understand this phenomenon better. To do that, refer to Figure 8 given below, which shows the bottom half of the local FE model with initial crack size. The blue elements represent the crack surface, which is detached from the top half of the local model. It is apparent that the initial crack form is assumed to have a semi-circular shape. So the curved crack front's nodal locations can be addressed in angles, from 0 degrees to ~180 degrees. Besides that, the elements that are closer to the crack front are smaller in size, compared to the ones in outer regions, as expected. There are 21 quadratic hexahedron elements along the crack front here; hence 43 nodes for the same curved length. The optimum mesh size was found out by increasing the number of elements on the crack front. Using 21 elements with FRAC3D program was seen to be sufficient to ensure accuracy. The aforementioned programs that simulate crack propagation phenomenon require hundreds of nodes used along the crack front to determine the correct solution. That is a quantitative comparison between other software and FRAC3D in this aspect.



**Figure 8.** Mesh for bottom half of the local model with initial crack (Crack surface is shown with blue elements).

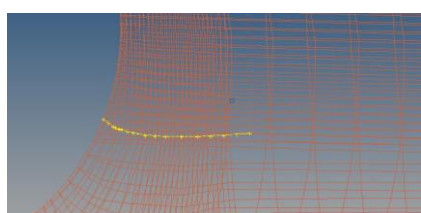
The initial orientation of the crack surface on the trailing edge of the blade was specified depending on the direction of maximum principal stress for that crack length. Therefore, the stress intensity factor solutions along the crack front demonstrated in Figure 9 shows non-zero values only for mode I results, i.e.,

K<sub>i</sub>. That's an anticipated outcome due to assumed direction of the initial crack.

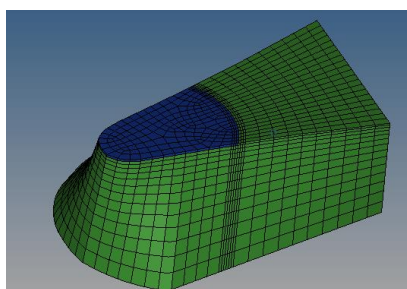


**Figure 9.** Stress intensity factor solutions for the initial crack on the trailing edge.

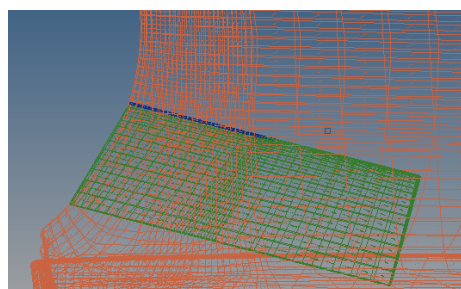
The width of the blade model is 85 mm. In order to demonstrate the effectiveness of the current methodology development, the crack was propagated ~6 mm, and the propagation path can be seen as the yellow line in Figure 10. This propagated length corresponds to the 20<sup>th</sup> step of the simulation. The local model for this step is shown in Figure 11, and the positioning of the same model within the global model can be seen in Figure 12. By using this procedure, the crack can further be extended to determine the final location of the propagated flaw. It was seen that the current development is effective considering accuracy and computational times to investigate these types of problems with high complexity in terms of loading and geometry. Since the local model with hexahedron elements is regenerated automatically with Hypermesh program at each step during propagation, the main challenge for these problems is being handled with less computational cost.



**Figure 10.** Crack propagation path after 20 steps.



**Figure 11.** Local FE model for the propagated crack, at 20<sup>th</sup> step, blue elements indicating the crack surface.



**Figure 12.** Local model at 20<sup>th</sup> step positioned within the global model

The simulation for the crack growth phenomenon under the influence of mixed-mode LCF loading has a few crucial points to discuss. These points may be decisive factors for the accuracy of the analysis results. The process starts with the random selection of a suitable  $\Delta a_{max}$  parameter (Equation (6)). In other words, there is no direct criterion that determines this parameter for a specific problem. In the beginning steps of the analysis where the crack lengths are shorter,  $\Delta a_{max}$  parameters are selected as lower values. As the crack grows, the value of this parameter can be increased for the following steps. This is a typical procedure for the analysis of crack propagation problems. Besides those, the author's experience on this subject shows that the FE models with many tetra elements are more sensitive to the selection of  $\Delta a_{max}$  parameter, when compared to the FRAC3D solution with hex elements. That means the value of this parameter ( $\Delta a_{max}$ ) is increased slower, hence leading to more number of steps until reaching to the same crack length.

In FRAC3D solution of the current problem, the  $\Delta a_{max}$  parameter starts with 0.16 mm, and ends with 0.75 mm for the 20<sup>th</sup> step. If higher numbers are used for this parameter, it was seen that the new crack front nodes' coordinates turn out to be highly misaligned, leading to the difficulty for the creation of the crack geometry for the next propagation step.

The submodeling procedure described above carries an important risk if it is not performed in an accurate manner. One of the basic rules during the application of this procedure mentions the significance of the selection of submodel boundaries. This rule states that the boundaries should be sufficiently away from the critical regions within the submodel. In the case of a fracture problem, these critical regions are the locations that are close to the crack itself. Hence, the boundaries of the local model shown in Figure 7 should be selected by keeping a distance to the crack, in all three directions of the local coordinate system shown in Figure 4. Otherwise the results of the analysis can be misleading.

## CONCLUDING REMARKS

A new computational procedure was presented to investigate the simulation of mixed-mode fatigue crack growth phenomenon for complex problems. A blade model subjected to LCF loading was of special interest in this study. This new methodology can also be used to analyze even more complicated problems, such as examples with the inclusion of HCF loading.

The procedure involves creation of the model with hexahedron elements, which is a challenging issue for complex geometries. The automation of remeshing process becomes necessary to accomplish this objective. Expectedly, models with hexahedron elements lead to more accurate results when compared to tetra element models. On the other hand, FRAC3D program has the technical capability to give accurate results with meshes relatively coarser. Current features of FRAC3D, such as the capabilities to analyze dynamic problems, structures with elastic-plastic material properties, anisotropic behavior, etc., will be considered along with this new crack growth procedure. That will also give us the chance to simulate propagation problems, which have never been tried before.

Being a special computational tool, this new methodology possesses a few significant features for the sake of analysis accuracy. These features are mostly related to the specification of maximum increment along the crack front, having the optimum size for the local model, and keeping the mesh density around the crack region at reasonable levels in terms of computational expense.

## ACKNOWLEDGMENT

The author would like to express his sincere thanks to Prof. Nied, from ME&M Department of Lehigh University, US. His initiation, supervision and guidance throughout this study have been very significant to accomplish this task.

## REFERENCES

- [1] Dhont, G. (1998). Automatic 3-D mode I crack propagation calculations with finite elements, *Int. Jour. of Num. Met. in Eng.*, 41, 739-757.
- [2] Carter, B.J., Wawrzynek P.A., Ingraffea, A.R. (2000). Automated 3-D crack growth simulation, *Int. Jour. of Num. Met. in Eng.*, 47, 229-253.
- [3] Hou, J., Goldstraw, M., Maan, S., Knop, M. (2001). *An evaluation of 3-D crack growth using ZENCRACK*, DSTO-TR-1158, Defense Science and Technology Organization.
- [4] Schollmann, M., Fan, M., Richard, H.A. (2003). Development of a new software for adaptive crack growth simulations in 3-D structures, *Eng. Frac. Mech.*, 70, 249-268.
- [5] Sukumar, N., Chopp, D.L., Bechet, E., Moes, N. (2008). Three-dimensional non-planar crack growth by a coupled extended finite element and fast marching method, *Int. Jour. of Num. Met. in Eng.*, 76, 727-748.
- [6] Dundar, H., Ayhan, A.O. (2016). Non-planar crack growth analyses of multiple cracks in thin-walled structures, *Int. Jour. of Fatigue*, 92, 596-604.
- [7] Sih, G.C. (1990). *Mechanics of fracture initiation and propagation*, Kluwer Academic Publishers.
- [8] Paris, P., Erdogan, F. (1963). A critical analysis of crack propagation laws, *Jour. of Basic Eng.*, 85, 528-533.
- [9] *Nasgro Fracture Mechanics and Fatigue Crack Growth Analysis Software Reference Manual* (2016). Version 8.1, NASA Johnson Space Center and Southwest Research Institute, Texas, ABD.
- [10] Erdogan, F., Sih, G.C. (1963). On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear, *Jour. of Basic Eng.*, 85, 519-525.
- [11] Ayhan, A.O., Nied, H.F. (2002). Stress Intensity Factors for Three-dimensional Surface Cracks Using Enriched Finite Elements, *Int. Jour. for Num. Met. in Eng.*, 54, 899-921.
- [12] Saribay, M., Nied, H.F. (2014). Dynamic stress intensity factors for suddenly loaded structures using enriched finite elements, *Theor. Appl. Fract. Mech.*, 70, 59-67.
- [13] Ayhan, A.O. (2011). Simulation of three-dimensional fatigue crack propagation using enriched finite elements, *Computers and Structures*, 89, 801-812.
- [14] Altair Hyperworks, Version 11.0, Copyright 1986-2019 Altair Engineering
- [15] ANSYS Mechanical APDL, Version 15.0.7, Copyright 2014 SAS IP, Inc.
- [16] [https://ffden2.phys.uaf.edu/webproj/212\\_spring\\_2015/Timothy\\_Sherry/Tim\\_Sherry/Compressor.htm](https://ffden2.phys.uaf.edu/webproj/212_spring_2015/Timothy_Sherry/Tim_Sherry/Compressor.htm)
- [17] <https://grabcad.com/library/compressor-blade-jet-engine-1>

## İtfaiye Teşkilatında İş Sağlığı ve Güvenliği Uygulamalarına Örnek Risk Değerlendirmesi

*A Risk Assessment Model for Occupational Health and Safety Practices in the Fire Department*

Göksel DEMİR<sup>1</sup> , Semih KUMAŞ<sup>2</sup> , Hacer Handan DEMİR<sup>3</sup> , İbrahim Ertuğrul YALÇIN<sup>4</sup> 

<sup>1</sup> Sağlık Bilimleri Üniversitesi, Hamidiye Sağlık Bilimleri Fakültesi, İş Sağlığı ve Güvenliği Bölümü, 34668, Üsküdar, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup> Akkuyu Nükleer Anonim Şirketi, Gülnar, Mersin, Türkiye

<sup>3</sup> İstanbul Gelişim Üniversitesi, Uygulamalı Bilimler Yüksekokulu, Lojistik Bölümü, 34310, Avcılar, İstanbul, Türkiye

<sup>4</sup> Bahçeşehir Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34353, İstanbul, Türkiye

### Öz

İnsani boyutu yanında ekonomik boyutu da büyük önem taşıyan iş sağlığı ve güvenliği konusunda, Türkiye’de olduğu gibi birçok ülkede yasalar ve yönetmelikler yürürlüğe sokulmuştur. Bu çalışmalar ile çalışanların sağlığını korumaya yönelik ve özellikle işverenler tarafından uyulması gereken kurallar belirlenmiştir. Özellikle Türkiye’de, 10 Haziran 2003 tarihli Resmi Gazete ile yayınlanan 4857 sayılı iş kanunu kapsamında çeşitli düzenlemeler yapılması ve gerekli tedbirlerin alınması, bu çalışmaların kilometre taşı olarak değerlendirilmektedir. Bu çalışmalar ile içinde bulunduğumuz Avrupa Birliğine uyum sürecinde iş kazaları en aza indirilmiş, böylece devlet yapısı hem ekonomik hem de sosyal açıdan yoğun bir iyileşme sürecine girmiştir. Ancak gerçekleştirilen çalışmalar, İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu’ndaki eksikliklerin giderilmesi gerektiği gerçeğini ortadan kaldıramamıştır. 30 Haziran 2012 tarihyle Resmi Gazetede yayınlanarak kabul gören ve 01 Ocak 2013 tarihi ile özel işletmelerde uygulamaya koyulan 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu gereğince; 01 Temmuz 2014 tarihinden itibaren kamu işletmeleri dahil olmak üzere tüm işletmelerin İş Sağlığı ve Güvenliği tedbirlerini uygulaması ve denetlenmesi zorunlu kılınmıştır. Bu çalışmada; uygulanmaya başlanan 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanununun gereklilikleri, yükümlülükleri ve İstanbul İtfaiye Teşkilatında uygulanması ile ilgili detaylar incelenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** 6331 Sayılı Kanun, İş Sağlığı ve Güvenliği, Risk Değerlendirmesi, İş Kazası.

### Abstract

Occupational health and safety management is an important issue along with its human dimension as well as its economic dimension. In this regard, as in many countries, laws and regulations that aims to protect the employee's health and wellbeing have been entered in force in Turkey. Occupational health and safety rules define both protective and post-accident applications which must be followed by employers. Particularly, taking the necessary precautions by making arrangements with the Labor Law No. 4857 and publication on the Official Gazette of Turkey on 10 June 2003 is considered as the milestone of these studies. With these efforts, occupational accidents were minimized in the duration of adaptation to the European Union, and thus, the state structure has entered a process of intensive recovery both economically and socially. However, the studies have not been able to eliminate the fact that the deficiencies in the Occupational Health and Safety Law should be eliminated. According to the Occupational Health and Safety Law No. 6331, which was published in the Official Gazette on 30 June 2012 and put into use in private companies as of 01 January 2013, and in all companies as of 01 July 2014; enterprises have been required to implement and inspect Occupational Health and Safety rules as required by law. In this study; the requirements, obligations and application of the Occupational Health and Safety Law No. 6331, which has been implemented in the Istanbul Fire Brigade, were examined.

**Keywords:** Law No. 6331, Occupational Health and Safety, Risk assessment, Occupational accident.

## I. GİRİŞ

Gelişmiş ülkelerde işverenden personelin başta sağlık olmak üzere güvenliği için koruyucu nitelikte çalışma koşulları sağlanması beklenir. Bu beklenti hem işverenin personeline karşı yerine getirmesi gereken sosyal

sorumluluğu adına hem de verimliliği artırma adına gerekmektedir. Ayrıca modern işletmelerde uygulanan Toplam Kalite Yönetimi sisteminin (TKY) uygulayışı maksadıyla çevreye ve insan hayatına duyarlı olan yapının temel taşlarından birisi olan çalışan sağlığı kavramı üretimin gittikçe beliren ana ayaklarından birisi olarak gün geçtikçe karşımıza çıkmaktadır. İşçi sağlığı ve iş güvenliği (İSİG), “yaşama hakkı” ile doğrudan ilişkili olan, en temel hak ve diğer hakların kullanılmasını sağlayarak ekonomik konularda da önem arz etmektedir. Bu nedenle her dönem konuya yoğun bir ilgi gösterilmekte ve iş kazalarının meslek hastalıkları ile birlikte önlenmesi yolunda yoğun çabalar gösterilmektedir. İş Sağlığı ve Güvenliği (İSG) uygulamalarındaki amaç; sağlık ve güvenlik şartlarının iyileştirilmesi için alınacak önlemleri belirlemektedir [1]. Bu kapsamda hedeflenen amaç mesleki risklerin önlenmesi, sağlık ve güvenliğin korunması, risk ve kaza faktörlerine önlemlerin alınması, İSG konusunda işçi ve temsilcilerinin eğitimi, bilgilendirilmesi, görüşlerinin alınması ve dengeli katılımların sağlanması, yürürlükteki mevzuatın doğru bir şekilde uygulanmasıyla İSG ile ilgili her türlü işlemlerin mevzuatlar çerçevesinde yürütülmesini sağlamaktır.

İstanbul İtfaiye Teşkilatı İstanbul Büyükşehir Belediyesine bağlı olarak İtfaiye Daire Başkanlığı adı altında acil durumlara müdahale ve yangın söndürme görevini üstlenen kamu kuruluşudur. Teşkilat görevi gereği operasyonel olarak merkezi çalışma alanları dışında müdahale işlemlerini gerçekleştirmekte ve 24 saat esasına göre vardiya usulü mesai yapılmaktadır. İstanbul İtfaiyesinde operasyonel görevleri yürüten çalışanlarla birlikte olay yeri arkasında Bakım ve Onarım, Personel ve Yazı İşleri, Ambar ve Ayniyat, Halkla İlişkiler, Yangın Önlem ve Denetim, Araştırma, Planlama ve Koordinasyon, Eğitim, Bilgi Teknolojileri, İnşaat ve Emlak gibi destek görevlerini yürüten çalışanlar da yer almaktadır [2]. Araştırmanın amacı, örnek işletmede iş güvenliği uygunluk yapısını saptayarak işletme yönetiminin iş güvenliği programına ilişkin uygulamalarını, çalışanların ve işletmenin sosyal, coğrafi, fiziki yapısı ile tehlike ve risk yapısını ölçmeye yöneliktir. Böylelikle, iş kazalarının nedenselliği ve çözüm yollarının İSG çerçevesinde incelenmesi mümkün olabilecektir.

İtfaiye Teşkilatı hemen hemen her ülke ve her şehirde 24 saat çalışma ve 48 saat izin hakkı ile görev yapmaktadır. Bu şekilde bir aylık süreç içerisinde 10 tam gün çalışmaktadır. Her vardiya posta olarak adlandırılmaktadır ve bu postalar A postası, B postası ve C postası olmak üzere ardışık şekilde 3'e ayrılmaktadır.

## II. İŞ SAĞLIĞI GÜVENLİĞİ KAVRAMI VE AMACI

İSG kavramı, uluslararası olarak İSG konusunda söz sahibi olan ILO (Uluslararası Çalışma Örgütü) ve

WHO (Dünya Sağlık Örgütü) ile Türkiye Cumhuriyeti arasında yapılan protokollerle sağlanan anlaşmalar sonucu; 6331 sayılı (ilk defa iş güvenliği ile ilgili müstakil sayılacak bir yasanın) kanunun çıkmasıyla günümüze gelmiştir. Çalışma biçimi ne olursa olsun tüm işçiler, çalışma ortamında mesleki faaliyetlerine bağlı olarak iş kazası ya da meslek hastalığı şeklindeki mesleki risklere maruz kalabilmektedirler. Güvenlik ya da iş güvenliği programının esas amacı, söz konusu riskleri önlemektir [3]. İSG'nin amacının; çalışanları korumak, üretim ile ilgili güvenliği sağlamak ve işletme güvenliği hakkında gerekenleri yapmak olduğu kabul edilir [4].

İSG çok yönlü bir çalışmayı gerektirmektedir. Tasarlama sürecinden başlayarak üretim araçlarının ilk prosesinden satış sürecinin sonuna kadar Mühendislik Bilimlerinin tüm dalları İSG kapsamındadır. Özellikle koruyucu hekimlik tarafından bakarsak tıbbın birçok dalı İSG kavramıyla ilişkilidir. İnsan davranışları ile doğrudan etkileşim içindedir. İnsan kaynaklı kazaların, iş kazaları sınıflandırmasında çok büyük bir dilimi yansıtmaları bu bilgiyi doğrular niteliktedir. Hukuk İSG ile doğrudan beraberdir. Devlet yaptırımını ile alınan ve yürütülen kanunlar, tüzükler, yönetmeliklerle çalışma hayatının düzenlenmesi hukukun temel unsurları sayesinde yerine getirilmektedir. İSG'nin mevzuata uygun olarak uygulanması ancak hukuk kurallarının iyi bilinmesi ve uygulanması ile mümkündür.

### 2.1 İş Kazalarının Tanımı ve Nedenleri

Kaza terimi aniden gelişen, kasıt olmaksızın meydana gelen, beklenmedik olayları ifade eden bir terimdir. Ancak beklenmedik olaylar zarar verici bir olayla sonuçlanmış olsa bile her zaman iş kazası olarak adlandırılmaz [5]. Çalışanın yaralanmasına neden olarak sağlığını bozabilen ya da ölümüne sebep olabilen kaza terimi incelendiğinde, genel anlamıyla “can ya da mal kaybına neden olan kötü olay” biçiminde tanımlandığı görülmektedir [6]. Önceden planı yapılmamış, çoğu zaman kişisel yaralanmalara, araç ve gereçlerde maddi zararlara uğramasına, hatta üretimin bir süre durmasına yol açan bir olaydır [6]. Görüldüğü üzere gerçekleşmesi muhtemel bir olayın iş kazası olarak değerlendirilmesi için mekânsal ve zamansal boyutta kesin bir tutarlılık söz konusu değildir. Bu boyutta, ancak kanunlar ile sınırlandırılmış zaman ve mekân içerisinde doğru bir sonuca varılabilmektedir. Örneklendirecek olursak çalışanın şahsi aracı ile işyerine gelirken yapmış olduğu bir kaza iş kazası olarak değerlendirilmemektedir. Çünkü kendi iradesi ile işyerine gelmektedir. Buna karşın aynı saatte aynı istikamette işyerinin servis aracı ile yapılan kazalardaki yaralanmalar iş kazası olarak değerlendirilmektedir. Burada işyeri otoritesinin altında olunmasının iş kazasını resmileştirdiğini görmekteyiz.

Bahsi geçen kaza etmenlerinin ve nedenlerinin sadece kaza olayı meydana geldiğinde değil, Tablo 1 ve 2 den de anlaşılacağı üzere güvenlik tedbirlerinin yeterli şekilde alınmayışından kaynaklanması oldukça düşündürücüdür.

**Tablo 1.** Alınmayan Önlemlere Göre İş Kazası Nedenleri [3].

	Açıklama	Bulgular
1.	Güvenlik için bütçe ayrılmamışsa	%43 daha fazla kaza
2.	Yeni işe alınan işçiler eğitilmiyorsa	%52 daha fazla kaza
3.	Güvenlik eğitimi için dış kaynaklar kullanılmıyorsa	%59 daha fazla kaza
4.	Nezaretçiler için özel bir eğitim yapılmıyorsa	%62 daha fazla kaza
5.	Güvenlik denetimleri yapılmıyorsa	%40 daha fazla kaza
6.	Yazılı programları olan işletmelerle karşılaştırılacak yazılı bir program bulunmuyorsa	%6 daha fazla kaza
7.	İşletme kendisinin geliştirdiği değil, hazır program kullanıyorsa	%43 daha fazla kaza
8.	Yazılı güvenlik program bulunmuyorsa	%30 daha fazla kaza
9.	İşçi güvenlik komiteleri bulunmuyorsa	%74 daha fazla kaza
10.	Uzman güvenlik örgütleriyle işbirliği yapılmıyorsa	%64 daha fazla kaza
11.	Güvenlik başarısını izleyen bir sistem kurulmamışsa	%81 daha fazla kaza
12.	Kaza raporları belgelenmiyorsa ya da gözden geçirilmiyorsa ve/veya gözden geçirenler güvenliği iş sorumluluklarının bir parçası olarak ele almıyorsa.	%22 daha fazla kaza
13.	Nezaretçi, güvenlik konusunda kendi ücret düzeyini etkileyecek tarzda hesap vermekle yükümlü değilse.	%39 daha fazla kaza
14.	Üst yönetim güvenlik farkındalığını etkin şekilde geliştirmemişse.	%47 daha fazla kaza

**Tablo 2.** İş Kazası Nedenleri [7].

İş Kazalarının Nedenleri		
Temel Nedenler	Dolaylı Nedenler	Dolaysız Nedenler
Yönetmelikler Kişisel ve Çevresel Faktörler	Güvensiz Uygulamalar Güvensiz Şartlar	Planlanmamış İşlemler Zehirli Gazlar Tehlikeli Madde

## 2.2 İş Kazalarının Özellikleri

İş kazasının sık kullanılan açıklaması, Sosyal Sigortalar ve Genel Sağlık Sigortası Kanunu'nda belirtilen açıklamasıdır. Bu açıklamadaki temel unsur, iş kazalarında hangi durumlar için para

ödenebileceğinin açıklanmış olmasıdır. İşverenin sorumluluk alanına dışında kalan bazı durumları da kapsayabildiği açıklanmıştır. Ayrıca kaza ile iş kazasını da ayırmak gerekmektedir. Kaza, istenmeyen ve zarar görülen sonuçlara neden olan durumlardır; ama işyerlerinde olması bu olayların kurbanlarının iş kazası geçirdiğinin kanıtı değildir [8].

Kaza sayıları ve işyerlerinde çalışan sigortalı kişi sayıları Tablo 3'de belirtilmiştir. Bu tabloya göre işyerlerindeki çalışan sayısı arttıkça oransal olarak kaza sayılarında bir düşüş söz konusudur. Bu düşüşün içerisinde işletmelerin büyüdükçe İSG normlarını menfi çıkarları ve yasal olarak zorunlulukları gereği uygulamalarının gerçeği yattığı düşünülmektedir.

**Tablo 3.** SGK 2019 verilerine göre Sigortalı Personel - İşyeri Sayısı ve Kaza Sayısı - İş Kazası Sonucu Ölüm Dağılımları [9].

Sigortalı Sayısı	İşyeri Sayısı	Kaza Sayısı	İş Kazası Sonucu Ölüm
1-3	1.046.372	5.513	110
4-9	387.890	12.226	189
10-20	133.752	17.491	230
21-49	78.272	35.241	301
50-99	18.753	26.947	160
100-199	9.033	33.337	165
200-249	1.726	11.235	33
250-499	2.913	28.451	63
500-1000	951	23.471	48
>1000	328	27.454	327
<b>Toplam</b>	<b>1.679.990</b>	<b>221.366</b>	<b>1.626</b>

## III. İŞ SAĞLIĞI GÜVENLİĞİ KAVRAMINDA TARAFLARIN YÜKÜMLÜLÜKLERİ VE GÖREVLERİ

Güvenlik yönetimi bakımından güvenliği işletmeye bir değer olarak kazandırmak, hem yönetimin ve hem de işçilerin bağlılığına dayanmaktadır [10,11]. Nitekim bir işletmede iş güvenliği kültürü yaratmada temel unsur nitelikli elemanlardır. İş güvenliği konusunda gerekli hassasiyeti gösteren, tüm hükümlülüklerini yerine getirmek için öncelik veren idari yaklaşım ise kuruma olan bağlılığı arttırmaktadır.

### 3.1 İşverenlerin ve Çalışanların Yükümlülükleri ve Görevleri

İşletmenin iş güvenliği performansı üzerinde insan kaynağı, oldukça büyük bir etkiye sahiptir [3]. İnsan kaynağını menfaatleri gereği değerlendiren işveren, aynı zamanda kişilere, topluma ve devlete karşı bu

kaynağın korunması konusunda yükümlüdür. Yükümlülük gereği işverenin, işveren vekili tayin ederek İSG çalışmalarını yönetmesi tabidir. Yalnız bu yetki tayini, sorumluluk tayini anlamına gelmemektedir. Olası bir kaza sonrası yükümlülüğün işverende de olduğunun işverence bilinmesi gereklidir.

İşçiler, sertifika programlarının katkısı ile güvenlik eğitiminden geçerek, çalışma ortamında yaşanacak potansiyel zararlar ve tehlikeler hakkında bilgi edinmeli, İSİG bakımından alınacak önlemler ile ilgili faaliyetlere de katılmalıdırlar [3]. İşçiler, çalışma ortamlarında karşılaştıkları sıkıntılar hakkında ilgili kurula bilgi vermelidirler [12].

#### IV. İTFAİYE TEŞKİLATINDA ÖRNEK BİR UYGULAMA

6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu Türkiye'nin iş kazaları ve meslek hastalıkları ile ilgili olan durumunu iyileştirmek, iş sağlığı ve güvenliğinin bir lüks olmaktan çıkartılarak çalışma yaşamının genel standardı haline getirilmesi amacıyla çıkartılmış ve yasa 30.06.2012 tarihli Resmi Gazetede yayımlanmıştır. Kanunun uygulanmasında kademeli geçiş benimsenmiştir. Bu sebeple itfaiye teşkilatında uygulanacak olan iş sağlığı güvenliği çalışmaları 01.07.2016 tarihi ile geçerlilik kazanmıştır. Aynı kanunun 2. Maddesinin b bendinde istisnalar başlığı altında, Afet ve acil durum birimlerinin müdahale faaliyetleri kısmı kanundan istisna tutulmuştur. Kanun metninden anlaşılacağı üzere itfaiye teşkilatına bağlı istasyonlardan araçların hareket etmesine müteakip olay yerinde veya olay yerine hareket edildiği süre içerisinde gerçekleşebilecek bir kazada 6331 sayılı iş sağlığı güvenliği kanunu uygulanmamaktadır.

#### V. RİSK DEĞERLENDİRMESİ

Risk değerlendirme: "işyerlerinde var olan tehlikeler ile dışarıdan gelebilecek tehlikelerin, işçilere ya da iş yeri/çevresine verebileceği zararlara karşı alınacak önlemlerin belirlenmesi amacıyla yapılan çalışmalar" olarak ifade edilmektedir. Bu çalışmaların bilimsel olarak metodolojik bir şekilde yapılması, nicel olarak ispatlanabilir belirli bir takım tablo ve şekillerden yararlanması, değerlendirmenin gerçekçiliğini artırır. Risk değerlendirmesinin amaçları; risklerin tanımlanması, risk kaynaklarının belirlenmesi, riskin kimleri etkilediği, aciliyeti ve önleme yöntemlerinin belirlenmesidir. Bir kamu işletmesi olan İtfaiye Teşkilatında ilk defa uygulanmaya başlanan risk değerlendirmesi kavramı organizasyon kültürü bağlamında yeni durumlar ortaya çıkmaktadır. Süreç boyunca profesyonel destek alınarak risk değerlendirmesinin uygun şartlar altında yapılması büyük bir zorunluluk teşkil etmektedir. Sadece kanunların öngördüğü şekilde bürokratik olarak risk değerlendirmesini kağıt üzerinde yapmak, olası riskleri tam anlamıyla engelleme açısından yavan

kaldığı kadar, sonuç itibari ile ilgilileri tam anlamıyla idari cezalardan kurtarması da söz konusu olmayacaktır.

#### 5.1 Metodoloji Seçimi ve Tanımlamalar

Risk değerlendirme çalışmalarının işyerlerinde oldukça büyük oranda kayıpları engellediği ve gerek üretim artışı gerekse insan sağlığı konusunda büyük yararlar sağladığı bir gerçektir. Ancak bu çalışmalara sadece kanuni zorunluluk tarafından bakılarak yapılması ve yanlış uygulamalar gerçekleştirilmesi işyerlerine bir yarar sağlamayacağı gibi, emek ve zaman gibi değerleri tüketecek ve hatta işyerine büyük oranda zarar verecektir. Ayrıca farklı iş kolları ve farklı fiziki şartları bulunan işyeri yapıları olası tehlikelerinde çeşitlenmesine neden olmaktadır. Diğer bir deyişle tüm işyerlerinin tehlike potansiyelleri birbirlerinden farklılıklar göstermektedir. Bu sebeplerden dolayı tüm işyerlerini kapsayan bir risk analizi metodolojisi bulunmamaktadır. Risk değerlendirme metodolojileri, risk analizi sürecinin matematiksel işlemler ve yorumlarının yapıldığı çekirdek kısmını oluşturmaktadır. Dünyada, günümüzde uygulanan standart halini almış veya almamış birçok risk değerlendirme yöntemi mevcuttur. Risk değerlendirme yöntemlerine baktığımızda "Kalitatif (Nitel) Yaklaşım" ve "Kantitatif (Nicel) Yaklaşım" içeren yöntemlerin bulunduğu görülmektedir. Bu yöntemlerin hepsi işletmelerdeki çeşitli gereksinimler üzerine geliştirilmiş ve kullanılmaya başlanmıştır [13]. Pek çok faktör, nicel bir risk değerlendirmesine karşı nitel bir karar verme kararını etkileyebilir. Sonuç çıkaracak hiçbir veri mevcut değilse, nicel bir risk değerlendirmesi mümkün olmaz. Veri kalitesi, zaman, personel veya kaynaklardaki kısıtlamalar, tam bir kantitatif risk değerlendirmesine izin vermeyebilir. Ancak, veri boşlukları nicel risk değerlendirmesinin önünde bir engel olmak zorunda değildir.

Genel anlamda İtfaiye teşkilatını işletme kavramı, itfaiye istasyonunu da işyeri kavramları ifade etmektedir. İşyeri ek yapıları, yapılacak olan İSG çalışmalarında işyeri ile beraber değerlendirilemeyeceği ve itfaiye istasyonlarında 500 kişinin altında çalışan olduğu düşünüldüğünde her işyeri için bir İSG uzmanının kısmi olarak görevlendirileceği açıktır. Bu sebepten dolayı metodolojinin basit prosedürlü olacak şekilde, mümkün olduğunca az doküman kullanarak, sebep sonuç ilişkileri içinde gerçekleştirilmesi evrak karmaşasını önleyecektir. Ayrıca işyerinin yapısı ve hizmet sektöründe olması sebebiyle nitel bir çalışma yapılmasının daha uygun olduğu ortaya çıkmaktadır. Bununla beraber, bu işyerlerinde orta düzeyde tecrübeli yöneticilerin de çalışma kapsamına girmesini sağlayacak bir sistem seçilmelidir.

## 5.2 Risk Yönetimi ve Süreci

Risk yönetimi, çevre güvenliği ve insan hayatı konularında risklerin değerlendirilmesi, iş kazası ve meslek hastalıklarının nedenleri ile bunlara neden olabilecek faktörlerle ilgili en etkin bilgiyi toplayarak sorunların ortaya çıkmasını engellemek için etkili bir güvenlik ağı kurmaktadır [14]. İSG yönetim sisteminin temel amacı işyerlerindeki çalışma olanaklarından kaynaklanan her türlü tehlikeyi ve

sağlık riskini azaltarak insan sağlığını etkilemeyen seviyeye düşmesini sağlamaktır [15]. Bu amaç kapsamında “Risk Yönetim Süreci” İSG yönetim sisteminin temel taşını teşkil eder [13,16]. Sonuçların değerlendirilmesi için Tablo 4’teki risk etkisi matrisi oluşturulmuştur. Görülen riskin olabilirlik ve şiddet çarpımı, meydana gelecek olan kazanın şiddeti hakkında bir öngörü edinmeyi sağlar.

**Tablo 4.** Risk skoru matrisi.

Şiddet Olabilirlik	1	2	3	4	5
1	Çok Az Risk 1	Az Riskli 2	Az Riskli 3	Az Riskli 4	Az Riskli 5
2	Az Riskli 2	Az Riskli 4	Az Riskli 6	Riskli 8	Riskli 10
3	Az Riskli 3	Az Riskli 6	Riskli 9	Riskli 12	Riskli 15
4	Az Riskli 4	Riskli 8	Riskli 12	Çok Riskli 16	Çok Riskli 20
5	Az Riskli 5	Riskli 10	Riskli 15	Çok Riskli 20	Çok Yüksek Riskli 25

Muhtemel bir olay sonrası beklenen zararın derecelendirilmesi için Tablo 5’ teki risk etki derecesi

kullanılarak etki puanına göre risk skoru hesaplaması yapılmalıdır.

**Tablo 5.** Risk etkisi.

Etki	Etki Derecesi	Puan
Düşük oranda hafif çizikler, burkulmalar	Çok Hafif	1
Hafif yanık, Hafif yaralanma, kayma, takılma ve benzeri nedenleri düşme	Hafif	2
Sıkışma, ezilme kulak zarı hasarı, üzerine cisim düşmesi ve çarpması, yüksekte düşme	Orta	3
Boğulma, zehirlenme, ciddi yaralanma, uzuv kopması, kafatası yaralanmaları, sürekli iş göremezlik, Ölü sayısının çok olması (birden fazla ölüm),	Ciddi	4
	Çok Ciddi	5

Muhtemel bir olay sonrası beklenen zararın derecelendirilmesi için Tablo 6’ da bulunan risk olasılığı kullanılarak etki puanına göre risk skoru hesaplaması yapılmalıdır.

**Tablo 6.** Risk olasılığı.

Ortaya Çıkma Olasılığı	Olasılık Derecesi	Puan
Nadiren	Çok Küçük	1
Çok az (yılda bir kez)	Küçük	2
Az (yılda birkaç kez)	Orta	3
Sıklıkla (ayda bir)	Yüksek	4
Çok sıklıkla (haftada bir)	Çok Yüksek	5

## VI. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan çalışma ilgili kanunlar ve kanunlara bağlı olarak yayınlanan yönetmelik ve mevzuatlar doğrultusunda, işyerindeki risk faktörleri değerlendirilerek yapılmıştır. Her iş yerindeki tehlike unsurlarının yapıları farklı olduğu kadar çözüm metodları da farklılık arz etmektedir. Bu sebepten dolayı özellikle risk analizi esnasındaki bu çalışma iş

kolunun tamamen ilgili olmadığı bir işyerine örnek teşkil etmemektedir. Diğer bir deyişle bu çalışma örnekten ziyade bir kılavuz niteliği taşımaktadır. İSG konusunda benzer bir çalışmanın yapılabilmesi için tüm risk etmenlerinin, yapılan işin gereği farklı bir çalışma tarzı ve metod ile yapılarak değerlendirilmesi daha isabetli ve kararlı sonuçlar verecektir.

İstasyon içi uygulamalarda “nace kodu” olarak adlandırılan kod ile itfaiye istasyonunun taşıdığı risk potansiyeli dikkate alındığında, itfaiye istasyonları belirlenen cetvele göre çok tehlikeli risk kapsamında yer almaktadır. Bu sebepten dolayı Risk değerlendirmelerinin en geç 2 yılda 1 yapılması gerekmekte aynı zamanda iş sağlığı güvenliği kurul toplantılarının da her ay yapılması gerekmektedir. Kurul kararları noter veya ilgili müdürlükten imzalanan onaylı deftere kaydedilmektedir. Kurul kararları itfaiye istasyonlarının dahilinde olası risklerin minimuma indirilmesi ile ilgili kararları kapsar ve kararlar iş güvenliği uzmanı ile iş yeri hekimi tarafından işveren veya işveren vekiline tebliğ



edilir. Gerekli düzenlemeler en kısa zamanda yapılarak bir sonraki kurul toplantısında önceki kurulda yer alan tebliğlerin hangi oranda gerçekleştirildikleri gündeme alınarak ilerleme sağlanır. Kanun içeriği ile; Kurul dahilinde bulunan seçilmiş gelmiş veya görevlendirilmiş kişiler işyerinde hiçbir şekilde kötü davranış ve muameleye maruz kalamaz veya özlük haklarından alıkonulamazlar.

İşyerlerindeki güvenli ve sağlıklı çalışma standartlarına kavuşulması, güvenlik ikliminin benimsenerek uygulanması yanında; yönetmelikte belirtilen görev, yetki ve sorumluluk zinciri içerisinde çalışan, işveren, devlet, STK'lar etkin ve entegre şekilde birlikte çalışmalıdır. Alınacak önlemleri kısa zamanda yerine getirmek üzere ciddi, somut adımlar atılması evrensel bir değer olan insan yaşamının korunması yanında işyerlerinin varoluş amacı olan üretim güvenliğini de koruyacaktır. Sonuç olarak; bu çalışmada itfaiye teşkilatında bir risk değerlendirmesi, kılavuz önerisinde bulunulmuş ve değerlendirilmiştir.

## KAYNAKLAR

- [1] Lucas D.L., Laurel D.K., Viktor E.B., & Jennifer M.L. (2014). Application of a translational research model to assess the progress of occupational safety research in the international commercial fishing industry, *Safety Science*, 64, 71-81.
- [2] İBB – İstanbul Büyükşehir Belediyesi (2019). [www.ibb.gov.tr](http://www.ibb.gov.tr).
- [3] Demirbilek, T. (2005). İş güvenliği kültürü. İzmir: Legal Yayınları.
- [4] Aydın, M. (2012). 2200 Soruda iş sağlığı ve güvenliği. Ankara: Riskmed Yayınları.
- [5] Güven, E. (1970). İş kazası yönünden sosyal politika sorunları. Eskişehir Anadolu Üniversitesi Yayınları.
- [6] Güzel, A., & Okur, C. (2003). Sosyal güvenlik hukuku, 9. Baskı. İstanbul: Beta Yayınları.
- [7] Yanturalı, B. (2015). İş sağlığı ve güvenliğinde risk değerlendirmesi ve bir uygulama çalışması (Master's thesis, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [8] Özveri, M. (2018). Türkiye'de Meslek Hastalıkları Alanında Yaşanan Hukuki Açmazlar. *Calisma ve Toplum*, 57(2).
- [9] SGK – Sosyal Güvenlik Kurulu (2019). <http://www.isteguvenlik.tc>.
- [10] Hovden, J., Lie, T., Karlsen, J.E., Alteren, B. (2008). The safety representative under pressure. A study of occupational health and safety management in the Norwegian oil and gas industry, *Safety Science*, 46(3), 493-509.
- [11] Dudu, H. (2019). İş Sağlığı ve Güvenliği Kültürünün İş Tatmini ve İş Kazalarına Etkisi (Doctoral Dissertation, İstanbul Aydın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [12] Geldi, M. (2017). Ülkemizde sağlık kurumlarında iş sağlığı ve güvenliği/Occupational health and safety in Turkey health care institutions. (Master's thesis, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [13] Özkılıç, Ö. (2007). İş sağlığı güvenliği ve çevresel etki risk değerlendirmesi. İstanbul: Mess Yayınları.
- [14] Özkılıç, Ö. (2005). İş sağlığı ve güvenliği yönetim sistemleri ve risk değerlendirme metodolojileri. 3.Baskı. İstanbul: Tisk Yayınları.
- [15] Lau, W.K.Y., Liang, P., Man, Y.B., Chung, S.S., Wong, M.H. (2014). Human health risk assessment based on trace metals in suspended air particulates, surface dust, and floor dust from e-waste recycling workshops in Hong Kong, China, *Environmental Science and Pollution Research*, 21(5), 3813-3825.
- [16] Koçak, D. (2019). Bir Kömür Madeninde İş Sağlığı ve Güvenliği Risk Değerlendirmesi İçin Uygun Yöntem Seçimi. (Master's thesis, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).

## VRF ve Fan Coil Sistemlerinin İlk Yatırım ve İşletme Maliyetleri Açısından Karşılaştırılması

*Comparison of VRF and Fan Coil Systems in Terms of Investment Cost and Operating Cost*

Alperen TURAN<sup>1</sup> , Ayhan ONAT<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği, İstanbul, Türkiye

### Öz

İklimlendirme sistemlerinde; konfor, enerji verimliliği, kurulum ve işletme kolaylığı açısından değişken debili soğutucu akışkan (VRF) sistemleri son zamanlarda yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Bu sistemlerde, cihazın içinde bulunan soğutucu akışkan sayesinde ısıtma ve soğutma işlemi yapılabilmektedir. İklimlendirme sistemlerinde kullanılan diğer bir uygulama ise Fan Coil (FCU) sistemidir. Fan coil sistemi enerjinin su ile taşındığı ısıtma ve soğutma uygulamasıdır. Konfor şartları ve tasarım taleplerine göre iki (2) borulu ve dört (4) borulu olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada bir cadde mağazasının ısı kayıp kazanç yükleri, Transfer Fonksiyon Metodu (TFM) yöntemine göre değerlendirme ve analiz yapan Hourly Analysis Program'ı (HAP) kullanılarak hesaplanmıştır. 1076 m<sup>2</sup> alan için hesaplanan toplam soğutma yükü 152,93 kW ve ısıtma yükü ise 74,9 kWh olmuştur. Hesaplanan mahal ısı yüklerine göre VRF ve FCU sistem ekipmanları seçilmiştir.

Seçilen ekipmanlara göre yapılan analizler sonucunda; VRF sistemlerinin yatırım maliyetlerinde %24,6, işletme giderlerinde %32,5 ve enerji tüketiminde %33,7 daha fazla avantaj sağladığı tespit edilmiştir. Bu kapasitede ki yapılarda yatırım maliyetleri, işletme giderleri ve enerji tüketimi açısından VRF sistemlerinin kullanılmasının daha uygun olacağı ortaya konmuştur.

**Anahtar kelimeler:** VRF, Fan Coil, VRF ve Fan Coil Karşılaştırma, Transfer Fonksiyon Metodu, Hourly Analysis Program

### Abstract

In air conditioning systems; In terms of comfort, energy efficiency, ease of installation and operation, variable flow refrigerant (VRF) systems have recently become widely used. In these systems, heating and cooling process can be performed by means of the refrigerant in the device. Another application used in air conditioning systems is the Fan Coil (FCU) system. Fan coil system is the heating and cooling application where energy is carried by water. It is used as two (2) pipe and four (4) pipe according to comfort conditions and design demands. In this study, the heat loss gain loads of a street store were calculated using the Hourly Analysis Program (HAP), which evaluates and analyzes according to the Transfer Function Method (TFM) method. The total cooling load calculated for an area of 1076 m<sup>2</sup> was 152,93 kW and the heating load was 74,9 kWh. VRF and FCU system equipments were selected according to the calculated heat loads.

As a result of the analysis made according to the selected equipment; It has been found that VRF systems provide %24,6 advantage in investment costs, %32,5 in operating expenses and %33,7 in energy consumption. It has been shown that it is more appropriate to use VRF systems in terms of investment costs, operating costs and energy consumption in buildings of this capacity.

**Keywords:** VRF, Fan Coil, VRF and Fan Coil Compare, Transfer Function Method, Hourly Analysis Program

## I. GİRİŞ

Fosil enerjiler (kömür-petrol gibi) insan hayatında ve dünyamızda olumsuz etkiler yapmaya devam etmektedir. Günümüzde ısıtma ve soğutma amaçlı kullanılan cihaz ve sistemlerde enerji verimliliğinin artırılması ve konfor parametrelerinin geliştirilmesi için çalışmalar devam etmektedir. Bu sistemlerin en yaygın kullanılanları değişken debili soğutucu akışkan (VRF) ve Fan Coil (FCU) uygulamalarıdır. VRF sistemleri, soğutma ve ısıtma

sistemi olarak kullanılabilir. Bu özelliği sayesinde VRF sistemi; okul, hastane vb birçok yapıda tercih edilmektedir. Aynı zamanda yapıların mimarisine ve geometrisine de uygunluğu, bu sistemin tercih edilme sebeplerinin başında gelmektedir. VRF sisteminde tek bir dış ünite birden fazla iç üniteye bağlanabilmekte, ısıtma ve soğutma yaparak enerji kullanımında tasarruf sağlamaktadır.

FCU sistemleri ise 2 borulu ve 4 borulu olarak tasarlanabilmektedir. Yatırımcı isteğine ve mahalın yapısına uygun olarak sistem ekipmanları belirlenmektedir. 2 borulu sistem sadece ısıtma ya da sadece soğutma yaparken, 4 borulu sistem mahallerin ihtiyacına ve kullanıcıların isteğine bağlı olacak şekilde aynı anda ısıtma veya soğutma modunda çalışabilmektedir. FCU sistemi iki (2) borulu ve dört (4) borulu olarak tasarlanabilmektedir. Yatırımcı isteğine ve mahalın yapısına uygun olarak sistem ekipmanları belirlenmektedir. 2 borulu sistem sadece ısıtma ya da sadece soğutma yaparken 4 borulu sistemde mahaller hem ısıtma hem de soğutma modunda çalıştırabilmektedir.

Bu tezin amacı; bir mağazanın TFM ve HAP ile ısı kayıp kazanç yüklerini hesaplayarak mahallerin ısı yükü listelerini oluşturmak ve çıkan mahal ısı yüklerine göre VRF ve FCU sisteminin ekipmanları seçilecektir. Ayrıca bu iki sistem ilk yatırım maliyetleri, işletme maliyetleri ve enerji analizleri açısından karşılaştırılacaktır.

VRF Sistemi ile FCU sistemi hakkında ulusal ve uluslararası birçok araştırma yapılmış ve yapılmaya da devam etmektedir. Yapılan bu çalışmalar araştırılıp incelenerek aşağıda özetleri verilmiştir.

Aynur T.N., Hwang, Y., Radermacher R. [1.2] VRF sistemlerinin ofisteki uygulamaları ile ilgili bir çalışma yapmıştır. Yapılan bu çalışmada iki farklı kontrol modu kullanmıştır. Bunlardan biri bireysel diğeri ise ofis merkezinden kontrol edilme şeklindedir. Bireysel kontrol modunda, VRF sisteminde iç ünitelerin hepsi kendi termostatları ile kontrol edilmiştir. Yani ne kadar iç ünite var ise o kadar termostat var şeklinde yorumlanabilir. İkinci kontrol modunda ise ofis merkezinden tek bir termostat yardımı ile iç üniteleri kontrol etmektedir. Sonuçta, bireysel kontrol modunda, ana kontrol moduna göre hem daha iyi ısı kontrol hem de daha iyi ısı verim elde edilmiştir.

Çalışkan vd. [3] Maitsozenko çevrimi prensibine dayalı yeni bir hava soğutucunun sabit bir çevre sıcaklığında ve 9 farklı ölü sıcaklık durumlarında enerji, ekserji ve termoeconomik açıdan analizini yapmıştır. Enerji analizinde soğutma tesir katsayısı ve soğutma kapasiteleri hesaplanmıştır. Ekserji analizinde ise ekserji kayıpları ve ekserji verimleri hesaplanmıştır.

Park ve Kim [4], iç ünite yüklerini ve kompresör hızını değiştirerek, iki iç üniteli birbirinden ayrı elektronik genleşme valfi (EEV) bulunan çok yönlü VRF sisteminin performansının ölçülmesi ile ilgili bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada, iç üniteler için aşırı kızgınlık değerinin EEV ayarı yapılarak 4°C'de tutulması ve kompresör hızının her bir iç ünite için yeterli soğutma kapasitesini sağlayacak şekilde ayarlanması gerektiği ortaya konmuştur.

Xia [5], Beş adet iç üniteli çok yönlü üç borulu VRF sistemi için bir deney düzeneği tasarlanmıştır. Bu deney düzeneğinde, iç üniteler ve dış ünite bulunan 6 adet kalorimetre ile gerçekleştirilmiştir. COP değeri, sistemin toplam ısı yükünün, tükettiği toplam enerjiye oranına eşittir. Bu çalışmada, İki kompresörün tandem olarak kullanmasının, performans değerini artırdığı tespit edilmiştir.

Masuda [6], iki iç üniteli çok yönlü VRF sistemi için bir kontrol metodu geliştirmiştir. Bu yeni kontrol metodu, soğutma yükü fazla olan odada kurulan iç üniteye soğutucu akışkan debisinin diğerini göre daha fazla olduğunu göstermiştir. Bu metod oda sıcaklığının istenilen sıcaklığa geldiğinde kompresör frekansının azalmasını veya tersi durumda yükselmesini sağlamaktadır. Sonuç olarak, yeni kontrol metodu ile iç ünitelerdeki soğutucu akışkan debisinin birbirinden bağımsız şekilde kontrol edilebilir.

Hai [7], 30 kW anma kapasiteli 3 borulu çok yönlü VRF sistemi üzerine çalışmıştır. Sistem, R22 soğutucu akışkanı kullanılan ve hepsi farklı kapasitede beş iç üniteye sahip bir uygulamadır. Deneysel çalışmalar sonucu, kararlı şartlar altında sistemin COP değerlerinin eşzamanlı ısıtma-soğutma modunda yüksek olduğu ortaya konmuştur.

VRF sistemlerinde iç üniteye bulunan sıcaklık sensörü, gerçek hava sıcaklığı ile termostat sıcaklığını karşılaştırmak için kullanılmıştır. Sıcaklık farkına göre, iç üniteye giden soğutucu akışkan debisi EEV tarafından ayarlanmıştır. Böylece, termostat sıcaklığı ve gerçek ortam sıcaklığına göre, her bir iç ünite birbirinden bağımsız bir şekilde kontrol edilmiş ve iç ünitelerin bir kısmı çalışmaya bile diğerleri çalışmaya devam etmiştir. Böylece, farklı bölgeler birbirinden bağımsız sıcaklıklara sahip olmuştur [8].

Hai [9], buz depolama tanklı çok yönlü VRF sistemi üzerine araştırma yapmış ve yeni bir sistem tasarlanmıştır. Buz depolama tankı ile birlikte ekstra 30oC alt soğutma sağlanmış ve bu durum enerji verim oranında %25 artış sağlamıştır. Shanghai'daki elektrik fiyatları göz önüne alındığında bu sistemin yatırım geri dönüş süresi 3 yıl olarak hesaplanmıştır.

Özsoy, ve diğerleri [10] fan coil hava hızlarının farklılaşması ve hava dağılımı incelenmiştir. Çeşitli

açılara göre, optimum tasarımı distribütör sayesinde açığı, hava dağılımını iyileştirilmiş ve daha homojen hava dağılımı elde edilmiştir.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

### 2.1. Binanın Genel Özellikleri

Çalışmada kullanılan mimari yapı cadde üzerinde yer alan bir mağazaya ait olup Autocad programı ile 2 boyutlu olarak çizilmiştir. Bina üzerinde HAP Carrier programı ile mahallerin ısı kayıp ve kazançları hesaplanmıştır. Yapılan hesaplar sonrası sistem dizaynı için gerekli cihaz seçimleri, yatırım maliyetleri ve işletme maliyetleri hesaplanmıştır.

Bina kapalı alanı 1076 m<sup>2</sup>'dir. Toplam 14 alandan oluşmaktadır. Oluşturulan mahallerle birlikte sisteme göre zonlamalar yapılmıştır. Saatlik müşteri yoğunlukları ve dış hava şartları göz önünde bulundurularak hesaplamalar tamamlanmıştır.

### 2.2. Transfer Fonksiyon Metodu

Transfer fonksiyon metodu "American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers" (ASHRAE) tarafından 1972 yılında ısı hesaplarının uyarlaması olarak sunulan bir yöntemdir. HAP programının temel hesaplaması TFM ile sağlanmaktadır. Isı transferi iletim, taşınım ve ışınım yöntemi ile sağlanmaktadır. TFM ise bu yöntemlerin haricinde üzerinden ısı geçişi olan maddelerin belirli zamanlarda ısıyı tutması ve daha sonradan bırakmasını temel ilke edinmektedir.

HAP programı temelinde saatlik ısı kazanç kayıplarını hesapladığı için TFM yöntemiyle birlikte günün belirli saatlerinde hapsedilen ve salınan ısıyı da hesaba katarak analizlerin daha doğru sonuçlar vermesini sağlamaktadır. Örnek verilecek olursa ısı geçişi olan bir duvar öğle saatlerinde içerisinde hapsedtiği ısıyı akşam saatlerinde bırakarak ısı kayıp ve kazanç miktarına etki etmektedir. TFM sadece duvar gibi iletimle yapılan ısı geçişlerini değil aynı zamanda insanlar, aydınlatmalar, elektrikli cihazlar vb. tüm elementlerin ısı değişkenliklerini hesaplamaktadır.

Transfer Fonksiyonu yöntemi yukarıda bahsedilen hesaplamaları yaparak aslında dinamik ısı transferlerini hesaplamaktadır. Dinamik ısı transferleri ise saatlik verilerin analizlerinde istenen değişkenleri bir matematiğe dayandırarak daha doğru sonuçlar vermektedir. Bilgisayar yazılımı kullanılarak optimize edilmiş bu yöntem yayınlandığı zamandan günümüze kadar HAP programıyla birlikte en efektif kullanılan ısı transfer yöntemidir.

### 2.3. Isı Transfer Etkenleri

#### 2.3.1. Duvar ve çatı yükleri hesabı

Duvar ve çatı yükleri hesabı hesap raporları içeriğinde "Duvar" ve "Çatı" bölümlerinde görülmektedir. Program içeriğine tanımlanan değerler sonucunda program transfer fonksiyon metodu yöntemiyle duvar ve çatı yüklerini hesaplayarak mahal kayıplarında

göstermektedir. Duvar ve çatı yükü hesapları Eşitlik.1'e göre yapılmaktadır.

$$T_{sa} = T_{oa} + \frac{aI_t}{h_o} - \frac{eD_R}{h_o} \quad (1)$$

- $T_{sa}$  : İç hava sıcaklığı (°C)  
 $T_{oa}$  : Dış hava sıcaklığı (°C)  
 $a$  : Duvar veya çatı sıcaklık emiciliği katsayısı (Birimsiz)  
 $I_t$  : Duvar veya yüzey üzerinden ısı akışı (W/m<sup>2</sup>)  
 $h_o$  : Dış duvar veya çatı yüzeyinde konvektif ısı transfer katsayısı (17.0 W/m<sup>2</sup>)  
 $e$  : Dış yüzeyin yarı küre salınımı. 1.0 değeri kullanılır.  
 $D_R$  : Dış yüzeydeki uzun dalga radyasyonu ile kara cisim radyasyonu arasındaki fark. Dikey yüzeyler için DR=0.0. Yatay yüzeyler için DR=20.0

#### 2.3.2. Cam güneş yükü hesabı

Cam güneş yükleri hesabı hesap raporları içeriğinde "Pencere güneş etkisi" bölümünde görülmektedir. Cam veya tavanda yer alan pencerelerden içeri giren güneş etkisi bu bölümde hesaplanmaktadır. Cam güneş yükü hesabı Eşitlik.2'ye göre yapılmaktadır.

$$SHG = TSHG + ASHG \quad (2)$$

$$TSHG = [TSHGF_b(1 - F_g) + TSHGF_d] (SC) (A)$$

$$ASHG = [ASHGF_b(1 - F_g) + ASHGF_d] (N_i) (SC) (A)$$

- $A$  : Cam alanı (m<sup>2</sup>)  
 $ASHG$  : Güneş ısıısının absorbe edilen bileşeni (W)  
 $ASGH_b$  : Absorbe edilmiş güneş ısıısı kazancının ışın bileşeni (W)  
 $ASHG_d$  : Absorbe edilmiş güneş ısıısı kazancının dağınık bileşenleri (W/m<sup>2</sup>)  
 $F_g$  : Doğrudan güneş ışığından gölgeli pencere alanı kesri, ondalık  
 $N_i$  : Binanın iç kısmına yapılan referans cam tarafından absorbe edilen güneş ışınımının oranı. 0.267'lik standart bir değer kullanılır.  
 $SC$  : Pencerenin genel gölge katsayısı (Birimsiz)  
 $SHG$  : Pencere, W için toplam güneş ısıısı kazancı  
 $TSHG$  : Güneş ısıısı kazancının bileşeni (W)  
 $TSHG_b$  : İletilen güneş ısıısı kazancının bileşeni (W)  
 $TSHG_d$  : İletilen güneş ısıısı kazancının değişken bileşeni (W/m<sup>2</sup>)

### 2.3.3. Cam ısı geçişi yükü hesabı

Cam ısı geçişi yükleri hesabı hesap raporları içeriğinde “Cam” bölümünde görünmektedir. Dışarıya açılan veya camdan ısı geçişi olan mahaller için katsayılar tanımlanmaktadır. Tanımlı katsayılar hesaba katılarak cam güneş yükleri hesabı program üzerinden hesaplanmaktadır. Cam ısı geçiş yükü hesabı Eşitlik.3’e göre yapılmaktadır.

$$q = UA T_{oa} - T_r \quad (3)$$

- q : Cam transmisyon ısı kazancı (W)  
 U : Pencere U değeri (W/m<sup>2</sup>-°C)  
 A : Pencere alanı (m<sup>2</sup>)  
 T<sub>r</sub> : Oda hava sıcaklığı (°C)  
 T<sub>oa</sub> : Dış hava sıcaklığı (°C)

### 2.3.4. Bölme ve tavan yükü hesabı

Bölme ve tavan yükleri program içerisinde aynı katsayı ve yöntemle hesaplanmaktadır. Odalar arası duvar geçişleri ve katlar arası geçişler hesap raporları içerisinde “Bölme” ve “Tavan” bölümlerinde görünmektedir. Bölme yüklerinin hesaba girebilmesi için tasarlanan odalarda konfor sıcaklıklarının farklı olması gerekmektedir. Böylece ısı geçişi oda duvarları arasından sağlanabilir. Aynı konfor şartlarında varsayılan odalar arasında ısı geçişi olmayacağı için bölme ve tavan yükleri hesap içerisinde yok sayılacaktır. Bölme ve tavan yükü hesabı formülü aşağıda verilen Eşitlik.4’e göre yapılmaktadır.

$$q = UA (T_{adj} - T_r) \quad (4)$$

- q : Isı kazancı (W)  
 U : Bölme veya tavan U değeri (W/m<sup>2</sup>-K)  
 A : Bölme veya tavan alanı (m<sup>2</sup>)  
 T<sub>adj</sub> : Bitişik boşluktaki sıcaklık (°C)  
 T<sub>r</sub> : Oda sıcaklığı (°C)

### 2.3.5. Kat yükü hesabı

Kat yükü hesabı hesap raporları içeriğinde “Kat” bölümünde görünmektedir. Katlar arası ısı geçişlerinin hesabının yapıldığı bu bölümde kat döşemelerinin alanlarının ve geçiş katsayılarının girilmesiyle program üzerinden sonuçlar hesaplanmaktadır. Zemine oturmuş katlarda kat yükü hesabı Eşitlik.5’e göre yapılmaktadır.

$$q_f = P (T_{oa} - T_r) \frac{k_{soil}}{\pi x} \left[ \ln \left( \frac{1}{h_o} + \frac{w\pi}{k_{soil}} + R_f + R_{si} + R_s \right) - \ln \left( \frac{1}{h_o} + R_f + R_{si} + R_s \right) \right] \quad (5)$$

Zemin kotu altında kalan alanlarda kat yükü hesabı Eşitlik.6 ve Eşitlik.7’ye göre yapılmaktadır.

$$q_f = P (T_{oa} - T_r) \frac{k_{soil}}{\pi x} \left[ \ln \left( \frac{1}{h_o} + \frac{D_f \pi}{2k_{soil}} + \frac{w\pi}{k_{soil} + R_s} \right) - \ln \left( \frac{1}{h_o} + \frac{D_f \pi}{2k_{soil} + s} \right) \right] \quad (6)$$

$$q_w = P (T_{oa} - T_r) \frac{2k_{soil}}{\pi x} \left[ \ln \left( \frac{1}{h_o} + \frac{\pi D_i}{2k_{soil}} + R_{wi} + R_w \right) - \ln \left( \frac{1}{h_o} + R_{wi} + R_w \right) + \ln \left( \frac{1}{h_o} + \frac{D_f \pi}{2k_{soil}} + R_w \right) - \ln \left( \frac{1}{h_o} + \frac{D_i \pi}{2k_{soil}} + R_w \right) \right] \quad (7)$$

- D<sub>f</sub> : Katın zeminden aşağısında yer alan kotu (m)  
 D<sub>i</sub> : Zemin kotu altında ki duvarın derinliği (m)  
 h<sub>o</sub> : Dış yüzey konveksiyon katsayısı (34.1 W/m<sup>2</sup>-°C)  
 k<sub>soil</sub> : Toprak ısı iletkenliği (W/m-°C)  
 P : Toprakla temasa maruz kalan duvarın çevresi (m)  
 q<sub>f</sub> : Zemin ısı kazancı (W)  
 q<sub>w</sub> : Bodrum duvarı ısı kazancı, (W)  
 R<sub>f</sub> : Temel içindeki duvar için ısı direnci, ((0.289m<sup>2</sup>-k)/W)  
 R<sub>si</sub> : Döşemede kullanılan yalıtımı için ısı direnci ((m<sup>2</sup>-k)/W)  
 R<sub>s</sub> : Zemin malzemesi karo veya halı gibi herhangi bir kaplama ve iç yüzey direnci dahil ısı direnci ((m<sup>2</sup>-k)/W)  
 R<sub>w</sub> : Duvar malzemesi karo veya halı gibi herhangi bir kaplama ve iç yüzey direnci dahil ısı direnci ((m<sup>2</sup>-k)/W)  
 R<sub>wi</sub> : Bodrum duvarın dış yüzeyine uygulanan yalıtımın ısı direnci ((m<sup>2</sup>-k)/W)  
 T<sub>oa</sub> : Dış hava sıcaklığı (°C)  
 T<sub>r</sub> : Oda hava sıcaklığı (°C)  
 W : Efektif kat genişliği, kat alanından etkilenen çevreye bölünerek hesaplanır

### 2.3.6. Aydınlatma yükü hesabı

Mahal içerisinde kullanılan aydınlatmalar ısı yaymaktadır. Kullanılan armatür türlerine göre yayılan ısı miktarları değişiklik göstermektedir. Aydınlatma yüklerinin belirlenmesi için oda içerisinde kullanılacak armatür sayısı ve modeli bilinmelidir. Aydınlatma yükleri hesap raporlarında “Başüstü Aydınlatma” ve “Masa Aydınlatması” bölümlerinde görünmektedir. Başüstü aydınlatma kısmı odanın aydınlatılması için kullanılan armatürlerin yaydığı ısı yükünü temsil etmektedir. Masa aydınlatması kısmı ise çalışma odalarında kullanılan masa üstü lambaları temsil etmektedir. Aydınlatma yükü Eşitlik.8’e göre yapılmaktadır.

$$q = K PI (BM) F_s / 100 \quad (8)$$

- q : Aydınlatma ısı kazancı (W)  
 K : Birim dönüşüm faktörü; S.I metrik birimleri için 1.0  
 P<sub>i</sub> : Aydınlatma gücü armatürü (watt)  
 BM : Balast çarpanı, ondalık

$F_s$  : Maksimum aydınlatma yükünün saatlik yüzde değeri

### 2.3.7. Elektrik ekipman yükü hesabı

Hesap raporları içerisinde yer alan “Elektrik Ekipmanı” bölümü mahallerde kullanılan elektronik cihazların yaydığı ısı yükünü temsil etmektedir. Program içerisine elektrik ekipmanlarının yaydığı ısı yükleri doğrudan girilmekte veya tasarlanan odanın kullanım amacına göre m<sup>2</sup> başına belirli bir ısı yükü tanımlanmaktadır. Elektrik ekipman yükü hesabı Eşitlik 9’a göre yapılmaktadır.

$$q = K P_e \frac{F_s}{100} \quad (9)$$

$q$  : Aydınlatma ısı kazancı (W)  
 $K$  : Birim dönüşüm faktörü; S.I metrik birimleri için 1.0  
 $P_e$  : Elektrik ekipman maksimum gücü (watt)  
 $F_s$  : Maksimum elektrik ekipman yükünün saatlik yüzde değeri

### 2.3.8. İnsan yükü hesabı

İnsan yükü hesabı mahal içerisinde bulunan insanların yaptıkları aktivitelere göre vücuttan yayılan ısı yükünü hesaba yansıtmaktadır. Hesap raporlarında “İnsan” olarak belirtilen kısımda ısı yükleri gösterilmektedir. Program içerisinde yükler hesaplanırken ilgili mahalde kaç insan bulunduğu, insanların aktiviteleri gibi değişkenler tanımlanmaktadır. İnsan yükü hesabı Eşitlik.10’a göre yapılmaktadır.

$$q = (HG)(O) \frac{F_s}{100} \quad (10)$$

$q$  : İnsanların ısı kazancı (W)  
 $K$  : Birim dönüşüm faktörü; S.I metrik birimleri için 1.0  
 $O$  : Maksimum insan sayısı  
 $F_s$  : Maksimum insan yükünün saatlik yüzde değeri

### 2.3.9. İnfiltrasyon ısı yükü hesabı

İnfiltrasyon ısı yükü, hesap programı içerisinde sadece hava akışının olduğu mahallerde hesaba katılmaktadır. İnfiltrasyon ısı mahale hava yoluyla taşınan veya hava yoluyla dışarı çıkan ısı miktarını göstermektedir. Cam fuga ve kapı alanlarından sızan havalar mahalın sıcaklığını etkilemektedir. İnfiltrasyon yükü program

içerisinde “İnfiltrasyon” olarak yer almaktadır. İnfiltrasyon yükü hesabı Eşitlik 11’e göre yapılmaktadır.

$$V_i = (\text{Air Changes per Hour}) (AF) \frac{H}{K} \quad (11)$$

$$Q_s = \rho_a C_{pa} V_i K (T_{oa} - T_r)$$

$$Q_l = \rho_a H_{fg} V_i K (w_{oa} - w_r)$$

Burada;

$AF$  : Boşluk için taban alanı (m<sup>2</sup>)  
 $C_{pa}$  : Havanın ısınma ısısı (1004.8 J/kg-K)  
 $H$  : Kat zeminden tavana olan yükseklik (m)  
 $H_{fg}$  : Suyun buharlaşma gizli ısısı (2.4535x10<sup>6</sup> J/kg)  
 $K$  : Birim dönüşüm faktörü; S.I metrik birimleri için m<sup>3</sup>/1000 L  
 $\rho_a$  : Havanın yoğunluğu, yüksekliğe bağlı olarak (kg/m<sup>3</sup>)  
 $Q_l$  : Gizli infiltrasyon ısı yükü (W)  
 $Q_s$  : Hissedilir infiltrasyon ısı yükü (W)  
 $T_{oa}$  : Dış hava sıcaklığı (°C)  
 $T_r$  : Oda sıcaklığı (°C)  
 $V_i$  : İnfiltrasyon hava akış hızı L/s  
 $w_{oa}$  : Dış havanın özgül nemi (kg/kg)  
 $w_r$  : Oda havasının özgül nemi (kg/kg)

değerlerini ifade etmektedir.

## 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 3.1. Isı Kayıp Kazanç Hesabı

Binamız Bolu’da bulunan bir cadde mağazasına aittir. İnsan yoğunluğu, bina özellikleri gibi hususlar her mahal için ayrı ayrı tanımlanmış ve bu doğrultuda hesaplar ortaya çıkarılmıştır.

FCU ve VRF sistem tasarımının yapılması için belirlenen mağazanın ısı yükleri HAP Programı kullanılarak hesaplanmıştır.

Mahallere göre hesaplanan ısıtma ve soğutma yükleri ile toplam alanları Mahal listesi Tablo.1’de gösterilmiştir.

**Tablo 1.** Mahal Isıtma ve Soğutma Yüğü Listesi

Mahaller	Soğutma Yüğü (kWh)	Isıtma Yüğü (kWh)	Kat Alanı (m <sup>2</sup> )
1. Kat Satış Alanı	23,36	11,5	175,5
1.Kat Deneme Kabini	3,0	2,4	22,3
2. Kat Satış Alanı	23,36	11,5	175,5
2.Kat Deneme Kabini	3,0	2,4	22,3
3. Kat Satış Alanı	23,36	11,5	175,5
3.Kat Deneme Kabini	3,0	2,4	22,3
4. Kat Satış Alanı	23,36	11,5	175,5
4.Kat Deneme Kabini	3,0	2,4	22,3
5. Kat Depo	4,81	3,7	74
5. Kat Müdür Odası	1,08	0	5,8
5. Kat Pers. Soyunma Odası-1	0,80	0	3,6
5. Kat Pers. Soyunma Odası-2	0,83	0,1	3,6
Zemin Kat Deneme Kabini	2,08	1,2	12,8
Zemin Kat Satış Alanı	37,89	14,2	185
<b>Toplam</b>	<b>152,93</b>	<b>74,9</b>	<b>1076</b>

**3.2. VRF Sistemi Cihaz Seçimleri**

VRF sistemi için projede belirtilen IU (iç ünite) kodları ve seçilen cihazların listesi Tablo 2.'de gösterilmiştir.

Hesaplara göre cihazların seçim adetleri Tablo 3'de gösterilmektedir.

**Tablo 2.** VRF Cihaz ve Kapasiteleri

Cihaz Kodu	Açıklama	Cihaz Tipi	Kapasite (kWh)
IND-01	İç Ünite	Kaset	11,2
IND-02	İç Ünite	Kaset	9,0
IND-03	İç Ünite	Duvar	5,6
IND-04	İç Ünite	Duvar	3,6
IND-05	İç Ünite	Duvar	2,2
OU-01	Dış Ünite	Tek Kompresör	28,0
OU-02	Dış Ünite	Çift Kompresör	40,0

**Tablo 3.** VRF cihaz adetleri

İç Ünite	Zemin Kat	1. Kat	2. Kat	3. Kat	4. Kat	5. Kat
IND-01	2	2	2	2	2	
IND-02	2					
IND-03						1
IND-04		1	1	1	1	
IND-05	1					3

Tablolardan yola çıkılarak katlarda kullanılacak olan VRF iç ünite tipleri ve kapasiteleri belirtilmiştir. Toplam kapasite sonucu %100 diversite ile çalışmaya uygun dış ünite seçimi yapılmıştır. Daha verimli çalışma sistemi oluşturmak adına bina iki zona ayrılacaktır. 1. ve 2. kat birinci zon olarak 3. ve 4. kat ise ikinci zon olarak tasarlanmıştır. Sistem için oluşturulan zonlar Tablo 4'de zonlar ve kapasitesiler tablosunda gösterilmektedir.

**Tablo 4.** Zonlar ve Kapasiteler

Zonlar	Kapasite (kWh)	Seçilen Dış Ünite (HP)	Dış Ünite Kapasitesi (kWh)
Zemin 1 ve 2. kat	94,2	10+10+14	96
3, 4 ve 5. kat	58,5	10+14	68
<b>Toplam Kapasite(kW)</b>		164	

### 3.3. FCU Sistemi Cihaz Seçimleri

VRF sistemine alternatif olarak düşünülen FCU sistemi için aynı kapasite ve tiplerde iç ünite seçimlerinin yapıldığı tablo aşağıda yer almaktadır.

FCU cihaz ve kapasiteleri Tablo 5’de gösterilmiştir. Tablo 5’de gösterilen cihazların adetleri ve hesaplara göre seçim adetleri Tablo 6’da gösterilmektedir.

**Tablo 5.** FCU Cihaz ve Kapasiteleri

Cihaz Kodu	Açıklama	Cihaz Tipi	Kapasite (kWh)
FCU-01	İç Ünite	Kaset	10,47
FCU-02	İç Ünite	Kaset	9,72
FCU-03	İç Ünite	Döşeme	5,25
FCU-04	İç Ünite	Döşeme	3,61
FCU-05	İç Ünite	Döşeme	2,41
FCU-06	İç Ünite	Döşeme	1,97

**Tablo 6.** FCU Cihaz Adetleri

FCU Ünitesi	Zemin Kat	1. KAT	2. Kat	3. Kat	4. Kat	5. Kat
FCU-01	2					
FCU-02	2	3	3	3	3	
FCU-03						1
FCU-04		1	1	1	1	
FCU-05	1					
FCU-06						3

Cihaz seçimlerinin ardından sistem ekipman seçimleri yapılmalıdır. Sistem ekipmanları için duvar tipi yoğunlaşmalı kazan ve chiller sistemi kurulacaktır. Cihaz seçimleri soğutma kapasiteleri üzerinden yapılmıştır. Isıtma ve kazan kapasitesi hesap raporları baz alınarak yapılmalıdır. 185,03 kW soğutma kapasitesi baz alınarak 185,4 kW chiller seçimi yapılmıştır. Kapasite ihtiyacına göre kazan seçimi yapılacaktır. Toplam ısıtma ihtiyacı 74,9 kW çıkmaktadır. Tek kazan sistemi kurularak ısıtma ihtiyacı karşılanabilmektedir.

FCU tarafı ısıtma ihtiyacı için bir adet 100 kW duvar tipi yoğunlaşmalı kazan seçilmiştir.

### 3.4. FCU ve VRF Sistemi Cihaz Yatırım ve İşletme Maliyetleri

Cihaz seçimleri sonrası yatırım ve işletme maliyetlerinin karşılaştırılarak yatırımcıya doğru bilgi aktarılması ve ülke kaynaklarının doğru kullanılması konusu mühendisliğin getirdiği sorumlulukların başında gelmektedir. VRF sistemi yatırım maliyetleri ile ilgili çalışma tablosu Tablo 7’de gösterilmiştir.

**Tablo 7.** VRF Cihazları ve Fiyatları

Cihaz Kodu	Açıklama	Adet	Birim Fiyat (TL)	Toplam Fiyat (TL)
IND-01	Kaset Tipi İç Ünite	10	2.819,88	28.198,8
IND-02	Kaset Tipi İç Ünite	2	2.719,08	5.438,16
IND-03	Duvar Tipi İç Ünite	1	1.617,84	1.617,84
IND-04	Duvar Tipi İç Ünite	4	1.421,28	5.685,12
IND-05	Duvar Tipi İç Ünite	4	1.363,32	5.453,28
OU-01	Dış Ünite	3	19.146,96	57.440,88
OU-02	Dış Ünite	2	29.012,76	87.038,28
-	Dış Ünite Bağlantı Kiti	2	2792,40	5.584,80
-	Dış Ünite Bağlantı Kiti	1	3793,20	3.793,20
-	Bakır Borulama	1		80.097,94
<b>Toplam</b>				<b>280.348,3</b>

VRF sistem yatırım maliyetlerinde cihazların yanı sıra cihaz bağlantıları için kullanılan bakır boru, jointler ve gaz bulunmaktadır. Bağlantı kitleri cihazlardan gelen

dalların birleşerek dış üniteye tek bir giriş yapılmasında kullanılan birleştirici ekipmandır. 4 Borulu FCU sistemi yatırım maliyetleri ile ilgili çalışma Tablo 8’de gösterilmiştir.



**Tablo 8.** FCU Cihazları ve Fiyatları

Cihaz Kodu	Açıklama	Adet	Birim Fiyat (TL)	Toplam Fiyat (TL)
FCU-01	Kaset Tipi İç Ünite	2	4.120,80	8.241,6
FCU-02	Kaset Tipi İç Ünite	14	3.916,80	54.835,2
FCU-03	Döşeme Tipi İç Ünite	1	1.568,16	1.568,16
FCU-04	Döşeme Tipi İç Ünite	4	968,88	3.875,52
FCU-05	Döşeme Tipi İç Ünite	1	1.203,84	1.203,84
FCU-06	Döşeme Tipi İç Ünite	3	1.067,22	3.201,66
Chiller	Hava Kaynaklı	1	160.380	160.380
Kazan	Duvar Tipi Yoğuşmalı	1	14.230,00	14.230,00
Sirk. Pompası-1	Sirkülasyon Pompası	2	4.230,6	8.461,2
Sirk. Pompası-2	Sirkülasyon Pompası	2	6.725,4	13.450,8
Kazan Dairesi Ekipmanları	Vana grupları, denge kabı, genleşme tankı vb.	1	7.650,00	7.650,00
Borulama		1	94.756,80	94.756,80
			<b>Toplam</b>	<b>371.854,78</b>

Yatırımdan sonra başka bir önemli husus ise işletme maliyetleri ve sistem ömrüdür. İşletme maliyetleri içerisinde elektrik tüketim değerleri, yedek parça değişimleri, yıllık bakımlar ve teknik kadro maliyetleri

yer almaktadır. İki sistem özelinde yapılan elektrik tüketim değerleri aşağıda Tablo 9 ve Tablo 10'da gösterilmiştir.

**Tablo 9.** VRF Cihazları Elektrik Tüketim Değerleri

Cihaz Kodu	Adet	Cihaz Elektrik Tüketimi (kWh)	Cihazlar Toplam Elektrik Tüketim (kWh)
IND-01	10	0,14	1,40
IND-02	2	0,13	0,26
IND-03	1	0,04	0,04
IND-04	4	0,03	0,12
IND-05	4	0,03	0,12
OU-01	3	7,05	21,15
OU-02	2	11,19	22,38
Toplam (kWh)			45,47

**Tablo 10.** FCU Ekipmanları Elektrik Tüketim Değerleri

Cihaz Kodu	Adet	Cihaz Elektrik Tüketimi (kWh)	Cihazlar Toplam Elektrik Tüketim (kWh)
FCU-01	2	0,225	0,45
FCU-02	14	0,19	2,66
FCU-03	1	0,07	0,07
FCU-04	4	0,06	0,24
FCU-05	1	0,055	0,055

<b>FCU-06</b>	3	0,032	0,096
<b>Kazan</b>	1	0,43	0,43
<b>Chiller</b>	1	61,4	61,4
<b>Sirk.</b>	4	0,8	3,2
<b>Pompaları</b>			
Toplam (kWh)			68,601

İki sistemin saatlik elektrik sarfiyat değerlerinin belirlenmiştir. Elektrik sarfiyat birim fiyatı SEPAŞ tarafından belirlenmektedir. SEPAŞ'ın kWh ücretlendirmesi saatlik 0,2310 TL/kWh'tır. Belirlenen

değerler sonrası işletmenin yatırım maliyetlerinin devamında 8 yıllık işletme maliyeti Tablo11'de gösterilmiştir.

**Tablo 11.** VRF Sistemi İşletme Giderleri

İşletme Giderleri	Aylık	Aylık (TL/kWh)	Yıllık (TL)	8 Yıllık (TL)	Enflasyona Bağlı 8 Yıllık (TL)
<b>Elektrik</b>	7093,32 kWh	1.638,56	19.662,68	157.301,46	186.402,24
<b>Bakım</b>	₺ 315,00	315,00	3.780,00	56.700,00	30.240,00
<b>Yedek Parça</b>	₺ 69,00	69,00	828,00	6.624,00	6.624,00
<b>Teknik Ekip</b>	₺ 1.750,00	1.750,00	21.000,00	168.000,00	168.000,00
				<b>TOPLAM</b>	<b>₺ 391.266,24</b>

VRF işletme giderleri hesaplandıktan sonra sistemin 8 yıllık giderlerinin toplamına göre veriler yüzdesel olarak Şekil 1'de gösterilmiştir.

Belirlenen değerler sonrası işletmenin yatırım maliyetlerinin devamında 8 yıllık işletme maliyeti Tablo 12'de gösterilmiştir.

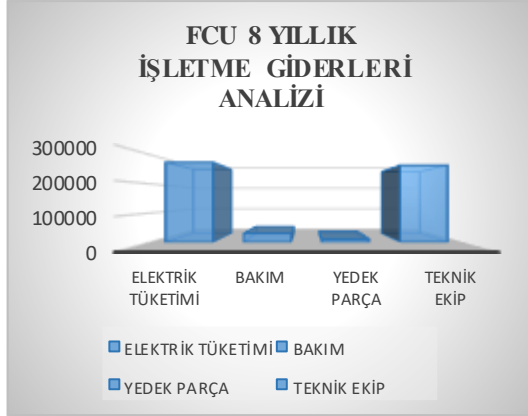


**Şekil 1.** VRF İşletme Giderleri

**Tablo 12.** FCU Sistemi İşletme Giderleri

İşletme Giderleri	Aylık	Aylık (TL/kWh)	Yıllık (TL)	8 Yıllık (TL)	Enflasyona Bağlı 8 Yıllık (TL)
<b>Elektrik</b>	10701,76 kWh	2.472,11	29.655,28	237.322,23	274.107,18
<b>Bakım</b>	₺ 315,00	315,00	3.780,00	30.240,00	30.240,00
<b>Yedek Parça</b>	₺ 115,00	115,00	1.380,00	11.040,00	11.040,00
<b>Teknik Ekip</b>	₺ 2.750,00	2.750,00	33.000,00	264.000,00	264.000,00
				<b>TOPLAM</b>	<b>₺ 579.387,18</b>

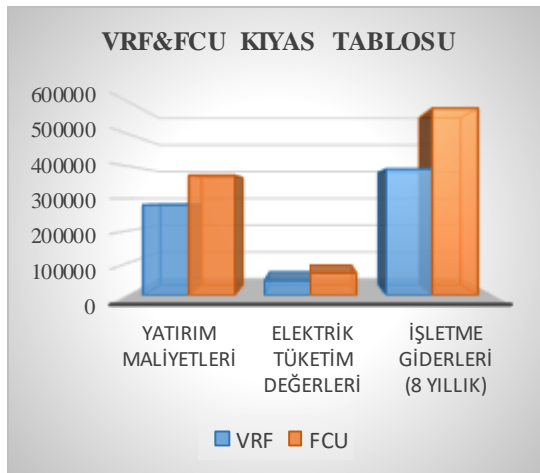
FCU işletme giderleri hesaplandıktan sonra sistemin 8 yıllık giderlerinin toplamına göre veriler yüzdesel olarak Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. FCU İşletme Giderleri

8 yıllık elektrik tüketim değerleri üzerinden maliyet hesabına %18,5 enflasyon değeri uygulanmıştır. Tüketim değeri ortalaması belirlenen oran üzerinden iki sistem içinde uygulanarak tablolar oluşturulmuştur. Yedek parça ücretleri çıkarılırken FCU sisteminde vana grupları, FCU iç parçaları vb. kalemler baz alınarak yedek parça ve bakım ücretleri oluşturulmuştur. Teknik ekip kadrosunda 2 kişinin yer alması gerekecektir. Borulama sistemi, vana grupları, tadilatlarda karşılaşılabilecek izolasyon değişimleri ve mevsim geçişlerinde görevlendirilen kişiler teknik kadro giderlerine yazılmıştır.

VRF sisteminde ise merkezi kumanda ve izleme sistemi daha efektif olacağından tek kişilik ve daha teknik kapasiteli bir kadro düşünülmüştür. Yedek parça değişimleri ve parça değişimleri tamamen fabrikasyon ürünü olacağı için daha düşük maliyet çıkaracaktır. Oluşturulan maliyet kıyaslamaları Şekil 3’de gösterilmiştir.



Şekil 3. VRF&FCU Karşılaştırma

## 4.SONUÇLAR

ASHRAE Transfer fonksiyon metodu kullanılarak HAP üzerinden hesaplamalar yapılarak mahallerin ısıtma ve soğutma yükleri hesaplanmıştır. Mağazaya ait bütün alanların özellikleri programda tanımlanmış ve bulunduğu ilin hava şartları girilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo.1’de verilmiştir. Toplam 1076 m2 alan için hesaplanan soğutma yükü 152,93 kWh ve ısıtma yükü ise 74,9 kWh olmuştur. Hesaplanan mahal ısı yüklerine göre İki Borulu VRF ve dört (4) borulu FCU sistem ekipmanları seçilmiştir.

VRF sistemi fabrikasyon olarak daha profesyonel üretim ve hizmet ağına sahiptir. Montajı üretici firmalarla belirlenen yetkili servislerce imalathanelerde üretilen bakır borularla yapılmaktadır. FCU sistem ekipmanları ve borulaması da yetkili kişilerce yapılmaktadır. İşçilik VRF sistemine göre daha çok insan kabiliyeti istemektedir ve imalat hatası oranı daha yüksektir.

İlk yatırım maliyetinde VRF sistemi tek firma üretimi olduğu için daha avantajlı fiyatlar sunmaktadır. FCU sistemini oluşturan ekipmanlar, tek bir firmadan tedarik edilemediği için işletmede oluşabilecek sıkıntılarda malzeme temini için daha fazla zaman ve para harcanmaktadır. FCU sistemini oluşturan parçaların fazla olması nedeniyle daha fazla teknik personele ihtiyaç duyulmaktadır.

Yatırım maliyetleri, işletme giderleri, tedarikçi ağı, teknik personel ihtiyacı gibi konular göz önünde bulundurulmalıdır. Sistem kıyaslamasını sadece yatırım maliyetleri üzerinden değerlendirmek sağlıklı sonuçlar oluşturmayacaktır.

Her iki sistem içinde ilk yatırım maliyetleri, işletme giderleri ve enerji maliyetleri ayrı ayrı hesaplanmıştır. VRF sistemlerinde ilk yatırım maliyeti, 280.348,3 TL işletme giderleri 291.266,18 TL ve enerji tüketimi 45,47 kWh olarak bulunmuştur. 4 borulu FCU sistemlerinde ise ilk yatırım maliyeti 371.854,78 TL, işletme giderleri 579.387,18 TL ve enerji tüketim değeri 68,601 kWh olarak hesaplanmıştır. VRF sistemlerinin FCU sistemlerine göre ilk yatırım maliyetlerine göre %24,6, işletme giderlerinde %32,5 ve enerji maliyetlerinde ise %33,7 oranında daha avantajlı olduğu tespit edilmiştir.

Tasarlanan yapılarda 400 kW ve üzeri soğutma yükü ihtiyacı çıkması durumunda VRF sistemi zonlamaları ve dış ünite sayılarında artışlar oluşmaktadır. VRF sistemi dış ünite sayılarının artması nedeniyle avantajlarını kaybetmeye başlamaktadır. FCU sisteminde ise bir adet chiller yüksek kapasitelere kadar çıkabildiği için adet artırımı olmadan kapasite artışına gidilerek sistem çözümlenebilmektedir. FCU sistemde fiyatlara en fazla etki eden ekipmanın chiller, VRF sistemde ise fiyatlara en fazla etki eden ekipmanın dış üniteler olduğu düşünülürse, soğutma

ihtiyacının artmasıyla birlikte sistem yeniden tasarlanırsa FCU kullanımı VRF sistemine göre daha avantajlı hale gelecektir.

Tez içerisinde ısıtma ve soğutma ihtiyaçlarına yönelik sistemler tasarlanmıştır. ASHRAE standartları gereği mahallerde taze hava ihtiyaçlarının da konfor ve sağlık açısından karşılanması gerekmektedir. Taze hava ihtiyaçları mahallerin kullanım amacı, kişi sayısı vb. durumlara göre katsayılar içermektedir. Bu ihtiyacı karşılamak için seçmiş olduğumuz sistemlere ısı geri kazanım cihazları ilave edilebilmektedir. VRF sistemi için DX bataryalı ısı geri kazanım cihazı, FCU sistemi için sulu bataryalı ısı geri kazanım cihazı kullanılarak mahallerde taze hava ihtiyaçları karşılanabilmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] Aynur T.N., Hwang, Y., Radermacher R., Field Performance Measurements of a VRV AC/HP System, 11 th International Refrigeration and Air Conditioning Conference, Purdue, IN-A.B.D., 1-8, 15-20 Temmuz 2006.
- [2] Aynur T.N., Hwang Y., Radermacher, R., Experimental Evaluation of the Ventilation Effect on the Performance of a VRV System in Cooling Mode - Part I: Experimental Evaluation, HVAC&R Research, 14 (4), 615-630, 2008.
- [3] Çalışkan H., Dinçer İ., Hepbaşlı A., Exergoeconomic and Sustainability Analyses of a Novel Air Cooler, Energy and Build., 55 (1), 747-756, 2012.
- [4] Park, Y.C., Kim, Y.C. and Min, M.K., “Performance analysis on a multi-type inverter air

conditioner”, Energy Conversion and Management, 42 (13):1607–1621, (2001).

[5] Xia, J., Winandy, E., Georges, B. and Lebrun, J., “Testing methodology for VRF systems”, 9th International Refrigeration and Air Conditioning Conference, Purdue, IN, USA, 1-8, (2002).

[6] Masuda, M., Wakahara, K. and Matsui, K., “Development of a multi-split system air conditioner for residential use”, ASHRAE Transactions, 97: 127-131, (1991).

[7] Hai, X.H., Jun, S., Hand, Z.Y. and Bin, T.C., “Design and research of the digital VRV multiconnected units with three pipes type heat recovery system”, 11th International Refrigeration and Air Conditioning Conference, Purdue, West Lafayette, IN, USA, 1-5, (2006).

[8] Aynur, T.N., Hwang, Y. and Radermacher, R., “Field performance measurements of a VRV AC/HP system”, 11th International Refrigeration and Air Conditioning Conference, Purdue, West Lafayette, IN, USA, 1-8, (2006).

[9] Hai, X.H., Tao, Z., Yun, F.H. and Jun., S., “Design and research of the commercial digital VRV multi-connected units with sub-cooled ice storage system”, 11th International Refrigeration and Air Conditioning Conference, Purdue, West Lafayette, IN, USA, 1-5, (2006).

[10] Özsoy M., Yücel C. , Varlıca O., Kılıç S., Kaplan K. Optimization of Air Distribution in A Non-Ducted Concealed Type Fancoil Unit Heat Exchanger ,Yıl 2019, Cilt 5 , Sayı 3, Sayfalar 124 – 130.

## Endüstri 4.0 Dönüşüm Sürecinde, KOBİ'lerin Teknoloji Seviyelerinin Belirlenmesi: Konya İmalat Sanayi Örneği

*Defining Technology Levels of SMEs in Transition to Industry 4.0: The Case of Konya Manufacturing Industry*

Büşra YİĞİTOL<sup>1</sup> , Hasan Kürşat GÜLEŞ<sup>2</sup> , Tuğba SARI<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Konya Gıda ve Tarım Üniversitesi, Yönetim Bilişim Sistemleri Bölümü, 42080, Konya, Türkiye

<sup>2</sup> Konya Gıda ve Tarım Üniversitesi, Uluslararası Ticaret ve İşletmecilik Bölümü, 42080, Konya, Türkiye

### Öz

İçinde bulunduğumuz çağda, deneyimlediğimiz dijitalleşme süreci, ülkelerin ekonomik sürdürülebilirliklerinin temel unsurlarından biri haline gelmiştir. Bu çerçevede Endüstri 4.0 teknolojilerine uyum, günümüz ve gelecekte işletmelerin sürdürülebilirliklerini belirleyecek kritik faktörlerden biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Yeni teknolojilere uyum sağlamada karşılaşılan zorluklar, büyük ölçekli işletmelerin yanı sıra belki de en fazla küçük ölçekli işletmeler için tehdit oluşturmaktadır. Çünkü küçük ve orta ölçekli işletmeler (KOBİ'ler) dijitalleşme altyapısı için gerek duyulan bilgi ve beceri, insan kaynağı, yatırım finansmanı gibi kaynaklara erişmekte daha dezavantajlı konumdadır. Dolayısıyla Türkiye gibi ülke ekonomisinin ve istihdamının büyük çoğunluğunun KOBİ'lere dayandığı gelişmekte olan ülkelerde bu geçiş sürecinin nasıl sağlanacağı önemli bir sorundur. Bu açıdan KOBİ'lerin teknoloji seviyelerinin belirlenmesi, bu yönde ekonomik ve politik yaklaşımların geliştirilmesi açısından önemlidir. Bu çalışmada Konya ili imalat sanayiinde faaliyet gösteren KOBİ'lerin geleneksel bilişim ve imalat teknolojileri ile yeni tanıtılan Endüstri 4.0 teknolojilerini uygulama düzeylerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda Konya merkezinde faaliyet gösteren 185 imalatçı KOBİ ile yapılan görüşmeler sonucunda elde edilen veriler istatistiki açıdan değerlendirilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre bölgedeki işletmelerin bilişim ve imalat teknoloji kullanım düzeyleri görece olarak olumlu bir düzeyde seyir ederken, aynı işletmelerin Endüstri 4.0 teknolojileri açısından düşük bir uygulama düzeyine sahip oldukları görülmektedir. Ayrıca, örnekleme dâhil edilen işletmeler bazı teknolojilerin kullanımı konusunda kendilerini olduklarından daha yetkin görmektedir. Çalışmanın diğer önemli sonuçlarından biri ise, Endüstri 4.0 teknolojilerini uygulama düzeyleri düşük olmasına rağmen işletmelerin bu teknolojileri sektörün ve işletmelerin geleceği açısından önemli yönde atfetmeleridir.

**Anahtar kelimeler:** Endüstri 4.0, İmalat Sanayi, KOBİ, Teknoloji düzeyi

### Abstract

In this era of digitalization, technological developments we have experienced has become one of the basic elements of the economic sustainability of countries. In this context, compliance with Industry 4.0 technologies is one of the critical factors that will determine the sustainability of companies in the present and the future. Challenges in adapting to new technologies has threaten small-sized companies the most. This is because small and medium-sized enterprises (SMEs) are more disadvantageous in accessing resources such as knowledge and skills, human resources and financial investment needed for the digitalization infrastructure. Thus, in developing countries such as Turkey where the economy and employment is mainly depend on small and medium-sized enterprises, how to ensure this transition successfully is a major problem. In this respect, determining technology levels of SMEs is important for establishing economic and political policies. In this study, it is aimed to determine the application level of traditional information and manufacturing technologies; and state of the art Industry 4.0 technologies of SMEs operating in Konya manufacturing industry. In this context the impact of the transition from Industry 3.0 technologies to Industry 4.0 on SMEs have been analyzed. The data was obtained from 185 SMEs with face-to-face interviews were analyzed statistically. According to the results of the study, while traditional IT and manufacturing technology usage levels of the companies re relatively positive, the firms have a low level of application in terms of Industry 4.0 technologies. In addition, the sample companies overestimated themselves in using certain technologies. Another important result of the study is that, although the mean application levels of Industry 4.0 technologies are quite low, firms attribute these technologies as very important for their sector and for themselves.

**Keywords:** Industry 4.0, Manufacturing Industry, SMEs, Technology level

## I. GİRİŞ

Günümüz iş dünyası gerek teknolojik yenilikler gerekse üretkenliği artırma yönündeki tetikleyici diğer dinamikler sebebiyle yeni bir ekonomik sistem içerisine doğru sürüklenmektedir. Bu değişimler sanayi tarihinin başlangıcı olarak kabul edilen 18. yy'den bu yana gerçekleştirilen ilerlemeler ile yol almaktadır. Tarihsel süreç içerisindeki ilk paradigma değişimi 1760'lı yıllarda başlayıp 1830'lara kadar süren dönemde yaşanmıştır. Bu dönemde su ve buhar gücünün üretim süreçlerinde kullanılmaya başlanmıştır. Üretimde makineleşme süreci ilk olarak İngiltere de ortaya çıkmasına rağmen kısa sürede Avrupa'ya yayılmıştır. Bu dönemde yaşanan gelişmeler sadece üretimi artırmakla kalmamış toplumsal yaşam kalitesini de artırmıştır. Üretimde mekanikleşmenin yaygınlaşmaya başlamasıyla sanayi sistemi, beden gücünden makine gücüne doğru bir geçiş yaşamıştır. Ayrıca kömürün yanı sıra buhar gücünden yararlanılması ve bu sayede demiryolu kullanımının yaygınlaşması ile yeni hammadde kaynaklarına ulaşım kolaylaşmış ve ağır sanayii gelişim göstermiştir [1].

Sanayi tarihinin ikinci dönüm noktası ise 1840'lı yıllarda elektriğin sanayi sisteminde kullanılmaya başlanmasıyla yaşanmıştır. İkinci Endüstri Devrimi başta her ne kadar Amerika, Japonya, Almanya gibi öncü ülkelerde ortaya çıksa da zaman içerisinde birçok ülkeye yayılım göstermiştir [2]. Elektriğin üretim süreçlerinde kullanılması daha çok ve daha hızlı bir üretim gerçekleştirilmesinin de yolunu açmıştır. Bu gelişmenin ilk örneğini Henry Ford otomotiv sektöründe kullanılmak üzere geliştirdiği bant tipi üretim ile ortaya koymuş ve bu üretim tarzı devrim niteliğinde görülmüştür [3]. İlk olarak otomotiv sektöründe kullanılsa da zaman içerisinde birçok fabrikada üretim, montaj hatlarının kurulmasıyla hızlanmış ve verimlilik artışı sağlanmıştır.

Montaj hattı ve seri üretim ile ivme kazanan üretim altyapısı bilgisayarın icadı ile yeni bir döneme adım atmıştır. Üçüncü sanayi devrimi olarak tanımlanan bu dönemde dijital teknolojilerde gelişim yaşanmış ve bilgisayar ve iletişim teknolojileri hem toplumsal alanda hem de iş hayatında kullanılmaya başlanmıştır. Üçüncü sanayi devriminde yaşanan gelişmeler ile birlikte emek kavramı yerini mekanik süreçlere bırakırken örgüt içerisindeki insan da üretimin bir dişlisi olmaktan ziyade beyni olmak yolunda bir değer artışı yaşamaya başlamıştır. Teknolojik gelişmelerin geldiği son noktada ise artık Endüstri ve üretim süreçlerinde dijitalleşme kavramından söz edilmeye başlanmıştır. Bu dönem Endüstri 4.0 yani dördüncü sanayi devrimi olarak tanımlanmaktadır. Henüz başlangıç aşamasında olan bu dönem üretim sürecindeki tüm aktörlerin birbiri ile koordineli iletişimini, verilerin anlık ve doğru şekilde teminine olanak tanıyarak katma değeri yüksek bir üretim sürecinin oluşturulmasına olanak tanımaktadır [4].

Endüstri 4.0 kavramının temelleri 2011 yılında Almanya'da düzenlenen teknoloji fuarında ortaya atılmıştır [5]. Endüstri 4.0 ile üretim sistemlerinde akıllı makine, robot sistemleri ve sensörlerin kullanılması, böylelikle süreçlere ve makinalara ilişkin anlık veri sağlama avantajı ile üretimin daha kontrollü, daha hızlı, daha verimli ve daha az maliyetli olmasını sağlayan bir devrim ya da diğer ifadeyle gelecek öngörüsünden bahsedilmektedir. Akıllı üretim sistemleri ile işletmelerin üretimleri küresel düzeye yükselir ve böylece üretim ya da talep ile ilgili değişikliklere hızla yanıt verebilecek kadar esneklik kazanmış olurlar [6]. Kısaca Endüstri 4.0 ile birlikte yeni teknolojilerden ve aşağıda belirtilen kavramların potansiyellerinden yararlanmak amaçlanmaktadır [7];

- İnternet ve nesnelerin interneti teknolojilerinin ulaşılabilirliği ve kullanımı
- Teknik süreçler ile iş süreçlerinin entegrasyonun sağlanması
- Üretim süreçlerinin gerçek dünyadan dijital dünyaya aktarımı ve sanallaştırılabilirliği
- Akıllı Endüstriyel üretim ve akıllı ürünleri içeren akıllı fabrikaların kullanılması

Endüstri 4.0 ile beraber gündeme gelen 9 teknoloji sınıflandırması bulunmaktadır. Bu teknolojiler işletmelerin sanayi dönüşümünde belirleyici kriterler olarak da görülmektedir. Bunlar büyük veri, bulut teknolojileri, nesnelerin interneti, siber güvenlik, artırılmış gerçeklik, eklemeli üretim, yatay ve dikey bütünleşme, otonom robotlar ve benzetim teknolojileridir [17]. Bazı kaynaklarda bu teknolojik sınıflandırmaya siber fiziksel sistemler de dâhil edilmektedir [18, 35]. Bu teknolojilerin ne olduğu ve işletmeler açısından gelecek öngörüsünde nasıl etkin kullanıldığı önemli bir olgudur.

- *Büyük Veri* üretim ve genel süreçler ile ilişkin çeşitli kaynaklardan sağlanan geniş, karmaşık, çeşitli ve heterojen verilerin bir birleşim kümesini ifade etmektedir [8]. Üretim sürecinin hızlı, kaliteli ve etkin yönetiminin en temel noktası elde edilen verilerin anlık, gerçek zamanlı olarak işlenebilmesi ve kullanıma hazır hale gelebilmesidir.
- *Bulut Bilişim* teknolojileri sayesinde büyük veri kümelerinin etkin yönetimi ve depolanması sağlanabilmektedir. Özellikle akıllı fabrikalarda üretilen ve birbirinden farklı birçok kaynaktan sağlanan fazla miktarlardaki verilerin anlık olarak kullanıma hazır halde depolanması için elverişli bir teknolojidir. Geleneksel depolama hizmetlerinden farklı olarak, bulut teknolojileri, çeşitli kaynaklardan gelen büyük miktarda veri için daha küçük bir alanda depolama alanı sağlar [9, 10].
- *Siber Güvenlik*, dijitalleşme ile ilgili belki de en önemli soru işareti verilerin güvenliğinin sağlanmasında öncü uygulamaların başında

yer almaktadır. Özellikle internet kullanımına bağlı olarak, üretim araçları ve dijital sistemler arasında bağlantılılığın artması siber güvenlik endişesini artırmakta ve makinelere erişimin etkin yönetilmesinde güvenli bağlantı önem kazanmaktadır [11].

- *Artırılmış Gerçeklik* teknolojileri dış dünyadaki gerçek bir görüntünün sanal semboller ile yansıtılmasına dayanan bilgisayar grafik tekniği olarak tanımlanabilir [12].
- *Ekllemeli Üretim Teknolojileri* en basit tanımıyla başlangıçta üç boyutlu bir bilgisayar destekli tasarım sistemi kullanılarak oluşturulan bir modelin, süreç planlama ihtiyacı olmadan doğrudan üç boyutlu yazıcılar yardımı ile üretilebilmesidir [13]. Bu teknoloji sayesinde, karmaşık bir üretim süreci gerektiren bir ürünün üretimi, geleneksel yöntemlere kıyasla çok daha kolay olarak gerçekleştirilebilmektedir.
- *Yatay ve Dikey Bütünleşme* teknolojileri ile işletmeler yatay entegrasyonla, farklı işletmeler arasındaki bilgileri, finansal kaynakları ve materyalleri paylaşmak için etkili bir ekosistem oluşturulabilirken, dikey entegrasyon ile elastik ve yeniden yapılandırılmış üretim sistemleri elde edebilirler [14].
- *Otonom Robot* güvenli, esnek, çok yönlü ve işbirliğine odaklanarak görevleri akıllıca tamamlayabilen robotların desteklediği özerk üretim yöntemlerindedir [15]. Akıllı fabrikalarda hem robotların hem de insan gücünün kullanılmasyla işbirliği ortamı sağlanabilmekte ve ağır fiziksel güç gerektiren işlemler robotlar tarafından güven ve kalite ile gerçekleştirilebilmektedir.
- *Benzetim Teknolojileri* ile üretim süreçleri fiziksel fabrikalardan sanal ortamlara aktarılabilir. Böylece test, kurulum, bakım ve kullanım ile ilgili birçok sürecin sanal platformlarda test edilebilmesi ve iyileştirme çalışmalarının maliyet açısından fayda sağlayacak şekilde gerçekleştirilmesine olanak sağlanabilmektedir.
- *Nesnelerin interneti (IoT)* fiziksel zeki nesnelere olarak tanımlanmaktadır [16]. Bu yapı sayesinde, cihazlar birbirleriyle iletişim kurabilir ve birbirleriyle etkileşime girebilir ve karar verme merkezi yapıdan uzaktır [17].
- *Siber Fiziksel Sistemler (CPS)*, fiziksel varlıklar ve bilgisayar teknolojileri arasındaki birbirine bağlı sistemleri yönetmek için dönüştürücü teknolojiler olarak tanımlanmaktadır [18].

yararlanabilmektedir. Bu avantajların bazıları şöyle sıralanabilmektedir;

- ♦ Üretim sisteminin etkin izlenebilirliği ve kontrolüne imkân verir, böylelikle oluşabilecek muhtemel sıkıntıların önüne geçilebilmektedir,
- ♦ Üretimde sıfır hata ile maliyet avantajı sağlar,
- ♦ Üretim süreçlerinin müşteri istek ve ihtiyaçlarına göre esneklik kazanmasına imkân sağlar,
- ♦ Kaynak yönetiminde geleneksel üretim sistemlerine kıyasla daha etkin ve verimlilik sağlar. Kaynakların neredeyse sıfır atık ile kullanımına imkân verir,
- ♦ Üretim süreçlerinde kaynak tasarrufu sağlar ve üretimin çevreye duyarlı bir şekilde yürütülmesine katkı sağlar.

Tüm bu teknolojik gelişmeler ve işletmelere sağladığı yararlar günümüz ve gelecek rekabet şartlarını dinamik bir boyuta taşımaktadır. Dolayısıyla işletmelerin bu gelişmeleri takip etmeleri ve kendilerini dijitalleşme yolculuğunda hazır hale getirmeleri gerekmektedir. Bu yolculukta büyük ölçekli işletmeler uyum ve geçiş konusunda küçük ölçekli işletmelere oranla daha avantajlı bir konuma sahiptir. Küçük ölçekli işletmeler için bilgi ve iletişim teknolojilerindeki değişiklikler, yeni iş modelleri gibi çevresel dinamikler düşünüldüğünde ve bu faktörlere işletmelerin yapısal sorunları, bilgi ve beceri eksiklikleri de eklendiğinde dönüşüm sürecinin ne kadar zorlu geçeceği tahmin edilebilmektedir. Ancak üretim sanayinin çok büyük bir yüzdesini oluşturan ve böylelikle başlıca ekonomik yapı taşlarından biri olan küçük ölçekli işletmelerin değişim sürecindeki rolleri merak konusudur. Dolayısıyla KOBİ'leri dönüşüm sürecinin dışında tutmak ekonomik dengelerin sürdürülebilirliğinin sağlanmasında olumsuz sonuçlar doğuracaktır. KOBİ'lerin bu sürece nasıl entegre edileceği yönünde yeni adımların atılması ve gerek politik gerekse ekonomik sistemlerin bu konu üzerine yeni yaklaşımlar geliştirmeleri gerekmektedir. Bu sürecin ilk aşaması ise KOBİ'lerin mevcut durumlarının etkin tespiti ile mümkündür. Geleceğe yönelik olarak sürecin etkin işleyebilmesi ve çözüm önerileri üretebilmek için KOBİ'lerin mevcut teknolojik düzeylerin belirlenmesi yararlı olacaktır. Elbette ki işletmelerin mevcut düzeyin belirlenmesinde Endüstri 4.0 teknolojilerini kullanım durumları önemli bir göstergedir.

Bu amaçla bu çalışmada Konya ili imalat sanayinde faaliyet gösteren KOBİ'lerin teknoloji uygulama düzeylerinin çok boyutlu olarak belirlenmesi amaçlanmaktadır. Çalışmada KOBİ'lerin mevcut imalat ve bilişim teknolojilerini kullanım düzeylerinin yanı sıra, yeni gelişmekte olan Endüstri 4.0 teknolojilerini uygulama düzeylerinin de belirlenmesi hedeflenmiştir. Endüstri 4.0 teknolojilerinin, hâlihazırda kullanılan imalat ve bilişim teknolojileri ile birlikte araştırılmasındaki amaç bu teknolojilerin

İşletmeler belirtilen teknolojik sistemleri kullanarak Endüstri 4.0 devriminin sağlayacağı birçok avantajdan

KOBİ'lerin teknoloji kullanım düzeylerinin belirlenmesi açısından etkin bir doğrulama sağlayacağı yönündeki kanaattir. Çünkü sanayi tarihinin geçiş sürecinde olduğu gibi teknolojik seviyenin ilerlemesi geçmiş ve geleceğin bağlantısı ile mümkündür. İşletmelerin bir üst teknoloji seviyesine yükselebilmeleri alt seviye teknolojilerin kullanımında ne kadar doygunluğa eriştiği ve bu süreci ne kadar tamamladığı ile ilişkilidir.

## II. LİTERATÜR TARAMASI

Endüstri 4.0 ile ilgili literatürdeki çalışmaların sayısı, kavramın bilinirliğinin ve öneminin artması ile paralel

olarak gün geçtikçe artmaktadır. Endüstri 4.0 teknolojilerine, işletmelere sağlayacağı faydalara ve işletmelerin geçiş sürecinde karşılaşılabilecek muhtemel zorluklara ilişkin tanımlayıcı çalışmaların yanı sıra, Endüstri 4.0 teknolojilerinin işletmelerde uygulanma seviyelerini inceleyen çalışmalar da bulunmaktadır. Türkçe literatüre bakıldığında aslında çoğu çalışmanın uygulamadan ziyade kavram ve kavrama ilişkin teknolojilerin açıklanmasına yönelik teorik çalışmalar olduğu görülmektedir [19, 20, 21, 22]. Bu çalışmada genel olarak KOBİ'ler bağlamında literatür incelemesi yapılmış ve öncü çalışmalardan bazıları Tablo 1'de özetlenmiştir.

**Tablo 1.** Endüstri 4.0 Literatür Taraması

Yazar	Amaç	Yöntem	Sonuç
<b>Safar ve diğ. (2018) [23]</b>	KOBİ'lerin rehberlik etmek amacıyla Endüstri 4.0 gereksinimlerine göre iş organizasyon modeli tasarlamak.	Model Tasarımı	KOBİ'lerin Endüstri 4.0 adaptasyonu için ilk aşamada yazılım ihtiyacı ve teknolojik altyapının oluşturulabilmesi için yatırım gereklilikleri söz konusudur. Bu konu ile ilgili finansman sıkıntısına da dikkat çekilmiştir.
<b>Sevinç ve diğ. (2018) [24]</b>	KOBİ'lerin Sanayi 4.0'a geçiş sürecindeki zorluklarını analiz etmek.	Anket	Dört kriter (organizasyon, inovasyon, çevre ve finans) bağlamında kurulan hiyerarşik yapı ile bu kriterlerin ağırlıkları hesaplanmıştır. Bununla birlikte, faktörlerin ağırlığı listelendiğinde, birinci sırada organizasyon, ikinci sırada maliyet, üçüncü sırada çevre, son sırada yenilik yer almaktadır.
<b>Schröder (2016) [25]</b>	KOBİ'lerin Endüstri 4.0 ile ilgili temel zorluklarına ve bu çerçevede bu zorlukların üstesinden gelmelerine destek olmak için ilgili çerçevenin nasıl uyarlanması gerektiği belirlemek.	Literatür Çalışması	Ele alınan konular küçük ve orta boyutlu işletmelerde Endüstri 4.0 durumu, 4.0 Endüstrisinin ekonomik potansiyeli, uygulaması önündeki engeller, iş dünyasının dönüşümü, Endüstri 4.0 genel çerçevesinin tartışılmasıdır.
<b>Çevik (2019) [26]</b>	KOBİ'lerin Sanayi 4.0 ile dönüşüm sürecindeki hazırlık durumlarını incelemek.	Anket	Çalışma, KOBİ'lerin henüz bu değişim sürecine birçok yönden hazır olmadıklarını göstermiştir. KOBİ'lerin ilgili dönüşüm süreci sorunları ise bütçe, bilgi eksikliği, teknolojik altyapı eksikliği olarak belirtilmiştir.
<b>Mittal ve diğ. (2018) [27]</b>	KOBİ'lerin bağlamında mevcut sistemleri, Endüstri 4.0 olgunluk modellerini analiz etmek ve KOBİ'lerin bu süreç içerisindeki özel gereksinimleri belirlemek.	Literatür Çalışması	Çalışma sonuçlarına göre dijital dönüşüm sürecinde KOBİ'lerin spesifik gerekliliklerini ve zorluklarını yansıtan çalışmalar sınırlı kalmıştır.
<b>Schumacher ve diğ. (2016) [28]</b>	Endüstri 4.0 olgunluğunu değerlendirmek için bir model ve uygulama sunmak.	Model Tasarımı	Model 9 boyut ve 62 maddeden oluşmaktadır. Bu boyutlar çalışanlar, kültür, ürünler, liderlik, müşteriler, teknoloji, strateji, yönetişimdir. İlk dört boyut, temel sağlayıcıların değerlendirilmesi için, diğerleri ise organizasyonel unsurların değerlendirilmesi içindir.
<b>Müller ve Voigt (2018) [29]</b>	Nesnelerin interneti teknolojilerinin ekonomik, sosyal ve ekolojik olmak üzere üç boyutlu		Almanya (222 işletme) ve Çin'den (107 işletme) toplamda 329 KOBİ ile görüşmeler sağlanmıştır. Çalışma sonuçları Almanya'daki KOBİ'lerin Endüstri 4.0 kavramını ve sürecini daha çok büyük ölçekli işletmelere yönelik olarak değerlendirdiğini



Yazar	Amaç	Yöntem	Sonuç
	değerlendirilmesini sunmak.		gösterirken, Çin'deki işletmelerin ise kavramın sosyal faydalarına ağırlık verdiğini saptamaktadır.
<b>Özçelik ve diğ. (2018) [30]</b>	Makine imalat sektöründe dijital olgunluk seviyesini ölçmek.	Anket	Çalışma Sakarya ilinde bir imalat işletmesinde yürütülmüştür. Literatürden dijitalleşme endeksi ölçümü için 9 ölçüt ele alınarak hazırlanan soru formu uygulamaya alınmıştır. Analitik Hiyerarşi Prosesi yöntemi kullanılarak değerlendirilen dijitalleşme endeksi sonuçlarına göre uygulama yapılan işletmenin 5 seviyeli olgunluk modeli üzerinden yaklaşık olarak 3. seviyede olduğu belirlenmiştir.
<b>TUSİAD ve BCG (2016) [11]</b>	Endüstri 4.0 tarafından sunulan fırsatları incelemek, Türkiye sanayisinin potansiyelini ortaya koymak.	Anket	Yapılan görüşme sonuçlarında, Türkiye'de zaten Endüstri 4.0 yönünde atılmış bazı somut adımların olduğu gözlenmiştir. Endüstri 4.0 teknolojilerinden yararlanma ve Türkiye'de rekabet avantajı yaratma konusunda sektörde yüksek düzeyde farkındalık ve ilginin olduğu kabul edilmektedir. Raporunda, sektörlerin işgücü yapısı, teknoloji altyapısı ve yatırım gibi sorunlarından kısaca bahsedilmektedir. Raporun son bölümünde, Türkiye için bir yol haritası hazırlamanın önemi ve katılımcılar için ortak bir platform üzerinde tartışma yapılması gerektiği vurgulanmıştır.
<b>Infosys (2015) [31]</b>	Şirketlerin Endüstri 4.0 yolculuğundaki planlarını incelemek.	Anket	Görüşülen şirketlerin çoğunluğu Endüstri 4.0 teknolojilerinin potansiyel gücünün farkında olmasına rağmen, yalnızca birkaçı bu kavramları pratikte kullanmaktadır. Ülkeler arasında bir kıyaslama yapılmış ve Çin'in diğer ülkelere kıyasla lider konumda olduğu söylenmiştir. Sektörler arasında yapılan kıyaslama da ise süreç Endüstrisinin diğer sektörlerle göre lider konumda olduğu belirtilmiştir.
<b>Berger (2017) [32]</b>	Yiyecek ve içecek Endüstrisinin Endüstri 4.0 açısından avantaj ve dezavantajlarını Türkiye örneği bağlamında değerlendirmek.	Anket	Türkiye'nin dijital teknoloji uygulamalarında diğer ülkelere göre sıralamasına yer verilmiştir. Raporunda Türkiye'nin yapılan sıralamalarda olumlu bir konuma sahip olmasına rağmen, Endüstri 4.0 hazırlığında düşük seviyeli ülke grubunda olduğu belirtilmektedir.
<b>Deloitte (2017) [33]</b>	Dünya genelinde işletmelerin Endüstri 4.0 hazırlık durumunu değerlendirmek.	Anket	Çalışma sonuçlarına göre, kamu kurumlarının toplumun yönlendirilmesinde daha etkili olduğu sonucuna varılmış ve şirketler üzerindeki en büyük etkinin müşterilere mümkün olduğunca en iyi ürün / hizmeti sunmak olduğu, son iki yılda en fazla ilgi gören konuların yeni ürün ve hizmetler geliştirmek / yaratmak ve verimliliği artırmak olduğu belirtilmiştir.
<b>Europarl Report (2016) [34]</b>	Endüstri 4.0 ile ilgili teknolojileri ve sürecin zorluklarını analiz etmek.	SWOT Analizi	Raporunda, Endüstri 4.0 kavramı, zorlukları, teknolojileri, Avrupa Birliği'nin Endüstri 4.0 için destek politikaları, siber güvenlik riskleri, teknolojik, sosyal ve iş değişiklikleri gibi konular ele alınmıştır. Çalışmada ayrıca Endüstri 4.0'a yönelik SWOT analiz gerçekleştirilmiştir.
<b>Şahin (2019) [35]</b>	G-20 ülkelerinin Endüstri 4.0 seviyelerini belirlemek ve kendi aralarında karşılaştırma yapmak suretiyle bir sıralama oluşturmak.	Entropi Tabanlı COPRAS Yöntemi	Çalışmada G-20 ülkeleri çok kriterli karar verme tekniklerinden bir tanesi olan COPRAS yöntemi kullanılarak ülkelerin Endüstri 4.0 seviyeleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlarda Türkiye'nin 20 ülke arasında 15. Sırada olduğu tespit edilmiştir.
<b>Kamber ve Bolatan (2019) [36]</b>	Türkiye'de yer alan üretim işletmelerinde Endüstri 4.0'a bakış açısını incelemek	Anket	Çalışmada Türkiye'deki üretim işletmeleri yöneticilerinin genel ve sektörel açıdan Endüstri 4.0 geçiş sürecinin gerekliliği ve işletmelere katma değer

Yazar	Amaç	Yöntem	Sonuç
			katacağı konusunda farkında oldukları sonucuna varılmıştır.

(Kaynak: Yazarlar tarafından oluşturulmuştur.)

### III. METODOLOJİ

Bu çalışmanın amacı, Konya ili imalat sanayi Küçük ve Orta Ölçekli İmalat İşletmeler (KOBİ)'inin mevcut imalat ve bilişim teknolojileri kullanım düzeylerinin yanı sıra Endüstri 4.0 teknolojilerini uygulama düzeylerinin belirlenmesidir. Bu amaç doğrultusunda Konya'da öne çıkan sektörlerden makine imalatı, otomotiv ve oto yan sanayi ürünleri imalatı, gıda ürünleri imalatı ve kimyasal imalat sanayilerinde faaliyet gösteren Küçük ve Orta Ölçekli İşletmeler (KOBİ) üzerinde bir anket uygulaması gerçekleştirilmiştir. Konya ilinde makine, otomotiv, kimya ve gıda imalat sanayinde faaliyet gösteren 1000'i aşkın firma bulunmaktadır. Çalışma kapsamında bu firmaların 250'sine ulaşılmaya çalışılmış olup, 185 firmadan sağlıklı veri toplanabilmiştir. İşletme yöneticileri ile yapılan yüz yüze görüşmelerden elde edilen veriler, SPSS paket programı yardımı ile istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Anket formu mevcut imalat ve bilişim teknolojileri ile güncel Endüstri 4.0 teknolojilerine yönelik ifadeleri kapsamaktadır. Anket formunun oluşturulmasında Görçün (2017) [37], Bülbül ve Güles (2004) [38], Tekin ve diğ. (2005) [39] ve Özkurt (2016) [40]'un çalışmaları kullanılan temel çalışmalar olup ayrıca konu ile ilgili literatürdeki diğer çalışmalar da taranmıştır.

Araştırmaya katılan işletmelerin sektörler arasındaki dağılımları Tablo 2'de belirtilmiştir. Buna göre işletmelerin %51,6'sı faaliyetlerini Makine imalat sektöründe yürütürken, işletmelerin %31,3'ü Otomotiv imalat sektöründe faaliyet göstermektedir.

**Tablo 2.** Sektörlere göre KOBİ dağılımları

Sektörler	İşletme sayısı	Yüzde (%)
Makine	94	51,6
Otomotiv	57	31,3
Kimya	16	8,8
Gıda	15	8,2
Toplam	182	100,0

Araştırmanın örneklemini oluşturulan KOBİ'lerin ölçek/çalışan sayıları dağılımları Tablo 3'de belirtilmiştir. İşletmelerin çoğunluğunun (%61,7) 10-49 arasında çalışana sahip olduğu görülmektedir. Bu sıralamayı %21,9 oranı ile 1-9 çalışana sahip KOBİ'ler gelmektedir.

**Tablo 3.** Çalışan sayılarına göre KOBİ dağılımları

Çalışan sayısı	İşletme sayısı	Yüzde (%)
1 – 9 çalışan	40	21,9
10 – 49 çalışan	113	61,7
50 – 249 çalışan	30	16,4
Toplam	183	100,0

KOBİ'lerin imalat teknolojilerini kullanım durumlarının belirlenebilmesi için çeşitli imalat sistemleri kullanım durumlarını belirtmeleri istenmiştir. Firmalara sunulan imalat teknolojileri, Bülbül ve Güleş'in 2004 yılında yaptıkları çalışma baz alınarak belirlenmiştir [38]. Bu teknolojilerin kullanım düzeylerine ilişkin veriler Tablo 4'de özetlenmiştir. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, işletmelerin orta ve üzeri seviyede kullandığı imalat teknolojilerinin gıda ve içecek imalatı sektöründe üretim kaynakları planlaması sistemleri, makine imalat sektöründe tam zamanında üretim sistemleri, otomotiv sektöründe bilgisayar kontrollü tezgâhlar (CNC) ve tam zamanında üretim sistemleri, kimya sektöründe ise yine tam zamanında üretim sistemleri olduğu görülmektedir.

**Tablo 4.** İşletmelerin imalat teknolojileri kullanım düzeyleri\*

İmalat teknolojileri		Gıda	Makine	Otomotiv	Kimya	Genel ortalama
Bilgisayar kontrollü tezgâhlar (CNC)**	Ortalama	2,67	3,18	4,02	2,75	3,36
	Std. Sapma	1,915	1,697	1,420	1,612	1,682
Bilgisayar destekli tasarım (CAD)**	Ortalama	3,13	3,51	3,82	2,44	3,48
	Std. Sapma	1,767	1,584	1,490	1,590	1,604
Bilgisayar destekli üretim (CAM)**	Ortalama	2,80	3,22	3,58	2,38	3,23
	Std. Sapma	1,699	1,641	1,523	1,310	1,608
Esnek imalat sistemleri	Ortalama	2,93	3,06	3,04	2,63	3,01
	Std. Sapma	1,900	1,501	1,584	1,586	1,559
Grup teknolojisi**	Ortalama	2,27	1,77	2,40	2,13	2,04
	Std. Sapma	1,438	1,102	1,237	1,310	1,218
Üretim kaynakları planlaması	Ortalama	3,47	3,07	3,42	2,81	3,19
	Std. Sapma	1,457	1,289	1,336	1,276	1,322
Tam zamanında üretim <sup>a</sup>	Ortalama	3,27	3,68	4,02	3,94	3,77
	Std. Sapma	1,624	1,246	1,110	1,237	1,248
İleri İmalat Teknolojileri Planlama Sistemleri (MRP,MRPII)**	Ortalama	1,93	2,31	2,82	2,00	2,41
	Std. Sapma	1,335	1,360	1,441	1,155	1,391

\* 1: Hiç uygulamıyor/ 5: İleri seviyede uyguluyor

\*\*ANOVA test sonucuna göre 0,05 seviyesinde sektörler arasında anlamlı farklılık göstermektedir.

<sup>a</sup>Tam zamanında üretim, işletmelerin üretime hazırlık zamanında ve sipariş süresinde tasarruf yapmasını sağlayan, aynı zamanda ürün kalitesine odaklanan bir üretim teknolojisidir [38].

Mevcut teknolojik seviyenin belirlenebilmesinde imalat teknolojilerinin yanı sıra işletmelerin bilişim teknolojileri kullanım düzeylerinin de önemli bir gösterge olacağı düşünülmektedir. Çalışmaya dahil edilen bilişim teknolojileri, Tekin vd.'lerinin 2005 yılında yaptığı çalışma temel alınarak oluşturulmuştur [39]. Bu açıdan araştırma kapsamındaki KOBİ'lerin bilişim teknolojileri kullanım düzeyleri Tablo 5'de belirtilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde tüm sektörler içerisinde internet teknolojisinin ileri düzey kullanıma sahip olduğu görülmektedir. Çağımız işletmelerinin teknoloji seviyesi düşünüldüğünde bu sonuç çok

şaşırtıcı görülmemektedir. En düşük uygulama seviyesini gösteren sistemler ise sektörler arasında farklılık göstermektedir. Gıda ve içecek imalatı sektöründe en düşük uygulama alanı bulan teknolojiler karar destek sistemleri, geniş alan ağlar ve elektronik veri değişimi sistemleri olmuştur. Makine sektöründe ise en düşük uygulama seviyesi barkod okuma ve iletim sistemleridir. Otomotiv sektöründe karar destek sistemleri, kimya sektöründe ise elektronik veri değişimi sistemleri en düşük uygulama seviyesine sahip sistemler olarak görülmektedir.

**Tablo 5.** İşletmelerin bilişim teknolojileri kullanım düzeyleri\*

Bilişim teknolojileri		Gıda	Makine	Otomotiv	Kimya	Genel ortalama
İnternet	Ortalama	4,67	4,52	4,49	4,81	4,55
	Std. Sapma	0,724	0,889	0,909	0,403	0,851
Yerel alan ağları (LAN)	Ortalama	4,13	3,83	4,07	4,19	3,96
	Std. Sapma	1,457	1,442	1,237	1,047	1,348
Barkod okuma ve iletim sistemleri**	Ortalama	2,60	1,81	2,07	2,94	2,06
	Std. Sapma	1,882	1,272	1,582	1,526	1,482
Karar destek sistemleri	Ortalama	2,07	1,93	1,98	2,25	1,98
	Std. Sapma	1,438	1,220	1,246	1,390	1,255
Elektronik veri değişimi	Ortalama	2,07	1,97	2,09	2,13	2,03
	Std. Sapma	1,486	1,282	1,229	1,408	1,285
Kurumsal kaynak planlaması (ERP)	Ortalama	3,13	2,43	2,42	2,13	2,46
	Std. Sapma	1,356	1,477	1,362	1,204	1,416
Geniş alan ağları (WAN)	Ortalama	2,07	2,02	2,40	2,56	2,19
	Std. Sapma	1,163	1,422	1,438	1,632	1,430
Uzman sistemler	Ortalama	2,80	2,24	2,56	2,25	2,39
	Std. Sapma	1,821	1,412	1,512	1,390	1,478

\* 1: Hiç uygulamıyor/ 5: İleri seviyede uyguluyor

\*\*ANOVA test sonucuna göre 0,05 seviyesinde sektörler arasında anlamlı farklılık göstermektedir.

Araştırmaya katılan işletmelerin Endüstri 4.0 teknolojilerine ilişkin uygulama durumları ve bu teknolojilere kendi sektörleri bağlamında attıkları önem dereceleri Tablo 6'da belirtildiği gibidir. Bu sonuçlar incelendiğinde uygulama açısından KOBİ'lerin belirtilen teknolojileri uygulama seviyelerinin çok düşük olduğunu göstermektedir. Sektörler arası farklılıkların incelenmesi için yapılan ANOVA test sonucuna göre ise sadece nesnelerin interneti teknoloji uygulamalarının sektörler arasında anlamlı farklılık gösterdiği tespit edilmiştir ( $p < 0,005$ ). Aynı teknoloji sınıflandırmasına atfedilen önem

dereceleri incelendiğinde ise her bir teknoloji sınıfının yüksek önem derecesinde değerlendirildiği görülmektedir. Elde edilen sonuçlar ışığında her ne kadar araştırmaya katılan işletmelerin çeşitli sebeplerden (yapısal, finansal, yönetsel, işgücü vb.) dolayı bu teknolojileri uygulamada çok düşük seviyelerde olsalar bile faaliyette buldukları sektör bağlamında değerlendirdiklerinde her bir teknolojinin sektörün geleceği ve rekabet açısından önemli olduğunu düşündükleri görülmektedir. Kısaca işletmelerin, imkânları olması dâhilinde bu teknolojileri kullanmak istediği söylenebilir.

**Tablo 6.** Endüstri 4.0 teknolojilerinin ortalama kullanım durumu

	Endüstri 4.0 teknolojileri kullanım durumu*		Endüstri 4.0 teknolojileri önem dereceleri durumu**	
	Ortalama	Std. Sapma	Ortalama	Std. Sapma
Otonom robotlar	1,26	1,416	4,29	1,535
Büyük veri uygulamaları	1,29	1,314	3,87	1,726
Bulut-bilişim teknolojisi	1,41	1,583	3,94	1,714
Siber güvenlik önlemleri	1,60	1,772	4,31	1,465
Simülasyon (benzetim) teknolojisi	1,82	5,392	4,06	1,588

Eklemeli üretim sistemleri	1,28	1,571	3,83	1,654
Sistem bütünleştirme	1,90	1,881	3,87	1,716
Nesnelerin interneti teknolojisi***	1,82	1,784	3,97	1,675
Artırılmış gerçeklik teknolojisi	1,13	1,385	4,05	1,620
Siber-fiziksel sistemler	1,49	1,499	4,03	1,660

\* 1: Hiç uygulamıyor/ 5: İleri seviyede uyguluyor

\*\*1: Önemsiz/ 5: Çok önemli

\*\*\*ANOVA test sonucuna göre 0,05 seviyesinde sektörler arasında anlamlı farklılık göstermektedir.

Araştırma amacına uygun olarak işletmelere, kurum içindeki hangi departmanlarda Endüstri 4.0 teknolojilerini kullandıklarını belirtmeleri istenmiştir. İşletmelerin vermiş oldukları cevapların ortalaması ve orta ve ileri düzeyde bu teknolojileri kullanan işletmelerin sayıları Tablo 7 ve 8'de özetlenmiştir. Buna göre Endüstri 4.0 teknolojilerini belirtilen 9

departmanda uygulama seviyeleri göreceli olarak temel düzeyde de olsa uygulandığı yönünde olmuştur. Bu sonuç Endüstri 4.0 teknolojilerinin uygulanma seviyeleri ile kıyaslandığında örnekleme oluşturan KOBİ'lerin kendilerini olduklarından daha iyi bir seviyede algıladıklarını göstermektedir.

**Tablo 7.** Endüstri 4.0 teknolojileri departmanlar açısından ortalama kullanım düzeyleri\*

Departmanlar		Gıda	Makine	Otomotiv	Kimya	Genel ortalama
Araştırma-Geliştirme	Ortalama	2,40	1,97	2,04	2,06	2,03
	Std. Sapma	1,298	1,364	1,362	0,998	1,325
Üretim	Ortalama	2,73	2,22	2,46	2,31	2,35
	Std. Sapma	1,534	1,560	1,615	1,195	1,543
Satın Alma	Ortalama	2,27	1,96	1,75	1,75	1,90
	Std. Sapma	1,223	1,359	1,074	0,856	1,226
Lojistik**	Ortalama	2,33	1,62	1,40	1,50	1,60
	Std. Sapma	1,397	1,108	0,821	0,817	1,050
Satış-Pazarlama	Ortalama	2,27	2,06	1,88	2,06	2,02
	Std. Sapma	1,335	1,397	1,324	1,436	1,366
Bakım-Onarım	Ortalama	2,27	1,96	1,82	1,81	1,93
	Std. Sapma	1,280	1,414	1,297	0,981	1,330
Bilişim Teknolojileri	Ortalama	2,53	1,85	1,86	2,13	1,93
	Std. Sapma	1,506	1,303	1,187	1,408	1,299
Muhasebe-Finansman	Ortalama	2,67	2,32	2,09	2,25	2,27
	Std. Sapma	1,633	1,594	1,503	1,653	1,569
Ürün Tasarımı	Ortalama	2,07	2,15	2,04	2,06	2,10
	Std. Sapma	1,335	1,510	1,476	1,237	1,453

\* 1: Hiç uygulamıyor/ 5: İleri seviyede uyguluyor

\*\*ANOVA test sonucuna göre 0,05 seviyesinde sektörler arasında anlamlı farklılık göstermektedir.

**Tablo 8.** Departmanlara göre Endüstri 4.0 teknolojilerini orta ve ileri düzeyde kullanan işletme sayısı

Departmanlar	Orta ve ileri düzeyde kullanan işletme sayısı	Yüzde (%)
Üretim	78	42,3
Araştırma-Geliştirme	72	39,2
Muhasebe-Finansman	72	39,1
Ürün Tasarımı	62	33,7
Satış-Pazarlama	60	32,6
Bilişim Teknolojileri	59	32,1
Bakım-Onarım	56	30,4
Satın Alma	55	29,8
Lojistik	36	19,6

İşletmelerin nesnelerin interneti teknolojileri olarak belirtilen 5 teknoloji [41] uygulamasına ilişkin kullanım düzeyleri ve orta ve ileri düzeyde bu teknolojileri kullanan KOBİ'lerin sayıları Tablo 9 ve Tablo 10'da özetlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre KOBİ'lerin belirtilen teknolojileri kullanım düzeyleri göreceli olarak olumlu yöndedir. Özellikle sensör teknolojisi en ileri düzeyde kullanılan teknoloji olarak

gözükmektedir. Sensör teknolojisinin diğer teknolojilere kıyasla ulaşılabilirliğinin fazla olması ve maliyet açısından diğer teknolojilere kıyasla daha ucuz olması bu durumun sebepleri arasında gösterilebilir. Dolayısıyla KOBİ'lerin kaynaklarının yettiği, erişebildikleri teknolojileri ağırlıklı olarak kullandıkları söylenebilmektedir.

**Tablo 9.** Sektörlere göre nesnelerin interneti teknolojilerinin ortalama kullanım düzeyleri\*

Nesnelerin interneti teknolojileri		Gıda	Makine	Otomotiv	Kimya	Genel ortalama
Makineden makineye iletişim araçları (M2M)	Ortalama	2,73	2,23	2,02	2,25	2,21
	Std. Sapma	1,58	1,395	1,382	1,291	1,399
Sensör teknolojisi	Ortalama	3,47	3,16	2,88	2,81	3,07
	Std. Sapma	1,407	1,447	1,536	1,223	1,455
RFID (radyo frekansı ile tanımlama)	Ortalama	2	1,78	1,32	1,5	1,63
	Std. Sapma	1,309	1,296	0,948	0,894	1,181
Depo otomasyon sistemleri (otomatik raflar vb.)	Ortalama	1,87	1,53	1,35	1,75	1,52
	Std. Sapma	1,457	0,991	0,916	1,125	1,028
Gerçek zamanlı yer belirleme sistemleri (GPS vb.)**	Ortalama	2,33	1,59	1,33	1,44	1,55
	Std. Sapma	1,759	1,082	0,873	0,727	1,09

\* 1: Hiç uygulamıyor/ 5: İleri seviyede uyguluyor

\*\*ANOVA test sonucuna göre 0,05 seviyesinde sektörler arasında anlamlı farklılık göstermektedir.

İşletmelerin nesnelerin interneti teknolojilerini orta ve ileri düzey kullanımlarına bakıldığında ise yine Endüstri 4.0 teknolojilerinin kullanım düzeylerinde elde edilen sonuçlar ile benzer sonuçlar elde edildiği söylenebilir. Her ne kadar Tablo 10'da belirtilen teknolojileri orta ve ileri seviyelerde kullanan işletme

sayıları olumlu KOBİ'ler bağlamında olumlu gözükse de genel Endüstri 4.0 teknolojilerini kullanım düzeyleri ile kıyaslandığında bu işletmelerin kendilerini teknolojik sınıflandırmada mevcut seviyelerinden daha ileri seviyede konumlandıklarını göstermektedir.

**Tablo 10.** Nesnelerin interneti teknolojilerini orta ve ileri düzeyde kullanan işletme sayısı

Nesnelerin interneti teknolojileri	Orta ve ileri düzeyde kullanan işletme sayısı	Yüzde (%)
Sensör teknolojisi	130	70,2
Makineden makineye iletişim araçları (M2M)	72	38,9
RFID (radyo frekansı ile tanımlama)	35	18,9
Depo otomasyon sistemleri (otomatik raflar vb.)	31	16,7
Gerçek zamanlı yer belirleme sistemleri (GPS vb.)	32	17,3

Endüstri 4.0 ile ilgili bir diğer önemli teknoloji ise bulut bilişim uygulamalarıdır. Araştırmaya katılan KOBİ'lerin bulut bilişim teknolojileri [40] kullanım

durumları Tablo 11'de belirtilmiştir. Buna göre KOBİ'lerin %35,8'si veri depolama ve yedeklemede bulut bilişim teknolojilerini kullandığını belirtmiştir.

**Tablo 11.** Bulut bilişim teknolojileri kullanan işletme sayıları

Bulut bilişim kullanım alanları	İşletme sayısı	Yüzde (%)
Veri depolama ve yedekleme	66	35,8
Veri analizi	16	8,6
İşletim desteği ve yazılım geliştirme	11	5,9
Makina ve cihazlar üzerine gömülü bilişim sistemleri	14	7,6
Hiçbiri	111	60

İmalat sanayinde faaliyet gösteren işletmelerin üretim ve lojistik faaliyetlere ilişkin büyük veri ile müşteri kaynaklı çeşitli verileri toplayıp kullanması, ürün kalitesinin artırılması; tedarik zinciri riskinin ve lojistik faaliyetlerin etkin yönetilmesi gibi çok sayıda fayda içermektedir [42]. Bu çerçevede işletmelerin belirtilen verileri kullanım düzeyleri ortalaması ve kullanılan işletme sayıları Tablo 12 ve Tablo 13'de özetlenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde KOBİ'lerin veri kullanımını ile

ilgili farkındalık sahibi olduğu göreceli olarak söylenebilmektedir. Özellikle müşterilere ve üretim süreçlerine ilişkin verilerin toplanması ile ilgili olarak tüm sektörlerde bir farkındalık olduğu görülmektedir. İşletmelerin yaklaşık olarak %64'ü müşteri verilerinin toplanmasını, yaklaşık %70'i ise üretim esnasında makine ve süreç verilerinin toplanması uygulamalarını orta ve ileri düzeyde uyguladıklarını belirtmiştir.

**Tablo 12.** Ortalama veri kullanım düzeyi\*

Veri kaynakları		Gıda	Makine	Otomotiv	Kimya	Genel ortalama
Müşteri verilerinin toplanması (Tüketim alışkanlıkları vb.)	Ortalama	3,53	3,18	3,16	3,06	3,19
	Std. Sapma	1,767	1,399	1,486	1,482	1,457

Üretim esnasında makine ve süreç verilerinin toplanması	Ortalama	3,08	2,89	3,36	3	3,05
	Std. Sapma	1,553	1,272	1,454	1,506	1,373
Lojistik faaliyetlere ilişkin verilerin eş zamanlı toplanması (Dağıtım araçlarının konumlarının takip edilmesi vb.)	Ortalama	2,2	2,34	2	2,56	2,24
	Std. Sapma	1,568	1,316	1,21	1,59	1,332
Ekonomik, sosyal ve siyasal gelişmelere ve müşteri eğilimlerine ait verilerin dış kaynaklardan temini	Ortalama	2,8	2,59	2,45	2,31	2,54
	Std. Sapma	1,612	1,347	1,278	1,537	1,36

\* 1: Hiç uygulamıyor/ 5: İleri seviyede uyguluyor

**Tablo 13.** Sektörlere göre veri kullanımı orta ve ileri düzeyde olan işletme sayısı

Veri kaynakları	İşletme sayısı (n)	Gıda	Makine	Otomotiv	Kimya	Genel toplam
Müşteri verilerinin toplanması (Tüketim alışkanlıkları vb.)	n	9	61	38	10	120
	%	0,6	0,65	0,67	0,63	64,86
Üretim esnasında makine ve süreç verilerinin toplanması	n	9	60	36	11	118
	%	0,69	0,65	0,72	0,69	67,82
Lojistik faaliyetlere ilişkin verilerin eş zamanlı toplanması (Dağıtım araçlarının konumlarının takip edilmesi vb.)	n	4	39	18	7	70
	%	0,27	0,41	0,32	0,44	37,84
Ekonomik, sosyal ve siyasal gelişmelere ve müşteri eğilimlerine ait verilerin dış kaynaklardan temini	n	8	46	27	7	89
	%	0,53	0,49	0,48	0,45	48,37

Veri kullanım düzeylerinin yanı sıra elde edilen verilerin saklanma yöntemleri de Endüstri 4.0 ile öne çıkan diğer unsurlar arasındadır [40]. Araştırma kapsamındaki KOBİ'lerin veri saklama durumları incelendiğinde yaklaşık %60'ının verilerini yerel bir bilgisayarın internet bağlantısıyla, yaklaşık %30'unun çevrimdışı sistemleri ile sakladıkları belirlenmiştir. Kullanılan diğer yöntemler ise çevrimiçi sistemler, güvenli çevrimiçi sağlayıcılar (Bulut teknolojileri) ve ortak bir veri tabanı kullanımı şeklindedir.

KOBİ'lerin sistem bütünleştirme uygulamalarına yaklaşımları incelendiğinde ise sistem bütünleştirme uygulamalarını işletme içerisinde orta ve ileri seviyede kullanan işletmelerin oranının %43, işletme dışı ise %30 olduğu görülmüştür. Bu sonuç Endüstri 4.0 teknoloji düzeyini yakalama açısından yeterli seviyelere ulaşamamış olsa bile KOBİ'ler açısından göreceli olarak dijitalleşme yolunda olumlu gidişatı gösterdiği söylenebilmektedir.

#### IV. SONUÇ

Bu çalışmada Konya imalat sanayiinde faaliyet gösteren KOBİ'lerin teknoloji uygulama seviyelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla belirlenen 4 sektörden toplam 185 işletme ile görüşmeler gerçekleştirilmiştir. İncelenen işletmelerin büyük çoğunluğu makine ve otomotiv imalat sanayii işletmeleri olup, daha çok küçük işletme (10-49 çalışan) ölçeğindedir. Teknoloji kullanımı ile ilgili öncelikli olarak imalat teknolojileri değerlendirmeye alınmıştır. İmalat teknoloji kullanım düzeyleri incelendiğinde işletmelerin genel olarak orta üstü seviyede bu teknolojileri kullandıkları gözlenmiştir. İmalat teknolojileri açısından sonuçlar değerlendirildiğinde işletmelerin gerek bölgesel gerekse sektörel açıdan değerlendirildiğinde temel

teknoloji kullanımında göreceli olarak iyi bir konumda oldukları söylenebilir. Değerlendirmeye alınan bir diğer teknolojik uygulama kriteri ise bilişim teknolojileridir. İncelenen işletmelerdeki bilişim teknolojileri kullanım düzeylerine ilişkin veriler incelendiğinde seviyede işletmelerin ortalama bir düzeye sahip olduğu görülmektedir. Bu teknolojiler içerisinde internet ve yerel alan ağları kullanım düzeyleri oldukça yüksek bir seviye göstermiştir. Bu durum bilişim teknolojileri sınıfı içerisinde bu teknolojilerin temel teknolojiler olması ve çağımız teknolojik gelişimleri açıdan değerlendirildiğinde normal bir durum olarak değerlendirilebilir. Elde edilen sonuçlar Konya'daki imalat sanayii KOBİ'lerinin bilişim ve imalat teknolojileri uygulama düzeyleri değerlendirildiğinde belirlenen sektörlerin, Endüstri 4.0 dönüşümü açısından henüz başlangıç düzeyinde olduğu söylenebilir. Ebetteki her teknolojinin her sektörde tam kapasite kullanımı söz konusu olmayabilir. Bu teknolojilerin sektörlerin gereksinimleri açısından değişiklik göstermeleri normal bir durumdur. Ancak sonuçlardan hareketle sektörlerin kendileri ile ilgili teknolojilerinden bile tam anlamıyla yararlanmadıkları söylemek yanlış olamayacaktır.

KOBİ'lerin Endüstri 4.0 teknolojileri uygulama düzeyleri incelendiğinde ise kullanım düzeyinin oldukça düşük olduğu görülmektedir. Belirtilen teknolojilerinin düşük seviyede de olsa yine uygulanıyor olması dijitalleşme sürecine geçişte bir adım atıldığını göstermektedir. Elde edilen sonuçlar başta TUSİAD (2016) ve Berger (2017) gibi uluslararası kuruluşların Türkiye'deki sanayi sektörüne ilişkin raporlarında elde edilen sonuçlar ve Şahin (2019), Çevik (2019) gibi Türkiye ile ilgili yapılan bilimsel çalışmaların sonuçları ile paralellik

göstermektedir. İşletmelerin bu teknolojilere atfetikleri önem dereceleri değerlendirildiğinde ise teknolojilerin kullanım düzeyinin çok düşük olmasına rağmen her teknolojiye verilen önem seviyesinin yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu durum işletme yöneticilerinin ve mühendislerinin yarının ihtiyaçları hakkında farkındalık sahibi olduğunu göstermektedir. Yani sadece vizyon sahibi değil aynı zamanda faaliyet gösterdikleri sektörün geleceği ve rekabet şartları açısından yönetim bilincine sahip olduklarını göstermektedir. Bu sonuç çalışmanın ortaya koyduğu önemli sonuçlardan bir tanesidir. Endüstri 4.0 sürecinin önemine ve sürecin sektör ve işletme açısından sağlayacağı katma değere yönelik farkındalık sonuçları Kamber ve Bolatan [36] gibi Endüstri 4.0 farkındalığı üzerine yapılmış çalışmaların sonuçları ile örtüşmektedir.

Endüstri 4.0 teknolojilerinin uygulandığı departmanlar incelendiğinde ise temel seviyede de olsa belirlenen her departmanda uygulandığı yönünde bir sonuca varılmıştır. İşletmeler, teknoloji uygulama düzeylerinin düşük olduğunu belirtmiş olmalarına rağmen aynı değerlendirmeyi departmanlar açısından yaptıklarında konuya daha olumlu yaklaşmışlardır. Bu sonuç da aslında işletmelerin kendilerini teknoloji kullanım düzeyi açısından olduğundan daha fazla iyi (overestimation) değerlendirdiğini göstermektedir. Benzer sonuçlar nesnelerin interneti teknolojileri kullanım düzeyleri incelemelerinde de gözlenmiştir. İncelenen işletmeler nesnelerin interneti teknolojileri kullanımı konusunda kendilerini olduğundan daha iyi bir seviye konumlandırmaktadır. Bu teknolojiler içerisinde sensör teknolojilerinin kullanımı diğer teknolojilere kıyaslandığında yüksek düzeyde kullanım seviyesi elde etmektedir. Bu durum teknolojilere ulaşılabilirlik ve maliyet açısından değerlendirildiğinde, sensör teknolojisinin diğer teknolojilere kıyasla daha ucuz, erişilebilir ve kolay anlaşılabilir olması ile açıklanabilir.

Endüstri 4.0 ile gündeme gelen teknolojilerin işlevselliğinin ana kaynağı veridir. Sistemlerin etkin çalışması birbirleri arasındaki veri iletişiminin etkin, anlık ve doğru şekilde sağlanabilmesinde gizlidir. Dolayısıyla dijital bir iş dünyasında incelenmesi gereken bir diğer önemli teknoloji bulut bilişim ve veri sistemleri kullanımınıdır. Bu teknolojiler işletmelerin Endüstri 4.0 teknoloji uygulama seviyelerinin önemli bir göstergesini oluşturmaktadır. İncelenen işletmelerin bulut bilişim teknolojileri kullanım düzeyleri değerlendirildiğinde, yarısına yakınının belirlenen teknolojileri kullandığı görülmüştür. Özellikle veri kullanım düzeyleri tüm sektörlerde göreceli olarak olumlu sonuçlar göstermiştir. İşletmelerin müşteri ve üretim süreçlerine ilişkin verileri, orta ve üzeri düzeyde topladığı elde edilen sonuçlar arasındadır. Bu sonuç işletmelerin, Endüstrilerin geleceğinin şekillenmesinde çok büyük önem taşıyan veri ve veri analizi

konularında farkındalık sahibi olduklarını göstermektedir.

Çalışma sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde, incelenen işletmelerin mevcut imalat ve bilişim teknolojilerinde göreceli olarak orta düzey kullanım konumuna sahipken, Endüstri 4.0 teknolojileri uygulamalarında çok düşük düzeyde kaldığı görülmektedir. Bu durum gerek sektörel gerekse ölçek açısından değerlendirildiğinde, Endüstri 4.0'a geçiş sürecinde KOBİ'lerin uzun bir yol kat etmesi gerekliliğini göstermektedir. İncelenen işletmeler temel alınarak, henüz Endüstri 3.0 göstergesi olan mevcut imalat ve bilişim teknolojilerinin kullanımında bile ileri seviyelere ulaşılmadığı düşünüldüğünde, Endüstri 4.0 teknolojileri kullanım düzeyinin henüz düşük seviyelerde olması çok şaşırtıcı bir sonuç olarak gözükmemektedir.

Yapılan bu çalışmanın sonuçları temel alındığında iki temel öneri ortaya konulmak istenmektedir. İlk öneri yapılacak olan yeni çalışmalara yöneliktir. Endüstri 4.0 ile ilgili yeni yapılacak çalışmalarda gerek küçük ve orta ölçekli işletmeler gerek ise büyük ölçekli işletmeler bazında Endüstri 4.0 teknoloji kullanımının daha geniş bir sektör ağı açısından değerlendirilmesi ve daha geniş bir perspektiften sürecin tüm boyutları ile değerlendirilmesi önerilmektedir. Diğer bir deyişle, KOBİ'lerin Endüstri 4.0 dönüşümünün, ileri teknoloji kullanımının yanında, yönetim stratejileri, çevresel etki ve insan kaynağı istihdamı açısından da incelenmesi gerekmektedir. Bir diğer öneri ise konu ile ilgili politikaların ve ekonomik süreçlerin geliştirilmesinden sorumlu olan kurum ve kuruluşlarla ilgilidir. Özellikle bilgi birikimi, yazılım ve donanım imkânları, eğitilmiş ve yetenekli insan kaynağı ve yatırım sermayesi vb. başlıca kaynakları yeterli düzeyde olmayan KOBİ'lerin yaşamakta olan dijital dönüşüme uyum sağlaması için çeşitli desteklere ihtiyaç duyduğu gözlemlenmektedir. KOBİ'lerin bu süreçte kendi stratejilerini geliştirebilmeleri için bu yeni teknolojilerin, işletmeleri ve sektörleri açısından ne gibi tehdit ve faydaları içerdiğini tam olarak anlamaları büyük önem taşımaktadır. Bu geçiş sürecinin KOBİ'lerin lehine işlemesi ve rekabet güçlerini artırması adına, sürece ilişkin bilinçlendirme ve bilgilendirme çalışmalarının yapılmasına olanak verecek, KOBİ'lere özel danışmanlık merkezlerinin kurulmasının hem sektörlerin hem de ülkelerin ekonomik sürdürülebilirliği açısından faydalı olacağı düşünülmektedir.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma Konya Gıda ve Tarım Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koodinatörlüğü tarafından desteklenmiştir.

## KAYNAKLAR

[1] Gabaçlı, N., ve Uzunöz, M. (2017). IV. Sanayi devrimi: Endüstri 4.0 ve otomotiv sektörü. *In ICPESS*

(*International Congress on Politic, Economic and Social Studies*), Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi-Ankara, Türkiye, 9-11 Kasım.

[2] Pamuk, N. S., ve Soysal, M. (2018). Yeni sanayi devrimi Endüstri 4.0 üzerine bir inceleme. *Verimlilik Dergisi*, (1), 41-66.

[3] Soylu, A. (2018). Endüstri 4.0 ve Girişimcilikte Yeni Yaklaşımlar. Soylu, A. (2018). Endüstri 4.0 Ve Girişimcilikte Yeni Yaklaşımlar. *Pamukkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, (32), 43-57.

[4] Özsoylu, A. F. (2017). Endüstri 4.0. *Çukurova Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 21(1), 41-64.

[5] Zheng, P., Sang, Z., Zhong, R. Y., Liu, Y., Liu, C., Mubarak, K. ve Xu, X. (2018). Smart manufacturing systems for Industry 4.0: Conceptual framework, scenarios, and future perspectives. *Frontiers of Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 2, 137-150.

[6] Benias, N., ve Markopoulos, A. P. (2017). A review on the readiness level and cyber-security challenges in Industry 4.0. *South Eastern European Design Automation, Computer Engineering, Computer Networks and Social Media Conference (SEEDA-CECNSM)*. Kastoria, Greece, 02 November 2017.

[7] Rojko, A. (2017). Industry 4.0 concept: background and overview. *International Journal of Interactive Mobile Technologies (IJIM)*, 11(5), 77-90.

[8] Rao, T. R., Mitra, P., Bhatt, R. ve Goswami, A. (2018). The big data system, components, tools, and technologies: a survey. *Knowledge and Information Systems*, (60), 1-81.

[9] Purcell, B. M. (2014). Big data using cloud computing. *Journal of Technology Research*, 5(1).

[10] Li, G., Hou, Y. ve Wu, A. (2017). Fourth Industrial Revolution: technological drivers, impacts and coping methods. *Chinese Geographical Science*, 27(4), 626-637.

[11] TUSİAD ve BCG (2016). Industry 4.0 in Turkey as an Imperative for Global Competitiveness - An Emerging Market Perspective. <https://tusiad.org/en/reports/item/9011-industry-40-in-turkey-as-an-imperative-for-global-competitiveness>.

[12] Ceruti, A., Marzocca, P., Liverani, A., ve Bil, C. (2019). Maintenance in Aeronautics in an Industry 4.0 Context: The Role of Augmented Reality and Additive Manufacturing. *Journal of Computational Design and Engineering*. 6(4), 516-526.

[13] Gibson, I., Rosen, D. W., ve Stucker, B. (2010). Design for additive manufacturing. In: Additive manufacturing Technologies, Springer, Boston, MA., 299-332.

[14] Manogaran, G., Thota, C., Lopez, D. ve Sundarasekar, R. (2017). Big data security intelligence for healthcare Industry 4.0. In: Thames, L., Schaefer, D (ed.), Cybersecurity for Industry 4.0, Springer, Cham, 103-126.

[15] Bahrin, M. A. K., Othman, M. F., Azli, N. N., ve Talib, M. F. (2016). Industry 4.0: A review on

industrial automation and robotic. *Jurnal Teknologi*, 78(6-13), 137-143.

[16] Rejikumar, G., Arunprasad, P., Persis, J., ve Sreeraj, K. M. (2019). Industry 4.0: key findings and analysis from the literature arena. *Benchmarking: An International Journal*. 26(8).

[17] Boston Danışma Grubu (BCG), (2019). Embracing Industry 4.0 rediscovering growth, <https://www.bcg.com/capabilities/operations/embracing-g-Industry-4.0-rediscovering-growth.aspx>.

[18] Lee, J., Bagheri, B., ve Kao, H. A. (2015). A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing letters*, 3, 18-23.

[19] Yıldız, A. (2018). Endüstri 4.0 ve akıllı fabrikalar. *Sakarya University Journal of Science*, 22(2), 546-556.

[20] Fırat, O. Z., ve Fırat, S. Ü. (2017). Endüstri 4.0 yolculuğunda trendler ve robotlar. *İstanbul Üniversitesi İşletme Fakültesi Dergisi*, 46(2), 211-223.

[21] Özdoğan, O. (2017). Endüstri 4.0: Dördüncü Sanayi Devrimi ve Endüstriyel Dönüşümün Anahtarları. Pusula Yayıncılık.

[22] Ulusoy, G. (2018). İmalat sektöründe Endüstri 4.0 dönüşümü çabaları: bazı gözlemler. *İktisat ve Toplum*, 8(92), 121-123.

[23] Safar, L., Sopko, J., Bednar, S., ve Poklemba, R. (2018). Concept of SME business model for industry 4.0 environment. *TEM Journal*, 7(3), 626.

[24] Sevinç, A., Gür, Ş., ve Eren, T. (2018). Analysis of the Difficulties of SMEs in Industry 4.0 Applications by Analytical Hierarchy Process and Analytical Network Process. *Processes*, 6(12), 264.

[25] Schröder, C. (2016). The challenges of industry 4.0 for small and medium-sized enterprises. Friedrich-Ebert-Stiftung: Bonn, Germany.

[26] Çevik, D. (2019). KOBİ'lerde Sanayi 4.0'ın Uygulanabilirliği ve Yönetici Bakış Açılarının Değerlendirilmesi. *Uluslararası Bilimsel Araştırmalar Dergisi (IBAD)*, 4(2), 277-291.

[27] Mittal, S., Khan, M. A., Romero, D., ve Wuest, T. (2018). A critical review of smart manufacturing & Industry 4.0 maturity models: Implications for small and medium-sized enterprises (SMEs). *Journal of manufacturing systems*, 49, 194-214

[28] Schumacher, A., Erol, S., ve Sihn, W. (2016). A maturity model for assessing Industry 4.0 readiness and maturity of manufacturing enterprises. *Procedia Cirp*, 52, 161-166.

[29] Müller, J. M., ve Voigt, K. I. (2018). Sustainable industrial value creation in SMEs: A comparison between industry 4.0 and made in China 2025. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 5(5), 659-670.

[30] Özçelik, T. O., Erkollar, A., ve Cebeci, H. I. (2019). Bir İmalat İşletmesi için Endüstri 4.0 (Dijital) Olgunluk Seviyesi Belirleme Uygulaması. *5th International Management Information Systems Conference*, Ankara, 24-26 Ekim 2018.



- [31] Infosys (2015). Industry 4.0: The State of the Nations, <http://www.experienceinfosys.com/industry-4-0>.
- [32] Berger (2017). Challenge for the F&B industry in Turkey, advantage or competitive disadvantage? [https://www.siemens.com.tr/i/Assets/gida-gunu/170524\\_KS\\_Industrie40\\_Presentation\\_Siemens\\_Turkey.pdf](https://www.siemens.com.tr/i/Assets/gida-gunu/170524_KS_Industrie40_Presentation_Siemens_Turkey.pdf).
- [33] Deloitte (2017). The Fourth Industrial Revolution is here—are you ready? [https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/tr/Documents/manufacturing/Industry4-0\\_Are-you-ready\\_Report.pdf](https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/tr/Documents/manufacturing/Industry4-0_Are-you-ready_Report.pdf).
- [34] Europarl (2016). Industry 4.0. [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2016/570007/IPOL\\_STU\(2016\)570007\\_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2016/570007/IPOL_STU(2016)570007_EN.pdf)
- [35] Şahin, C. (2019). Ülkelerin endüstri 4.0 düzeylerinin COPRAS yöntemi ile analizi: G-20 ülkeleri ve Türkiye. Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi, Türkiye.
- [36] Kamber, E. ve Bolatan, G. İ. S. (2019). Endüstri 4.0 Türkiye Farkındalığı. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 11(30), 836-847.
- [37] Görçün, Ö. F. (2017). Dördüncü Sanayi Devrimi Endüstri 4.0. İstanbul: Beta.
- [38] Bülbül, H., ve Güles, H. K. (2004). Türk sanayi işletmelerinde ileri imalat teknolojileri kullanımı ve performansa etkisi. *METU Studies in Development*, 31(1), 1.
- [39] Tekin, M., Zerenler, M., ve Bilge, A. (2005). Bilişim teknolojileri kullanımının işletme performansına etkileri: lojistik sektöründe bir uygulama. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 4(8), 115-129.
- [40] Özkurt, C. (2016). Endüstri 4.0 Perspektifinden Türkiye’de İmalat Sanayinin Durumu: Sakarya İmalat Sanayi Üzerine Bir Anket Çalışması. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Türkiye.
- [41] Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2010). The internet of things: A survey. *Computer networks*, 54(15), 2787-2805.
- [42] Body, K., 2018, 10 big data use cases in manufacturing, <https://www.actify.com/industry-topics/10-big-data-use-cases-manufacturing/>

# Numerical Solutions Of Nonlinear Boundary Value Pantograph Type Delay Differential Equations

*Doğrusal Olmayan Sınır Değerli Pantograf Tip Gecikmeli Diferansiyel Denklemlerin Nümerik Çözümleri*

Bülent YILMAZ<sup>1</sup> , Volkan YAMAN 

<sup>1</sup> Marmara University, Faculty of Arts and Sciences, Department of Mathematics, 34722, Istanbul/Turkey

## Abstract

In this paper we compared the Daftardar-Jafari Method (DJM) with Adomian Decomposition Method (ADM) and Differential Transformation Method (DTM) in solving nonlinear boundary value delay differential equations of pantograph type. All these 3 methods provide series solutions to the problems. We analysed the first n-term approximate solutions of these 3 methods with 2 numerical examples to see if DJM is as good as ADM and DTM in solving nonlinear boundary value delay differential equations and we found DJM a reliable method in solving this kind of problems.

**Keywords:** Delay differential equations, Daftardar-Jafari, Adomian Decomposition, Differential Transformation, Boundary value

## Öz

Bu çalışmada doğrusal olmayan sınır değerli pantograf tip gecikmeli diferansiyel denklemlerin çözümünde Daftardar-Jafari Metodunu (DJM), Adomian Ayrıştırma Metodu (ADM) ve Diferansiyel Transformasyon Metoduyla (DTM) karşılaştırdık. Bu 3 metot ta seri formunda çözümler oluşturmaktadır. Bu 3 metodun ilk n-terimli yaklaşık çözümlerini 2 nümerik örnekle analiz ederek DJM nin sınır değerli gecikmeli diferansiyel denklemlerin çözümünde ADM ve DTM kadar iyi olup olmadığını araştırdık ve sonuç olarak DJM nin bu tip problemlerde güvenilir bir metot olduğunu gördük.

**Anahtar Kelimeler:** Gecikmeli diferansiyel denklemler, Daftardar-Jafari, Adomian Ayrıştırma, Diferansiyel Transformasyon, Sınır değer

## I. INTRODUCTION

Delay Differential Equations (DDE) consider processes where rate of change depends not only on the present stage but also on the history. Linear and nonlinear delay differential equations are studied by many researchers using the ADM and DTM. Wazwaz et al [1], and Ogunfiditimi [2] used ADM, Cakir and Arslan [3] compared results of ADM and DTM on linear and nonlinear differential equations of pantograph type. In literature, to our knowledge, there isn't a research focused on DJM's application on nonlinear delay differential equations.

In this paper we investigate the efficiency of DJM compared with ADM and DTM on boundary value problems of ordinary nonlinear differential equations with proportional delay through 2 numerical examples.

We will briefly illustrate the theory of DJM, ADM and DTM, we will show applications of these 3 methods to 2 numerical problems, analyse the results and give a conclusion about the efficiency of DJM.

## II. MATERIALS AND METHODS

### 2.1. Daftardar-Jafari Method (DJM)

DJM is a method that can be utilized to obtain solutions of nonlinear functional equations [4]. A general functional equation can be written as;

$$y = N(y) + g \quad (1)$$

where  $N$  might be a nonlinear operator and  $g$  is a known function. DJM decomposes the solution  $y$  into a series as;

$$y = \sum_{n=0}^{\infty} y_n \tag{2}$$

By using the series expansion of  $y$ , nonlinear operator  $N$  in (1) can be decomposed as;

$$N\left(\sum_{n=0}^{\infty} y_n\right) = N(y_0) + \sum_{n=1}^{\infty} \left( N\left(\sum_{m=0}^n y_m\right) - N\left(\sum_{m=0}^{n-1} y_m\right) \right) \tag{3}$$

Then (1) can be re-written as;

$$y_0 + y_1 + \sum_{n=2}^{\infty} y_n = g + N(y_0) + \sum_{n=1}^{\infty} \left( N\left(\sum_{m=0}^n y_m\right) - N\left(\sum_{m=0}^{n-1} y_m\right) \right) \tag{4}$$

Taking  $y_0 = g$  and  $y_1 = N(y_0)$  we get the following recurrence relation;

$$\begin{aligned} y_0 &= g \\ y_1 &= N(y_0) \\ &\vdots \\ y_{m+1} &= N(y_0 + y_1 + \dots + y_m) \\ &\quad - N(y_0 + y_1 + \dots + y_{m-1}) \quad m = 1, 2, \dots \end{aligned} \tag{5}$$

This yields;

$$\begin{aligned} (y_1 + y_2 + \dots + y_{m+1}) \\ = N(y_0 + y_1 + \dots + y_m) \quad m = 1, 2, \dots \end{aligned} \tag{6}$$

From this we can write (1) as;

$$y = g + \sum_{n=1}^{\infty} y_n \tag{7}$$

It is shown in [5] that if  $N$  is a contraction then  $y = \sum_{n=0}^{\infty} y_n$  is absolutely and uniformly convergent and converges to the unique  $y$  in view of Banach fixed point theorem.  $k$ - term approximation to  $y$  is shown as follows;

$$y \approx \sum_{n=0}^k y_n \tag{8}$$

**2.2. Adomian Decomposition Method (ADM)**

A general form of a deterministic differential equation can be written as;

$$Ly + Ry + Ny = g \tag{9}$$

where  $L$  is the highest order linear differential operator ( $L = \frac{d^n}{dt^n}(\cdot)$ ; with invertibility assumption),  $R$  is the remainder linear operator and  $N$  is the nonlinear operator and  $g$  is any function [6], [7]. By applying the inverse operator  $L^{-1}$  we get the following;

$$L^{-1}Ly = L^{-1}g - L^{-1}Ry - L^{-1}Ny \tag{10}$$

where for initial value problems the inverse operator  $L^{-1}$  is defined as the  $n$ -fold definite integration

operator from 0 to  $t$ . ADM decomposes the solution into a series;

$$y = \sum_{n=0}^{\infty} y_n \tag{11}$$

Then we obtain;

$$L^{-1}Ly = L^{-1}L \sum_{n=0}^{\infty} y_n = L^{-1}g - L^{-1}R \sum_{n=0}^{\infty} y_n - L^{-1}Ny \tag{12}$$

ADM replaces  $N y$  with a series of so called Adomian polynomials ( $A_n$  s) which are generated for the particular nonlinearity of the operator  $N$ . Thus we have;

$$Ny = \sum_{n=0}^{\infty} A_n \tag{13}$$

With the definition of  $L^{-1}$  and taking  $y_0$  (the first term of the series  $\langle y_n \rangle$ ) as the sum of  $L^{-1} g$  and terms resulting from the initial conditions, (12) can be written as follows;

$$y = \sum_{n=0}^{\infty} y_n = y_0 - L^{-1}R \sum_{n=0}^{\infty} y_n - L^{-1}N \sum_{n=0}^{\infty} A_n \tag{14}$$

where  $A_n$  can be formulated as;

$$A_0 = f(y_0) \tag{15}$$

$$A_n = \sum_{v=1}^n c(v, n) f^{(v)}(y_0) \quad n = 1, 2, \dots \tag{16}$$

where  $f$  is the nonlinear term,  $f^{(v)}$  is the  $v^{th}$  derivative of  $f$ , and  $c(v, n)$  is the function as defined in [7].

Convergence of  $\sum_{n=0}^{\infty} A_n$  is shown in [8] and [5] basing on the assumption that nonlinear operator  $N$  is a contraction in Banach space.

So that we reach at the following recursive relation;

$$\begin{aligned} y_1 &= -L^{-1}Ry_0 - L^{-1}A_0 \\ y_2 &= -L^{-1}Ry_1 - L^{-1}A_1 \\ &\vdots \\ y_n &= -L^{-1}Ry_{n-1} - L^{-1}A_{n-1} \end{aligned} \tag{17}$$

As  $y_0$  is calculated from the initial conditions and  $A_n$  depends only on  $(y_0, y_1, \dots, y_n)$  we can find all  $y_n$  and  $A_n$  respectively.

In [9] it is shown that ADM and DJM generate series solution  $y = \sum_{n=0}^{\infty} y_n$  converging to the same limit.

The practical solution will be the  $k$ -term approximation to  $y$ ;

$$y \approx \sum_{n=0}^k y_n \tag{18}$$

**2.3. Differential Transformation Method (DTM)**

Any analytical function  $y(x)$  can be expanded in Taylor series about a point  $x_0$  as

$$y(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} \left. \frac{d^k y(x)}{dx^k} \right|_{x=x_0} (x - x_0)^k \tag{19}$$

Differential transformation of  $y(x)$  is defined as;

$$Y(k) = \frac{1}{k!} \left. \frac{d^k y(x)}{dx^k} \right|_{x=x_0} \quad k = 0, 1, 2, \dots \tag{20}$$

Differential inverse transform of  $Y(k)$  is defined as follows;

$$y(x) = \sum_{k=0}^{\infty} Y(k) (x - x_0)^k \tag{21}$$

with n-terms approximation we obtain;

$$y(x) \approx \sum_{k=0}^n \frac{1}{k!} \left. \frac{d^k y(x)}{dx^k} \right|_{x=x_0} (x - x_0)^k \tag{22}$$

The fundamental operations of DTM performed at  $x = 0$  is shown in Table 1.

**Table 1.** Most used differential transformation operators

Original Function	Transformed Function
$y(x) = u(x) \pm v(x)$	$Y(k) = U(k) \pm V(k)$
$y(x) = c u(x)$	$Y(k) = c U(k)$
$y(x) = u(x) v(x)$	$Y(k) = \sum_{l=0}^k U(l) V(k-l)$
$y(x) = \frac{d^n u(x)}{dx^n}$	$Y(k) = \frac{(k+n)!}{k!} U(k+n)$
$y(x) = x^n$	$Y(k) = \delta(k-n) = \begin{cases} 1, & \text{if } k = n \\ 0, & \text{if } k \neq n \end{cases}$

$y(x) = e^{2x}$	$Y(k) = \frac{2^k}{k!}$
$y(x) = u\left(\frac{x}{a}\right)$	$Y(k) = \frac{1}{a^k} U(k)$

**III. NUMERICAL APPLICATIONS**

In this section boundary value nonlinear delay differential equations have been solved by DJM, ADM and DTM and results analysed. We used Mathematica 10.4 in numerically solving of algebraic equations.

Example 1.

Nonlinear second order proportional delay differential equation

$$\frac{d^2 y(x)}{dx^2} = -y(x) + 5y^2\left(\frac{x}{2}\right), \quad x \in [0, 1] \tag{23}$$

$$y(0) = 1, \quad y(1) = e^{-2}$$

Exact solution is  $y = e^{-2x}$

Solving with DJM:

By taking 2-fold integration of both sides of (23) we get the standard form for DJM;

$$y(x) = 1 + y'(0)x - \int_0^x \int_0^x y(x) dx dx + 5 \int_0^x \int_0^x y^2\left(\frac{x}{2}\right) dx dx \tag{24}$$

Let's call  $y'(0) = b$ .

Then in accordance with (5) we get

$$y_0(x) = 1 + bx$$

In (24) we have a linear term  $y$  as well. So we set

$$y_1 = Ly_0 + Ny_0\left(\frac{x}{2}\right) = - \int_0^x \int_0^x y_0(x) dx dx + 5 \int_0^x \int_0^x y_0^2\left(\frac{x}{2}\right) dx dx$$

and in accordance with (5) we have;

$$y_{m+1} = L(y_0 + y_1 + \dots + y_m) + N\left(y_0\left(\frac{x}{2}\right) + y_1\left(\frac{x}{2}\right) + \dots + y_m\left(\frac{x}{2}\right)\right) - N\left(y_0\left(\frac{x}{2}\right) + y_1\left(\frac{x}{2}\right) + \dots + y_{m-1}\left(\frac{x}{2}\right)\right) \quad m = 1, 2, \dots$$

which in this example is;

$$y_{m+1} = - \int_0^x \int_0^x y_0(x) + y_1(x) \dots + y_m(x) dx dx + 5 \left[ \int_0^x \int_0^x \left( y_0\left(\frac{x}{2}\right) + y_1\left(\frac{x}{2}\right) + \dots + y_m\left(\frac{x}{2}\right) \right)^2 dx dx - \int_0^x \int_0^x \left( y_0\left(\frac{x}{2}\right) + y_1\left(\frac{x}{2}\right) + \dots + y_{m-1}\left(\frac{x}{2}\right) \right)^2 dx dx \right]$$

So, we get;

$$y_1(x) = - \int_0^x \int_0^x (1 + bx) \, dx \, dx + 5 \int_0^x \int_0^x \left(1 + b \left(\frac{x}{2}\right)\right)^2 \, dx \, dx = -\frac{x^2}{2} - \frac{bx^3}{6} + 5 \left(\frac{x^2}{2} + \frac{bx^3}{6} + \frac{b^2x^4}{48}\right)$$

$$y_2(x) = -\frac{x^4}{6} - \frac{bx^5}{30} + \frac{b^2x^6}{288} + 5 \left(\frac{x^4}{12} + \frac{bx^5}{30} + \frac{x^6}{120} + \frac{37b^2x^6}{11520} + \frac{bx^7}{504} + \frac{5b^2x^7}{32256} + \frac{31b^2x^8}{129024} + \frac{5b^2x^8}{331776} + \frac{5b^4x^{10}}{10616832}\right)$$

$$y_2(x) = - \int_0^x \int_0^x y_0(x) + y_1(x) + y_2(x) \, dx \, dx + 5 \left[ \int_0^x \int_0^x \left(y_0\left(\frac{x}{2}\right) + y_1\left(\frac{x}{2}\right) + y_2\left(\frac{x}{2}\right)\right)^2 \, dx \, dx - \int_0^x \int_0^x \left(y_0\left(\frac{x}{2}\right) + y_1\left(\frac{x}{2}\right)\right)^2 \, dx \, dx \right]$$

⋮

By substituting the boundary condition  $y(1) = e^{-2}$  in 4 terms approximate series solution ( $y_0 + y_1 + y_2 + y_3$ ) we obtain  $b = -2.0$  by numerically solving the algebraic equation, and hence we obtain the series solution of the problem.

Solving with ADM:

$$L^{-1} : \int_0^x \int_0^x (.) \, dx \, dx$$

Applying  $L^{-1}$  to both sides of (23) we get;

$$y(x) = 1 + bx - L^{-1}y(x) + 5 L^{-1}y^2\left(\frac{x}{2}\right)$$

where  $b$  denotes  $y'(0)$ .

In accordance with (14) we have  $y_0(x) = 1 + bx$  and the nonlinear term is  $y^2\left(\frac{x}{2}\right)$ .

In accordance with (15), (16) and (17) Adomian polynomials and  $y_n$  are calculated as follows;

$$A_0 = y_0^2\left(\frac{x}{2}\right) = \left(1 + b\frac{x}{2}\right)^2$$

$$y_1(x) = -L^{-1}y_0(x) + 5 L^{-1}A_0 = -\frac{x^2}{2} - b\frac{x^3}{6} + 5 \left(\frac{x^2}{2} + b\frac{x^3}{6} + b^2\frac{x^4}{48}\right)$$

$$A_1 = y_1\left(\frac{x}{2}\right) 2y_0\left(\frac{x}{2}\right) = 2 \left(1 + b\frac{x}{2}\right) \left(-\frac{x^2}{8} - b\frac{x^3}{48} + 5 \left(\frac{x^2}{8} + b\frac{x^3}{48} + b^2\frac{x^4}{768}\right)\right)$$

⋮

By substituting boundary condition at  $x = 1$ ; starting from the 5<sup>th</sup> iteration  $b$  is found as -2.0. Then we obtain the series solution.

Solving with DTM:

Applying Differential Transformation to (23) at  $x = 0$  in accordance with Table 1 we obtain the following;

$$(k+1)(k+2)Y(k+2) = -Y(k) + 5 \sum_{l=0}^k \frac{1}{2^k} Y(l)Y(k-l)$$

From the initial condition of (23) we have  $Y(0) = 1$ .

We also have  $y'(0) = Y(1) = b$ .

For  $k = 0$ ;  $1 \cdot 2 \cdot Y(2) = -Y(0) + 5(Y(0))^2 \xrightarrow{\text{yields}} Y(2) = 2$

$k = 1$ ;  $Y(3) = \frac{2b}{3}$

$k = 2$ ;  $Y(4) = \frac{1}{48} (12 + 5b^2)$

$k = 3$ ;  $Y(5) = -\frac{2b}{15}$

$k = 4$ ;  $Y(6) = \frac{444 + 145b^2}{11520}$

⋮

By substituting boundary condition at  $x = 1$ ; starting from 12<sup>th</sup> iteration  $b$  is found as -2.0.

With the definition of inverse transform,  $n = 12$  term approximate solution is obtained as;

$$y(x) = \sum_{k=0}^{\infty} Y(k)x^k \approx \sum_{k=0}^{12} Y(k)x^k = 1 - 2x + 2x^2 - \frac{4}{3}x^3 + \frac{2}{3}x^4 - \frac{4}{15}x^5 + \frac{4}{45}x^6 - \frac{8}{315}x^7 + \frac{2}{315}x^8 \dots$$

The results of 3 methods applied to the problem compared with the exact solution is as follows;

**Table 2.** Error analysis

	DJM-Exact	ADM-Exact	DTM-Exact
$x = 0.0$	0	0	0
$x = 0.2$	-5.958613725 $\times 10^{-5}$	3.338020682 $\times 10^{-5}$	-1.746912571 $\times 10^{-7}$
$x = 0.4$	-1.260420042 $\times 10^{-7}$	7.063050189 $\times 10^{-5}$	-3.696623786 $\times 10^{-7}$
$x = 0.6$	-2.005382795 $\times 10^{-7}$	1.131771987 $\times 10^{-7}$	-5.944723387 $\times 10^{-7}$
$x = 0.8$	-2.463858192 $\times 10^{-7}$	1.450977594 $\times 10^{-7}$	-7.92225276 $\times 10^{-7}$
$x = 1.0$	0	0	0

Since boundary values are taken as input for all 3 methods there is no error at the boundaries.

Example 2.

Nonlinear second order proportional delay differential equation;

$$\frac{d^2y(x)}{dx^2} = (y^2(x) + y^2(x))y\left(\frac{x}{2}\right), \quad x \in [0, 1] \tag{25}$$

$$y(0) = 1, \quad y(1) = \frac{1}{2}$$

Exact solution is  $y = \frac{1}{x+1}$

Solving with DJM:

By taking 2-fold integration of both sides of (25) we get the standard form for DJM.

$$y(x) = 1 + bx + \int_0^x \int_0^x (y^2(x) + y^2(x)) y\left(\frac{x}{2}\right) dx dx$$

where  $b$  is for  $y'(0)$ . Then we have

$$y_0(x) = 1 + bx$$

$$y_2(x) = \frac{b^{16} x^{26}}{539136000000} + \frac{b^{15} x^{25}}{110592000000} + \frac{1913 b^{14} x^{24}}{915701760000} + \frac{4261 b^{13} x^{23}}{1398988800000} + \frac{b^{13} x^{21}}{165888000} + \frac{14621 b^{12} x^{22}}{139898880000} + \frac{13 b^{12} x^{20}}{65664000} + \frac{75953 b^{11} x^{21}}{30965760000} + \frac{196992000}{1052329 b^9 x^{17}} + \frac{504299520000}{11670373 b^8 x^{18}} + \frac{52224000}{484303 b^5 x^{16}} + \frac{6144000}{4717 b^5 x^{14}} + \frac{2801664000}{348059 b^7 x^{17}} + \frac{5013504000}{1029967 b^7 x^{15}} + \frac{48384000}{8039 b^7 x^{13}} + \frac{40609382400}{97 b^7 x^{11}} + \frac{442368000}{3231751 b^6 x^{16}} + \frac{9318400}{274529 b^6 x^{14}} + \frac{376012800}{354329 b^6 x^{12}} + \frac{232243200}{667 b^6 x^{10}} + \frac{2246400}{16787 b^5 x^{15}} + \frac{422400}{129307 b^5 x^{13}} + \frac{1327104000}{315311 b^5 x^{11}} + \frac{19353600}{2677 b^5 x^9} + \frac{20275200}{24917 b^4 x^{14}} + \frac{9101 b^4 x^{12}}{172800} + \frac{3225600}{227519 b^4 x^{10}} + \frac{3594240}{463 b^4 x^8} + \frac{5068800}{23311 b^3 x^{11}} + \frac{92160}{11111 b^3 x^9} + \frac{2795520}{30463 b^3 x^7} + \frac{126720}{601 b^2 x^{12}} + \frac{1382400}{359 b^2 x^{10}} + \frac{3584}{3207 b^2 x^8} + \frac{9984}{841 b^2 x^6} + \frac{211200}{7 b x^{11}} + \frac{34560}{3 b x^9} + \frac{80640}{45 b x^7} + \frac{80640}{17 b x^5} + \frac{50688}{x^3} + \frac{50688}{7 x^5} + \frac{11 x^4}{2880} + \frac{7168}{1152} + \frac{880}{32} + \frac{112}{20} + \frac{360}{28} + \frac{40}{24}$$

⋮

By substituting the boundary condition  $y(1) = \frac{1}{2}$  in 3 terms approximate series solution ( $y_0 + y_1 + y_2$ ) we obtain  $b = -0.9974$ , and hence we obtain the series solution of the problem.

Solving with ADM:

$$L^{-1} : \int_0^x \int_0^x (.) dx dx$$

$$y_0(x) = 1 + bx$$

where  $b$  is for  $y'(0)$ .

There are 2 nonlinear terms;  $y^2(x)y\left(\frac{x}{2}\right)$  and  $y^3(x)y\left(\frac{x}{2}\right)$

We get;

$$y(x) = 1 + bx + L^{-1}y^2(x) y\left(\frac{x}{2}\right) + L^{-1}y^3(x) y\left(\frac{x}{2}\right)$$

Adomian polynomials ( $A_n$  for the 1<sup>st</sup> nonlinear term and  $B_n$  for the 2<sup>nd</sup> nonlinear term) and  $y_n, (n \geq 1)$  are as follows;

$$A_0 = y_0^2(x) y_0\left(\frac{x}{2}\right) = (1 + bx)^2 \left(1 + \frac{bx}{2}\right)$$

$$B_0 = y_0^2(x) y_0\left(\frac{x}{2}\right) = (1 + bx)^2 \left(1 + \frac{bx}{2}\right)$$

$$y_1(x) = \frac{b^4 x^8}{60} + \frac{3b^2 x^5}{20} + \frac{13 b^2 x^4}{24} + bx^2 + x^2$$

Nonlinear term,  $Ny$  is  $(y^2(x) + y^2(x)) y\left(\frac{x}{2}\right)$ .

$y_n, (n \geq 1)$  are as follows;

$$y_1(x) = x^2 + bx^2 + \frac{13 b^2 x^4}{24} + \frac{3 b^2 x^5}{20} + \frac{b^4 x^8}{60}$$

$$A_1 = \left(\frac{b^4 x^8}{60} + \frac{3b^2 x^5}{20} + \frac{13 b^2 x^4}{24} + bx^2 + x^2\right)$$

$$x\left(\frac{1}{2}(1 + bx)^2 + 2\left(1 + \frac{bx}{2}\right)(1 + bx)\right)$$

$$B_1 = \left(\frac{b^4 x^8}{60} + \frac{3b^2 x^5}{20} + \frac{13 b^2 x^4}{24} + bx^2 + x^2\right)$$

$$x\left(\frac{1}{2}(1 + bx)^2 + 3\left(1 + \frac{bx}{2}\right)(1 + bx)^2\right)$$

$$y_2(x) = \frac{b^7 x^{11}}{3300} + \frac{b^4 x^{10}}{200} + \frac{53 b^4 x^7}{1440} + \frac{51 b^4 x^7}{320} + \frac{2273 b^2 x^7}{5040} + \frac{101 b^2 x^6}{120} + \frac{19 b^2 x^5}{20} + \frac{x^4}{2}$$

⋮

By substituting the boundary condition  $y(1) = \frac{1}{2}$  in 5 terms approximate series solution ( $y_0 + y_1 + y_2 + y_3 + y_4$ ) we obtain  $b = -0.986677$ , and hence we obtain the series solution of the problem.

Solving with DTM:

By applying differential transformation operations of Table1, transformed equation of (25) can be written as follows;

$$(k+1)(k+2)Y(k+2) = \sum_{m=0}^k \frac{(\sum_{m=0}^m Y(m) \sum_{l=0}^{m-l} Y(l) Y(m-l)) Y(k-m)}{2^{k-m}} + \sum_{r=0}^k \frac{(\sum_{l=0}^l Y(l) Y(r-l)) Y(k-r)}{2^{k-r}}$$

From the initial condition of (25) we have  $Y(0) = 1$ . We also have  $y'(0) = Y(1) = b$ .

For

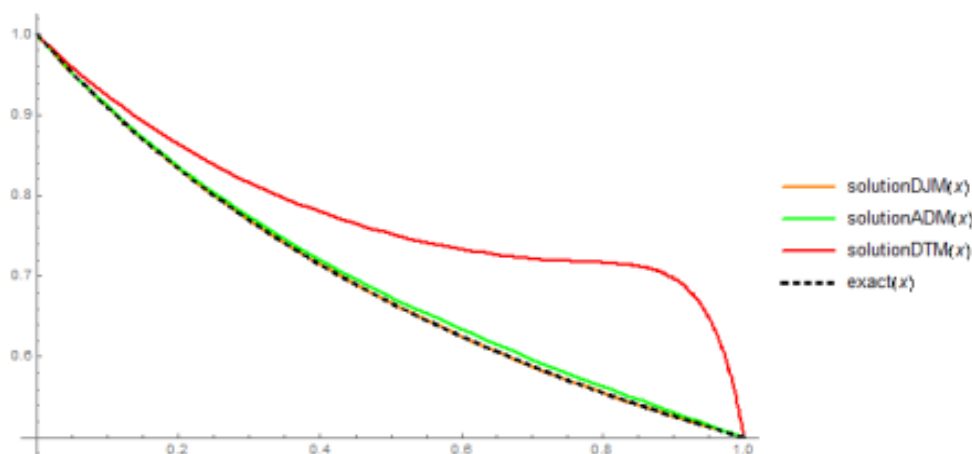
$$\begin{aligned}
 k = 0; & \quad Y(2) = 1 \\
 k = 1; & \quad Y(3) = b \\
 k = 2; & \quad Y(4) = \frac{1}{24}(13b^2 + 11) \\
 k = 3; & \quad Y(5) = \frac{1}{20}(3b^2 + 17b) \\
 & \quad \vdots
 \end{aligned}$$

By substituting the boundary condition  $y(1) = \frac{1}{2}$  in 20 terms approximate series solution  $(\sum_{k=0}^{20} Y(k) x^k)$  we obtain  $b = -0.853709$ , and with the definition of inverse transform,  $n = 20$  term approximate solution is obtained as follows;

$$\begin{aligned}
 y(x) = & -0.470935 x^{21} + 0.487609 x^{20} - 0.504875 x^{19} + 0.522751 x^{18} - 0.541261 x^{17} + 0.560426 x^{16} - 0.580269 x^{15} \\
 & + 0.600816 x^{14} - 0.622089 x^{13} + 0.644117 x^{12} - 0.666919 x^{11} + 0.690543 x^{10} - 0.714954 x^9 \\
 & + 0.740367 x^8 - 0.766252 x^7 + 0.794215 x^6 - 0.818982 x^5 + 0.85311 x^4 - 0.853709 x^3 + x^2 \\
 & - 0.853709 x + 1
 \end{aligned}$$

Table 3. Error analysis

	DJM-Exact	ADM-Exact	DTM-Exact
$x = 0.0$	0	0	0
$x = 0.2$	0.000053721909530568546	0.0027873595113915295	0.030240751176283664
$x = 0.4$	0.00011459706021721416	0.006049697944179644	0.06539434024993596
$x = 0.6$	0.00017334321661466312	0.008754821716905448	0.1087273721
$x = 0.8$	0.00017662364074289005	0.007939509477603246	0.16114119396876214
$x = 1.0$	0	0	0



**IV. RESULTS AND CONCLUSION**

We have investigated the convergence rates of DJM, ADM and DTM on 2 numerical examples of boundary value nonlinear pantograph type delay differential equations. We see that all 3 methods converge to the exact solution for the first problem very fast. For the second problem ADM and DJM are again very successful with few iterations but DTM doesn't converge as fast as them. In DTM  $b$  is found -0.793523 with 6 iterations, -0.826196 with 12 iterations and -0.853709 with 20 iterations where the exact value of  $b$  is -1.0. It seems DTM solution tends to converge to exact solution as number of iterations increases but as the Taylor series expansion of the exact solution of the problem is convergent only in radius less than 1, DTM would require much higher number of iterations to

approximate the exact solution as DJM and ADM do.

We see in these two numerical examples that DJM can be used as a reliable method for solving boundary value nonlinear pantograph type delay differential equations.

**REFERENCES**

[1] Wazwaz, A.M., Raja, M.A.Z, Syam, M.I. (2016) Reliable Treatment for Solving Boundary Value Problems of Pantograph Delay Differential Equations, Romanian Academy Publishing House, ISSN: 1221-1451  
 [2] Ogunfeditimi, F.O. (2015) Numerical Solution of Delay Differential Equations Using the Adomian Decomposition Method (ADM), The

- 
- International Journal of Engineering And Sciences (IJES), Vol:4, Issue: 5, 18-23.
- [3] Cakir, M. and Arslan, D. (2015) The Adomian Decomposition Method and The Differential Transform Method For Numerical Solution of Multi-Pantograph Delay Differential Equations, Applied Mathematics, 6, 1332-1343.
- [4] Daftardar-Gejji, V. and Jafari, H. (2006) An Iterative Method For Solving Nonlinear Functional Equations, Journal of Mathematical Analysis and Applications 316, 753-763.
- [5] Cherruault, Y., Adomian, G., Abbaoui, K. and Rach, R. (1995) Further Remarks on Convergence of Decomposition Method. International Journal of Bio-Medical Computing, 38, 89-93.
- [6] Adomian, G. (1986) Nonlinear Stochastic Operator Equations, Academic Press, New York.
- [7] Adomian, G. (1994) Solving Frontier Problems of Physics: the Decomposition Method, Kluwer Academic Publishers.
- [8] Cherruault, Y. (1989) Convergence of Adomian's Method, Kybernetes, Vol: 18, No:2, 31-38.
- [9] Bhalekar, S., Daftardar-Gejji, V. (2011) Convergence of the New Iterative Method, International Journal of Differential Equations, Vol:2011, 1-10.



## Farklı LEED Versiyonlarının İç Mekânlardaki Su ve Enerji Verimliliği Üzerindeki Etkileri

*Effects of Different LEED Versions on Indoor Water and Energy Efficiency*

Dilara N. KESKİN<sup>1</sup> , Deniz AKGÜL<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Marmara Üniversitesi, Göztepe Kampüsü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Bilimleri Programı, Kadıköy, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup> Marmara Üniversitesi, Göztepe Kampüsü, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Kadıköy, İstanbul, Türkiye

### Öz

Doğal kaynakların hızla tüketildiği ve sera gazı emisyonlarının artarak küresel ısınma etkilerinin her geçen gün daha da görünür hale geldiği günümüzde, sürdürülebilirlik çalışmaları ile çevreye verilen tahribatın azaltılması hedeflenmektedir. Doğal kaynak kullanımı ve yüksek emisyon değerleri sebebiyle, inşaat sektörü bu anlamda acil önlem alması gereken sektörlerdendir. Bu kapsamda yeşil bina sertifikasyonları, inşaat sektöründeki sürdürülebilirlik uygulamalarını yönlendirmektedir. Bu sertifikasyonlar, güncel çevre sorunlarının çözümüne pozitif yönde etki edebilme amacı ile gerekli görüldükçe yenilenmektedirler. Bu çalışmada, dünyada en çok tercih edilen yeşil bina sertifikası olan Enerji ve Çevresel Tasarımda Liderlik (LEED)'in iç mekândaki su ve enerji verimliliği alt başlıklarında yapılan güncellemelerin su ve enerji tüketiminden kaynaklanan CO<sub>2</sub> emisyonlarını nasıl etkilediği analiz edilmiştir. Bu kapsamda, 2009 yılına ait LEED versiyon 3 ile 2019 yılında yayınlanan güncel versiyon 4.1 arasındaki farklılıklar, versiyon 3 kapsamında sertifikalandırılmış örnek bir bina üzerindeki su ve enerji verimliliği analizleriyle ortaya konmuştur. Bu iki versiyon kapsamlı olarak incelendiğinde, iç mekândaki su verimliliği gereklilikleri üzerinde büyük güncellemeler olmamasına rağmen, yapılan değişikliklerin projeleri su tüketimini azaltma, ya da alternatif su kaynaklarını kullanma konusunda teşvik ettiği belirlenmiştir. Bu sayede hem su kaynaklarının korunabileceği, hem de su tüketiminin azaltılmasıyla birlikte su arıtımı, dağıtımı ve atık suların bertarafından kaynaklanan CO<sub>2</sub> salımlarının %10,5 oranında azaltılabileceği tespit edilmiştir. Enerji verimliliği açısından ise versiyon 3'te takip edilen ASHRAE 90.1-2007 ile güncel versiyonda takip edilen ASHRAE 90.1-2016 arasındaki farklılıklar sayesinde, aynı verimlilik oranının sağlanması için yapılacak uygulamalarla CO<sub>2</sub> salımının %16,6 oranında azaltılabileceği ortaya konmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Yeşil Bina, LEED, Su Verimliliği, Enerji Verimliliği, CO<sub>2</sub> Emisyonu, Bina Enerji Modellemesi

### Abstract

Nowadays, while natural resources are being depleted rapidly and the effects of global warming has become more distinct with the increasing greenhouse gas (GHG) emissions, it is aimed to prevent environmental degradation through sustainability studies. Due to the high consumption of natural sources and GHG emissions, construction sector is one those that should act immediately. In this context, green building certifications lead sustainability practices in the construction industry. These certifications are updated as necessary in order to provide solution for current environmental problems. In this study, how CO<sub>2</sub> emissions caused by water and energy consumption are affected by the updates in indoor water and energy efficiency subtitles of Leadership in Energy and Environmental Design (LEED), which is the most preferred green building certification in the world, was analyzed. In this context, the differences between LEED v3 (published in 2009) and v4.1 (published in 2019) were revealed by conducting water and energy efficiency analyzes on a sample building certified under version 3. When these two versions are examined side by side, although there are no major updates on indoor water efficiency requirements, it has been shown that, the changes lead projects to either decrease the water use or use alternative water resources. In this way, it has been determined that, both water resources can be protected and as a result of reducing water consumption, CO<sub>2</sub> emissions caused by water treatment, distribution and disposal of wastewater can be reduced by 10.5%. It was found that, thanks to the differences between ASHRAE 90.1-2007 (v3) and ASHRAE 90.1-2016 (v4.1), applications to be carried out to provide the same efficiency may reduce CO<sub>2</sub> emissions by 16.6%.

**Keywords:** Green Building, LEED, Water Efficiency, Energy Efficiency, CO<sub>2</sub> Emissions, Building Energy Modelling

## I. GİRİŞ

Dünyada nüfus artışı ve sanayileşmeyle birlikte fosil yakıt kullanımının artması, kentleşme, kentleşme sürecinde orman alanlarının ve doğal kaynakların tahribatı ile bilinçsiz arazi kullanımı atmosferdeki sera gazı emisyonlarının

artmasına neden olmuştur. Sera gazı emisyonunun artması, sıcaklık değerlerindeki artışın, dolayısıyla iklim değişikliğinin en önemli sebeplerindendir [1]. Sıcaklık artışı ve atmosferdeki sera gazı konsantrasyonlarının yükselmesi ekolojik dengeyi de etkilemektedir. Yerkürenin aşırı ısınmaya başlaması, buzulların erimesi, sel, kuraklık ve su kıtlığı riskleri gibi bir takım ekolojik dengesizliklerin ortaya çıkması küresel ısınmanın sonuçlarındandır [2, 3].

Küresel iklim değişikliğiyle birlikte önemi gitgide artan sürdürülebilirlik kavramı, beraberinde kaynakların korunması amacıyla çeşitli uygulamalar getirmiştir. Bunlardan biri de özellikle inşaat sektöründe doğal kaynakların hızla tüketiminin önüne geçmek amacıyla oluşturulan “Yeşil Bina” kavramıdır. İnşaat sektörü, doğal kaynakların tüketimi açısından önemli bir paya sahiptir. Günümüzde yapı sektörü doğadan elde edilen ham maddenin %50’sini, küresel enerjinin %40’ını ve suyun %16’sını tüketirken, oluşan atıkların da %50’sinden sorumludur [4]. Kaynak korumasını amaçlayan “Yeşil Bina” kavramı da bu noktada önem arz etmektedir. İnşaat sektöründe enerji ve su verimliliğine önem veren, malzeme seçimleriyle hem kullanıcıların sağlığını göz önüne alıp hem de çevreye verilen olumsuz etkiyi azaltan, arazi seçimi ve inşaat yapımı sırasındaki uygulamalara müdahale ederek doğal çevreyi koruyan uygulamalar “Yeşil Bina” kavramı çerçevesinde değerlendirilmektedir.

Yeşil Bina kavramıyla ilgili olarak, farklı ülkelerde farklı sertifikasyon sistemleri oluşturulmuştur. Fakat dünya çapında en çok tercih edilen yeşil bina sertifikasyon sistemi 124.428 kayıtlı projesiyle Enerji ve Çevresel Tasarımda Liderlik (LEED) sertifikasıdır [5,6]. LEED sertifikası 1993’te sürdürülebilirlik alanında çalışmalar yapmak amacıyla kurulan Amerikan Yeşil Bina Konseyi (USGBC) tarafından 1998 yılında yayınlanmıştır [7]. LEED sertifikası, yeni yapılacak binalarda, iç mekânlarda, mevcut yapılarda, mahallelerde ve düşük-orta katlı konut binalarında takip edilebilen bir sertifikasyon türüdür [8].

Küresel ısınmanın etkisinin giderek artması, LEED’in sertifikasyon için gerekli olan koşulları başlangıçtan bu yana sürekli olarak güncelleyerek daha sıkı hale getirmesine neden olmuştur. 1998 yılında yayınlanan ilk versiyon v1 oluşturulmuş ve ardından 2000, 2002, 2005, 2009, 2013 yıllarında sırasıyla v2, v2.1, v2.2, v3 ve v4 yayınlanmıştır. 2016 yılına kadar v3 projelerinin sisteme kayıtları devam etmiştir fakat 2016 yılından sonra tüm proje kayıtları versiyon 4 kapsamında yapılmıştır [9,10]. Aralık 2018 itibariyle de versiyon 4 üzerinde güncellemeler yapılarak v4.1 Beta yayınlanmış, Ocak 2019 itibariyle v4.1 kullanıma açılmıştır [11].

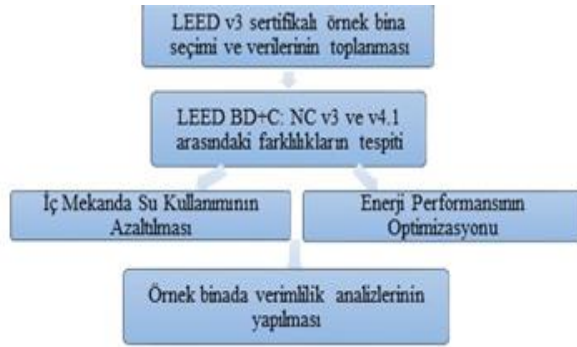
LEED sertifikasında binalar 110 puan üzerinden değerlendirilmekte ve toplanan puan sonucuna göre

sertifika seviyesi Sertifikalı, Gümüş, Altın ve Platin olarak derecelendirilmektedir. Bu sertifikasyon türünde, sertifikayı alabilmek için yapılması zorunlu tutulan gereklilikler “Ön Koşul”, puan toplanarak sertifikasyon seviyesinin ne olacağını belirlenmesine katkı sağlayan gereklilikler ise “Kredi” olarak adlandırılmaktadır. LEED Yeni Binalar ve Majör Renovasyonlar (BD+C:NC) v4.1 sertifikası 9 ana kategoriden oluşmaktadır. Bunlar; bütünleşik süreç yönetimi, konum ve ulaşım, sürdürülebilir araziler, su verimliliği, enerji ve atmosfer, malzeme ve kaynaklar, iç mekân kalitesi, tasarımda yenilik ve bölgesel öncelik kategorileridir. Enerji ve Atmosfer kategorisi altındaki enerji performansının optimizasyonu kredisi 18 puan ile tüm LEED kredileri arasında en yüksek puan değerine sahip kredidir. Su Verimliliği kategorisi altındaki iç mekânda su kullanımının azaltılması kredisi ise 6 puan ile toplam puana etkisi açısından ikinci sırada önem arz eden kredilerdendir [12].

Bu çalışmada, su ve enerji kaynaklarının tüketimi ile bu tüketimin sebep olduğu çevresel etkileri azaltmayı hedefleyen, enerji performansının optimizasyonu ve iç mekânda su kullanımının azaltılması kredilerindeki güncellemeler LEED BD+C v3 ile v4.1 için karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Bu analizlerle birlikte, LEED’in yönlendirdiği şekilde enerji ve su tüketimleri elde edildiğinde CO<sub>2</sub> salımlarının ne yönde etkilendiği ortaya konmuştur. Çalışmamız, LEED Yeni Binalar ve Majör Renovasyonlar kategorisi altında uygulamaya 2019 yılında geçmiş olan versiyon 4.1 ile ilgili yapılacak ilk akademik çalışmalardan olma özelliği taşımaktadır. Özellikle yeşil bina sertifikasyonu kapsamında yapılan bilimsel çalışmalarda genellikle LEED, BREEAM, DGNB ve GSAS gibi farklı sertifikasyon türleri arasındaki farklılıklar karşılaştırılmıştır. Bu çalışmaların bir kısmında su ve enerji verimliliği üzerinde de durulmuştur [7, 13, 14, 15,]. Mevcut literatürden farklı olarak çalışmamızda ilk defa LEED BD+C: NC’nin en güncel versiyonu v4.1 ile 2009 yılına ait LEED v3, enerji ve su verimliliği konularında karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır.

## II. MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışmamız kapsamında öncelikle süreç şemasında (Şekil 1) görüldüğü üzere, enerji ve su kullanım analizlerinin yapılabileceği örnek bir bina seçilmiştir. Bu binaya ait veriler mimari, mekanik, elektrik projelerinden ve bina kayıtlarından tedarik edilmiştir. Ardından, LEED BD+C:NC gerekliliklerinin v3 ile v4.1 arasındaki farklılıkları tespit edilerek örnek binanın iç mekândaki su ve enerji verimliliği analizleri gerçekleştirilmiştir. Su verimliliği analizi için Microsoft Excel, enerji modellemesi için Carrier Hap programları kullanılmıştır.



Şekil 1. Çalışmaya ait süreç şeması

## 2.1. Çalışma Kapsamında Seçilen Örnek Bina

Çalışma kapsamında LEED v3 ve LEED v4.1 arasındaki farklılıkların değerlendirilebilmesi için örnek bina olarak LEED BD+C: NC v3'ten sertifikalandırılmış bir bina tercih edilmiştir. Bunun için birçok kredide başarı sağlamış ve Platin seviyesinde sertifika almaya hak kazanmış, 3 katlı, 400 m<sup>2</sup>'lik orta ölçekli bir ofis binası seçilmiştir. Bu bina, büyük ölçekte bir renovasyon ile yapıldığı için LEED Yeni Binalar ve Majör Renovasyonlar kategorisi altında değerlendirilmiştir.

Bina İstanbul'da yer aldığı için ASHRAE 90.1-2016'ya göre 3A iklim bölgesinde, ASHRAE 90.1-2007'ye göre 4A iklim bölgesinde yer almaktadır. Buradaki tanımlamaya göre, iklim bölgeleri 0 ile 8 arasındadır ve 0 en sıcak, 8 en soğuk bölgeleri göstermektedir. Nem alt bölgeleri ise A (nemli), B (kuru) veya C (deniz) harfleriyle belirtilmektedir [16]. Proje binasında 3 açık ofis, 3 kapalı ofis, 2 toplantı odası, 3 tuvalet, 1 mescit, 1 yemekhane ve 1 garaj bulunmaktadır. Mekanik olarak şartlandırılmamış garaj, mescit ve tuvaletler 41 m<sup>2</sup>'yi oluşturmaktadır. Kalan diğer mahaller ise şartlandırılmıştır ve 359 m<sup>2</sup>'lik alana sahiptir.

Çalışma kapsamında değerlendirilen binanın başvurduğu diğer LEED kredileri gibi, enerji performansının optimizasyonu ve iç mekânda su kullanımının azaltılması kredileri 2013 yılında USGBC tarafından onaylanmış ve bina tüm çalışmalarıyla birlikte LEED Platin sertifika almaya hak kazanmıştır. 2013 yılındaki analiz sonuçlarına göre, ASHRAE 90.1.2007 standardı baz alınarak yapılan enerji verimliliği analizinde, binada PV panel kullanımıyla birlikte %51 oranında enerji verimliliği sağlanmaktadır. İç mekândaki su verimliliği analizlerinde ise bina toplam %43 oranında su verimliliğine sahiptir.

## 2.2. LEED BD+C: NC v3 ve v4.1 Kapsamında İç Mekânda Su Verimliliği ve Enerji Performansının Optimizasyonu Kredilerindeki Farklılıklar

Çalışmamızda versiyonlar arasındaki farkların, kaynak kullanımı üzerindeki etkilerinin irdelenebilmesi için öncelikle LEED v3 ile v4.1 gereklilikleri ve analiz yöntemleri arasındaki farklılıklar incelenmiştir. Bu

sayede analizler, ilgili versiyonda belirtilen standartlar ve yöntemler baz alınarak tamamlanmıştır.

İç mekânda su kullanımının azaltılması ve enerji performansının optimizasyonu kredileri kapsamında, v3 ile v4.1 arasında analiz sonuçlarına göre alınabilen puanlarda değişiklikler olmuştur. İç mekânda su kullanımının azaltılması kredisinden v3'te maksimum 4 puan alınabilirken v4.1'de bu 6 puana kadar yükselmiştir. Enerji performansının optimizasyonu kredisinde ise v4.1'de enerji verimliliği, kredi gerekliliğinin bir kısmını oluşturmakta, diğer kısmında ise sera gazı emisyonu sonucu puan almada etkin rol oynamaktadır. Dolayısıyla enerji verimliliği açısından bina enerji modellemesine göre %44 verimlilik sağlanıyorsa, v3'te en yüksek puan olan 19 puan alınabiliyorken; v4.1'de bu analizden 9 puan alınabilmekte ve kalan diğer 9 puanı sera gazı emisyon sonucu belirlemektedir [12, 17].

Çalışma kapsamında ele alınan enerji performansının optimizasyonu kredisinde, bina enerji modellemesi yapılarak binadaki enerji verimliliği ortaya koyulmaktadır. V4.1'de bir yenilik olarak, binanın enerji kullanımı nedeni ile sebep olduğu sera gazı emisyonu da ikinci bir opsiyon olarak incelenmekte ve bu oran ne kadar az olursa o miktarda puan durumuna etki etmektedir. Dolayısıyla v4.1 değerlendirmesi yapılırken binanın enerji verimliliğinin yanı sıra sera gazı emisyon faktörü de ortaya konmaktadır. İç mekânda su kullanımının azaltılması kredisinde, v4.1'de binada kullanılan ve su tüketen beyaz eşyalarda bazı sertifika türleri aranmaktadır fakat bu cihazlar su tüketimi analizine dahil edilmemektedir.

### 2.2.1. İç mekânda su kullanımının azaltılması kredisindeki güncellemeler

USGBC'nin, iç mekândaki su verimliliği analizlerini gerçekleştirilmesi için baz aldığı 5 temel parametre vardır. Bunlar;

- ◆ Bina kullanıcı ile ziyaretçi sayıları,
- ◆ Binanın işletildiği gün sayısı,
- ◆ LEED'in EPA Act (Enerji Politika Yasası) 1992 standartlarına belirlenen; armatürde/rezervuarda olması gereken maksimum su tüketim değerleri (baz değerler),
- ◆ Kullanıcı tür ve cinsiyetlerine göre farklılık gösteren armatür kullanım sıklıkları,
- ◆ Proje alanında kullanılan armatür ve rezervuarların su tüketim değerleridir.

Bina için seçilen vitriye armatürler/rezervuarların su tüketim değerleri ile yukarıdaki parametreler dikkate alınarak bir yılda binada kaç litre su tüketileceği hesaplanmaktadır. Projedeki seçilen armatürlerle oluşan toplam su tüketiminin, baz değerler (Tablo 1) kullanılarak hesaplanan su tüketim miktarına oranı, binadaki iç mekan su verimliliği oranını ortaya koymaktadır [17]. Bu sebeple, yukarıda belirtilen

parametrelerdeki herhangi bir değişim, toplam su verimliliği oranının değişmesine sebep olacaktır.

**Tablo 1.** LEED'in EAct (Enerji Politika Yasası) 1992 standartlarına uygun olarak hazırladığı, armatürde/rezervuarda olması gereken maksimum su tüketim değerleri (baz değerler)

Armatür Tipi	Baz değer (v3 ve v4.1)	Kullanım süresi (saniye)
Rezervuar	6 litre/basım	-
Pisuar	3,8 litre/basım	-
Ortak lavabo armatürü	v3'te fotoselli için baz değer 4,7 litre/dakika; diğerleri 1,9 litre/dakika (415 kPa basınçta)	30 (v3'te fotoselli armatürler 12 saniye olarak değerlendirilmektedir.)
Duş	9,5 litre/dakika (550 kPa basınçta)	300
Evye bataryası	8,3 litre/dakika (415 kPa basınçta)	15

V3 ve v4.1 hesaplama yöntemi arasındaki dikkat çekici farklılık fotoselli lavabo armatürü tercihinin verimlilik hesaplarındaki etkisinin kaldırılmış olması ve tüm lavabo armatürlerinin 30 saniyelik kullanım üzerinden değerlendirilmesidir. Dolayısıyla v4.1'de lavabo armatürlerinin fotoselli olup olmamasının bir etkisi bulunmamakta ve tüm ortak kullanım lavabo armatürleri 30 saniyelik kullanım üzerinden hesaplanmaktadır. V3'te ise normal lavabo armatürlerinin su tüketimi 30 saniye üzerinden, fotoselli armatürlerin su tüketimi ise 12 saniye üzerinden hesaplanmaktadır [12,17].

### 2.2.2. Enerji performansının optimizasyonu kredisindeki güncellemeler

Enerji performansının optimizasyonu kredisi üç opsiyondan oluşmaktadır. Fakat bu opsiyonlardan enerji verimlilik oranının artırılmasını ve CO<sub>2</sub> salımlarının azaltılmasını yönlendiren, ayrıca en fazla puan getirisi olan Bina Enerji Simülasyonu; USGBC tarafından binalarda tasarım sırasında yönlendirici olması ve daha enerji verimli binalar yapılması amacıyla önerilmektedir. Çalışma binasında da LEED v3 sertifikası alınırken bu opsiyon takip edilmiş ve ASHRAE Standard 90.1-2007 kullanılmıştır.

Enerji verimliliği hesaplarında LEED v3'te ASHRAE Standard 90.1-2007 kullanılırken, v4.1'de verimlilik hesaplarının ASHRAE Standard 90.1-2016'da tüm mekanik bileşenler için verilen baz değerlere göre

yapılması gerekmektedir [12,17]. Enerji verimliliği analizinde proje binası, ASHRAE standardının baz değerlerine göre oluşturulmuş, aynı koşullara sahip bir bina ile kıyaslanmakta ve bu baz binaya göre ne kadar enerji verimli olduğu ortaya konmaktadır. ASHRAE standardındaki her bir değişiklik, o standarda göre yapılan enerji verimliliği analizinin sonucunu direkt olarak etkilemektedir. Bu sebeple ASHRAE 90.1-2007 ve 2016'da verilen baz değerler analiz edilmiş ve Tablo 2'de her iki ASHRAE standardına ait baz değerler sunulmuştur.

Bu kredide v4.1 ile gelen değişikliklerden biri; yalnızca binanın enerji verimliliği değil, bu verimliliğin sağladığı sera gazı emisyon oranının da krediden alınacak puanı belirlemesidir. LEED v3'te enerji verimliliği oranı (EV) denklem (1) deki gibi hesaplanmaktadır.

$$EV = \frac{(BBET - \text{ÇBET})}{BBET} \times 100 \quad (1)$$

BBET baz binadaki enerji tüketim maliyeti, ÇBET ise çalışma binasındaki enerji tüketim maliyetidir.

Fakat v4.1'de enerji verimliliği sonucunu ortaya koymak için gerekli olan hesap yöntemi değiştirilmiştir. LEED v4.1'e göre enerji verimliliği hesabı için ASHRAE 90.1.2016 Ek G'deki performans derecelendirme yöntemi kullanılmaya başlanmıştır (Eşitlik 2-4).

$$EV = 1 - (PCI/PCIt) \quad (2)$$

$$PCI = \text{ÇBEF}/BBEF \quad (3)$$

$$PCIt = (BBUEC + BPF \times BBREC)/BBP \quad (4)$$

PCI Binadaki enerji tüketiminin maliyet endeksi, ÇBEF çalışma binasının enerji performansı, BBEF baz binanın enerji performansı, PCIt bina için hedeflenen enerji tüketim maliyet endeksi, BBUEC baz binadaki kontrolsüz enerji maliyeti (priz yükleri), BBREC baz binadaki kontrollü enerji maliyeti (diğer enerji tüketim kolları), BPF binanın performans faktörüdür. BPF, ASHARE 90.1 2016'da belirtilen binanın iklim zonu ve bina türüne göre belirlenmektedir ve çalışma binası için 0,6'dır. BBP ise baz binadaki enerji tüketim performansdır.

LEED v4.1'de sera gazı salım oranı hesaplanırken de Eşitlik 2, 3 ve 4'teki formüller kullanılmıştır. Yalnızca verimlilikte kullanılan maliyet kalemleri CO<sub>2</sub> emisyon eşleniğiyle değiştirilmiştir.

### 2.3. Su ve Enerji Verimliliği Analizi İçin Girdilerin Belirlenmesi

Su verimliliği analizi için öncelikle binadaki günlük kullanıcı sayısı ve binanın kaç gün kullanıldığı bilgisi firma tarafından edinilmiştir. Yılda 260 gün çalışılan firmada günlük ortalama 37 çalışan ve 6 ziyaretçi

bulunmaktadır. İç mekânda kullanılan vitriyfe armatürler ile rezervuarların su tüketim bilgileri, hangi kullanıcıların hangi armatür ve rezervuarı kullandığı bilgisi, kullanıcı sayıları ve kullanım günüyle birlikte analiz girdilerini oluşturmaktadır.

Çalışma kapsamında enerji modellemesi yapılırken ise ASHRAE 90.1 Ek G'de yer alan simülasyon gereklilikleri ile binanın tasarımına ait veriler dikkate alınmıştır ve simülasyon için Carrier HAP yazılımı kullanılmıştır. Carrier HAP'ta bina modellenirken girdi olarak her bir mahal için alan bilgisi, havalandırma debileri, kullanıcı sayıları ve bina kullanımına ait zaman çizelgesi oluşturulmaktadır. Bina tasarımına bağlı olarak pencere, duvar alanları ile bunların ısı yalıtım katsayıları belirlenmiştir. Binadaki HVAC sistemleri tasarıma uygun olarak simülasyon programında oluşturulmuş, seçilen aydınlatma armatürlerinin aydınlatma güç yoğunlukları (LPD) mahal bazında hesaplanmıştır. Binadaki proses yükleri de ayrı bir girdi kalemini oluşturmaktadır. Enerji

verimliliği oranı tüketilen elektriğin maliyet olarak baz bina ile karşılaştırılmasıyla ortaya konduğu için elektriğin birim fiyatı 0,15 \$/kWh olarak alınmıştır. Carrier HAP programında maliyet dolar bazında hesaplandığı için elektriğin birim fiyatı çalışmanın yapıldığı tarihteki güncel kur baz alınarak dolara çevrilmiştir [18].

Carrier HAP programında, proje binasının girdileri simülasyon için belirtildikten sonra bu girdiler ASHRAE 90.1 baz değerleriyle değiştirilmiştir. Binanın yönelişinin de enerji tüketimine etkisi olduğu için, ASHRAE değerleriyle oluşturulan baz bina 90°, 180° ve 270° döndürülerek baz binadaki ortalama enerji tüketimi hesaplanmıştır. Bu ortalaması alınmış baz bina ile tasarım binasının elektrik tüketim değeri arasındaki oran, enerji verimlilik oranını vermektedir. V3'de ASHRAE 90.1-2007, v4.1'de ASHRAE 90.1-2016 kullanıldığı için, baz değerlerde farklılıklar bulunmaktadır. Tasarım binasının girdileri ile her iki versiyona ait baz değerler Tablo 2'de belirtilmiştir.

**Tablo2.** Carrier HAP programı için enerji modellemesi girdileri

Enerji Modellemesi Girdileri	Proje Binası Değerleri	v3 Baz Bina Değerleri	v4.1 Baz Bina Değerleri			
Bina Cephesi	Çatı	R=3,20; 20 cm beton çatı (U:0,313)	R= 3,5 (U:0,273)	R= 4,4 (U:0,220)		
	Duvar	Tuğla+EPS (U:0.195) beton (U:0.318) Tuğla (U. 0,229)	U:0,365	U: 0,435		
	Döşeme	U:0,610	U:0,496	U:0,420		
	Pencere	90*120 (U:0,880, SHGC:0,150) 200*100 (U:0,880; SGHC: 0,150) 200*140 (U:0,880; SGHC: 0,150) 200*80 (U:0,880; SGHC: 0,150)	Tümü için; U:2,270, SHGC:0,40	Tümü için; U:1,870; SGHC: 0,250		
		290*280 (U:0,880; SGHC: 0,150) 330*230 (U:1,700; SGHC: 0,300) 350*280 (U:1,700; SGHC: 0,300) 45*120 (U:0,880; SGHC: 0,150) 600*200 (U:0,880; SGHC: 0,150)				
Kapı		U: 2,000; SGHC:0,400			U: 2,270; SGHC:0,400	U: 1,870; SGHC:0,250
Istima Soğutma Havalandırma		HVAC ekipman			VRF EER:3,380 COP:3,680	Sistem 4: PSZ-HP SEER:3,810
	Fan performansı	1,20 kW	0,74 W/(L/s)	0,74 W/(L/s)		
	Aydınlatma	1N01: 5,71 W/m <sup>2</sup> (ofis) 1N02: 5,86 W/m <sup>2</sup> (açık ofis) 1N03:12,08 W/ m <sup>2</sup> (hol) 1N04: 5,10 W/ m <sup>2</sup> (tuvalet) 2N01: 7,20 W/ m <sup>2</sup> (toplantı odası)	1N01: 12 W/ m <sup>2</sup> 1N02: 12 W/ m <sup>2</sup> 1N03:5 W/ m <sup>2</sup> 1N04: 10,20 W/ m <sup>2</sup> 2N01: 14 W/ m <sup>2</sup>	1N01: 10 W/ m <sup>2</sup> 1N02: 8,70 W/ m <sup>2</sup> 1N03:7,10 W/ m <sup>2</sup> 1N04: 9,1 W/ m <sup>2</sup> 2N01: 11,5 W/ m <sup>2</sup>		
İç Mekân Aydınlatma		BK01: 7,20 W/ m <sup>2</sup> (açık ofis) BK02:5,60 W/ m <sup>2</sup> (toplantı odası) BK03: 4,94 W/ m <sup>2</sup> (ofis) BK04: 5,10 W/ m <sup>2</sup> (tuvalet) BK05: 6,30 W/ m <sup>2</sup> (yemekhane) BK06: 8,00 W/ m <sup>2</sup> (mescit) BK07: 3,40 W/ m <sup>2</sup> (koridor)	BK01: 12 W/ m <sup>2</sup> BK02:14 W/ m <sup>2</sup> BK03: 12 W/ m <sup>2</sup> BK04: 10,20 W/ m <sup>2</sup> BK05: 10 W/ m <sup>2</sup> BK06: 10 W/ m <sup>2</sup> BK07: 5 W/ m <sup>2</sup>	BK01: 8,70 W/ m <sup>2</sup> BK02:11,50 W/ m <sup>2</sup> BK03: 10 W/ m <sup>2</sup> BK04: 9,1 W/ m <sup>2</sup> BK05: 11,40 W/ m <sup>2</sup> BK06: 16,50 W/ m <sup>2</sup> BK07: 7,10 W/ m <sup>2</sup>		

	ZK01:7,65 W/ m <sup>2</sup> (açık ofis)	ZK01:12 W/ m <sup>2</sup>	ZK01:8,70 W/ m <sup>2</sup>
	ZK02: 5,80 W/ m <sup>2</sup> (ofis)	ZK02:12 W/ m <sup>2</sup>	ZK02:10 W/ m <sup>2</sup>
	ZK03: 12,00 W/ m <sup>2</sup> (giriş bekleme)	ZK03: 5 W/ m <sup>2</sup>	ZK03:7,10 W/ m <sup>2</sup>
	ZK04: 5,10 W/ m <sup>2</sup> (tuvalet)	ZK04: 10,20 W/ m <sup>2</sup>	ZK04: 9,1 W/ m <sup>2</sup>
	ZK05: 3,40 W/ m <sup>2</sup> (koridor)	ZK05: 6,80 W/ m <sup>2</sup>	ZK05: 7,10 W/ m <sup>2</sup>
Dış Aydınlatma	0,5 kW	0,7 kW	0,7 kW
Priz Yükleri	9,6 kW	9,6 kW	9,6 kW
DHW (Kullanım Sıcak Suyu)	4 kW	6 kW	6 kW

### PV Panel: 9610,4 kW yıllık enerji üretimi

U: Isı İletim Katsayısı (W/m<sup>2</sup>·K), R: Isıl Direnç (m<sup>2</sup> K/W), SHGC: Güneş Enerjisi Toplam Geçirgenlik, EER: Enerji Verimlilik Oranı, COP: Performans Katsayısı, PSZ-HP: Isı Pompalı Paket Tip Rooftop

Bina cephesi kapsamında pencere, duvar, zemin, çatı ve kapı özellikleri dikkate alınmıştır. Çalışma binasında %39 cam-duvar oranı vardır. Bina cephesine ait bileşenlerin baz değerleri için ASHRAE 90.1-2007 ve ASHRAE 90.1-2016'daki iklim zonuna göre "Bina Cephe Gerekliliklerinde" belirtilen veriler kullanılmıştır. HVAC ekipmanları kapsamında çalışma binasında VRF sistemi kullanılmışken, ASHRAE 90.1-2007 ve ASHRAE 90.1-2016'da bu bina için Sistem 4; yani ısı pompalı paket tip rooftop önerilmektedir. ASHRAE'de baz bina için sistem belirlenirken v4.1'de mevcut binanın m<sup>2</sup>'si, kat yüksekliği, iklim zonu dikkate alınmakta; v3'te ise iklim zonu yerine çalışma binası enerji tüketim türü dikkate alınmaktadır. Havalandırma ekipmanı kapsamında proje binasında HRV sistemi bulunmaktadır. ASHRAE 90.1-2007'ye göre yapılan v3 enerji modellemesinde havalandırma oranları model girdisi değilken v4.1'te girdi olarak yer almıştır.

Projede bulunan aydınlatma armatürlerine ait Aydınlatma Gücü Yoğunluk (LPD) değerleri çalışma binasına ait aydınlatma planlarından alınmıştır. Baz değerler için ise ASHRAE 90.1 Tablo 9.6.1'de yer alan, her mahal için ayrı ayrı belirlenmiş olan LPD değerleri kullanılmıştır. İç mekândaki armatürlerin hafta içi ortalama olarak kış aylarında 6 saat, yaz aylarında 4 saat kullanıldığı dikkate alınmış, dış mekân armatürlerinin ise haftanın her günü 12 saat çalışması modelleme girdilerini oluşturmuştur.

Priz yükleri olarak mutfak ekipmanları, pompalar, ofis bilgisayarları çalışma binası ve baz binalarda aynı miktarda, toplam 9,6 kW değerinde alınmıştır. Kullanım sıcak suyu için modellemede girdiler belirlenirken dört ay boyunca kullanım suyu ısıtması

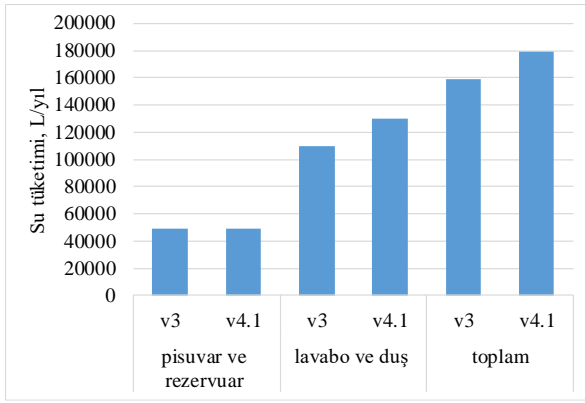
için enerji tüketiminin olmayacağı hesaba katılmıştır. Bunun sebebi projede kullanılan hava kaynaklı ısı pompası, soğutmada atık ısı ürettiğinden; bu atık ısı, kullanım suyu ısıtması için kullanılmaktadır. Bu bina için soğutma mevsimi dört ay olduğundan bu dört ay kullanım suyu ısıtmasında enerji tüketimi olmayacaktır.

Tüm bunlara ek olarak proje binasında enerji verimliliğine etki edecek miktarda PV panel ile yıllık 9610,4 kW enerji üretimi mevcuttur.

## III. BULGULAR VE TARTIŞMA

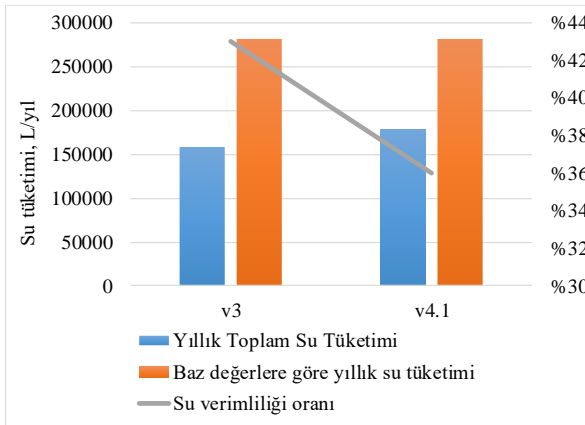
### 3.1. İç Mekândaki Su Kullanımının Azaltılması

İç mekândaki su verimliliği hesaplanırken, kullanıcı gruplarının türü dolayısıyla belirlenen kullanım sıklıkları, süreleri, kullandıkları armatürlerin debileri dikkate alınmıştır. Yapılan su verimliliği analizlerine göre fotoselli lavabo armatür kullanım süresi LEED v3'te 12 saniye olarak alınırken, LEED v4.1'de fotoselli armatürler de dahil tüm ortak lavabo armatürlerinin 30 saniyelik kullanım süresi üzerinden değerlendirilmesi, fotoselli armatür tercihlerinin su verimliliği açısından önemini kaybetmesine neden olmuştur. Şekil 2'de yıllık olarak sifon ve armatürlerdeki toplam su tüketimleri v3 ile v4.1 hesap yöntemine göre ayrı ayrı belirlenmiştir. Pisuar ve rezervuar için kullanılan su miktarı aynı kalırken, lavabo ve duşlardaki su tüketim miktarının v4.1'de v3'e göre daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun sebebi güncel LEED versiyonunda fotoselli armatürler ile ilgili hesaplama yönteminin değişmesidir. Bu durum, dolayısıyla toplam su verimliliği oranında değişikliğe yol açmaktadır.



Şekil 2. Sifon ve armatürlerdeki yıllık su tüketimi

Şekil 3'te belirtildiği üzere, LEED v3 BD+C'ye göre binada yıllık olarak 158866,5 litrelik su tüketilmektedir. Aynı binanın Tablo 1'de verilen baz değerlere göre hesaplanan su tüketimi miktarı ise 281232,9 litre/yıldır. Dolayısıyla çalışmadaki örnek binada, LEED v3 BD+C baz değerlerine göre %43 oranında su verimliliği sağlanmaktadır. V4.1 kapsamında incelenen ofis binasındaki su tüketimi 179318,1 litre/yıl iken v4.1 baz değerlerine göre yıllık toplam su tüketimi 281326,5 litre olarak hesaplanmıştır. V4.1'e göre %36 su verimliliği sağlandığı belirlenmiştir.



Şekil 3. LEED v3 ile v4.1'deki toplam su tüketim miktarları ve su verimliliği oranları

LEED v3 ile v4.1 arasında, sağlanan su verimlilik oranlarına göre alınabilecek puanlarda da değişiklik olmuştur. V3'te %30, %35, %40 su verimliliği sağlanırken sırasıyla 2, 3 ve 4 puan alınabilmektedir. V4.1'de ise %25, %30, %35, %40, %45, %50 su verimliliği sağlanırken sırasıyla 1, 2, 3, 4, 5, 6 puan alınabilmektedir [12,17]. Örnek bina için v3'e göre yapılan hesaplamada, %43 su verimliliği ile birlikte ilgili krediden 4 puan alınabildiği görülürken aynı bina, v4.1'deki gereklilikler kapsamında analiz edildiğinde binada %36 su verimliliği sağlandığı ve bunun 3 puana tekabül ettiği görülmektedir.

LEED, puanlama üzerinden sertifika seviyesinin belirlendiği bir sertifikasyon sistemi olduğu için

kredilerden alınacak puanlar önem arz etmektedir. Güncellenen versiyonda iç mekândaki su kullanımının azaltılmasıyla ilgili krediden v3'e göre aynı puanı alabilmek için mevcutta kullanılan rezervuar ve vitrikiye armatürlerinden %10,5 oranında daha az su tüketimi olanların tercih edilmesi gerekmektedir.

Suyun kullanılabilir hale getirilmesi, dağıtımı, atık suyun arıtılması gibi konular sera gazı emisyon salımına neden olduğundan, su kullanımının azaltılması sera gazı emisyonu açısından da fayda getirmektedir [19]. Ecoinvent'in 2018 verilerine göre 1 litre suyun arıtılmasından başlanarak bertarafına kadar olan yaşam döngüsü içerisinde sebep olduğu CO<sub>2</sub> emisyonu 0,367 gramdır [20]. Bu veriden hareketle yapılan hesaplamalara göre, LEED v3 kapsamında binadaki su tüketim miktarının sebep olduğu CO<sub>2</sub> emisyonu yıllık 58,3 kg'dır. Aynı binanın LEED v4.1'de v3 ile aynı verimlilik oranına sahip olabilmesi için tüketmesi gereken su miktarının sebep olacağı CO<sub>2</sub> emisyonu ise yıllık 52,1 kg'dır.

Su kullanımının önemini git gide daha da anlaşıldığı bu dönemlerde, bazı ülkeler kişi başına günlük olarak tüketilmesi beklenen su miktarıyla ilgili hedefler oluşturmuşlardır. Avrupa ülkelerinden İngiltere, 2030'a kadar kişi başına günlük 120 L su tüketimini gerçekleştirebilmeyi hedeflemiştir [21]. Çalışma binamızda LEED v4.1'e göre günlük kişi başına tüketilen su miktarı 17,7 L olarak hesaplanmıştır. Bir kişinin günün 10 saatini bu ofiste geçirdiği düşünülürse, geriye kalan vakitte geçirdiği mekânlarda, verimli armatür tercihleriyle birlikte 120 L'nin daha da altında su tüketimi sağlanması mümkün olabilir.

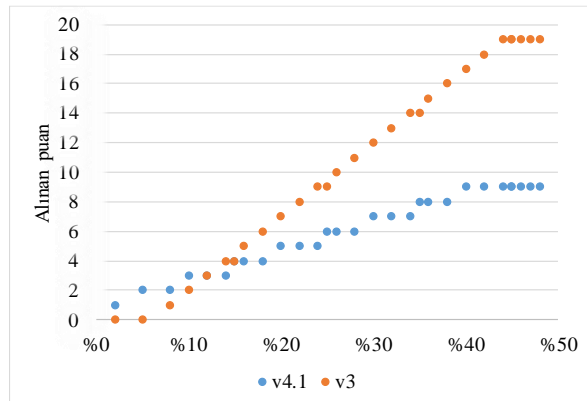
Su, binaların operasyonu sırasında en çok kullanılan doğal kaynaklardan olduğu ve CO<sub>2</sub> salımına sebep olduğu için LEED'in v4.1'de yaptığı değişiklik ile projelerde su kullanımının azaltılması teşvik edilmektedir [22]. Bu nedenle projeler ya daha düşük debili armatürler ve rezervuar tercihinde bulunmaya, ya da alternatif su kaynaklarından yağmur suyu, gri su gibi kullanımlara yönlendirilmektedir. Su kaynaklarının yalnızca %3'ünün tatlı su olduğu ve bunun da üçte ikisinin buzullarda olduğu düşünülürse, suyun korunması ve geri dönüşümünün sağlanmasının ne denli önemli olduğu anlaşılmaktadır [21].

### 3.2. Enerji Performansının Optimizasyonu

LEED'in farklı versiyonları olan v3 ile v4.1'in enerji verimliliği kapsamındaki değişiklikleri, örnek bina üzerinde analiz edilmiştir. Bu çalışma kapsamında versiyon özelinde kullanılan ASHRAE standardı ve bu standardın enerji tüketim kalemleri üzerinde, baz bina için ne gibi farklılıklar oluşturduğu tespit edilmiştir. Aynı zamanda bu farklılıkların baz binadaki toplam enerji tüketimi ve binanın toplam enerji verimliliğini nasıl değiştirdiği analiz edilerek, sertifika aday binaların enerji verimliliği konusunda nasıl

yönlendirildiği ve bu durumun karbondioksit emisyonlarında ne gibi etkileri olduğu ortaya konulmuştur.

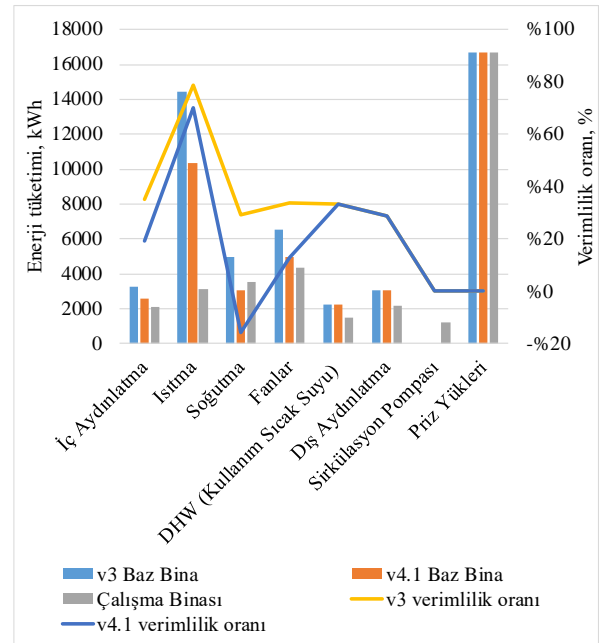
Şekil 4'te görüldüğü üzere; LEED v4.1'de minimum %2, v3'te ise %8 enerji verimliliği sağlanması halinde söz konusu krediden puan alınmaya başlanmaktadır. V4.1'de v3'e göre daha düşük verimlilik oranı ile puan alınmaya başlanabilmektedir ancak, verimlilik hesaplarında ASHRAE 90.1-2016 kullanıldığında v3'e göre daha düşük verimlilik oranları elde edilmektedir. V3'te her %2 verimlilik artışıyla birlikte lineer bir şekilde puan artışı sağlanırken, v4.1'de her %5 verimlilik artışıyla birlikte alınabilecek puan da artmaktadır. V4.1'de enerji modellemesinden alınabilecek maksimum puan 9 puana düşürülerek, toplam 18 puandan geri kalan 9 puanın sera gazı emisyon değeri sonucuna göre hesaplanması enerji modellemesinin öneminin azaldığı anlamına gelmemektedir. Bir binadaki emisyon salımına o binadaki cihaz seçimlerinin büyük bir oranda etkisi bulunmaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı, binalarda verimli sistemler kullanılmasıyla birlikte 30 yıl içerisinde binaların mevcutta sebep olduğu karbon emisyonlarının %83 oranında azalabileceğini belirtmektedir [23]. Çalışmamızda elde ettiğimiz bulgular ile, v4.1'de dikkate alınan ASHRAE 90.1-2016, 2007'ye göre baz binalarda çok daha az enerji tüketimi öngörmekte, bu sebeple aynı binanın, v4.1'de v3'e oranla daha düşük enerji verimlilik oranına sahip olduğu ortaya çıkmaktadır.



Şekil 4. Enerji modellemesi sonucunun LEED v3 ile v4.1 puanına etkisi

Mekanik bileşenlerin modellenmesi sonucunda her bir bileşen için LEED v3 ile v4.1'deki verimlilik oranları ve enerji tüketim verileri Şekil 5'te gösterilmektedir. İç aydınlatma, ısıtma, soğutma ve fanlar gibi iki versiyon arasında baz bina verilerinin değişkenlik gösterdiği ekipmanlarda, v4.1'deki verimlilik oranlarının v3'e kıyasla daha düşük olduğu belirlenmiştir. En büyük farkın ise yaklaşık %40'lık bir oranla soğutma

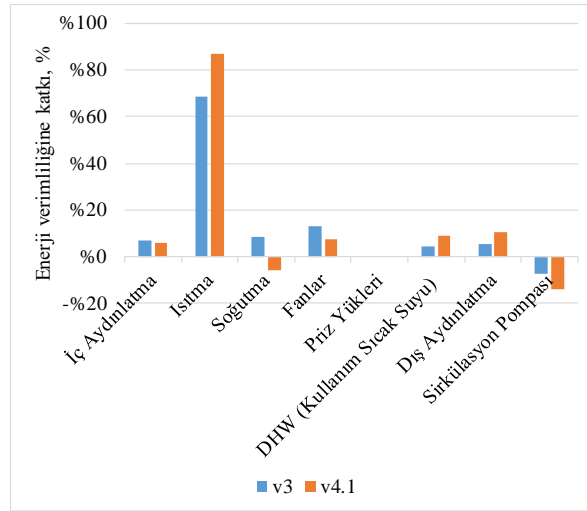
sisteminden kaynaklandığı görülmektedir. McKibbin ve Wilcoxon'e göre gün geçtikçe ısıtma sistemlerine olan talep azalacak, soğutma sistemleri üzerinde daha fazla talep oluşacaktır [24]. ASHRAE 90.1-2016'da da bu yaklaşımın etkisi olduğu görülmekte ve soğutma sistemleri üzerinde ısıtmaya göre daha katı gereklilikler oluşturularak projeler daha verimli soğutma sistemleri tercih etmeye yönlendirilmektedir. Kullanım sıcak suyu ve dış aydınlatma için v3 ile v4.1'deki baz değerler aynı kaldığından, bu iki bileşende versiyon değişimi bir farklılığa sebep olmamıştır. Priz yükleri için ise, proje binasındaki tüketim değeri baz binada da aynı seviyede (9,6 kW) girildiği için her iki versiyonda da proje binasındaki priz yüklerinin baz binaya oranında değişiklik oluşmamıştır.



Şekil 5. LEED v3 ile v4.1'deki mekanik bileşenlerin verimlilik yüzdeleri ile enerji modellemesi tüketim sonuçları

Mekanik bileşenlerin toplam enerji verimliliği içerisindeki oranları dikkate alındığında LEED v3 ile v4.1'de ortak olarak ısıtma sistemlerinin tüm bileşenler arasında sırasıyla %68 ve %87 verimlilikle en yüksek paya sahip oldukları görülmektedir (Şekil 6). Bunun sebebi çalışma binasındaki ısıtma sistemleri için ASHRAE'nin önerdiği cihaz özelliklerine göre daha verimli sistemlerin tercih edilmiş olmasıdır. Soğutma sisteminin LEED v4.1'de, sirkülasyon pompalarının ise her iki versiyonda toplam verimliliğe negatif etki yaptığı görülürken priz yüklerinin bir etkisi olmadığı, diğer bileşenlerin %5 ile %13 arasında değişen etkiye sahip oldukları görülmektedir.





**Şekil 6.** LEED v3 ve v4.1'de mekanik bileşenlerin toplam verimliliğe katkıları

v3 ve v4.1 için Carrier HAP modelleme programı ile elde edilen toplam enerji tüketimi, enerji maliyetleri ve verimlilik oranları Tablo 3'te verilmektedir. Çalışma binasında 9610,4 kW'lık enerji üretimi PV panel kullanımıyla sağlanmaktadır. Carrier HAP programında PV panelden sağlanan enerji üretimi bir girdi olarak işlenemediği için, nihai enerji verimliliği sonucunu ortaya koyabilmek amacıyla Tablo 3'te belirtilen değerlere PV panelden üretilen enerji miktarı daha sonra işlenmiştir.

**Tablo 3.** PV panel enerjisi katılmadan v3 ile v4.1 enerji modellemesi toplam sonuçları

	Baz Bina (BB)		Çalışma Binası (ÇB)		Verimlilik Oranı (v3 verimlilik yöntemi kullanılarak)
	Enerji Kullanımı (kWh)	Maliyet (\$)	Enerji Kullanımı (kWh)	Maliyet (\$)	
<b>v3</b>	51.114,30	7.667	34.557,30	5.184	%32,40
<b>v4.1</b>	42.920,40	6.438	34.557,30	5.184	%19,50

ASHRAE 90.1 standardı, binadaki enerji tüketen cihazların tasarımını yönlendiren ve enerji tüketimlerini değerlendiren standart olduğundan, binadaki enerji verimliliği miktarına direkt olarak etki etmektedir. Bu sebeple ASHRAE 90.1-2016'da belirlenen tüketim değerleri dikkate alınarak yapılan tasarımlar, önceki versiyonlara göre tasarlanmış binalardan daha az enerji tüketen binalar olmaktadır. Güncel versiyonda talep edilen enerji tüketimi eski versiyonlara göre daha düşük olduğu için, aynı bina ASHRAE 90.1-2007 ve 2016 değerleri ile kıyaslandığında enerji verimlilik oranı 2016'da düşmektedir.

Çalışma binasında yıllık olarak 34.557,30 kW'lık enerji tüketimi mevcuttur. Tüketilen bu enerjinin 9.610,4 kW'lık kısmı PV paneldeki enerjiyle sağlandığı için bina şebekeden 24.946,9 kW enerji tüketmektedir. Enerji verimliliği Eşitlik 1'deki gibi hesaplandığında, binadaki toplam enerji verimliliği v3'teki baz binaya göre %51; v4.1'deki baz binaya göre ise %41,8 olarak hesaplanmaktadır. Yani versiyonların temel aldığı ASHRAE 90.1 standardındaki iç aydınlatma, ısıtma, soğutma ve fanlarda beklenen enerji verimlilik değerleri v4.1'de daha yükseldiği için, aynı verimlilik hesap yöntemi kullanıldığında v4.1'e göre enerji verimlilik oranının düştüğü gözlemlenmektedir. Ayrıca ısıtma ve soğutma sistemleri, binadaki doğrudan emisyon kaynaklarının başında geldiği için v4.1'deki bu değişiklikler CO<sub>2</sub> emisyon salımını olumlu yönde etkilemektedir [25].

Fakat LEED v4.1'de enerji performansının optimizasyonu kredisindeki verimlilik hesap yöntemi de ASHRAE 90.1'e göre güncellenmiştir. V4.1'deki nihai sonucu elde etmek amacıyla Eşitlik 2 kullanılmıştır. Buna göre hem binadaki enerji verimliliği hem de bu eşitlikteki maliyet kalemlerinin yerine sera gazı emisyon faktörü koyularak hesaplanan sera gazı emisyon salım oranı %23'tür.

Çalışma binasının LEED v3 ile v4.1 baz binalarına göre %50 daha az elektrik tüketmeleri için v3'e göre 25.557,15 kWh, v4.1'e göre 21.460,2 kWh elektrik tüketimi olmalıdır. İklim Şeffaflığı (Climate Transparency) küresel birliğinin Kahverengiden Yeşile 2019 (Brown to Green 2019) raporunda, Türkiye'deki her bir kWh elektrik üretimi için 481 gCO<sub>2</sub> salımı olduğu ortaya konulmuştur [26]. Bu veriden hareketle, aynı verimlilik oranı için v3'te yıllık olarak 1,2E+04 kg CO<sub>2</sub> salımı olurken v4.1'de 1E+04 kg CO<sub>2</sub> salımı olacağı tespit edilmiştir.

Bu verimlilik oranlarına göre aynı bina LEED BD+C v3 kapsamında değerlendirildiğinde, krediden alınabilecek en yüksek puanı (19 puan) alabilmektedir. v4.1 kapsamında ise enerji modellemesi sonucuna göre enerji verimliliğinden 5 puan, sera gazı emisyon salımından 4 puan olarak toplam 9 puan elde edebilmektedir. Burada v4.1'de hem takip edilen standardın katıldığı, hem de projelerde daha da yüksek verimlilik oranlarına erişilmesi için puanlama sisteminin değiştiği görülmektedir.

**IV. SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER**  
LEED BD+C:NC kapsamında versiyon 3 ile versiyon 4.1 arasındaki farklar incelendiğinde öncelikle temel olarak yapılan güncellemelerin kullanıcıları daha az su ve enerji tüketmeye yönlendirme amaçlı olduğu tespit edilmiştir. LEED yeşil bina sertifika sisteminde sertifikayı alabilmek ve sertifika seviyesini yükseltebilmek için kredilerden alınan puanlar oldukça önemlidir. Bu sebeple LEED, yaptığı güncellemeleri

hem kriterler hem de alınabilecek puanlar üzerinden gerçekleştirilmiştir. Puan sistemi üzerindeki değişikliğin amacı, proje sahiplerini daha yüksek puan alabilmeleri için daha az su ve enerji tüketmeye, bu tüketimden kaynaklı CO<sub>2</sub> emisyonlarını azaltmaya yönlendirmektir.

V4.1'de enerji performansının optimizasyonu kredisinden alınabilen maksimum 18 puanın, ikiye bölünerek enerji verimliliği ve sera gazı emisyon salımı olarak analiz edilmeye başlanması, son yıllarda dünyadaki sera gazı salımlarının artışı dolayısıyla inşaat sektöründe bu konuya dikkat çekilmesi ve sektörün yönlendirilmesi açısından önemlidir. Aynı konu su verimliliği için de geçerlidir. Su kullanımının azaltılması, doğal kaynağın tüketilmesinin yanında sera gazı salımlarında da etkili olduğu için LEED, inşaat projelerini daha az su tüketimi için yönlendirmektedir. Bu çalışmayla birlikte, elektrik tüketiminden kaynaklanan CO<sub>2</sub> emisyon salımlarının önemi kadar, sonlu bir kaynak olan suyun bina kullanımı için temini ve atık suyun arıtılmasından kaynaklı atmosfere salınan CO<sub>2</sub> miktarının da yeşil bina sertifikaları üzerindeki önemi anlaşılmıştır. Çalışma binasının LEED v3 ile v4.1 baz binalarına göre %50 enerji verimlilik oranına sahip olabilmesi için v4.1'de binanın v3'e göre yıllık olarak 2000 kg daha az CO<sub>2</sub> salımının olması gerekmektedir. Aynı binanın LEED v4.1 su verimliliği kriterlerince v3'e göre karbon salımının %13 oranında daha yüksek hesaplanacağı öngörülerek su tüketiminin sınırlandırılması gerekmektedir.

Bu çalışmayla aynı zamanda, yenilenebilir enerji kaynak kullanımının binalardaki enerji verimliliğine ne denli katkı sağladığı ortaya konmuştur. Çalışma binasında yenilenebilir enerji kaynağı kullanılmadan önce v3'e göre %30,40, v4.1'e göre %19,50 enerji verimliliği sağlanırken, PV panel kullanımıyla birlikte bu oranlar sırasıyla %51 ve %41,8'e yükselmiştir.

## TEŞEKKÜR

Data temini ve enerji modellemesindeki desteklerinden ötürü ERKE Sürdürülebilir Bina Tasarım ve Danışmanlık ekibine teşekkürler.

## KAYNAKLAR

- [1] Kılıç, C. (2009). Küresel İklim Değişikliği Çerçevesinde Sürdürülebilir Kalkınma Çabaları ve Türkiye. *C.Ü. İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 10(2), 19-41.
- [2] Houghton, J. (2009). *Global Warming: The Complete Briefing*. Cambridge University Press.
- [3] Karakaya, E., & Özcağ, A. G. M. (2001). Sürdürülebilir Kalkınma ve İklim Değişikliği: Uygulanabilecek İktisadi Araçların Analizi. In First Conference in Fiscal Policy and Transition Economies, University of Manas.
- [4] Saka, İ. (2011). Sürdürülebilirlik Açısından İstanbul'da bir Ofis Binasının Leed Sertifikalandırma

Sistemi Kapsamında Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Türkiye.

- [5] Rastogi, A., Choi, J. K., Hong, T., & Lee, M. (2017). Impact of Different LEED Versions for Green Building Certification and Energy Efficiency Rating System: A Multifamily Midrise Case Study. *Applied energy*, 205, 732-740.
- [6] USGBC, <https://www.usgbc.org/projects>, (Nisan 2020).
- [7] Awadh, O. (2017). Sustainability And Green Building Rating Systems: LEED, BREEAM, GSAS and Estidama Critical Analysis. *Journal of Building Engineering*, 11, 25-29.
- [8] Anbarci, M., Giran, O., & Demir, I. H. (2012). Uluslararası Yeşil Bina Sertifika Sistemleri İle Türkiye'deki Bina Enerji Verimliliği Uygulaması. *E-Journal of New World Sciences Academy NWSA Engineering Sciences*, 7(1), 158-176.
- [9] Suzer, O. (2019). Analyzing The Compliance And Correlation of LEED and BREEAM By Conducting a Criteria-Based Comparative Analysis and Evaluating Dual-Certified Projects. *Building and Environment*, 147, 158-170.
- [10] Sachdeva, S. (2016). An Introduction to LEED. Heapy Engineering presentation.
- [11] USGBC, <https://new.usgbc.org/leed-v41#bdc> (Eylül 2019).
- [12] USGBC. (2019). LEED BD+C 4.1 Guide. 1. Baskı
- [13] Schwartz, Y., & Raslan, R. (2013). Variations in Results of Building Energy Simulation Tools, and Their Impact on BREEAM and LEED ratings: A case study. *Energy and Buildings*, 62, 350-359.
- [14] Varma, C. S., & Palaniappan, S. (2019). Comparison of Green Building Rating Schemes Used in North America, Europe and Asia. *Habitat International*, 89, 101989.
- [15] Liu, Z., Zhang, C., Guo, Y., Osmani, M., & Demian, P. (2019). A Building Information Modelling (BIM) based Water Efficiency (BWe) Framework for Sustainable Building Design and Construction Management. *Electronics*, 8(6), 599.
- [16] ASHRAE, A. S. (2007). Standard 90.1-2007: Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings. American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, Georgia, USA.
- [17] USGBC. (2009). LEED V3 Reference Guide for Building Design and Construction. 1. baskı, s.165-177
- [18] Elektrik Birim Fiyatı, <https://gazelektrik.com/enerji-piyasaları/elektrik-fiyatları> (Mart 2020).
- [19] Greer, F., Chittick, J., Jackson, E., Mack, J., Shortlidge, M., & Grubert, E. (2019). Energy And Water Efficiency in LEED: How Well are LEED Points Linked to Climate Outcomes?. *Energy and Buildings*, 195, 161-167.
- [20] Ecoinvent 3.4 (2018), Market for tap water, verified.
- [21] Zhang, Y., Wang, J., Hu, F., & Wang, Y. (2017). Comparison Of Evaluation Standards For Green

Building İn China, Britain, United States. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 262-271.

[22] Al-Qawasmi, J., Asif, M., El Fattah, A. A., & Babsail, M. O. (2019). Water Efficiency and Management in Sustainable Building Rating Systems: Examining Variation in Criteria Usage. *Sustainability*, 11(8), 2416.

[23] Becqué, R., Mackres, E., Layke, J., Aden, N., Managan, K., Nesler, C., & Graham, P. (2016). Accelerating Action Efficient Buildings: A Blueprint for Green Cities.

[24] Kılıç, C. (2009). Küresel İklim Değişikliği Çerçevesinde Sürdürülebilir Kalkınma Çabaları ve Türkiye. *C.Ü. İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 10, 19-41.

[25] Dean, B., Dulac, J., Petrichenko, K., & Graham, P. (2016). Towards zero-emission efficient and resilient buildings.: Global Status Report.

[26] Climate Transparency (2019). Brown to Green Report: The G20 Transition Towards A Net-Zero Emissions Economy.