

KATLANABİLİR FÜZE KANADININ DİRENGENLİK KISTASINA GÖRE YAPISAL ENİYİLEMESİ

Ata Ürün¹, Melin Şahin², Ercan Gürses³

Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Mühendisliği,
Dumlupınar Blv. No: 1, 06800, Ankara

ÖZET

Katlanabilir füze kanat yapıları, fırlatıldıktan sonra burulma yayları ile aktive edilmektedir ve bu yaylar zamanla gevşemeye uğramaktadır. Kanat mekanizmalarının azalan tork değerlerinde de düzgün açılabilmesi için katlanabilir kanat yapılarının hafif olması gerekmektedir. Bununla birlikte füze sisteminin toplam ağırlığı da azaltılmaya çalışılmalıdır. Bu sebeplerden dolayı ilgili füze sistemi üzerinde bulunan dört adet alüminyum katlanabilir kanat için hafifletme çalışması yapılmıştır. Yapılan bu çalışmada, topoloji eniyileme varyasyonlarından biri olan “Çift-Yönlü Evrimsel Yapısal Eniyileme” metodu kullanılarak iki parçadan oluşan katlanabilir füze kanadının ve böylece tüm füze sisteminin ağırlığı azaltılmış, ağırlık azaltılırken kanadın direngenliğinin olabildiğince korunmasına da dikkat edilmiştir. Seçilen metotla çoklu-bileşen eniyilemesi alanında çalışma yapılarak literatüre yeni bir katkı da sunulmuştur. MATLAB programı kullanılarak oluşturulan ortamda NASTRAN sonlu eleman çözücüsü kullanılarak gerekli iterasyonlar yapılmış ve çözüme ulaşılmıştır. Eniyileme sonunda konvansiyonel üretim tezgâhlarıyla üretilebilecek özgün bir kanat tasarımı da elde edilmiştir.

GİRİŞ

Füze sistemleri, atıldığı platformlara bağlı olarak farklı yapısal konfigürasyonlarda olabilmektedir. Bir füze sistemi, uçaktan bırakılabileceği gibi, “fırlatıcı” adı verilen üstü açık platformlardan, ya da “kanister” adı verilen çevresi kapalı ve korunaklı platformlardan da atılabilir. Kanister platformundan atılan füze sistemleri, daha az hacim kaplayarak platforma sığma amacına yönelik olarak katlanabilir kanat yapılarına sahiptir. Katlanabilir kanat yapıları, fırlatıldıktan sonra burulma yayları ile aktive edilmektedir. Bu burulma yayları on beş yıla varan süreler boyunca kanister içinde burulmuş ve açılmaya hazır halde durabilmektedirler. Bu sürenin sonunda burulma yayları, yapısına da bağlı olarak gevşemeye uğramakta ve tork değerleri de azalmaktadır. Kanat mekanizmalarının on beş yıl sonra azalan tork değerleriyle de hızlı ve sağlam bir şekilde açılabilmesi için katlanabilir kanat yapılarının olabildiğince hafif olması gerekmektedir. Ayrıca, her havacılık yapısında olduğu gibi toplam ağırlığın azaltılması da oldukça önemlidir. Belirtilen bu sebeplerden ötürü, füze sistemi üzerinde bulunan dört adet alüminyum katlanabilir kanadın hafifletilmesine yönelik bir çalışma yapılmasına karar verilmiş ve topoloji eniyilemesi metodu kullanılmıştır. Topoloji eniyilemesi, belirli bir hacimde bulunan malzeme miktarını en aza indirecek şekilde malzeme dağılımını düzenleyen bir tasarım metodudur. Yapılan bu çalışmada şu metotlar incelenmiştir:

¹ Yüksek Lisans Öğrencisi Havacılık ve Uzay Müh. Böl. E-posta: ata.urun@metu.edu.tr

² Doç. Dr. Havacılık ve Uzay Müh. Böl. E-posta: msahin@metu.edu.tr

³ Doç. Dr. Havacılık ve Uzay Müh. Böl. E-posta: gurses@metu.edu.tr

Katı İzotropik Mikroyapıların Ceza Unsuruyla Eniyilemesi (SIMP)

Bu basit ama etkili metot ilk olarak Bendsøe tarafından 1989'da önerilmiştir [Bendsøe MP, 1989]. SIMP terimi ise ilk olarak 1992'de Rozvany tarafından kullanılmıştır [Rozvany GIN, Zhou M, Birker T 1992]. Mühendislik uygulamalarında ilk uygulanan eniyileme metotlarından biri olan SIMP, modeldeki elemanların hassasiyetlerinin türevini alarak elemanların materyal yoğunluğunu 0 ve 1 aralığında belirler. Tamamen dolu ya da tamamen boş olmayan elemanlar gri bölgeler oluşturur. Bu tamamen gradyan bazlı çalışan metot ayırık tasarım hacimlerinin olduğu mühendislik uygulamalarında işlevsiz kalabilmektedir [Sigmund 2011].

Metasezgisel Metotlar

Doğadan esinlenerek oluşturulan bu algoritmalar, Dünya'da yapay zeka araştırmalarına yoğunlaşılması sonucunda popülerlik kazanmıştır. Uygulaması oldukça kolaydır, gradyan bazlı değildir ve birçok farklı mühendislik alanında uygulanabilir. Esin kaynağına göre üç farklı ana kategoride değerlendirilebilirler. Bunlar evrim bazlı algoritmalar, fizik bazlı algoritmalar ve sürü bazlı algoritmalar [Mirjalili, Lewis, 2016]. Boyut ve şekil eniyileme yöntemlerinde başarılı sonuçlar ortaya çıkabilse de ne yazık ki aynı başarı topoloji eniyilemesinde sağlamamaktadır. Bunun sebebi ise topoloji eniyilemesinde değişkenlerin, yani eleman sayısının görece çok olmasıdır. Doğadan esinlenen ve rehber eşliğinde rastgele davranış sergileyerek sonuca varan bu algoritmaların, çok elemanlı bir topoloji eniyilemesi yapması işlemci hesaplama zamanı açısından çok pahalıya mal olmaktadır [Sigmund 2011].

Evrimsel Yapısal Eniyileme Metodu (ESO)

Bu metot ilk olarak Y.M. Xie ve G.P. Steven tarafından 1997'de önerilmiştir [Xie, Steven, 1997]. Sonlu eleman analizi sonucunda her bir eleman belirlenen kıyaslama değerine göre sıralanır. Kıyaslama değeri Von Mises gerilme değeri olabileceği gibi gerinim enerjisi değeri de olabilir. Kıyaslama sonucunda belirli formülasyonlara göre elemanlar silinir ve yeni model oluşturulur. Yeni modelle iterasyonlara devam edilir. Uygulanması ve sonuç alınması oldukça kolay bir metot olmakla beraber, her problemde optimumun bulunacağını garanti edememektedir. Ayrıca sonlu eleman analizi için oluşturulan elemanların boyutu ve geometrisi de sonuçları etkiler. Bu sebeple son ürün olarak oluşturulan yapı sonlu eleman ağına bağlı olarak değişkenlik gösterir ve bu durum da çalışmanın güvenilirliğini etkiler [Huang, Xie, 2010].

Çift-Yönlü Evrimsel Yapısal Eniyileme Metodu (BESO)

Evrimsel Yapısal Eniyileme Metodunda (ESO) eleman eksilterek yapılan yapısal iyileştirmeler, bazı problemlerin çözümünde yetersiz kalabilmektedir. Bu durumu çözebilmek için Çift-Yönlü Evrimsel Yapısal Eniyileme Metodu (BESO) X. Huang ve Y.M. Xie tarafından geliştirilmiştir [Huang, Xie 2007]. BESO'da eleman eksiltme olduğu gibi eleman ekleme de vardır. Bu metot çift yönlü çalıştığı için optimuma daha yakın sonuçlar elde edilir. Ayrıca sonlu eleman analizinde oluşturulan elemanların boyutu ve geometrisi sonucu etkilemez. Bu durumu sağlayabilmek için sisteme çeşitli filtreler eklenmektedir ancak eklenen bu filtreler yüzünden ortalama işlem süresi, ESO metodunun ortalama işlem süresinden daha fazla olmaktadır [Huang, Xie, 2010]. BESO topoloji eniyileme metodunun ana amacı eleman ekleyip eksilterek olabilecek en direngen yapıyı elde etmektir. Bu yapı elde edilirken elemanlarının her birinin esnekliğinin (kompliyans) *denklem 1.a*'da olduğu gibi en aza inmesi, yani maksimum direngenliği sağlaması istenir. *Denklem 1.b* ise yapının hacminin çıkarılan elemanlarla beraber azalmasını gösterir:

$$\text{En aza indir } C = \frac{1}{2} * f^T * u \quad (1.a)$$

$$\text{Tabi olarak } V^* - \sum_{i=1}^N V_i * x_i = 0 \quad (1.b)$$

Denklem 1.a'da f uygulanan kuvveti, u da deplasman vektörünü belirtir. C ise ortalama esnekliktir (kompliyans). N sistemdeki ortalama eleman sayıysken, V_i tekil elemanın hacmi ve V^* toplam yapısal hacimdir. Ayrıca x_i terimi 1 ya da 0 olarak o elemanın varlığına ya da yokluğunu delalet eder.

Bir eleman sisteme eklendiğinde ya da çıkarıldığında yapının toplam direngenliğindeki değişiklik çıkan/eklenen elemanın “gerinim enerjisine” eşit olur. Bu enerjiye eleman hassasiyet değeri de denir ve *denklem 2'deki* gibi bulunur:

$$\alpha_i^e = \Delta C_i = \frac{1}{2} * u_i^T * K_i * u_i \quad (2)$$

u_i , i 'ninci elemanın düğümsel deplasman vektörü, K_i ise i 'ninci elemanın direngenlik matrisidir.

ESO metodunun temelinde elemanların hesaplanan hassasiyet değerlerinin sıralanması ve düşük hassasiyet değerli elemanların silinmesi vardır. BESO metodunda ise boş elemanların hassasiyet değeri en başta sıfır olarak varsayılmaktadır. Analizin sonraki evrelerinde filtreler kullanarak bu boş elemanların hassasiyet değeri hesaplanır ve sıralamaya katılır. Bu filtreler, ayrıca aşağıdaki problemlere de çözüm sunmaktadır:

Dama Tahtası Problemi: Sürekli yapı sistemleri düşük sıralamalı elemanlarla ayrıklaştırıldığında elemanların hassasiyet değerleri elemanın sınırlarında süresiz olabilmektedir. Bu da elemanların dama tahtasına benzer şekilde süresiz ve düzensiz sıralanmasına neden olmaktadır [Jog, Harber, 1996].

Ağa Boyutuna Bağlı Olma Problemi: Farklı boyutlarda ağ yapılarının kullanılması aynı yapıda ve sınır koşullarında farklı topolojilerin bulunmasına sebep olabilmektedir. Bu duruma önleyebilmek için çeşitli çözümler önerilmiştir. Bunlardan bazıları çevre kontrol metodu [Haber, Jog, Bendsøe, 1996] ve hassasiyet filtre metodudur [Sigmund, 1997].

Filtrelemeye başlanmadan önce elemanların hassasiyet değerleri her bir elemanın düğüm noktalarına dağıtılmalıdır:

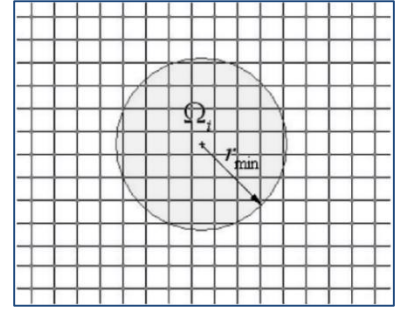
$$\alpha_j^n = \sum_{i=1}^M \omega_i * \alpha_i^e \quad (3)$$

M, j düğüm noktasına bağlı eleman sayısını ifade etmektedir. ω_i ise i numaralı elemanın ağırlık faktörüdür. ω_i aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$\omega_i = \frac{1}{M-1} * \left(1 - \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^M r_{ij}}\right) \quad (4)$$

r_{ij} , i numaralı elemanın merkezi ile j numaralı düğüm noktası arasındaki mesafeyi göstermektedir.

Düğüm noktalarının hassasiyet değerleri *denklem 3*'le bulunduktan sonra sıra elemanların hassasiyet değerini tekrar hesaplamaya gelmektedir. Filtre bu aşamada devreye girmektedir. r_{min} , i numaralı elemana etki eden düğüm noktaları bulmak için kullanılan bir algoritmadır. *Şekil 1*'de gösterildiği gibi, iki boyutlu problemlerde dairenin ya da üç boyutlu problemlerde kürenin içinde kalan alana Ω_i alanı denmektedir ve bu alanın içindeki düğüm noktalarının hassasiyet değerleri, i numaralı elemanın hassasiyet değeri hesaplanırken kullanılmaktadır. Ağırlık faktörü de denklemde büyük öneme sahiptir. Elemanın hassasiyet değerini hesaplamak için denklem 5 kullanılmaktadır:



Şekil 1 : Minimum Filtre Yarıçapı
[Huang, Xie, 2010]

$$\alpha_i = \frac{\sum_{j=1}^K \omega(r_{ij}) * \alpha_j^n}{\sum_{j=1}^K \omega(r_{ij})} \quad (5)$$

K , burada Ω_i alanının içindeki toplam düğüm noktası sayısını belirtmektedir. $\omega(r_{ij})$ ise doğrusal ağırlık faktörüdür ve aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$\omega(r_{ij}) = r_{min} - r_{ij} \quad (j=1, 2, \dots, K) \quad (6)$$

Filtre sistemi anlaşılacağı üzere elemanların hassasiyet numaralarını pürüzsüzleştirir. Ayrıca bu sistemle boş elemanların da hassasiyet numaraları her bir iterasyonda hesaplanmakta ve hassasiyet numarası belirli değeri geçen boş elemanlar dolu elemana dönüştürülmektedir. Bu filtreleme sistemini daha da dengeli hale getirmek için aşağıdaki hesaplama kullanılmaktadır:

$$\alpha_i = \frac{\alpha_i^k + \alpha_i^{k-1}}{2} \quad (7)$$

k , güncel iterasyon sayısıdır. Bir önceki iterasyon sonuçlarıyla güncel sonuçların ortalaması alınmakta ve böylece daha dengeli ve pürüzsüz bir geçiş sağlanmaktadır.

Eleman ekleme ya da çıkarmadan önce bir sonraki iterasyon için hedef hacim belirlenmelidir. Bu hacmi belirlemek için aşağıdaki formülasyon kullanılmaktadır:

$$V_{k+1} = V_k * (1 \pm ER) \quad (k=1,2,3,\dots) \quad (8)$$

ER , evrimsel hacim oranıdır ve analizin başında belirli bir değer olarak seçilmektedir. V_k ise güncel hacimdir. Güncel hacim, analizde hedeflenen hacme gelince iterasyonlar aynı hacimde devam etmektedir. Eleman eklemek veya çıkarmak için her bir elemanın hassasiyet değeri aşağıdaki gibi kıyaslanmaktadır:

$$\alpha_i \leq \alpha_{del}^{th} \quad (9.a)$$

$$\alpha_i > \alpha_{add}^{th} \quad (9.b)$$

Dolu elemanlar *denklem 9.a* şartını sağlarsa silinmekte, boş elemanlar ise *denklem 9.b* şartını sağlarsa dolu elemana dönüşmektedir. Bu kıyaslamaları yapmak için kullanılan α_{del}^{th} ve α_{add}^{th} eşik değerleri üç adımda belirlenmektedir:

1. Bir sonraki hedeflenen hacme kaç elemanın denk geleceği hesaplanır. Örneğin, 1000 eleman varsa ve bir sonraki hedeflenen hacim 0.5 ise 500 eleman bu hacme denk gelir. Sonra elemanlar hassasiyet derecesine göre büyükten küçüğe sıralanırlar ve 500. elemanın hassasiyet değeri α_{th} olarak atanır ve $\alpha_{del}^{th} = \alpha_{add}^{th} = \alpha_{th}$ olarak kabul edilir.
2. İterasyonda eklenen eleman sayısı toplam eleman sayısına oranlanır ve bu orana hacim ekleme oranı (AR) denir. Bu oran, analizin en başında belirtilen AR_{max} değişkeninden küçükse üçüncü adım yok sayılır. Büyükse üçüncü adıma geçilir.
3. Doluya dönüşen boş eleman sayısının toplam eleman sayısına oranı AR_{max} olacak şekilde α_{add}^{th} değeri belirlenir. Bu değer, son eklenen elemanın hassasiyet değerinden sadece biraz aşağıda olmalıdır. α_{del}^{th} ise mevcut hacimden eklenen elemanların hacmini ve bir sonraki iterasyonun gerektirdiği hacmin çıkarılmasından bulunur.

Bu eleman ekleme ve çıkarma döngüsü istenen hacme varılsa da sonlanmaz. Aynı hacimde analiz, iterasyonlar yakınsama kistasını sağlayana kadar devam etmektedir. Yakınsama kistası:

$$Kıstas = \frac{|\sum_{i=1}^N C_{k-i+1} - \sum_{i=1}^N C_{k-N-i+1}|}{\sum_{i=1}^N C_{k-i+1}} \leq \tau \quad (10)$$

τ izin verilen kıstas değeryken N ise bir tam sayıdır ve genellikle 5 olarak seçilmektedir.

BESO metodu kendi içinde de farklılaşmış ve zamanla farklı yaklaşımlar ortaya çıkmıştır:

Eleman-silmeli BESO: Bu yaklaşım ilk ortaya çıkan ve en bilinen yaklaşımdır. Bu yaklaşımda silinen elemanlar yeniden dolu hale dönüşene kadar analizden tamamen çıkarılmakta ve tüm mekanik özellikleri sıfır olarak kabul edilmektedir. Analiz ilerledikçe her bir iterasyon başına düşen hesaplama süresi ve böylece tüm analizin hesaplama süresi düşmektedir [Huang, Xie, 2010].

Eleman-etkisizleştirmeli BESO: Eleman-silmeli BESO yaklaşımı yakınsayan ve ağa boyutuna bağlı olmayan bir yaklaşım olsa da, elemanların tamamen silinip yapıdan çıkarılması teorik zorluklara sebep olmakta ve bazen mantıksız sonuçlara yol açmaktadır. Bu durumun önüne geçilmek için eleman-etkisizleştirilmeli BESO önerilmiştir. Bu yaklaşımda silinen elemanlar analizden tamamen çıkarılmaz, bunun yerine elemanların esneklik katsayısı ya da kalınlığı düşürülmektedir. Elemanlar analizden tamamen çıkarılmadığı için her bir iterasyonun hesaplama süresi yaklaşık aynı olmaktadır. Bu sebeple eleman-etkisizleştirmeli BESO yaklaşımına göre oldukça daha fazla süre isteyen bir yaklaşım olmasına rağmen özellikle direngenlik ve doğal frekans konulu topoloji çalışmalarında daha başarılı sonuçlar ortaya koymaktadır. İlk olarak Zhu tarafından 2007'de [Zhu, 2007] önerilen bu yaklaşım Huang ve Xie tarafından 2009 yılında geliştirilmiştir [Huang, Xie, 2009]. *Denklem 1.a* ve *denklem 1.b* her iki yaklaşım için de geçerlidir.

Eleman-silmeli BESO'da x_i ya 0 ya 1 olurken Eleman-etkisizleştirmeli BESO'da x_i , ya x_{min} ya da 0 olmaktadır. Silinen elemanların esneklik katsayısı aşağıdaki gibi bulunmaktadır:

$$E(x_i) = E_1 * x_i^p \quad (11)$$

E_1 içi dolu katı elemanların esneklik katsayısı iken p ceza katsayısıdır ve genellikle 3 olarak seçilmektedir.

Elemanların hassasiyet değeri aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\alpha_i = \begin{cases} \frac{1}{2} * u_i^T * K_i * u_i & \text{eğer } x_i = 1 \text{ ise} \\ \frac{x_{min}^{p-1}}{2} * u_i^T * K_i * u_i & \text{eğer } x_i = x_{min} \text{ ise} \end{cases} \quad (12)$$

Ceza katsayısı sonsuza yakınsarsa bulunan denklem Eleman-silmeli BESO'nun denklemiyle aynı olur:

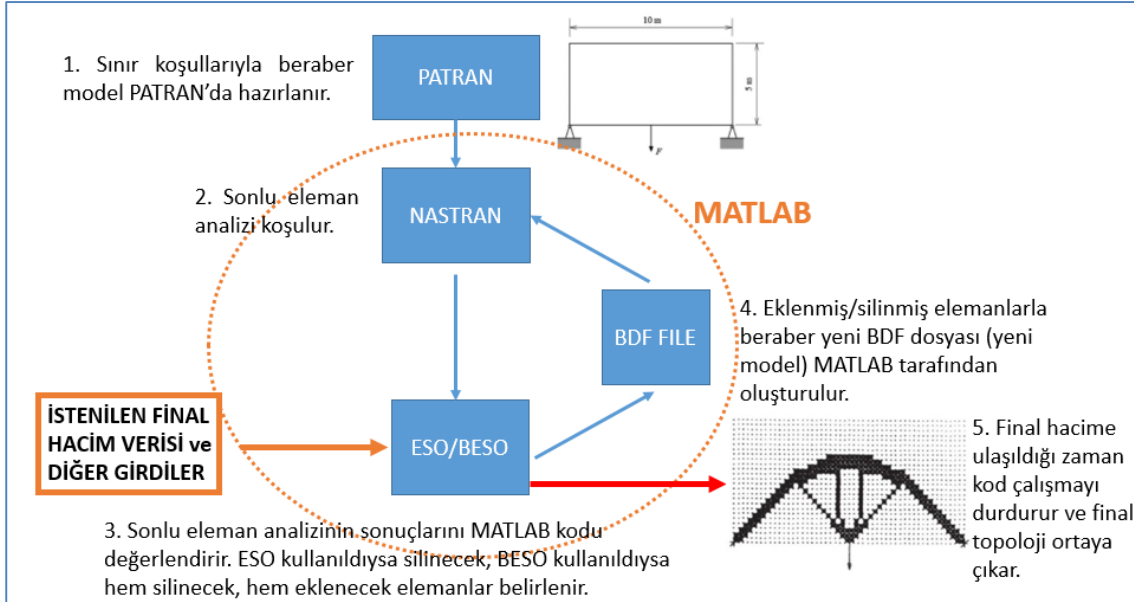
$$\alpha_i = \begin{cases} \frac{1}{2} * u_i^T * K_i * u_i & \text{eğer } x_i = 1 \text{ ise} \\ 0 & \text{eğer } x_i = x_{min} \text{ ise} \end{cases} \quad (13)$$

Denklem 13'ten anlaşılacağı gibi Eleman-silmeli BESO aslında Eleman-etkisizleştirmeli BESO'nun özel bir alt türüdür.

Bu çalışmada “Eleman-etkisizleştirmeli BESO” metodunun kullanılmasına karar verilmiştir. Bunun başlıca sebebi bu metodun direngenlik kıstasına göre yapılan çalışmalarda daha başarılı olmasıdır. Eleman-silmeli BESO metoduyla yapılan çalışmalarda bazen elemanlar arasında bağlantı kopabilmekte ve bu da süreksizlik sebebiyle analizin sonlanmasına neden olmaktadır. Halbuki Eleman-etkisizleştirilmeli BESO metodunda silinen elemanlar bile analizden çıkarılmadığı için hiçbir zaman süreksizlik yaşanmamakta ve analiz yarıda kalmamaktadır. “Eleman-etkisizleştirmeli BESO” metodunun seçilmesinin bir başka sebebi de BESO metodunun farklı tasarım uzaylarında aynı anda analiz yapılabilmesidir. Katlanabilir füze kanadı iki parçadan oluşmaktadır ve iki parçanın da eş zamanlı analizinin yapılması gerekmektedir. Gradyan bazlı SIMP ve benzeri metotlar farklı tasarım uzaylarında eş zamanlı analize göre tasarlanmamıştır. Fakat BESO metodu bütünle değil, her bir elemanın hassasiyet değeriyle analizi yapar ve bu da çoklu tasarım uzaylarında başarılı sonuçlar bulmasına sebep olur. BESO, eleman ekleme özelliğiyle ESO metodundan daha başarılı sonuçlar bulmaktadır. Zaten ESO'nun geliştirilmesiyle ortaya çıkmıştır. Son olarak, bu çalışmada metasezgisel metotların kullanılmamasının sebebi ise hesaplama süresidir. Yaklaşık 80,000 eleman olması planlanan bir yapıda metasezgisel metotlarla topoloji eniyileme yapılması tahmini güç bir hesaplama süresine ihtiyaç duymaktadır. Fakat bu metotların süper bilgisayarların yaygınlaşması ve paralel işlem tekniklerinin gelişmesiyle ileride daha popüler olacağı beklenmektedir [Sigmund, 2011] [Huang, Xie, 2010].

YÖNTEM

Yapılan bu çalışmada, MATLAB programı kullanılarak oluşturulan ortamda NASTRAN sonlu eleman çözücüsü yardımıyla gerekli iterasyonlar yapılmış ve çözümlere ulaşılmıştır. PATRAN'da oluşturulan model MATLAB döngüsüne sokulmakta ve bu döngüde NASTRAN sonlu eleman çözücüsü kullanılarak elemanların gerilme değerleri, gerinim enerjileri, vb. bulunmaktadır. Bu değerler kıyaslanarak silinecek veya eklenecek elemanlar belirlenmekte ve yeni model oluşturulmaktadır. Döngü, yeni modeli sonlu eleman yöntemi kullanarak bir daha analiz etmekte ve bu iterasyonlar, model döngüye girilen hedeflenen hacme ulaşana kadar devam etmektedir. NASTRAN-MATLAB döngüsü Şekil 2'de detaylıca anlatılmıştır.

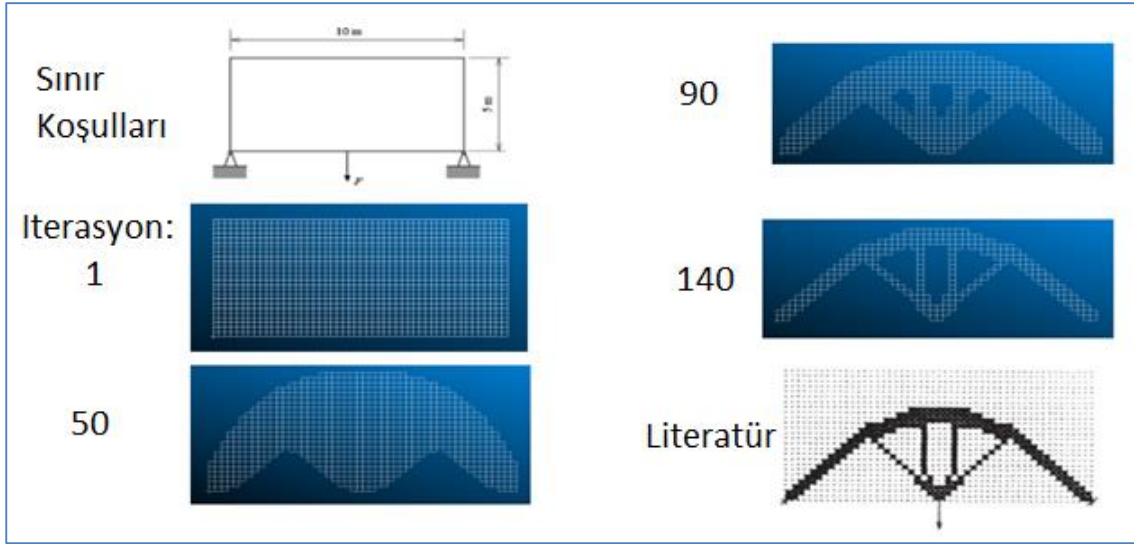


Şekil 2: NASTRAN-MATLAB Döngüsü

UYGULAMALAR VE DEĞERLENDİRME

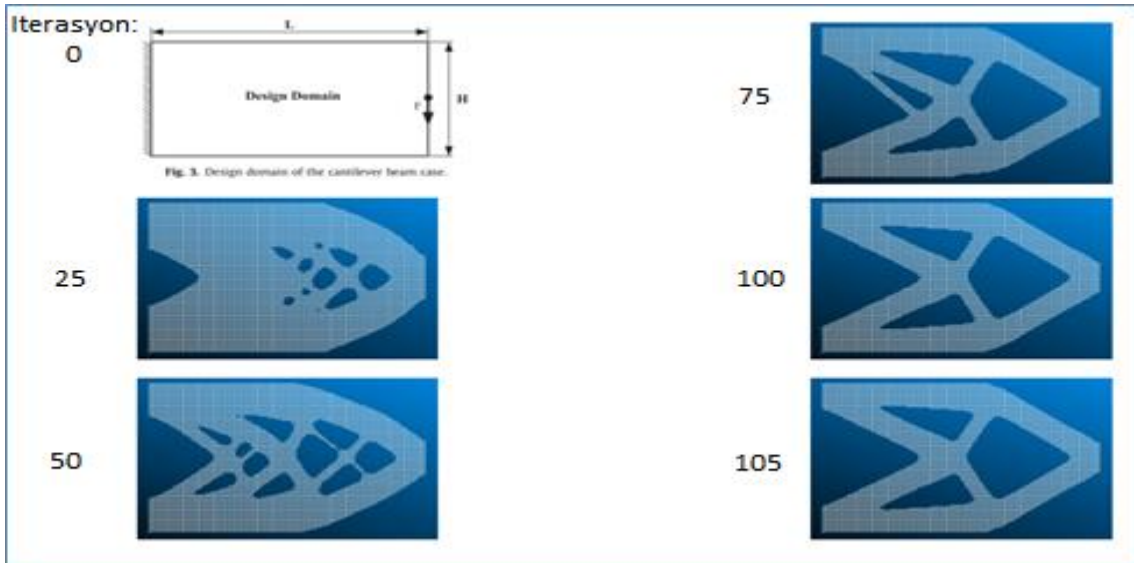
Oluşturulan NASTRAN- MATLAB döngüsünü test etmek ve iyileştirmek için çeşitli uygulamalar yapılmıştır. Bu uygulamalar literatürdeki 2 boyutlu ve 3 boyutlu kistas problemlerin ESO veya BESO metodu ile çözülmesidir ve elde edilen sonuçlar aşağıda listelenmiştir.

2 Boyutlu Michell Yapısının ESO ile Eniyilemesi: Şekil 3'te gösterildiği gibi 1250 adet 4 düğüm noktalı doğrusal sonlu elemandan (QUAD4) oluşan ortasından yüklenmiş dikdörtgen kiriş Şekil 2'deki döngüye sokularak eniyileme gerçekleştirilmiştir. Döngüde kıyas kriteri olarak Von Mises gerilme değerleri kullanılmıştır. Bulunan sonuçların literatürle büyük ölçüde uyumlu olduğu gözlenmiştir [Huang, Xie, 2010].



Şekil 3: Michell Yapısı Eniyilemesi [Huang, Xie, 2010]

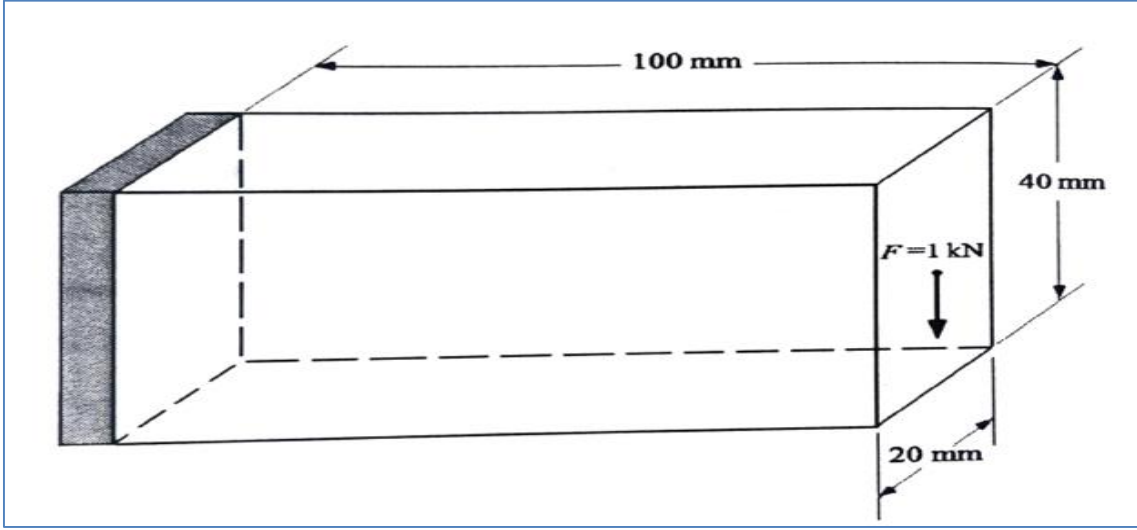
2 Boyutlu Ankastre Kiriş yapısının BESO ile Eniyilemesi: Şekil 4'te gösterilen, 16000 adet 4 düğüm noktalı doğrusal sonlu elemanla (*QUAD4*) oluşturulan ankastre kiriş yapısı döngüye sokularak eniyileme gerçekleştirilmiştir. Döngüde kıyas kriteri olarak gerinim enerjisi değerleri kullanılmıştır. Hedeflenen hacim %50 olarak girilmiş ve elde edilen sonuçlar literatürle büyük ölçüde uyum göstermiştir [Huang, Xie, 2010].



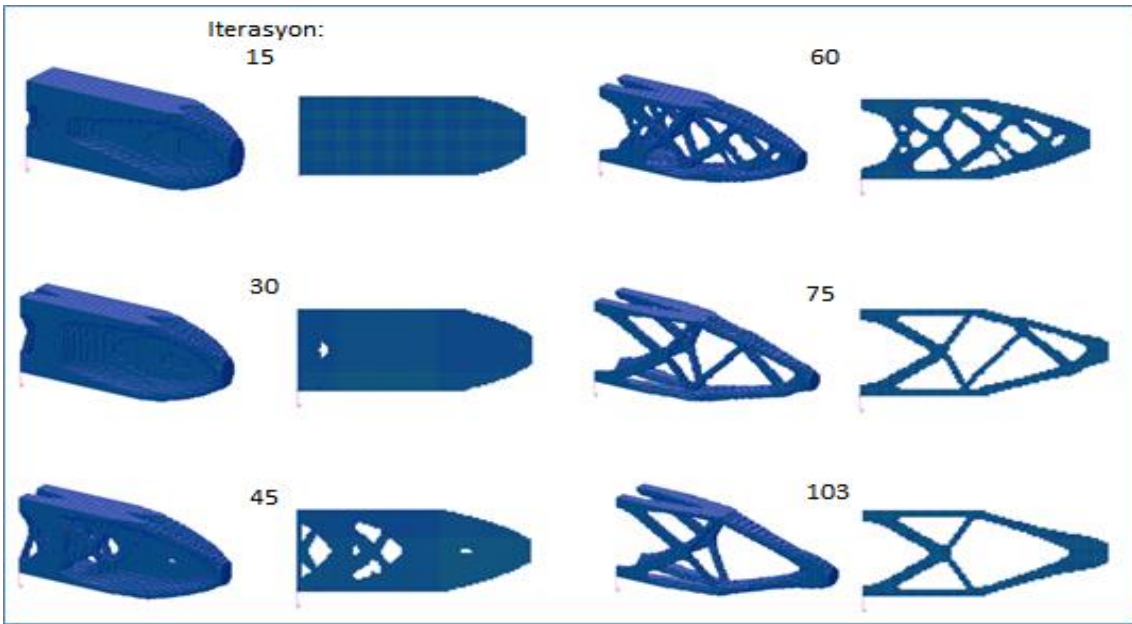
Şekil 4: Ankastre Kiriş Yapısı Eniyilemesi

Üç Boyutlu Ankastre Kiriş yapısının BESO ile Eniyilemesi: Üç boyutta yapılan analizler BESO metodundaki gelişmiş filtreleme sistemleri nedeniyle daha kompleks yapıya sahip olmakla beraber çözüm için daha uzun sürelere ihtiyaç duymaktadır. Şekil 5'te üç boyutlu yapı ve yapının sınır koşulları gösterilmektedir. Bu ankastre kiriş yapısı 80000 adet 8 düğüm noktalı doğrusal sonlu elemandan (*CHEXA*) oluşmaktadır.

Ancak şekil ve yükleme simetrik olduğu için analize 40000 eleman dahil edilmiştir. Döngüde kıyas kriteri olarak gerinim enerjisi değerleri kullanılmıştır. Hedeflenen hacim kriteri %10 olarak girilmiş ve bulunan sonuçlar Şekil 6'da görüldüğü gibi literatürle uyumluluk göstermiştir [Huang, Xie, 2010].



Şekil 5: Ankastre Kiriş Yapısı ve Sınır Koşullar [Huang, Xie, 2010]



Şekil 6: 3 Boyutlu Ankastre Kiriş Yapısı Eniyilemesi

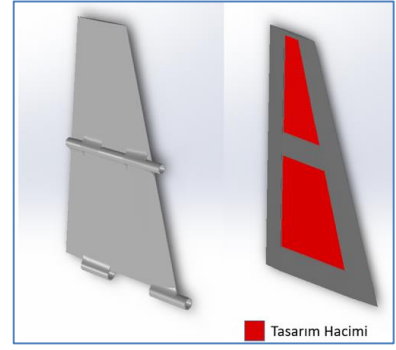
Kodlanan MATLAB kodu ve oluşturulan NASTRAN-MATLAB döngüsü bu çalışmalarla başarısını kanıtlamıştır. Bundan sonraki analizler Şekil 7'de gösterilen katlanabilir füze kanadının dirençlilik kıstasına göre eniyilemesi üzerine olacaktır.

Varsayımlar:

1. Şekil 7'de görülen yay yapıları ve mekanik arayüzleri analize dâhil edilmemiştir.
2. Üst ve alt kanat arasında bulunan yaylı pim mekanizması sayesinde kanat açıldıktan sonra sabitlenmektedir. Bu yapı analize doğrusal olmayan etkiler katacağı için analize dâhil edilmemiştir. Bunun yerine üst ve alt kanat mekanik olarak bir bütün olarak analize dâhil edilmiştir.

Ağ yapısı, sınır koşulları ve malzeme:

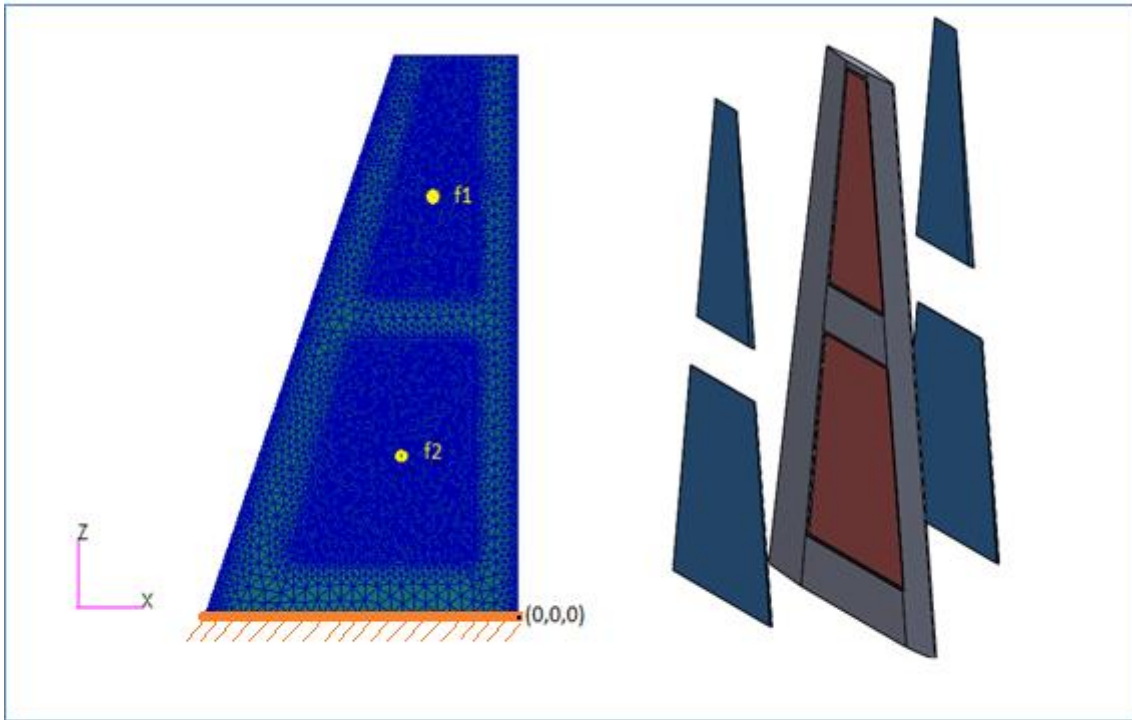
1. Kanat ankastre olacak şekilde tabanından sabitlenmiştir (Şekil 8a).
2. Basınç yükleri intizamlı bir şekilde sadece üst ve alt tasarım hacimlerine dağıtılmıştır. Bileşke yüklerin boyutu ve konumu Tablo 1'de verilmiştir.
3. Model, Şekil 8 (b)'de gösterildiği gibi bir adet kanat gövdesinden, iki adet tasarım hacminden ve dört adet sac gövde yüzeyinden oluşmaktadır. Kanadın aerodinamik yapısı bozulmasın diye topoloji eniyilemesi sadece iç kısımda bulunan tasarım hacimlerinde gerçekleştirilmiştir. Tüm parçaların malzemesi alüminyum havacılık serisi 7XXX'tir.
4. Modelde toplam 254590 adet eleman bulunmaktadır. Bu elemanların 74825 tanesi tasarım hacimlerinde bulunmaktadır. Tasarım hacimleri için 8 düğüm noktalı 6 eş yüzlü (HEX8), geri kalan parçalar için ise 4 düğüm noktalı 4 yüzlü (TET4) elemanlar kullanılmıştır.



Şekil 7: Katlanabilir Füze Kanadı

Tablo 1: Bileşke Kuvvetler ve Konumları

Kanatlar	Bileşke Kuvvet (N)	X(mm)	Z(mm)
Üst Kanat	2400	-116	673
Alt Kanat	5200	-231	263



Şekil 8 (a) ve (b) : (a) Bileşke Kuvvetlerin konumu (b) Tüm kanat bileşenleri

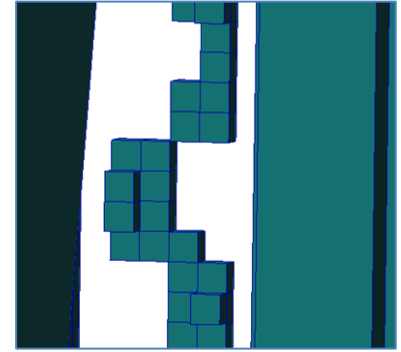
Değişkenler:

1. ER (Evrimsel Hacim Oranı): Her bir iterasyon sonundaki hedef hacmi belirlemekte kullanılan bir değişkendir ve bu çalışmada 0.01 olarak seçilmiştir.

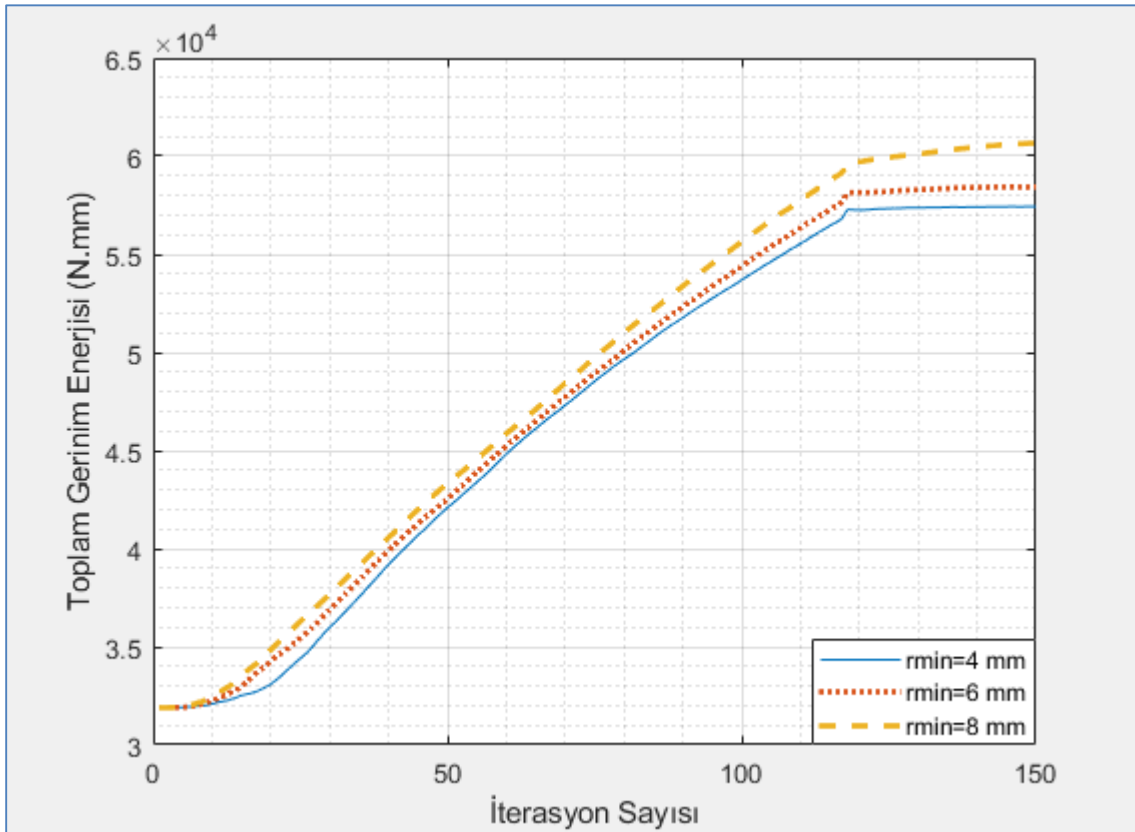
2. AR_{max} (Maksimum Hacim Ekleme Oranı): Eklene elemanların sayısının tüm eleman sayısına oranı AR_{max} değişkeninden büyük olamaz. Bu değişken analize çok fazla elemanın eklenmemesini ve böylece yapının bütünlüğünü kaybetmemesini sağlamaktadır ve 0.5 olarak seçilmiştir.
3. V_f (Hedeflenen Hacim Oranı): Bu değişken analizin sonundaki yapının hacminin ilk yapının hacmine olan oranıdır. Analiz bu hacim oranına ulaşıncaya kadar devam eder. Ne kadar azsa o kadar çok fazla malzeme eksilir ve hesaplama süresi uzar. Bu çalışmada 0.3 olarak seçilmiştir ve analiz sonucunda iki kanatta da hacim olarak yüzde 70 azaltma yapılmıştır.
4. r_{min} (Minimum Filtre Yarıçapı): Bu yarıçap filtreleme işleminde kullanılmaktadır. Ne kadar büyük verilirse filtreye o kadar çok fazla düğüm noktası dahil olmakta ve elemanların hassasiyet değerleri bu düğüm noktalarıyla pürüzsüz bir şekilde hesaplanmaktadır. Fakat bu durum son yapının direngenlik değerini optimumdan uzaklaştırmaktadır. Bu nedenle bu değişken dikkatlice seçilmelidir. Bu yapılan çalışmada 4mm, 6mm ve 8mm olmak üzere üç farklı minimum filtre yarıçapı kullanılmıştır.

SONUÇ

İki parçalı katlanabilir füze kanadı direngenlik kistasına göre topoloji eniyilemesine tabi tutulmuştur. Üç farklı minimum filtre yarıçapı değeri için üç farklı analiz koşulmuş ve üç farklı özgün kanat topolojisi elde edilmiştir. Bu oluşturulan yapılar değerlendirildiği zaman *Grafik 1*'de gösterildiği üzere r_{min} değeri azaldıkça Toplam Gerinim Enerjisinin azaldığı, böylece daha optimum bir yapının oluştuğu gözlemlenmektedir. Fakat yapı pürüzlü olmakla beraber dama tahtası problemiyle de karşılaşmıştır (*Şekil 9*). r_{min} değeri arttıkça yapı optimumdan uzaklaşsa da daha pürüzsüz, düzgün ve üretim metotlarına daha uygun topolojiler elde edilmiştir. Bu sebeple bu çalışma r_{min} değerinin 8 mm olduğu topolojiye odaklanmıştır.

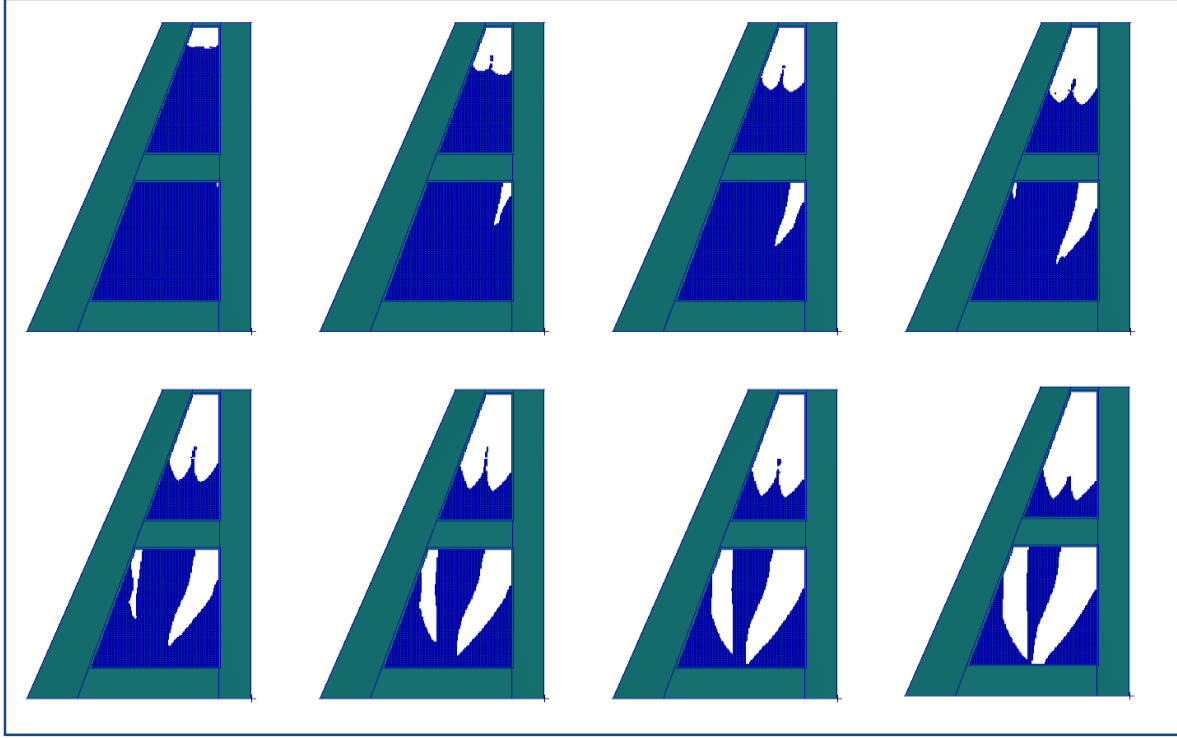


Şekil 9: Dama Tahtası Problemi



Grafik 1: 3 Farklı Çalışma için Toplam Gerinim Enerjisi Değerleri

İlk koşulan analizlerde hedeflenen hacim oranı tüm tasarım hacimlerine uygulanmıştır. Bu sebeple gerinim enerjisi çok daha baskın olan alt kanattaki elemanlar analizi domine edip üst taraftaki elemanların çoğunun silinmesine sebep olmuştur. Böylece gerçek dışı topolojiler ortaya çıkmıştır. Bu durumun önüne geçebilmek adına hedeflenen hacim oranı iki kanada da ayrıca uygulanmış, her tasarım hacmi kendi arasında kıyaslanmıştır. Şekil 10'da gösterildiği üzere analiz başarılı bir şekilde gerçekleşmiş ve gerekli boşaltmalar yapılmıştır.



Şekil 10: 8 mm r_{min} ile 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105 ve 120 iterasyonlarının topolojileri

Analiz 150. İterasyondan sonra hedeflenen yüzde 30 hacim oranını elde etmiştir. Bu son yapının topolojisi Şekil 11'de gösterilmektedir. İstenilen hacim oranına inmek için yapılan boşaltmalar bazı yapı bağlantılarının kopmasına sebep olmuştur ve daha kompleks geometride bir topoloji oluşmuştur. İleriki çalışmalarda bu yapının stres ve doğal frekans değerlerini göz önüne alarak kullanıma hazır, işlevsel, özgün ve hafif bir kanat yapısı tasarlanacaktır.



Şekil 11 (a) ve (b) : (a) 8 mm r_{min} ile 150. İterasyon yapısı (b) alt kanat detayı

Kaynaklar

- Bendsøe M.P. (1989), “*Optimal shape design as a material distribution problem*”, Structural Optimization 1, s. 193–202
- Haber, R., Jog, S. & Bendsøe, M.P. (1996), “*A new approach to variable-topology shape design using a constraint on perimeter*”, Structural Optimization 11, s. 1–12
- Huang, X. & Xie, Y. (2007), “*Convergent and meshindependent solutions for the bidirectional evolutionary structural optimization method*”, Finite Elements in Analysis and Design 43, s. 1039-1049
- Huang, X. & Xie, Y. (2009), “*Bidirectional evolutionary topology optimization of continuum structures with one or multiple materials*”, Computational Mechanics 43, s. 393-401.
- Huang, X., & Xie, Y. (2010), “*Evolutionary topology optimization of continuum structures: methods and applications*”, John Wiley & Sons.
- Jog S. & Haber R. (1996), “*Stability of finite element models for distributed-parameter optimization and topology design*”, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 130, s. 203-226,
- Mirjalili, S. & Lewis A. (2016), “*The Whale Optimization Algorithm*”, Advances in Engineering Software 95, s. 51-67
- Rozvany G.I.N, Zhou M. & Birker T. (1992), “*Generalized shape optimization without homogenization*”, Structural Optimization 4, s. 250–254
- Sigmund O. (1997), “*On the design of compliant mechanisms using topology optimization*”, Mechanics of Structures and Machines 25, s. 493–524
- Sigmund O. (2011), “*On the usefulness of non-gradient approaches in topology optimization*” Structural and Multidisciplinary Optimization. 43, s. 589-596.
- Xie Y. & Steven G.P. (1997), “*Evolutionary structural optimisation*”, Springer, Berlin
- Zhu, J.H., Zhang, W.H. & Qiu, K.P. (2007), “*Bi-Directional Evolutionary Topology Optimization Using Element Replaceable Method*”, Computational Mechanics 40, s. 97-109