

KATI YAKITLI ROKET MOTORUNUN OLGUNLAŞMA SÜRECİNDE ASTAR ARAYÜZÜNDE OLUŞAN AYRILMANIN İNCELENMESİ

Fevzi Emirhan Bağcı¹

Erdem Acar²

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Ankara/
Roketsan A.Ş., Ankara

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi,
Ankara

ÖZET

Çalışmanın amacı, katı yakıtlı roket motorunun yakıt olgunlaşma sürecinde astar arayüzünde gerçekleşen ayrılmayı, termo-mekanik analizle doğrulamaktır. Analizde, yakıt döküm operasyonundan sonraki soğuma süreci simüle edilerek arayüzdeki ayrılma incelenecektir. Çalışma kapsamında ilk olarak yakıt, yalıtım ve astar malzemelerinin doğru modellenmesi için literatürden doğrulama çalışması yapılmıştır. Yakıt için doğrusal viskoelastik ve çelik için elastik malzeme modelleri kullanılmıştır. Yakıt ve yalıtım/gövde arasında yapıştırıcı görevi gören astar için kohezif bölge modelinden yararlanılmıştır. Roket motoru analizi için gerekli malzeme parametreleri kurum içi yapılan testlerle (soyulma, yapışma çekme, tek eksenli çekme ve gerilme gevşeme) elde edilmiştir. Elde edilen parametreler ile astar malzeme modeli oluşturulmuştur. Soyulma testi analizi gerçekleştirilerek astar malzeme modelinin doğruluğu araştırılmıştır ve yakın sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen astar malzeme modeli ile termo-mekanik analiz gerçekleştirilerek ayrılma gözlemlenen bölge ile gerçekte ayrılma gözlemlenen bölge karşılaştırılacaktır.

GİRİŞ

Katı yakıtlı roket motorları taktik füze sistemlerinde yaygın olarak kullanılır. Motor içerisinde yer alan yakıtın yanıp lüleden atılması ile gerekli itki oluşturulur. Katı yakıtlı roket motorları, yakıt çekirdeği konfigürasyonuna göre kartuş yüklemeli ve gövdeye yapışık olarak ikiye ayrılabilir. Kartuş yüklemeli yakıtlarda, yakıt kendi başına üretilir ve motor gövdesine hazır olarak yerleştirilir. Gövdeye yapışık yakıtlar ise genellikle, yalıtılmış metal/ kompozit gövde içerisine dökülerek üretilir ve şekillendirilir. Gövde/yalıtım ile yakıt arayüzüne uygulanan astar, yakıtın yapışmasına yardımcı olur [AGARD, 1997].

Roket motoru üretimden ateşleme anına kadar çeşitli çevresel etkilere maruz kalır ve süreç boyunca yapısal bütünlüğünü korumalıdır. Maruz kaldığı çevresel etkilerden biri de yakıt olgunlaşma sürecinde maruz kaldığı ısı yükleridir [Yıldırım & Özüpek, 2011]. Isıl yükler termal genleşmeye ve yakıt-yalıtım arayüzünde ayrılmaya sebep olabilirler. Arayüzdeki ayrılma, motorda yüksek basınç veya gövdenin ısıya karşı korumasız kalmasına sebep olarak motorda patlama meydana getirebilir [Dhital vd., 2014]. Bu yüzden motorun maruz kalacağı yükler göz önüne alınarak analizler gerçekleştirilmeli ve tasarım değerlendirilmelidir.

¹ Yüksek lisans öğrencisi, Makine Müh. Böl., E-posta: f.bagci@etu.edu.tr

² Prof. Dr., Makine Müh. Böl., E-posta: acar@etu.edu.tr

Roket motorunun yapısal analizinin doğru yapılabilmesi için bileşenlerin mekanik davranışının doğru modellenmesi kritiktir. Bu kapsamda literatürde genellikle; yakıt lineer viskoelastik ve yalıtım hiperelastik malzeme olarak modellenmiştir fakat bu arayüzde yapıştırıcı görevi gören astar modele dahil edilmeyerek yakıt-yalıtım/gövde arayüzünün yapışık olduğu varsayımı yapılmıştır.

Arayüz ayrılmalarının simüle edilmesinde yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri kohezif bölge modelidir. Bu modelde yapıştırıcının davranışı çekme-ayırılma grafiği üzerinden tanımlanır. Bu grafikte maksimum yapışma dayanımı, tam ayrılma için gerekli enerjiyi gösteren kırılma enerjisi ve başlangıç/yapışma katılığı bilgileri yer almaktadır. Analitik hesaplardan geri besleme yapılarak nümerik analiz ile parametreler kalibre edilmektedir [Zhou vd., 2014; Linke & Lammering, 2023].

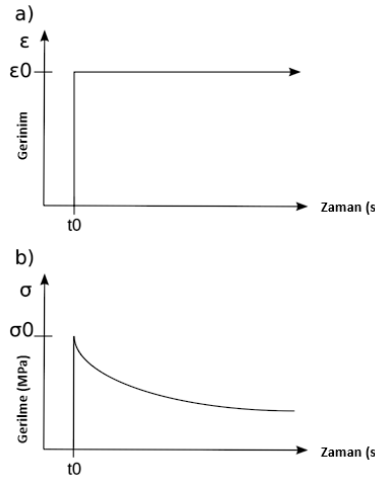
Bu çalışmada astar; yapıştırıcıların ve arayüz ayrılmalarının modellenmesinde yaygın olarak kullanılan kohezif bölge modeli kullanılarak analize dahil edilmiştir. Bu modelleme sayesinde arayüzde oluşan yüke bağlı olarak ayrılma olup olmadığı gözlemlenebilecektir.

YÖNTEM

Bu çalışmada astar arayüzünde ayrılma üç bölümde incelenecektir: bileşen (yakıt, astar, yalıtım, gövde) malzemelerinin modellenmesi, astar malzeme parametrelerinin tersine analizle kalibre edilmesi ve roket motorunun termo-mekanik analizinin gerçekleştirilmesi.

Bileşen Malzemelerinin Modellenmesi

Yakıt: Yakıt, HTPB (Hydroxyl-terminated polybutadiene) bazlı kompozit bir malzemedir ve yaygın olarak doğrusal viskoelastik olarak modellenmektedir. Bu malzeme modelinde gerilme-gerinim arasındaki ilişki gerilme gevşeme (stress relaxation) testleri ile kurulmaktadır. Sabit gerinim altında gerilmenin zamana bağlı değişimi elde edilmektedir. Örnek test sonucu Şekil 1 ile gösterilmiştir.



Şekil 1: Tipik Gerilme Gevşeme Test Sonucu: a) gerinim-zaman ve b) gerilme-zaman

Gevşeme modülleri genellikle Prony serisi ile ifade edilmektedir. Aşağıda denklem olarak gösterimi verilmiştir. Gerilme gevşeme testi farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilerek zaman-sıcaklık arasında da bir bağıntı kurulmaktadır ve WLF (Williams–Landel–Ferry) denklemi ile modellenmektedir [AGARD, 1997].

$$E(\xi) = E_{\infty} \sum_{i=1}^n E_i \exp\left(-\frac{\xi}{\lambda_i}\right)$$

Burada E_{∞} denge modülünü, E_i gevşeme katsayılarını ve λ_i gevşeme zamanlarını ifade etmektedir.

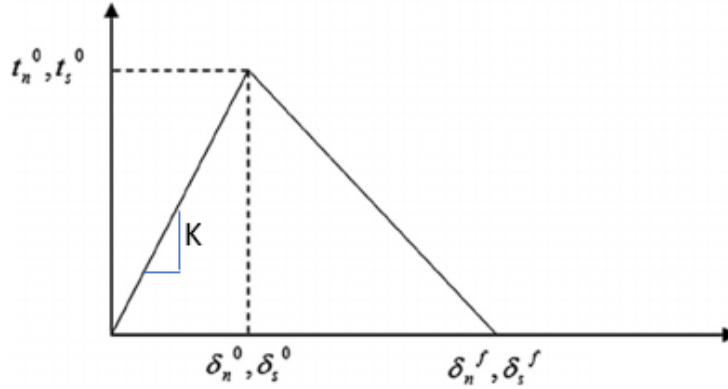
Yalıtım: Yalıtım, EPDM (Ethylene Propylene Diene Monomer) kauçuk bazlı bir malzemedir. Doğrusal olmayan veya hiperelastik malzeme sınıfına girdiği için gerinim enerji yoğunluğu fonksiyonu şeklinde modellenmesi uygundur. Çekme testi (varsa çift eksenli çekme ve düzlemsel gerilme testleri ile birlikte) sonucu, malzeme modellerine oturtularak gerinim enerji yoğunluğu fonksiyonu katsayıları elde edilmektedir. Bu çalışmada kullanılan Ogden malzeme modeli [Ogden, 1972] aşağıdaki denklemde açıklanmıştır:

$$U = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^m \frac{c_j}{b_j} (\lambda_i^{b_j} - 1)$$

Burada U gerinim enerji yoğunluğunu, c_j , b_j malzeme sabitlerini ve λ_i asal gerinimleri (principal stretch) ifade etmektedir.

Gövde: Gövde malzemesi çeliktir. Yükleme koşullarında plastik deformasyon beklenmediği için elastik olarak modellenmesi uygundur. Malzeme modeli için gerekli bilgiler tek eksenli çekme testi sonucu elde edilmektedir.

Astar: Astar, tek başına hiperelastik özellik gösterdiği halde yakıt ile bağlı olduğu parçayı birbirine yapıştırma görevi gördüğü için arayüzde yapıştırıcı olarak modellenmesi uygundur. Yapıştırıcı arayüz için kohezif bölge modeli yaygın olarak kullanılmaktadır. Kohezif bölge modelinde, yapışma mukavemeti ve başlangıç/yapışma katılığını elde etmek için yapışma çekme testi veya tek eksenli çekme testi, kırılma enerjisini elde etmek için DCSB (Double Cantilever Sandwich Beam) testi ve soyulma testi yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu testlerin verileri ile çekme-ayrılma grafiği tanımlanarak malzeme modeli oluşturulmaktadır. Tipik bir çekme-ayrılma grafiği Şekil 2 ile gösterilmiştir. Grafikte n indisi çekme yönü, s indisi kayma yönünü ifade etmektedir. Burada t^0 maksimum yapışma mukavemetini, δ^0 ayrılma başlangıcını, δ^f ayrılma sonunu, K başlangıç/yapışma katılığını ve grafiğin altında kalan alan kırılma enerjisini (G_a) göstermektedir.



Şekil 2: Tipik Çekme-Ayrılma Grafiği

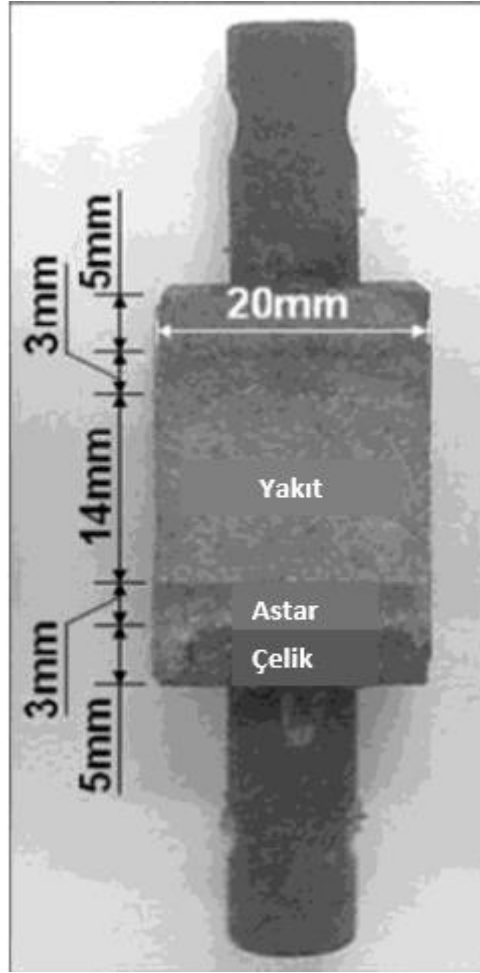
Kırılma modunun çekme yönünde beklenmesi sebebiyle bu çalışmada mod I kırılma için kohezif bölge modeli oluşturulacaktır.

Yapışma Çekme Testi

Maksimum yapışma mukavemetinin elde edilmesi için yapışma çekme testi gerçekleştirilmektedir. Bu testlerde kullanılan örnek bir numune Şekil 3 ile gösterilmiştir. Test sonucunda aşağıdaki denklem üzerinden maksimum yapışma mukavemeti elde edilmektedir.

$$\sigma_c = \frac{P_c}{A}$$

Burada P_c kritik yükü ve A astar kesit alanını belirtmektedir.

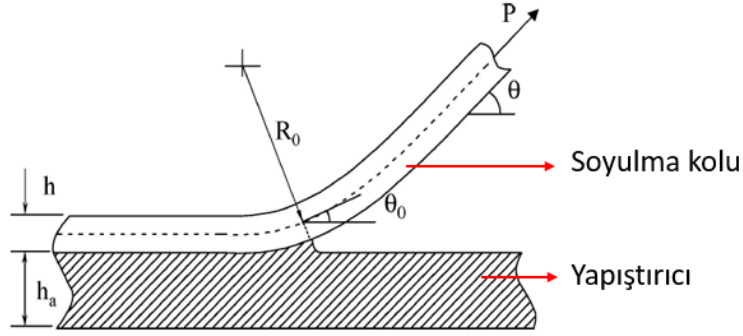


Şekil 3: Yapışma Çekme Testi Numunesi [Qiu vd., 2014]

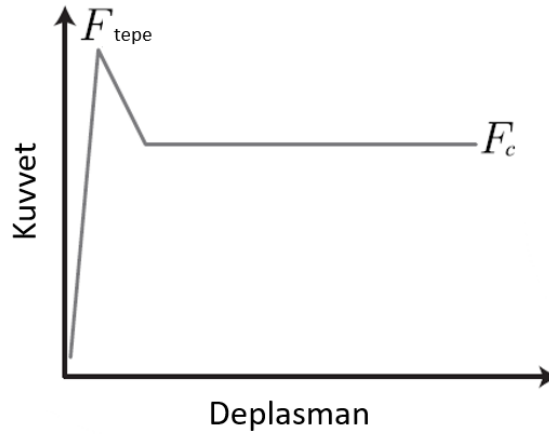
Soyulma Testi

Soyulma testinin genel konseptinde “w” genişliğinde malzeme, görece esnek olan soyulma koluna yapışmıştır ve bu kola “ θ ” açısı ile kuvvet uygulanır. Kuvvet, kritik kuvvet F_c 'ye ulaştığı zaman malzeme yapıştığı malzemeden ayrılır. Kritik kuvvet F_c 'ye ulaşıp düzgün ayrılma olmadan önce genellikle tepe değeri gözlenir. Bunun temel sebepleri (1) tanımlı bir kırık olmaması ve (2) konfigürasyon kaynaklı öz benzeşik geometri eksikliği. Öz benzeşik kavramı ile ayrılma prosesinin ayrılma uzunluğundan bağımsız olması yani kararlı haldeki ayrılma kastedilmektedir. Kritik soyulma kuvveti pek çok faktöre bağlıdır: kullanılan malzemelerin kalınlığı ve özellikleri, malzemelerde plastisite veya diğer enerji kayıplarının gerçekleşmesi, arayüzün yapıştırıcı özellikleri, soyulma açısı θ , sıcaklık, hız ve çevre gibi test şartları. Soyulma testlerinin amacı genellikle (1) kırılma enerjisini (G_a) veya (2) test standartlarına göre soyulma direncini (numune genişliği boyunca ayrılma kuvvetini) ölçmektir [Bartlett vd., 2023].

Soyulma testi şematik olarak Şekil 4 ile gösterilmiştir. Test sonucunda beklenen tipik kuvvet-deplasman grafiği Şekil 5 ile gösterilmiştir.



Şekil 4: Soyulma Testi [Kawashita vd., 2005]



Şekil 5: Soyulma Testi Sonucu Tipik Kuvvet-Deplasman Grafiği

Soyulma testinde soyulma kolunda meydana gelen bükülme, elastik ve plastik deformasyon kaynaklı enerji kayıplarının da dikkate alınması ve enerji denklemleri üzerinden kırılma enerjisinin elde edilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda aşağıdaki denklemler üzerinden kırılma enerjisi hesabı gerçekleştirilmektedir [Kawashita vd., 2005; Kinloch vd., 1994]. Denklemlerde kullanılan terimler Tablo 1 ile açıklanmıştır.

$$G_a = \frac{1}{b} \left(\frac{dU_{\text{ext}}}{da} - \frac{dU_s}{da} - \frac{dU_{dt}}{da} - \frac{dU_{db}}{da} \right)$$

$$dU_{\text{ext}} = Pda(1 + \varepsilon_a - \cos \theta)$$

$$d(U_s + U_{dt}) = bhda \int_0^{\varepsilon_a} \sigma \cdot d\varepsilon$$

$$G_a = \frac{P}{b} (1 + \varepsilon_a - \cos \theta) - h \int_0^{\varepsilon_a} \sigma \cdot d\varepsilon - G_{db}$$

Bu denklem ile G_a 'nın bulunabilmesi için tek bilinmeyen G_{db} 'dir. Bunun için normalize edilmiş k_0 parametresi üzerinden fonksiyonlar tanımlanarak ve bilinen enerji değerleri kullanılarak denklemler oluşturulmuştur. Bu denklemlerde k_0 ve θ_0 parametreleri birbirine bağlıdır ve iteratif şekilde çözümlenerek denklem setlerini sağlaması gerekmektedir. Bulunan k_0 değeri ile G_{db} elde edilmektedir ve dolayısıyla G_a değeri bulunabilmektedir.

$$k_0 = \frac{h}{2\varepsilon_y R_0}$$

$$\frac{G_{db}}{G_{max}^e} = f_1(k_0)$$

$$\frac{G_a^{\infty E}}{G_{max}^e} = \frac{(1 - \cos \theta)}{[1 - \cos(\theta - \theta_0)]} \cdot f_2(k_0)$$

$$\theta_0 = (2\varepsilon_y k_0) \sqrt{0.2 + \sqrt{0.058 + \frac{h_a E}{3hE_a}}}$$

$$G_{max}^e = \frac{1}{2}(\sigma \varepsilon_y h) = \frac{1}{2}(E \varepsilon_y^2 h)$$

$$G_a^{\infty E} = \frac{P}{b}(1 - \cos \theta)$$

$k_0 > 2 \frac{(1 - \alpha)}{(1 - 2\alpha)}$ olduğu durum (soyulma kolunun hem yükleme

hem de boşaltma anlarında plastik deformasyona uğraması) için;

$$f_1(k_0) = \frac{4}{3} \alpha (1 - \alpha)^2 k_0^2 + 2(1 - \alpha)^2 (1 - 2\alpha) k_0 + \frac{2(1 - \alpha)}{3(1 - 2\alpha) k_0} [1 + 4(1 - \alpha)^3] - (1 - \alpha) [1 + 4(1 - \alpha)^2]$$

$$f_2(k_0) = \frac{1}{3} \alpha [1 + 4(1 - \alpha)^2] k_0^2 + 2(1 - \alpha)^2 (1 - 2\alpha) k_0 + \frac{8}{3} \frac{(1 - \alpha)^4}{(1 - 2\alpha) k_0} - 4(1 - \alpha)^3.$$

Tablo 1: Denklemlerde Kullanılan Semboller ve Anlamları

Sembol	Anlamı	Sembol	Anlamı
G_a	Kırılma enerjisi [N/m veya J/m ²]	ε_a	Çekme gerinimi [mm/mm]
G_{db}	Bükülme kaynaklı enerji kaybı [N/m veya J/m ²]	θ	Soyulma açısı [derece]
G_{max}^e	Maksimum elastik enerji [N/m]	θ_0	Soyulma kök açısı [derece]
$G_a^{\infty E}$	Soyulma kolunun sonsuz rijit varsayılması durumunda kırılma enerjisi [N/m]	h	Soyulma kolu kalınlığı [mm]

dU_{ext}	Harici iş [J]	h_a	Astar kalınlığı [mm]
dU_s	Soyulma kolunda depolanan gerinim enerjisi [J]	k_0	Normalize edilmiş eğri
dU_{dt}	Soyulma kolundaki çekme deformasyonu kaynaklı enerji kaybı [J]	R_0	Soyulma kolu asıl yarıçapı [mm]
dU_{db}	Soyulma kolundaki bükülme kaynaklı enerji kaybı [J]	ϵ_y	Akma gerinimi [mm/mm]
b	Soyulma kolu genişliği [mm]	E	Soyulma kolu Young modülü [GPa]
a	Çatlak uzunluğu [mm]	E_a	Astar Young modülü [GPa]
P	Soyulma kuvveti [N]	α	Pekleşme parametresi

Termo-mekanik Analiz

Termo-mekanik analiz, termal ve yapısal analizin bağlaşıklar olarak çözüldüğü bir analiz türüdür. Zayıf bağlaşıklar (weak coupling) varsayımı yapıldığında, termal analizde termal yüklerin etkisiyle oluşan sıcaklık dağılımı elde edilir ve bu dağılım yapısal analize aktarılır. Varsa yapısal yükler de analize dahil edilir ve gerilme/gerinim sonuçları elde edilir [Ferraiuolo vd., 2022]. Analiz akışının şematik gösterimi Şekil 6 ile gösterilmiştir. Bu çalışmada da benzer bir yaklaşım benimsenecektir.



Şekil 6: Termo-mekanik Analiz Akış Şeması

UYGULAMALAR VE DEĞERLENDİRME

Doğrulama Çalışması

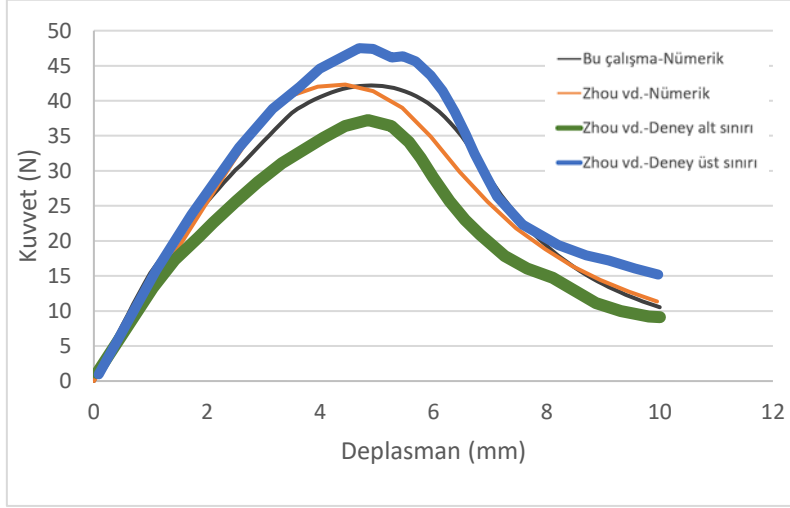
Malzeme modellerinin ve analiz yönteminin doğruluğunu teyit etmek amacıyla Zhou vd.nin çalışmasından faydalanılmıştır [Zhou vd., 2014]. Zhou vd. çalışmasında, motor bileşenlerinin malzeme testlerini ve yakıt-astar-yalıtım arayüz testlerini gerçekleştirmiştir. Bu test sonuçlarını kullanarak astarı, kohezif bölge modeli olarak modellemiş ve ilk parametreleri üretmiştir. Sonrasında ABAQUS yazılımı ile DCSB testini modelleyerek kohezif bölge parametrelerini kuvvet-deplasman grafiğini sağlayacak şekilde kalibre etmiştir.

Bu bildiriye, ANSYS yazılımı kullanılarak doğrulama çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma sonuçlarının, makaledeki kuvvet-deplasman ve çekme-ayrılma grafikleriyle karşılaştırılması sırasıyla Şekil 7 ve Şekil 8 ile gösterilmiştir.

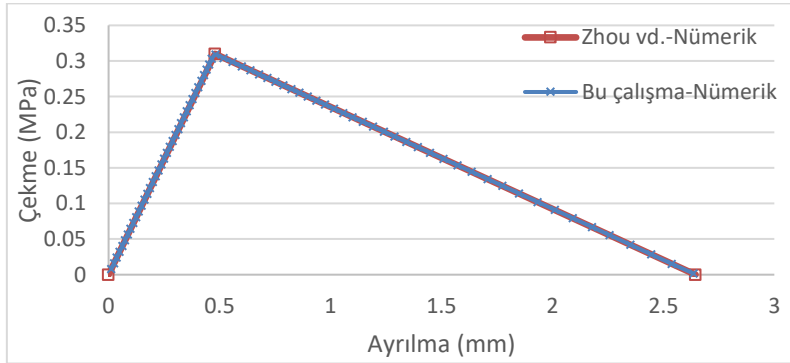
Kuvvet-deplasman grafiğinde, nümerik analiz sonuçlarında maksimum kuvvet değerinde %0,3 ve bu değere karşılık gelen deplasman değerinde %10.3'lük bir fark gözlenmiştir. Deney sonuçlarının

ortalamasına göre ise maksimum kuvvet değerinde %0.34 ve bu değere karşılık gelen deplasman değerinde %1,1'lik bir fark gözlenmiştir. Bu çalışmadaki nümerik analiz sonucu eğri boyunca deney alt ve üst sınırı içerisinde kalmıştır.

Çekme-ayrılma grafiği sonuçlarında maksimum çekme değerinde %0.35 ve bu değere karşılık gelen ayrılma değerinde %0.56'lık bir fark gözlenmiştir.



Şekil 7: Kuvvet-Deplasman Grafiği Karşılaştırması



Şekil 8: Çekme-Ayrılma Grafiği Karşılaştırması

Astar Malzeme Modelinin Oluşturulması

Maksimum yapışma mukavemeti: Maksimum yapışma mukavemetinin elde edilmesi için yapışma çekme testi gerçekleştirilmiştir. Kullanılan numune Şekil 3 ile gösterilmiştir. Test sonucunda elde edilen veriler Tablo 3 ile gösterilmiştir.

Başlangıç/yapışma katılığı: Başlangıç/yapışma katılığının elde edilmesi için astar numunesine tek eksenli çekme testi gerçekleştirilmiştir. Çekme testi sonucunda elde edilen Young Modülü'nün astar kalınlığına (0,4 mm) bölünmesi ile elde edilen değer kullanılmıştır [Zhou vd., 2014]. Test sonucunda elde edilen veriler Tablo 3 ile gösterilmiştir.

Kırılma Enerjisi: Kırılma enerjisi hesabında kullanılan parametreler Tablo 2 ile verilmiştir. Hesaplama, IC Peel yazılımı üzerinden gerçekleştirilmiştir [IC Peel, 2024]. Her bir numuneden elde edilen P değerine göre hesaplanan kırılma enerjisi Tablo 3 ile gösterilmiştir.

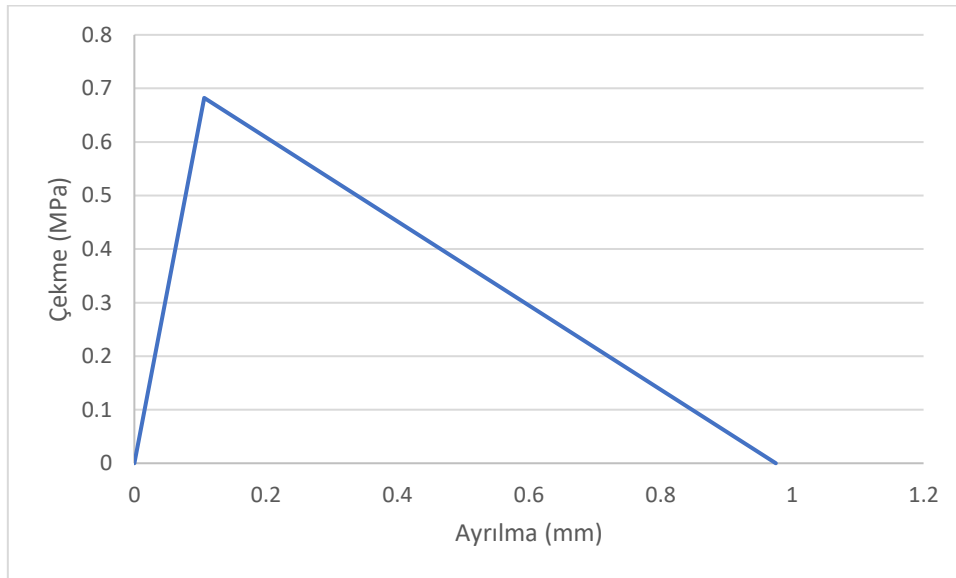
Tablo 2. Soyulma Testi Kırılma Enerji Hesabı Girdileri

Parametre	Değer
b	75 mm
P	37 N
θ	90°
h	0,05 mm
h_a	0,4 mm
ϵ_y	1,075E-3
E	200 GPa
E_a	2,56E-3 GPa
α	0,008

Tablo 3. Kırılma Enerjisi, Maksimum Yapışma Mukavemeti ve Başlangıç/Yapışma Katılığı Parametrelerinin Deney/ Hesaplama Değerleri

Test Numuneleri	G_a [J/m ²]	σ_c [MPa]	K [N/mm ³]
1	320,18	0,6512	6,4254
2	318,25	0,7974	6,4321
3	342,41	0,6771	6,4189
4	330,68	0,6339	6,4065
5	352,08	0,6519	6,3711
Ortalama	332,72	0,6823	6,4108
Standart sapma	14,48	0,06616	0,02412

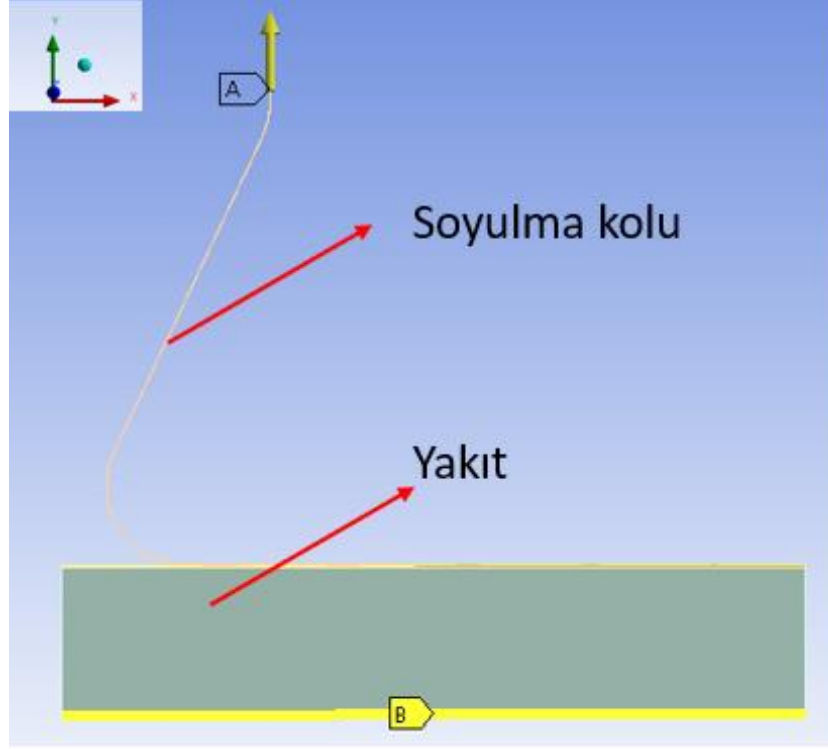
Bu parametreler doğrultusunda kohezif bölge modelini tanımlayan çekme-ayrılma grafiği, Şekil 9 ile gösterilmiştir.



Şekil 9: Oluşturulan Çekme-Ayrılma Grafiği

Soyulma Testi Sonlu Elemanlar Analizi

Analizde kullanılan geometri ve sınır koşulları Şekil 10 ile gösterilmiştir. A ile gösterilen yüzeye +y yönünde 25 mm deplasman olacak şekilde ve B ile gösterilen kenara x ve y'de deplasman olmayacak şekilde tanımlama yapılmıştır. Geometri ve sınır koşulları uygun olduğu için düzlemsel gerinim varsayımı yapılmıştır. Analizde kullanılan yakıt, astar ve çelik malzemelerinin özellikleri sırasıyla Tablo 4, Tablo 5 ve Tablo 6 ile verilmiştir.



Şekil 10: Soyulma Testi Geometrisi ve Sınır Koşulları

Tablo 4. Yakıt Malzeme Özellikleri

<u>İzotropik Elastisite</u>			
ν	0,499	E (MPa)	4,62
<u>Prony Serisi</u>			
Katsayı	Bağıl Gevşeme Modülü	Gevşeme Zamanı (s)	
1	0,145885	0,016947	
2	3,33E-05	0,068783	
3	0,094137	0,279163	
4	0,009085	1,133015	
5	0,028405	4,598476	
6	3,33E-05	18,66347	
7	0,013176	75,74791	
8	0,000562	307,4319	
9	3,33E-05	1247,749	
10	0,007673	5064,14	

WLF Kayma Fonksiyonu		
Referans Sıcaklık (K)	C1	C2
20	4,15	159,47

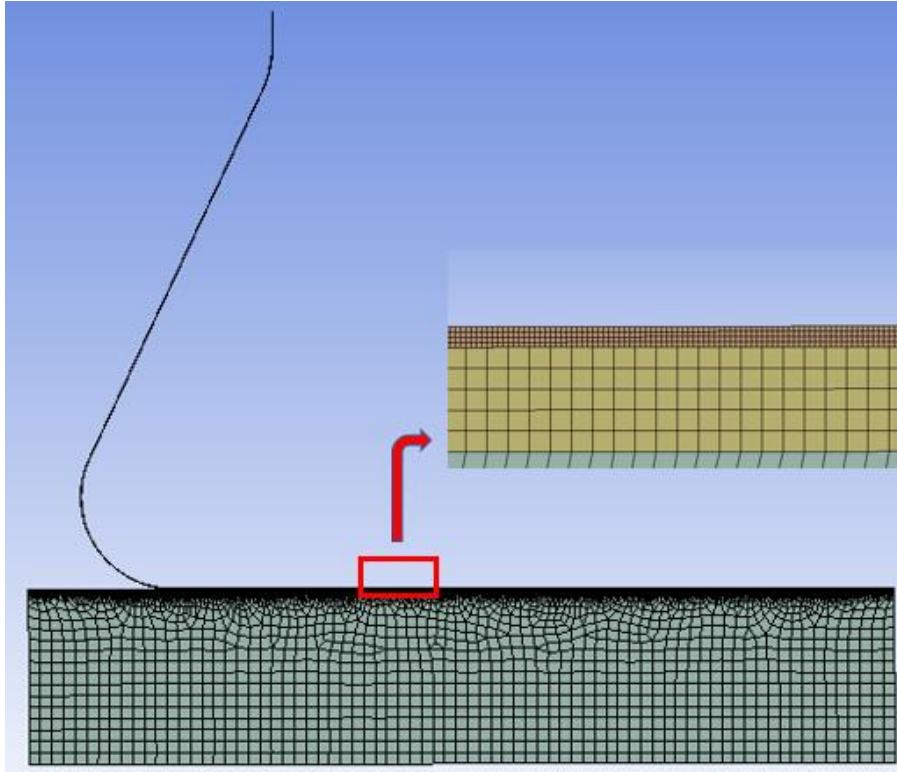
Tablo 5. Astar Malzeme Özellikleri

Parametre	Değer
σ_c (MPa)	0,68
G_a (J/m ²)	332,72
Yapay Sönümlenme Katsayısı	0.0001

Tablo 6. Çelik Malzeme Özellikleri

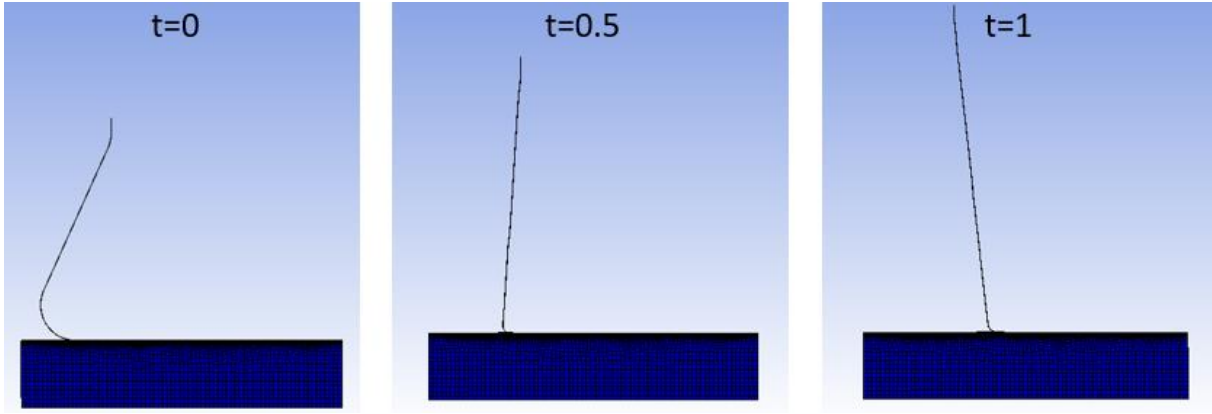
Parametre	Değer
ν	0,3
E (MPa)	200000
σ_y (MPa)	215
E_t (MPa)	1605

Soyulma kolu ve yakıt için toplam 53535 adet doğrusal dörtgen eleman ile çözüm ağı oluşturulmuştur. Çözüm ağı Şekil 11 ile gösterilmiştir.



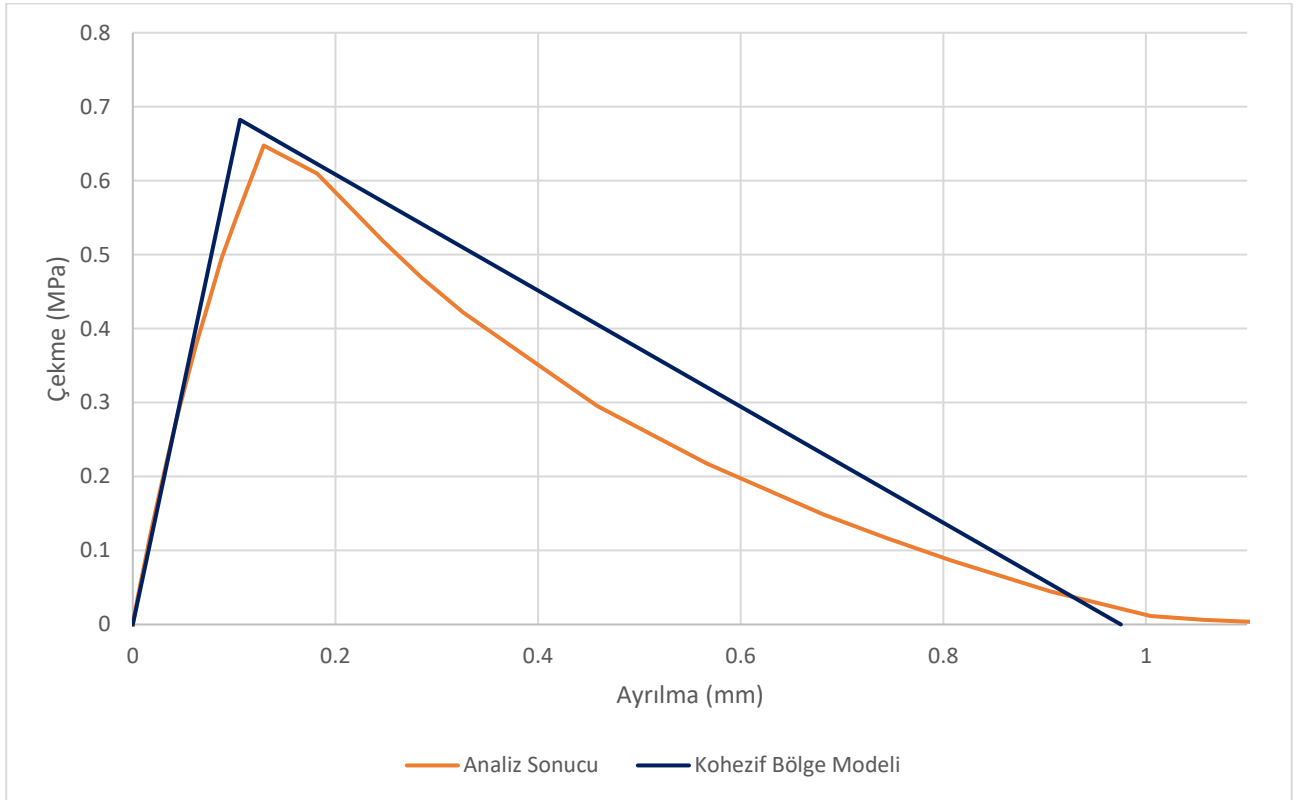
Şekil 11: Soyulma Testi Geometrisi Çözüm Ağı

Soyulma kolu ile yakıt arasına yapışık temas tanımlanmıştır. Oluşturulan temasa, kırılma modülü kullanılarak astar malzemesi atanmıştır. Analiz sonucu gözlemlenen ayrılma, zaman adımlarına göre Şekil 12 ile verilmiştir.

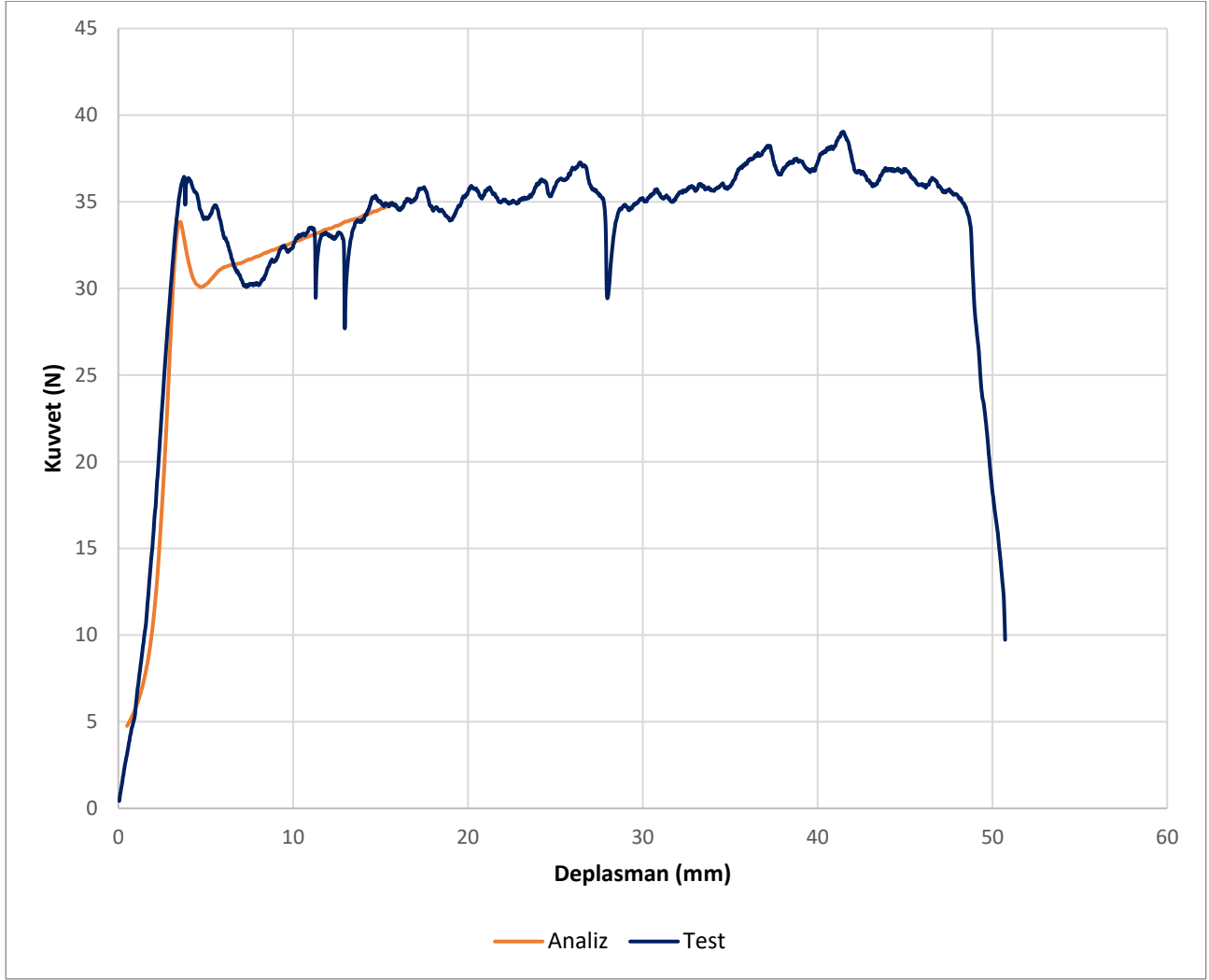


Şekil 12: Analizde Gözlemlenen Ayrılmanın Zamana Bağlı Değişimi

Analizde tanımlanan kohezif bölge modeli ile temas bölgesinden elde edilen çekme ayrılma grafiği karşılaştırması Şekil 13 ile gösterilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman grafiği ile deney verilerinin karşılaştırması Şekil 14 ile verilmiştir.



Şekil 13: Kohezif Bölge Modeli ve Analiz Sonucu Çekme-Ayrılma Grafikleri



Şekil 14: Soyulma Testi ve Analiz Sonucu Kuvvet Deplasman Grafikleri

Analiz sonucuna göre çekme ayrılma grafiğinde maksimum yapışma mukavemetinde %5 ve kırılma enerjisinde %9,1'lik bir fark bulunmaktadır. Profil benzemektedir. Kuvvet deplasman grafiğinde F_{tepe} değerleri arasında %8,9 ve F_c değerleri arasında %8,1'lik bir fark bulunmaktadır. Profil benzemektedir. Analizde ilk 25 mm'lik bölge karşılaştırılmıştır.

SONUÇ

Bu çalışmada, roket motorunda yer alan yakıt, astar ve çelik malzeme modelleri oluşturularak arayüzdeki ayrılma olayı incelenmiştir. Astar malzeme modeli olarak kohezif bölge modeli kullanılmıştır ve bu kapsamda soyulma ve yapışma çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Analiz modelini teyit etmek amacıyla ilk olarak doğrulama çalışması gerçekleştirilmiştir ve yakın sonuçlar elde edilmiştir.

Astarın kohezif bölge modeli parametrelerinin kalibre edilmesi için soyulma testi analizi gerçekleştirilmiştir ve analiz sonuçları ile test sonuçları karşılaştırılmıştır. Yakın sonuçlar elde edilmiştir. Motor seviyesi gerçekleştirilecek yakıt olgunlaşma sonrası soğuma analizinde astar analize dahil edilerek arayüzde ayrılma olayı incelenecektir.

Kaynaklar

- AGARD. (1997). Structural assessment of solid propellant grains. NATO.
- Bartlett, M. D., Case, S. W., Kinloch, A. J., & Dillard, D. A. (2023). Peel tests for quantifying adhesion and toughness: A review. *Progress in Materials Science*, 137, 101086.
- Dhital, D., Lee, J. R., Farrar, C., & Mascarenas, D. (2014). A review of flaws and damage in space launch vehicles: Motors and engines. *Journal of intelligent material systems and structures*, 25(5), 524-540.
- Ferraiuolo, M., Perrella, M., Giannella, V., & Citarella, R. (2022). Thermal–Mechanical FEM Analyses of a Liquid Rocket Engines Thrust Chamber. *Applied Sciences*, 12(7), 3443.
- ICPeel Spreadsheet, Imperial College London Website, www.me.ic.ac.uk/AACgroup Erişim Tarihi: 04.08.2024
- Kawashita, L. F., Moore, D. R., & Williams, J. G. (2005). Analysis of peel arm curvature for the determination of fracture toughness in metal-polymer laminates. *Journal of materials science*, 40, 4541-4548.
- Kinloch, A. J., Lau, C. C., & Williams, J. G. (1994). The peeling of flexible laminates. *International Journal of Fracture*, 66, 45-70.
- Linke, M., & Lammering, R. (2023). On the calibration of the cohesive strength for cohesive zone models in finite element analyses. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 124, 103733.
- Ogden, R. W. (1972). Large deformation isotropic elasticity—on the correlation of theory and experiment for incompressible rubberlike solids. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, 326(1567), 565-584.
- Qiu, X., Li, G. C., Ding, B., and Cao, M. C., *J. Propul. Technol.* **1**, 115-122 (2014).
- Yıldırım, H. C., & Özüpek, Ş. (2011). Structural assessment of a solid propellant rocket motor: Effects of aging and damage. *Aerospace Science and Technology*, 15(8), 635-641.
- Zhou, Q. C., Ju, Y. T., Wei, Z., Han, B., & Zhou, C. S. (2014). Cohesive zone modeling of propellant and insulation interface debonding. *The Journal of Adhesion*, 90(3), 230-251.