

ÇOK ÖLÇEKLİ MALZEME MODELLEMESİ İLE KISA ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİTLERİN YAPISAL ANALİZİ: ARAÇ PEDALI ÖRNEĞİ

Sevil DURSUN *^{ID}
Necmettin KAYA **^{ID}

Alınma: 23.03.2022; düzeltme: 16.01.2023; kabul: 16.01.2023

Öz: Lif takviyeli plastik malzemeler ürün hafifletme çalışmalarında kullanılan kompozit malzemelerdendir. Anizotropik yapıda olan bu malzemelerin enjeksiyon prosesinde, akışa bağlı olarak lifler farklı yönlerde dağılabilmektedir. Bu malzemelerden imal edilen ürünlerin sonlu elemanlar modellemelerinde lif yönlerinin proses ortamından transfer edilerek tanımlanması analizin doğruluğunu artırmaktadır. Bu çalışmada, enjeksiyon kalıplama ile üretilen kısa lif takviyeli plastikten elde edilen araç pedalının sonlu elemanlar modeli oluşturularak yapısal analizi, lif oryantasyon verileri de modellemeye dahil edilerek gerçekleştirildi. Lif oryantasyon verileri, enjeksiyon simülasyonu sonucunda elde edildi ve anizotropinin de dahil edildiği çok ölçekli malzeme modelinde kullanıldı. %30 cam lif katkılı poliamid malzeme kullanılarak üretilen pedal sonuçları, takviyesiz plastik malzeme ve çelik malzeme kullanılarak üretilen pedal verileri ile karşılaştırıldı. Çelik pedala kıyasla takviyeli plastik malzemedeki elde edilen pedalın yer değiştirme sonuçlarında %2.5 oranında artış, gerilme değerlerinde ise %7 oranında artış görülür. Takviyeli plastiğin 294 MPa olan akma gerilmesi referans alındığında bu artışın kısıt değerlerin altında kaldığı sonucuna varılır. Ayrıca çelik malzemeye kıyasla %20 oranında daha hafif pedal elde edilir.

Anahtar Kelimeler: Yapısal analiz, Enjeksiyon kalıplama, Sonlu elemanlar analizi, Lif oryantasyonu, Kompozitler

Structural Analysis of Short Fiber Reinforced Composites By Multi-Scale Material Modeling: A Vehicle Pedal Example

Abstract: Fiber reinforced plastic materials are composite materials used in product lightening studies. In the injection process of these anisotropic materials, the fibers may disperse in different directions depending on the flow. In the finite element modeling of products manufactured from these materials, the identification of fiber directions by transferring them from the process environment increases the accuracy of the analysis. In this study, a finite element model of the vehicle pedal obtained from short fiber reinforced plastic produced by injection molding and structural analysis was carried out by including fiber orientation data were created. Fiber orientation data were obtained as a result of injection simulation used in the multi-scale material model including anisotropy. Pedal results produced using 30% glass fiber reinforced polyamide material were compared with pedal data produced using non-reinforced plastic material and steel material. Compared to the steel pedal, the displacement results of the pedal made of reinforced plastic material increase by 2.5% and the stress values increase by 7%. When the yield stress of reinforced plastic, which is 294 MPa, is taken as reference, it is concluded that this increase is below the constraint values. In addition, 20% lighter pedal is obtained compared to steel material.

Keywords: Structural analysis, Injection molding, Finite element analysis, Fiber orientation, Composites

* After Sales Engineering Department, Renault Group, Bursa, Turkey

** Bursa Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, TR-16059, Bursa, TÜRKİYE

İletişim Yazarı: Sevil Dursun (drsnsevil@gmail.com)

1. GİRİŞ

Sektöre bağılı olarak gelişen ihtiyaçlar, yaygın olarak kullanılan konvansiyonel malzemeler yerine uygulama alanına bağılı olarak, daha ucuz, daha dayanıklı, daha hafif malzemeler üretmeye teşvik etmiştir. Bunların başında, ileri düzey malzeme grubu içerisinde yer alan kompozit malzemeler gelmektedir. Kompozit malzemeler iki veya daha fazla malzeme grubunun makro seviyede birleştirilmesi ile elde edilir. Farklı malzeme gruplarının bir araya getirilmesindeki en büyük amaç, dayanımı daha düşük olan ana malzemeyi takviye malzeme ilavesi ile daha dayanıklı hale getirmektir. Kompozitler, matris yapısına göre polimer, metal, seramik esaslı, takviye elemanına göre partikül, fiber, whisker yapının şekline göre ise tabakalı, kaplamalı, film-folye, bal peteği ve filaman sarılmış olmak üzere sınıflandırılmaktadır (Aricasoy, 2006). Kompozit malzemelerin pek çok avantajı ve dezavantajı bulunmaktadır. Fiber takviyeli kompozitler, yüksek çekme ve basma dayanımına sahiptir. Aynı zamanda yüksek sıcaklıkta olağanüstü mekanik ve termal dayanıma sahip olduğu görülmüştür (Hsissou ve diğ., 2021). Takviye elemanların yüksek sertlik değerlerine sahip olmaları nedeni ile bu malzemelerin klasik yöntemlerle kesilmesi oldukça problemleri bir durum olmakla birlikte yapılan çalışmalarda yüksek basınçlı su akışı ile oldukça kaliteli yüzeyler, yüksek talaş kaldırma oranı ile elde edilmektedir (Ergene ve Bolat, 2019). Bu kompozit malzemelerden en yaygın kullanılanı fiber takviyeli kompozit malzemelerdir. Kompozitin dayanımı fiberin ana malzeme içerisindeki yönüne, boyutlarına, hacimsel oranına bağılı olarak değişir. Fiber takviyeli kompozitlerin mekanik davranışını etkileyen diğer faktör ise fiberin çapı ve yönüdür; fiber yönlerine bağılı olarak dayanım artırılabilir (Campbell, 2010). Fiber takviyeli kompozitlerde, en önemli kritik faktör, yükü taşıyan ve ana yapıya dağıtan fiber ile ana malzeme arasında çatlak oluşumu ve bu çatlağın yükler neticesinde ilerleyerek yapının dayanımını düşürmesidir (Yalçın ve Ergene, 2017). Tabakalı kompozitler de ise delaminasyon hasarının, tabakaların mukavemet ve rijitliklerinin azalmasına neden olduğu bilinmektedir (Atlıhan ve Ergene, 2017). Literatürdeki çalışmalarda, lif takviyesinin malzemenin dayanımını arttırdığı üzerinde durulmuş ve ilgili proses parametreleri ile elde edilen dayanım verileri çeşitli çalışmalarda karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışmanın literatürde bulunan diğer çalışmalara kıyasla farklı olmasının nedeni, deneysel verilerde kullanılan malzeme sarfiyatının önlenmesi, proses parametrelerinin simülasyon ortamında da optimum hale getirilebileceği malzeme modeli oluşturma metodunun önerilmesi ve bu verilere kıyasla deneysel çalışmanın yapılmasıdır. Özellikle lif takviyeli kompozitlerde, lif doğrultularına bağılı olarak değişen malzeme dayanımı nedeniyle, bu verilerin malzeme modeli oluşturulurken göz ardı edilmesi analiz sonuçlarını oldukça etkilemektedir. Mevcut olan bilgisayar destekli mühendislik yazılımlarında çok yaygın olmayan lif oryantasyon verilerinin dahil edildiği malzeme modeli elde edilmesi, eş zamanlı olarak literatürde de bu konu ile alakalı çalışmaların kısıtlı olması ile sonuçlanmaktadır. Bu çalışma ile literatürde kısıtlı olarak çalışılan lif oryantasyon verilerinin de dahil edildiği çok ölçekli malzeme modeli oluşturma metodu önerilmiştir. Kısa lif takviyeli termoplastikler sürekli lif takviyeli olanlara kıyasla istenilen malzeme karakteristiklerini sağlayamayabilir. Fakat kısa lif takviyeli kompozitler, üretim sürecinin kolay ve düşük maliyetli olması nedeni ile yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Mlekusch, 1999). Enjeksiyon kalıplama, plastik parçaların üretilmesinde kullanılan yüksek hızlı bir üretim teknolojisidir. Kullanılan bu üretim tekniğinin verimi ve neticede elde edilecek ürünün kalitesi, uygun proses ayarları ve kalıp yapısına bağılıdır. Ürün kalitesini geliştirmek adına enjeksiyon kalıbının tasarım aşamasında, kavite içerisinde etkisini gösteren fiziksel etkilerin de hesaba katılması gerekmektedir. Bu etkiler, istenilen boyutlarda ürün eldesini ve şekil kararlılığını belirler (Siklo ve diğ., 2011).

Kikuchi ve Koyama (1996), çarpılmanın ana nedeni olarak lif takviyeli polimerlerin oryantasyonu üzerine çalışmıştır. Analizlerde cam elyaf takviyeli poliamid kullanılmıştır. Düzgün olmayan lif oryantasyonunun çarpılmaya neden olduğu tespit edilmiştir. Mlekusch (1999) çalışmasında, köşeli geometrilerin çarpılması üzerinde cam liflerin etkisini analiz etmiştir. Matris eleman olarak poliamid kullanılmıştır. Lif takviyeli ve takviyesiz polimer arasında, lif ve onun

yönlenmesi sebebiyle oluşan ortotropi nedeniyle çarpılma farkı olduğu sonucuna varmıştır. Aynı zamanda artan lif hacim oranı ile beraber deformasyon artışı olduğunu gözlemiştir. Siklo ve diğerleri (2011) yapmış olduğu enjeksiyon kalıplama ile üretilen polipropilen matrisli cam lif takviyeli plastik parçaların deformasyon analizinde, çarpılmanın tespitinin kolaylaşması adına V şeklinde bir numune üzerinden analiz gerçekleştirilmiştir. Çalışmada hem sıcaklık farkının hem de cam lif içeriğinin parçanın deformasyonunu diğer çalışılan parametrelere (enjeksiyon oranı, akışkan sıcaklığı, tutma basıncı) kıyasla önemli ölçüde etkilediği sonucuna varılmıştır. Cam lif içeriğinin artışı ile deformasyon miktarının azaldığı görülmüştür. Kısa lifler, kalıp doldurma prosesi boyunca hizalanırlar ve bu durum oryantasyona bağlı malzeme özelliklerine neden olur. Bu anizotropi, hem parçanın davranışı üzerine hem de çarpılma ve büzülme üzerinde etkiye sahiptir. 3 boyutlu lif oryantasyonunun kısa lif takviyeli plastikler için ölçümü konusunda pek çok yöntem mevcuttur (Guild ve diğ., 1993). Lif oryantasyonunun çok sayıda numune için belirlenmesi ve istatistiksel nedenlerden dolayı her numunenin konumunda çok fazla lif ölçülmek zorunda olduğundan bilgisayar destekli analiz gerekmektedir (McGrath ve diğ., 1995). Lif oryantasyonunun tahmini, enjeksiyon kalıplama ile üretilmiş olan parçaların istenilen mekanik özellikler ile elde edilmesi açısından önemlidir. Bu nedenle, lif dolgulı polimerin bir kalıp doldurma simülasyonu, sistemi tamamen tanımlamak için anizotropik bir yapısal denklem içermelidir (Chung ve diğ., 1995). İlk olarak Jeffery 'nin (1922) modeli, viskoz bir sıvıya daldırılmış tek bir elipsoidal parçacığın hareketi için geliştirilen, bu alandaki çoğu çalışmanın temeli olmuştur. Bu model lif-lif etkileşimini hesaba katmadığı ve lif oryantasyonunun hız alanı üzerindeki etkisini dikkate almadığı için yeterince seyreltik süspansiyon için geçerlidir. Givler ve diğerleri (1983), Jeffery'nin sonlu elemanlar metodu vasıtası ile akış çizgileri boyunca olan denkleminin nümerik integrasyonundan lif oryantasyonunu hesaplamıştır. Folgar ve Tucker (1984) ise, lif-lif etkileşimlerini hesaba katmak için Jeffery denklemlerine bir difüzyon terimi ekleyerek konsantre süspansiyonların oryantasyon davranışı için bir model geliştirmiştir. Dinh ve Armstrong (1984), yarı konsantre süspansiyonlar için reolojik durum denklemi geliştirmiştir. Yaklaşık olarak lif-lif etkileşimlerini hesaba katmak amacıyla bir test lifi üzerindeki sürtünmeyi tahmin etmek için Batchelor 'un (1971) hücre modelini kullanarak çok parçacıklı problemi tek parçacıklı bir probleme indirgemişlerdir. Advani ve Tucker (1987), lif oryantasyonunu tanımlamak ve tahmin etmek için tensörlerin kullanımını geliştirmiştir. Bu tensörler, oryantasyon durumunun kısa bir temsilini sunar, ancak iyi bir yakınsama için oryantasyon tensörleri denklem açılımlarının dikkatle düzenlenmiş olması gereklidir. Altan ve diğerleri (1990), Hele-Shaw akışlarda zamana bağlı üç boyutlu lif oryantasyonunu tahmin etmek adına nümerik bir metod geliştirmiştir. Her bir lif konumu, kalıp doldurma sırasında izlenmiş ve akış yolu boyunca, dördüncü dereceden yönlendirme tensörlerinin bağımsız bileşenleri, sıfır hacim oranı sınırında çözülmüştür. Viskoz akışkanlara daldırılan kısa liflerin yönü akışa bağlı olarak değişir. Bu lif yönelimi mekanik özellikleri etkilemektedir. Lif oryantasyon durumu bilindikten sonra, kompozitin mekanik özelliklerini tahmin edebilen teoriler mevcuttur (Halpin ve diğ., 1976 ve Chen ve diğ., 1984).

Literatürde, lif takviyeli polimer malzemelerin enjeksiyon kalıplama simülasyonları ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmaların büyük bir çoğunluğu plastik enjeksiyon kalıplama simülasyon yazılımından elde edilen verileri referans olarak değerlendirme yapmaktadır. Fakat enjeksiyon kalıplama simülasyonundan elde edilen lif oryantasyon tensör verileri, ana malzeme (matris) ve takviye (lif) malzeme verilerinin kombinasyonu ile elde edilen kompozit malzemenin yapısal analizinin gerçekleştirilmesi ile ilgili çalışmalar oldukça azdır. Bu çalışmanın amacı, lif takviyeli plastik ürünlerin sonlu elemanlar modellemelerinde üretim geçmişini de dikkate alarak lif yönlerinin sonlu elemanlar modellerine aktarılması ve daha doğru modeller oluşturularak sayısal hesaplamalarla doğruluğunu arttırmak adına izlenen yöntem bir örnek üzerinde açıklanmıştır.

Kurkin ve Sadykova [22], lif oryantasyonunun malzemenin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini, DIGIMAT programına oryantasyon verilerini dahil ederek oluşturduğu malzeme modelinin yapısal analizini gerçekleştirerek incelemiştir.

Foss 'un [23] yapmış olduğu çalışmada, kısa lif takviyeli plastiklerin malzeme modeli, lif oryantasyon verilerinin de dahil edildiği temelde 4 seviyeden oluşan gruplandırma, analiz metotuna göre doğrusal ve doğrusal olmama durumu için, mekanik özelliklere göre ortotropik ve izotropik model kullanılarak oluşturulmuştur. Ortotropik bir malzeme modelinin yapılan karşılaştırma sonucunda izotropik modellemeye kıyasla daha sağlam ve doğru sonuçlar verdiği görülmüştür.

Kulkarni ve diğerleri (2017), yaptıkları analizler neticesinde elde ettikleri nihai ortotropik malzeme verilerini dahil ettikleri yapısal analizlerde, izotropik malzeme verilerini kullanarak yaptıkları analizlere kıyasla deneysel sonuçlara yaklaşık %92 oranında daha yakın olduğu sonucuna varmışlardır.

Ramorino ve diğerleri yaptıkları çalışmada (2020), %35 kısa lif takviyeli poliiftalamid (PPA) malzeme kullanarak manifold bloğunun enjeksiyon simülasyonları neticesinde elde ettikleri lif oryantasyon ve artık gerilmelerinin dahil edildiği ortotropik malzeme kullanılarak yapılan analizler, deneysel verilerle uyumlu olduğu sonucuna varmışlardır. Aynı zamanda genelde pirinç malzeme kullanılarak üretilen manifold bloklarında çalışmada kullanılan malzemenin kullanılmasıyla yaklaşık %60 oranında ağırlıkta azalma ve yaklaşık %65 maliyet kazancı sağlanmıştır.

Gustavsson ve diğerleri (2021) yaptıkları çalışmada, lif oryantasyon sonuçlarını dahil ederek oluşturdukları malzeme modeli ile yapısal analiz gerçekleştirilmiştir. Aynı model ve malzeme kartına atanan farklı lif oryantasyon verileri ile anizotropik temsil gerçekleştirildi. Ayrıca deneysel veriler kullanılarak kalibre edilen bir malzeme modeli kullanıldı.

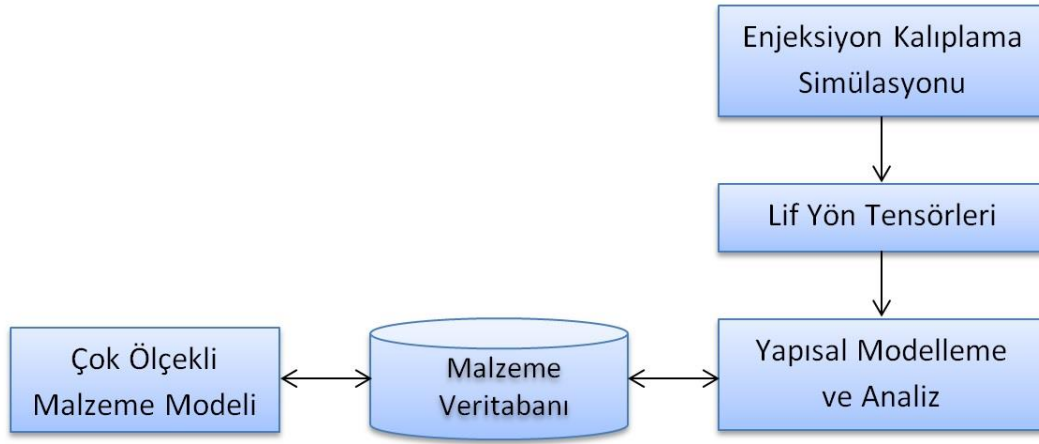
Dhande ve diğerleri (2014) yaptıkları çalışmada, %30 cam elyaf katkılı poliamid malzemeden elde edilen araç pedalı üzerinde sonlu elemanlar analizi gerçekleştirdi. Konvansiyonel malzemeye kıyasla %66,7 daha hafif pedal elde edildi. Yapılan çalışmada lif oryantasyon tensör verileri hesaba katılmamıştır.

Bu çalışmada, fiber oryantasyon verilerinin dahil edildiği çok ölçekli malzeme modeli oldukça yaygın olarak kullanılan ticari bilgisayar destekli mühendislik yazılımlarından birinin mevcut olan arayüzü kullanılarak oluşturulmuş ve yapısal analizde kullanılmıştır. Anizotropik etkiler göz ardı edilmeden oluşturulan lif takviyeli plastik malzeme ile takviyesiz plastik malzeme ve çelik malzeme sonuçları karşılaştırılmıştır. Mevcutta lif yönelimleri kullanılmadan lif takviyeli plastik malzemeler, çekme testi sonucu elde edilen birim şekil değiştirme ve gerilme eğrisi kullanılarak izotropik malzeme kabulü ile modellenmektedir. Lif oryantasyonunun tahmin edilmesi ile alakalı literatürde yapılan belirli varsayımlar sonucunda elde edilen matematiksel ifadeler, polimerin doğrusal olmayan ve karmaşık akış özellikleri ile lif içermesi durumu, sadece uygun malzeme modelleri dahil edilerek sayısal çözümler kullanmaya yöneltmiştir. Yaygın olarak kullanılan ticari yazılımların pek çoğunda plastik enjeksiyon kalıplama işlemi için sayısal çözümler kullanılmaktadır. Lif takviyeli plastik parçaların sonlu elemanlar modellerinde plastik enjeksiyon üretim geçmişinin de dikkate alınarak analizlere dahil edilmesi ile daha doğru modelleme yapılarak sonuçlar elde edilmiştir. Üretim geçmişini dikkate alarak yapılan çalışmalar literatürde oldukça azdır. Önerilen malzeme modeli oluşturma yönteminin diğer çalışmalara kıyasla avantajları arasında, enjeksiyon işlemi sonrası elde edilen lif oryantasyon verileri ile birim hücre

malzeme modelinin oluşturulması, mikro ölçekte yapılan malzeme tanımlamasından makro seviyede malzeme modeli eğrisi elde edilmesi sayılabilir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, cam elyaf katkılı malzemelerden yapılan ürünlerin sonlu elemanlar modellerinin doğru oluşturulması adına lif oryantasyon verilerinin hesaba katılarak mukavemet değerlerinin elde edilme yöntemi bir araç pedalı örneği ile gösterilmiştir. Araç pedalının, %30 cam elyaf katkılı poliamid matrisli malzemeden plastik enjeksiyon kalıplama yöntemi ile üretilmesi ve anizotropik verilerin de dahil edilerek yapısal analizinin gerçekleştirilmesi ele alınmıştır. Şekil 1’de iş akışı gösterilmiştir.



Şekil 1:

İş Akış Diyagramı

Bu çalışmada, plastik enjeksiyon kalıp simülasyonu için Inspire Mold, çok ölçekli malzeme modeli için Multiscale Designer, sonlu elemanlar modeli oluşturularak yapısal analiz HyperWorks kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Plastik enjeksiyon kalıplama yöntemi ile üretimin, bilgisayar destekli mühendislik uygulamalarında referans aldığı matematiksel yaklaşım, kütle, momentum, enerji korunumu denklemleri ve ilgili malzeme özelliklerinin de dahil edildiği süreklilik varsayımına dayanmaktadır. Enjeksiyonlu kalıplamanın doldurma ve ütleme bilgisayar simülasyonu, esas olarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) ve sayısal ısı transferinin (NHT) uygulanmasıyla ilgilidir.

Problemin özelliklerine göre, temel denklemler uygun şekilde basitleştirilebilir. Uygun başlangıç koşulları ve sınır koşulları göz önüne alındığında, denklemlerin tümü polimer eriyik akışının matematiksel modelini oluşturur (Fung, 1977). Polimer eriyiğinin akışını temsil eden ortak

denklem ilişkileri Newton akışkanları, genelleştirilmiş Newton akışkanları ve viskoelastik akışkanlar olarak sınıflandırılır (Zhou ve diğ., 2013).

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (1)$$

Newton iç sürtünme yasası; τ , kayma gerilimi tensörü, hız gradyanına kayma hızı denir. $\dot{\gamma}$ gerinim (veya deformasyon) tensör oranıdır ve orantı sabiti μ , sıvının akmaya karşı direncinin indeksi olan sıvının viskozitesi olarak adlandırılır.

Genelleştirilmiş Newton tipi akışkanlarda erimiş polimerlerin akışını modellemek amacıyla viskozitenin kayma hızının bir fonksiyonu olmasına izin verilir ve sonuçta Eş. 1 düzenlenerek aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\tau = \eta(T; \dot{\gamma}) \dot{\gamma} \quad (2)$$

τ , bileşenlerinin bir matrisi olarak yazılabilen viskoz gerilme tensörü olarak adlandırılır.

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Ve $\eta(T, \dot{\gamma})$ viskozite fonksiyonu olarak adlandırılır, aynı zamanda viskozite olarak da adlandırılır. Genelleştirilmiş Newton akışkanları, aşağıda verilen Eş. 4 genelleştirilmiş Newton viskoz kuvvet yasasını dikkate alır.

$$\sigma = 2\eta \dot{\epsilon} - (p - \lambda \nabla \cdot u)I \quad (4)$$

Burada η dinamik viskozitedir, λ dilatasyon viskozitesidir, I birim tensördür, $\dot{\epsilon}$ gerinim (veya deformasyon) tensörüdür ve σ her zaman Eş. 5' de ki gibi yazılabilen gerilme tensörüdür.

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} = -pI + \tau \quad (5)$$

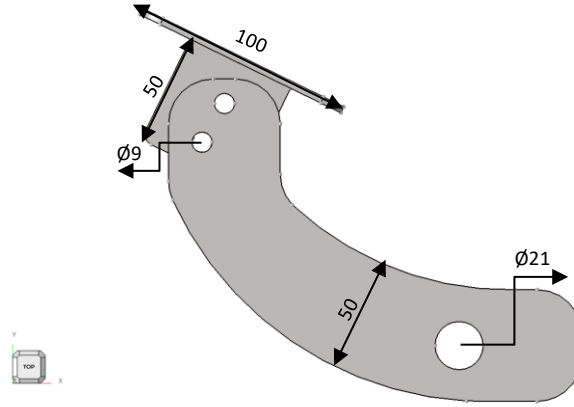
Enjeksiyon kalıplama, üç temel adımdan oluşan döngüsel bir işlemdir: doldurma aşaması, ütüleme aşaması ve soğutma aşaması. Doldurma aşamasında, soğuk duvarlı boşluğa bir polimer eriyik enjekte edilir, burada yüksek basınçların etkisi altında yayılır ve kalıbı doldurur. Paketleme aşamasında, kalıp doldurulduktan sonra yüksek basınç korunur ve soğutma sırasında yoğunluk değişikliklerini (büzülmeyi) telafi etmek için boşluğa ek eriyik akar. Ve son adımda, eriyik soğutulur ve şekillendirilmiş ürün çıkarılır. Doldurma ve ütüleme aşamaları sırasında farklı akışkan özellikleri geçerlidir, bu nedenle varsayımlar, sınır koşulları ve daha basitleştirilmiş sayısal modeller bu iki aşamanın simülasyonunda farklıdır. Çözüm sürelerini ve malzeme verisi gereksinimlerini daha makul hale getirmek için birtakım varsayımlar yapılır.

Enjeksiyon kalıplama simülasyonu sonucu elde edilen fiber oryantasyon tensör sonuçları hem düğüm noktası hem de eleman bazlıdır. Bu tensör simetriktir ve ağ yapısında her elemanda ve

düğümde 6 bileşenle ifade edilir. Elemanlardaki fiber oryantasyon tensörü sonucu, elemental tensör değerlerini gösterir ve düğüm değerlerinin ortalamasıdır. Elde edilen sonuçlar, belirtilen ana yönde fiberin hizalanma olasılığını gösterir. Belirtilen bu yönde hizalanma olasılığı düşük ise bu değer sifıra yakın bir değerle gösterilir.

2.1. MODELLEME VE ANALİZ ÇALIŞMALARI

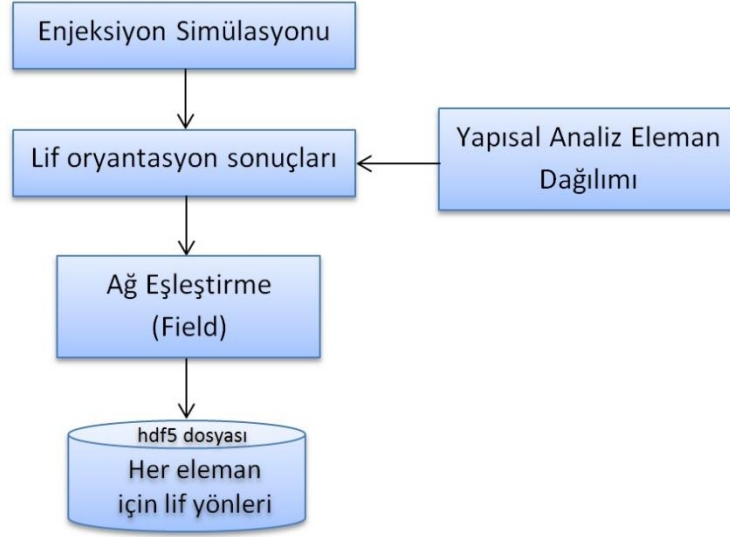
Bu çalışmada izlenen yöntem bir araç pedalı geometrisi üzerinde açıklanmıştır. Şekil 2' de parçanın katı modeli gösterilmiştir (Rauber, 2020).



Şekil 2:

Araç pedalı katı modeli ve ana ölçüleri

Malzeme olarak, kullanılan yazılımların veri tabanından %30 cam elyaf katkılı poliamid (PA66+GF30) seçilmiş ve ilk aşamada lif oryantasyon tensör verilerinin elde edilmesi amacıyla plastik enjeksiyon simülasyonu Altair® Inspire™ Mold ile gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada çok ölçekli malzeme modeli oluşturmak için Altair® Multiscale Designer® kullanılmış ve son aşamada ise lif oryantasyon verileri, yapısal analizde kullanılan ağ yapısı Altair® HyperWorks® arayüzünde Field komutu kullanılarak eşleştirilmiştir. Yapısal analizde kullanılan ağ yapısındaki elemanlar ile eşleştirilen tensör verileri ile çok ölçekli malzeme verileri birleştirilerek nihai malzeme elde edilmiştir. Altair® HyperWorks® arayüzünde oluşturulan nihai malzeme modeli ile yapısal analiz gerçekleştirilmiştir. Plastik enjeksiyondaki işlem adımları (dolum, ütüleme ve soğutma) için dolum süresi, tutma süresi, enjeksiyon sıcaklık değeri gibi proses parametreleri arayüzde enjeksiyon simülasyonu yapılacak malzeme seçimi yapıldığında yazılımın veri tabanından önerilen değerler alınmıştır. Ancak kullanıcı isterse bu değerleri değiştirebilir. Analiz sonucunda, malzeme modellemesinde kullanılan lif oryantasyon verileri haricinde, dolum esnasındaki sıcaklık dağılımı, hava çıkışının tıkandığı veya olmadığı noktalar, ütüleme esnasındaki sıcaklık dağılımı, büzülmeden kaynaklanan yüzey çöküntüleri, soğutma esnasındaki sıcaklık dağılımı ve enjeksiyon sonrası parçadaki çekme miktarı sonuçları da elde edilmiştir. Plastik enjeksiyon simülasyonu sonucunda oluşan ağ yapısı ve lif oryantasyon verilerini içeren C2mRun_main.fem dosyası Altair® HyperWorks® arayüzüne aktarılmış ve aynı arayüzde yapısal analiz için kullanılan ağ yapısı da oluşturulmuştur. Yapısal analizde oluşan ağ yapısı ile enjeksiyon simülasyonunda oluşan ağ yapısı aynı olmadığı için Field aracı ile ağ yapıları eşleştirilmiş ve sonuç olarak h5 formatında yapısal analizde kullanılmak üzere oryantasyon verileri elde edilmiştir. İşlem adımları Şekil 3'te görülebilir.

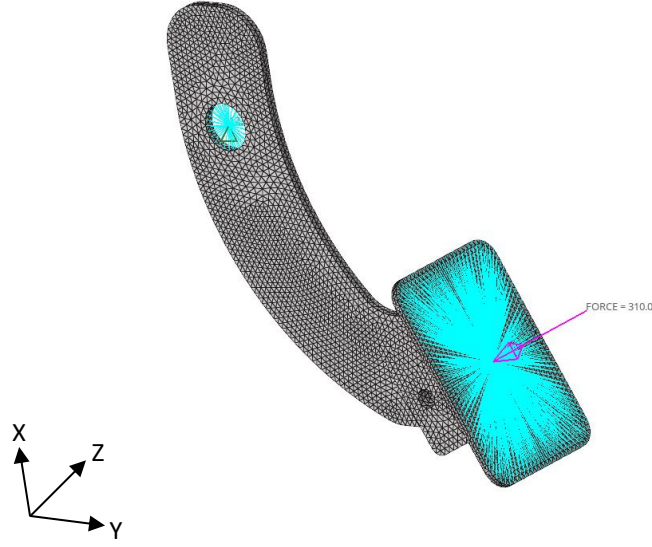


Şekil 3:

Yapısal analize uygun oryantasyon verilerinin elde edilmesi

Çok ölçekli malzeme modeli tanımı için Altair® Multiscale Designer® yazılımı kullanılmış ve üç adımda gerçekleştirilmiştir. Bunlar sırasıyla, birim hücre modelinin tanımlanması, doğrusal malzeme karakterizasyonu ve son olarak doğrusal olmayan malzeme karakterizasyonudur. Çok ölçekli malzeme modeli oluşturulmasından yapısal analize kadar olan işlem adımlarının detayları aşağıdaki sıralanmıştır:

1. Birim hücre modelinin mikro seviyede geometrik olarak tanımlanması
2. Doğrusal malzeme karakterizasyonu aşamasında, çözücünün kendi veri tabanındaki matris ve lif malzeme verilerinin seçilmesi ve homojen malzeme özelliklerinin elde edilmesi
3. Doğrusal olmayan malzeme karakterizasyonu aşamasında, oluşan laminat yapı %5 plastik birim şekil değiştirmeye maruz kalacak şekilde test edilerek gerilme-birim şekil değiştirme sonuçlarının elde edilmesi
4. Enjeksiyon kalıplama simülasyonundan elde edilen sonuçların, malzeme modeline dahil edilerek yapısal analizde kullanılacak olan nihai malzeme modelinin elde edilmesi
5. Şekil 4’de gösterilen parçanın deliklerin olduğu kısımlardan hareketinin kısıtlanması, elde edilen lif oryantasyon verileri ile oluşan nihai malzeme modelinin analizin gerçekleştirildiği arayüze aktarılması ve parçaya atanması
6. Altair® HyperWorks® arayüzünde yapısal analiz için gerekli sınır koşulları ile doğrusal olmayan analizin gerçekleştirilmesi (Pedal yüzeyine ortalama 31 kg’lık bir kütle geleceği varsayılarak 310 N büyüklüğünde kuvvet uygulanmıştır)
7. Aynı sınır koşulları altında takviyesiz plastik malzeme ve çelik malzeme için izotropik malzeme kabulü ile analizin gerçekleştirilmesi
8. Lif takviyeli plastik, takviyesiz plastik ve çelik malzeme ile elde edilen pedalin analiz sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 4:

Yapısal analiz için Pedal sonlu elemanlar modeli ve sınır şartları

Sonlu elemanlar modeli 53713 tane lineer tetra elemandan oluşmaktadır. Şekil 4'te mavi renk ile gösterilen iki adet bir boyutlu RBE3 eleman kullanılmıştır. Kullanılan bu RBE3'lerin amacı bir nokta ile birden çok noktanın kontrolünü sağlayarak, yük aktarımının uygun bir şekilde temsilini sağlamaktır. Araç pedalının hareketi, belirtilen noktadan SPC (Şekil 4'te üçgen şeklinde temsil edilir) ile kısıtlanır. SPC, seçilen noktadaki elemanların serbestlik derecelerinin kontrol edilmesi ile parça hareketini kısıtlamak amacı ile kullanılır. Parça hareketi $U_x = 0$, $U_y = 0$, $U_z = 0$ (X,Y,Z yönündeki yer değiştirme) ve $Rot_x = 0$, $Rot_z = 0$ (X,Z yönündeki dönme) şeklinde sabitlenmiştir. Y eksenini etrafındaki dönme hareketi (Rot_y) serbest bırakılmıştır. Parça hareketi Pedala 310 N büyüklüğünde kuvvet uygulanmıştır. Bu kuvvet araç üzerinde yapılan testler neticesinde araç pedalına gelecek olan maksimum ve minimum yüklerin belirlendiği bir araştırmadan referans alınarak ortalama değer olarak seçilmiştir (Belt, 2015). Analizlerde kullanılan malzeme modelinin matris fazı (poliamid) ve lif fazı (cam elyaf) için yapılan kabuller Tablo 1'de listelenmiştir.

Tablo 1. Kullanılan malzemelerin özellikleri

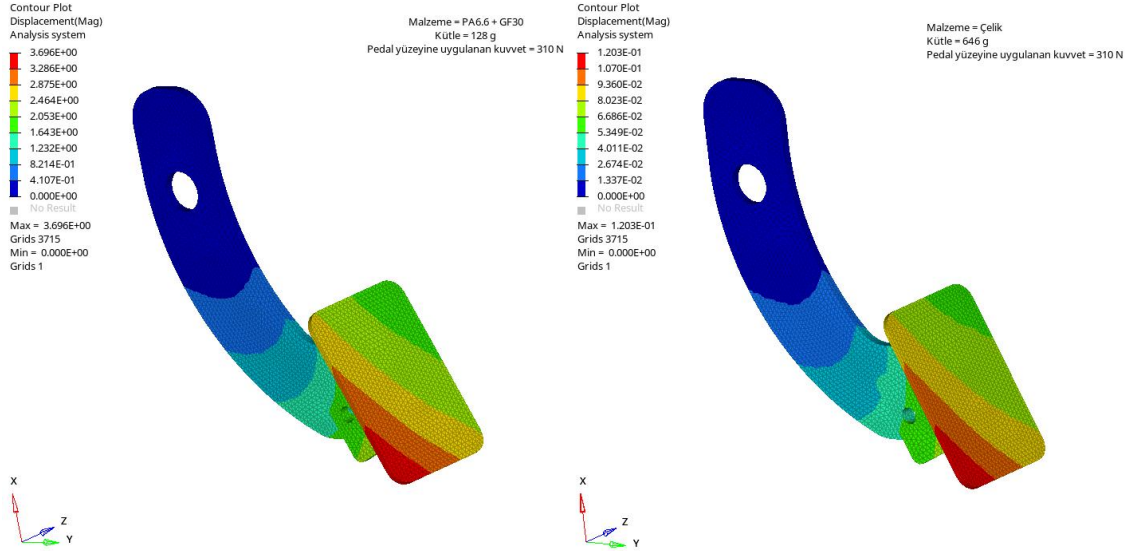
Malzeme Karakterizasyonunda Kullanılan Veriler ve Kabuller
Matris, Lif Elastisite Modülü =3103 MPa, 72395 MPa
Matris, Lif Poisson oranı=0.41, 0.22
Matris, Lif Yoğunluğu= 1.32×10^{-3} , 2.57×10^{-3}
Çok ölçekli malzeme modellemesi sonucu elde edilen kompozit malzeme yoğunluğu= 1.56×10^5
Çok ölçekli malzeme modellemesi sonucu elde edilen kompozit malzemenin X, Y, Z yönündeki elastisite modülleri=13004,5227,5227 MPa
Çok Ölçekli Malzeme modellemesi sonucu elde edilen kompozit malzemenin Kayma modülleri= G_{yz} :1486 MPa G_{xz} :1582 MPa G_{xy} :1582 MPa
Çok Ölçekli Malzeme modellemesi sonucu elde edilen kompozit malzemenin Poisson oranları= V_{xy} :0.37 V_{xz} :0.37 V_{yx} :0.15 V_{yz} :0.54 V_{zx} :0.15 V_{zy} :0.54
Matris fazı için seçilen hasar modeli: Orandan Bağımsız Plastisite (Rate Independent Plasticity) Lif fazı için seçilen hasar modeli: Elastik (Keep Elastic) Çok Ölçekli Malzeme modellemesi doğrusal olmayan analizi sonucunda kompozit malzeme için elde edilen maksimum gerilme değeri= 294 MPa Çok Ölçekli Malzeme modellemesi doğrusal olmayan analizi sonucunda kompozit malzeme için elde edilen maksimum birim uzama değeri=0.05

3.BULGULAR VE TARTIŞMA

%30 cam lif katkılı poliamid, takviyesiz poliamid ve çelik malzeme kullanılarak elde edilen araç pedalının doğrusal olmayan analizi sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

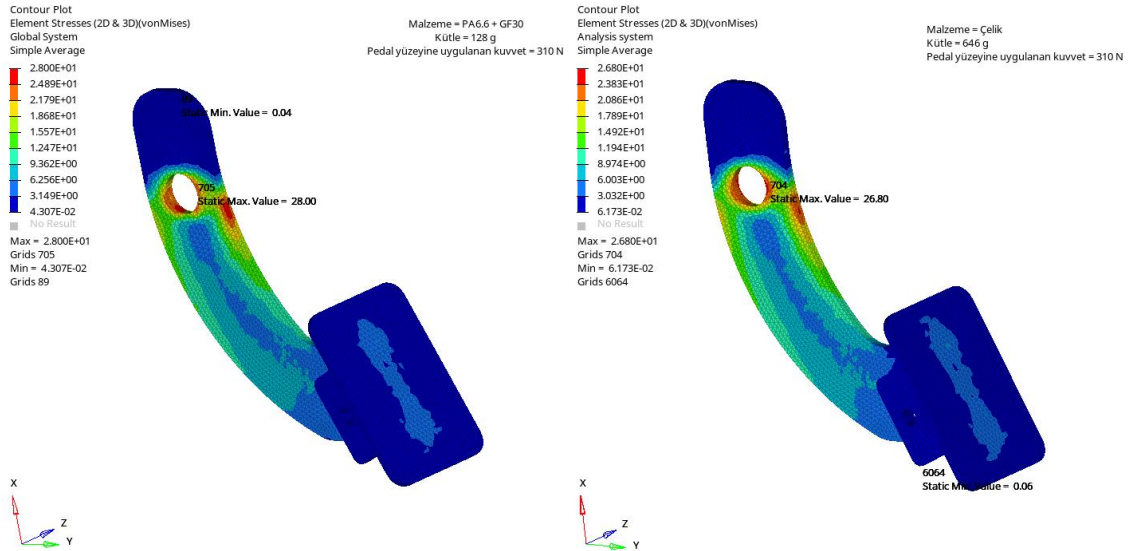
Plastiğe lif eklenmesi ile parçanın mukavemetinde her zaman artış görülmez. Çünkü enjeksiyon kalıplama ile üretilen kısa lif takviyeli plastiklerin üretimi esnasında elyaflar da kırılma meydana gelmektedir. Proses koşullarına bağlı olan bu kırılma sebebi ile lif eklenmesinin plastiğin mukavemetini kesin olarak arttırdığı veya azalttığı sonucuna varılamamaktadır. Bu çalışmada, cam lif takviyeli poliamid malzeme ile elde edilen pedalın maksimum yer değiştirme sonucu 3 mm; gerilme sonucu 28 MPa, çelik pedalın maksimum yer değiştirme sonucu 0,1 mm; gerilme sonucu ise 26 MPa'dır. Sonuçlar Şekil 5 ve 6'da gösterilmiştir. Takviyesiz poliamid malzeme ile elde edilen pedalın yer değiştirme sonucu 0,1 mm; gerilme sonucu ise 26 MPa'dır ve Şekil 7 ve 8'de gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre cam lif takviyeli poliamid malzeme kullanımı ile %7

oranında gerilme değerlerinde, %2,5 oranında yer değiştirme sonuçlarında artış görülmüştür. Bu sonuçlar literatür ile de uyumludur (Fu ve ark, 1999).



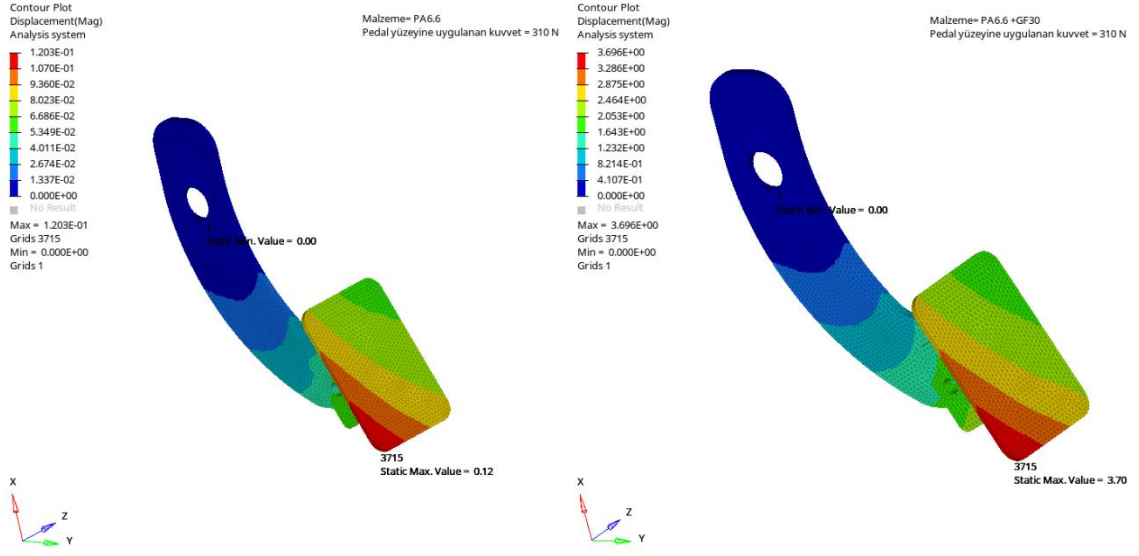
Şekil 5:

PA66+GF30 ve Çelik pedalin 310 N'luk yük altındaki yer değiştirme sonucu



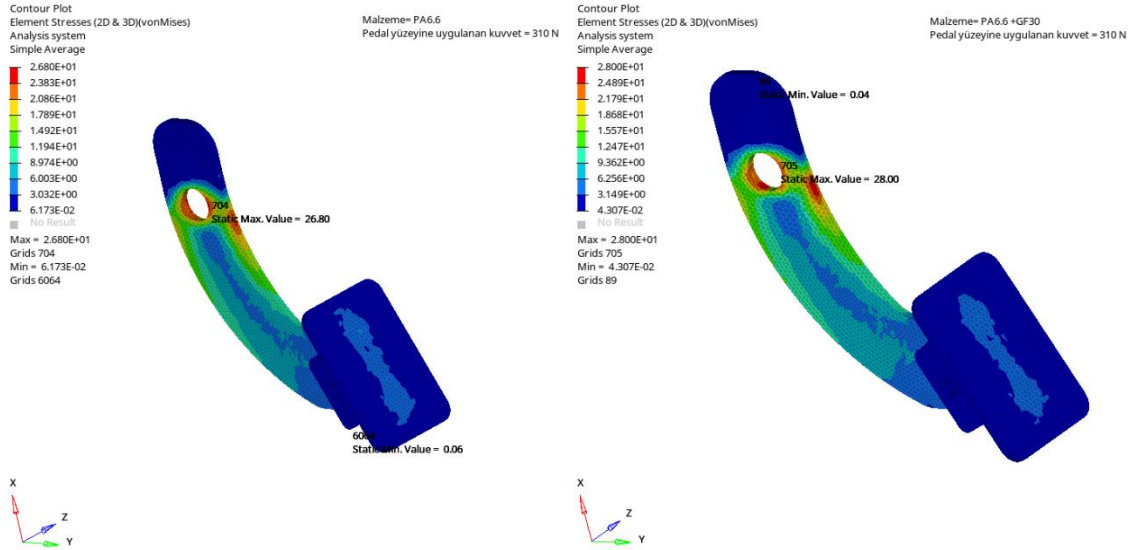
Şekil 6:

PA66+GF30 ve Çelik pedalin 310 N'luk yük altındaki gerilme sonucu



Şekil 7:

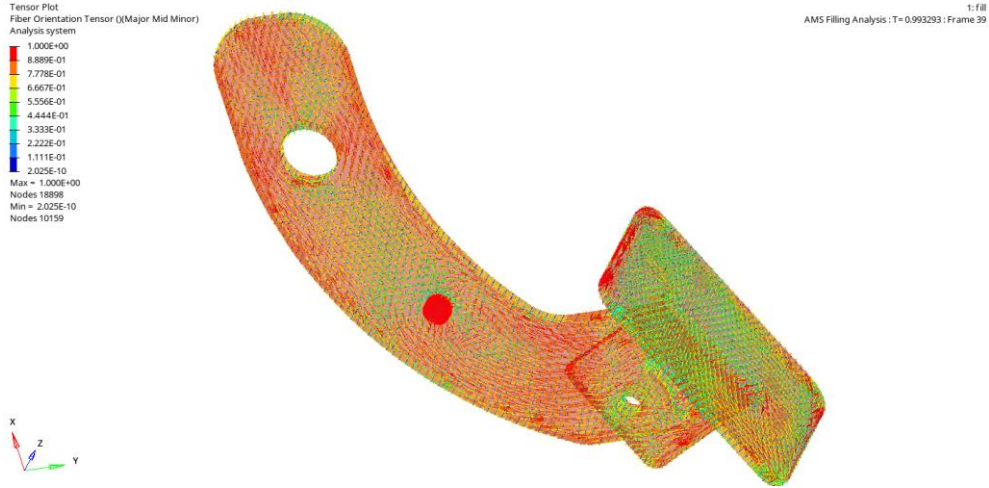
PA66+GF30 ve PA66 pedalin 310 N'luk yük altındaki yer değiştirme sonucu



Şekil 8:

PA66+GF30 ve PA66 pedalin 310 N'luk yük altındaki gerilme sonucu

Elde edilen gerilme sonuçlarının malzeme emniyet değerlerini sağladığı görülmüştür. Malzeme emniyet değeri olarak, kullanılan malzemelerin akma gerilmeleri referans alınmıştır. Bu değerler, takviyesiz plastik için 83 MPa, takviyeli plastik için 294 MPa, çelik için 300 MPa'dır (Müller, 2021). Cam lif takviyeli poliamid malzeme ile elde edilen pedalın kütlesi 128 gr iken çelik malzeme ile edilen pedalın kütlesi 646 gr'dır. Kompozit malzemenin kullanımı ile %20 oranında hafifletme sağlanmıştır. Mühendislik plastikleri, metallere kıyasla daha fazla tasarım özgürlüğü sunmakta ve araçlarda kullanılan parçaların kütlesinin en aza indirilmesine olanak sağlamaktadır (Yaşar, 2001). Enjeksiyon simülasyonu sonucu elde edilen ve yapısal analizde kullanılan lif yön tensör sonuçları Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 9:

Plastik enjeksiyon simülasyonu sonucunda elde edilen lif yön tensörlerinin görüntülenmesi

4. SONUÇ

Lif takviyeli plastik malzemelerin enjeksiyon prosesinde akıştan dolayı oluşan lif yönlerinin yapısal analize transfer edilerek daha doğru malzeme modeli ile ve malzeme testi yapmadan doğru sonuçlar elde etmek için izlenen yöntem bir örnek çalışma ile anlatılmıştır. Literatürde yapılan sonlu elemanlar analizlerinde, lif yönleri hesaba katılmadan analizler gerçekleştirildiğinden deneysel çalışmalara kıyasla farklılıklar görülmektedir. Lif katkılı plastik malzemelerin lif yönlerinin dahil edilerek doğru bir şekilde temsil edilmesi, analiz sonuçlarını oldukça etkilemektedir. Bu nedenle lif yönlerinin de analize dahil edilerek malzeme modeli oluşturulması önerilmiştir. Yapılan bu çalışma bilhassa literatürdeki bu noktaya önemli katkı sağlamaktadır. Önerilen bu yöntemin kullanılmasının, geleneksel malzemelere kıyasla daha ucuz, hafif ve dayanıklı olan lif takviyeli plastiklerin kullanımının yaygınlaşmasına neden olacağı öngörülmektedir.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

1. Lif yönlerinin sonlu elemanlar modeline dahil edilmesi ile daha doğru sonuçlar elde edilebileceği gösterilmiştir. Ürünlerin sonlu elemanlar yöntemi ile yapısal analizlerinde, üretim geçmişinin de yer alması sonuçların doğruluğunu arttıracaktır.

2. Lif takviyesi ile malzemede her zaman mukavemet artışı görülmemektedir. Bu çalışmada da cam lif takviyeli poliamid malzeme kullanımı ile %7 oranında gerilme değerlerinde, %2,5 oranında yer değiştirme sonuçlarında artış görülmüştür.
3. Kompozit malzemenin kullanımı ile %20 oranında hafifletme sağlanmıştır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

YAZAR KATKISI

Bu çalışma Sevil DURSUN'un Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalında yaptığı yüksek lisans çalışmaları kapsamında hazırlanmıştır. Necmettin KAYA çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi ve yönetimi, fikrinsel içeriğin eleştirel incelenmesi, son onay ve tam sorumluluk, Sevil DURSUN verilerin elde edilmesi, veri analizi ve yorumlama, makale taslağının oluşturulması, son onay ve tam sorumluluk kısımlarına katkı sağlamıştır.

KAYNAKLAR

1. Advani, S. G., ve Tucker III, C. L. (1987). *The use of tensors to describe and predict fiber orientation in short fiber composites*, Journal of rheology, 31(8), 751-784. <https://doi.org/10.1122/1.549945>
2. Affdl, J. H., ve Kardos, J. L. (1976) *The Halpin-Tsai equations: a review*, Polymer Engineering & Science, 16(5), 344-352. <https://doi.org/10.1002/pen.760160512>
3. Altan, M. C., Subbiah, S., Güçeri, S. I., ve Pipes, R. B. (1990) *Numerical prediction of three-dimensional fiber orientation in Hele-Shaw flows*, Polymer Engineering & Science, 30(14), 848-859. <https://doi.org/10.1002/pen.760301408>
4. Atlıhan, G., Ergene, B. (2018). *Vibration analysis of layered composite beam with variable section in terms of delamination and orientation angle in analytical and numerical methods*.
5. Arıcasoy, O. (2006) *Kompozit sektör raporu*, İstanbul Ticaret Odası, 4, 22. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.134.13>
6. Batchelor, G. K. (1971) *The stress generated in a non-dilute suspension of elongated particles by pure straining motion*, Journal of Fluid Mechanics, 46(4), 813-829. <https://doi.org/10.1017/S0022112071000879>
7. Casson, N. (1959) *A flow equation for pigment-oil suspensions of the printing ink type*, Rheology of disperse systems.
8. Campbell, F. C. (2010) *Structural composite materials*, ASM international.
9. Chen, C. Y., ve Tucker III, C. L. (1984) *Mechanical property predictions for short fiber/brittle matrix composites*, Journal of reinforced plastics and composites, 3(2), 120-129. <https://doi.org/10.1177/073168448400300202>
10. Chung, S. T., ve Kwon, T. H. (1995) *Numerical simulation of fiber orientation in injection molding of short-fiber-reinforced thermoplastics*, Polymer Engineering & Science, 35(7), 604-618. <https://doi.org/10.1002/pen.760350707>

11. Dinh, S. M., ve Armstrong, R. C. (1984) *A rheological equation of state for semiconcentrated fiber suspensions*, Journal of Rheology, 28(3), 207-227. <https://doi.org/10.1122/1.549748>
12. Dhande, K. K., Jamadar, N. I., ve Ghatge, S. (2014). *Design and analysis of composite brake pedal: an ergonomic approach*. Int J Mech Eng Robot Res, 3(3), 474-482.
13. Folgar, F., ve Tucker III, C. L. (1984) *Orientation behavior of fibers in concentrated suspensions*, Journal of reinforced plastics and composites, 3(2), 98-119. <https://doi.org/10.1177/073168448400300201>
14. Ergene, B., Bolat, Ç. (2019). *A review on the recent investigation trends in abrasive waterjet cutting and turning of hybrid composites*. Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences, 37(3), 989-1016.
15. Foss, P. H. (2004) *Coupling of flow simulation and structural analysis for glass-filled thermoplastics*, Polymer composites, 25(4), 343-354. <https://doi.org/10.1002/pc.20028>
16. Fung Y.C. (1977) *A first course in continuum mechanics*, New York, Prentice-Hall.
17. Fu, S. Y., Hu, X., & Yue, C. Y. (1999) *Effects of fiber length and orientation distributions on the mechanical properties of short-fiber-reinforced polymers a review*, Journal of the Society of Materials Science, Japan, 48(6Appendix), 74-83. https://doi.org/10.2472/jsms.48.6Appendix_74
18. Givler R.C., Crochet M.J. (1983) *On the solution of anisotropic channel flow*, Journal Composite Material, 17,330.
19. Guild, F. J. ve Summerscales, J. (1993) *Microstructural image analysis applied to fibre composite materials: a review*, Composites, 24(5), 383-393. [https://doi.org/10.1016/0010-4361\(93\)90246-5](https://doi.org/10.1016/0010-4361(93)90246-5)
20. Gustavsson M., Aspenberg D., Stoltz B. (2021) *Simulation of short fiber reinforced plastics in LS-DYNA using Envyo mapped fiber orientations obtained from process simulation in Moldex3D*, 13th European LS-DYNA Conference, Ulm, Germany.
21. Herschel W.H., Bulkley R. (1927) *Flow of non-newtonian fluids*, in *encyclopedia of fluid mechanics*, Gulf, Houston.
22. <https://grabcad.com/library/baja-pedal-1>, Erişim tarihi: 26.10.2021, Konu: *Baja Pedal (Rauber F.)*.
23. Hsissou, R., Seghiri, R., Benzekri, Z., Hilali, M., Rafik, M., & Elharfi, A. (2021). *Polymer composite materials: A comprehensive review*. Composite structures, 262, 113640. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113640>
24. <https://autosafety.org/wp-content/uploads/2015/03/The-Brakes-Will-Not-Always-Overcome-the-Engine.pdf>, Erişim tarihi: 24.11.2022, Konu: Brake Effectiveness During Sudden Unintended Acceleration (Belt A.R.).
25. <https://whm.net/wp-content/uploads/2021/04/pa66-gf30-black.pdf>, Erişim tarihi: 24.11.2022, Konu: Material data sheet PA66 GF30 black (Müller W.H.).
26. Jeffery, G. B. (1922) *The motion of ellipsoidal particles immersed in a viscous fluid*, Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing papers of a mathematical and physical character, 102(715), 161-179. <https://doi.org/10.1098/rspa.1922.0078>
27. Kikuchi, H. ve Koyama, K. (1996) *Generalized warpage parameter*, Polymer Engineering & Science, 36(10), 1309-1316.

28. Kulkarni, A., Aswini, N., Dandekar, C. R., ve Makhe, S. (2012) *Modeling of short fiber reinforced injection moulded composite*, In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 40, No. 1, p. 012025). IOP Publishing.
29. Kurkin, E. I., ve Sadykova, V. O. (2017) *Application of short fiber reinforced composite materials multilevel model for design of ultra-light aerospace structures*, Procedia Engineering, 185, 182-189. doi: 10.1016/j.proeng.2017.03.336
30. McGrath, J. J., ve Wille, J. M. (1995) *Determination of 3D fiber orientation distribution in thermoplastic injection molding*, Composites science and technology, 53(2), 133-143.
31. Mlekusch, B. (1999), *The warpage of corners in the injection moulding of short-fibre-reinforced thermoplastics*, Composites science and technology, 59(12), 1923-1931. doi:10.1016/S0266-3538(99)00051-2
32. Oldroyd, J. G. (1947) *A rational formulation of the equations of plastic flow for a Bingham solid*, Cambridge University Press, In Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society (Vol. 43, No. 1, pp. 100-105).
33. Ramorino, G., Cecchel, S., ve Cornacchia, G. (2020) *Effect of Fiber Orientation and Residual Stresses on the Structural Performance of Injection Molded Short-Fiber-Reinforced Components*, Advances in Systems Science and Applications, 20(2), 1-19.
34. Sikló, B., Cameron, K. ve Kovács, J. G. (2011) *Deformation analysis of short glass fiber-reinforced polypropylene injection-molded plastic parts*, Journal of Reinforced Plastics and Composites, 30(16), 1367-1372.
35. Yaşar, H. (2001) *Plastikler Dünyası*, MMO Yayınları,3-132.
36. Yalçın, B., Ergene, B. (2018). *Farklı malzemelere sahip hibrid kompozitlerde çatlağın mekanik davranışlara etkisinin analizi*. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 24(4), 616-625. doi: 10.5505/pajes.2017.02800
37. Zhou H., Hu Z., Li D. (2013) *Computer modeling for injection molding: simulation, optimization, and control*, first edition, numerical implementation for the filling and packing simulation.