

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ALANINDAKİ ARAŞTIRMALARDA GÜNCEL METODOLOJİK YAKLAŞIMLAR

EDİTÖR

Doç. Dr. Mert Kılınçel

Makine Mühendisliği Alanındaki Araştırmalarda Güncel Metodolojik Yaklaşımlar

Editör

Doç. Dr. Mert Kılınçel

İmtiyaz Sahibi
Platanus Publishing®

Editör
Doç. Dr. Mert Kılınçel

Kapak & Mizanpaj & Sosyal Medya
Platanus Yayın Grubu

Birinci Basım
Mart, 2026

Yayımcı Sertifika No
45813

ISBN
978-625-8513-52-3

©copyright
Bu kitabın yayım hakkı Platanus Publishing'e aittir. Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin alınmadan hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Adres: Natoyolu Cad. Fahri Korutürk Mah. 157/B, 06480, Mamak,
Ankara, Türkiye.

Telefon: +90 312 390 1 118
web: www.platanuspublishing.com
e-mail: platanuskita@gmail.com



Platanus Publishing®

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM 1.....	5
Metal Matrisli Kompozitlerde Fonksiyonel Yüzey Mühendisliği:	
Hidrofobik/Süperhidrofobik Yüzeylerin Tasarımı, Üretimi ve Uygulamaları	
Tunahan Pamukçu & Nilhan Ürkmez Taşkın	
BÖLÜM 2.....	29
Rockwell Sertlik Ölçümlerinde ASTM E18 Standardına Göre Belirsizlik	
Hesaplamasının İncelenmesi	
Bülent Aydemir	
BÖLÜM 3.....	52
Fonksiyonel Derecelendirilmiş Sandviç Kirişlerin Statik Analizi	
Caner Solar & Vedat Taşkın	
BÖLÜM 4.....	76
Sürdürülebilir Yeşil Bir Dünya için Doğal Afetlerde Makine Mühendisliği	
Yaklaşımıyla Araç Hasarlarında, İkame Araç Bedeli (Mahrumiyet Bedeli),	
Değer Kaybı ile Hasar Hesabı Yönünden Bir Araştırma	
Ahmet Çoşgun	



BÖLÜM 1

Metal Matrisli Kompozitlerde Fonksiyonel Yüzey Mühendisliği: Hidrofobik/Süperhidrofobik Yüzeylerin Tasarımı, Üretimi ve Uygulamaları

Tunahan Pamukçu¹ & Nilhan Ürkmez Taşkın²

1.GİRİŞ

Günümüzde mühendislik malzemelerinden beklenen performans kriterleri yalnızca mekanik dayanım ve hafiflik gibi geleneksel parametrelerle sınırlı kalmamakta; çevresel koşullara dayanıklılık, yüzey fonksiyonelliği ve uzun süreli kullanım performansı gibi çok boyutlu gereksinimleri de kapsamaktadır (Callister & Rethwisch, 2020). Bu bağlamda yüzey özelliklerinin malzeme davranışı üzerindeki belirleyici etkisi giderek daha fazla önem kazanmış; yüzey mühendisliği, ileri malzeme teknolojilerinin temel araştırma alanlarından biri hâline gelmiştir (Bhushan, 2013).

Sıvı itici yüzeyler; korozyonun azaltılması, kendi kendini temizleme davranışı, kirlenmenin ve buzlanmanın önlenmesi gibi işlevsel avantajlar sunarak birçok mühendislik uygulamasında ilgi odağı hâline gelmiştir (Nosonovsky & Bhushan, 2007; Quéré, 2008). Bu kapsamda süperhidrofobik yüzeyler, genellikle 150°'nin üzerinde sıvı temas açısına sahip olan ve yüzey-sıvı etkileşimini minimuma indirgeyen özel yüzey yapıları olarak tanımlanmaktadır (Ma & Hill, 2006).

Kompozit malzemeler; yüksek özgül dayanım, tasarım esnekliği ve çok fonksiyonlu yapı oluşturabilme potansiyelleri sayesinde otomotiv, havacılık ve enerji gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır (Chawla, 2012; Gibson, 2016). Bununla birlikte geleneksel kompozit yüzeyler; nem emilimi, çevresel bozulma ve yüzey kirlenmesi gibi etkenler nedeniyle zamanla performans kaybı yaşayabilmektedir (Mallick, 2007). Bu durum, kompozit malzemelerde yüzey özelliklerinin iyileştirilmesini ve fonksiyonel yüzeylerin geliştirilmesini gerekli kılmaktadır.

Metal matrisli kompozitler (MMK'lar), alüminyum (Al), magnezyum (Mg), titanyum (Ti) gibi metal matrislerin silisyum karbür (SiC), alüminyum oksit

¹ Arş. Gör., Trakya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Edirne, Türkiye, ORCID: 0009-0008-5660-2066

² Doç. Dr., Trakya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Edirne, Türkiye, ORCID: 0000-0003-2251-3889

(Al_2O_3), bor karbür (B_4C) veya karbon temelli takviyelerle güçlendirilmesiyle elde edilen; yüksek özgül dayanım, iyi termal iletkenlik ve aşınma direnci gibi özellikleri bir arada sunan mühendislik malzemeleridir (Chawla, 2012; Callister & Rethwisch, 2020). Buna karşın MMK yüzeyleri; matrisin doğal oksit tabakası, çok fazlı mikro yapı nedeniyle yerel galvanik çift oluşumu, pitting korozyon eğilimi ve servis koşullarında aşınma-korozyon etkileşimi gibi nedenlerle yüzey performansı açısından kritik sınırlamalar gösterebilir (Trowsdale vd., 1996). Bu nedenle MMK’larda fonksiyonel yüzey mühendisliği yaklaşımları; ıslanabilirliğin kontrolü, korozyon/aşınma dayanımının artırılması ve çevresel etkilerin azaltılması için stratejik bir çözüm alanı olarak öne çıkmaktadır (Zhang & Wang, 2016).

Son yıllarda yapılan çalışmalar, süperhidrofobik özelliklerin kompozit yüzeylere kazandırılmasında sol-jel kaplama, kimyasal yüzey modifikasyonu, lazer yüzey işleme ve hiyerarşik yapı oluşturma gibi yöntemlerin öne çıktığını göstermektedir (Bhushan & Jung, 2011; Latthe vd., 2014). Bununla birlikte söz konusu yöntemlerin mekanik dayanıklılığı, aşınma direnci ve uzun süreli çevresel kararlılığı hâlen önemli araştırma konuları arasında yer almaktadır (Verho vd., 2011; Wang vd., 2015).

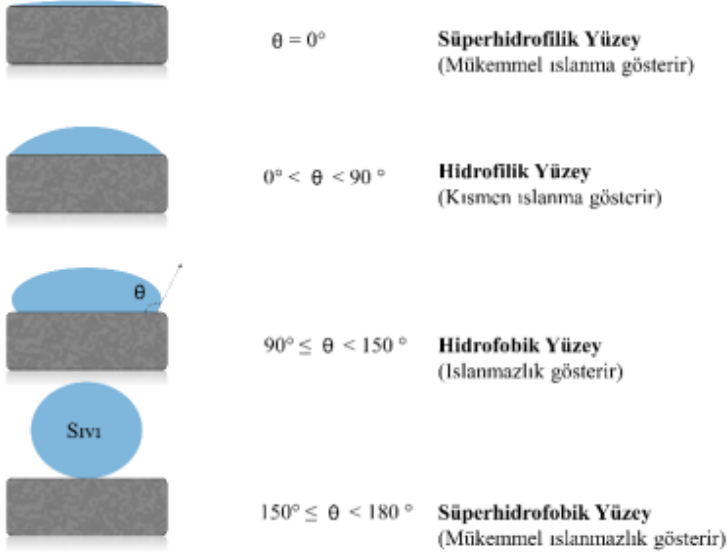
Bu kitap bölümünün amacı; süperhidrofobik kompozit yüzeylere ilişkin temel kavramları sistematik bir çerçevede sunmak, başlıca üretim yöntemlerini ve karakterizasyon tekniklerini mühendislik bakış açısıyla değerlendirmek ve bu yüzeylerin güncel ve potansiyel uygulama alanlarını ele almaktır.

2. SÜPERHİDROFOBİKLİK KAVRAMI VE TEMEL İLKELER

2.1. Islanabilirlik ve Temas Açısı Kavramı

Bir katı yüzeyin bir sıvı ile etkileşimi “ıslanabilirlik” kavramı ile ifade edilir ve bu davranışın nicel göstergesi temas açısıdır. Temas açısı, sıvı-katı-gaz fazlarının kesiştiği hatta oluşan geometrik açı olarak tanımlanır ve yüzeyin hidrofilik ya da hidrofobik karakterini belirlemede temel bir parametre olarak kabul edilir (Adamson & Gast, 1997; Young, 1805). Genel olarak temas açısı 90° ’nin altında olan yüzeyler hidrofilik, 90° ’nin üzerinde olan yüzeyler ise hidrofobik olarak sınıflandırılmaktadır. Süperhidrofobik yüzeyler ise temas açısının 150° ’nin üzerinde olduğu ve temas açısı histerezisinin oldukça düşük olduğu özel yüzeylerdir. Bu tür yüzeylerde su damlacıkları yüzey üzerinde küresel forma yakın bir şekil almakta ve çok düşük eğimlerde dahi kolaylıkla hareket edebilmektedir (Ma & Hill, 2006; Quéré, 2008). Bu davranışın temelinde, yüzey ile sıvı arasındaki gerçek temas alanının oldukça sınırlı olması yer almaktadır. Bununla birlikte temas açısı, yüzey enerjisi ve yüzey topografyası ile birlikte değerlendirilmelidir; bu nedenle izleyen kısımda yüzey enerjisi-ıslanabilirlik ilişkisi, ardından temel ıslanma modelleri ele alınacaktır. Temas

açılarına göre yüzeylerin sınıflandırılması Şekil 1’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1. Temas açılarının yüzey isimlendirilmeleri.

Not: Evcin vd.’den (2018) uyarlanmıştır.

2.2. Yüzey Enerjisi ve Islanabilirlik İlişkisi

Bir yüzeyin ıslanabilirlik davranışı, yalnızca geometrik pürüzlülükle değil, aynı zamanda yüzey enerjisi ile de doğrudan ilişkilidir. Düşük yüzey enerjisine sahip malzemeler, sıvı molekülleri ile zayıf etkileşim göstererek hidrofobik davranış sergilemektedir (Israelachvili, 2011). Bu nedenle süperhidrofobik yüzeylerin tasarımında genellikle florlu polimerler veya silikon bazlı bileşikler gibi düşük yüzey enerjili kimyasal yapılar tercih edilmektedir. Bununla birlikte literatürde yapılan çalışmalar, yalnızca düşük yüzey enerjisinin süperhidrofobik davranış için tek başına yeterli olmadığını göstermektedir. Mikro ve nano ölçekte yüzey pürüzlülüğünün yüzey enerjisi ile birlikte değerlendirilmesi gerektiği ve bu iki parametrenin birlikte süperhidrofobik davranışı belirlediği vurgulanmaktadır (Bhushan & Jung, 2011; Nosonovsky & Bhushan, 2007). Bu nedenle izleyen kısımda, yüzey enerjisi ve pürüzlülüğün temas açısına etkisini açıklamak için geliştirilen Young, Wenzel ve Cassie–Baxter modelleri özetlenmektedir.

2.3. Young, Wenzel ve Cassie–Baxter Modelleri

Bir katı yüzeyin sıvılarla etkileşimi, yüzey enerjisi ve ara yüzey gerilimleri tarafından belirlenir. Süperhidrofobik davranışın teorik olarak anlaşılması, klasik

ıslanabilirlik modellerinin geliştirilmesiyle mümkün olmuştur. Bu kapsamda Young, Wenzel ve Cassie–Baxter modelleri, süperhidrofobik yüzeylerin temel fiziksel prensiplerini açıklamak için yaygın olarak kullanılmaktadır.

İdeal, pürüzsüz ve kimyasal olarak homojen bir katı yüzeyde sıvı damlasının denge temas açısı Young denklemi ile tanımlanır. Bu denklem, katı–gaz, katı–sıvı ve sıvı–gaz ara yüzey gerilimleri arasındaki dengeyi ifade eder (Denklem 1).

$$\cos Q_Y = \frac{\gamma_{SG} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LG}} \quad (1)$$

Burada

Q_Y : Young temas açısı,

γ_{SG} : katı–gaz yüzey gerilimi,

γ_{SL} : katı–sıvı yüzey gerilimi,

γ_{LG} : sıvı–gaz yüzey gerilimini temsil eder.

Young modeli yalnızca ideal yüzeyler için geçerlidir ve gerçek mühendislik yüzeylerindeki pürüzlülük ve kimyasal heterojenlikleri dikkate almaz. Bu nedenle süperhidrofobik davranışın açıklanmasında tek başına yeterli değildir. Süperhidrofobik davranışın temelinde, düşük yüzey enerjili kimyasal bileşim ile mikro/nano ölçekte yüzey pürüzlülüğünün birlikte sağlanması yer alır. Bu etkileşim, yüzey ıslanabilirliğini açıklamak amacıyla geliştirilen Wenzel ve Cassie–Baxter modelleri ile teorik olarak ifade edilmektedir (Wenzel, 1936; Cassie & Baxter, 1944).

Gerçek yüzeylerin mikro ve nano ölçekte pürüzlülük içermesi, temas açısının yüzey geometrisinden etkilenmesine neden olur. Wenzel modeli, sıvının yüzey pürüzlülüklerini tamamen doldurduğu homojen ıslanma rejimini tanımlar (Şekil 2a). Bu rejimde temas açısı, pürüzlülük oranı ile ilişkilendirilerek Denklem 2 ile verilir.

$$\cos \theta_w = R \cos \theta_y \quad (2)$$

Burada;

θ_w : Wenzel temas açısı

R : Yüzey pürüzlülük oranı (gerçek yüzey alanının, izdüşüm alanına oranı)

θ_y : Sıvı damlacığının temas açısıdır.

Wenzel modeline göre hidroforbik bir yüzeyde pürüzlülüğün artması temas açısını artırarak hidroforbikliği güçlendirebilir; ancak sıvı yüzeyle tam temas hâlinde olduğundan damla yapışması ve temas açısı histerezi genellikle yüksektir.

Süperhidroforbik yüzeylerin karakteristik özelliği olan düşük temas alanı ve düşük yapışma kuvveti, Cassie–Baxter rejimi ile açıklanır. Bu modelde sıvı, yüzeyin yalnızca belirli bir kısmı ile temas ederken pürüzler arasında hava cepleri hapsolür (Şekil 2b). Cassie–Baxter denklemi Denklem 3’te verilmiştir.

$$\cos \theta_{CB} = f_s (\cos \theta_y + 1) - 1 \quad (3)$$

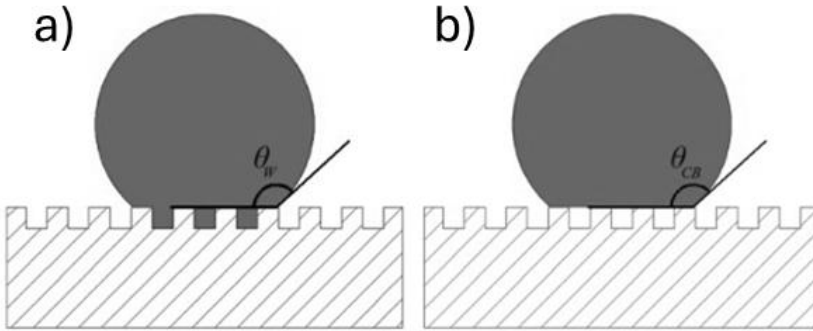
Burada;

θ_{CB} : Cassie–Baxter temas açısı,

f_s : Sıvı ile temas eden katı yüzeyin alan oranı

θ_y : Sıvı damlacığının temas açısıdır.

Hava ceplerinin varlığı, sıvı–katı temas alanını önemli ölçüde azaltarak temas açısının 150°’nin üzerine çıkmasını sağlayabilir. Bu mekanizma, “lotus etkisi” olarak bilinen kendini temizleme davranışının temelini oluşturur ve doğada lotus yaprağı gibi yüzeylerde gözlemlenen biyomimetik örneklerle ilişkilidir (Barthlott & Neinhuis, 1997).



Şekil 2. (a) Wenzel modeli ve (b) Cassie–Baxter modeli.

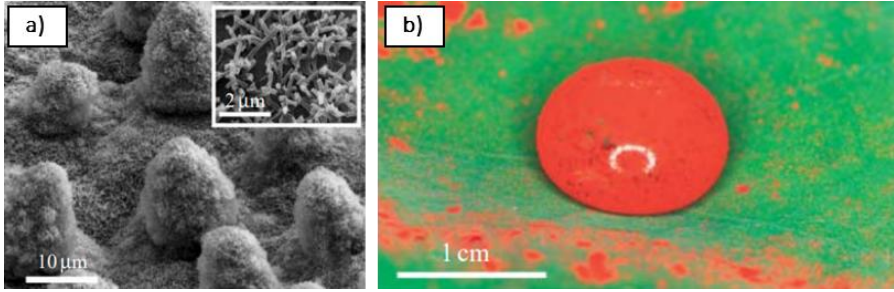
Not: (Gu vd.,2017) uyarlanmıştır.

2.4. Lotus Etkisi ve Biyomimetik Yaklaşım

Doğada gözlemlenen süperhidroforbik davranışın en bilinen örneklerinden biri lotus yaprağıdır. Lotus yaprağı yüzeyinde mikro ve nano ölçekte hiyerarşik çıkıntılar bulunmakta ve bu yapı, su damlacıklarının yüzeyden kolaylıkla

uzaklaşmasını sağlamaktadır (Barthlott & Neinhuis, 1997). Bu fenomen literatürde “lotus etkisi” olarak adlandırılmaktadır.

Lotus etkisi, süperhidrofobik yüzey tasarımı için biyomimetik yaklaşımların temelini oluşturmuş ve mühendislik yüzeylerinin doğadan ilham alınarak geliştirilmesine öncülük etmiştir. Bu yaklaşım, yüzey geometrisi ile kimyasal bileşimin birlikte optimize edilmesi gerektiğini açık biçimde ortaya koymaktadır (Koch & Barthlott, 2009; Bhushan & Jung, 2011). Lotus etkisinin anlaşılması, yapay süperhidrofobik yüzey tasarımı için hiyerarşik pürüzlülük ve düşük yüzey enerjisinin birlikte sağlanması gerektiğini göstererek, izleyen kısımda ele alınacak üretim stratejilerinin temel motivasyonunu oluşturmuştur. Şekil 3(a)'da lotus yaprağının SEM görüntüsü, Şekil 3(b)'de ise lotus yaprağı üzerine damlatılmış sıvı damlacığının yüzey üzerinde küresel forma yakın biçimde durduğu görülmektedir.



Şekil 3. (a) Lotus yaprağının SEM görüntüsü, (b) lotus yaprağı üzerine damlatılan sıvı damlacığı.

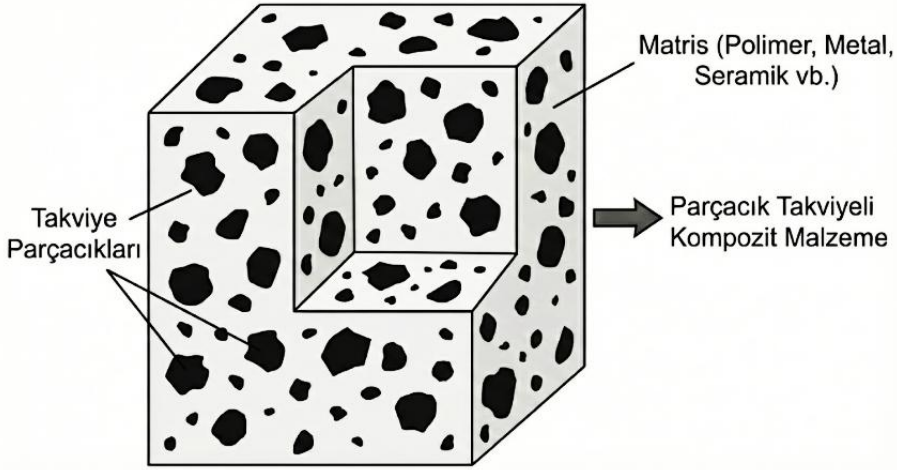
Not: Koch & Barthlott'tan (2009) uyarlanmıştır.

3. PARÇACIK TAKVİYELİ METAL ESASLI KOMPOZİTLERDE (PTMMK) YÜZEY FONKSİYONELLEŞTİRME

3.1. Yapısal Özellikleri ve Yüzey Davranışı

Kompozit malzemeler; iki veya daha fazla farklı fazın makroskobik ölçekte bir araya getirilmesiyle oluşturulan ve bileşenlerin tek başına sağlayamadığı üstün özellikleri birlikte sunan mühendislik malzemeleridir. Matris ve takviye fazlarından oluşan bu yapılar, yüksek özgül dayanım, tasarım esnekliği ve fonksiyonel özelleştirme imkânı sağlamaları nedeniyle otomotiv, havacılık, enerji ve savunma sanayinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Chawla, 2012; Gibson, 2016). Nispeten üretim kolaylığı ve maliyet açısından yapısal uygulamalarda genellikle daha fazla tercih edilebilir olan PTMMK yüzeylerinde ıslanabilirlik davranışı yalnızca matris metalin yüzey enerjisine bağlı değildir;

takviye parçacıklarının yüzey yakınındaki dağılımı, matris-takviye ara yüzeyinin topografisi ve işlem sonrası oluşan oksit/hidroksit katmanları da belirleyicidir. Örneğin Al-SiC gibi sistemlerde takviye fazının sertliği ve yüzeyde oluşturduğu mikro ölçekli çıkıntılar, uygun bir kimyasal modifikasyonla birleştirildiğinde Cassie–Baxter rejimini destekleyen hiyerarşik yapıların oluşturulmasını kolaylaştırabilir; ancak aynı çok fazlı yapı pitting korozyon duyarlılığını da etkileyebilir (Trowsdale vd., 1996; Quéré, 2008) PTMMK malzeme yapısının genel şematik gösterimi Şekil 4’te verilmiştir.



Şekil 4. Parçacık takviyeli kompozit malzeme (PTMMK) yapısının şematik gösterimi.

PTMMK malzemelerin yüzey özellikleri yalnızca matrisin kimyasal yapısına bağlı değildir; takviye elemanlarının dağılımı, yüzey morfolojisi ve üretim yöntemi gibi parametrelerle birlikte değişkenlik gösterir. Bu çok fazlı yapı; kompozit yüzeylerin ıslanabilirlik, yapışma ve çevresel etkilere karşı dayanım gibi davranışlarını doğrudan etkileyerek yüzey fonksiyonelleştirme stratejilerinin tasarımında belirleyici rol oynar (Mallick, 2007).

3.2. Yüzey Fonksiyonelleştirmenin Amacı ve Kapsamı

Yüzey fonksiyonelleştirme, bir malzemenin kütsel (hacimsel) özelliklerini değiştirmeden yüzeyine yeni fiziksel veya kimyasal işlevler kazandırmayı amaçlayan mühendislik yaklaşımlarını kapsamaktadır. PTMMK malzemelerde yüzey fonksiyonelleştirmenin temel hedefleri arasında ıslanabilirliğin kontrolü, aşınma ve korozyon direncinin artırılması, çevresel dayanıklılığın iyileştirilmesi ve yüzeye çok işlevli özelliklerin kazandırılması yer almaktadır (Mittal, 2015; Bhushan, 2013).

Süperhidrofobik yüzey uygulamalarında fonksiyonelleştirme işlemleri genellikle yüzey enerjisinin düşürülmesi ve mikro/nano ölçekte uygun yüzey

topografisinin oluşturulması üzerine odaklanmaktadır. Kompozit malzemelerin heterojen yapısı, bu iki parametrenin birlikte kontrol edilmesini zorlaştırırsa da doğru tasarım yaklaşımları ile önemli avantajlar sunabilmektedir (Nosonovsky & Bhushan, 2007).

3.3. Mikro ve Nano Ölçekli Yüzey Yapılarının Rolü

Literatürde yapılan çalışmalar, süperhidrofobik davranışın yalnızca kimyasal modifikasyonla değil, yüzeyin mikro ve nano ölçekte yapılandırılmasıyla mümkün olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Hiyerarşik yüzey yapıları, Cassie–Baxter ıslanma rejiminin oluşmasını kolaylaştırarak sıvı–katı temas alanını minimize etmekte ve böylece yüksek temas açısı ile düşük yapışma davranışını desteklemektedir (Bhushan & Jung, 2011; Quéré, 2008). Kompozit malzemelerde bu tür yapıların oluşturulması; takviye elemanlarının yüzeye yakın bölgelerdeki dağılımı, yüzey pürüzlülüğü ve üretim sonrası uygulanan işlemlerle doğrudan ilişkilidir. Özellikle parçacık takviyeli kompozitlerde parçacıkların yüzeyde oluşturduğu mikro ölçekli yapıların, süperhidrofobik davranışa katkı sağladığı bildirilmektedir (Latthe vd., 2014). Bu nedenle izleyen kısımda, kompozit yüzeylerde mikro/nano topografiyi oluşturmak veya güçlendirmek amacıyla kullanılan kimyasal ve fiziksel modifikasyon yaklaşımları ele alınmaktadır.

3.4. Kompozit Yüzeylerde Kimyasal ve Fiziksel Modifikasyon Yaklaşımları

Kompozit yüzeylerin fonksiyonelleştirilmesinde kullanılan yöntemler genel olarak kimyasal ve fiziksel modifikasyon teknikleri olarak iki ana grupta ele alınmaktadır. Kimyasal modifikasyonlar; yüzey kaplamaları, silan bazlı işlemler ve düşük yüzey enerjili moleküllerin yüzeye bağlanması gibi yaklaşımları içermektedir. Bu yöntemler yüzey enerjisinin düşürülmesinde etkili olmakla birlikte, kaplama tabakasının mekanik dayanımı ve aşınma altında bütünlüğünü koruma açısından bazı sınırlamalar içerebilmektedir (Israelachvili, 2011).

Fiziksel modifikasyonlar ise lazer yüzey işleme, plazma işlemleri ve mekanik aşındırma gibi yöntemleri kapsamakta olup yüzey topografisinin kontrollü biçimde değiştirilmesini amaçlamaktadır. Kompozit yüzeylerde bu tekniklerin uygulanması, mikro ve nano ölçekte pürüzlülüğün daha kalıcı biçimde oluşturulmasına olanak tanımakta ve süperhidrofobik davranışın mekanik dayanıklılığını artırabilmektedir (Verho vd., 2011; Wang vd., 2015).

3.5. Süperhidrofobik Kompozit Yüzeylerde Performans Kriterleri

Süperhidrofobik kompozit yüzeylerin mühendislik uygulamalarında kullanılabilmesi için yalnızca yüksek temas açısı değerleri yeterli değildir. Bu yüzeylerin aynı zamanda mekanik aşınma, kimyasal etki ve çevresel koşullar

altında kararlı performans sergilemesi beklenmektedir. Literatürde süperhidrofobik özelliklerin mekanik yükler altında zamanla bozulabildiği ve bunun yüzey fonksiyonelleştirme stratejilerinin en önemli sınırlamalarından biri olduğu vurgulanmaktadır (Nosonovsky & Bhushan, 2007; Wang vd., 2015). Bu nedenle güncel araştırmalar, kompozit yüzeylerde süperhidrofobik davranışın yalnızca yüzey kaplaması ile değil, yüzey mimarisinin kompozit yapının kendisiyle bütünleştiği daha dayanıklı tasarımlar üzerine yoğunlaşmaktadır. Bu yaklaşım, süperhidrofobik yüzeylerin endüstriyel uygulamalara aktarılmasında kritik bir rol oynamaktadır (Bhushan & Jung, 2011). Bu kapsamda performans değerlendirmesinde; temas açısı histerezisi ve kayma açısı gibi dinamik ıslanabilirlik ölçütleri ile birlikte, aşınma testleri ve kimyasal/çevresel dayanıklılık testleri kritik öneme sahiptir. Bu kriterlerin standartlaştırılmış test protokolleriyle izlenmesi, süperhidrofobik kompozit yüzeylerin gerçek servis koşullarındaki güvenilirliğini belirlemede temel yaklaşımdır.

4. HİDROFOBİK/SÜPERHİDROFOBİK YÜZEY ÜRETİM YÖNTEMLERİ

MMK'larda süperhidrofobik yüzey üretimi, metal yüzeylerin oksitlenmeye eğilimi ve çok fazlı mikro yapının heterojen tepkimesi nedeniyle polimer matrisli kompozitlerden ayrışır. Bu nedenle süreç tasarımında iki hedef birlikte ele alınmalıdır: (i) yüzeyde mikro/nano topografiyi kontrollü biçimde oluşturmak (aşındırma, lazer, elektrokimyasal işlemler vb.), (ii) yüzey enerjisini düşürerek hidrofobik kimyayı kalıcı şekilde yüzeye bağlamak (silanizasyon, florlu/silikon bazlı modifikasyonlar vb.). Bu yaklaşımın korozyon korumaya katkısı, su/iyon temasının azaltılması ve elektrokimyasal reaksiyonların baskılanması üzerinden açıklanmaktadır (Bhushan & Jung, 2011; Zhang & Wang, 2016).

4.1. Kimyasal Kaplama Yöntemleri

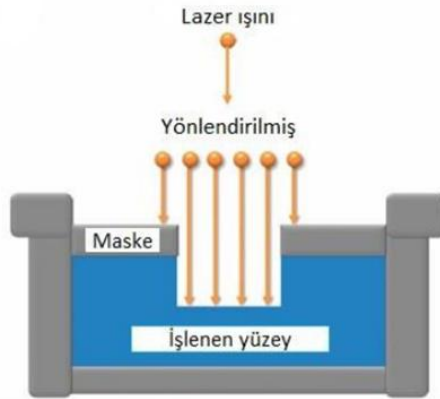
Kimyasal kaplama yöntemleri, süperhidrofobik yüzeylerin üretilmesinde en yaygın kullanılan teknikler arasında yer almaktadır. Bu yöntemlerde temel amaç, kompozit yüzey üzerine düşük yüzey enerjisine sahip bir kaplama tabakasının uygulanmasıdır. Özellikle florlu bileşikler ve silikon bazlı polimerler, yüzey enerjisinin düşürülmesinde etkin rol oynamaktadır (Ma & Hill, 2006; Bhushan & Jung, 2011). Kompozit yüzeylerde kimyasal kaplama uygulamaları genellikle daldırma, püskürtme veya spin kaplama teknikleri ile gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemlerin en önemli avantajı, karmaşık geometrilere sahip yüzeylere dahi uygulanabilmesi ve nispeten düşük işlem maliyetine sahip olmasıdır. Bununla birlikte, kaplama tabakasının mekanik aşınmaya karşı sınırlı dayanım göstermesi, bu yöntemin endüstriyel uygulamalardaki en önemli dezavantajlarından biridir (Verho vd., 2011).

4.2. Sol-Jel Tabanlı Üretim Yaklaşımları

Sol-jel yöntemi, süperhidrofobik yüzeylerin üretiminde sıklıkla tercih edilen bir diğer tekniktir. Bu yöntemde metal alkoksit veya organosilan prekürsörlerden oluşan bir sol çözeltisi hazırlanmakta ve uygun işlem koşulları altında jel fazına dönüştürülmektedir. Elde edilen kaplama tabakası, mikro ve nano ölçekte pürüzlülük oluşturma potansiyeline sahiptir (Brinker & Scherer, 1990). Kompozit malzemelerde sol-jel kaplamalar, yüzey morfolojisinin kontrol edilebilmesi ve kimyasal bileşimin ayarlanabilir olması açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Ayrıca bu yöntem, düşük işlem sıcaklıklarında uygulanabildiği için polimer matrisli kompozitlerle uyumlu bir üretim yaklaşımı olarak öne çıkmaktadır (Latthe vd., 2014). Bununla birlikte kaplama kalınlığının homojenliği ve kuruma sırasında çatlak oluşumu gibi sorunlar, süreç parametrelerinin dikkatle kontrol edilmesini gerektirmektedir.

4.3. Lazer Yüzey İşleme Teknikleri

Lazer yüzey işleme, süperhidrofobik yüzeylerin üretiminde fiziksel modifikasyon temelli ve temassız bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Bu teknikte lazer ışını kullanılarak yüzey üzerinde mikro ve nano ölçekte düzenli yapılar oluşturulmakta ve böylece yüzey pürüzlülüğü kontrollü biçimde artırılmaktadır (Vorobyev & Guo, 2013). Kompozit yüzeylerde lazer işlemenin en önemli avantajı, kimyasal kaplamaya ihtiyaç duyulmadan süperhidrofobik davranışın elde edilebilmesidir. Bu durum, yüzeyin mekanik dayanıklılığını artırmakta ve uzun süreli performans açısından avantaj sağlamaktadır. Ancak lazer işlem parametrelerinin hassas kontrol gerektirmesi ve büyük yüzeylerde uygulama maliyetinin yüksek olması, yöntemin endüstriyel ölçeklenebilirliğini sınırlayan faktörler arasında yer almaktadır (Long vd., 2015). Şekil 5'te lazer yüzey işleme yönteminin şematik gösterimi verilmiştir.

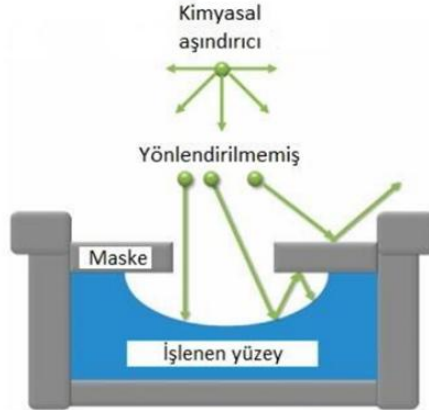


Şekil 5. MMK yüzeylerinde Lazer yüzey işleme yönteminin şematik gösterimi.

Not: Ge-Zhang vd.'den (2022) uyarlanmıştır.

4.4. Elektrokimyasal ve Kimyasal Aşındırma Yöntemleri

Elektrokimyasal ve kimyasal aşındırma yöntemleri, yüzey üzerinde rastgele veya yarı düzenli mikro/nano yapılar oluşturarak süperhidrofobik davranış elde edilmesini amaçlamaktadır. Bu yöntemler özellikle metal ve metal matrisli kompozitlerde etkili sonuçlar vermektedir (Zhang vd., 2008). Aşındırma işlemi sonrasında genellikle düşük yüzey enerjili bir kimyasal modifikasyon uygulanmakta ve böylece yüzeyin süperhidrofobik karakteri güçlendirilmektedir. Bu yöntemlerin en önemli avantajı, nispeten basit işlem adımlarına sahip olmasıdır. Ancak aşındırma derinliğinin kontrolü ve yüzey bütünlüğünün korunması, dikkat edilmesi gereken kritik parametrelerdir (Quéré, 2008). Polimer matrisli kompozitlerde ise agresif aşındırıcıların matrise zarar verme riski nedeniyle, daha düşük şiddette yüzey işlemleri veya seçici modifikasyon yaklaşımları tercih edilmektedir. Şekil 6'da kimyasal yüzey işleme yönteminin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 6. MMK yüzeylerinde kimyasal işleme yönteminin şematik gösterimi.

Not: Ge-Zhang vd.'den (2022) uyarlanmıştır.

MMK yüzeylerinde elektrokimyasal işlemler, topografiyi oluşturmanın yanı sıra korozyon direncini artıran ara tabakalar üretmesi nedeniyle önemlidir. Al ve Mg esaslı MMK'larda anodizasyon veya plazma elektrolitik oksidasyon (PEO/MAO) gibi işlemler; sert oksit seramik tabakalar oluşturarak aşınma dayanımını artırabilir ve korozyon bariyeri sağlayabilir. PEO'nun MMK'larda kaplama morfolojisi, gözeneklilik, sertlik ve aderans gibi özellikleri takviye tipine bağlı olarak değişebilmekte; buna bağlı olarak korozyon ve aşınma performansı da etkilenebilmektedir (Saji, 2024). Bu tür oksit tabakalar sonrasında düşük yüzey enerjili silanlarla fonksiyonelleştirildiğinde, hem mekanik açıdan daha dayanıklı hem de su itici özelliklerini daha uzun süre koruyan hibrit MMK yüzeyleri elde edilebilir (Zhang & Wang, 2016). Ancak çok fazlı yapı nedeniyle yerel akım yoğunluğu farklılıkları oluşabileceğinden, gözenekli oksit

morfolojisinin ve kaplama bütünlüğünün süreç parametreleriyle kontrol edilmesi gerekmektedir.

4.5. Partikül Takviyeli ve Hiyerarşik Yapı Oluşturma Yaklaşımları

Süperhidrofobik kompozit yüzeylerin üretiminde partikül takviyesi, mikro ve nano ölçekte hiyerarşik yüzey yapılarının oluşturulmasına olanak sağlayan etkili yaklaşımlar arasında yer almaktadır. Bu yöntemde genellikle SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 veya karbon temelli nanopartiküller yüzeye kaplama ile entegre edilmekte; böylece yüzey pürüzlülüğü artırılarak Cassie–Baxter ıslanma rejiminin oluşması desteklenmektedir (Tuteja vd., 2007). Partikül takviyeli sistemlerde yüzey enerjisinin düşük tutulması amacıyla çoğunlukla florlu veya silikon bazlı bağlayıcılar kullanılmakta ve bu sayede yüksek temas açısı değerlerine ulaşılabilir. Ancak partiküllerin yüzeye tutunması, kaplama bütünlüğü ve uzun süreli aşınma dayanımı gibi konular, yöntemin pratik uygulamalarında kritik sınırlamalar oluşturabilmektedir (Wang vd., 2015). Bu nedenle partikül takviyeli kaplamalarda performans değerlendirmesi; temas açısı ve kayma açısının yanı sıra partikül kopması/aşınma sonrası hidrofobikliğin korunumu açısından da yapılmalıdır.

5. SÜPERHİDROFOBİK KOMPOZİT YÜZEYLERİN KARAKTERİZASYONU

5.1. Temas Açısı ve Temas Açısı Histerezisi Ölçümleri

Süperhidrofobik yüzeylerin karakterizasyonunda en temel ve yaygın kullanılan yöntem temas açısı ölçümleridir. Statik temas açısı, yüzeyin sıvı itici davranışını nicel olarak tanımlamakta olup süperhidrofobik yüzeyler için bu değer genellikle 150° 'nin üzerinde olması beklenmektedir (Ma & Hill, 2006; Quéré, 2008). Temas açısı ölçümleri, yüzeyin kimyasal yapısı ve morfolojisi hakkında dolaylı fakat önemli bilgiler sunmaktadır. Bununla birlikte yalnızca statik temas açısı değeri, süperhidrofobik performansın değerlendirilmesi için her zaman yeterli olmayıp düşük temas açısı histerezisi ile birlikte yorumlanmalıdır.

Temas açısı histerezisi, ilerleyen temas açısı (Q_A) ile geri çekilen temas açısı (Q_R) arasındaki fark olarak tanımlanır ve damlacıkların yüzey üzerindeki hareket kabiliyetini doğrudan yansıtır (Nosonovsky & Bhushan, 2007). Temas açısı histerezisi Denklem 4'te verilmiştir.

$$\Delta Q = Q_A - Q_R \quad (4)$$

Düşük histerezis değeri, damlanın yüzey üzerinde kolayca hareket edebilmesini ve düşük eğim açılarında dahi yüzeyden yuvarlanmasını sağlar. Düşük histerezis değeri, Cassie–Baxter ıslanma rejiminin varlığına işaret etmekte ve kendini temizleme davranışının temel göstergesi olarak kabul edilmektedir.

Yüzeylerin temas açısı değerleri, temas açısı ölçüm cihazları (gonyometreler) kullanılarak belirlenmektedir. Uygulamada en yaygın kullanılan tekniklerden biri durgun damla (sessile drop) yöntemi olup, bu yöntemde yüzeye bırakılan sabit hacimli bir sıvı damlasının denge hâlindeki profili analiz edilerek temas açısı hesaplanır. Şekil 7’de durgun damla yöntemi prensibiyle çalışan bir temas açısı ölçüm cihazı verilmiştir.

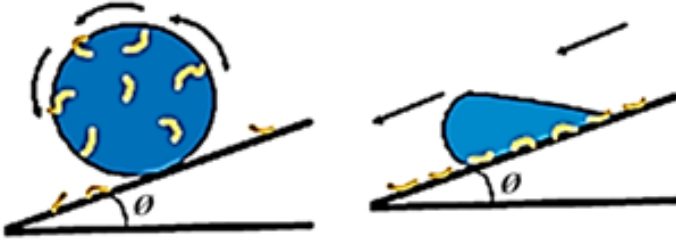


Şekil 7. Temas açısı ölçüm cihazı (Pamukcu, 2024).

5.2. Kayma Açısı ve Dinamik Islanma Davranışı

Kayma açısı, bir sıvı damlacığının yüzey üzerinden hareket etmeye başladığı minimum eğim açısı olarak tanımlanır. Bu parametre, süperhidrofobik yüzeylerin pratik uygulamalar açısından değerlendirilmesinde büyük önem taşımaktadır. Düşük kayma açısı değerleri, yüzeyin sıvı ile olan etkileşiminin son derece zayıf olduğunu ve damlacıkların yüzeyden kolaylıkla uzaklaştırılabildiğini göstermektedir (Extrand & Kumagai, 1996). Kayma açısının şematik gösterimi Şekil 8’de verilmiştir.

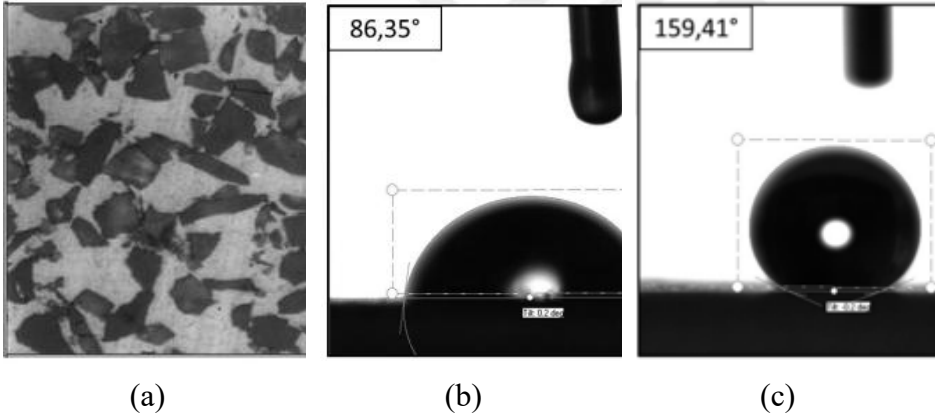
Dinamik ıslanma davranışı, yüzey pürüzlülüğü ve yüzey enerjisinin birlikte değerlendirilmesini gerektirir. Literatürde kayma açısı ile temas açısı histerezisi arasında güçlü bir ilişki olduğu ve bu iki parametrenin birlikte değerlendirilmesinin süperhidrofobik yüzey performansının daha doğru yorumlanmasını sağladığı vurgulanmaktadır (Nosonovsky & Bhushan, 2007; Quéré, 2008).



Şekil 8. Kayma açısının şematik gösterimi.

5.3. Yüzey Morfolojisinin İncelenmesi

Süperhidrofobik davranışın kökeni büyük ölçüde yüzey morfolojisine bağlı olduğundan, mikro ve nano ölçekli yapıların karakterizasyonu kritik öneme sahiptir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM), yüzey pürüzlülüğünün ve hiyerarşik yapıların görsel olarak analiz edilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. SEM görüntüleri, süperhidrofobik yüzeylerde mikro ve nano ölçekte yapıların bir arada bulunduğunu açıkça ortaya koymaktadır (Barthlott & Neinhuis, 1997). Şekil 9'da kimyasal işlem ve modifikasyon sonucunda süperhidrofobik yüzey elde edilmiş SiCp takviyeli bir alüminyum kompozit yüzeyinin SEM görüntüsü ve işlem öncesi ve sonrası temas açısı değişimi görülmektedir.



Şekil 9. (a) MMK yüzey mikroyapısı (b-c) aynı yüzeyde kimyasal işlem öncesi ve sonrası temas açıları

Atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ise yüzey topografisinin nicel olarak değerlendirilmesine olanak tanır ve yüzey pürüzlülüğü parametrelerinin belirlenmesini sağlar. AFM ölçümleri, yüzey pürüzlülüğünün temas açısı ile olan ilişkisini ortaya koymada önemli bir araçtır (Bhushan, 2013).

5.4. Mekanik Dayanım ve Aşınma Direnci Testleri

Süperhidrofobik kompozit yüzeylerin mühendislik uygulamalarında kullanılabilmesi için mekanik dayanım ve aşınma direnci kritik parametreler arasında yer almaktadır. Literatürde süperhidrofobik özelliklerin mekanik yükler altında zamanla bozulabildiği ve bu durumun yüzey kaplamalarının endüstriyel uygulamalardaki en önemli sınırlamalarından biri olduğu bildirilmektedir (Verho vd., 2011).

Aşınma testleri; bant aşındırma, zımpara testi veya tekrarlı sürtünme deneyleri gibi yöntemlerle gerçekleştirilebilir ve yüzeyin süperhidrofobik karakterini ne ölçüde koruyabildiği değerlendirilmektedir. Kompozit yüzeylerde süperhidrofobik davranışın uzun süreli korunabilmesi, yüzey mimarisinin kompozit yapının kendisiyle bütünleşmiş olmasına bağlıdır (Wang vd., 2015).

5.5. Kimyasal ve Çevresel Dayanıklılık

Süperhidrofobik kompozit yüzeylerin kimyasal ortamlara ve çevresel etkilere karşı dayanıklılığı, özellikle dış ortam uygulamaları açısından büyük önem taşımaktadır. Asidik ve bazik çözeltiler, UV ışınımı ve sıcaklık değişimleri gibi etkenler, yüzey kimyasını ve morfolojisini olumsuz yönde etkileyebilmektedir (Liu & Jiang, 2012). Bu nedenle süperhidrofobik yüzeylerin karakterizasyonunda, farklı çevresel koşullar altında temas açısı ve kayma açısı ölçümlerinin tekrarlanması yaygın bir uygulamadır. Literatürde, kimyasal ve çevresel dayanıklılığı yüksek süperhidrofobik yüzeylerin, endüstriyel uygulamalara daha yakın çözümler sunduğu vurgulanmaktadır (Bhushan & Jung, 2011). Bu testlerde yalnızca başlangıç temas açısı değil, belirli maruziyet süreleri sonrasında temas açısındaki azalma ($\Delta\theta$) ve kayma açısındaki artış birlikte raporlanmalıdır. Ayrıca çevresel dayanıklılık değerlendirmesinde yüzeyin morfolojisindeki değişimler SEM/AFM ile desteklenerek, performans kaybının kimyasal bozulma mı yoksa yapı hasarı mı kaynaklı olduğu ayrıştırılmalıdır.

5.6 MMK Yüzeylerinde Korozyon Performansının Değerlendirilmesi

MMK'larda süperhidrofobik yüzeylerin en önemli mühendislik vaatlerinden biri korozyonun geciktirilmesidir. Bu nedenle temas açısı/kayma açısı ölçümlerinin yanında, elektrokimyasal testlerle korozyon davranışının nicel olarak doğrulanması önerilir. Potentiodynamik polarizasyon eğrileri ile korozyon potansiyeli (E_{corr}) ve korozyon akım yoğunluğu (i_{corr}) belirlenebilir; i_{corr} değerindeki düşüş ve E_{corr} değerindeki asil yöndeki kayma, koruyucu etkinliğin göstergesi olarak yorumlanır. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) ise kaplama/bariyer tabakasının bütünlüğünü ve zamanla bozulma eğilimini değerlendirmede yerleşik bir yaklaşımdır (Rammelt & Reinhard, 1992). Süperhidrofobik yüzeylerin korozyon performansı değerlendirmelerinde EIS ve polarizasyonun birlikte kullanımı yaygın olup, metal yüzeylerde su iticiliğin

korozyon direncine katkısı literatürde deneysel olarak da gösterilmiştir (He vd., 2009; Zhang & Wang, 2016). Ayrıca tuz püskürtme (ASTM B117) veya daldırma testleri gibi hızlandırılmış çevresel deneylerle, süperhidrofobik özelliklerin servis koşullarında korunumu temas açısı/kayma açısı ölçümleriyle birlikte raporlanmalıdır. MMK'ların çok fazlı yapısı nedeniyle galvanik etkiler söz konusu olabileceğinden, korozyon değerlendirmesinde yüzey morfolojisi (SEM) ve kaplama sürekliliği ile birlikte yorum yapılması kritik önem taşır.

6. MÜHENDİSLİK UYGULAMALARI VE ENDÜSTRİYEL POTANSİYEL

6.1. Otomotiv ve Elektrikli Araç Uygulamaları

Süperhidrofobik kompozit yüzeyler, otomotiv ve özellikle elektrikli araç teknolojilerinde çok işlevli yüzey çözümleri sunmaktadır. Elektrikli araçlarda menzil, enerji verimliliği ve bakım maliyetleri kritik parametreler olup, yüzey özelliklerinin bu parametreler üzerindeki etkisi giderek daha fazla önem kazanmaktadır (Zhang vd., 2016). Araç dış yüzeylerinde kullanılan süperhidrofobik kaplamalar, yağmur ve kir tutmama özellikleri sayesinde aerodinamik sürüklenmeyi azaltmakta ve sensör sistemlerinin (kamera, LiDAR) daha kararlı çalışmasına katkı sağlamaktadır. Ayrıca buzlanma geciktirici özellikleri sayesinde soğuk iklim koşullarında güvenlik performansını artırmaktadır (He vd., 2019). Elektrikli araç batarya muhafaza sistemlerinde süperhidrofobik kompozit yüzeylerin kullanımı, nem kaynaklı korozyon ve elektriksel kaçak risklerini azaltarak sistem güvenliğini artırma potansiyeline sahiptir (Liu vd., 2021).

6.2. Korozyon Koruma ve Yapısal Dayanıklılık

Süperhidrofobik yüzeyler, metal ve kompozit yapıların korozyona karşı korunmasında etkin bir pasif bariyer görevi üstlenmektedir. Yüzey ile sıvı arasındaki temas alanının minimize edilmesi, elektrokimyasal reaksiyonların başlamasını zorlaştırmakta ve korozyon hızını önemli ölçüde düşürmektedir (Ishizaki vd., 2010). Kompozit malzemelerde süperhidrofobik yüzey fonksiyonelleştirme; özellikle denizcilik, otomotiv ve havacılık uygulamalarında uzun servis ömrü açısından avantaj sağlamaktadır. Literatürde, süperhidrofobik yüzeylerin tuzlu su ve nemli ortamlarda klasik kaplamalara kıyasla daha yüksek korozyon direnci sunduğu rapor edilmiştir (Zhang vd., 2016). MMK'lar otomotiv ve havacılık uygulamalarında özellikle aşınma dayanımı ve hafiflik avantajı nedeniyle tercih edilmektedir (Chawla, 2012) (ör. Al-SiC fren bileşenleri, piston/silindir yüzeyleri, yapısal hafif parçalar). Bu tür uygulamalarda yüzeyin su ve kir tutması; korozyon başlatıcı ortamların yüzeyde kalıcılığını artırabilir ve bakım ihtiyacını yükseltebilir. Süperhidrofobik fonksiyonelleştirme, yüzeyde suyun kalış süresini azaltarak korozyon başlama olasılığını düşürürken, kendini

temizleme davranışı sayesinde bakım maliyetlerini azaltma potansiyeli taşır (Bhushan & Jung, 2011; Zhang & Wang, 2016).

Denizcilik ve dış ortam enerji uygulamalarında (tuzlu su/nemli atmosfer) MMK yüzeylerinin dayanımı kritik olduğundan, süperhidrofobik yüzeylerin “yalnız yüksek temas açısı” değil, aşınma ve çevresel maruziyet sonrası performansını koruyan tasarımlar olması beklenir. Bu bağlamda hiyerarşik topografi + kimyasal modifikasyon kombinasyonunun, yalnız kaplama temelli çözümlere kıyasla daha dayanıklı sonuçlar verebileceği değerlendirilmektedir.

6.3 Kendini Temizleyen ve Düşük Bakım Gerektiren Yüzeyler

Süperhidrofobik yüzeylerin en bilinen mühendislik avantajlarından biri kendini temizleme özelliğidir. “Lotus etkisi” olarak adlandırılan mekanizma sayesinde yüzey üzerindeki kir partikülleri su damlacıkları ile birlikte yüzeyden uzaklaştırılabilmektedir (Barthlott & Neinhuis, 1997). Bu özellik; ulaşım araçları, dış cephe panelleri ve güneş enerjisi sistemleri gibi bakım maliyetlerinin yüksek olduğu uygulamalarda ekonomik avantajlar sunmaktadır. Kompozit yapılarda süperhidrofobik özelliklerin entegre edilmesi, ek yüzey kaplama ihtiyacını azaltarak daha sürdürülebilir mühendislik çözümleri geliştirilmesine katkı sağlayabilir (Bhushan & Jung, 2011).

6.4 Buzlanma Önleyici ve Çevresel Dayanımlı Yüzeyler

Süperhidrofobik kompozit yüzeyler, buz oluşumunu geciktirici veya azaltıcı özellikleri sayesinde özellikle soğuk iklim uygulamalarında dikkat çekmektedir. Düşük yüzey enerjisi ve hava ceplerinin varlığı, suyun yüzeyde tutunmasını zorlaştırarak buzlanma sürecini geciktirebilmektedir (Nosonovsky & Hejazi, 2012). Bu özellikler; elektrikli araçlar, rüzgâr türbinleri ve enerji iletim hatları gibi sistemlerde performans kayıplarının azaltılmasını mümkün kılmaktadır. Ancak literatürde, uzun süreli buzlanma ve mekanik yükler altında süperhidrofobik özelliklerin zamanla zayıflayabildiği de vurgulanmaktadır (Lv vd., 2014).

6.5 Endüstriyel Ölçeklenebilirlik ve Sürdürülebilirlik

Süperhidrofobik kompozit yüzeylerin endüstriyel potansiyelini belirleyen en önemli faktörlerden biri üretim yöntemlerinin ölçeklenebilirliğidir. Laboratuvar ölçeğinde başarılı sonuçlar veren birçok yöntem, endüstriyel ölçekte maliyet, süre ve çevresel etki açısından sınırlamalarla karşılaşabilmektedir (Liu & Jiang, 2012). Son yıllarda çevre dostu kaplama teknikleri, flor içermeyen düşük yüzey enerjili malzemeler ve biyomimetik yaklaşımlar ön plana çıkmaktadır. Bu gelişmeler, süperhidrofobik yüzeylerin sürdürülebilir mühendislik uygulamalarına entegrasyonunu mümkün kılmaktadır (Wang vd., 2015).

7. GENEL DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR

Bu kitap bölümünde süperhidrofobik kompozit yüzeylere ilişkin temel kavramlar sistematik bir çerçevede ele alınmış; ıslanabilirlik, temas açısı ve temel ıslanma modelleri üzerinden süperhidrofobik davranışın fiziksel temeli açıklanmıştır. Kompozit malzemelerde yüzey fonksiyonelleştirmenin gerekliliği vurgulanarak mikro/nano ölçekli yüzey topografisinin ve düşük yüzey enerjili kimyasal modifikasyonun birlikte sağlanmasının kritik olduğu ortaya konmuştur. Bu kapsamda kimyasal kaplama, sol-jel, lazer yüzey işleme, aşındırma ve partikül takviyeli/hiyerarşik yapı oluşturma gibi başlıca üretim yöntemleri değerlendirilmiş ve kompozit yüzeylere uygulanabilirlikleri tartışılmıştır.

Süperhidrofobik kompozit yüzeylerin değerlendirilmesinde yalnızca statik temas açısı değerlerinin yeterli olmadığı; temas açısı histerezi ve kayma açısı gibi dinamik ıslanabilirlik ölçütlerinin yanı sıra yüzey morfolojisi (SEM/AFM), mekanik dayanım/aşınma direnci ve kimyasal/çevresel dayanıklılık testlerinin birlikte ele alınması gerektiği vurgulanmıştır. Özellikle mekanik aşınma ve uzun süreli çevresel maruziyetinde süperhidrofobik özelliklerin zayıflayabildiği; bu durumun endüstriyel uygulamalara geçişte temel sınırlayıcı etkenlerden biri olduğu literatürde sıklıkla rapor edilmektedir (Lv vd., 2014; Verho vd., 2011; Wang vd., 2015).

Mühendislik uygulamaları açısından süperhidrofobik kompozit yüzeylerin; korozyon direncinin artırılması, kendini temizleme, buzlanmayı geciktirme ve bakım maliyetlerinin azaltılması gibi önemli avantajlar sunduğu görülmektedir. Bununla birlikte bu yüzeylerin yaygınlaşabilmesi için üretim yöntemlerinin ölçeklenebilir olması, maliyet-etkin süreçlerin geliştirilmesi ve sürdürülebilir/çevre dostu (özellikle flor içermeyen) kimyasal yaklaşımların ön plana çıkarılması gerekmektedir. Bu doğrultuda gelecekteki çalışmaların; kompozit yapıyla bütünleşik, mekanik olarak daha dayanıklı ve uzun süreli çevresel kararlılığı yüksek süperhidrofobik yüzey tasarımlarına odaklanması beklenmektedir (Nosonovsky & Hejazi, 2012). Sonuç olarak, süperhidrofobik kompozit yüzeylerin endüstriyel uygulamalara güvenilir biçimde aktarımı; kimyasal/topografik tasarımın birlikte optimize edilmesi ve performansın gerçek servis koşullarını temsil eden standart test protokolleriyle doğrulanmasıyla mümkün olacaktır.

TEŞEKKÜR

Bu kitap bölümü, Tunahan Pamukçu tarafından Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda 2024 yılında tamamlanan “Çeşitli Alüminyum ve Kompozit Yüzeylerde Süperhidrofobik Yapı Oluşturulması” başlıklı yüksek lisans tez çalışmasına dayanmaktadır. Çalışma sürecinde değerli akademik katkıları, yönlendirmeleri ve destekleri için danışmanım Doç. Dr. Nilhan Ürkmez Taşkın'a teşekkür ederim.

Ayrıca, bu bölümde sunulan süperhidrofobik kompozit yüzeylere ilişkin bazı deneysel sonuçlar ve değerlendirmeler, Proceedings of the Estonian Academy of Sciences dergisinde 2025 yılında yayımlanan “Effect of Reinforcement Ratio on Contact Angle in Hydrophobic/Superhydrophobic AA5754/SiCp Composite Materials” başlıklı makalede verilmiştir (Pamukcu ve Ürkmez Taşkın, 2025).

KAYNAKÇA

- Adamson, A. W., & Gast, A. P. (1997). *Physical chemistry of surfaces*. Wiley.
- Barthlott, W., & Neinhuis, C. (1997). Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces. *Planta*, 202, 1–8. <https://doi.org/10.1007/s004250050096>
- Bhushan, B. (2013). *Introduction to tribology*. John Wiley & Sons.
- Bhushan, B., & Jung, Y. C. (2011). Natural and biomimetic artificial surfaces for superhydrophobicity, self-cleaning, low adhesion, and drag reduction. *Progress in Materials Science*, 56, 1–108. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2010.04.003>
- Brinker, C. J., & Scherer, G. W. (1990). *Sol–gel science: The physics and chemistry of sol–gel processing*. Academic Press.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020). *Materials science and engineering: An introduction*. Wiley.
- Cassie, A. B. D., & Baxter, S. (1944). Wettability of porous surfaces. *Transactions of the Faraday Society*, 40, 546–551. <https://doi.org/10.1039/TF9444000546>
- Chawla, K. K. (2012). *Composite materials: Science and engineering*. Springer.
- Evcin, A., Ersoy, B., Uygunoğlu, T., & Güneş, İ. (2018). Farklı mineral katkıların epoksi zemin kaplama malzemesinin ıslanmazlığına ve yüzey enerjisine etkisi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33, 581–590. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.416368>
- Extrand, C. W., & Kumagai, Y. (1996). An experimental study of contact angle hysteresis. *Journal of Colloid and Interface Science*, 184, 191–200. <https://doi.org/10.1006/jcis.1996.0608>
- Ge-Zhang, S., Yang, H., Ni, H., Mu, H., & Zhang, M. (2022). Biomimetic superhydrophobic metal/nonmetal surface manufactured by etching methods: A mini review. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10, 958095. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.958095>
- Gibson, R. F. (2016). *Principles of composite material mechanics*. CRC Press.
- Gu, Y., Zhang, W., Mou, J., Zheng, S., Jiang, L., Sun, Z., & Wang, E. (2017). Research progress of biomimetic superhydrophobic surface characteristics, fabrication, and application. *Advances in Mechanical Engineering*, 9(12). <https://doi.org/10.1177/1687814017746859>
- He, M., Wang, J., Li, H., Jin, X., Wang, J., Liu, B., & Song, Y. (2019). Superhydrophobic surfaces to reduce ice adhesion strength. *Soft Matter*, 6, 239–243.

- He, T., Wang, Y., Zhang, Y., Lv, Q., Xu, T., & Liu, T. (2009). Super-hydrophobic surface treatment as corrosion protection for aluminum in seawater. *Corrosion Science*, 51(8), 1757–1761. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.04.027>
- Ishizaki, T., Masuda, Y., & Sakamoto, M. (2010). Corrosion resistance and durability of superhydrophobic surface formed on magnesium alloy coated with fluorinated silane. *Langmuir*, 26, 9749–9755. <https://doi.org/10.1021/la100073k>
- Israelachvili, J. N. (2011). Intermolecular and surface forces. Academic Press.
- Koch, K., & Barthlott, W. (2009). Superhydrophobic and superhydrophilic plant surfaces: An inspiration for biomimetic materials. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 367(1893), 1487–1509. <https://doi.org/10.1098/rsta.2009.0022>
- Lathe, S. S., Imai, H., Ganesan, V., & Rao, A. V. (2014). Superhydrophobic surfaces: Development and applications. *Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology*, 4, 1–15. <https://doi.org/10.4236/jsemat.2014.41001>
- Liu, K., & Jiang, L. (2012). Bio-inspired design of multiscale structures for function integration. *Nano Today*, 7, 155–175.
- Liu, Y., Chen, Z., Yu, F., & Wu, L. (2021). Superhydrophobic coatings for corrosion protection: A review. *Surface and Coatings Technology*, 409, 126888. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.126888>
- Long, J., Zhong, M., Zhang, H., & Fan, P. (2015). Superhydrophobic surfaces fabricated by femtosecond laser with tunable water adhesion. *Langmuir*, 31, 1045–1051. <https://doi.org/10.1021/la504433f>
- Lv, J., Song, Y., Jiang, L., & Wang, J. (2014). Bio-inspired strategies for anti-icing. *ACS Nano*, 8, 3152–3169. <https://doi.org/10.1021/nn406522m>
- Ma, M., & Hill, R. M. (2006). Superhydrophobic surfaces. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 11, 193–202. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2006.06.002>
- Mallick, P. K. (2007). Fiber-reinforced composites: Materials, manufacturing, and design. CRC Press.
- Mittal, K. L. (2015). Advances in surface science. CRC Press.
- Nosonovsky, M., & Bhushan, B. (2007). Multiscale roughness and stability of superhydrophobic biomimetic interfaces. *Langmuir*, 23, 9919–9927. <https://doi.org/10.1021/la700862x>

- Nosonovsky, M., & Hejazi, V. (2012). Why superhydrophobic surfaces are not always icephobic. *ACS Nano*, 6, 8488–8491. <https://doi.org/10.1021/nn303524k>
- Pamukcu, T. (2024). Çeşitli Alüminyum ve Kompozit Yüzeylerde Süperhidrofobik Yapı Oluşturulması (Yüksek Lisans Tezi). Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. YÖK Ulusal Tez Merkezi.
- Pamukcu, T., & Urkmez Taşkın, N. (2025). Effect of reinforcement ratio on contact angle in hydrophobic/superhydrophobic AA5754/SiCp composite materials. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*, 74(2), 247–252. <https://doi.org/10.3176/proc.2025.2.07>
- Quéré, D. (2008). Wetting and roughness. *Annual Review of Materials Research*, 38, 71–99. <https://doi.org/10.1146/annurev.matsci.38.060407.132434>
- Rammelt, U., & Reinhard, G. (1992). Application of electrochemical impedance spectroscopy (EIS) for characterizing the corrosion-protective performance of organic coatings on metals. *Progress in Organic Coatings*, 21(2), 205–226. [https://doi.org/10.1016/0033-0655\(92\)87005-U](https://doi.org/10.1016/0033-0655(92)87005-U)
- Saji, V. S. (2024). Advances in plasma electrolytic oxidation (PEO) on metal-matrix composites (MMCs) – A critical review. *Chemical Engineering Journal*, 498, 155066. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.155066>
- Trowsdale, A. J., Noble, B., Harris, S. J., Gibbins, I. S. R., Thompson, G. E., & Wood, G. C. (1996). The influence of silicon carbide reinforcement on the pitting behaviour of aluminium. *Corrosion Science*, 38(2), 177–191. [https://doi.org/10.1016/0010-938X\(96\)00098-4](https://doi.org/10.1016/0010-938X(96)00098-4)
- Tuteja, A., Choi, W., Ma, M., Mabry, J. M., Mazzella, S. A., Rutledge, G. C., McKinley, G. H., & Cohen, R. E. (2007). Designing superoleophobic surfaces. *Science*, 318, 1618–1622.
- Verho, T., Bower, C., Andrew, P., Franssila, S., Ikkala, O., & Ras, R. H. A. (2011). Mechanically durable superhydrophobic surfaces. *Advanced Materials*, 23, 673–678. <https://doi.org/10.1002/adma.201003129>
- Vorobyev, A. Y., & Guo, C. (2013). Multifunctional surfaces produced by femtosecond laser pulses. *Journal of Applied Physics*, 114, 033103. <https://doi.org/10.1063/1.4813072>
- Wang, S., Liu, K., Yao, X., & Jiang, L. (2015). Bioinspired surfaces with superwettability: New insight on theory, design, and applications. *Chemical Reviews*, 115, 8230–8293.
- Wenzel, R. N. (1936). Resistance of solid surfaces to wetting by water. *Industrial & Engineering Chemistry*, 28, 988–994. <https://doi.org/10.1021/ie50320a024>

- Young, T. (1805). An essay on the cohesion of fluids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 95, 65–87. <https://doi.org/10.1098/rstl.1805.0005>
- Zhang, D., & Wang, L. (2016). Superhydrophobic surfaces for corrosion protection: A review of recent progresses and future directions. *Journal of Coatings Technology and Research*, 13, 11–29. <https://doi.org/10.1007/s11998-015-9744-6>
- Zhang, F., Zhao, L., Chen, H., Xu, S., Evans, D. G., & Duan, X. (2016). Corrosion resistance of superhydrophobic layered double hydroxide films on aluminum. *Angewandte Chemie International Edition*, 47, 2466–2469. <https://doi.org/10.1002/anie.201508501>
- Zhang, F., Zhao, L., Chen, H., Xu, S., Evans, D. G., & Duan, X. (2008). Corrosion resistance of superhydrophobic layered double hydroxide films on aluminum. *Angewandte Chemie International Edition*, 47(13), 2466–2469. <https://doi.org/10.1002/anie.200704694>
- Zhang, X., Shi, F., Yu, X., Liu, H., Fu, Y., Wang, Z., Jiang, L., & Li, X. (2008). Polyelectrolyte multilayer as matrix for electrochemical deposition of gold clusters: Toward superhydrophobic surfaces. *Journal of the American Chemical Society*, 130, 17664–17666. <https://doi.org/10.1021/ja806397q>



BÖLÜM 2

Rockwell Sertlik Ölçümlerinde ASTM E18 Standardına Göre Belirsizlik Hesaplamasının İncelenmesi

Bülent Aydemir¹

1. GİRİŞ

Sertlik, malzemenin çizilmeye, kesmeye ve plastik deformasyona karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanır. Sertlik, Uluslararası Birimler Sistemi SI'da yer almayan konvansiyonel bir büyüklüktür. Sertlik değerleri, "maksimum çekme dayanımı" gibi tasarım aşamasında doğrudan kullanılamamaktadır; ancak, elde edilen sonuçlar diğer mekanik özelliklerin tahmininde veya malzemeler ya da imalat usulleri arasında bir mukayese yapmak için kullanılabilir.

Sertlik ölçümü için pek çok ölçüm metodu vardır. Bunlardan en bilinenleri Rockwell, Brinell, Vickers, Knoop statik sertlik ölçüm yöntemleridir. Bu çalışmada Rockwell sertlik ölçüm yöntemi sonucunda elde edilen sertlik değerleri için belirsizlik hesabı örnekleri verilecektir. Temel olarak, Rockwell sertlik ölçme yönteminde tepe açısı değeri 120° olan koni biçimindeki elmas veya çapı belirli olan (1,588 mm, 3,175 mm, 6,350 mm ve 12,70 mm) sert metalden imal edilmiş bilya bir batıcı ucun deney parçasının yüzeyine belirli bir kuvvet ile bastırılır ve ortaya çıkan izin dalma derinliğinden sertlik değerine karar verilir.

Rockwell sertlik ölçme yöntemi EN ISO 6508-1 ve ASTM E18 standardında detaylı olarak tanımlanmıştır. ASTM E18 standardında verilen Rockwell sertlik ölçüm skalaları için uygulanan yük ve uç şekilleri Tablo 1 ve Tablo 2 de verilmiştir.

Tablo 1. Rockwell sertlik skalaları ve kuvvet değerleri

Sertlik Skalası Sembolü	Batıcı uç	Toplam Test Kuvveti, kgf
B	1/16 inç (1,588 mm) bilya	100
C	elmas	150
A	elmas	60
D	elmas	100
E	1/8 inç (3,175 mm) bilya	100
F	1/16 inç (1,588 mm) bilya	60

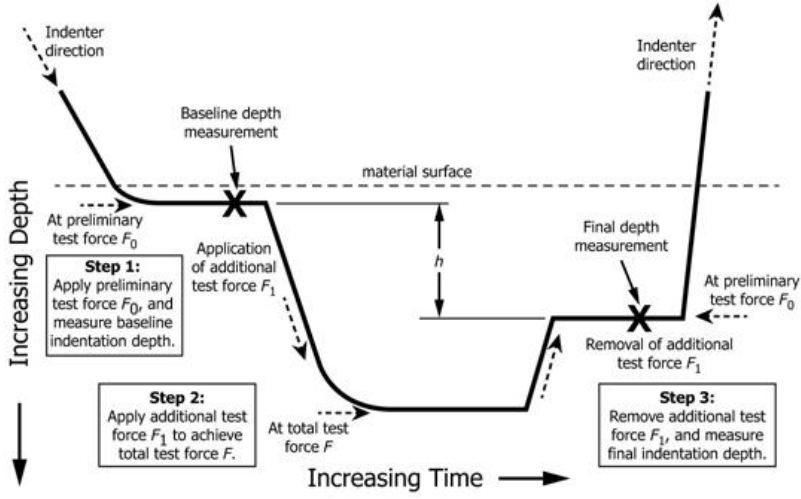
¹ Prof. Dr., Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Müh. Böl., DÜBİT Laboratuvarı, Düzce, Türkiye, ORCID: 0000-0001-6848-2681

G	1/16 inç (1,588 mm) bilya	150
H	1/8 inç (3,175 mm) bilya	60
K	1/8 inç (3,175 mm) bilya	150
L	1/4 inç (6,350 mm) bilya	60
M	1/4 inç (6,350 mm) bilya	100
P	1/4 inç (6,350 mm) bilya	150
R	1/2 inç (12,70 mm) bilya	60
S	1/2 inç (12,70 mm) bilya	100
V	1/2 inç (12,70 mm) bilya	150

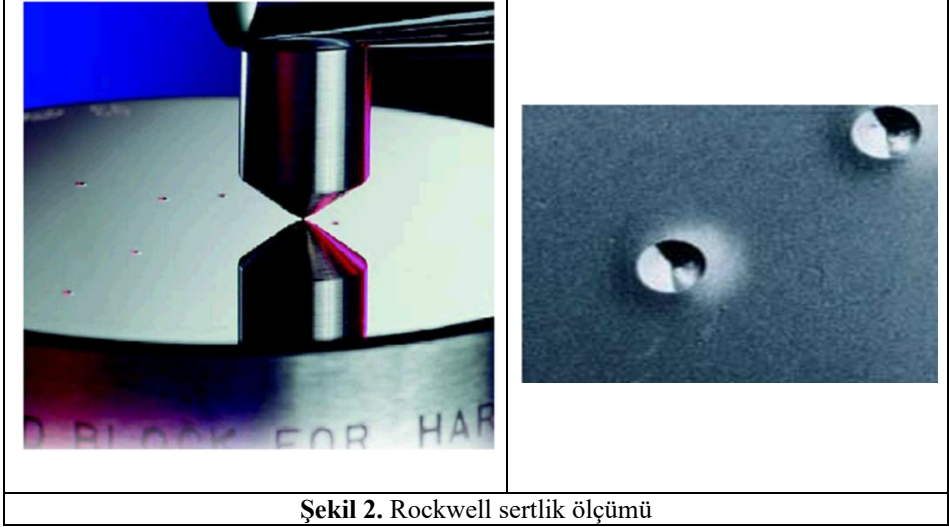
Tablo 2. Rockwell Yüzeysel Sertlik skalaları ve kuvvet değerleri

Toplam Test Kuvveti, kgf (N)	N skalası, Elmas uç	T skalası, 1/16 inç (1,588 mm) bilya	W skalası, 1/8 inç (3,175 mm) bilya	X skalası, 1/4 inç (6,350 mm) bilya	Y skalası, 1/2 inç (12,70 mm) bilya
15 (147)	15N	15T	15W	15X	15Y
30 (294)	30N	30T	30W	30X	30Y
45 (441)	45N	45T	45W	45X	45Y

Rockwell sertlik ölçümü yönteminde batıcı ucun konumuna göre şematik diyagramı Şekil 1 de verilmiştir. Batıcı uca ön yükleme kuvvetinin uygulanması ile uç yüzeyden içeriye doğru girerek adım 1 pozisyonuna gelir. Sonrasında esas yük uygulanması ile uç malzeme içinde daha da ilerleyerek adım 2 durumuna gelir. Adım 2 pozisyonunda batıcı uc üzerinde test malzemesinin elastik + plastik deformasyonu vardır. Burada yeterli süre kaldıktan sonra uç üzerinden esas yükleme kuvveti kaldırılır. Uç adım 3 pozisyonuna geldiğinde üzerinde test malzemesinin sadece plastik deformasyonu kalır ve bu konumdan test malzemesinin sertliğine ASTM E18 standardına tanımlanan formüller kullanılarak karar verilir.



Şekil 1 Rockwell Sertlik Testi Yöntemi (Şematik Diyagram)



Şekil 2. Rockwell sertlik ölçümü

Elmas konik uç kullanılan Rockwell skalaları için sertlik değeri hesabı formülü aşağıdaki şekildedir.

$$\text{Rockwell Sertlik} = 100 - (h / 0,002)$$

$$\text{Rockwell Yüzeysel (Superficial) Sertlik} = 100 - (h \text{ (mm)} / 0,001)$$

Bilya uç kullanılan Rockwell skalaları için sertlik değeri hesabı formülü ise aşağıdaki şekildedir.

$$\text{Rockwell Sertlik} = 130 - (h \text{ (mm)} / 0,002)$$

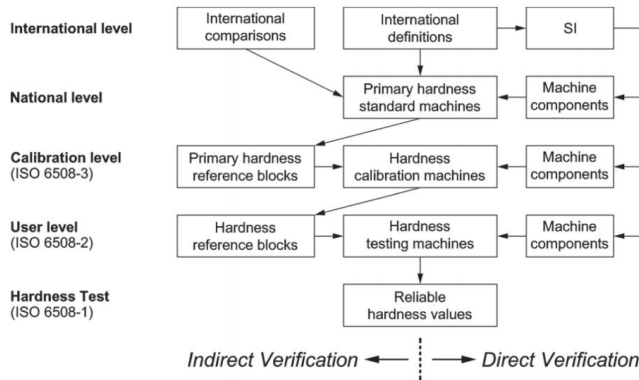
Rockwell Yüzeysel (Superficial) Sertlik = $100 - (h \text{ (mm)} / 0,001)$ hesaplanabilir.

Bu çalışmada, Rockwell sertlik ölçümünde belirsizlik hesaplaması ele alınacaktır. Çalışmada Rockwell sertlik ölçümleri için belirsizlik hesabı ASTM E18 standardı Ek X2 kısmına uygun şekilde açıklanmıştır. Bu çalışmada, ölçüm belirsizlik hesaplamasının uygulanmasını kolaylaştırmak ve sayısal örneklerle konuya açıklık getirebilmesi üzerine odaklanılmıştır. Bu çalışmada, ASTM E18 standardına göre Rockwell sertlik ölçümleri için ölçüm belirsizlik yaklaşımları, belirsizlik bileşenleri ve gereken bilgilere yer verilmiştir. Ayrıca ölçüm belirsizliği hesabının sayısal örnekler ile hesaplamaları detaylı olarak verilmiştir.

2. ASTM E18 STANDARDINA GÖRE ÖLÇÜM BELİRSİZLİĞİNİN BELİRLENMESİ

Sertlik alanındaki izlenebilirlik zinciri Şekil 3 de dört kademede olduğu gösterilmiştir. Zincir, uluslararası karşılaştırmaları yapmak için birçok tanımları kullanan uluslararası seviye ile başlar. Birçok birincil (primer) standart sertlik cihazları, kalibrasyon laboratuvarları seviyesi için birincil sertlik referans bloklarının kalibrasyonunda kullanılırlar. Bu cihazlar ilgili sertlik ölçeği standardında tanımlanan en iyi doğruluğu sahip cihazlardır.

Bu çalışmada, ASTM E18 standardının ek X2 verilen Rockwell sertliği ölçüm belirsizliğini belirlemek için prosedür ve örnekler göre verilen hesaplamalar esas olarak oluşturulmuştur.



Şekil 2. Sertlik ölçümlerinde izlenebilirlik zinciri

ASTM E18 standardında verilen belirsizliği belirleme yaklaşımı, yalnızca Rockwell sertlik makinasının referans standartlarına göre genel ölçüm performansı ile ilişkili belirsizlikleri dikkate alır. Bu performans belirsizlikleri, kuvvet uygulama sistemi ve derinlik ölçüm sistemi gibi makinanın çok sayıda ayrı bileşeniyle ilişkili ayrı belirsizliklerin birleşik etkisini yansıtır. Bu nedenle, makinanın ayrı bileşenleriyle ilişkili belirsizlikler hesaplamalara dahil edilmemiştir. Bu yaklaşım nedeniyle, ayrı makina bileşenlerinin toleranslar

dahilinde çalışması önemlidir. Bu hesaplama yalnızca doğrudan bir doğrulamayı veya kalibrasyonu başarıyla geçen cihazlarda uygulanması önerilir.

Bu belirsizlik hesaplamaları Rockwell sertlik makinasının ASTM E18 test yöntemi standardının prosedürlerine uygun olarak dolaylı bir doğrulama sonrası için uygundur.

Rockwell sertlik ölçüm değerlerinin genel belirsizliğini tahmin etmek için, belirsizliğin katkıda bulunan bileşenleri belirlenmelidir. Belirsizliklerin çoğu belirli sertlik ölçeğine ve sertlik seviyesine bağlı olarak değişebileceğinden, her bir sertlik ölçeği ve ilgili sertlik seviyesi için ayrı bir ölçüm belirsizliği belirlenmelidir. Birçok durumda, laboratuvarın sertlik makinasına bağlı bilgisine dayanarak bir dizi sertlik seviyesine tek bir belirsizlik değeri belirleyebilir.

Belirsizlik, bir ülkenin en yüksek referans standardı seviyesine veya başka bir ülkenin ulusal referans standardına göre belirlenmelidir. Bazı durumlarda, en yüksek referans standardı seviyesi ticari bir referans standardı da olabilir.

2.1. Genel Yaklaşım

Sertlik makinasının ölçüm sapması B, sertlik makinasının gösterdiği beklenen sertlik ölçüm değerleri ile bir malzemenin "gerçek" sertliği arasındaki farktır. İdeal olarak, ölçüm sapmaları düzeltilmelidir. Test sistemleri, Rockwell sertlik testlerinde sıklıkla olduğu gibi ölçüm sapması için düzeltilmediğinde, sapma daha sonra bir ölçümdeki genel belirsizliğe katkıda bulunur. Sapmaları belirsizlik hesaplamasına dahil etmek için bir dizi olası yöntem vardır ve bunların her birinin hem avantajları hem de dezavantajları vardır. Basit ve korumacı bir yöntem, sapmayı genişletilmiş belirsizliğin hesaplanmasıyla aşağıdaki formül ile birleştirmektir:

$$U = k \cdot u_c + \text{ABS}(B)$$

Ölçüm belirsizliğini değerlendirmek ve ifade etmek için çeşitli yaklaşımlar kullanılabileceğinden, bildirilen ölçüm belirsizliği değerlerinin neyi temsil ettiğine ilişkin kısa bir açıklama, bildirilen ölçüm belirsizliği değerinin yanına eklenmesi uygun olacaktır.

2.2. Belirsizlik Kaynakları

Rockwell sertlik ölçümündeki en önemli belirsizlik kaynakları ve sertlik değerindeki toplam belirsizliği hesaplamak için prosedür ve formüller bu bölümde verilecektir. Daha sonraki bölümlerde, bu belirsizlik kaynaklarının açıklanan 3 ölçüm durumu için toplam ölçüm belirsizliğine nasıl katkıda bulunduğu verilecektir.

Genel olarak belirsizlik kaynakları şunlardır:

1. Sertlik makinasının tekrarlanabilirlik eksikliği,
2. Test edilen malzemenin sertliğindeki düzensizlik,
3. Sertlik makinasının tekrar üretilebilirlik eksikliği,
4. Sertlik makinasının ölçüm ekranının çözünürlüğü
5. Referans test bloğunun sertifika değerindeki belirsizliktir.

Ölçüm sapmasının tahmini ve genişletilmiş belirsizliğe dahil edilmesi de ilave olarak ele alınacaktır. Tek tek belirsizlik kaynaklarının formül ve açıklamaları aşağıda verilmiştir.

Tekrarlanabilirlik Eksikliğinden Kaynaklanan Belirsizlik (u_{Repeat}) ve Uniform(homojen) Olmamayla Birleştiğinde ($u_{Rep\&NU}$)

Bir sertlik makinasının tekrarlanabilirliği, her ölçüm yapıldığında aynı sertlik değerini sürekli olarak ne kadar iyi tekrarlanabildiğinin bir göstergesidir. Tüm yüzeyinde sertliği mükemmel bir şekilde uniform (homojen) olan bir malzeme olduğunu düşünülebilir. Ayrıca, operatör de dahil olmak üzere test koşullarını değiştirmeden, bu uniform malzeme üzerinde kısa bir süre boyunca tekrar tekrar sertlik ölçümleri yapılır. Her test yerinin gerçek sertliği tam olarak aynı olsa bile, rastgele hatalar nedeniyle her ölçüm değerinin diğer tüm ölçüm değerlerinden farklı olacağı görülecektir. Bu nedenle, tekrarlanabilirliğin olmaması, sertlik makinasının her zaman malzemenin gerçek sertliğini ölçebilmesini engeller ve dolayısıyla ölçümdeki belirsizliğe katkıda bulunur.

Bir sertlik makinasının tekrarlanabilirlik eksikliğinin genel ölçüm belirsizliğine yaptığı katkı, tek bir ölçüm değeri veya birden fazla ölçümün ortalamasının raporlanmasına bağlı olarak farklı şekilde belirlenir. Ek olarak, raporlanan ortalama ölçüm değerinin test edilen malzemenin ortalama sertliğinin bir tahmini olması amaçlandığında, makinanın tekrarlanabilirlik eksikliğinden ve test malzemesinin sertliğindeki düzensizlikten kaynaklanan belirsizlik katkılarını ayırmak zordur ve birlikte belirlenmelidir. Bu koşulların her biri için belirsizlik katkıları aşağıdaki gibi tahmin edilebilir.

Tek Sertlik Ölçümü

Tek bir sertlik ölçümü için, tekrarlanabilirlik eksikliğinden kaynaklanan standart belirsizlik katkısı u_{repeat} , uniform bir test numunesi üzerinde yapılan bir dizi sertlik ölçümünden elde edilen değerlerin standart sapmasıyla şu şekilde tahmin edilebilir.

$$u_{repeat} = STDEV (H1, H2, \dots, Hn) \quad (1)$$

burada $H1, H2, \dots, Hn$ sertlik değeridir. Genel olarak, sertlik ölçümlerinin sayısı arttıkça tekrarlanabilirlik tahmini iyileştirilir. Genellikle, dolaylı bir

doğrulama sırasında ölçülen sertlik değerleri u_{repeat} için yeterli bir tahmin sağlayacaktır.

Çoklu Ölçümlerin Ortalaması

Birden fazla sertlik testi değerinin ortalamasının raporlanması gerektiğinde, sertlik makinasının tekrarlanabilirlik eksikliği nedeniyle standart belirsizlik katkısı $u_{repeat--}$, standart belirsizlik katkısı u_{repeat} 'ın ortalaması alınan sertlik testi değerlerinin sayısının kareköküne bölünmesiyle tahmin edilebilir.

$$u_{repeat--} = u_{repeat} / \sqrt{n_T}$$

burada n_T ortalaması alınan sertlik testi değerlerinin sayısıdır.

Malzeme Sertliğinin Tahmini

Sertlik ölçümleri genellikle birkaç yerde yapılır ve malzemenin bir bütün olarak ortalama sertliğini tahmin etmek için değerler ortalaması alınır. Örneğin, bu birçok ürün türünün üretimi sırasında kalite kontrol ölçümleri yaparken; dolaylı bir doğrulamanın parçası olarak makina hatası E'yi belirlerken ve bir test bloğunu kalibre ederken yapılabilir. Tüm malzemeler test yüzeyi boyunca bir miktar sertlik düzensizliği gösterdiğinden, bir malzemenin düzensizliğinin derecesi de malzemenin ortalama sertliğinin bu tahminindeki belirsizliğe katkıda bulunur. Birden fazla sertlik ölçüm değerinin ortalaması, ortalama malzeme veya ürün sertliğinin bir tahmini olarak hesaplandığında, bu değerdeki belirsizliğin malzemenin gerçek sertliğine göre belirtilmesi istenebilir. Bu durumda, sertlik makinasında tekrarlanabilirliğin olmaması ve test malzemesindeki düzensizlikten kaynaklanan birleşik belirsizlik katkıları, sertlik ölçüm değerlerinin "ortalama standart sapmasından" tahmin edilebilir. Bu, sertlik değerlerinin standart sapmasının, ölçüm sayısının kareköküne bölünmesiyle hesaplanır:

$$u_{Rep\&NU} = \frac{STDEV(H_{T1}, H_{T2}, \dots, H_{Tn})}{\sqrt{n_T}} \quad (2)$$

burada $H_{T1}, H_{T2}..$ sertlik değerleri, n_T ölçüm değerlerinin sayısıdır.

Tekrar Üretilirliğin Eksikliğinden Kaynaklanan Belirsizlik (u_{Reprod})

Sertlik makinasının performansındaki günlük değişime, yeniden üretilebilirlik seviyesi denir. Farklı makina operatörleri ve test ortamındaki değişiklikler gibi değişimler genellikle sertlik makinasının performansını etkiler. Üretilirlik seviyesi, sertlik makinasının test değişkenleri uç noktadaki değişimlere maruz kaldığı uzun bir süre boyunca sertlik makinasının performansının izlenmesiyle en iyi şekilde belirlenir. Tekrar üretilebilirliğin değerlendirilmesi sırasında test makinasının kontrol altında olması çok önemlidir. Makina bakıma ihtiyaç

duyuyorsa veya yanlış çalıştırılıyorsa, tekrar üretilebilirlik eksikliği fazla bir değer olacaktır.

Bir sertlik makinasının tekrar üretilebilirlik eksikliğini değerlendirilmesi, zaman içinde aynı test bloğu üzerinde yapılan periyodik doğrulama ölçümleri gibi sertlik makinasının periyodik izleme ölçümlerine dayanmalıdır. Belirsizlik katkısı, her bir izleme değerleri kümesinin ortalamasının standart sapmasıyla aşağıdaki şekilde tahmin edilebilir:

$$u_{\text{Reprod}} = \text{STDEV} (M_1, M_2, \dots, M_n) \quad (3)$$

burada $M_1, M_2, \dots, M_n$, birden fazla izleme ölçüm değerinin her bir n kümesinin bireysel ortalamalarıdır.

Denklem 3'da hesaplandığı gibi, tekrar üretilebilirlik eksikliğinden kaynaklanan belirsizlik katkısı, makinanın tekrarlanabilirlik eksikliğinden ve izleme test bloğunun uniform olmamasından kaynaklanan bir katkıyı da içerir; ancak, bu katkılar çoklu ölçümlerin ortalamasına dayanır ve tekrar üretilebilirlik belirsizliğini önemli ölçüde abartmamalıdır.

Ölçüm Sisteminin Çözünürlüğünden Kaynaklanan Belirsizlik (u_{Resol})

İz ölçüm sisteminin sonlu çözünürlüğü, sertlik makinasının kesinlikle doğru bir sertlik değeri sağlamasını engeller. Ancak, ekran çözünürlüğünün ölçüm belirsizliği üzerindeki etkisi genellikle yalnızca sertlik ekran çözünürlüğü 0,5 Rockwell sertlik biriminden daha kaba olduğunda önemlidir. Ölçüm sistemi çözünürlüğü r 'nin etkisinden kaynaklanan belirsizlik katkısı u_{Resol} , dikdörtgen bir dağılımla tanımlanabilir ve şu şekilde tahmin edilebilir:

$$u_{\text{Resol}} = \frac{r/2}{\sqrt{3}} = \frac{r}{\sqrt{12}} \quad (4)$$

burada r , ölçüm sisteminin Rockwell sertlik birimleri cinsinden bir sertlik değerinin tahmin edilebileceği çözünürlük sınırıdır.

Referans Test Bloğunun Ortalama Sertlik Değerindeki Standart Belirsizlik (u_{RefBlk})

Referans test bloklarının ilgili sertifikasında belirtilen bir belirsizlik değeri ve referans test bloğu değerinin Rockwell standardına göre izlenebilir olduğunu görülebilmelidir. Bu belirsizlik, referans test blokları ile kalibre edilen veya doğrulanan sertlik makinalarının ölçüm belirsizliğine katkıda bulunur. Referans test bloğu sertifikalarında bildirilen belirsizliğin genellikle genişletilmiş belirsizlik olduğu unutulmamalıdır. Genişletilmiş belirsizlik, standart

belirsizliğin bir kapsam faktörüyle (genellikle 2 ile) çarpılmasıyla hesaplanır. Bu hesaplamada, genişletilmiş belirsizlik değerinin yerine standart belirsizlik kullanır. Bu nedenle, referans test bloğunun sertifikalı değerindeki belirsizlikten kaynaklanan belirsizlik değeri genellikle şu şekilde hesaplanabilir:

$$u_{RefBlk} = \frac{U_{RefBlk}}{k} \quad (5)$$

burada, $U_{(RefBlk)}$ referans test bloğunun sertifikalı değerinin bildirilen genişletilmiş belirsizliği ve k referans standardının sertifikalı değerindeki belirsizliği hesaplamak için kullanılan kapsam faktörüdür (genellikle 2).

Ölçüm Sapması (B)

Ölçüm sapması, sertlik makinasının gösterdiği sertlik ölçüm değerleri ile bir malzemenin "gerçek" sertliği arasındaki farktır. Ölçüm sapması B , dolaylı doğrulamanın bir parçası olarak belirlenen hata E ile şu şekilde tahmin edilebilir:

$$B = H^- - H_{RefBlk}^- \quad (6)$$

burada H^- dolaylı doğrulama sırasında sertlik makinasının ölçtüğü ortalama sertlik değeridir ve H_{RefBlk}^- dolaylı doğrulama için kullanılan referans test bloğu standardının sertifikalı ortalama sertlik değeridir.

2.3. Belirsizlik Hesaplama Prosedürü: Dolaylı Doğrulama

Bu bölümde, kalibrasyon yapan laboratuvar tarafından, sertlik makinasının sertlik ölçüm hatası E_H 'deki belirsizliği U_{Mach} 'ı, ölçüm değerlerinin ortalaması ile doğrulama için kullanılan referans bloğunun sertifikalı değeri arasındaki fark olarak tahmin etmek için kullanılabilecek bir prosedür açıklanmaktadır. Sertlik ölçümünde her zaman belirsizlik olduğundan, ölçümlerin ortalama değerinin belirlenmesinde ve dolayısıyla makina hatasının belirlenmesinde belirsizlik olması gerektiği sonucu çıkar.

Sertlik ölçüm hatasının standart belirsizliğine (u_{Mach}), katkı sağlayan parametreler şunlardır:

(1) $u_{Rep\&NU}$ (Ref. Blok), sertlik makinasının tekrarlanabilirlik eksikliğinden kaynaklanan belirsizlik, sertlik makinasının hatası E 'yi belirlemek için bir referans test bloğunda yapılan sertlik ölçümlerinden belirlenen referans test bloğundaki (denklem 2) düzensizlikten kaynaklanan belirsizlikle birleştirilmiştir. $u_{Rep\&NU}$ terimine, belirsizliğin dolaylı doğrulama için kullanılan referans blokta yapılan ölçümlerden belirlendiğini açıklığa kavuşturmak için (Ref. Blok) eki eklenmiştir.

(2) u_{Resol} , sertlik birimlerinde iz ölçüm sisteminin (denklem 4) çözünürlüğünden kaynaklanan belirsizlik ve

(3) u_{RefBlk} , referans test bloğunun sertifika değerindeki standart belirsizlik (denklem 7) parametreleridir.

Birleşik standart belirsizlik u_{Mach} ve genişletilmiş belirsizlik U_{Mach} , her Rockwell sertlik ölçeğinin her sertlik seviyesi için yukarıda açıklanan uygun belirsizlik bileşenlerinin birleştirilmesiyle hesaplanır:

$$u_{Mach} = \sqrt{u_{Rep\&NU}^2(Ref. Blok) + u_{Resol}^2 + u_{RefBlk}^2} \quad (7)$$

$$U_{Mach} = k \cdot u_{Mach} \quad (8)$$

Bu hesaplama için ASTM E18 standardına göre $k = 2$ 'lik bir kapsam faktörü kullanılmalıdır. Bu kapsama faktörü yaklaşık %95'lik bir güven düzeyi sağlar.

Ölçüm Belirsizliğinin Bildirilmesi

Genişletilmiş belirsizlik U_{Mach} , bir kalibrasyon laboratuvarı tarafından müşterisine, bir Rockwell sertlik makinasının dolaylı doğrulamasının bir parçası olarak bildirilen sertlik makinası hatası E'deki belirsizliğin bir göstergesi olarak bildirilebilir. U_{Mach} değeri, belirsizliğin hangi Rockwell sertlik ölçeğine ve sertlik seviyesine uygulanabileceğini tanımlayan bir ifadeyle desteklenmeli ve standartta belirtildiği şekilde “Belirtilen sertlik ölçeği ve sertlik seviyesi için dolaylı doğrulamanın bir parçası olarak bildirilen sertlik makinası hatası E'nin genişletilmiş belirsizliği yaklaşık %95'lik bir güven aralığında ve 2 kapsam faktörü ile ASTM E18'nin Ek X2'ine uygun olarak hesaplanmıştır.” gibi açıklayıcı bir ifadeyle verilmelidir.

ASTM E18 de verilmiş bu konu ile ilgili örnek X2.1 de verilmiştir. Bu örnekte U_{Mach} 'ın nasıl hesaplanacağını örnek olarak verilir. Bu örnek için 25,7 HRC sertifikalı değere ve $U_{RefBlk} = 0,45$ HRC genişletilmiş belirsizliğe sahip bir Rockwell C referans bloğu üzerinden alınan ölçümler için yapılmıştır. Test cihazının çözünürlüğü 0,1 HRC'dir. Blok üzerinde beş doğrulama ölçümü gerçekleştirildi ve sertlik değerleri Tablo 3 de verilmiştir. Ortalama sertlik değeri 25,44 HRC olarak hesaplanmıştır.

Tablo 3. Referans bloktan alınan sertlik ölçüm sonuçları

Ölçülen değerler, HRC					Ortalama, x	Tekrarlanabilirlik	u rep NU
1	2	3	4	5	HRC	HRC	HRC
25,4	25,3	25,5	25,3	25,7	25,44	0,4	0,075

Bu sonuçlar kullanılarak ölçüm belirsizliği hesabı aşağıdaki gibi gerçekleştirilebilir.

$$u_{Rep\&NU}(Ref. Blok) = \frac{STDEV(25,4, 25,3, 25,5, 25,3, 25,7)}{\sqrt{5}} = 0,075 \text{ HRC}$$

$r = 0,1 \text{ HRC}$

$$u_{\text{Resol}} = \frac{r/2}{\sqrt{3}} = \frac{0,1}{\sqrt{12}} = 0,029 \text{ HRC}$$
$$u_{\text{RefBlk}} = \frac{0,45}{2} = 0,225 \text{ HRC}$$

Toplam belirsizlik,

$$u_{\text{Mach}} = \sqrt{u_{\text{Rep\&NU}}^2(\text{RefBlok}) + u_{\text{Resol}}^2 + u_{\text{RefBlk}}^2}$$
$$= \sqrt{0,075^2 + 0,029^2 + 0,225^2} = 0,239 \text{ HRC}$$
$$U_{\text{Mach}} = k \cdot u_{\text{Mach}} = 2 \cdot 0,239 = 0,48 \text{ HRC}$$

Sonuç olarak, sertlik makinasındaki $-0,26 \text{ HRC}$ hata E_H 'deki belirsizlik $0,48 \text{ HRC}$ 'tür. Bu değerlendirme yaklaşık 25 HRC sertliğe sahip bir malzeme üzerinde yapılmış olsa da, belirsizliğin HRC sertlik ölçeğinin düşük seviye aralığına uygulandığı düşünülebilir. Bu hesaplama, HRC sertlik ölçeğinin orta ve yüksek sertlik ölçeklerinin aralıkları için de yapılmalıdır.

2.4. Belirsizliği Hesaplama Prosedürü: Rockwell Sertlik Ölçüm Değerleri

Bir kullanıcı tarafından ölçülen bir sertlik değerindeki belirsizlik U_{Meas} , ölçülen değer malzemenin sertliğinin "gerçek" değeriyle ne kadar uyumlu olduğunun bir göstergesi olarak ifade edilir.

Tek Ölçüm Değeri için

Tek bir sertlik ölçüm değeri için ölçüm belirsizliği belirlenecekse, standart belirsizlik u_{Meas} 'a aşağıdaki bileşenler katkıda bulunur.

(1) u_{Repeat} , makinanın tekrarlanabilirlik eksikliğinden kaynaklanan belirsizlik (Denklem 1),

(2) u_{Reprod} , tekrar üretilebilirlik eksikliğinden kaynaklanan belirsizlik katkısı (Denklem 3),

(3) u_{Resol} , ölçüm sisteminin çözünürlüğünden kaynaklanan belirsizlik (Denklem 4) ve

(4) u_{Mach} , sertlik makinasının hatası E 'yi belirlemedeki belirsizlik (Denklem 9).

Birleşik standart belirsizlik u_{Meas} , uygulanabilir sertlik seviyesi ve Rockwell sertlik ölçeği için yukarıda açıklanan uygun belirsizlik bileşenleri birleştirilerek hesaplanır:

$$u_{\text{Meas}} = \sqrt{u_{\text{Repeat}}^2 + u_{\text{Reprod}}^2 + u_{\text{Resol}}^2 + u_{\text{Mach}}^2} \quad (9)$$

Ortalama Ölçüm Değeri için

Aynı test parçası veya birden fazla test parçası üzerinde yapılan birden fazla sertlik ölçümünün ortalama değeri için ölçüm belirsizliğinin belirlenmesi durumunda, standart belirsizlik u_{Meas} 'e aşağıdaki bileşenler katkıda bulunur.

(1) $u_{Repeat-}$, birden fazla ölçümün ortalamasına dayalı olarak makinanın tekrarlanabilirlik eksikliğinden kaynaklanan belirsizlik (Denklem 1),

(2) u_{Reprod} , tekrar üretilebilirlik eksikliğinden kaynaklanan belirsizlik katkısı (Denklem 3),

(3) u_{Resol} , ölçüm sisteminin çözünürlüğünden kaynaklanan belirsizlik (Denklem 4) ve

(4) u_{Mach} , sertlik makinasının hatası E'yi belirlemedeki belirsizlik (Denklem 9).

Birleşik standart belirsizlik u_{Meas} , uygulanabilir sertlik seviyesi ve Rockwell sertlik ölçeği için yukarıda açıklanan uygun belirsizlik bileşenleri birleştirilerek hesaplanır:

$$u_{Meas} = \sqrt{u_{Repeat-}^2 + u_{Reprod}^2 + u_{Resol}^2 + u_{Mach}^2} \quad (10)$$

Yukarıda belirtilen tek ve ortalama sertlik değerleri için tartışılan ölçüm belirsizliğinin yalnızca ölçüm sürecinin belirsizliklerini temsil eder.

Ortalama Ölçüm Değeri, Ortalama Malzeme Sertliğinin Tahmini Olarak

Ölçüm laboratuvarları ve üretim tesisleri genellikle test malzemesinin ortalama sertliğini tahmin etmek amacıyla bir test numunesinin veya ürününün Rockwell sertliğini ölçerler. Genellikle, test parçasının yüzeyi boyunca birden fazla sertlik ölçümü yapılır ve ardından sertlik değerlerinin ortalaması, malzemenin ortalama sertliğinin bir tahmini olarak raporlanır. Belirsizliğin, ortalama ölçüm değerinin malzemenin gerçek ortalama sertliğini ne kadar iyi temsil ettiğinin bir göstergesi olarak raporlanması isteniyorsa, standart belirsizlik u_{Meas} 'a aşağıdaki bileşenler katkıda bulunur.

(1) $u_{Rep\&NU}$ (Malzeme), makinanın tekrarlanabilirlik eksikliğinden kaynaklanan belirsizlik, malzemenin homojen olmamasından kaynaklanan belirsizlikle ifade edilir. Değeri denklem 2 yardımıyla test malzemesi üzerinde yapılan sertlik ölçümlerinden belirlenir. $u_{Rep\&NU}$ terimine, belirsizliğin test edilen malzeme üzerinde yapılan ölçümlerden belirlendiğini açıklığa kavuşturmak için (Malzeme) ifadesi eklenmiştir.

(2) u_{Reprod} , tekrar üretilebilirlik eksikliğinden kaynaklanan belirsizlik katkısı (Denklem 3),

(3) u_{Resol} , ölçüm sisteminin çözünürlüğünden kaynaklanan belirsizlik (Denklem 4) ve

(4) u_{Mach} , sertlik makinasının hatası E'yi belirlemedeki belirsizlik (Denklem 9).

Birleşik standart belirsizlik u_{Meas} , uygulanabilir sertlik seviyesi ve Rockwell sertlik ölçeği için yukarıda açıklanan uygun belirsizlik bileşenleri birleştirilerek hesaplanır:

$$u_{Meas} = \sqrt{u_{Rep\&NU}^2(\text{malzeme}) + u_{Reprod}^2 + u_{Resol}^2 + u_{Mach}^2} \quad (11)$$

Belirsizliği, ortalama ölçüm değerinin malzemenin gerçek ortalama sertliğini ne kadar iyi temsil ettiğinin bir göstergesi olarak bildirirken, malzemenin sertliğindeki herhangi temsili bir örneklemesini sağlamak için uygun test yerlerinde yeterli sayıda ölçüm yapıldığından emin olmak önemlidir.

Genişletilmiş belirsizlik U_{Meas} , yukarıda verilen 3 durum için aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$U_{Meas} = k \cdot u_{Meas} + ABS(B) \quad (12)$$

Bu analiz için $k = 2$ 'lik bir kapsama faktörü kullanılmalıdır. Bu kapsama faktörü yaklaşık %95'lik bir güven aralığını ifade eder.

Ölçüm Belirsizliğinin Raporlanması

Tek ve Ortalama Ölçüm Değerleri

Raporlanan ölçüm değeri tek bir sertlik testi veya birden fazla sertlik testinin ortalaması olduğunda, U_{Meas} değeri, "Raporlanan sertlik değerinin (veya ortalama sertlik değerinin) genişletilmiş ölçüm belirsizliği, sertlik referans standartlarına göredir ve yaklaşık %95'lik bir güven aralığını temsil eden 2'lik bir kapsam faktörü ile ASTM E18'nin Ek X2'ine uygun olarak hesaplanmıştır." gibi açıklayıcı bir ifadeyle verilmesi standarda göre uygun olur.

Ortalama Ölçüm Değeri, Ortalama Malzeme Sertliğinin Bir Tahmini Olarak

Ortalama ölçüm değerinin malzemenin gerçek ortalama sertliğini ne kadar iyi temsil ettiğinin bir göstergesi olarak belirsizliği bildirmek istendiğinde, U_{Meas} değeri, "Test edilen malzemenin bildirilen ortalama sertliğinin genişletilmiş belirsizliği, ölçüm sürecinden ve malzemenin sertliğinin homojen olmamasından kaynaklanan belirsizlik katkılarına dayanmaktadır. Belirsizlik, sertlik referans standartlarına göredir ve yaklaşık %95'lik bir güven aralığını temsil eden 2'lik bir kapsam faktörü ile ASTM E18'nin Ek X2'ine uygun olarak hesaplanmıştır." gibi açıklayıcı bir ifadeyle verilmelidir. Test raporunda ortalaması alınan ölçüm sayısı ve ölçümlerin yapıldığı yerler belirtilmiyorsa, bu bilgi belirsizliğin nasıl

hesaplandığına ilişkin kısa açıklamanın bir parçası olarak da eklenmesi tavsiye edilir.

ASTM E18 de verilmiş bu konu ile ilgili örnek X2.2 de verilmiştir. Bu örnekte, bir laboratuvar, ürün sertliğini tahmin etmek için yüzeyinde 6 adet HRC sertlik ölçümü almıştır. Ürünün sertlik ölçümlerinin değerleri aşağıdaki tablo 4 te verilmiştir. Ölçüm cihazının çözünürlüğü 0,5 HRC'dir. Laboratuvar, ortalama sertlik değerindeki ölçüm belirsizliğini belirlemek ister. 31,92 HRC sertlik, HRC test aralığının orta aralığındadır. HRC test aralığının orta aralığının son dolaylı doğrulaması $U_{Mach} = 0,8$ HRC ve hata $E = -0,3$ HRC bildirilmiştir.

Tablo 4. Test numunesinden alınan sertlik ölçüm sonuçları

Ölçülen değerler, HRC						Ortalama a, x	Tekrarlanabilirlik	u_{rep} NU
1	2	3	4	5	6	HRC	HRC	HRC
33,0	31,5	31,5	32,0	31,0	32,5	31,92	2,0	0,300

Bu sonuçlar kullanılarak ölçüm belirsizliği hesabı aşağıdaki gibi gerçekleştirilebilir.

$$u_{Rep\&NU}(\text{Malzeme}) = \frac{STDEV(33, 31.5, 31.5, 32, 31, 32.5)}{\sqrt{6}} = 0,300 \text{ HRC}$$

$$u_{Reprod} = STDEV(M1, M2, \dots, Mn) = 0,21 \text{ HRC olduğu örnekte verilmiştir.}$$

$$r = 0,5 \text{ HRC}$$

$$u_{Resol} = \frac{r/2}{\sqrt{3}} = \frac{0,5}{\sqrt{12}} = 0,144 \text{ HRC}$$

$$u_{Mech} = \frac{0,8}{2} = 0,4 \text{ HRC}$$

Toplam belirsizlik,

$$u_{Meas} = \sqrt{u_{Rep\&NU}^2(\text{malzeme}) + u_{Reprod}^2 + u_{Resol}^2 + u_{Mach}^2}$$

$$= \sqrt{0,3^2 + 0,21^2 + 0,144^2 + 0,4^2} = 0,561 \text{ HRC}$$

$$U_{Meas} = k \cdot u_{Meas} + ABS(B) = 2 \cdot 0,561 + ABS(-0,3) = 1,42 \text{ HRC}$$

HRC ortalama değer için tek ölçüm üzerinde yapılan sertlik ölçümlerinin sonucu olarak verilebilir.

Belirsizliği Hesaplama Prosedürü: Standard Test Bloklarının Sertifikalı Değerine Göre

Referans test bloklarının kalibrasyonu ile uğraşan kalibrasyon laboratuvarları, bildirilen sertifikalı değerdeki belirsizliği belirlemelidir. Bu belirsizlik U_{Cert} ,

sertifikalı değerin test bloğunun "gerçek" ortalama sertliğiyle ne kadar uyumlu olduğuna dair bir gösterge sağlar.

Test blokları, test bloğunun yüzeyi boyunca yapılan kalibrasyon ölçümlerine dayalı olarak ortalama bir sertlik değerine sahip olarak sertifikalandırılır. Bu analiz, esasen bir ürünün ortalama sertliğini ölçmek için yapılan işlem ile aynıdır. Bu durumda, ürün kalibre edilmiş bir referans test bloğudur. Test bloğunun sertifikalı ortalama değerinin standart belirsizliğine U_{Cert} katkı sağlayan bileşenler aşağıda tanımlanmıştır.

(1) $u_{Rep\&NU}$ (Calib.Blok), standart makinaların tekrarlanabilirlik eksikliğinden kaynaklanan belirsizlik, kalibre edilmiş blokların homojen olmamasından kaynaklanan belirsizlikle denklem 2 kullanılarak hesaplanır ve test bloğu üzerinde yapılan kalibrasyon ölçümlerinden belirlenir. Belirsizliğin kalibre edilmiş blok üzerinde yapılan kalibrasyon ölçümlerinden belirlendiğini açıklamak için $u_{Rep\&NU}$ teriminin yanına (Calib.Blok) ifadesi eklenir.

(2) U_{Reprod} , yeniden üretilebilirlik eksikliğinden kaynaklanan belirsizlik katkısı (Denklem 3),

(3) u_{Resol} , ölçüm sisteminin çözünürlüğünden kaynaklanan belirsizlik (Denklem 4) ve

(4) u_{Mach} , sertlik makinasının hatası E'yi belirlemedeki belirsizlik (Denklem 9).

Birleşik standart belirsizlik u_{Cert} , uygulanabilir sertlik seviyesi ve Rockwell sertlik ölçeği için yukarıda açıklanan uygun belirsizlik bileşenleri birleştirilerek hesaplanır:

$$u_{Cert} = \sqrt{u_{Rep\&NU}^2(Cal. Blok) + u_{Reprod}^2 + u_{Resol}^2 + u_{Mach}^2} \quad (15)$$

$$U_{Cert} = k \cdot u_{Cert} + ABS(B) \quad (16)$$

Bu analiz için $k = 2$ 'lik bir kapsama faktörü kullanılmalıdır. Bu kapsama faktörü yaklaşık %95'lik bir güven aralığını ifade eder.

U_{Cert} değerinin yanında, "Test edilen sertifikalı bloğun bildirilen ortalama sertliğinin genişletilmiş belirsizliği, ölçüm sürecinden ve malzemenin sertliğinin homojen olmamasından kaynaklanan belirsizlik katkılarına dayanmaktadır. Belirsizlik, sertlik referans standartlarına göredir ve yaklaşık %95'lik bir güven aralığını temsil eden 2'lik bir kapsam faktörü ile ASTM E18'nin Ek X2'ine uygun olarak hesaplanmıştır." gibi açıklayıcı bir ifadeyle standarda göre verilmesi gereklidir.

ASTM E18 de verilmiş bu konu ile ilgili örnek X2.3 de verilmiştir. Bu örnekte, bir ikinci seviye test blok standart laboratuvar, sertliği tahmin etmek için yüzeyinde 5 adet HRC sertlik ölçümü almıştır. Ürünün sertlik ölçümlerinin değerleri aşağıdaki Tablo 5 de HRC değeriyle verilmiştir. Sertlik ölçümlerinde kullanılan cihazın çözünürlüğü 0,01 HRC'dir. Laboratuvar, orta sertlik değerindeki ölçüm belirsizliğini belirlemek 40 HRC değerinde referans kullanılır. HRC sertlik skalasında son dolaylı doğrulaması $U_{Mach} = 0,16$ HRC ve $+0,11$ HRC hata E'yi bildirmiştir.

Tablo 5. Kalibrasyon blok numunesinden alınan sertlik ölçüm sonuçları

Ölçülen değerler, HRC						Ortalama, $\bar{x}$	Tekrarlılık	$u_{rep\ NU}$
1	2	3	4	5	6	HRC	HRC	HRC
40,61	40,72	40,65	40,61	40,55	40,63	0,17	0,06	0,028

Bu sonuçlar kullanılarak ölçüm belirsizliği hesabı aşağıdaki gibi gerçekleştirilebilir.

$$u_{Rep\&NU}(\text{Calib. Blok}) = \frac{STDEV(40.61, 40.72, 40.65, 40.61, 40.55)}{\sqrt{5}}$$

$$= 0,028 \text{ HRC}$$

$u_{Reprod} = STDEV(M1, M2, \dots, Mn) = 0,125$ HRC olduğu örnekte verilmiştir.
 $r_H = 0,01$ HRC

$$u_{Resol} = \frac{r_H/2}{\sqrt{3}} = \frac{r_H}{\sqrt{12}} = 0,003 \text{ HRC}$$

$$u_{Mech} = \frac{0,16}{2} = 0,08 \text{ HRC}$$

Toplam belirsizlik,

$$u_{Meas} = \sqrt{u_{Rep\&NU}^2(\text{Calib. Blok}) + u_{Reprod}^2 + u_{Resol}^2 + u_{Mach}^2}$$

$$= \sqrt{0,028^2 + 0,125^2 + 0,003^2 + 0,08^2} = 0,151 \text{ HRC}$$

$$U_{Meas} = k \cdot u_{Meas} + ABS(B) = 2 \cdot 0,151 + ABS(0,11) = 0,41 \text{ HRC}$$

HRC ortalama değer için tek ölçüm üzerinde yapılan sertifikalı sertlik test bloğu ölçümlerinin sonucu olarak verilebilir.

3. ASTM E18 STANDARDINA BENZER ÖRNEK SAYISAL BELİRSİZLİK HESAPLAMALARI

ASTM E18 de verilen örneklere benzer şekilde farklı durumlar için belirsizlik hesaplama örnekleri aşağıda verilmiştir.

Örnek 1

Eğer bir sertifikalı bir referans bloğunu var ise bunu kullanarak sertlik makinanızın belirsizlik seviyesini belirlemeniz gerektiğinde ASTM E18 örnek X2.1 e ve aşağıda verilen örneğe benzer şekilde belirsizlik hesabı yapabilirsiniz.

Bu örnekte U_{Mach} 'ın nasıl hesaplanacağını örneği verilmiştir. Elinizde 45,32 HRC sertifikalı değere ve $U_{RefBlk} = 0,34$ HRC genişletilmiş belirsizliğe sahip bir Rockwell referans bloğunuzun olduğunu düşünelim. Sertlik cihazının gösterge çözünürlüğü 0,1 HRC'olsun. Blok üzerinde beş adet ölçüm gerçekleştirip aşağıda Tablo 6 te verilen değerlerin ölçülmüştür. Bu değerlere göre ölçüm belirsizliği hesaplaması aşağıdaki şekilde yapılmalıdır.

Tablo 6. Referans bloktan alınan sertlik ölçüm sonuçları

Ölçülen değerler						Ort., x
ölçüm	1	2	3	4	5	HRC
HRC =	45,1	45,3	45,2	45,4	45,1	45,22

Bu sonuçlar kullanılarak ölçüm belirsizliği hesabı aşağıdaki gibi gerçekleştirilebilir.

$$u_{Rep\&NU}(\text{Ref. Blok}) = \frac{STDEV(45,1, 45,3, 45,2, 45,4, 45,1)}{\sqrt{5}} = 0,13 \text{ HRC}$$

$$r = 0,1 \text{ HRC}$$

$$u_{Resol} = \frac{r / 2}{\sqrt{3}} = \frac{r}{\sqrt{12}} = 0,029 \text{ HRC}$$

$$u_{RefBlk} = \frac{0,34}{2} = 0,17 \text{ HRC}$$

Toplam belirsizlik,

$$u_{Mach} = \sqrt{u_{Rep\&NU}^2(\text{Ref. Blok}) + u_{Resol}^2 + u_{RefBlk}^2}$$

$$= \sqrt{0,13^2 + 0,029^2 + 0,17^2} = 0,18 \text{ HRC}$$

$$U_{Mach} = k \cdot u_{Mach} = 2 \cdot 0,18 = 0,36 \text{ HRC}$$

Örnek 2

Eğer bir test numuneniz ve sertifikalı bir referans bloğunu var ise bunu kullanarak sertlik makinanızın belirsizlik seviyesini belirlemeniz gerektiğinde ASTM E18 örnek X2.2 ye ve aşağıda verilen örneğe benzer şekilde belirsizlik hesabı yapabilirsiniz.

Bu örnekte U_{Meas} 'ın nasıl hesaplanacağını örneği verilmiştir. Ölçümü istenen malzemenin sertlik ölçümlerinin standarda uygun olarak gerçekleştirilmiş ve aşağıda Tablo 7 de verilen HRA değeri elde edilmiştir. Ayrıca elinizde 60,68 HRA sertifikalı değere ve $U_{RefBlk} = 0,8$ HRA genişletilmiş belirsizliğe sahip bir Rockwell referans bloğunuzun olduğunu düşünelim. Referans blok üzerinde beş

adet ölçüm gerçekleştirip aşağıda Tablo 8 da verilen değerlerin ölçülmüştür. Ölçüm sistemi çözünürlüğü 0,1 HRA olsun. Bu değerlere göre ölçüm belirsizliği hesaplaması aşağıdaki şekilde yapılmalıdır.

Tablo 7. Test numunesinden alınan sertlik ölçüm sonuçları

Ölçülen Sertlik değerleri					Ort., x
1	2	3	4	5	HRA
60,5	60,8	60,5	60,9	60,8	60,7

Bu sonuçlar kullanılarak ölçüm belirsizliği hesabı aşağıdaki gibi gerçekleştirilebilir.

$$u_{Rep\&NU}(\text{Malzeme}) = \frac{STDEV(60,5, 60,8, 60,5, 60,9, 60,8)}{\sqrt{5}} = 0,084 \text{ HRA}$$

Tablo 8. Referans bloktan alınan sertlik ölçüm sonuçları

Ölçülen Sertlik değerleri					Ort., x
1	2	3	4	5	HRA
60,8	60,6	60,9	60,5	60,6	60,68

$$B = H_{CRM} - H_x = 60,68 - 60,70 = 0,02 \text{ HRA}$$

$$u_{Reprod} = STDEV(60,8, 60,6, 60,9, 60,5, 60,6) = 0,16 \text{ HRA}$$

Elinde referans bloğu olmayan bir laboratuvar referans blok ölçüm değerlerini cihazın kalibrasyonunu yapan laboratuvarın sertifikasından değerleri alarak bu değerler elde edebilir. Sertlik cihazının kalibrasyonu için farklı sertlik seviyelerinde referans sertlik blokları ile ölçümler gerçekleştirilmesi gereklidir. Bu blok ölçümlerinden en büyük hataya sahip blok değeri olarak u_{reprod} değerini yapılan ölçüm sonuçlarını kullanarak hesaplayabilir.

$$r = 0,1 \text{ HRA}$$

$$u_{Resol} = \frac{r / 2}{\sqrt{3}} = \frac{r}{\sqrt{12}} = 0,029 \text{ HRA}$$

$$u_{Mech} = \frac{0,80}{2} = 0,40 \text{ HRA}$$

Toplam belirsizlik,

$$u_{Meas} = \sqrt{u_{Rep\&NU}^2(\text{malzeme}) + u_{Reprod}^2 + u_{Resol}^2 + u_{Mach}^2}$$

$$= \sqrt{0,084^2 + 0,029^2 + 0,084^2 + 0,40^2} = 0,46 \text{ HRA}$$

$$U_{Meas} = k \cdot u_{Meas} + ABS(B) = 2 \cdot 0,46 + ABS(0,02) = 0,94 \text{ HRA}$$

Örnek 3

Elinde referans bloğunuz var ve cihazının kalibrasyonu içinde ilave referans sertlik bloğunuz var ise ASTM E18 standardının örnek X1,3 e ve aşağıda verilen örneğe benzer şekilde belirsizlik hesabı yapabilirsiniz.

Bu örnekte U_{Meas} 'ın nasıl hesaplanacağını örneği verilmiştir. Ölçümü istenen referans sertlik bloğunun sertlik ölçümlerinin standarda uygun olarak gerçekleştirilmiş ve aşağıda Tablo 9 de verilen HRB değeri elde edilmiştir. Ayrıca elinizde 36,65 sertifikalı değere ve $U_{RefBlok} = 0,22$ HRB genişletilmiş belirsizliğe sahip bir Rockwell referans bloğunuzun olduğunu düşünelim. Referans blok üzerinde beş adet ölçüm gerçekleştirip aşağıda Tablo 10 de verilen değerlerin ölçülmüştür. Ölçme sistemi çözünürlüğü 0,01 HRB olsun. Bu değerlere göre ölçüm belirsizliği hesaplaması aşağıdaki şekilde yapılmalıdır.

Tablo 9. Referans bloktan alınan sertlik ölçüm sonuçları

Ölçülen Sertlik değerleri					Ort., x
1	2	3	4	5	HRB
36,12	36,28	36,42	36,33	36,18	36,27

Bu sonuçlar kullanılarak ölçüm belirsizliği hesabı aşağıdaki gibi gerçekleştirilebilir.

$$u_{Rep\&NU}(\text{Malzeme}) = \frac{STDEV(36,13, 36,38, 36,42, 36,33, 36,18)}{\sqrt{5}}$$

$$= 0,053 \text{ HRA}$$

Tablo 10. Referans bloktan alınan sertlik ölçüm sonuçları

Ölçülen Sertlik değerleri					Ort., x
1	2	3	4	5	HRB
36,61	36,58	36,68	36,75	36,63	36,65

$$B = H_{CRM} - H_x = 36,65 - 36,27 = 0,38 \text{ HRB}$$

$$u_{Reprod} = STDEV(36,61, 36,58, 36,68, 36,75, 36,63) = 0,07 \text{ HRB}$$

Referans blok ölçüm değerlerini cihazın kalibrasyonunu yapan laboratuvarın sertifikasından değerleri alarak bu değerler elde edebilir. Sertlik cihazının kalibrasyonu için farklı sertlik seviyelerinde referans sertlik blokları ile ölçümler gerçekleştirilmesi gereklidir. Bu blok ölçümlerinden en büyük hataya sahip blok değeri olarak u_{reprod} değerini yapılan ölçüm sonuçlarını kullanarak hesaplayabilir.

$$r = 0,01 \text{ HRB}$$

$$u_{Resol} = \frac{r / 2}{\sqrt{3}} = \frac{r}{\sqrt{12}} = 0,003 \text{ HRA}$$

$$u_{Mech} = \frac{0,22}{2} = 0,11 \text{ HRB}$$

Toplam belirsizlik,

$$u_{Meas} = \sqrt{u_{Rep\&NU}^2(\text{malzeme}) + u_{Reprod}^2 + u_{Resol}^2 + u_{Mach}^2}$$

$$= \sqrt{0,53^2 + 0,07^2 + 0,003^2 + 3,1^2} = 0,175 \text{ HRB}$$

$$U_{Meas} = k \cdot u_{Meas} + ABS(B) = 2 \cdot 0,18 + ABS(0,38) = 0,73 \text{ HRB}$$

Verilen 3 örnek ile ASTM E18 standardına göre ölçüm belirsizliği hesabının farklı durumlara göre hesabı sayısal örnekler ile verilmiştir.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Ülkemizde yaygın olarak kullanılmakta olan sertlik ölçümlerinin kalitesinin göstergesi ölçüm belirsizliği değeridir. Ölçüm belirsizliklerinin doğru parametreler katılarak en düşük seviyede olacak şekilde hesaplanması arzu edilen durumdur. Bu kapsamda ölçüm yapan ve akredite olan deney laboratuvarları için belirsizlik hesaplamasına yardımcı olmak amacıyla bu çalışma planlanmıştır. Verilen sayısal örnek ile hesaplamadaki tüm aşamalar açıklanmıştır. Bu sayede, ASTM E18 standardına göre Rockwell skalasında sertlik ölçümleri yapan veya kullanan konu ile ilgili kişilere belirsizlik hesabı hakkında detaylı ve doğru bir bilgi iletilmesi hedeflenmiştir. Bu çalışma ile ölçüm belirsizliği hesabı konusunda araştırma yapanlara rehber bir doküman hazırlanması amaçlanmıştır.

KAYNAKLAR

1. ASTM E92, 2022, Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials
2. TS EN ISO 6508-1, 2023, Metalik malzemeler – Rockwell sertlik deneyi - Bölüm 1: Deney metodu
3. TS EN ISO 6508-2, 2023, Metalik malzemeler - Rockwell sertlik deneyi - Bölüm 2: Deney cihazlarının doğrulanması ve kalibrasyonu
4. Aydemir, B., Sertlik ölçüm yöntemlerinin bugünü ve yarını, 2009, Metal Dünyası, Sayı 196, S.84-87, İstanbul
5. Aydemir, B., Mekanik Testlerde Ölçüm Belirsizliği Uygulamaları, 2018, 4. Ulusal Laboratuvar Akreditasyonu ve Güvenliği Sempozyumu ve Sergisi, İstanbul, 25-27.04.2018,
6. Aydemir, B., Malzeme Deneylerinde (Çekme deneyi) Ölçüm Belirsizliğinin Hesaplanması Eğitim Dokümanı-G2KV-110, 2015, G2KV-110, Nisan 2015, TÜBİTAK UME
7. Aydemir, B., Knoop sertlik deneyinde ölçüm belirsizliği hesaplaması ve sayısal uygulaması, IMSMATEC 21, 28-30 May 2021, Nevşehir, S.41-45
8. Aydemir, B., Calculation of Measurement Uncertainty in Vickers Hardness Testing and Numerical Application, IMASCON Autumn 2019, 01 – 03 November 2019, Kocaeli, P. 582-588



BÖLÜM 3

Fonksiyonel Derecelendirilmiş Sandviç Kirişlerin Statik Analizi

Caner Solar¹ & Vedat Taşkın²

GİRİŞ

Teknolojik ilerlemelerin merkezinde yer alan ve 'ileri malzeme' sınıfına giren Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler (FDM), birden fazla malzemenin üstün özelliklerinin sentezlenmesiyle elde edilmektedir. Mühendislik alanında sıkça başvuru alan modern kompozitler içerisinde, özellikle fonksiyonel derecelendirilmiş sandviç yapılar dikkat çekmektedir. Üstün nitelikleri sayesinde bu yapılar, son yıllarda endüstriyel uygulamalarda giderek artan bir popülerite kazanmıştır.

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin (FDM) imalat süreçlerinde, uygulanan yöntemlerin doğası gereği malzeme bünyesinde mikro boşluklar meydana gelebilmektedir. Gelişmiş üretim teknikleri sayesinde, oluşan bu gözeneklerin boyut, şekil, yoğunluk ve dağılım gibi parametrelerinin belirli bir doğrultuda kademeli olarak değiştirilmesiyle 'fonksiyonel derecelendirilmiş gözenekli malzemeler' elde edilmektedir.

Günümüz mühendislik uygulamalarında geniş bir yer tutan fonksiyonel derecelendirilmiş (FD) gözenekli sandviç kiriş ve plakalar, operasyonel koşullar altında çok eksenli yüklemelere maruz kalmaktadır. Enine, düzlem içi ve dinamik kuvvetlere karşı mukavemet gösteren bu yapısal elemanların eğilme ve titreşim karakteristiklerinin hassasiyetle öngörülmesi, güvenilir bir yapısal analiz için elzemdir. Bu gereklilikten hareketle, literatürde FD gözenekli sandviç yapıların mekanik davranışlarını inceleyen kapsamlı araştırmalar yürütülmüştür.

Bu kitap bölümünde, yüzeyleri fonksiyonel derecelendirilmiş ve çekirdeği homojen gözenekli yapıya sahip sandviç kirişlerin eğilme ve serbest titreşim davranışları, Hiperbolik Kayma Deformasyon Teorisi çerçevesinde incelenmiştir. Analizlerde, malzeme özelliklerinin kalınlık boyunca değişiminin kuvvet kanunu (power-law) dağılımına uyduğu kabul edilmiştir. Sistemin hareket denklemleri Hamilton Prensibi esas alınarak türetilmiş olup, basit mesnetli sınır koşulları için Navier Yöntemi ile kapalı form çözümler elde edilmiştir. Elde edilen boyutsuz sayısal veriler ışığında; kuvvet kanunu üssü, gözeneklilik katsayısı ve tabaka kalınlık oranlarının yapının mekanik davranışı üzerindeki

¹ Arş. Gör., Trakya Üniversitesi, ORCID: 0009-0007-6457-0984

² Doç. Dr., Trakya Üniversitesi, ORCID: 0000-0002-3013-2317

etkileri detaylıca tartışılmıştır. Sunulan sonuçların literatürdeki mevcut verilerle uyum içinde olduğu doğrulama çalışmalarıyla ortaya konmuştur.

Literatürde fonksiyonel derecelendirilmiş (FD) malzemelerden üretilen kiriş ve plakların mekanik davranışları üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde; statik, dinamik ve stabilite analizlerinin geniş bir yelpazede ele alındığı görülmektedir. Özellikle Alwan, Özmen, Filiz ve Aydoğdu & Taşkın gibi araştırmacılar, FD kirişlerin serbest titreşim ve statik davranışlarını Euler-Bernoulli ve Timoshenko gibi temel teorilerle incelerken; Sınır ve ark. (2018) ise değişken kesitli Euler-Bernoulli kirişlerin lineer olmayan titreşim davranışlarına odaklanmışlardır. Buna paralel olarak Demirhan, Vo, Benferhat ve Slimane gibi yazarlar çalışmalarını sandviç yapıların eğilme ve titreşim analizleri üzerine yoğunlaştırmışlardır. Demirhan ve Taşkın (2017; 2020), FD sandviç plak ve kirişlerin statik ve dinamik analizlerini farklı teorilerle ele alarak malzeme dağılımının önemini vurgulamışlardır. Yakın tarihli bir çalışmada Ermiş ve ark. (2024), kusurlu (imperfect) FD gözenekli sandviç kirişlerin gerilme analizlerini Peridinamik Diferansiyel Operatör ve Rafine Zikzak Teorisi kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmaların bir uzantısı olarak Solar ve ark. (2025), TPMS çekirdekli gözenekli sandviç kirişlerin statik davranışını incelemiş ve gözenekli çekirdek geometrisinin yapısal performansa etkisini detaylandırmışlardır. Demirhan ve Taşkın (2019), durum-uzay yaklaşımını kullanarak Levy tipi çözümle gözenekli FD plakların eğilme ve serbest titreşim analizlerini gerçekleştirmiş; gözeneklilik oranının ve narinlik oranının yapısal davranış üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Son yıllardaki çalışmalarda (Al-Itbı, Chopan, Adıyaman, Kareem & Noori, Hadji & Avcı), malzeme bünyesindeki gözenekliliğin (üniform, simetrik veya asimetrik dağılımlı) yapısal performans üzerindeki etkilerinin araştırılması önemli bir eğilim haline gelmiştir. Söz konusu analizlerde, yönetici denklemlerin türetilmesi için ağırlıklı olarak Hamilton ve Lagrange prensipleri kullanılırken; kinematik ilişkilerin tanımlanmasında Klasik Kiriş/Plak Teorilerinin yanı sıra, Yüksek Mertebeden ve Hiperbolik Kayma Deformasyon Teorileri (Meksi, Demirhan & Taşkın, Turan) sıklıkla tercih edilmiştir. Çözüm yöntemlerinde ise Navier, Rayleigh-Ritz, Durum-Uzay (State-Space) ve Sonlu Elemanlar Yöntemi (Altınöz, Aslan) gibi analitik ve sayısal yaklaşımlar öne çıkmaktadır. Tüm bu çalışmaların ortak sonucu; kuvvet kanunu üsteli, gözeneklilik katsayısı, narinlik oranı ve sınır koşullarının, yapıların doğal frekans, kritik burkulma yükü ve sehim değerleri üzerinde belirleyici bir role sahip olduğudur.

1.1. Plak Teorileri

• Klasik Plak Teorisi

Klasik plak teorisi, basit eğilme durumunda yer değiştirme bileşenlerini temsil eden en temel plak teorisidir.

$$u(x, y, z, t) = u_0 - z \frac{dw_0}{dx} \quad (1)$$

$$v(x, y, z, t) = u_0 - z \frac{dw_0}{dy} \quad (2)$$

$$w(x, y, z, t) = w_0(x, y, t) \quad (3)$$

Denklem 1-3'teki $u(x, y, z, t)$, $v(x, y, z, t)$, (x, y, z, t) sırasıyla (x, y, z) koordinatları yönündeki yer değiştirme bileşenlerini temsil eder. w_0 , plak orta düzlemindeki bir noktanın düşey yer değiştirmesini göstermektedir.

Kirchhoff kabullerine göre, eğilmeden kaynaklanan deformasyon durumunda enine kayma şekil değiştirmeleri ile normal şekil değiştirmeler ihmal edilmektedir (Wang'dan aktaran Demirhan, 2016).

• Reissner-Mindlin Plaka Teorisi

Reissner-Mindlin plaka teorisi, plakaların yalnızca eğilme deformasyonlarına değil, aynı zamanda enine kayma deformasyonlarına olan duyarlılığını da dikkate alan bir plaka teorisidir. Bu yaklaşım, Klasik Plak Teorisi'nin (Kirchhoff teorisi) kinematik varsayımlarını genişleterek daha genel bir deformasyon alanı tanımlamakta ve özellikle orta kalınlıktaki plakaların davranışını daha gerçekçi bir biçimde temsil etmektedir.

Reissner ve Mindlin tarafından önerilen ve klasik plak teorisinin kinematik açıdan genişletilmesiyle elde edilen birinci mertbe kayma deformasyon teorisinde, yer değiştirme bileşenleri Denklem 4-6'da verildiği şekilde tanımlanmaktadır.

$$u(x, y, z, t) = -z\phi_x(x, y, t) \quad (4)$$

$$v(x, y, z, t) = -z\phi_y(x, y, t) \quad (5)$$

$$w(x, y, z, t) = w_0(x, y, t) \quad (6)$$

ϕ_x ve ϕ_y sırasıyla y ve x eksenleri etrafındaki dönmeleri temsil etmektedir. Birinci mertbe kayma deformasyon teorisi (FSDT), klasik plak teorisinden farklı olarak enine (düşey) kayma deformasyonlarını da hesaba katmaktadır.

- **İkinci ve Daha Yüksek Mertebe Plak Teorileri**

İkinci ve daha yüksek mertebe plak teorilerinde, plak kalınlığı boyunca yer değiştirme bileşenlerinin dağılımını temsil edebilmek amacıyla yüksek mertebeden polinom açılımları kullanılmaktadır.

Dikine uzama etkisini ihmal eden ikinci mertebe plak teorisinde yer değiştirme bileşenleri, Denklem 7-9'da verildiği şekilde ifade edilmektedir (Wang'dan aktaran Demirhan, 2016).

$$u(x, y, z, t) = z\phi_x(x, y, t) + z^2\psi_x(x, y, t) \quad (7)$$

$$v(x, y, z, t) = z\phi_y(x, y, t) + z^2\psi_y(x, y, t) \quad (8)$$

$$w(x, y, z, t) = w_0(x, y, t) \quad (9)$$

Literatürde çok sayıda yüksek mertebe plak teorisi geliştirilmiş olup, en yaygın kullanılan yaklaşımlardan biri Reddy tarafından önerilen üçüncü mertebe kayma deformasyon teorisidir. Bu teoriye ait yer değiştirme bileşenleri Denklem 10-12'de verildiği şekilde ifade edilmektedir (Wang'dan aktaran Demirhan, 2016).

$$u(x, y, z, t) = z\phi_x(x, y, t) + z^3\left(-\frac{4}{3h^2}\right)\left(\phi_x + \frac{\partial w_0}{\partial x}\right) \quad (10)$$

$$v(x, y, z, t) = z\phi_y(x, y, t) + z^3\left(-\frac{4}{3h^2}\right)\left(\phi_y + \frac{\partial w_0}{\partial y}\right) \quad (11)$$

$$w(x, y, z, t) = w_0(x, y, t) \quad (12)$$

1.2. Kiriş Teorileri

- **Euler-Bernoulli (EB) Kiriş Teorisi**

Euler-Bernoulli kiriş teorisine göre, eğilmeden önce tarafsız eksene dik ve düzlem olan kesitler, eğilmeden sonra da tarafsız eksene dik ve düzlem kalırlar. Bu teoriye göre, kiriş elemanının davranışını tanımlamak için denge denklemleri kullanılır (Gül, 2015).

Euler-Bernoulli kiriş teorisine göre yer değiştirme alanı ifadeleri Denklem 13'te verilmiştir. (Alwan, 2017).

$$u(x, z; t) = u_0(x; t) - z\frac{\partial w_0}{\partial x} - zf(z)u_1(x; t)$$

$$v(x, z; t) = 0$$

$$w(x, z; t) = w_0(x)$$

$$f(z) = 0 \quad (13)$$

- **Timoshenko Kiriş Teorisi**

Timoshenko kiriş teorisi, Euler-Bernoulli kiriş teorisinin diklik kabulünü esneterek, düşey kayma deformasyonlarının kalınlık boyunca sabit olduğunu varsayar. Bu nedenle, Timoshenko kiriş teorisinde, kayma düzeltme faktörünün kullanılması gerekir (Wang'dan aktaran Demirhan, 2016).

Timoshenko, Euler-Bernoulli kiriş teorisine kayma etkisinin yanı sıra dönme etkisini de eklemiştir. (Taşkın, 2021).

Bir Timoshenko kiriş modeli için yer değiştirme alanı Denklem 14'teki gibi verilmektedir.

$$\begin{aligned} u(x, z; t) &= u_0(x; t) - z \frac{\partial w_0}{\partial x} + f(z)u_1(x; t) \\ v(x, z; t) &= 0 \\ w(x, z; t) &= w(x; t) \\ f(z) &= z \end{aligned} \tag{14}$$

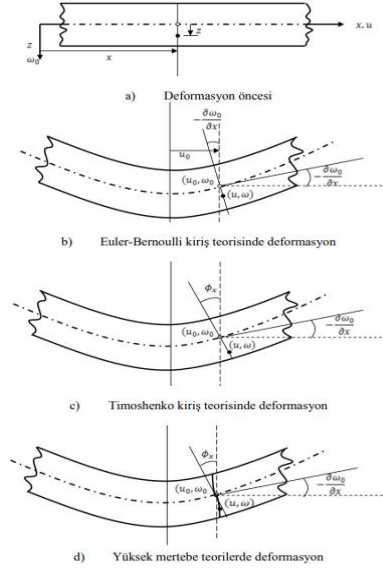
- **Reddy Kiriş Teorisi**

Reddy (1984) tarafından geliştirilen bir teori olan Reddy kiriş teorisi, düzlem içindeki yer değiştirmelerin kalınlık boyunca yüksek mertebede değiştiği ve kirişin alt ve üst yüzeylerinde kayma gerilmelerinin sıfır olduğu bir modeldir. Bu teori, şekil fonksiyonunun kalınlık koordinatına bağlı olarak seçilmesiyle kayma deformasyon teorilerini elde etmeyi mümkün kılar. Önceki klasik kiriş teorileri olan Euler-Bernoulli ve Timoshenko kiriş teorilerinde şekil fonksiyonu sırasıyla 0 ve z'ye eşit olmuştu. Ancak, Reddy'nin önerisi olan PKDT (parabolik kayma deformasyon teorisi), şekil fonksiyonunu kalınlık koordinatının kübik bir fonksiyonu olarak seçer.

Reddy kiriş teorisinde, büyüklükler y-ekseninden bağımsız olduğunda yer değiştirme alanı aşağıdaki şekli alır (Gül, 2015).

$$\begin{aligned} u(x, z; t) &= u_0(x; t) - z \frac{\partial w_0}{\partial x} + f(z)u_1(x; t) \\ v(x, z; t) &= 0, w(x, z; t) = w(x; t), f(z) = z(1 - \frac{4z^2}{3h^2}) \end{aligned} \tag{15}$$

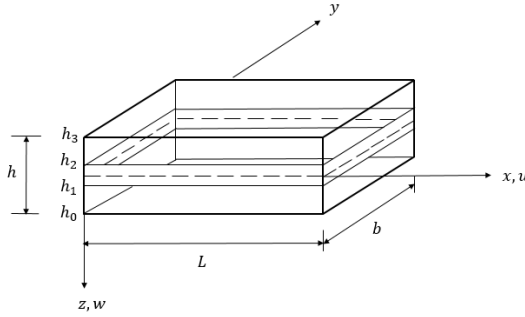
Bu denklemlerde, u, v ve w sırasıyla x, y ve z koordinatlarındaki yer değiştirme bileşenlerini, u_0 ve w_0 sırasıyla x ve t zamansal değişkenlere bağlı tarafsız eksen üzerinde ölçülen x, y, z eksenini doğrultusundaki yer değiştirmeleri, $f(z)$ ise kalınlık boyunca değişen bir şekil fonksiyonunu temsil eder.



Şekil 1. Farklı kiriş teorilerine göre tipik bir dikine düz çizginin deformasyonu (Wang'dan aktaran Demirhan, 2016)

MATERYAL VE YÖNTEM

Yapılan bu çalışmada kullanılan FD kirişin geometrisi ve koordinat sistemleri Şekil 2'de gösterilmiştir. Burada L , uzunluğu; h , kalınlığı; b , genişliği; h_0, h_1, h_2, h_3 z eksenine doğrultusundaki tabaka koordinatlarını temsil etmektedir.



Şekil 2. FD kirişin geometrisi ve koordinat takımı

Metal ve seramik malzeme özelliklerini içeren Elastisite modülü ve yoğunluk ifadeleri Denklem 16-17'de verilmiştir.

$$E(z) = E_m + (E_s - E_m)V_s(z) \quad (16)$$

$$\rho(z) = \rho_m + (\rho_s - \rho_m)V_s(z) \quad (17)$$

Yüzeyleri FD malzeme ve izotropik özlü sandviç kirişin seramik bileşenin hacim oran fonksiyonu, $V_s^{(i)}$, z 'ye bağlı olmak üzere Denklem 18 ile tanımlanır.

$$\begin{aligned} V_s^{(1)}(z) &= \left(\frac{z-h_0}{h_1-h_0} \right)^p, \quad h_0 \leq z \leq h_1, (0 \leq p \leq \infty) \\ V_s^{(2)}(z) &= 1, \quad h_1 < z < h_2, (0 \leq p \leq \infty) \\ V_s^{(3)}(z) &= \left(\frac{z-h_3}{h_2-h_3} \right)^p, \quad h_2 \leq z \leq h_3, (0 \leq p \leq \infty) \end{aligned} \quad (18)$$

• Hiperbolik Kayma Deformasyon Kiriş Teorisi

Hiperbolik kayma deformasyon kiriş teorisi, düzlemsel sandviç yapıların mekanik davranışlarını analiz etmek için geliştirilmiş bir teoridir. Bu teori, kirişin üst ve alt yüzeylerindeki kayma gerilmelerini doğru bir şekilde hesaba katarak, daha doğru sonuçlar elde etmeyi amaçlar.

Soldatos vd. (1992), çalışmasında kullandığı Hiperbolik kayma deformasyon kiriş teorisinin yer değiştirme alanı Denklem 19'te ifade edilmiştir.

$$\begin{aligned} u(x, z) &= u_0(x) - \frac{zdw_0}{dx} + f\phi(x) \\ w(x) &= w_0(x) \end{aligned} \quad (19)$$

Hiperbolik kayma deformasyon kiriş teorisine göre kirişin herhangi bir noktasındaki sıfır olmayan normal (ε_x) ve kayma (γ_{zx}) gerilmeleri, Denklem 20'te verilen ve Denklem 21'te ifade edilen $\varepsilon_x^0, k_x^b, k_x^s, \gamma_{xz}^0$ 'nin bilinmeyen yer değiştirme değişkenleriyle aşağıdaki gibi ilişkilendirildiği noktalarda meydana gelir:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \varepsilon_x^0 + zk_x^b + fk_x^s \\ \gamma_{zx} &= g\gamma_{xz}^0 \end{aligned} \quad (20)$$

$$\varepsilon_x^0 = \frac{du_0}{dx}, k_x^b = -\frac{d^2w_0}{dx^2}, k_x^s = \frac{d\phi}{dx}, \gamma_{xz}^0 = 0 \quad (21)$$

Şekil fonksiyonu f ile şekil fonksiyonun türevi olan g fonksiyonu Denklem 22'da tanımlanmıştır.

$$\begin{aligned} f &= [z \cosh(1/2) - h \sin(z/h)] \\ g &= f' = [\cosh(1/2) - \cos(z/h)] \end{aligned} \quad (22)$$

Kirişin k katmanındaki herhangi bir noktadaki gerilme-gerinim ilişkisi, tek boyutlu Hooke kanunu ile Denklem 23'te verilmiştir.

$$\sigma_x^k = E^k(z)\varepsilon_x^k, \tau_{xz}^k = G^k(z)\gamma_{zx}^k, G^k(z) = \frac{E^k(z)}{2(1+\nu)} \quad (23)$$

FD sandviç kirişin hiperbolik kayma deformasyon teorisine dayalı hareket denklemlerini türetmek için Hamilton prensibi temel alınmıştır.

$$\int_{t_1}^{t_2} (\delta U - \delta V + \delta K) dt = 0 \quad (24)$$

Burada, δU , δV ve δK sırasıyla toplam gerilme enerjisinin, potansiyel enerjinin ve kinetik enerjinin değişimlerini ifade eder; t_1 ve t_2 ise başlangıç ve bitiş zamanlarını ifade eder.

Gerilme enerjisinin değişimi Denklem 25 ile ifade edilir.

$$\delta U = \int_0^L \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} (\sigma_x^k \delta \varepsilon_x + \tau_{zx}^k \delta \gamma_{zx}) dz dy dx = \int_0^L \left(N_x \frac{d\delta u_0}{dx} - M^c \frac{d^2 \delta u_0}{dx^2} + M^s \frac{d\delta \phi}{dx} + Q \delta \phi \right) dx \quad (25)$$

Burada, N_x eksenel kuvveti; M^c klasik kiriş teorisine benzer şekilde eğilme momentini; M^s ise kayma deformasyonu ile ilişkili daha yüksek mertebeden momenti ve Q , kesme kuvvetini temsil eder. Bu büyüklükler, kiriş kalınlığı boyunca oluşan gerilmelerin uygun şekilde entegre edilmesiyle hesaplanır.

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ M^c \\ M^s \\ Q \end{Bmatrix} = b \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \begin{Bmatrix} \sigma_x^k \\ \sigma_x^k z \\ \sigma_x^k f \\ \tau_{zx}^k f' \end{Bmatrix} dz = \begin{bmatrix} A & B & C & 0 \\ B & D & E & 0 \\ C & E & F & 0 \\ 0 & 0 & 0 & H \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ k_x^b \\ k_x^s \\ \gamma_{zx}^0 \end{Bmatrix} \quad (26)$$

A, B, C, D, E, F, H matrisleri Denklem 27’de tanımlanmıştır. Bu matrisler, kirişin özelliklerini ve geometrisini temsil eder.

$$(A, B, C, D, E, F) = b \int_{-h/2}^{h/2} E^k(z) (1, z, f, z^2, fz, f^2) dz$$

$$H = b \int_{-h/2}^{h/2} G^k(z) g^2 dz \quad (27)$$

Potansiyel enerjinin değişimi δV , kirişin üzerine etki eden dış yükler nedeniyle oluşur. Potansiyel enerjinin değişimi (δV), yük q ve eksenindeki yük N_0 nedeniyle Denklem 28’deki gibi ifade edilir.

$$\delta V = \int_0^L \left(q \delta w + N_0 \frac{dw}{dx} \frac{d\delta w}{dx} \right) dx \quad (28)$$

Kinetik enerjinin değişimi (δK) Denklem 29 ile elde edilir.

$$\delta K = \int_0^L \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \rho(z) \left(\frac{d^2 u}{dt^2} \delta u + \frac{d^2 w}{dt^2} \delta w \right) dz dy dx = \int_0^L \left(I_A \frac{d^2 u_0}{dt^2} - I_B \frac{d^3 w_0}{dx dt^2} + I_C \frac{d^2 \phi}{dt^2} \right) \delta u_0 dx + \int_0^L \left(-I_B \frac{d^2 u_0}{dt^2} + I_D \frac{d^3 w_0}{dx dt^2} - I_E \frac{d^2 \phi}{dt^2} \right) \frac{d \delta w_0}{dx} dx + \int_0^L \left(-I_B \frac{d^2 u_0}{dt^2} + I_D \frac{d^3 w_0}{dx dt^2} - I_E \frac{d^2 \phi}{dt^2} \right) \frac{d \delta w_0}{dx} dx \quad (29)$$

Burada, $\rho(z)$ her katmanın kütle yoğunluğunu ifade eder. Atalet moment katsayıları, $I_A, I_B, I_C, I_D, I_E, I_F$ ise Denklem 30 ile tanımlanır.

$$(I_A, I_B, I_C, I_D, I_E, I_F) = b \int_{-h/2}^{h/2} \rho^k(z) (1, z, f, z^2, fz, f^2) dz \quad (30)$$

$\delta u_0, \delta w_0$ ve $\delta \phi_0$ katsayılarını toplamak ve sıfıra eşitlemek koşuluyla hareket denklemleri elde edilir.

$$\begin{aligned} \frac{dN_x}{dx} &= I_A \frac{d^2 u_0}{dt^2} - I_B \frac{d^3 w_0}{dx dt^2} + I_C \frac{d^2 \phi}{dt^2} \\ \frac{d^2 M^c}{dx^2} &= -q + N_0 \frac{d^2 w_0}{dx^2} + I_B \frac{d^3 u_0}{dx dt^2} - I_D \frac{d^4 w_0}{dx^2 dt^2} + I_A \frac{d^2 w_0}{dt^2} + I_E \frac{d^3 \phi}{dx dt^2} \\ \frac{dM^3}{dx} - Q &= I_C \frac{d^2 u_0}{dt^2} - I_E \frac{d^3 w_0}{dx dt^2} + I_F \frac{d^2 \phi}{dt^2} \end{aligned} \quad (31)$$

N_x, M^c, M^s, Q gerilme sonuçları ile aşağıdaki hareket denklemleri, bilinmeyen yer değiştirme değişkenleri (u_0, w_0, ϕ_0) cinsinden elde edilebilir.

$$\begin{aligned} A \frac{d^2 u_0}{dx^2} - B \frac{d^3 w_0}{dx^3} + C \frac{d^2 \phi}{dx^2} &= I_A \frac{d^2 u_0}{dt^2} - I_B \frac{d^3 w_0}{dx dt^2} + I_C \frac{d^2 \phi}{dt^2} \\ B \frac{d^3 u_0}{dx^3} - D \frac{d^4 w_0}{dx^4} + E \frac{d^3 \phi}{dx^3} &= -q + N_0 \frac{d^2 w_0}{dx^2} + I_B \frac{d^3 u_0}{dx dt^2} - I_D \frac{d^4 w_0}{dx^2 dt^2} + I_A \frac{d^2 w_0}{dt^2} + I_E \frac{d^3 \phi}{dx dt^2} \\ C \frac{d^2 u_0}{dx^2} - E \frac{d^3 w_0}{dx^3} + F \frac{d^2 \phi}{dx^2} - H \phi &= I_C \frac{d^2 u_0}{dt^2} - I_E \frac{d^3 w_0}{dx dt^2} + I_F \frac{d^2 \phi}{dt^2} \end{aligned} \quad (32)$$

• Hareket Denkleminin Çözümü

Basit destekli fonksiyonel derecelendirilmiş sandviç kirişin eğilme analizleri için hareket denkleminin çözümü Navier metodu ile elde edilmiştir. Basit destekli kirişin sınır koşulları Denklem 33'te verilmiştir. Denklem 33'te verilen sınır koşulları, basit destekli kirişin uçlarında hangi kuvvetlerin ve momentlerin etki ettiğini belirtir.

$$w_0 = N_x = M^c = M^s = 0, \quad x = 0 \text{ ve } x = L \quad (33)$$

Kenarların, eğilme analizi için hareket edebilir basit destekli olduğu varsayılmıştır. Çözümün Denklem 34'teki formda olduğu varsayılmıştır:

$$\begin{aligned}
u_0(x, t) &= \sum_{m=1,3,5}^{\infty} u_m \cos(\alpha x) e^{i\alpha t}, \\
w_0(x, t) &= \sum_{m=1,3,5}^{\infty} w_m \sin(\alpha x) e^{i\alpha t}, \\
\phi(x, t) &= \sum_{m=1,3,5}^{\infty} \phi_m \cos(\alpha x) e^{i\alpha t}
\end{aligned} \tag{34}$$

Denklem 34'te $i = \sqrt{-1}$ hayali birim, ω doğal frekansı, $\alpha = m\pi/L$ ve (u_m, w_m, ϕ_m) belirlenecek olan bilinmeyen katsayılarıdır.

$$q(x) = \sum_{m=1,3,5}^{\infty} \frac{4q_0}{m\pi} \sin(\alpha x) \tag{35}$$

Denklem 35'te q_0 , uzunluğun merkezindeki yükün maksimum yoğunluğudur. Kiriş, eksenel basınç kuvveti N_0 'a maruz kalır.

$$\begin{bmatrix} A\alpha^2 & -B\alpha^3 & C\alpha^2 \\ -B\alpha^3 & D\alpha^4 & -E\alpha^3 \\ C\alpha^2 & -E\alpha^3 & F\alpha^2 + H \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} u_m \\ w_m \\ \phi_m \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{Bmatrix} \frac{4q_0}{m\pi} \tag{36}$$

FD sandviç kirişin yer değiştirme ve gerilme değerleri Denklem 36'ın çözümü elde edilir.

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Sandviç yapının yüzeyleri fonksiyonel derecelendirilmiş Al/Al_2O_3 (Alüminyum/Alümina), çekirdek tabakası ise homojen izotropik Alüminyum (Al) olarak modellenmiştir. Narinlik oranına (L/h) göre boyutlandırılan kirişe ait malzeme özellikleri Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Alümina (Al_2O_3) ve alüminyum (Al) malzemelerinin özellikleri.

Malzeme Çeşidi	E (Gpa)	ρ (kg/m ³)	ν
Alümina (Al_2O_3)	380	3960	0.3
Alüminyum (Al)	70	2702	0.3

Analizlerde esas alınan tabaka konfigürasyonları ve bunlara karşılık gelen z koordinat değerleri Tablo 2'de özetlenmiştir.

Tablo 2. Tabaka çeşitleri ve h_0, h_1, h_2, h_3 yükseklik değerleri.

Tabaka çeşitleri	h_0	h_1	h_2	h_3
1-1-1	-h/2	-h/6	h/6	h/2
1-2-1	-h/2	-h/4	h/4	h/2
2-1-2	-h/2	-h/10	h/10	h/2
2-1-1	-h/2	0	h/4	h/2
2-2-1	-h/2	-h/10	3 * h/10	h/2
1-8-1	-h/2	-2 * h/5	2 * h/5	h/2

Analiz sonucu bulunan sayısal sonuçlar aşağıdaki boyutsuz ifadeler ile elde edilmiştir. Boyutsuz ifadelerdeki tanımlamaları Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3. Boyutsuz ifadelerdeki tanımlamalar

Boyutsuz Düşey Yer Değiştirme	$\bar{u} = \frac{100uE_m h^3}{q_0 L}$	Boyutsuz Eksenel Gerilme	$\bar{\sigma}_x = \frac{\sigma_x h}{q_0 L}$
Boyutsuz Enine Yer Değiştirme	$\bar{w} = \frac{100wE_m h^3}{q_0 L}$	Boyutsuz Enine Kayma Gerilmesi	$\bar{\tau}_{xz} = \frac{\tau_{xz} h}{q_0 L}$

• FD Sandviç Kirişin Statik Eğilme Analizi

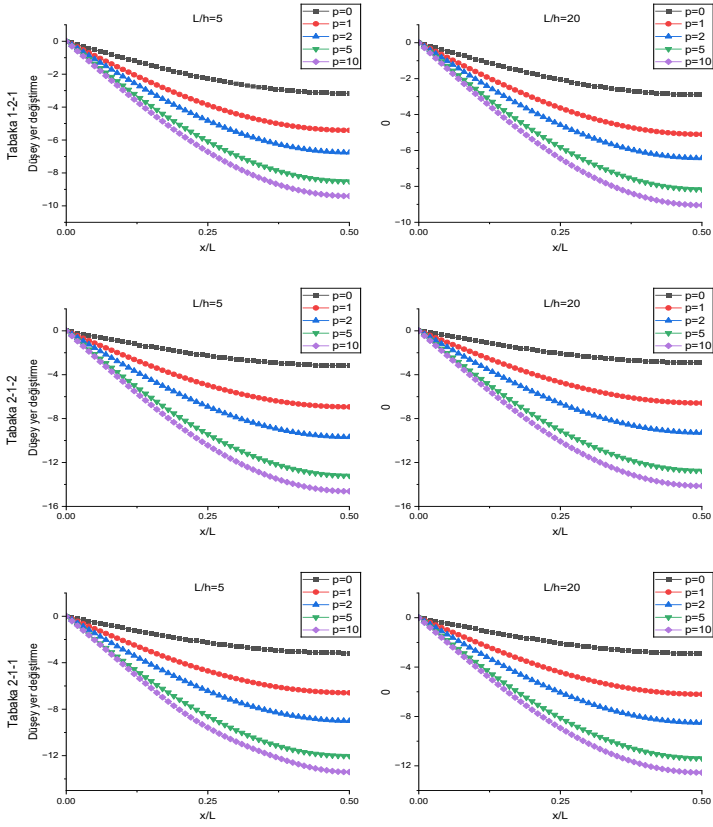
Tez çalışması kapsamında, altı farklı tabaka için FD sandviç kirişin statik eğilme analizi yapılmıştır. Çeşitli kuvvet kanunu üstelleri için boyutsuz düşey yer değiştirmeler Tablo 4-5’te sunulmuştur.

Tablo 4. Basit destekli FD sandviç kirişlerin boyutsuz düşey yer değiştirme değerleri (L/h=5)

p	Teori	L/h=5					
		1-1-1	1-2-1	2-1-2	2-1-1	2-2-1	1-8-1
0	Vo vd. (2015b) CBT	2.8783	2.8783	-			
	Vo vd. (2015b) FBT	3.1657	3.1657	-			
	Vo vd. (2015b) TBT	3.1654	3.1654	-			
	Vo vd. (2015b) 2B	3.1397	3.1397	-			
	Sayyad ve Avhad (2019)	3.1241	3.1241	3.1241			
	Sunulan çalışma	3.1654	3.1654	3.1654	3.1654	3.1654	3.1654
1	Vo vd. (2015b) CBT	5.9181	5.0798	-			
	Vo vd. (2015b) FBT	6.3128	5.4408	-			
	Vo vd. (2015b) TBT	6.2693	5.4122	-			
	Vo vd. (2015b) 2B	6.2098	5.3612	-			
	Sayyad ve Avhad (2019)	6.3011	5.0341	6.8424			
	Sunulan çalışma	6.2694	5.4121	6.9329	6.5911	5.8658	3.9675
2	Vo vd. (2015b) CBT	8.0074	6.4056	-			
	Vo vd. (2015b) FBT	8.4582	6.8003	-			
	Vo vd. (2015b) TBT	8.3893	6.7579	-			
	Vo vd. (2015b) 2B	8.3893	6.6913	-			
	Sayyad ve Avhad (2019)	8.2734	6.3359	9.5104			
	Sunulan çalışma	8.3895	6.7578	9.6784	9.0037	7.6346	4.3118
5	Vo vd. (2015b) CBT	10.8117	8.1409	-			
	Vo vd. (2015b) FBT	11.3372	8.5762	-			
	Vo vd. (2015b) TBT	11.2274	8.5137	-			
	Vo vd. (2015b) 2B	11.1175	8.4276	-			
	Sayyad ve Avhad (2019)	11.0708	8.0576	13.0323			
	Sunulan çalışma	11.2279	8.5137	13.2047	12.0266	9.9263	4.6963
10	Vo vd. (2015b) CBT	12.1322	9.0232	-			
	Vo vd. (2015b) FBT	12.1322	9.4800	-			
	Vo vd. (2015b) TBT	12.5659	9.4050	-			
	Vo vd. (2015b) 2B	12.4453	9.3099	-			
	Sayyad ve Avhad (2019)	12.3910	8.9290	14.4346			
	Sunulan çalışma	12.5666	9.4051	14.6252	13.0408	11.0251	4.8822

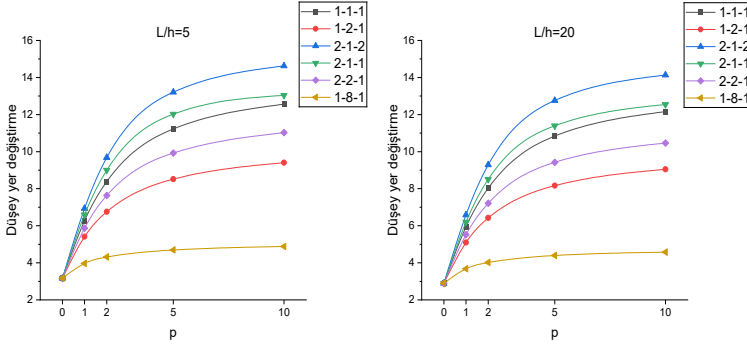
Tablo 5. Basit destekli FD sandviç kirişlerin boyutsuz düşey yer değiştirme değerleri
($L/h=20$)

p	Teori	L/h=20					
		1-1-1	1-2-1	2-1-2	2-1-1	2-2-1	1-8-1
0	Vo vd. (2015b) CBT	2.8783	2.8783	-			
	Vo vd. (2015b) FBT	2.8963	2.8963	-			
	Vo vd. (2015b) TBT	2.8963	2.8963	-			
	Vo vd. (2015b) 2B	2.8947	2.8947	-			
	Sayyad ve Avhad (2019)	2.8585	2.8585	2.8585			
	Sunulan çalışma	2.8962	2.8962	2.8962	2.8962	2.8962	2.8962
1	Vo vd. (2015b) CBT	5.9181	5.0798	-			
	Vo vd. (2015b) FBT	5.9428	5.1024	-			
	Vo vd. (2015b) TBT	5.9401	5.1006	-			
	Vo vd. (2015b) 2B	5.9364	5.0975	-			
	Sayyad ve Avhad (2019)	5.9561	5.3415	6.4978			
	Sunulan çalışma	5.9401	5.1006	6.5837	6.2002	5.5177	3.6799
2	Vo vd. (2015b) CBT	8.0074	6.4056	-			
	Vo vd. (2015b) FBT	8.0356	6.4302	-			
	Vo vd. (2015b) TBT	8.0313	6.4276	-			
	Vo vd. (2015b) 2B	8.0262	6.4235	-			
	Sayyad ve Avhad (2019)	7.9201	6.6697	9.1626			
	Sunulan çalışma	8.0313	6.4276	9.2864	8.5068	7.2122	4.0172
5	Vo vd. (2015b) CBT	10.8117	8.1409	-			
	Vo vd. (2015b) FBT	10.8445	8.1681	-			
	Vo vd. (2015b) TBT	10.8376	8.1642	-			
	Vo vd. (2015b) 2B	10.8309	8.1589	-			
	Sayyad ve Avhad (2019)	10.6766	8.4045	12.5898			
	Sunulan çalışma	10.8377	8.1642	12.7564	11.3918	9.4209	4.3947
10	Vo vd. (2015b) CBT	12.1322	9.0232	-			
	Vo vd. (2015b) FBT	12.1677	9.0518	-			
	Vo vd. (2015b) TBT	12.1593	9.0471	-			
	Vo vd. (2015b) 2B	12.1519	9.0413	-			
	Sayyad ve Avhad (2019)	11.9795	9.2824	13.9531			
	Sunulan çalışma	12.1593	9.0471	14.1374	12.5450	10.4641	4.5776



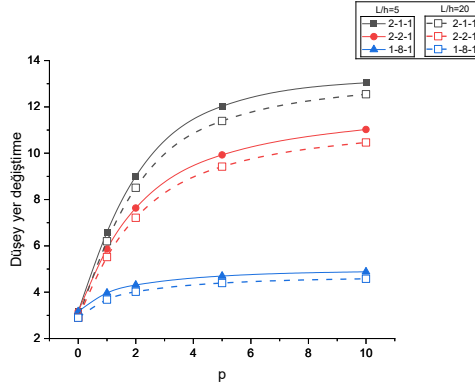
Şekil 3. Boyutsuz düşey yer değıştirme değęerlerinin x/L oranıyla değışimi

Çalışmada kullanılan teori yüksek mertebeden modellerle doğrulanmış, kayma etkisinin ihmal edildiğı klasik teorinin ise yetersiz kaldığı görülmüştür. Kuvvet kanunu üsteli ve narinlik oranındaki (L/h) artışın yer değıştirmeleri artırdığı; tabaka dizilimindeki seramik yoğunluğunun ise sonuçlar üzerinde belirleyici bir rol oynadığı tespit edilmiştir.



Şekil 4. Boyutsuz düşey yer değiştirme değerlerinin p üsteli ile değişimi ($L/h=5$ ve $L/h=20$)

Şekil 4’te, düşey yer değiştirmenin p üsteli ile değişimi $L/h=5$ ve $L/h=20$ için 2 farklı grafik halinde sunulmuştur. Şekil 4 incelendiğinde, p üstelinin artışı ile tüm tabaka çeşitlerinde düşey yer değiştirme değerinin arttığı gözlemlenmektedir. Bu artış, 2-1-2 tabakalı kirişte en yüksek, 1-8-1 tabakalı kirişte ise en düşük seviyededir.



Şekil 5. Boyutsuz düşey yer değiştirme değerlerinin L/h oranına göre karşılaştırması

Boyutsuz düşey yer değiştirmelerin L/h oranına göre değişimi Şekil 5’te verilmiştir. Analiz sonuçları, kiriş kalınlığının daha baskın olduğu $L/h=5$ durumunda elde edilen yer değiştirmelerin, daha narin yapıdaki $L/h=20$ durumuna göre tüm tabaka tiplerinde daha büyük olduğunu ortaya koymaktadır.

Tablo 6. Basit destekli FD sandviç kirişlerin boyutsuz eksenel gerilme değerleri (L/h=5)

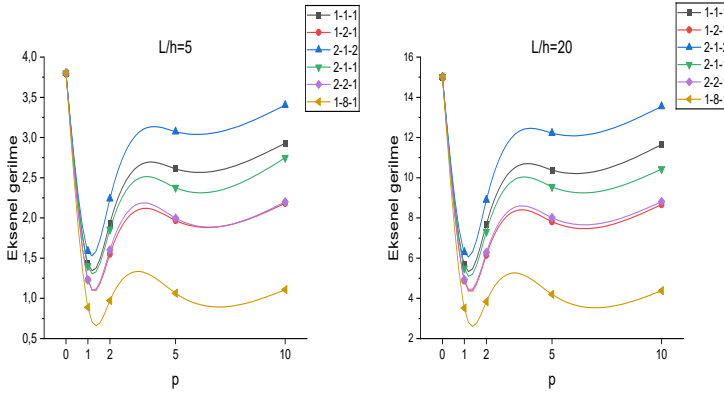
p	Teori	L/h=5					
		1-1-1	1-2-1	2-1-2	2-1-1	2-2-1	1-8-1
0	Vo vd. (2015b) FBT	3.7500	3.7500	-			
	Vo vd. (2015b) TBT	3.8020	3.8020	-			
	Vo vd. (2015b) 2B	3.8005	3.8005	-			
	Sayyad ve Avhad (2019)	3.8025	3.8025	3.8025			
	Sunulan çalışma	3.8000	3.8000	3.8000	3.8000	3.8000	3.8000
1	Vo vd. (2015b) FBT	1.4203	1.2192	-			
	Vo vd. (2015b) TBT	1.4349	1.2339	-			
	Vo vd. (2015b) 2B	1.4330	1.2315	-			
	Sayyad ve Avhad (2019)	1.4614	1.2331	1.5900			
	Sunulan çalışma	1.4340	1.2320	1.5890	1.4030	1.2279	0.8900
2	Vo vd. (2015b) FBT	1.9218	1.5373	-			
	Vo vd. (2015b) TBT	1.9382	1.5527	-			
	Vo vd. (2015b) 2B	1.9352	1.5505	-			
	Sayyad ve Avhad (2019)	1.9369	1.5530	2.2384			
	Sunulan çalışma	1.9380	1.5520	2.2390	1.8570	1.6041	0.9720
5	Vo vd. (2015b) FBT	2.5948	1.9538	-			
	Vo vd. (2015b) TBT	2.6123	1.9705	-			
	Vo vd. (2015b) 2B	2.6079	1.9672	-			
	Sayyad ve Avhad (2019)	2.6101	1.9707	3.0733			
	Sunulan çalışma	2.6120	1.9700	3.0720	2.3770	1.9993	1.0630
10	Vo vd. (2015b) FBT	2.9117	2.1656	-			
	Vo vd. (2015b) TBT	2.9293	2.1826	-			
	Vo vd. (2015b) 2B	2.9245	2.1788	-			
	Sayyad ve Avhad (2019)	2.9268	2.1829	3.4047			
	Sunulan çalışma	2.9290	2.1820	3.4040	2.7480	2.1999	1.1070

Tablo 7. Basit destekli FD sandviç kirişlerin boyutsuz eksenel gerilme değerleri (L/h=20)

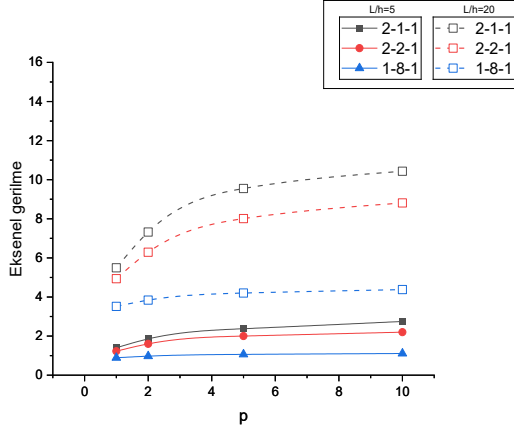
p	Teori	L/h=20					
		1-1-1	1-2-1	2-1-2	2-1-1	2-2-1	1-8-1
0	Vo vd. (2015b) FBT	15.0000	15.0000	-			
	Vo vd. (2015b) TBT	15.0129	15.0129	-			
	Vo vd. (2015b) 2B	15.0125	15.0125	-			
	Sayyad ve Avhad (2019)	15.0136	15.0136	15.0136			
	Sunulan çalışma	15.0116	15.0116	15.0116	15.0116	15.0116	15.0116
1	Vo vd. (2015b) FBT	5.6814	4.8766	-			
	Vo vd. (2015b) TBT	5.6850	4.8801	-			
	Vo vd. (2015b) 2B	5.6845	4.8797	-			
	Sayyad ve Avhad (2019)	5.7370	4.8802	6.3020			
	Sunulan çalışma	5.6850	4.8800	6.3010	5.4940	4.9344	3.5170
2	Vo vd. (2015b) FBT	7.6871	6.1493	-			
	Vo vd. (2015b) TBT	7.6912	6.1532	-			
	Vo vd. (2015b) 2B	7.6904	6.1526	-			
	Sayyad ve Avhad (2019)	7.6154	6.1534	8.8940			
	Sunulan çalışma	7.6910	6.1530	8.8940	7.3200	6.2865	3.8400
5	Vo vd. (2015b) FBT	10.3792	7.8152	-			

	Vo vd. (2015b) TBT	10.3835	7.8194	-		
	Vo vd. (2015b) 2B	10.3824	7.8185	-		
	Sayyad ve Avhad (2019)	10.2712	7.8196	12.2223		
	Sunulan çalışma	10.3830	7.8190	12.2210	9.5480	8.0085
10	Vo vd. (2015b) FBT	11.6469	8.6623	-		
	Vo vd. (2015b) TBT	11.6513	8.6665	-		
	Vo vd. (2015b) 2B	11.6500	8.6655	-		
	Sayyad ve Avhad (2019)	11.5237	8.6667	13.5459		
	Sunulan çalışma	11.6500	8.6660	13.5440	10.4330	8.8082
					4.2030	4.3780

Boyutsuz eksenel gerilmelerin p üsteline bağlı değişimi, farklı narinlik oranları ($L/h=5$ ve 20) için Şekil 6'de verilmiştir. Analiz sonuçlarına göre; $p=0$ için tüm tabakalarda değerler sabit kalırken, $p=1$ seviyesinde düşüş, $p=10$ seviyesinde ise gerilme değerlerinde tekrar bir artış tespit edilmiştir.

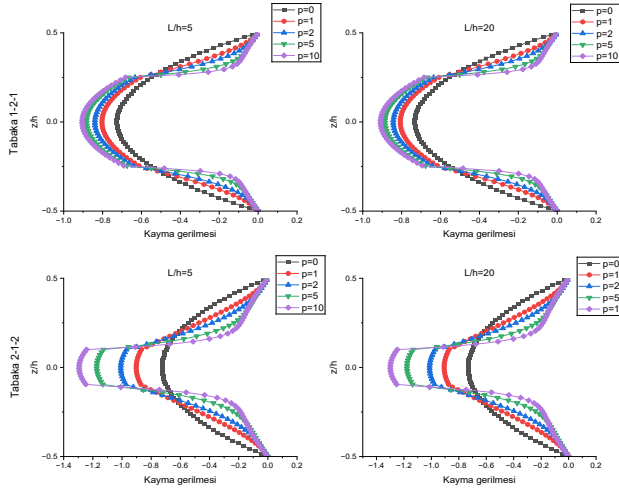


Şekil 6. Boyutsuz eksenel gerilme değerlerinin p üsteli ile değişimi ($L/h=5$ ve $L/h=20$)



Şekil 7. Boyutsuz eksenel gerilme değerlerinin L/h oranıyla değişimi

Boyutsuz eksenel gerilmelerin L/h oranına göre değişimi Şekil 7’de verilmiştir. Sonuçlar, giriş narinlik oranı arttıkça ($L/h=20$) eksenel gerilmelerin de tüm tabaka konfigürasyonlarında artış gösterdiğini ortaya koymaktadır. Tablo 8-9 ve Şekil 9’daki analizler, elde edilen kayma gerilme değerlerinin literatürle tam uyumlu olduğunu kanıtlamaktadır. Simetrik FD sandviç yapısı gereği, maksimum kayma gerilmesinin nötr eksen üzerinde oluştuğu gözlemlenmiştir.



Şekil 8. Boyutsuz kayma gerilmesi değerlerinin z/h oranıyla değişimi

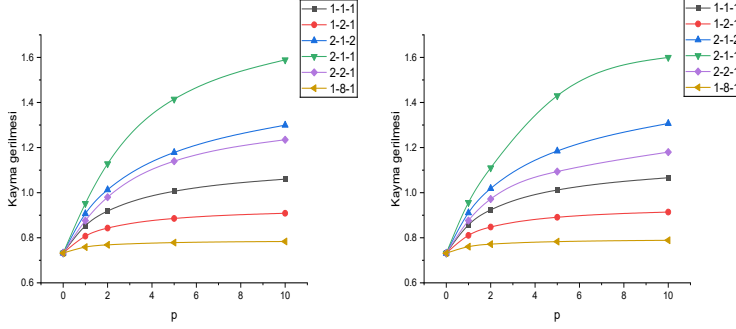
Tablo 8. Basit destekli FD sandviç kirişlerin boyutsuz kayma gerilmesi değerleri (L/h=5)

p	Teori	L/h=5			
		1-1-1	1-2-1	2-1-2	1-8-1
0	Vo vd. (2015b) FBT	0.5976	0.5976	-	
	Vo vd. (2015b) TBT	0.7332	0.7332	-	
	Vo vd. (2015b) 2B	0.7233	0.7233	-	
	Sayyad ve Avhad (2019)	0.7285	0.7285	0.7285	
	Sunulan çalışma	0.7263	0.7263	0.7263	0.7263
1	Vo vd. (2015b) FBT	0.8208	0.7507	-	
	Vo vd. (2015b) TBT	0.8586	0.8123	-	
	Vo vd. (2015b) 2B	0.8444	0.7993	-	
	Sayyad ve Avhad (2019)	0.8767	0.8056	0.9050	
	Sunulan çalışma	0.8492	0.8032	0.9026	0.7540
2	Vo vd. (2015b) FBT	0.9375	0.8208	-	
	Vo vd. (2015b) TBT	0.9249	0.8493	-	
	Vo vd. (2015b) 2B	0.9084	0.8349	-	
	Sayyad ve Avhad (2019)	0.9170	0.8424	0.9103	
	Sunulan çalışma	0.9147	0.8395	1.0090	0.7650
5	Vo vd. (2015b) FBT	1.0929	0.9053	-	
	Vo vd. (2015b) TBT	1.0125	0.8925	-	
	Vo vd. (2015b) 2B	0.9931	0.8763	-	
	Sayyad ve Avhad (2019)	1.0048	0.8851	1.1766	
	Sunulan çalışma	1.0020	0.8823	1.1736	0.7750
10	Vo vd. (2015b) FBT	1.1819	0.9497	-	
	Vo vd. (2015b) TBT	1.0665	0.9151	-	
	Vo vd. (2015b) 2B	1.0458	0.8980	-	
	Sayyad ve Avhad (2019)	1.0586	0.9083	1.2982	
	Sunulan çalışma	1.0559	0.9050	1.2944	0.7800

Tablo 9. Basit destekli FD sandviç kirişlerin boyutsuz kayma gerilmesi değerleri (L/h=20)

p	Teori	L/h=20			
		1-1-1	1-2-1	2-1-2	1-8-1
0	Vo vd. (2015b) FBT	0.5976	0.5976	-	
	Vo vd. (2015b) TBT	0.7451	0.7451	-	
	Vo vd. (2015b) 2B	0.7432	0.7432	-	
	Sayyad ve Avhad (2019)	0.7355	0.7355	0.7355	
	Sunulan çalışma	0.7322	0.7322	0.7322	0.7322
1	Vo vd. (2015b) FBT	0.8208	0.7507	-	
	Vo vd. (2015b) TBT	0.8681	0.8215	-	
	Vo vd. (2015b) 2B	0.8657	0.8193	-	
	Sayyad ve Avhad (2019)	0.8726	0.8106	0.9107	
	Sunulan çalışma	0.8531	0.8070	0.9067	0.7584
2	Vo vd. (2015b) FBT	0.9375	0.8208	-	
	Vo vd. (2015b) TBT	0.9344	0.8581	-	
	Vo vd. (2015b) 2B	0.9316	0.8556	-	
	Sayyad ve Avhad (2019)	0.9222	0.8486	0.9149	
	Sunulan çalışma	0.9184	0.8429	1.0131	0.7684
5	Vo vd. (2015b) FBT	1.0929	0.9053	-	
	Vo vd. (2015b) TBT	1.0227	0.9014	-	
	Vo vd. (2015b) 2B	1.0194	0.8986	-	
	Sayyad ve Avhad (2019)	1.0101	0.8897	1.1835	
	Sunulan çalışma	1.0060	0.8857	1.1783	0.7786
10	Vo vd. (2015b) FBT	1.1819	0.9497	-	

Vo vd. (2015b) TBT	1.0773	0.9243	-
Vo vd. (2015b) 2B	1.0736	0.9214	-
Sayyad ve Avhad (2019)	1.0642	0.9128	1.3055
Sunulan çalışma	1.0601	0.9085	1.2994
			0.7833



Şekil 9. Boyutsuz kayma gerilmesi değerlerinin p üsteli ile değişimi ($L/h=5$ ve $L/h=20$)

GENEL SONUÇLAR

Fonksiyonel derecelendirilmiş sandviç kirişler üzerinde gerçekleştirilen statik eğilme analizlerinden elde edilen temel bulgular şunlardır:

- **Malzeme Dağılımının Etkisi:** Kuvvet kanunu üstelinin (p) artması, kirişin eğilme rijitliğini düşürmektedir. Bu durum, statik analizlerde düşey yer değiştirme, eksenel gerilme ve kayma gerilmesi değerlerinin artmasına neden olmaktadır.
- **Tabaka Diziliminin Rolü:** Sandviç kirişin tabaka konfigürasyonu, mekanik davranış üzerinde belirleyici bir parametredir. Seramik fazın yoğun olduğu dizilimlerde (2-1-2), çekirdek fazın yoğun olduğu dizilimlere (1-8-1) kıyasla daha yüksek yer değiştirme ve gerilme değerleri elde edilmiştir.
- **Geometrik Etkiler:** Uzunluk/kalınlık oranı (L/h) statik eğilme karakteristiklerini önemli ölçüde değiştirmektedir. Narinlik oranı arttıkça boyutsuz gerilme ve yer değiştirme parametrelerinde belirgin artışlar gözlemlenmiştir.
- **Teorik Doğrulama:** Kullanılan yöntem, kayma deformasyonlarını dikkate alması sayesinde literatürdeki gelişmiş teorilerle tam uyum sağlamıştır. Simetrik yapı nedeniyle maksimum kayma gerilmesinin nötr ekseninde oluştuğu doğrulanmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu kitap bölümü, Caner Solar tarafından Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda 2024 yılında tamamlanan "Fonksiyonel Derecelendirilmiş Gözenekli Sandviç Kirişin Eğilme ve Titreşim Analizi" başlıklı Yüksek Lisans tezinden üretilmiştir.

Tez sürecindeki değerli katkıları, akademik yönlendirmeleri ve desteğinden dolayı danışmanım Doç. Dr. Vedat Taşkın'a; çalışma boyunca yardımlarını ve tecrübelerini esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Pınar Aydan Demirhan'a teşekkür ederim.

Ayrıca, bu tez çalışmasından üretilen ve kısmi sonuçları içeren bir makale, *Trakya University Journal of Engineering Sciences* (TUVES) dergisinde 2024 yılında (Cilt 25, Sayı 2, ss. 77-90) "Fonksiyonel Derecelendirilmiş Gözenekli Sandviç Kirişin Statik Eğilme ve Serbest Titreşim Analizi" başlığıyla yayımlanmıştır.

KAYNAKÇA

- Adiyaman, G. (2022). Free vibration analysis of a porous functionally graded beam using higher-order shear deformation theory. *Journal of Structural Engineering & Applied Mechanics*, 5(4), 186-198. <https://doi.org/10.31462/jseam.2022.04277288>
- Al-Itbı, S. K. A. (2023). *Fonksiyonel derecelendirilmiş gözenekli sandviç kirişlerin statik ve serbest titreşim analizi* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Gelişim Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.
- Altınöz, M. (2016). *Fonksiyonel derecelendirilmiş Timoshenko kirişinin çeşitli sınır şartlarında dinamik analizi* (Yüksek lisans tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Alwan, H. H. S. A. (2017). *Farklı mühendislik teorileri ile fonksiyonel derecelendirilmiş kirişin serbest titreşim analizi* (Yüksek lisans tezi). Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Aslan, T. A., Noori, A. R., Rasooli, H., & Temel, B. (2020). Fonksiyonel derecelenmiş sandviç kirişlerin tamamlayıcı fonksiyonlar yöntemi ile statik analizi [Static analysis of functionally graded sandwich beams by the complementary functions method]. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(4), 1091-1102. <https://doi.org/10.21605/cukurovaummfd.869180>
- Aydogdu, M., & Taskin, V. (2007). Free vibration analysis of functionally graded beams with simply supported edges. *Materials & Design*, 28(5), 1651-1656. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.02.007>
- Benferhat, R., Tahar, H. D., & Abderezak, R. (2021). Effect of porosity on fundamental frequencies of FGM sandwich plates. *Coupled Systems Mechanics*, 10(1), 25-40. <https://doi.org/10.12989/cme.2021.3.1.025>
- Chopan, A. (2023). *Fonksiyonel derecelendirilmiş gözenekli sandviç kirişlerin zorlanmış titreşim analizi* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Gelişim Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.
- Demirhan, P. A. (2016). *Fonksiyonel derecelendirilmiş sandviç kiriş ve plakların dört değişkenli kayma deformasyon teorisi ile eğilme ve titreşim analizi* (Doktora tezi). Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.
- Demirhan, P. A., & Taşkın, V. (2017). Levy solution for bending analysis of functionally graded sandwich plates based on four variable plate theory. *Composite Structures*, 177, 80-95.
- Demirhan, P. A., & Taskin, V. (2019). Bending and free vibration analysis of Levy-type porous functionally graded plate using state space approach. *Composites Part B: Engineering*, 160, 661-676.

- Demirhan, P. A., & Taşkın, V. (2020). Transfer Matris Metodu ile Fonksiyonel Derecelendirilmiş Sandviç Kirişlerin Titreşim Analizi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 11(1), 259-269. <https://doi.org/10.24012/dumf.664735>
- Ermis, M., Dorduncu, M., & Kutlu, A. (2024). Peridynamic differential operator for stress analysis of imperfect functionally graded porous sandwich beams based on refined zigzag theory. *Applied Mathematical Modelling*, 133, 414-435.
- Filiz, S. (2010). *Eksenel fonksiyonel derecelendirilmiş çubuk ve kirişlerin serbest titreşimi* (Yüksek lisans tezi). Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.
- Gül, U. (2015). *Kirişlerin dinamik davranışlarının kayma deformasyonlu kiriş teorileri ile analizi* (Yüksek lisans tezi). Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.
- Hadji, L., & Avcar, M. (2021). Free vibration analysis of FG porous sandwich plates under various boundary conditions. *Journal of Applied and Computational Mechanics*, 7(2), 505-519. <https://doi.org/10.22055/JACM.2020.35328.2628>
- Kareem, S., & Noori, A. R. (2022). Influence of porosity on the free vibration response of sandwich functionally graded porous beams. *Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies*, 7(4), 291-301. <https://doi.org/10.47481/jscmt.1165940>
- Meksi, R., Benyoucef, S., Mahmoudi, A., Tounsi, A., Adda Bedia, E. A., & Mahmoud, S. R. (2017). An analytical solution for bending, buckling and vibration responses of FGM sandwich plates. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 21(2), 727-757. <https://doi.org/10.1177/1099636217698443>
- Özmen, U. (2021). *Fonksiyonel derecelendirilmiş kirişlerin mekanik analizi* (Doktora tezi). Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.
- Sınır, S., Çevik, M., & Sınır, B. G. (2018). Nonlinear free and forced vibration analyses of axially functionally graded Euler-Bernoulli beams with non-uniform cross-section. *Composites Part B: Engineering*, 148, 123-131.
- Solar, C., Demirhan, P. A., & Taskin, V. (2025). Investigation of static behavior of functionally graded porous sandwich beams with TPMS core. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*, 74(2), 109-114. <https://doi.org/10.3176/proc.2025.2.04>
- Soldatos, K.P (1992). A transverse shear deformation theory for homogeneous monoclinic plates. *Acta Mechanica*, 94(3): 195-220.

- Slimane, M., Hadj Mostefa, A., Hakima, B., Dimitri, R., & Tornabene, F. (2021). Higher-order free vibration analysis of porous functionally graded plates. *Journal of Composites Science*, 5(11), 305. <https://doi.org/10.3390/jcs5110305>
- Taşkın, S. (2021). *Eksenel fonksiyonel derecelendirilmiş Timoshenko kirişi ve Euler-Bernoulli kirişlerin sonlu elemanlar program çözümlerinin karşılaştırılması* (Yüksek lisans tezi). Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.
- Turan, M. (2018). *Tabakalı kirişlerin statik, serbest titreşim ve burkulma analizleri için bir sonlu eleman modeli* (Doktora tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Vo, T. P., Thai, H.-T., Nguyen, T.-K., Inam, F., & Lee, J. (2015a). A quasi-3D theory for vibration and buckling of functionally graded sandwich beams. *Composite Structures*, 119, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.08.006>



BÖLÜM 4

Sürdürülebilir Yeşil Bir Dünya için Doğal Afetlerde Makine Mühendisliği Yaklaşımıyla Araç Hasarlarında, İkame Araç Bedeli (Mahrumiyet Bedeli), Değer Kaybı ile Hasar Hesabı Yönünden Bir Araştırma

Ahmet Çoşgun¹

1.GİRİŞ :

Türkiye’de son 70 yılda çeşitli tehlikeler nedeniyle hasar gören konut sayısı 600.000 dolayındadır. Bu veri toplamın %66’sı depremlerden; %15’i su baskınlarından, %10’u yer kaymalarından, %7’si kaya düşmelerinden ve %2’si meteorolojik olaylardan ve çığ düşmelerinden kaynaklanmaktadır. Afetler; belirli bir coğrafi bölgede nispeten aniden ortaya çıkan, kolektif stres yaratan, önemli ölçüde kayıp yaratan ve toplumun yaşantısını sekteye uğratan olaylardır. Doğal afetlerden can ve mal kaybı açısından ilk sırada deprem bulunmaktadır. Bu nedenle doğal afetlerin irdelenmesi büyük önem taşımaktadır.

2.DOĞAL AFETLER

Son yıllarda Doğal Afetlerin başında sel, yangın büyük öneme sahiptir. Sel felaketi, Türkiye de ve bazı bölgelerimizde en fazla gözlenen “hidrometeorolojik” afetlerin başında gelmektedir. Sel’in en sık yaşanma nedeni, kuvvetli ve uzun süreli yağışlardır. Sel ve taşkınlar, kar ermesi sonucu oluşan akışlar veya drenaj kanallarının tıkanması sonucunda da meydana gelebilirler.

Sel’in oluşumuna baktığımızda, büyüklüğü ve verdiği zararların boyutu, önemli ölçüde o yerin klimatolojik-meteorolojik, jeolojik-jeomorfolojik, biyolojik özellikleri ve insanların çeşitli etkinlikleriyle doğrudan ilişkilidir. Türkiye doğal özellikleri, sosyo-ekonomik ve kültürel yapısı nedeniyle selin ve sel afetinin çok sık ve yaygın olarak görüldüğü bir ülke konumundayız. Türkiye de ilk bahar sonları ve yaz başları, sel olaylarının daha çok görüldüğü dönemlerdir. Bu dönemdeki seller daha etkili olmakta çoğunlukla da afet boyutuna varmaktadır. Türkiye’de sel olaylarının %51’i ilkbahar sonları ve yaz

¹ Doç. Dr., Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Kampüs/ ANTALYA, Orcid: 0000-0002-0243-5476

başlarında yaşanırken, geriye kalanın çok büyük bir kısmı kış, çok az bir kısmı da sonbahar aylarında görülmektedir.

Türkiye de sel olayının en fazla görüldüğü bölgeler ise, sırasıyla Karadeniz, **Akdeniz** ve Marmara Bölgeleridir. Sel olayları, sadece akarsulara bağlı olarak meydana gelmez. Çok çeşitli nedenden dolayı akarsu yatakları dışında, çevresine göre daha çukur olan alanlarda da görülür. Yukarıda söz edilen sebeplerden dolayı yamaçlarda yüzeysel akışa geçen sular, yamaçları kaplayarak akar ve çukur alanlarda birikerek sellenme'ye neden olur. Bu aslında yüksek dağların yanına yapılmış ovalar, ve platolar da imara açılmış yerler aslında selde risk altında olan yerler olup çok dikkatli ve güvenli alt yapı sistemlerinin kurulması gerekli olan yerlerdir. Burada yerel yönetimler çok büyük ön plana çıkmaktadırlar[1].

Türkiye de sel felaketleri ne örnek vermek gerekirse; 10 Ağustos 2005 tarihinde Erzurum da meydana gelen sel'de Erzurum şehrine ekonomik maliyeti de yaklaşık olarak 8.458.222 YTL kadar olmuştur[5] (*Erzurum Valiliği, İl Kriz Merkezi, 2005*).

17-18 Temmuz 2019 Akçakoca ve Cumayeri (Düzce) Sel Afeti Sonuçları Selden etkilenen bölgelere müdahale aşamasından sonra iyileştirme çalışmalarına geçilmiştir. Toplam 9.500.000 TL'lik ödenek bölgenin iyileştirilmesi amacıyla ayrılmıştır. İlk etapta 138 aileye toplam 491.000,00 TL barınma, taşınma ve eşya zararı kapsamında acil yardım ödemesi yapılmıştır[6](*Düzce Valiliği, İl Kriz Merkezi, 2019*).

Bu kapsamda Türkiye de geçerli olan trafik sigortaları afet durumunda ne yazık ki bir maddi yardım unsuru olamamaktadır. Zira, 2918 sayılı Karayolları trafik Kanunu bu kapsamda değerlendirilmemektedir. Bu kapsamda Kasko Genel Şartları madde A.2 hükmüne göre kasko sınırları Türkiye sınırları içinde geçerlidir. Ancak ek sözleşme teminat altına alınabilecek rizikoları gösteren m A.4 hükmüne göre Türkiye sınırları dışına da meydana gelen zararlarda teminat altına alınabilir.[3].

2.1. Doğa Olayları sonucu meydana gelen zararlar:

Deprem, Toprak kayması, Fırtına, dolu yıldırım veya yanardağ püskürmesi, sel ve sel baskını ile meydana gelmiş zararlar ek sözleşme ile teminat kapsamına dahil edilebilir.(GŞA.4.4 ve 5.)

Bu yukarıda sayılan afetler bir düzeyi tehlikeli iken; bazıları doğa olayı niteliğindedir. Doğal afet düzeyinde olmayan doğa olaylarından kaynaklanan zararlar teminat kapsamındadır. Bunlar için ek sözleşmeye gerek yoktur. Örneğin Yıldırım düşmesi örnek olarak verilebilir[2].

Doğal afet etkisiyle meydana gelen zararlarda sigortalının kastının bulunmaması gerekir. Tüm uyarılara rağmen sel baskının olduğu yere giren **kişi** sonrasında gerçekleşen zararlardan kasko teminatından bu durumda yararlanamaz. Doğal afetler sonucu gerçekleşen zararlardan ilgili doğa olayının etkisiyle sigortalı aracın fiziksel bir etki altında zarara gördüğü hallerde sigorta teminatı altındadır[3].

Türkiye de Antalya ili Kumluca İlçesinde 12.12.2022 tarihinde meydana gelen sel felaketinde araçların durumlarına ait fotoğraflar aşağıda sunulmuştur[4].



(Görseller Kumluca Belediye Başkanlığı arşivlerinden izin ile alınmıştır).

Bu sel felaketinde yaklaşık Antalya ili Kumluca ilçesinde 3.000-3.500 arasında araçlar hasar görmüş bu araçların çoğu sular altında kalmıştır. Sular altında kalanların özellikle motor aksamına ve diğer aksamına su girmesi nedeniyle

araçların çoğu pert total işleminde tabi tutulmuşlardır. Maddi hasar miktarı çok yüksek düzeydedir.

3-SEL VE DOĞAL AFETLERDE MEYDANA GELEN ARAÇ HASARLARI

Doğal afet sonucunda meydana gelen araçlarda özellikle motor kısmına su girmesi durumunda araçlarda çamur vb sadece kirlenme vb durumlarda aracın kaporta, döşeme kısımlarında meydana gelen hasarlarda kaportanın yenisi ile değiştirilmesi veya düzeltilmesi, boya ve boya malzemeleri ve işliğini bedelleri ayrı ayrı hesaplanması gerekmektedir. Burada genel olarak makine mühendisliği alanında parça bedeli + işçilik bedelinin güncel değişken piyasa koşullarındaki değerlerin belirlenmesi gerekmektedir. Diğer taraftan Pert total işlemine tabi tutulan araçlarda Yargıtay içtihatları gereğince ayrıca bir “değer kaybı” hesabının da yapılmaması gerekmektedir. Bazen Makine Mühendisleri bilirkişiler bu durumu dikkate almamaktadırlar Tabi ki böyle bir durumda yargılama hatalı bir durum almakta ve dosya sonradan yeniden ele alınmaktadır. Bu da davaların süresinin uzamasına neden olunmaktadır.

4- İKAME ARAÇ BEDELİ HESAPLAMASI:

Doğal afet sebebiyle aracın hiç yapılmaması durumunda aracın PERT TOTAL hale gelmesinde artık yeni aracın alınmaya kadar geçen sürenin belirlenmesi gerekmektedir. Burada örneğin sel felaketinde tamamen sular içerisinde kalan bir araç (motor + şase) Pert total işlemine tabi tutulmalı bu süre sarfında yeni aracının alımına kadar günlük benzer bir aracın kira bedeli belirlenmesi ile bu iki değer çarpılması ile araç ikame bedelinin belirlenmesi gerekmektedir. Birçok Yargıtay içtihatlarında bu yöndedir. İkame araç bedeli hesabında aracın kaza sonrası yapılmaya kadar geçen sürenin belirlenmesi çok önemli bir durumdur. Tabi ki burada araçta oluşan hasarlar bir makine mühendisi uzman tarafından değerlendirilmesi zorunludur. Bu durm dikkate alınarak aracın ikame aracın süresinin belirlenmesi makine mühendisliği alanında değerlendirilmektedir. Son zamanlarda 6754 sayılı bilirkişi kanunu gereğince uzmanlık alanlarında bir çok uzmanlık alanlarında kısıtlamaya gidilmektedir. Bu kısıtlamalarda makine mühendisi uzmanlık alanından alınarak oto emlakçıları tarafından yapılması yönünde bir kısıtlamada bulunmaktadır. Kanaatimce bu durumdan Yüksek yargı tarafından(Danıştay) dönüleceği yönündedir. Zira bir aracın tüm değerlendirmesi uzman Makine Mühendisliği ile Otomotiv Mühendisliği konularının arasındadır.

5- ARAÇ DEĞER KAYBI HESABI:

Doğal afet sebebiyle aracın motoruna su girmemesi durumunda örneğin bu tip araçlarda aracın kaporta vb hasar giderildikten sonra oluşan Değer kaybı hesabında kasko şirketinden istenebilir. Burada Makine Mühendisliği alanında Yargıtay içtihatlarında hesaplamalarda şu iki özelliğin belirlenmesi

gerekmektedir. Bunlardan birincisi aracın kaza yapmadan önceki ikinci el değerinin belirlenmesi gerekmektedir. Diğer taraftan araç yapıldıktan sonraki ikinci el değerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu değerlerin belirlenmesi araçtaki hasarın yaşı durumu plastik aksamın değişip değişmediği ile aracın daha önceden kazalı olup olmadığı gibi unsurların tamamı makine mühendisliği ve Otomotiv Mühendisliği alanında irdelenerek bu değerlerin belirlenmesi gerekmektedir. Ancak 6754 sayılı Bilirkişi kanununa bağlı yapılan uzmanlık ve alt uzmanlık alanlarının belirlenmesinde değer kaybı hesabı sigorta uzmanlarına verilmiş olup bu konuda Danıştay da süren davalarda mevcuttur. Bizimde kanaatimiz bu tip araçlar da değer kaybının Makine Mühendisliği ile otomotiv mühendisliği alanında çalışan mühendisler tarafından bilirkişi raporlarının düzenlenmesi gerektiği görüşüyoruz.

6.SONUÇ:

Türkiye de 12.12.2022 tarihinde Antalya İli Kumluca ilçesinde meydana gelen doğal bir afet olan sel olayında yaklaşık 3000-3500 aracın sel sularında hasar gördüğü düşünüldüğünde afetlerle ilgili olarak Tüm afetleri içine alan Zorunlu Afet Sigortaları Genel şartnamesinin düzenlenmesi gerektiği bununda hükümet tarafından yasal bir düzenlemenin yapılması gerektiği görüşüyoruz.

6754 sayılı Bilirkişi kanununa bağlı Bilirkişi yönetmeliği ile Bilirkişi Daire Başkanlığı İnternet ortamında her üç yılda yayınlanan bilirkişi uzmanlık alanlarının belirlenmesinde özellikle araç hasarları, ikame araç hesabı ve değer kaybı hesaplarının bu kanunun yürürlüğe girmeden önceki gibi uzmanlık alanları makine mühendisliği alanında uzman makine mühendisleri tarafından yapılmasını önermekteyim.

Özellikle Adalet Bakanlığı Bilirkişi Daire Başkanlığının uzmanlık alanlarının belirlenmesinde üniversitede yetkin öğretim üyelerinin görüşlerinin alınarak (Makine Mühendisliği ve Otomotiv Mühendisliği) bu uzmanlık alanlarının belirlenmesi gerektiği görüşüyoruz. Aksi takdirde bir Makine Mühendisi bilirkişi ile hasar miktarı hesabı(Parça + işçilik), araç ikame bedeli hesabı, değer kaybı hesabı yapabilirken bir davada; şu anda ise yürürlükteki Bilirkişi Daire Başkanlığının uzmanlık alanlarına göre 4(dört) bilirkişinin bir davada görev alması hem usul hukuku kapsamında kanuna aykırı olduğunun bir göstergesi sonucunu ortaya çıkmaktadır. Yüksek Yargı olan Danıştay tarafından bir kısım yukarıda belirtilen hususlar hakkında Özellikle Makine mühendislerin haklarını koruyan TMMOB bağlı Makine Mühendisleri Odasının bu konuda çalışmalar yapması, hukuki platformlarda durumun değerlendirilmesini önermekteyim.

KAYNAKLAR

- [1]. ÖZCAN ,E., Sel olayı ve Türkiye , GÜ, Gazi Eğitim Fakültesi Dergisi, Cilt 26, Sayı 1 (2006) 35-50
- [2]. Yargıtay 17.HD e: 2011/4081 ve K. 2011/11156 ve 24/11/2011 sayılı kararı, Yargıtay E.T.13.07.2023
- [3] Yüce , Alber, A., Kara Araçları Kasko sigortası Seçkin Hukuk Yayınevi, Ekim 2023, ISBN 9789750288623 , Ankara, Türkiye
- [4]. Görseller, “Kumluca Belediye Başkanlığı verileri” Kumluca, Antalya ,Türkiye (2022)
- [5]. Erzurum Valiliği, İl Kriz Merkezi, (2005).Türkiye.
- [6]. Düzce Valiliği, İl Kriz Merkezi, (2019).Türkiye