

**LİF TAKVİYELİ PLASTİKLERİN ENJEKSİYON
SİMÜLASYONLARI VE SONUÇLARININ YAPISAL
ANALİZLERE TRANSFERİ**

Sevil DURSUN



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**LİF TAKVİYELİ PLASTİKLERİN ENJEKSİYON SİMÜLASYONLARI VE
SONUÇLARININ YAPISAL ANALİZLERE TRANSFERİ**

Sevil DURSUN
0000-0003-1309-9727

Prof. Dr. Necmettin KAYA
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
KONSTRÜKSİYON VE İMALAT ANABİLİM DALI

BURSA – 2023
Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

Sevil DURSUN tarafından hazırlanan “LİF TAKVİYELİ PLASTİKLERİN ENJEKSİYON SİMÜLASYONLARI VE SONUÇLARININ YAPISAL ANALİZLERE TRANSFERİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Konstrüksiyon ve İmalat Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Necmettin KAYA

- Başkan** : Prof. Dr. Necmettin KAYA İmza
0000-0002-8297-0777
Uludağ Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Konstrüksiyon ve İmalat Anabilim Dalı
- Üye** : Doç. Dr. Emre İsa ALBAK İmza
0000-0001-9215-0775
Uludağ Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Taşıt Tasarımı Anabilim Dalı
- Üye** : Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Onur GENÇ İmza
0000-0003-0332-1785
Bursa Teknik Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Mekanik Sistemleri Anabilim Dalı

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN
Enstitü Müdürü
.././.....

B.U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

16/01/2023

Sevil DURSUN

EK 8
TEZ YAYINLANMA
FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezin/raporun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kâğıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma izni Bursa Uludağ Üniversitesi'ne aittir. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları ile tezin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları tarafımıza ait olacaktır. Tezde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığını ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederiz.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan “**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**” kapsamında, yönerge tarafından belirtilen kısıtlamalar olmadığı takdirde tezin YÖK Ulusal Tez Merkezi / B.U.Ü. Kütüphanesi Açık Erişim Sistemi ve üye olunan diğer veri tabanlarının (Proquest veri tabanı gibi) erişimine açılması uygundur.

Prof.Dr.Necmettin KAYA
Tarih

Sevil DURSUN
Tarih

İmza

Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum
anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

İmza

Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum
anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

LİF TAKVİYELİ PLASTİKLERİN ENJEKSİYON SİMÜLASYONLARI VE SONUÇLARININ YAPISAL ANALİZLERE TRANSFERİ

Sevil DURSUN

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Konstrüksiyon ve İmalat Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Necmettin KAYA

Yapısal analizlerde, sonuçların doğruluğunu ve deneysel veriler ile korelasyonunu etkileyen hususlardan biri de malzemenin gerekli kabuller doğrultusunda modellenmesidir. İzotropik kabul yapılarak malzemelerin modellenmesi ve yapısal analizlerde kullanılması oldukça yaygın olmakla birlikte bilhassa elyaf takviyeli plastikler gibi anizotropik etkilerin yapının mukavemetini oldukça etkilediği durumlarda, bu etkilerinde modellenmeye dahil edilmesi simülasyondan elde edilen verilerin güvenilirliğini arttırmaktadır.

Bu çalışmada, ticari yazılımlardan biri kullanılarak, enjeksiyon kalıplama ile üretilen kısa lif takviyeli plastikten elde edilen dizüstü bilgisayar destekleyicisinin yapısal analizi, lif oryantasyon verileri de modellemeye dahil edilerek gerçekleştirilmiştir. Lif oryantasyon verileri, Altair® Inspire™ Mold yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen enjeksiyon simülasyonu sonucunda elde edilmiştir. Elde edilen lif oryantasyon verileri Altair® Multiscale Designer® çözücüsüne aktararak anizotropinin de dahil edildiği çok ölçekli malzeme modeli elde edilmiştir. Malzeme olarak çözücünün kendi veri tabanından seçilen %30 cam lif katkı poliamid kullanılmıştır. Oluşan nihai malzeme modeli ile Altair® HyperWorks® yazılımında yapısal analiz gerçekleştirilmiştir. Literatürde kısa elyaf takviyeli plastiklerin modellenmesinde lif oryantasyonlarının dahil edilmesi ile alakalı çalışmalar oldukça kısıtlıdır. Bu çalışmada ayrıca önerilen malzeme modeli ile anizotropik etkiler aynı zamanda lif takviyesi olmayan malzeme verileri ile karşılaştırılmış ve lif takviyesinin, malzemenin mukavemetini arttırdığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Lif takviyeli plastikler, yapısal analiz, lif oryantasyonu, sonlu elemanlar, PA 6.6 GF30, plastik enjeksiyon
2023, vi + 51 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

INJECTION SIMULATIONS OF FIBER REINFORCED PLASTICS AND TRANSFER OF RESULTS TO STRUCTURAL ANALYSIS

Sevil DURSUN

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Construction and Manufacturing

Supervisor: Prof. Dr. Necmettin KAYA

In structural analysis, one of the issues that affect the accuracy of the results and their correlation with the experimental data is the modeling of the material in line with the necessary assumptions. Although it is quite common to use isotropic materials in modeling and structural analysis, especially when anisotropic effects such as fiber-reinforced plastics affect the strength of the structure, these effects should be included in the modeling. It increases the reliability of the data obtained from the simulation.

In this study, the structural analysis of the laptop support obtained from short fiber reinforced plastic produced by injection molding was performed using one of the commercial software, including the fiber orientation data in the modelling. The fiber orientation data were obtained as a result of the injection simulation performed using the Altair® Inspire™ Mold software. The obtained fiber orientation data was transferred to the Altair® Multiscale Designer® solver and a multi-scale material model including anisotropy was obtained. As the material, 30% glass fiber reinforced polyamide selected from the solver's own database was used. Structural analysis was performed in Altair® HyperWorks® software with multiscale material model. In the literature, studies on the inclusion of fiber orientations in the modeling of short fiber reinforced plastics are very limited. In this study, the anisotropic effects with the proposed material model were also compared with the data of non-fiber reinforced materials, and it was seen that fiber reinforcement increased the strength of the material.

Key words: Fiber reinforced plastics, structural analysis, fiber orientation, finite element analysis, PA 6.6 GF30, injection molding

2023, vi + 51 pages.

TEŐEKKÖR

Mühendislik eğitime başladığım ilk günden beri yolumun keřiștiđi, mesleki gelişimime katkı sağlayan tüm güzel insanlara, tez çalışmamda desteklerinden dolayı danışman hocam Prof.Dr.Necmettin KAYA'ya ve daima yanımda olan sevgili aileme teşekkürlerimi sunarım.

Sevil DURSUN
16/01/2023

İÇİNDEKİLER

Sayfa

| | |
|--|-----|
| ÖZET | i |
| ABSTRACT | ii |
| TEŞEKKÜR | iii |
| SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ | iv |
| ŞEKİLLER DİZİNİ | v |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI | 2 |
| 2.1.Kaynak Araştırması | 2 |
| 2.2.Lif Oryantasyon Tensörü | 4 |
| 2.3.Polimer Eriyiği Akış Denklemleri | 4 |
| 2.4.Hele-Shaw modeli ve enjeksiyon simülasyonu | 15 |
| 3. MATERYAL ve YÖNTEM | 19 |
| 3.1.Enjeksiyon Kalıplama Süreci | 19 |
| 3.2.Enjeksiyon Kalıplama Simülasyonları | 21 |
| 3.3.Lif Takviyeli Plastik Parçanın Yapısal Analizi | 28 |
| 3.3.1.Parçanın Plastik Enjeksiyon Kalıplama Simülasyonu | 29 |
| 3.3.2.Çok Ölçekli Malzeme Modellenmesi | 34 |
| 3.3.3.Anizotropik Malzeme Modeli ile Yapısal Analiz Gerçekleştirilmesi | 41 |
| 4. BULGULAR | 42 |
| 5. TARTIŞMA ve SONUÇ | 47 |
| KAYNAKLAR | 48 |
| ÖZGEÇMİŞ | 51 |

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

| | |
|-----------|---|
| τ | Viskoz gerilme tensörü |
| η | Dinamik viskozite |
| λ | Dilatasyon viskozitesi |
| I | Birim tensörü |
| E | Gerinim (veya deformasyon) tensörü |
| Σ | Gerilme tensörü |
| p | Basınç |
| \hat{V} | Özgül hacim |
| T | Sıcaklık |
| q | Isı akısı |
| α | Termal yayılım |
| ρ | Polimer yoğunluğu |
| cp | Özgül ısı kapasitesi |
| $T(z)$ | Kavite kalınlığı boyunca sıcaklık profili |
| t | Sınırlardaki teğetsel birim vektörü |
| n | Dış normal birim vektörü |
| β | Kayma katsayısı |
| u | Sıvı parçacığının hızı |
| ub | Boşluk duvarının hızı |

Açıklama

Kısaltmalar

| | |
|-------|---------------------------------|
| T_g | Camsı geçiş sıcaklığı |
| T_m | Erime sıcaklığı |
| CFD | Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği |
| NHT | Sayısal Isı Transferi |
| FDM | Sonlu Farklar Yöntemi |
| FVM | Sonlu Hacimler Yöntemi |
| FEM | Sonlu Elemanlar Yöntemi |
| FEA | Sonlu Elemanlar Analizi |

ŞEKİLLER DİZİNİ

| | Sayfa |
|---|--------------|
| Şekil 2.1. Psödoplastik akışkanların karakteristik viskozite eğrisi..... | 8 |
| Şekil 2.2. PVT diyagramı..... | 9 |
| Şekil 2.3. Enjeksiyon kalıplama simülasyonu için sınır koşulları..... | 11 |
| Şekil 2.4. Hele-Shaw modeli tarafından tanımlanan akışın şematik diyagramı..... | 15 |
| Şekil 3.1. Enjeksiyon kalıplama makinesi şematik kesiti..... | 20 |
| Şekil 3.2. Parçanın şekli ve konumu..... | 28 |
| Şekil 3.3. Parçanın geometrik boyutları..... | 28 |
| Şekil 3.4. Analiz iş akışı..... | 29 |
| Şekil 3.5. Yazılım ara yüzünde malzeme ve giriş kapısının seçilmesi..... | 30 |
| Şekil 3.6. Yazılım ara yüzünde hava çıkışlarının gösterilmesi..... | 31 |
| Şekil 3.7. Enjeksiyon Proses Parametreleri..... | 32 |
| Şekil 3.8. Lif oryantasyon verileri, YY yönünde..... | 33 |
| Şekil 3.9. Lif oryantasyon verileri, XX yönünde..... | 33 |
| Şekil 3.10. Lif oryantasyon verileri, ZZ yönünde..... | 34 |
| Şekil 3.11. Yapısal analize uygun oryantasyon verilerinin elde edilmesi..... | 34 |
| Şekil 3.12. Yazılım ara yüzünde tanımlanan işlem adımları..... | 35 |
| Şekil 3.13. Matris ve fiber (lif)'in mikro seviyede geometrik olarak tanımlanması..... | 36 |
| Şekil 3.14. Fiber (Lif) malzeme verilerinin seçilmesi (E cam elyaf)..... | 37 |
| Şekil 3.15. Doğrusal olmayan malzeme özelliklerinin çekme testi sonucu elde edilmesi..... | 38 |
| Şekil 3.16. Doğrusal olmayan malzeme özelliklerinin çekme testi sonucu elde edilmesi (E cam elyaf)..... | 39 |
| Şekil 3.17. Yazılım arayüzünde, senkronize çalışılacak çözücünün seçimi..... | 40 |
| Şekil 3.18. Fiber (Lif) oryantasyon verilerinin malzeme modeline dahil edilmesi ile oluşturulan çok ölçekli malzeme modeli..... | 40 |
| Şekil 3.19. Yapısal analiz için tanımlanan sınır koşulları ile parçanın gösterilmesi..... | 41 |
| Şekil 4.1. PA66+GF30 Standın 20 N'luk yük altındaki yer değiştirme sonucu..... | 42 |
| Şekil 4.2. PA66 Standın 20 N'luk yük altındaki yer değiştirme sonucu..... | 42 |
| Şekil 4.3. PA66+GF30 Standın 20 N'luk yük altındaki yer değiştirme sonucu (Scale factor 10)..... | 43 |
| Şekil 4.4. PA66 Standın 20 N'luk yük altındaki yer değiştirme sonucu (Scale factor 10)..... | 43 |
| Şekil 4.5. PA66+GF30 Standın 20 N'luk yük altındaki gerilme sonucu..... | 44 |
| Şekil 4.6. PA66 Standın 20 N'luk yük altındaki gerilme sonucu..... | 44 |
| Şekil 4.7. PA66+GF30 Standın 20 N'luk yük altındaki gerilme sonucu..... | 45 |
| Şekil 4.8. PA66+GF30 Standın 20 N'luk yük altındaki gerilme sonucunun sadece matris fazı için sonucu..... | 45 |
| Şekil 4.9. PA66+GF30 Standın 20 N'luk yük altındaki gerilme sonucunun sadece fiber (lif) fazı için sonucu..... | 46 |

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. Ana malzeme ve takviye malzemelerine göre oldukça geniş bir yelpazede karşılaştığımız malzeme grubuna, bu çalışmanın da ana konusu olan lif takviyeli plastik malzemeler özelinde bakılacak olursa, oldukça yaygın bir kullanıma sahip olduğu ve literatürde de pek çok karşılaştırmalı çalışmanın mevcut olduğu bilinmektedir. Yapılan bu çalışmalarda, lif takviyesinin malzemenin dayanımını arttırdığı üzerinde durulmuş ve ilgili proses parametreleri ile elde edilen dayanım verileri çeşitli çalışmalarda karşılaştırılmıştır. Yapılan tez çalışmasının literatürde bulunan diğer çalışmalara kıyasla farklı olmasının nedeni ve çalışılmasının amacı, 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. Bilhassa 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. Bu malzeme modeli, oldukça yaygın olarak kullanılan ticari bilgisayar destekli mühendislik yazılımlarından birinin mevcut olan arayüzü kullanılarak oluşturuldu ve yapısal analizde kullanıldı. Diğer çalışmalara kıyasla oldukça verimli ve pratik bir modelleme yaklaşımı ile analiz gerçekleştirildi. Anizotropik etkiler göz ardı edilmeden oluşturulan lif takviyeli plastik malzeme ile takviyesiz malzeme verileri karşılaştırıldı.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Kaynak Araştırması

Plastik malzemeler, mekanik davranışlarının iyileştirilmesi amacıyla lifler ile takviye edilmektedir. 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 bağlıdır. 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 belirleyecektir (Siklo ve diğerleri,2011). Proses parametrelerinin etkisinin tespiti önemlidir. Optimum olmayan ayarların kullanılması nedeniyle parçada eşit olmayan bir büzülme neticesinde çarpılma görülecektir. Malzeme özellikleri, kalıp ve parça tasarımı veya proses özellikleri gibi temel sebeplerden dolayı ortaya çıkan büzülme, deformasyona neden olmaktadır. Bu deformasyon üç nedene bağlı olabilir: anizotropik büzülme, oryantasyon etkisi, düzgün olmayan soğutma (Fischer,2003 ve Shoemaker,2006). Jansen ve diğerleri (1998)'nin yapmış olduğu deneyler, kalıp yarıları arasındaki artan sıcaklık farkıyla birlikte deformasyonun arttığını, ayrıca düşük tutma basıncında plakaların sıcak tarafa doğru eğildiğini, yüksek tutma basıncında ise plakaların soğuk tarafa doğru eğildiğini göstermektedir. 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 deformasyon artışı olduğunu gözlemlemiştir.

Siklo ve diğeri (2011)'nin 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 diğeri çalışılan parametrelere (enjeksiyon oranı, akışkan sıcaklığı, tutma basıncı) kıyasla önemli ölçüde etkilediği sonucuna varılmıştır. Cam lif içeriğinin artışı ile deformasyon miktarının azaldığı görülmüştür.

İleri ki kısımlarda daha detaylı olarak bahsedilecek olan plastik enjeksiyon simülasyonlarında kullanılacak olan lif oryantasyonu, elde edilecek malzemenin mekanik özelliklerinin tespit edilmesi açısından önemli bir parametredir. Kısa lifler, kalıp doldurma prosesi boyunca hizalanırlar ve bu durum oryantasyona bağı 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,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,1995).

Lif oryantasyonunun tahmini, enjeksiyon kalıplama ile üretilmiş olan parçaların istenilen mekanik özellikler ile elde edilmesi açısından önemlidir. Bu nedenle, lif dolgulu polimerin bir kalıp doldurma simülasyonu, sistemi tamamen tanımlamak için anizotropik bir yapısal denklem içermelidir (Chung,1995).

Konuya ilişkin literatürde bazı çalışmalar mevcuttur. İlk olarak Jeffery (1922)'nin 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 diğeri (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 geliştirdi. Dinh ve Armstrong (1984), yarı konsantre süspansiyonlar için reolojik durum denklemi geliştirdi.

Yaklaşık olarak lif-lif etkileşimlerini hesaba katmak amacıyla bir test lifi üzerindeki sürtünmeyi tahmin etmek için Batchelor (1971)'un hücre modelini kullanarak çok parçacıklı problemi tek parçacıklı bir probleme indirgediler.

2.2. Lif Oryantasyon Tensörü

Literatürde bahsi geçen konuya ilişkin pek çok metod geliştirilmekle birlikte, bilgisayar destekli mühendislik uygulamalarının da referans aldığı ve bu çalışmada da sıklıkla bahsedilen lif oryantasyon tensöründen detaylı olarak bahsedilmesi gerekir. Advani ve Tucker (1987), lif oryantasyonunu tanımlamak ve tahmin etmek için tensörlerin kullanımını geliştirdi. 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 geliştirdi. Her bir lif konumu, kalıp doldurma sırasında izlendi ve akış yolu boyunca, dördüncü dereceden yönlendirme tensörlerinin bağımsız bileşenleri, sıfır hacim oranı sınırında çözüldü.

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 Kardos,1978 ve Chen ve Tucker,1984).

2.3. Polimer Eriyiği Akış Denklemleri

Bu kısımda enjeksiyon kalıplama işleminin doldurma ve ütüleme aşamalarındaki polimer eriyik akışı için ilgili malzeme özelliklerinden ve denklemlerden bahsedildi ve bu denklemlere uygulanacak sınır koşulları sunuldu. Bahsi geçen üretim yönteminin bilgisayar destekli mühendislik uygulamalarında referans aldığı matematiksel yaklaşım, kütle, momentum, enerji korunumu denklemleri ve ilgili malzeme özelliklerinin de dahil edildiği süreklilik varsayımına dayanmaktadır.

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 ve LiuI,2002).

Viskoz gerilme tensörü τ ve gerinim tensörü ϵ arasındaki ilişki kurucu denklem olarak isimlendirilmektedir. Bu, malzeme özelliğidir ve özel koşullardan bağımsızdır. Farklı polimerler için, malzeme özelliklerini tanımlamak amacıyla farklı yapısal modeller kullanılır. Bazen, sorunu basitleştirme ihtiyacından dolayı, aynı tip polimerler için farklı yapısal modeller kullanıldı. Polimer eriyiğinin akışını temsil eden ortak denklem ilişkileri Newton akışkanları, genelleştirilmiş Newton akışkanları ve viskoelastik akışkanlar olarak sınıflandırılır. Bu üç temel denklem ilişkisini ve ortak viskozite modelleri incelendi (Zhou ve diğerleri,2013).

Newton tipi akışkanlar:

Newton iç sürtünme yasası

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (2.1)$$

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.

Gerilimin kayma hızıyla doğru orantılı olduğu sıvılar için geçerli olmakla birlikte, Newton tipi akışlar olarak isimlendirilir. Bu tip akışkanlarda viskozite belirli bir sıcaklıkta genelde sabit olmaktadır. Newton sıvıları, su ve alkol, hafif yağ, düşük moleküler ağırlıklı bileşiklerin solüsyonu ve düşük hızlı gaz gibi çoğu saf sıvıyı içerir. Ancak, erimiş polimerler Newton tipi olmayan akışkanlardır. Viskozitesi çok karmaşık ve doğrusal olmadığı için kimyasal yapısına, bileşimine ve işleme koşullarına bağlıdır.

Genelleştirilmiş Newton tipi akışkanlar:

Erimiş polimerlerin akışını modellemek amacıyla viskozitenin kayma hızının bir fonksiyonu olmasına izin verilir ve sonuçta denklem 2.1 modifiye edilerek aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\tau = \eta(T, \dot{\gamma}) \dot{\gamma} \quad (2.2)$$

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

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Ve $\eta(T, \dot{\gamma})$ viskozite fonksiyonu olarak adlandırılır, aynı zamanda viskozite olarak da adlandırılır.

Doğada bulunan nişastalı sıvıların, süspansiyonların ve plastik eriyiklerin çoğu bu tür sıvılardır. Newton tipi olmayan akışkanlarda, sıcaklık veya akış hızı arttığında viskozite $\eta(T, \dot{\gamma})$ azalır. Ayrıca, eriyik prosesindeki plastik malzemeler daha viskoz ve sıkıştırılabilirlerdir.

Genelleştirilmiş Newton akışkanları, aşağıda verilen genelleştirilmiş Newton viskoz kuvvet yasasını dikkate alır:

$$\sigma = 2\eta \dot{\epsilon} - (p - \lambda \nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I} \quad (2.4)$$

ya da

$$\tau = 2\eta \dot{\epsilon} + (\lambda \nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I} \quad (2.5)$$

burada η dinamik viskozitedir, λ dilatasyon viskozitesidir, I birim tensördür, ϵ gerinim (veya deformasyon) tensörüdür ve σ her zaman aşağıdaki biçimde yazılabilen gerilme tensörüdür.

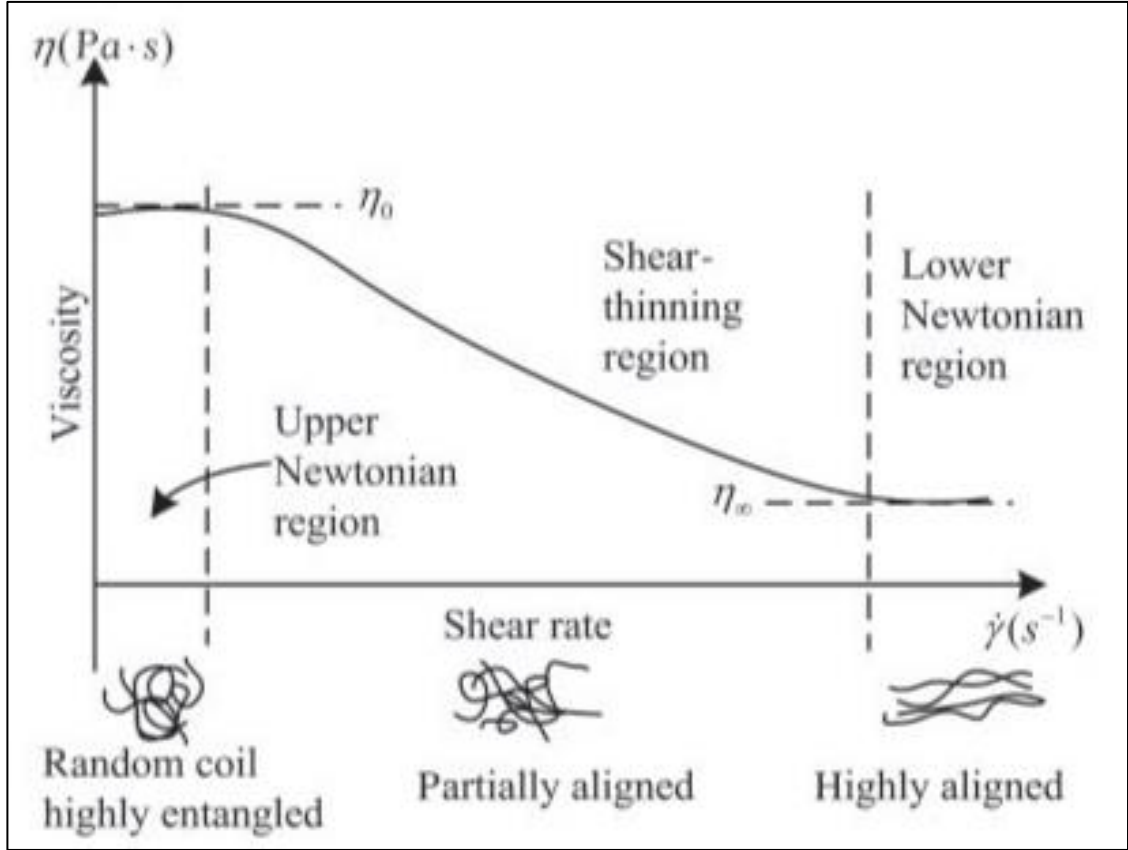
$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} = -pI + \tau \quad (2.6)$$

İzotropik akışkan için, viskoz gerilme, akışkanın lokal deformasyon hızının (veya gerinim hızının) bir fonksiyonudur.

İzotropik akışkanın mikro birimi, altı bileşenin bağımsız olduğu dokuz gerinim hızı bileşenine sahiptir. Genelleştirilmiş Newton akışkanı, polimer simülasyonunda yaygın olarak kullanılan yapısal modeldir. Uygulamadaki farklılıklarına göre zamana bağlı ve zamandan bağımsız olarak iki gruba ayrılabilir. Zamana bağlı grup içerisinde Bingham plastikleri, psödoplastik sıvılar ve dilatant sıvılar bulunurken, zamandan bağımsız grubu reopektik sıvılar ve tiksotropik sıvılar olarak alt gruplara ayırabiliriz (Nassehi,2002 ve Lenk,1978).

Bu tip akışkanları temsil eden farklı yapısal modeller Herschel ve Bulkley (1927), Oldroyd (1947) ve Casson (1959) tarafından geliştirilmiştir. Psödoplastik akışkanların akma gerilmesi eşiği yoktur ve bu akışkanlar için, kesme geriliminin kesme hızına oranı, kesme hızının artmasıyla genellikle sürekli ve hızlı bir şekilde düşer. Viskozitenin artan kayma gerilmesi oranıyla azaldığı bu kayma incilmesi etkisi, psödoplastik akışkanların önemli bir olgusudur. Bu akışkan modeli polimer akışını simüle etmek için şu anda en yaygın olarak kullanılan Newton tipi olmayan viskoz akışkan modelidir.

Enjeksiyon kalıplama sürecini modellemek için bir viskozite fonksiyonu (veya modeli) gereklidir.



Şekil 2.1. Psödoplastik akışkanların karakteristik viskozite eğrisi (Zhou ve ark. 2013)

Polimer zincirleri, kesme hızı arttıkça daha düzgün hizalanır, dolayısıyla viskozite buna bağlı olarak azalır (kayma incelmesi olarak tanımlanan bölgeye karşılık gelmektedir). Tüm polimerik zincirler tam olarak hizalandığında, kesme viskozitesi, kesme hızına neredeyse duyarız hale gelir (alt Newton bölgesi olarak tanımlanmaktadır).

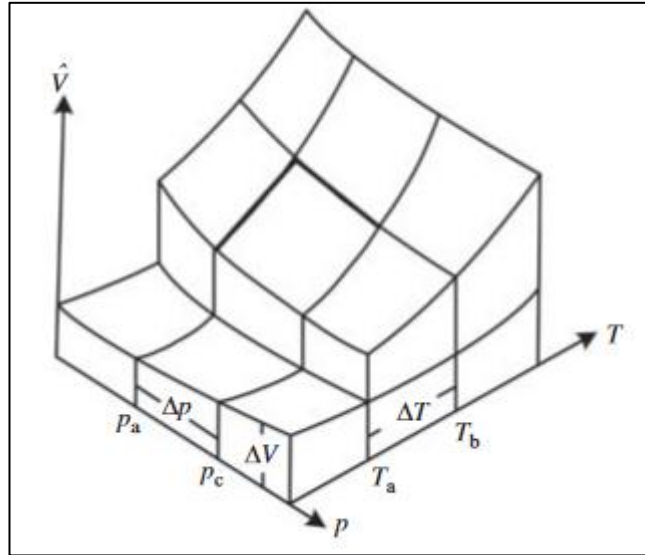
Genelleştirilmiş Newton akışkan modeli, viskozitenin deformasyon hızı tensörü ile değiştiği Newton olmayan özelliği tanımlayabilir. Ancak polimer işleme akışlarında yaygın olarak gözlenen geri tepme, gerilme gevşemesi, gerilme aşımı ve ekstrüdat şişmesi gibi diğer olguları tahmin edemez. Bu etkiler, polimer işlemede ürün kalitesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir ve göz ardı edilmemelidir. Polimer işleme akışlarının matematiksel modellenmesi ideal olarak viskoelastik yapı denklemlerinin kullanımına dayanmalıdır.

Termodinamik ile ilişkisi:

Enjeksiyon kalıplama simülasyonu için çeşitli termodinamik özellikler gereklidir. Termoplastikler genellikle sıcaklık ve basınç üzerinde önemli bir hacimsel değişime uğrar. Bu nedenle, ütleme aşamasında malzemenin sıkıştırılabilirliğini ve nihai parçanın enjeksiyonu sonrasındaki büzülme ve çarpılmayı hesaplamak için basınç-hacim-sıcaklık (PVT) ilişkisini karakterize etmek esastır.

Durum denklemi, üç değişken; basınç p , özgül hacim \hat{V} ve sıcaklık T ile ilgilidir. Özgül hacim, birim kütle başına düşen termoplastik hacmi olarak tanımlanır:

$$f(p, \hat{V}, T) = 0 \quad (2.7)$$



Şekil 2.2. PVT diyagramı (Zhou ve ark. 2013)

Farklı termoplastik türleri, geçiş sıcaklığı boyunca farklı PVT davranışlarına sahiptir. Yarı kristal termoplastik, önemli ve ani bir hacimsel değişime sahipken, amorf termoplastik, eriyikten katıya ani bir geçiş olmaksızın, özgül hacim-sıcaklık eğrilerinde yalnızca eğimde bir değişikliğe sahiptir.

Termal iletkenlik, özgül ısı kapasitesi ve termal yayılım gibi termal özellikler, doldurma ve ütüleme aşamaları sırasında ısı akış hızı, parça sıcaklık dağılımı, ısı ve çevrim süresi tahmininde kritik rol oynar.

Fourier'in izotropik bir ortamda tek yönlü kararlı hal ısı iletimi yasasına göre, termal iletkenlik şu şekilde tanımlanır:

$$k = -\frac{q}{\nabla T} \quad (2.8)$$

Burada q ısı akısıdır. Termal yayılım α , polimerdeki geçici ısı akışını ve zamana bağlı sıcaklık dağılımını belirler. Aşağıdaki denklem termal iletkenlik ile ilgilidir.

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (2.9)$$

Burada ρ polimerin yoğunluğu ve c_p özgül ısı kapasitesidir. Genel olarak, termal yayılım, polimerin dinamik sıcaklık tepkisinden deneysel olarak belirlenir. Akışkan akışını yöneten denklemler kütle korunumu denklemi, momentum korunum denklemi ve enerji korunum denkleminde oluşur. Üç denklem benzer forma sahiptir, bu nedenle taşıma denklemi genelleştirilebilir. Sıkıştırılabilir, viskoz bir akışkanın akışını temsil eden bu denklemler, bir polimer eriyiğinin akışına uygulanabilir.

Sınır Koşulları:

Ana denklemleri elde ettikten sonra, enjeksiyon kalıplama problemi için sınır koşulları ele alınır. Ana denklemlerin aksine, sınır koşulları belirli bir problem için oldukça spesifikdir. Bu nedenle hem genel denklemler hem de enjeksiyon kalıplama için basitleştirilmiş denklemlerde geçerli olacak sınır koşullarını tanımlamak mümkündür.

Şekil 2.3, gerekli sınır koşullarını belirttiğimiz basit bir kalıp boşluğunu göstermektedir.

Sınır koşullarının tanımlanması gereken birkaç yüzey vardır:

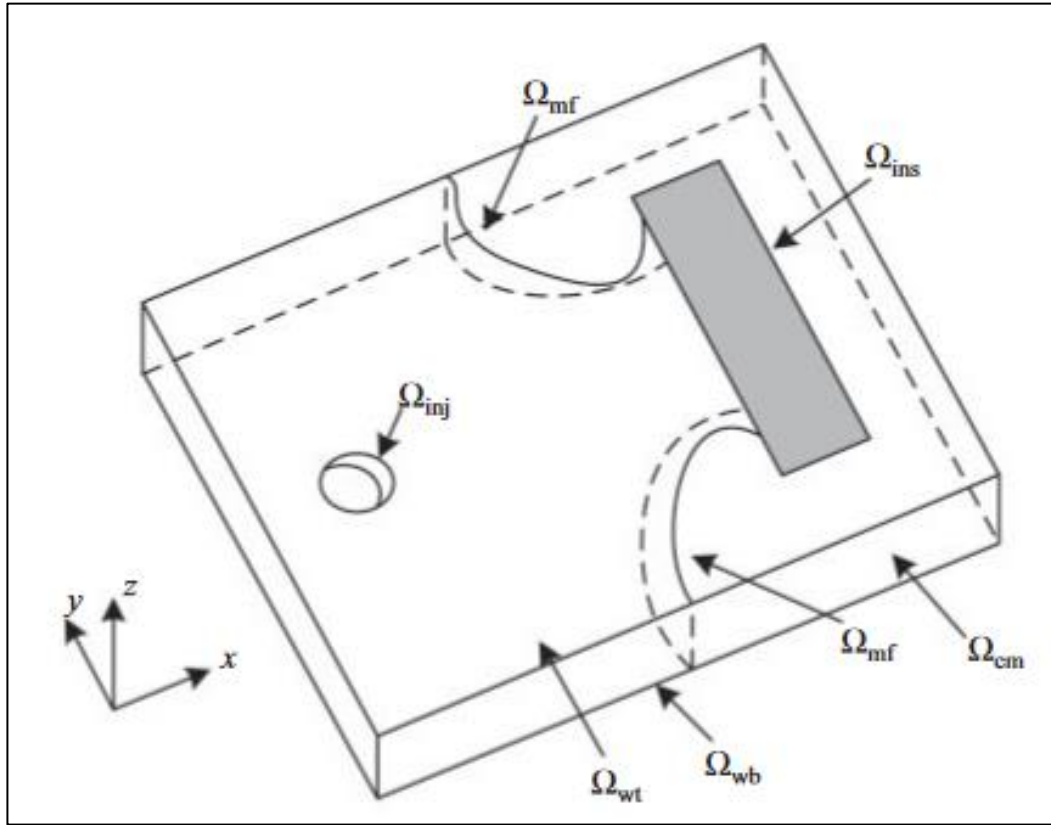
Ω_{inj} , eriyiğin boşluğa enjekte edildiği yüzeydir.

Ω_{em} , eriyik ile temas halinde olan kalıbın kenarını tanımlayan yüzeydir.

Ω_{wt} , sırasıyla kalıp duvarının üst ve alt yüzeyidir.

Ω_{ins} , kalıptaki herhangi bir eki tanımlayan yüzeydir.

Ω_{mf} , eriyik cephesinin konumunu tanımlayan yüzeydir.



Şekil 2.3. Enjeksiyon kalıplama simülasyonu için sınır koşulları (Zhou ve ark. 2013)

Enjeksiyon kalıplama problemi için sınır koşulları, boşluktaki basınç ve termal dağılımların çözümü ile ilgilidir. Aslında, süreklilik ve momentum denklemlerini basınç için tek bir denklemde birleştirmek mümkündür. Bu basınç denklemi, enerji denklemine bağlanır, çünkü basıncı etkileyen malzemenin viskozitesi hem sıcaklık hem de kesme hızı tarafından belirlenir. Bu nedenle enjeksiyon kalıplama probleminin çözümü, basınç ve

enerji denklemlerinin çözümünü gerektirir. Basınç ve termal sınır koşulları aşağıdaki bölümde ayrı ayrı tartışılacaktır.

Basınç Sınır Koşulları:

Herhangi bir geçirimsiz sınırdaki, sınıra normal doğrultudaki basınç gradyanı sıfırdır. Geçirimsiz sınırlar, kalıp kenarları, kalıp duvarları ve herhangi bir kalıp ekidir.

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0 \quad \Omega_{em}, \Omega_{wt}, \Omega_{wb} \text{ ve } \Omega_{ins} \quad (2.10)$$

Fiziksel olarak bu, kalıp duvarlarından veya kenarlarından akamayacağı anlamına gelir. Geçit hızını veya p basıncını belirleyebilen eriyik akış hızı q , eriyiğin boşluğa girdiği yüzeyde (kapı olarak da bilinir) belirtilir.

$$q = q_{inj} \text{ veya } p = p_{inj} \quad \Omega_{inj} \quad (2.11)$$

Mühendisler genellikle doldurma aşamasında belirli bir akış hızı kullanır. Bu, kalıplanacak parçanın hacminin kullanıcı tarafından belirlenen doldurma süresine bölünmesiyle elde edilir. Enjeksiyon profilini modellemek için bu akış hızını değiştirmek mümkündür. Ütuleme aşaması için, enjeksiyon kapısının belirtildiği noktada basınç tanımlanabilir. Dolayısıyla bu, model ütuleme profillerinden de farklılık gösterebilir. Basınç verisinin atmosfer basıncı olduğu varsayıldığında, eriyik cephesindeki basınç sıfırdır. Yani:

$$p = 0 \quad \Omega_{mf} \quad (2.12)$$

Çoğu kalıp, eriyiğin önündeki havanın kaçmasına izin verecek şekilde havalandırılır, bu fiziksel olarak mantıklıdır.

Sıcaklık sınır koşulları:

Sıcaklıkla ilgili sınır koşulları aşağıdaki gibidir:

Kavite kalınlığı boyunca sıcaklık profili, $T(z)$, eriyiğin enjekte edildiği yüzey için öngörülmüştür. Yani:

$$T(z) = T_{inj}(z) \quad (2.13)$$

Çoğu akış analizi yazılımı, enjeksiyon noktasında eriyik sıcaklığının düzgün olduğunu varsayar. Uygulamada bu çok kritik değildir, çünkü eriyik hızla boşluk veya yolluk sistemine taşınır, burada termal etkiler, kesme ısıtması ve iletimi nedeniyle kalınlık boyunca bir sıcaklık profilinin hızla gelişmesine izin verir. Sıcaklık, T , tüm kalıp sınırlarında belirtilmiştir. Her sınırdaki farklı bir sıcaklık belirlenebilir.

$$\begin{aligned} T &= T_{em} & \Omega_{em} \\ T &= T_{wt} & \Omega_{wt} \\ T &= T_{wb} & \Omega_{wb} \\ T &= T_{ins} & \Omega_{ins} \end{aligned} \quad (2.14)$$

Son zamanlarda, önce kalıbın ve soğutma sisteminin termal analizini yapmak ve ardından akış analizi için kalıp üzerindeki sıcaklıkları tanımlamak için bu analizden elde edilen sonuçları kullanmak yaygınlaştı. Pek çok bilim insanı, polimer kalıplama işleminde, boşluk yüzeyindeki kayma gerilmesinin her zaman kritik değerden daha büyük olduğunu ve bunun sonucunda akışkanın boşluk duvarına yapışmak yerine boşluk duvarı üzerinde kayacağını düşünmüştür. Öte yandan, kaymama durumu, özellikle serbest yüzey farklı denklemlerle izleme yöntemleri için temas hattında gerilme tekilliğine neden olacaktır. Parçacıklar veya hacim fonksiyonu ile izleme yöntemleri için, sayısal simülasyonda iyileştirilmesi zor olan, önceki kadar kötü olmasa da temas noktalarında gerilmenin sert bir şekilde değişmesi sorunu hala mevcuttur. Kaymaz koşul kullanılıyorsa, temas hattına yakın hız sürekli değiştiği için temas hattındaki gerilim tekilliği temel olarak ortadan kaldırılır (Dussan,1979 ve Huh,1977).

Hockin (1976), boşluk duvarındaki eriyiğin kayabilir olduğunu ve sürtünmeden etkilendiğini düşünmüştür.

Sürtünme, kayma katsayısına ve boşluk duvarındaki akışkanın teğetsel hızına bağlıdır. Silliman ve Scriven (1980), Navier (1822) lineer kayma uzunluğu modeline göre Navier kayma koşulunu önerdiler ve aşağıdaki şekilde gösterilen duvarın kayma hızı ve kayma gerilmesi arasında nicel bir ilişki kurdular.

$$[\beta_\tau \cdot n + (u - u_b)] \cdot t^T = 0 \quad (2.15)$$

t ve n 'nin sınırlardaki teğetsel ve dış normal birim vektörleri temsil ettiği, τ deviatorik gerilim tensörü veya viskoz gerilim tensörüdür, β kayma katsayısıdır ve u ile u_b , sıvı parçacığının ve boşluk duvarının hızıdır.

Model Basitleştirmeleri:

Bir akışkan hareketinin davranışını temsil eden denklemler önceki kısımlarda belirtildiği üzere süreklilik, momentum ve enerji denklemleridir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u u) = \nabla \cdot \sigma + \rho f \quad (2.17)$$

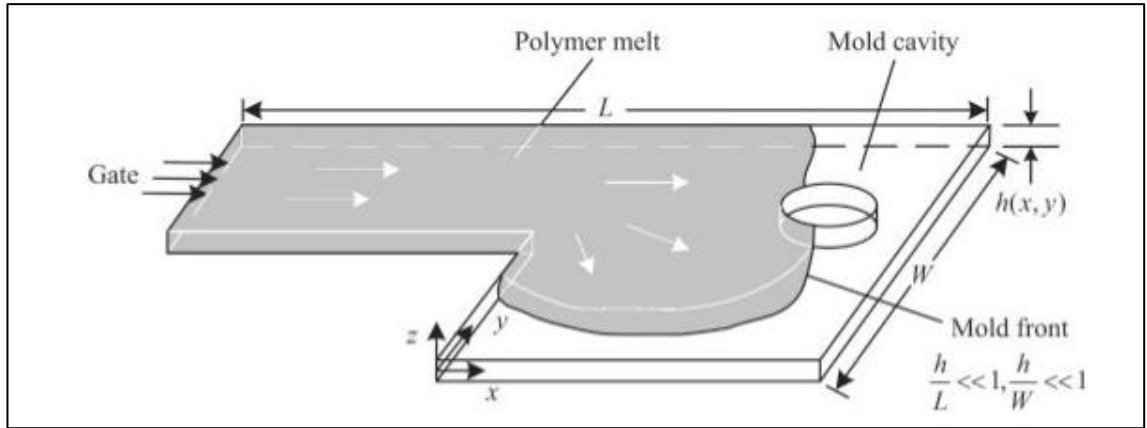
$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + c \nabla \cdot (\rho T u) = \nabla \cdot (k \cdot \nabla T) + \tau_{xx} \frac{\partial u}{\partial x} + \tau_{yx} \frac{\partial u}{\partial y} + \tau_{zx} \frac{\partial u}{\partial z} + \tau_{xy} \frac{\partial v}{\partial x} + \tau_{yy} \frac{\partial v}{\partial y} + \tau_{zz} \frac{\partial v}{\partial z} + S_i \quad (2.18)$$

Bu denklemler oldukça geneldir ve tüm yaygın kullanılan akışkanlar için geçerlidir. Günümüz bilgisayar donanımları ve sayısal teknikler ile enjeksiyon kalıp boşlukları gibi karmaşık alanlarda bunları çözmek mümkün değildir. Uygulama enjeksiyon kalıplamadır ve bu amaçla denklemleri basitleştirmek mümkündür. 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.

Son adımda, eriyik soğutulur ve şekillendirilmiş ürün çıkarılır. Doldurma ve ütüleme aşamaları sırasında farklı akışkan özelliklerine odaklanılır, 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. Aşağıdaki bölümde, bu varsayımlardan bahsedilecektir.

2.4. Hele-Shaw Modeli ve Enjeksiyon Simülasyonu

Polimer işleme simülasyonunda en yaygın olarak kullanılan model sadeleştirilmesi, Hele-Shaw modelidir (Henry Selby Hele-Shaw'dan sonra adlandırılır). Küçük boşluktaki akışlar için geçerlidir. Çoğu plastik ürünün kalınlığı düzlemsel yönlerin çok ötesindedir. Ayrıca uzun moleküler zincir yapısı yüksek viskoziteye neden olur, bu nedenle atalet kuvveti viskoz kayma gerilmesinden çok daha küçüktür. Böylece, ince bir boşluktaki doldurma akışı, Hele-Shaw akışlarına yaklaştırılabilir.



Şekil 2.4. Hele-Shaw modeli tarafından tanımlanan akışın şematik diyagramı (Zhou ve ark. 2013)

Hele-Shaw akışlarının ana denklemi, viskoz olmayan potansiyel akış ve sıvının gözenekli bir ortamdan akışıyla (Darcy yasası) aynıdır. Böylece bu tür akışın iki boyutta görselleştirilmesine izin verir.

Hele-Shaw yaklaşımı aşağıdaki varsayımlara dayanır:

- Eriyiğin doldurma akışı, sıkıştırılamaz akışkanın genişletilmiş laminar akışı olarak düşünülebilir. Kalınlık yönündeki hız ihmal edilebilir ve basınç sabit kalır.
- Yüksek viskozite nedeniyle, viskoz kayma geriliminden çok daha küçük olan atalet kuvveti ihmal edilebilir.
- Kalınlık yönündeki ısı taşınımını göz ardı edin.
- Eriyik akışı yönünde, ısı iletimi, ısı taşınımına göre biraz daha fazladır, dolayısıyla ihmal edilebilir.
- Eriyik akışı cephesindeki çapraz akışı, yani çeşme etkisini dikkate almayın.
- Boşluğun simülasyon üzerindeki etkisini görmezden gelin.

Hele-Shaw yaklaşımı (Kabuk modeli), ince parça enjeksiyon kalıplama işlemini simüle etmek için iyi bir araçtır. Katı bir parçayı ince kabuk yapısı ile modellemek için katı parçanın geometrisi, orta düzlem modeli veya yüzey modeli ile basitleştirilir.

Doldurma aşamasında, eriyiğin sıkıştırılamaz olduğu varsayılır.

Bu varsayım, yoğunluğun sabit olduğu ve dilatasyon viskozitesinin $\lambda=0$ olduğu anlamına gelir.

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (2.19)$$

$$\nabla \cdot (\rho uu) = \rho(\nabla \cdot uu) = \rho u(\nabla \cdot u) + \rho(u \cdot \nabla u) = \rho(u \cdot \nabla u) \quad (2.20)$$

Doldurma aşaması sırasında, eriyik genelleştirilmiş newton akışkanı olarak temsil edilebilir. Bu varsayım, viskoelastik etkilerin göz ardı edileceği anlamına gelir ve eriyiğin sıkıştırılamaz olduğu varsayımından dolayı, deviatorik gerinim tensörü ve gerinim hızı tensörü eşittir.

$$\nabla \cdot \sigma = \nabla \cdot (-pI + \eta\dot{\gamma}) = -\nabla p + \nabla \cdot \eta\dot{\gamma} = -\nabla p + \nabla \cdot \eta(\nabla u + \nabla u^T) \quad (2.21)$$

Doldurma aşamasında malzemenin ısı iletkenliğinin sabit olduğu varsayılır. Polimerlerin ısı iletkenliğinin (k) sıcaklığa bağlı olmasına rağmen, malzeme verilerinin elde edilmesindeki zorluk nedeniyle bu varsayım zorunludur.

$$\begin{aligned}\nabla \cdot (k \cdot \nabla T) &= k \nabla \cdot \nabla T = k \nabla^2 T \\ \nabla \cdot u &= 0\end{aligned}$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla u) = -\nabla p + \nabla \cdot \eta(\nabla u + \nabla u^T) + \rho f$$

$$\frac{\partial(\rho i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho i u) = k \nabla^2 T + \Phi + S_i \quad (2.22)$$

Ütöleme aşaması sırasında, eriyik sıkıştırılabilirliğinin etkisinin dikkate alınması esastır. Bu nedenle, $\nabla \cdot u = 0$ bağıntısı denklemleri basitleştirmek için kullanılamaz. Bununla birlikte, malzeme davranışı ve geometri ile ilgili diğer tüm varsayımları kullanıyoruz.

$$\begin{aligned}\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) &= 0 \\ \nabla \cdot (\rho u u) &= \rho(u \cdot \nabla u) + (\nabla \cdot \rho u)u \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho u) &= \frac{\partial \rho}{\partial t}u + \rho \frac{\partial u}{\partial t} = -(\nabla \cdot \rho u)u + \rho \frac{\partial u}{\partial t} \\ \rho \frac{\partial u}{\partial t} &= -\rho(u \cdot \nabla u) + \nabla \cdot \sigma + \rho f \\ \rho \frac{\partial u}{\partial t} &= -\nabla p - \rho(u \cdot \nabla u) + \nabla \cdot \eta \dot{\gamma} + \rho f \\ \rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \cdot \nabla T \right) &= \beta T \left(\frac{\partial p}{\partial t} + u \cdot \nabla p \right) + \eta \dot{\gamma} + k \nabla^2 T\end{aligned} \quad (2.23)$$

Literatürde, lif takviyeli polimer malzemelerin enjeksiyon kalıplama simülasyonları ile alakalı pek çok 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 alakalı çalışmalara çok rastlanılmamaktadır. Bu çerçevede literatürde yapılan bazı çalışmalara değinecek olursak;

Kurkin ve Sadykova (2017), kısa lif takviyeli kompozit malzeme modelini oluştururken liflerin oryantasyon verileri Moldex 3D yazılımı kullanılarak elde edildi. Lif oryantasyonunun malzemenin mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin de analize dahil edilmesi için bu veriler DIGIMAT programına aktarıldı. Buradan elde edilen nihai malzeme modeli ile ANSYS Workbench'de yapısal analiz gerçekleştirildi. Sonuç olarak malzemeye ait eşdeğer gerilme alanları ve deformasyon değerleri elde edildi.

Foss (2004) 'un yapmış olduğu çalışmada, kısa lif takviyeli plastiklerin enjeksiyon simülasyonu C-MOLD yazılımı kullanılarak gerçekleştirildi. Analiz sonucunda lif oryantasyon verileri ABAQUS formatına dönüştürüldü. Matris ve lif malzemesinin mekanik özellikleri çözüm dosyasının içerisine dahil edildi. Geometrik doğrusal olmama kabulü yapılarak belirlenen sınır koşulları dahilinde yapısal analiz gerçekleştirildi. Yapılan çalışmada Seviye 0, I, II, III olarak akış analizleri gruplandırıldı. Temelde 4 seviyeden oluşan gruplandırma, analiz metotuna göre doğrusal ve doğrusal olmama durumu için, mekanik özelliklere göre ortotropik ve izotropik model kullanılarak oluşturuldu. Ortotropik bir malzeme modelinin yapılan karşılaştırma sonucunda izotropik modellemeye kıyasla daha sağlam ve doğru sonuçlar verdiği görülmüştür.

Kulkarni ve diğerleri (2012), yaptıkları çalışmada ANSYS ve Moldflow ticari kodlarını kullanarak lif takviyeli kare plaka kompozit üzerinde yapısal analiz ve enjeksiyon analizi gerçekleştirdiler. Yapılan analizler neticesinde elde ettikleri nihai ortotropik malzeme verilerini dahil ettikleri yapısal analizlerde, isotropik malzeme verilerini kullanarak yaptıkları analizlere kıyasla deneysel sonuçlara yaklaşık %92 oranında daha yakın olduğu sonucuna vardılar.

Ramorino, Cecchel ve Cornacchia yaptıkları çalışmada (2020), %35 kısa lif takviyeli poliftalamid (PPA) malzeme kullanarak manifold bloğunun enjeksiyon simülasyonları neticesinde elde ettikleri lif oryantasyon ve artık gerilmeleri ABAQUS yazılımına aktararak yapısal analiz gerçekleştirdiler.

Elde edilen ortotropik malzeme kullanılarak yapılan analizler, deneysel verilerle uyumlu olduğu sonucuna vardılar. Aynı zamanda genelde pirinç malzeme kullanılarak üretilen manifold bloklarında çalışmada kullanılan malzemenin kullanılmasıyla yaklaşık %60 oranında ağırlıkta azalma ve yaklaşık %65 maliyet kazancı sağlandı.

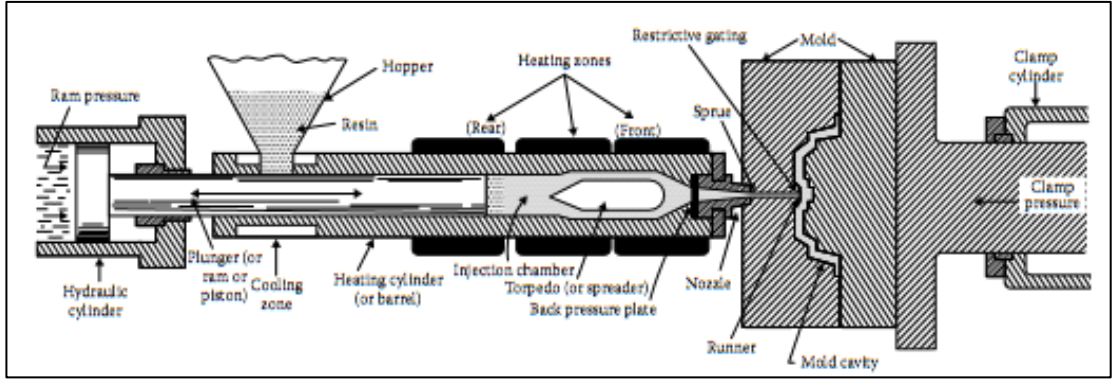
Gustavsson ve diğerleri (2021) yaptıkları çalışmada, lif oryantasyon sonuçlarını Envyo ile LS-DYNA arayüzüne aktararak yapısal analiz gerçekleştirdi. Aynı model ve malzeme kartına atanan farklı lif oryantasyon verileri ile anizotropik temsil gerçekleştirildi. Ayrıca LS-OPT kullanılarak deneysel veriler kullanılarak kalibre edilen bir malzeme modeli kullanıldı.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Enjeksiyon Kalıplama Süreci

Araştırma konusunun temelini oluşturan enjeksiyon kalıplama işleminden detaylı olarak bahsetmek gerekir (Rodriguez ve diğerleri,2015).

Enjeksiyon kalıplama, işlemin her adımını aynı aparatın ayrı bir bölgesinde döngüsel olarak gerçekleştirmektedir. Kalıp boşluğu iki çelik parçadan (en az) oluşmaktadır: bunlardan biri hareketlidir, kalıplama döngüsünün farklı kısımları sırasında açılıp kapanabilir. Tüm kalıp, genellikle kalıba açılan kanallar boyunca dolaşan su kullanılarak T_g (camsı geçiş sıcaklığı) veya T_m 'nin(erime sıcaklığı) altındaki sıcaklıklarda soğutulur. Enjeksiyon ünitesinin memesinden gelen polimer eriyiği, asıl parça boşluğuna girmeden önce yolluk, yolluk sistemi ve kapıdan akar. Bir piston (aynı zamanda koç olarak da adlandırılır), piston geri çekildiğinde hazneden barele düşen topakları (Şekil 3.1) ısıtılmış bir bölgeye iter.



Şekil 3.1. Enjeksiyon kalıplama makinesi şematik kesiti (Rodriguez ve ark. 2015)

Yeni malzeme tarafından yer değiştiren erimiş polimer, memeden ve yolluk burcundan ileriye doğru itilir, yolluktan aşağı doğru itilir ve geçidi geçerek soğutulmuş bir boşluğa geçer. Termoplastik, kalıp açılmadan ve parça çıkarılmadan önce T_m veya T_g 'nin altındaki basınç altında soğutulmalıdır. Piston geri çekilir, yeni topaklar düşer, kalıp sıkıştırılır ve tüm döngü tekrarlanır. Bazı makinelerde 8.000–40.000 psi (55–275 MPa)'lık kalıp basınçları ve 15 s'ye kadar düşük döngüler elde edilir.

Piston tipi makineler doğası gereği basit olmasına rağmen, sınırlı ısıtma hızları sebebiyle popülerliği azalmıştır, bu nedenle bugün Amerika Birleşik Devletleri'nde kullanılan makinelerin çoğu pistonlu vidalı tiptedir.

Bir pistonlu vidalı enjeksiyon kalıplama makinesinde çevrimin adımları aşağıdakilerden oluşur:

1. Kalıp kapatılır ve enjeksiyon sırasında kalıbı kapalı tutmak için kelepçe basıncı uygulanır.
2. Vida bir piston görevi görür ve erimiş polimer boşluğa akar (doldurma aşaması).
3. Boşluk dolduğunda, soğutmanın neden olduğu büzülme (ütüleme aşaması) telafi etmek için boşluğa daha fazla malzeme eklemek amacıyla erimiş plastik üzerindeki basınç artırılır.
4. Boşluk, polimeri Tg veya Tm'nin (soğutma aşaması) altına getirmek için soğutulur.
5. Soğutma aşamasında vida, bir sonraki parça için daha fazla malzemeyi eritmek amacıyla dönmeye başlar.
6. Parça soğuduktan sonra kalıp açılır ve parça çıkarılır.
7. Kalıp kapanır ve döngü tekrarlanır.

Döngünün bu bölümünde (5.adım) vida önemlidir, çünkü duvarlardaki ısı transferini artırır ve ayrıca adyabatik bir sistemde mekanik enerjiyi ısıya dönüştürerek önemli ölçüde ısıtma yapar. Vidalı makinenin bir diğer avantajı da karıştırma ve homojenleştirme özelliğidir. Doldurma aşamasında, polimer eriyiği yolluk, yolluk sistemi ve parça boşluğuna girdikçe duvarlarla sürtünme nedeniyle daha fazla dirençle karşılaşmaktadır. Enjeksiyonla kalıplanmış parçaların çoğu incedir ve oldukça büyük olabilir ve bu nedenle doldurulmalarını sağlamak için çok büyük basınçlar gerektirir.

3.2. Enjeksiyon Kalıplama Simülasyonları

Tam kalıp doldurma bilgisayar simülasyonları, boşlukta ilerleyen eriyik cephesinin konumu ve şekli de dahil olmak üzere akış bölgesi boyunca hız ve sıcaklık profillerinin hesaplamalarını gerektirir. Tüm problem, basit kalıplar için bile çok karmaşıktır. Problem, kalıptaki her farklı akış bölgesini temsil eden daha küçük izole problemlere bölünmüş ve çözümler bir araya getirilmiştir. Bu bölgelerin her biri, bu kısımdaki açıklamaların kapsamı dışında kalan farklı yaklaşımlar ve simülasyon araçları gerektirir.

Yine de bu yaklaşımların temeli, basit geometrilerdeki boşlukların tek boyutlu akışla doldurulması durumu için aşağıda gösterilmiştir. Son 30 yılda, bu simülasyonlar tarafından çok fazla bilgi ve öngörü sağlandı. Enjeksiyon kalıplama için bilgisayar simülasyon paketleri artık ticari olarak mevcuttur ve enjeksiyon kalıplama sanatını bilime dayalı bir sürece dönüştürmüştür. Kalıp doldurma analizi aşağıdaki üç bölgeye ayrılmıştır:

1. Tam gelişmiş bölge:

Doldurma işleminin çoğunluğu, neredeyse tamamen gelişmiş bir şekilde soğuk duvarlar arasında dar bir boşluk konfigürasyonunda eriyiğin akışını içerir. Merkez kapılı dairesel bir diskin (örneğin, kompakt disk) doldurulmasını veya uç kapılı bir dikdörtgen-açısal şeridin (örneğin, cetvel) doldurulmasının simülasyonu yapılırsa, uygun hareket denklemlerini ve enerjinin korunumu denklemini kullanılır.

Doldurma sırasında soğutma, boşlukta akışı etkileyen donmuş bir tabaka oluşturur. Bu katman, kalıplanmış parçanın farklı bölümlerinde farklı bir moleküler ve lif (kısa lif dolgulu polimer durumunda) oryantasyonu oluşturur. Bu nedenle, enerji denklemleri ve momentum denklemleri (akış denklemleri) her zaman birleştirilir ve aynı anda çözümlenmelidir. Sonlu elemanlar ve sonlu farklar yöntemleri, ilk kez Hieber ve Shen'in çalışmasında uygun başlangıç ve sınır koşulları ile kullanıldı (1980). Bu denklemleri zamanın bir fonksiyonu olarak çözmek ve lokal basınç, sıcaklık ve eriyik cephesinin ilerlemesini tahmin etmek için kullanıldı.

2. Akış ön bölgesi:

Bu bölgenin deri oluşumunda yönelme ve gerilmeler gibi yüzey özelliklerinde önemli bir rol oynadığı ortaya çıkmaktadır. Bu bölgedeki akış hem kesme hem de uzama akışını içerdiğinden daha karmaşıktır.

3. Kapı bölgesi:

Bu bölgedeki akışın yüksek kesme ve genellikle güçlü uzama bileşeni nedeniyle, polimerin viskoelastik etkileri önemlidir ve doldurma işleminin genel simülasyonunun tahminleri için dikkate alınması gerekir.

Kalıp doldurulduktan sonra, daha fazla serbest yüzey akışı olmaz, ancak eriyik soğutmanın neden olduğu büzülmeyle telafi etmek için boşluğa girmeye devam eder. Makinenin kontrolü tipik olarak sabit bir Q'dan sabit bir P'ye kayar.

Yoğunluktaki değişiklik, ütüleme sırasında meydana gelen başlıca olgu olduğundan, doldurma aşaması simülasyonu için yeterli olan sıkıştırılmazlık varsayımı artık kabul edilemez. Polimer yoğunluğunun sıcaklık ve basınca bağımlılığı gereklidir (Ooswald,1998 ve Wang,1991). Bu nedenle bu fazın analizi, doldurma aşamasında kullanılan momentum (akış) denklemleri ve enerji denklemi (sıcaklık) ile kütle korunumunu (sıkıştırılabilir sıvılar için süreklilik denklemi) de içerecektir. Geçit donduğunda, boşluk ekstrüderin uygulanan basıncından ayrılır, boşluk içindeki basınç düşer ve parçanın son soğuması gerçekleşir. Bu, parçanın çıkarılmasından önceki sürecin son adımıdır. Polimer soğutmanın ana etkisi, gerilme gevşemesini geciktirmesi ve katılaşmadan sonra gerilmelerin bir kısmının donmuş halde kalmasıdır. Bu gerilmeler genellikle büzülme ve eğilme sorunları yaratır. Bu gerilmeleri tahmin etmek için viskoelastik bir yapısal modele ihtiyaç vardır. Bilgisayar simülasyonları, kristalleşemeyen polimerler için bu açıdan oldukça fayda sağlamıştır (Liu ve diğerleri,2014).

Enjeksiyonlu kalıplamanın doldurma ve ütüleme bilgisayar simülasyonu, esas olarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) ve sayısal ısı transferinin (NHT) uygulanmasıyla ilgilidir. Genellikle, polimer sürecini temsil eden bir model, analitik çözümleri olmayan bir cebirsel denklem, bir dizi doğrusal olmayan kısmi diferansiyel denklem ve/veya integral denklemi biçimindedir.

Sayısal analiz, bu matematiksel problemlere faydalı çözümler elde etmek için yöntemler sağlar.

Bu tür yöntemler, sorunu yorumlamak ve anlamak için kullanılabilir, soruna yaklaşık ancak tatmin edici bir çözüm verecektir. Geçtiğimiz yıllarda, yüksek hızlı dijital bilgisayarların evrimi sayesinde, sayısal simülasyon, akışkanlar mekaniği, ısı transferi, taşıma olayları ve tabii ki polimer reolojisi ve işleme bilimleri ile birlikte gelişti (Zhon ve diğerleri,2013).

Sonlu farklar yöntemi (FDM), on sekizinci yüzyılda Euler tarafından ortaya atılan kısmi diferansiyel denklemlerin sayısal çözümü için en eski sayısal yöntemdir (Ferziger ve Peric,2002). Aynı zamanda basit geometri için akış ve ısı transferi problemleri için en kolay yöntemdir.

Bu yöntemde sürekli alan, düğüm adı verilen çok sayıda ayrık nokta tarafından oluşturulan bir sonlu fark ağ örgü kafesi ile değiştirilir; kafes düğümlerinde tanımlanan ayrık değişkenlerin fonksiyonları, sürekli çözüm alanlarında sürekli değişkenlerin fonksiyonlarına yaklaşmak için kullanılır; ve fark bölümü ve integral toplamı, sırasıyla orijinal denklemlerde ve belirli koşullarda türetme ve integrali yaklaşık olarak hesaplamak için kullanılır; sonuç olarak, mevcut ve komşu düğümlerde bilinmeyen bir değişkenle her düğümde cebirsel bir denklem kurulur. FDM basit ve verimlidir. Bununla birlikte, ayrık denklemlerin korunum özelliğini sağlamak zordur. Enjeksiyon kalıplama parçaları genellikle karmaşık geometriye sahip olduğundan, FDM genellikle tek başına değil, diğer yöntemlerle birlikte kullanılır. Sonlu hacimler yöntemi (FVM) , sürekli etki alanını değiştirmek için sayısal ayrık noktalarla (yani düğümler) ağ alır ve kontrol hacmini bir düğümün etrafındaki bir alan olarak tanımlar. Bu yöntem, koruma denklemlerini doğrudan yönetmeyi hedefler ve başlangıç noktası olarak kontrol hacimlerindeki denklemleri entegre eder. FDM ile karşılaştırıldığında, FVM, yapılandırılmamış ağa uygulandığı için bölge alanına oldukça uyarlanabilir. FVM, ünlü CFD yazılımı tarafından kullanılan en yaygın sayısal yöntemdir. Sonlu elemanlar yöntemi (FEM), birçok yönden FVM'ye benzer. Sürekli bir alanı, genellikle elemanlar (iki boyutlu alanda üçgen elemanlar veya dörtgen elemanlar, üç boyutlu alanda dörtyüzlü elemanlar veya altı yüzlü elemanlar) olarak adlandırılan bir dizi ayrık alt alana ayırır. Her eleman için, FEM'in eleman düğümlerinin bilinmeyen değişkenlerinin değeri ile temsil edilen bir şekil fonksiyonu seçmesi (en basit şekil fonksiyonu doğrusal fonksiyondur) ve denklemleri entegre etmeden önce şekil fonksiyonunu ana denklemlerde ikame etmesi gerekir.

Ana denklemler, denklemlerin integrali alındıktan sonra ve tüm etki alanındaki ana denklemlerin ağırlıklı ortalama marjı sıfır olduğunda bir ağırlık fonksiyonu ile çarpılır. Böylece, geniş alan düğümlerinde bilinmeyen değişkenli bir cebirsel denklem sistemi oluşturulur. Düzensiz bir bölgeye uyarlanabilirlik, eleman bölme esnekliğinden yararlanan FEM'in avantajıdır. Ancak, konveksiyon terimini ayırıklaştırmada ve sıkıştırılmaz Navier – Stokes denklemleri için ilkel değişken yöntemini çözmede FVM kadar gelişmiş değildir.

Ağsız yöntemin şekil işlevi, geleneksel FEM sonuçlarının hücrelere bağımlılığını etkili bir şekilde önleyen önceden oluşturulmuş ağ hücresine bağlı değildir. Ancak FEM ile karşılaştırıldığında, ağsız yöntemde global matris formu nispeten daha kötüdür, hesaplama verimliliği yüksek değildir, şekil fonksiyonunun hesaplanması zaman alıcıdır, sınır koşulları için bazı özel yaklaşımların kullanılması gerekir ve sayısal kararlılık problemlerinde sıkıntılıdır.

Genel olarak bahsedecek olursak, enjeksiyon kalıplama parçaları farklı karmaşık geometrilere sahiptir, bu nedenle genel bir çözüm yöntemi gereklidir. Mühendislik problemlerini çözmek için genel bir yöntem olarak FEM, özellikle bu tür problemlere çok uygundur. FEM, inşaat ve havacılık mühendisliğindeki karmaşık elastiklik ve yapısal analiz problemlerini çözmeye ihtiyacından kaynaklanmıştır. Gelişimi, 1941'de Alexander Hrennikoff'un ve 1942'de Richard Courant'ın çalışmalarına dayandırılabilir (Pelosi,2007). Hrennikoff'un çalışması, bir kafes analogisi kullanarak alanı ayrıklaştırırken, Courant'ın yaklaşımı, bir silindirin burulma probleminden kaynaklanan ikinci dereceden eliptik kısmı diferansiyel denklemlerin çözümü için alanı sonlu üçgen alt bölgelere ayırır. Courant'ın katkısı, Rayleigh, Ritz ve Galerkin tarafından geliştirilen kısmı diferansiyel denklemler için daha önceki sonuçların büyük bir kısmına dayanarak geliştirildi. Bilgisayar icat edildiğinde, genellikle sonlu elemanlar analizi (FEA) olarak bilinen pratik uygulaması başladı. İlk olarak 1956'da Turner, Clough ve diğerleri tarafından uçak yapılarının tasarımı için gerilme problemlerini sayısal olarak analiz etmek için geliştirilmiştir. 1960 yılında Clough, FEM adını ilk kez gündeme getirdi ve ardından inşaat mühendisliğinde kullandı.

Kısa bir süre sonra FEM'in çok çeşitli problemlere uygulanabileceği anlaşıldı. Katı mekaniği, akışkan akışı, ısı transferi gibi daha genel problemleri çözmek için uyarlandı. Polimer enjeksiyon kalıplama karmaşık bir işlemdir. Bu süreçte parça kalitesi, süreç koşulları, polimer özellikleri, kalıp yapısı vb. ile ilgilidir ve süreç ile parça kalitesi arasındaki ilişki basitçe kurulamaz. Ancak, geleneksel bir deneme-yanılma yöntemine dayalı olarak süreç koşullarını ve kalıp yapısını değiştirerek üretimdeki bir sorunu çözmek verimli değildir. Bu nedenle enjeksiyon kalıplama işlemi için bilimsel araçlara ihtiyaç duyuldu ve polimer enjeksiyon kalıplama prosesinin simülasyon yazılımı geliştirildi ve başarıyla uygulandı.

Bu yazılımla, enjeksiyon kalıplama işleminin bir taklidi sunulmaktadır ve tasarım aşamasında sorunlardan kaçınmak, bunları enjeksiyon kalıplama işleminin bilimsel simülasyonu temelinde üretimde düzeltmekten çok daha iyidir. Doldurma aşaması, enjeksiyon kalıplama döngüsünün ilk aşamasıdır. Doldurma aşaması, hareketli eriyik cephesi, Newton tipi olmayan sıvı akışı ve karmaşık enjeksiyon işleminde birleştirilmiş ısı transferi sorunları ile üç boyutlu bir geçici problemdir. Bu aşama, dizinin en karmaşık ve önemli aşamasıdır ve literatürde daha fazla ilgi görmüştür. 1950'lerden başlayarak, son 60 yılda enjeksiyon kalıplamanın dolgu simülasyonu üzerine pek çok araştırma yapıldı. Enjeksiyon kalıplama işleminin doldurma simülasyonu üç kategoride düzenlenebilir: tek boyutlu modeller, sözde 2.5D modeller ve tam üç boyutlu modeller. Aslında, enjeksiyon kalıplama ürünleri tek boyutlu modelleri uygulamak için çok karmaşıktır. Enjeksiyonla kalıplanmış parçaların en çok üç boyutlu, karmaşık geometrik konfigürasyonlara sahip olduğu ve polimer eriyiklerin reolojik tepkisinin genellikle Newton olmayan ve izotermal olmadığı düşünüldüğünde, tek boyutlu modeller gerçek durumun tatmin edici bir doldurma işleminin resmini verme yeteneğine sahip değildir. Kuşkusuz, üç boyutlu modeller pratik olarak daha değerli modeller olmalıdır. 1970'lerden başlayarak, son 40 yılda enjeksiyon kalıplamanın 3B doldurma davranışının simülasyonu için birçok araştırma yapıldı. Bilgisayarların kapasitesiyle sınırlanan katı modellerin erken aşamada yaygın olarak uygulanması zordur. Dolayısıyla uzlaşma sözde 2.5D modellerdir. 1B modellerin ardından, orta düzlem modelleri, yüzey modelleri ve katı modeller dahil olmak üzere üç sıralı model tanıtıldı.

Genel olarak, çoğu plastik ürün (%75'e kadar) ince kabuklu yapılara sahiptir. Yani, çoğu plastiğin kalınlığı düzlemsel yönlerin çok ötesindedir. Hele-Shaw yaklaşımına dayalı 2.5D modeller, ince bir boşlukta akış analizi için popüler ve etkili bir çözümdür.

Bir kalıp boşluğunun doldurulmasının orta düzlemde veya yüzeyde 2 boyutlu bir akış problemi olduğu varsayılır ve boşluklu sıcaklık alanı sonlu farklar yöntemi (FDM) ile hesaplanır. Bu yüzden onlara 2.5D modeller denir. Orta düzlem modeller ve yüzey modelleri iki tür 2.5D modeldir. Bununla birlikte, modern enjeksiyon kalıplı ürünlerin geliştirilmesinde geometrik yapı her geçen gün karmaşıklaşıyor. Ayrıca akan malzemenin lif içerip içermediğini de analiz edemezler.

Katı modeller olarak da bilinen tam üç boyutlu modeller, 2.5D modellerin eksik olduğu yerlere uyar. 2.5D modeller tarafından göz ardı edilen 3D fenomenin ayrıntılarını gösterebilirler. Minimum model sadeleştirilmesi ile daha gerçekçi bir simülasyon elde edilebilir. Yüksek performanslı bilgisayar ve paralel hesaplama tekniklerinin geliştirilmesi, tam 3B simülasyon uygulamasından yararlanır (Zhou ve diğerleri,2013). Enjeksiyon kalıplama simülasyon yazılımını gerçekleştirmek için genel adımlar aşağıdaki gibidir:

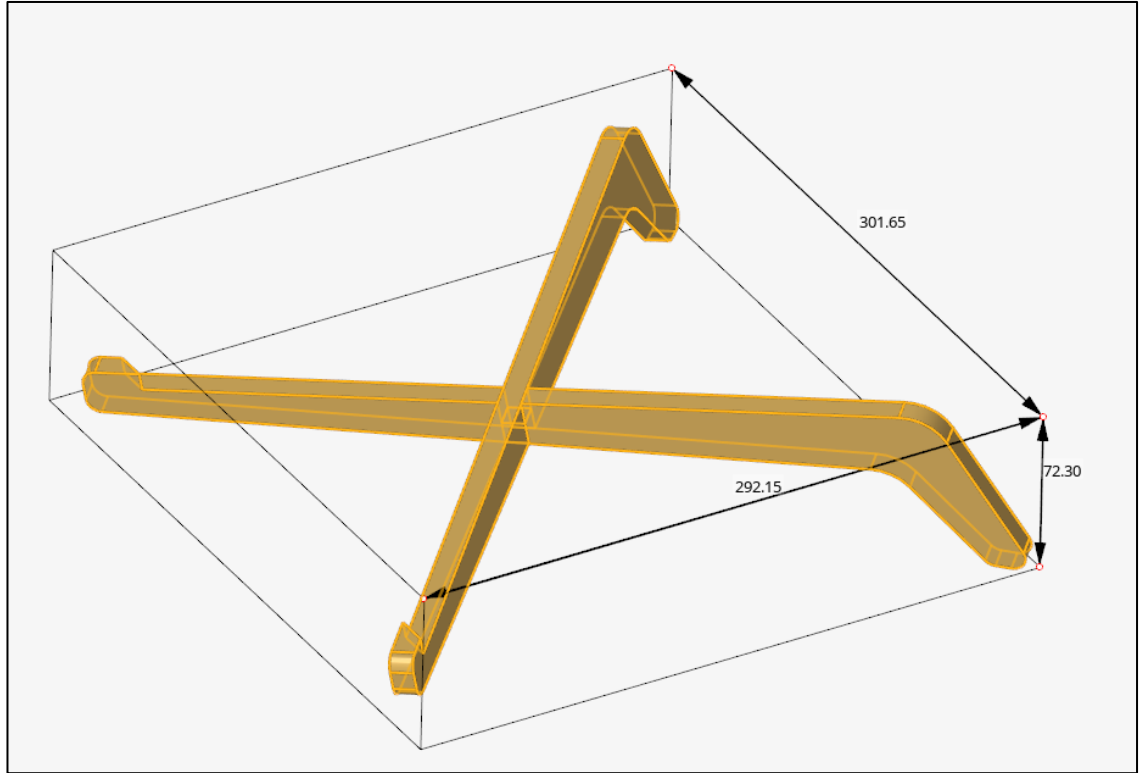
1. Geometri Modelleme: Parçanın geometrik modeli önce CAD yazılımında oluşturulur, simülasyon yazılımına aktarılır ve ardından simülasyon sürecinin talebine uyacak şekilde ağ yapısı oluşturulur. Simülasyon yazılımının kendisi de yolluk ve soğutma sistemleri gibi bazı basit modelleri oluşturmak için kullanılabilen bazı basit modelleme araçları sunar.
2. Polimer Malzeme Seçimi: Malzeme veri tabanı, malzeme özellikleri ile ilgili detaylı bilgileri içeren simülasyon yazılımının önemli bölümlerinden biridir. Bir simülasyon görevine başlarken, kullanıcı plastik veri tabanından uygun malzemeyi kolayca seçebilir. Simülasyon sistemlerinin çoğu, kullanıcıların özel bir malzeme veri tabanı oluşturması için bir düzenleme işlevi de sağlar.
3. Kalıplama İşlemi Koşullarının Belirlenmesi: Proses koşullarının ayarlanması, prosesle ilgili parametreler (doldurma, ütüleme, soğutma vb.) ve ekipmanla ilgili parametreler (kalıp, enjeksiyon kalıplama makinesi vb.) dahil olmak üzere, gerçek üretim prosesi ve üretim ekipmanının temsilidir. Bu koşullar, enjeksiyon kalıplama simülasyonunun analiz sonuçlarını doğrudan etkileyecektir.
4. Sayısal Çözümleme: Görevin temel ayarını tamamladıktan sonra, kullanıcı sayısal çözücüye çalıştırabilir. Bir dizi sonuç üretilecek (grafikler, metinler, animasyon vb.).

3.3. Lif Takviyeli Plastik Parçanın Yapısal Analizi

Çalışmada analizi yapılan parça aşağıda belirtilen ölçülerdeki dizüstü bilgisayar standıdır (Renovales,2020).



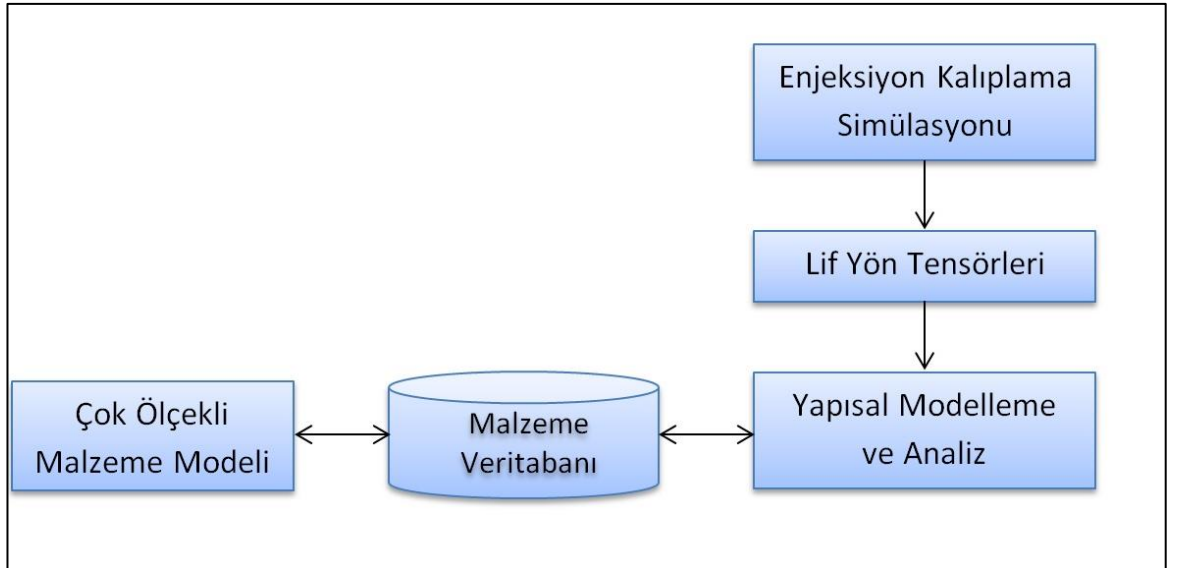
Şekil 3.2. Parçanın şekli ve konumu (Renovales 2020)



Şekil 3.3. Parçanın geometrik boyutları

Malzeme olarak, kullanılan yazılımların veri tabanından seçilen %30 cam elyaf katkıli poliamid (PA66+GF30) seçildi. Yapılan çalışma 3 aşamadan oluşmaktadır.

İlk aşamada lif oryantasyon tensör verilerinin elde edilmesi amacıyla plastik enjeksiyon simülasyonu gerçekleştirildi. Bu amaçla Altair® Inspire™ Mold yazılımı kullanıldı. İkinci aşamada çok ölçekli malzeme modeli oluşturmak için Altair® Multiscale Designer® kullanıldı. Son aşamada lif oryantasyon verileri, yapısal analizde kullanılan ağ yapısına Altair® HyperWorks® ara yüzünde Field komutu ile entegre edildi. Entegre edilen tensör verileri ile çok ölçekli malzeme verileri birleştirilerek nihai malzeme elde edildi. Altair® HyperWorks® ara yüzünde oluşan nihai malzeme modeli ile yapısal analiz gerçekleştirildi.

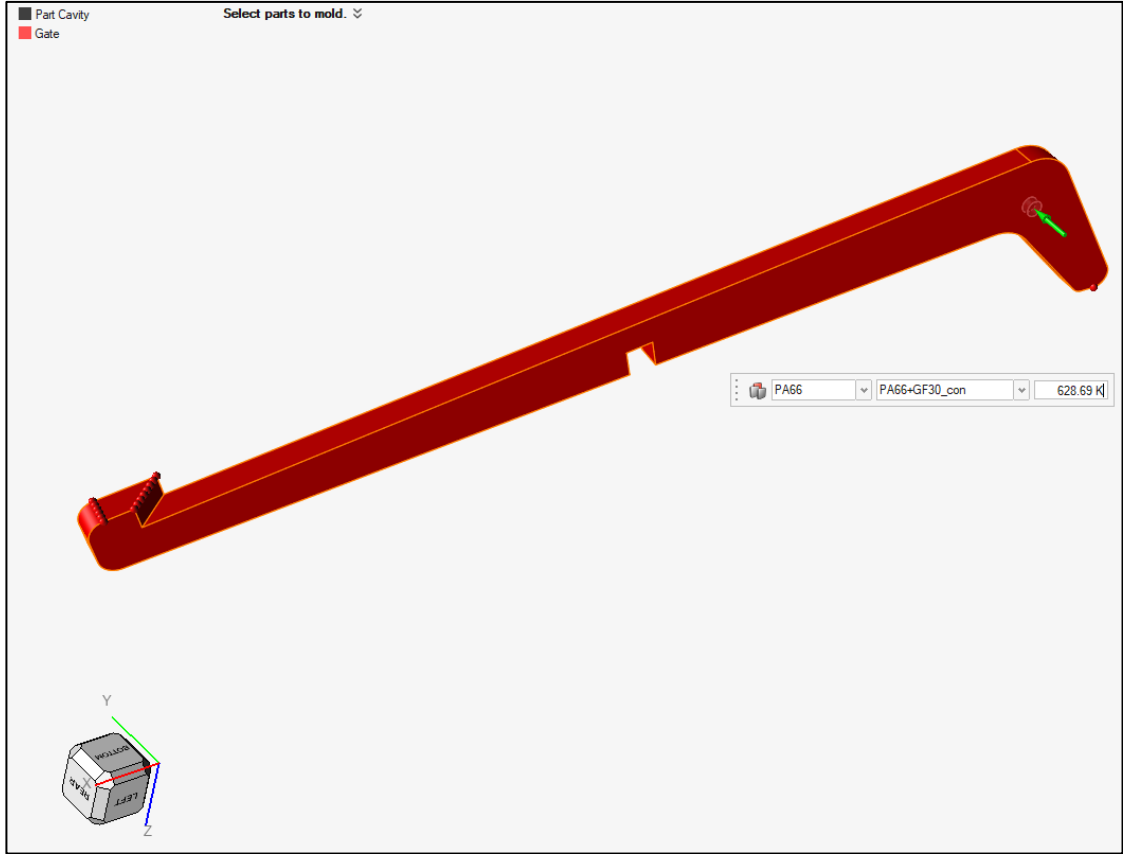


Şekil 3.4. Analiz iş akışı

3.3.1. Parçanın Plastik Enjeksiyon Kalıplama Simülasyonu

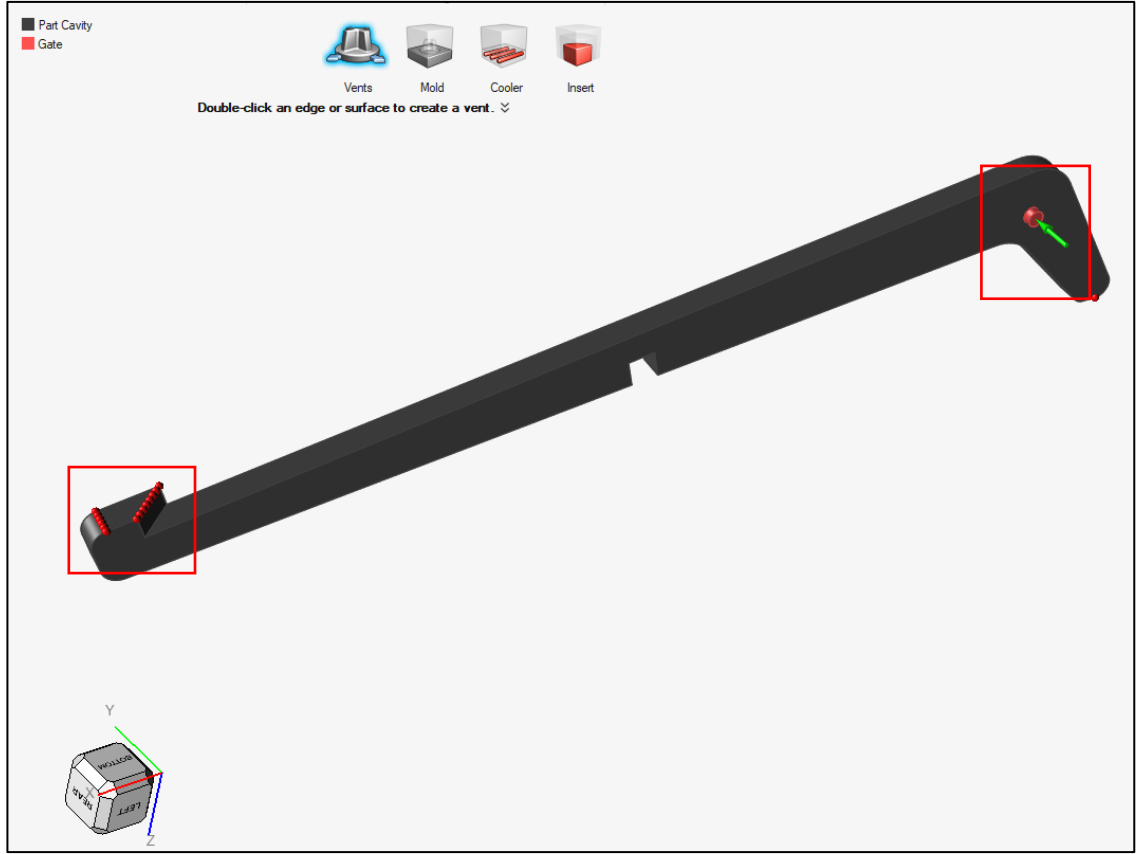
Parçanın enjeksiyon simülasyonu için gerekli tanımlamalar Altair® Inspire™ Mold ara yüzünde gerçekleştirildi. Malzeme olarak yazılımın kendi veri tabanında bulunan %30 cam elyaf katkıli poliamid (PA66+GF30) seçildi.

Sıcaklık değeri, seçilen malzemeye göre otomatik olarak belirlendi. Polimer eriyiğın giriş kapısı (Gate) olarak, aşağıda yeşil ok ile gösterilen lokasyon seçildi.



Şekil 3.5. Yazılım ara yüzünde malzeme ve giriş kapısının seçilmesi

Eriyik kalıp içerisinde ilerlerken, dolunun düzgün olması adına hava çıkış kısmı simülasyonda aşağıdaki araç (Vents) kullanılarak temsil edilir.



Şekil 3.6. Yazılım ara yüzünde hava çıkışlarının gösterilmesi

Plastik enjeksiyondaki işlem adımları (dolum, ütüleme ve soğutma) için proses parametreleri tanımlanır.

Process Parameters

Stages Machine

Filling

Filling time 1 s

V/P Switchover Point

Percentage filled volume 98.0 %

Percentage max machine pressure 90.0 %

Specified pressure 1000 MPa

Percentage max clamp force 90.0 %

Holding & packing pressure

Pressure percentage 90.0 %

Stop filling when:

Volume filled 100.0 %

Time 0 s

Packing

Pressure hold time 5 s

Max packing time 10 s

Cooling

Stop by:

Ejection temperature 350 K

End time 60 s

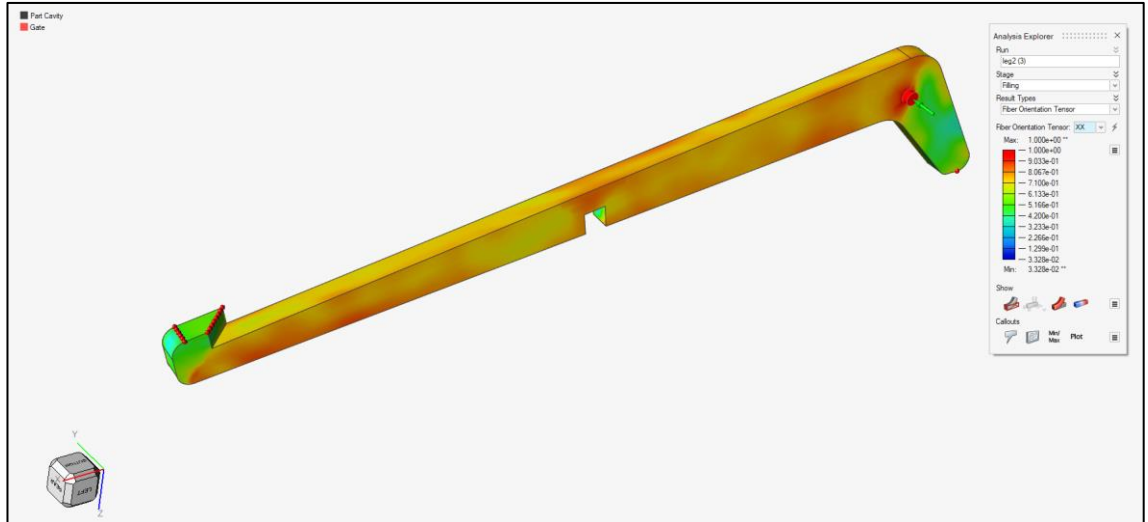
OK

Şekil 3.7. Enjeksiyon Proses Parametreleri

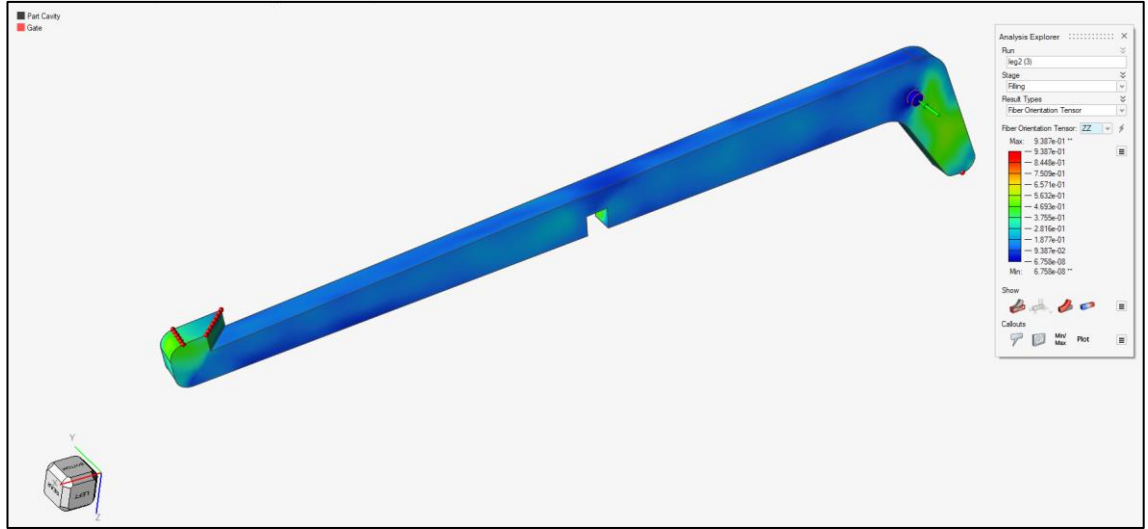
Analiz sonucunda, malzeme modellemesinde kullanılan lif oryantasyon verileri haricinde, dolum esnasındaki sıcaklık dağılımı, hava çıkışının tıkanıdığı veya olmadığı noktalar, ütüleme esnasındaki sıcaklık dağılımı, büzülmeden kaynaklanan yüzey çöküntüleri, soğutma esnasındaki sıcaklık dağılımı ve enjeksiyon sonrası parçadaki çekme miktarı sonuçları elde edildi.



Şekil 3.8. Lif oryantasyon verileri, YY yönünde



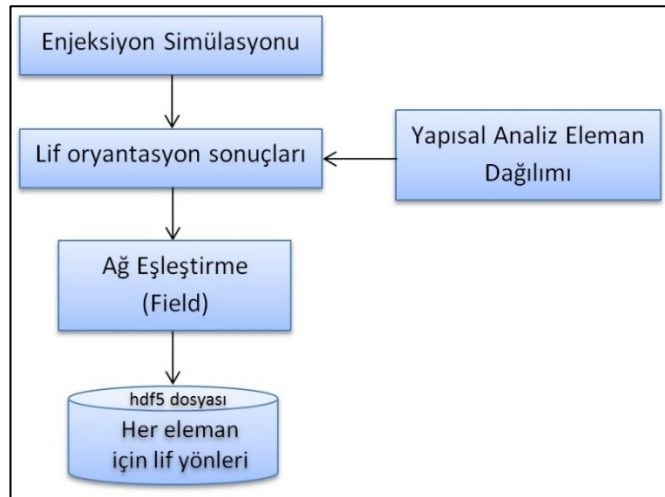
Şekil 3.9. Lif oryantasyon verileri, XX yönünde



Şekil 3.10. Lif oryantasyon verileri, ZZ yönünde

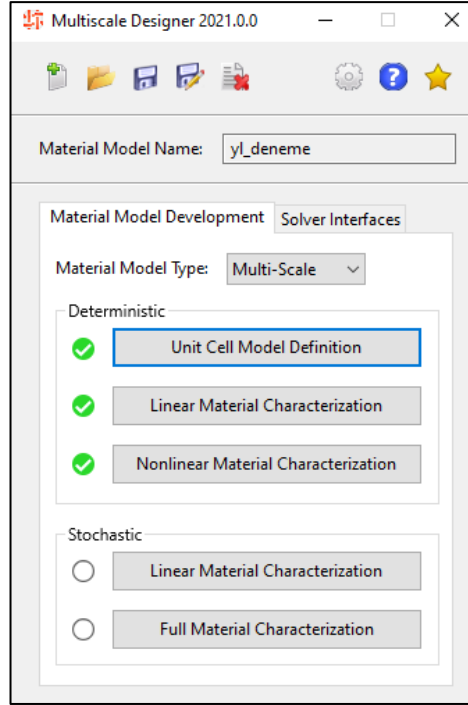
3.3.2. Çok Ölçekli Malzeme Modellenmesi

Plastik enjeksiyon simülasyonu sonucunda oluşan ağ yapısı ve lif oryantasyon verilerini içeren C2mRun_main.fem dosyası Altair® HyperWorks® ara yüzüne aktarıldı. Aynı ara yüzde yapısal analiz için kullanılan ağ yapısı da oluşturuldu. Yapısal analizde oluşan ağ yapısı ile enjeksiyon simülasyonunda oluşan ağ yapısı aynı olmadığı için Field aracı ile ağ yapıları eşleştirildi. Sonuç olarak h5 formatında yapısal analizde kullanılmak üzere oryantasyon verileri elde edildi. Proses adımları aşağıda gösterilmiştir.



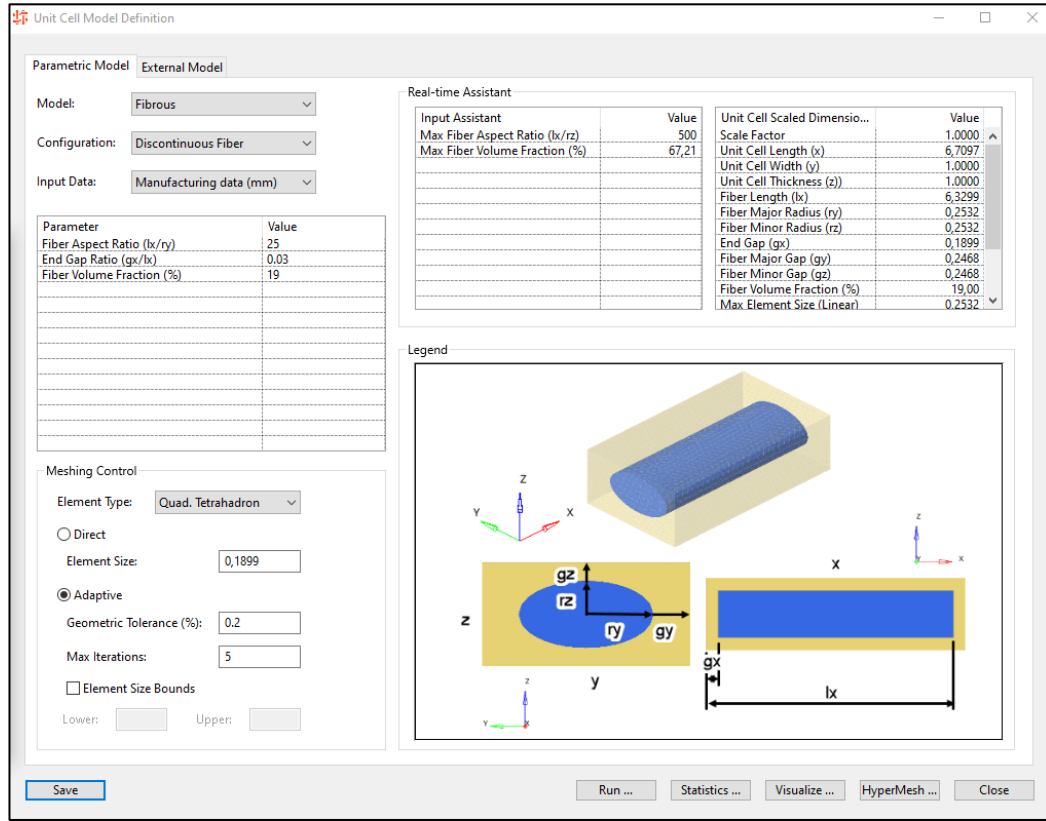
Şekil 3.11.Yapısal analize uygun oryantasyon verilerinin elde edilmesi

Altair® Multiscale Designer® ara yüzünde 3 adımda çok ölçekli malzeme tanımlaması gerçekleştirildi.



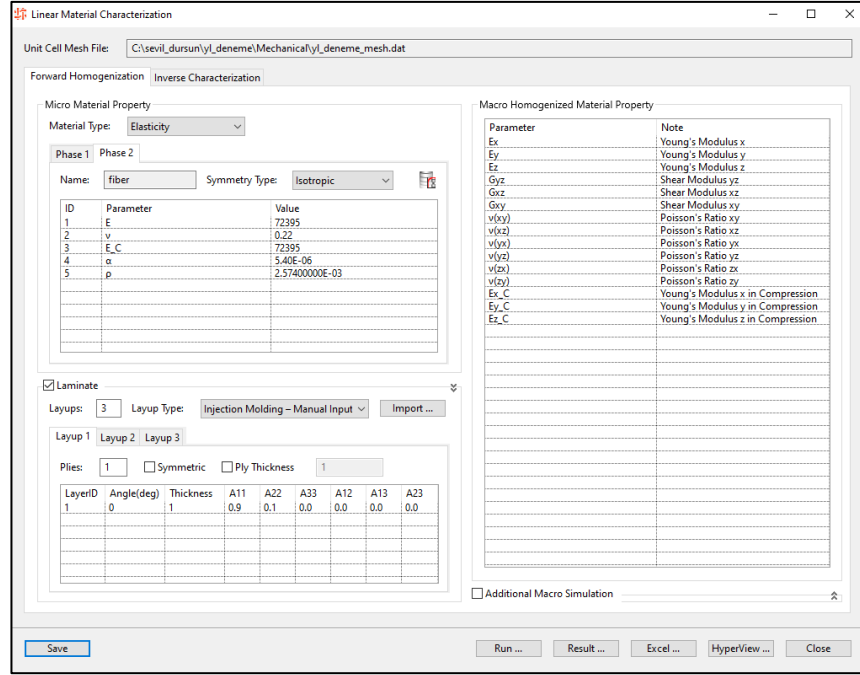
Şekil 3.12. Yazılım ara yüzünde tanımlanan işlem adımları

“Unit Cell Model Definition” kısmında, mikro seviyede malzeme geometrik boyutları tanımlandı.



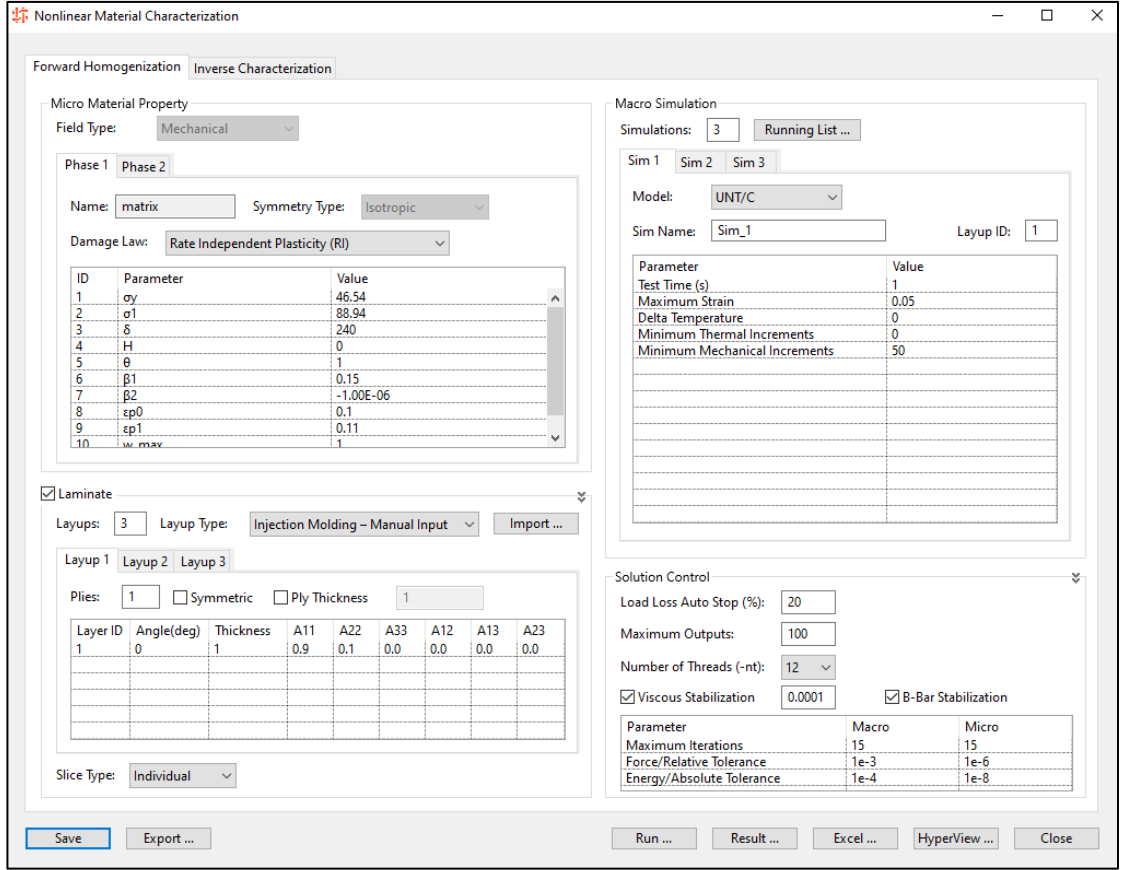
Şekil 3.13. Matris ve fiber (lif)’in mikro seviyede geometrik olarak tanımlanması

Linear malzeme karakterizasyonu aşamasında, çözücünün kendi veri tabanındaki matris ve fiber(lif) malzeme verileri seçildi ve homojen malzeme özellikleri elde edildi.

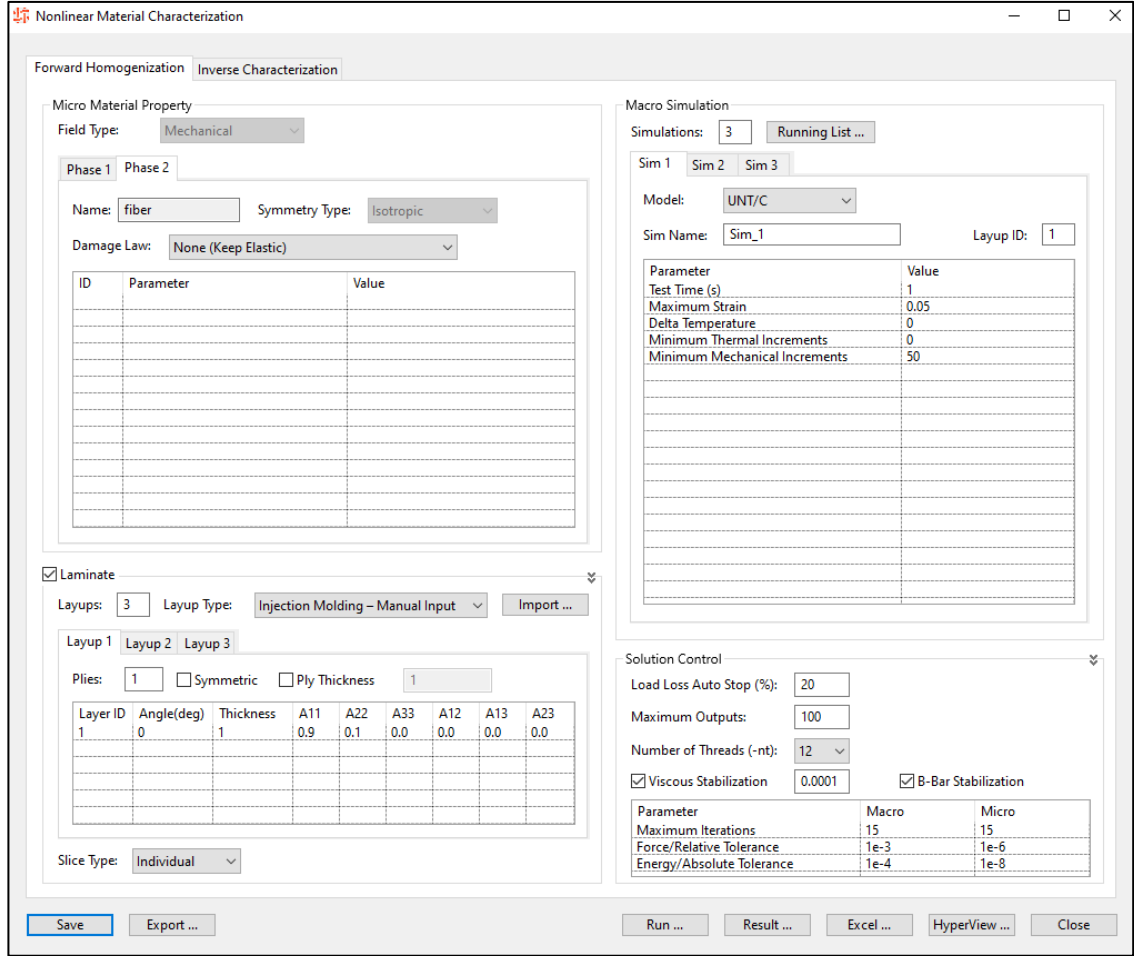


Şekil 3.14. Fiber (Lif) malzeme verilerinin seçilmesi (E cam elyaf)

Doğrusal olmayan malzeme karakterizasyonu aşamasında, oluşan laminat yapı %5 plastik birim şekil değiştirmeye(strain) maruz kalacak şekilde test edilerek gerilme-gerinme verileri elde edildi.

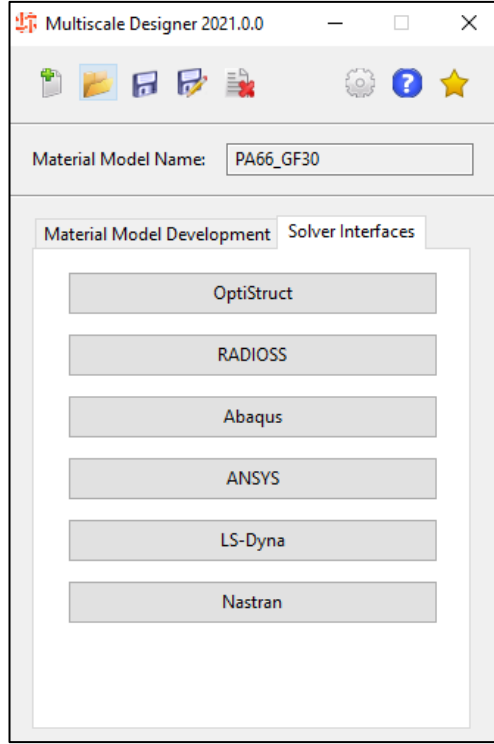


Şekil 3.15. Doğrusal olmayan malzeme özelliklerinin çekme testi sonucu elde edilmesi

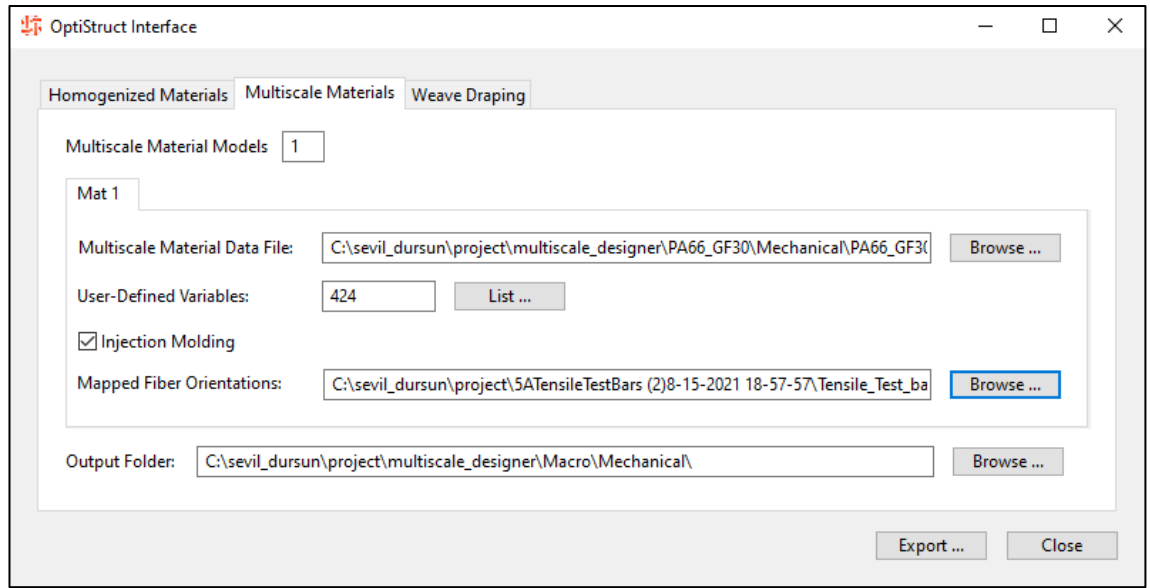


Şekil 3.16. Doğrusal olmayan malzeme özelliklerinin çekme testi sonucu elde edilmesi (E cam elyaf)

Oluşturulan malzeme modelinin davranışını doğru yansıtmak adına lif oryantasyon verileri, analizin gerçekleştirildiği çözücü (Altair® OptiStruct®) seçildi. Enjeksiyon kalıplama simülasyonundan elde edilen veriler, malzeme modeline dahil edilerek yapısal analizde kullanılacak olan nihai malzeme modeli elde edildi.



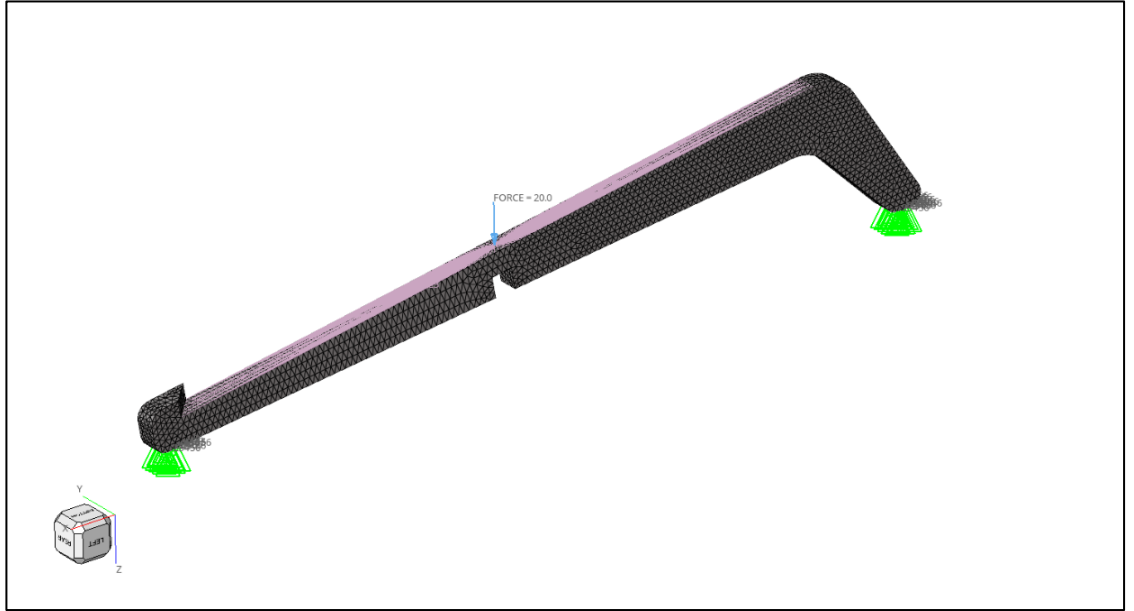
Şekil 3.17. Yazılım ara yüzünde, senkronize çalışılacak çözücünün seçimi



Şekil 3.18. Fiber (Lif) oryantasyon verilerinin malzeme modeline dahil edilmesi ile oluşturulan çok ölçekli malzeme modeli

3.3.3. Anizotropik Malzeme Modeli ile Yapısal Analiz Gerçekleştirilmesi

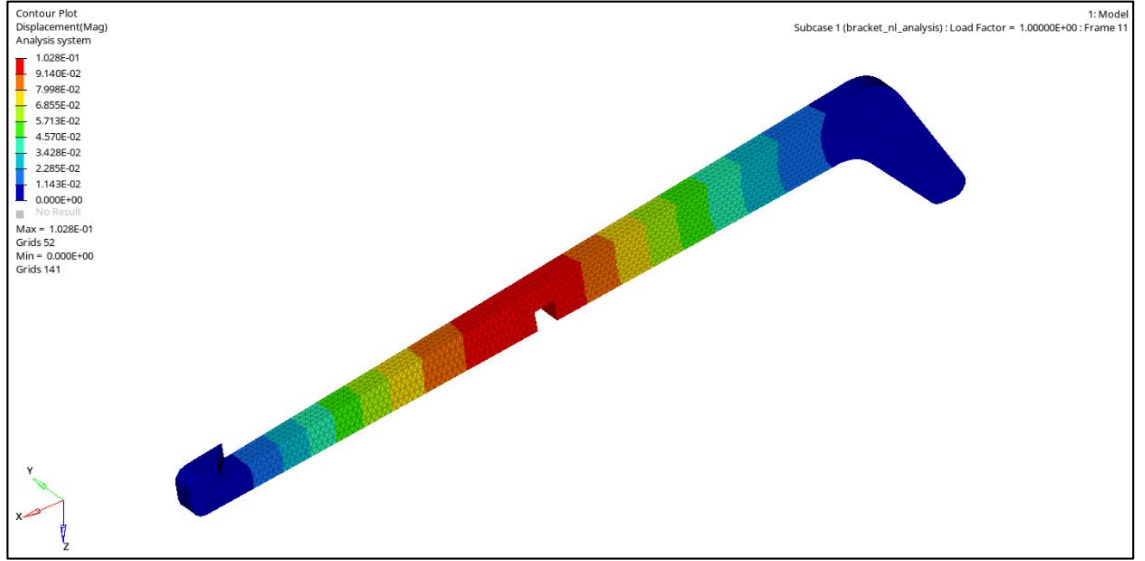
Altair® HyperWorks® ara yüzünde yapısal analiz için gerekli sınır koşulları ile doğrusal olmayan analiz gerçekleştirildi. Ortalama bir dizüstü bilgisayar ağırlığı referans alınarak 20 N büyüklüğünde belirli bir noktadan zorlanmış deplasman uygulandı. Parçanın iki noktadan zemine sabitlendiği kabul edildi (yeşil renk ile gösterilen kısımlardan). Elde edilen lif oryantasyon verileri oluşan nihai malzeme modeli, analizin gerçekleştiği ara yüze aktarıldı ve parçaya atandı. Karşılaştırma yapmak adına aynı sınır koşullar altında sadece PA66 malzeme verileri kullanılarak takviyesiz izotropik malzeme kabulü ile doğrusal olmayan analiz de gerçekleştirildi.



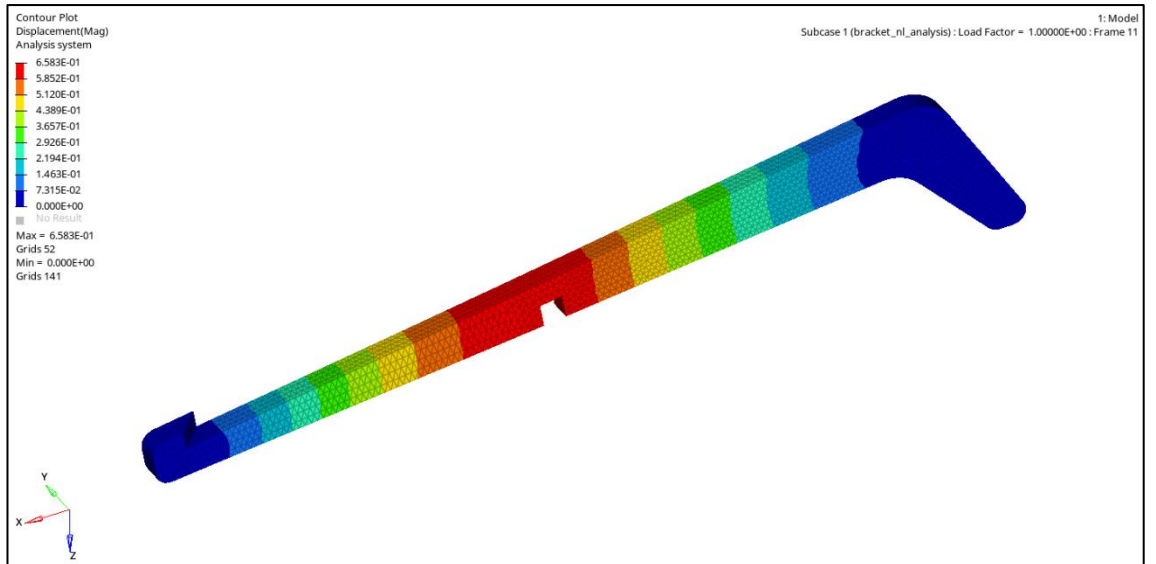
Şekil 3.19. Yapısal analiz için tanımlanan sınır koşulları ile parçanın gösterilmesi

4. BULGULAR

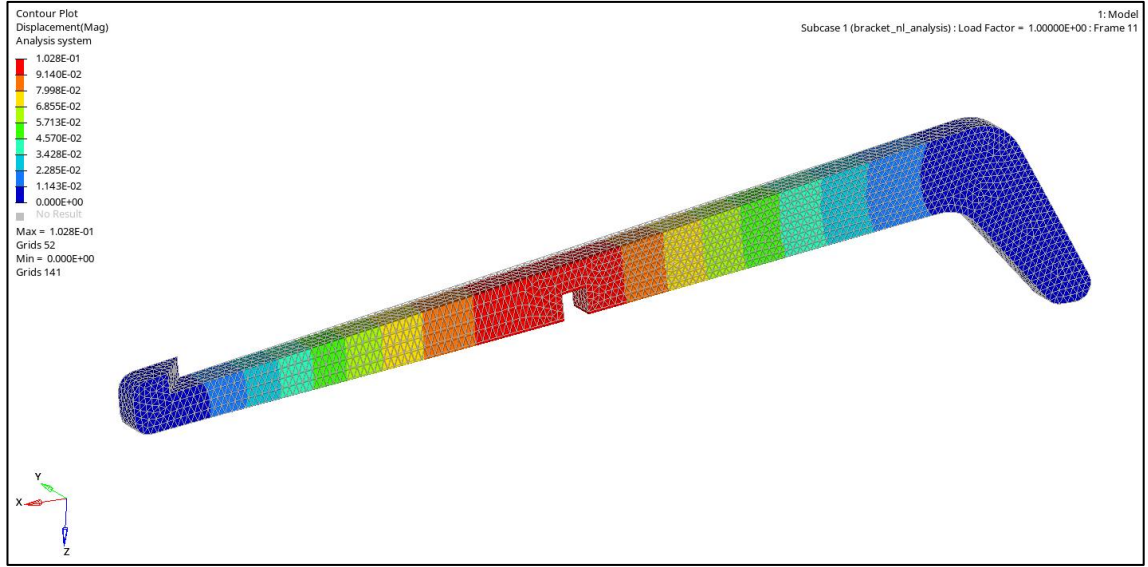
%30 cam elyaf katkılı Poliamid matrisli bilgisayar standının doğrusal olmayan analizi sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edildi. Ayrıca sadece izotropik kabul ile PA66 malzemesi kullanılarak elde edilen standın deplasman, gerilme ve gerilme miktarları da doğrusal olmayan analiz sonucunda elde edildi.



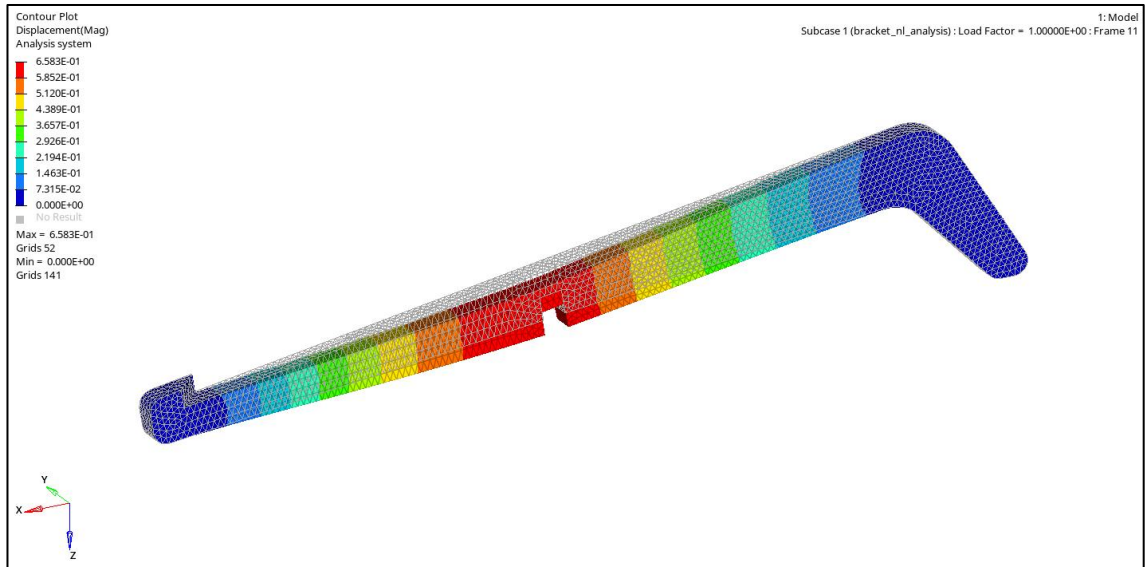
Şekil 4.1. PA66+GF30 Standın 20 N'lik yük altındaki yer değiştirme sonucu



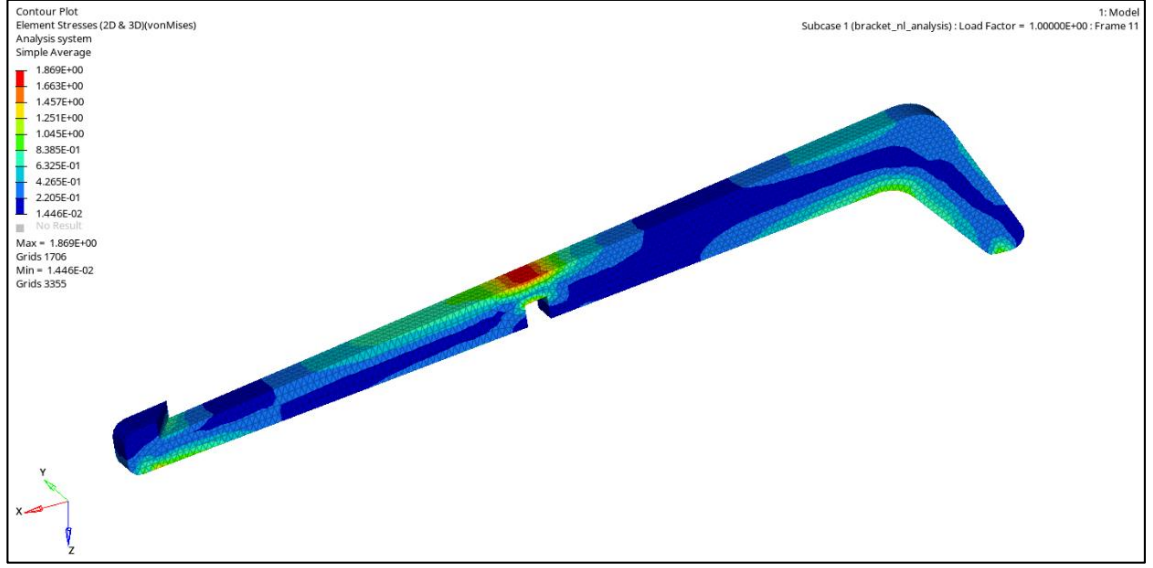
Şekil 4.2. PA66 Standın 20 N'lik yük altındaki yer değiştirme sonucu



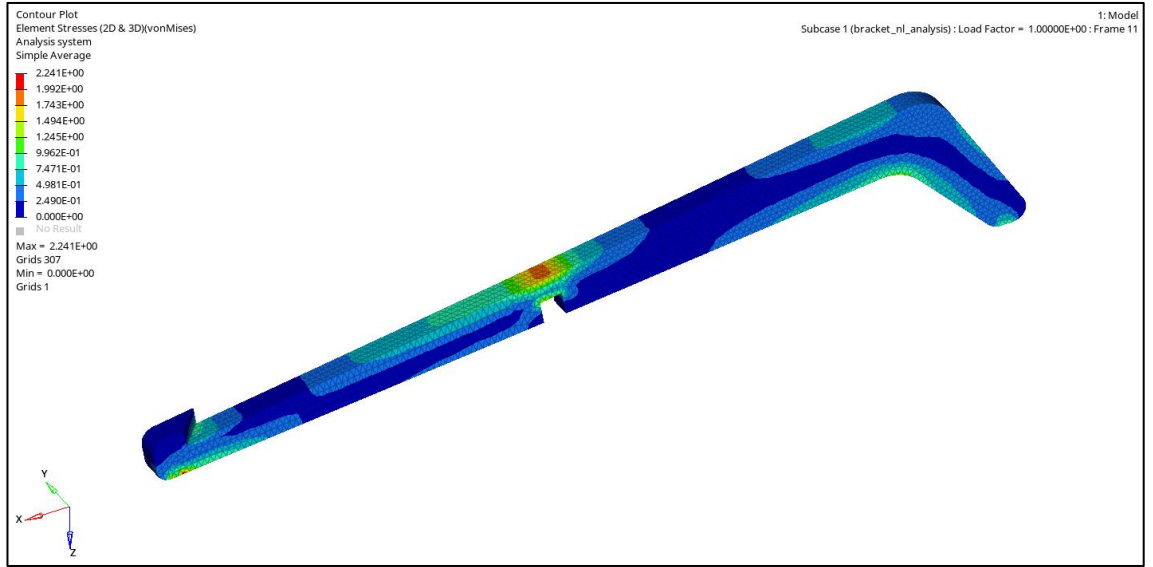
Şekil 4.3. PA66+GF30 Standın 20 N'lik yük altındaki yer değıştirme sonucu (Scale factor 10)



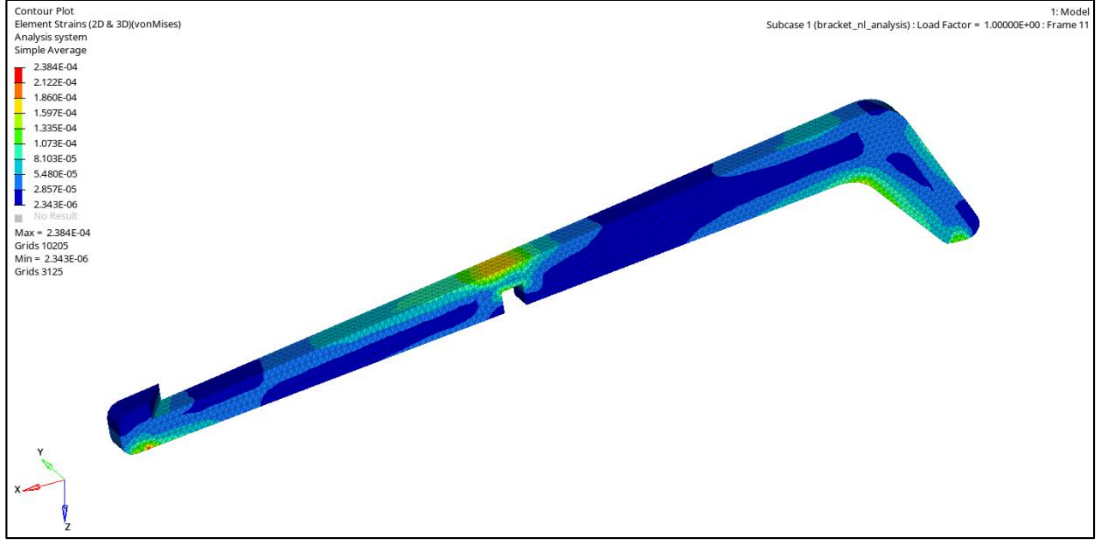
Şekil 4.4. PA66 Standın 20 N'lik yük altındaki yer değıştirme sonucu (Scale factor 10)



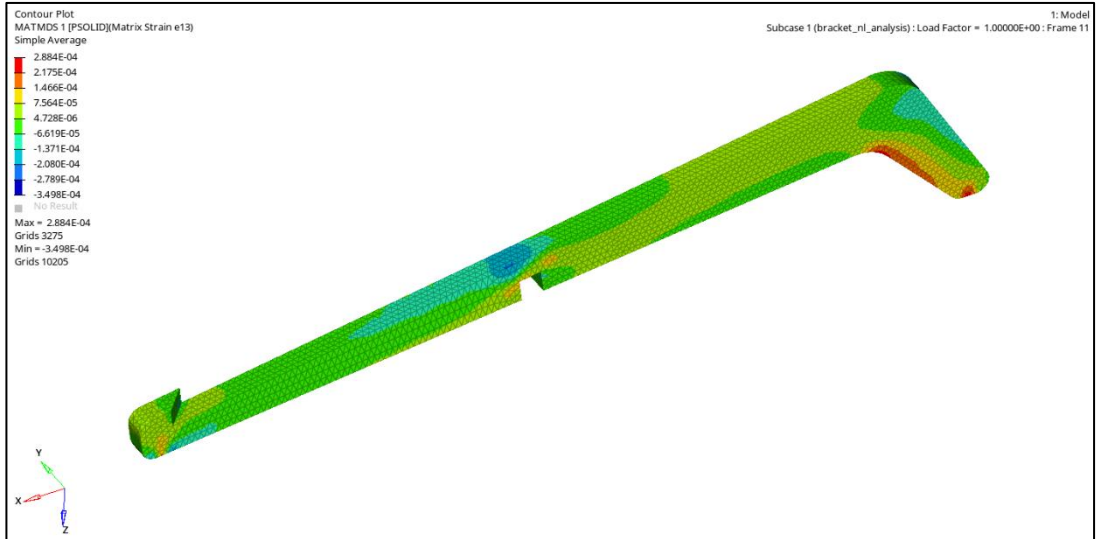
Şekil 4.5. PA66+GF30 Standın 20 N'lik yük altındaki gerilme sonucu



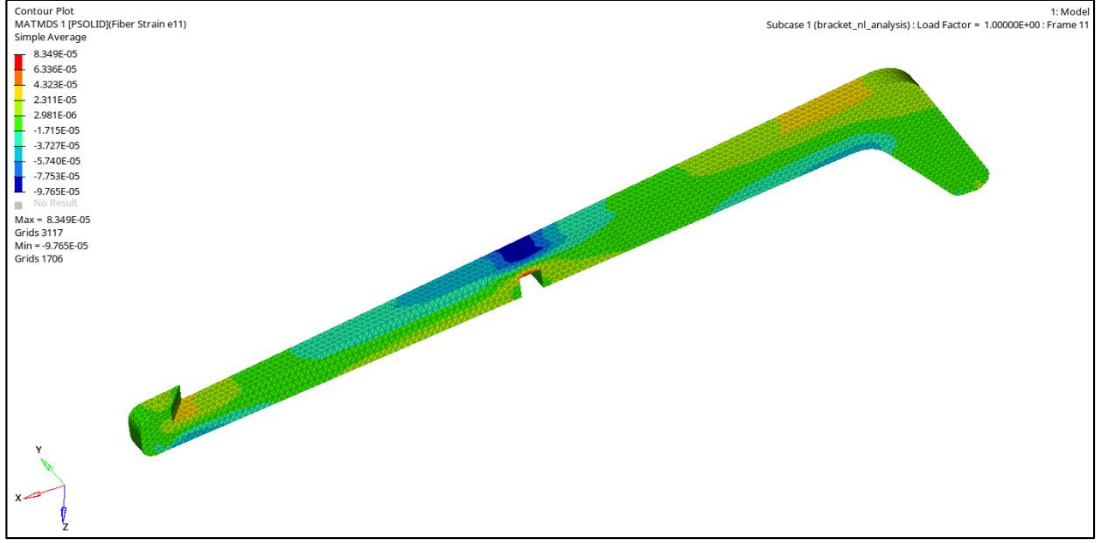
Şekil 4.6. PA66 Standın 20 N'lik yük altındaki gerilme sonucu



Şekil 4.7. PA66+GF30 Standın 20 N'lik yük altındaki gerinme sonucu



Şekil 4.8. PA66+GF30 Standın 20 N'lik yük altındaki gerinme sonucunun sadece matris fazı için sonucu



Şekil 4.9. PA66+GF30 Standın 20 N'lik yük altındaki gerinme sonucunun sadece fiber (lif) fazı için sonucu

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu tez çalışması kapsamında %30 cam elyaf takviyeli poliamid matrisli kompozit malzemeden elde edilen dizüstü bilgisayar standının yapısal analizi gerçekleştirildi. Aynı sınır koşullar altında izotropik malzeme kabulü ile sadece poliamid kullanılarak elde edilen standın da analizi gerçekleştirildi. Literatürde mevcut olan deneysel çalışmalarda lif katkısının yapının mukavemetini arttırdığı görülmüştür. Yapılan analiz sonucunda lif takviyesi ile yer değiştirme değerlerinde %16, gerilme değerlerinde ise %80 azalma görülmüştür. Literatürdeki çalışmalar, yapılan analiz verilerini destekleyici niteliktedir. Lif katkılı plastik malzemelerin doğru bir şekilde temsil edilmesi, analiz sonuçlarını oldukça etkilemektedir. Bu nedenle oryantasyon verilerinin de analize dahil edilerek malzeme modeli oluşturulması önerilmiştir. Literatürde bu konu ile alakalı çalışmalar oldukça kısıtlıdır. Çalışmada kullanılan yazılımlar ile hem enjeksiyon kısmında hem de çok ölçekli malzeme modellemesi yaparken parametreler değiştirilerek optimum düzeyde lif takviyeli malzemeler, sadece simülasyon ortamında oluşturulabilir. İşlem adımları, literatürdeki çalışmalara kıyasla oldukça pratiktir. Diğer geleneksel malzemelere kıyasla daha ucuz, hafif ve dayanıklı olan lif takviyeli kompozitlerin, özellikle liflerin doğrultusu ile ilişkili dayanımlarının bağlı olduğu etkilerin tespiti açısından önerilen bu yöntemin kullanılmasının, bu malzemelerin kullanımının yaygınlaşmasına neden olacağı öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

- Advani, S. G., & 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.
- Altan, M. C., Subbiah, S., Güçeri, S. I., & Pipes, R. B. (1990). *Numerical prediction of three-dimensional fiber orientation in Hele-Shaw flows*. Polymer Engineering & Science, 30(14), 848-859.
- Cardozo, D. (2008). *Three models of the 3D filling simulation for injection molding: a brief review*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 27(18), 1963-1974.
- Casson, N. (1959). *A flow equation for pigment-oil suspensions of the printing ink type*. Rheology of disperse systems.
- Chen, C. Y., & Tucker III, C. L. (1984). *Mechanical property predictions for short fiber/brittle matrix composites*. Journal of reinforced plastics and composites, 3(2), 120-129.
- Chung, S. T., & Kwon, T. H. (1995). *Numerical simulation of fiber orientation in injection molding of short-fiber-reinforced thermoplastics*. Polymer Engineering & Science, 35(7), 604-618.
- Dinh, S. M., & Armstrong, R. C. (1984). *A rheological equation of state for semiconcentrated fiber suspensions*. Journal of Rheology, 28(3), 207-227.
- Dussan, E.B. (1979). *On the spreading of liquids on solid surfaces:static and dynamic contact lines*. Annual Reviews of Fluid Mechanics.11(1): 371–400.
- Ehrhart,F. (2020, December 2 – 3). *Applying Multiscale Material Models to Macroscale Simulations* [Conference presentation]. Virtual ATCx Composites. Online event.
- Ferziger, J. H., Perić, M., & Street, R. L. (2002). *Computational methods for fluid dynamics* (Vol. 3, pp. 196-200). Berlin: springer.
- Fischer, JM. (2003). *Handbook of molded part shrinkage and warpage*.1st ed.Norwich:Plastics Design Library /William Andrew Inc.
- Folgar, F., & Tucker III, C. L. (1984). *Orientation behavior of fibers in concentrated suspensions*. Journal of reinforced plastics and composites, 3(2), 98-119.
- Foss, P. H. (2004). *Coupling of flow simulation and structural analysis for glass-filled thermoplastics*. Polymer composites, 25(4), 343-354.
- Fung, Y. C. (1977). *A first course in continuum mechanics*. Englewood Cliffs.
- Givler, R. C., Crochet, M. J., & Pipes, R. B. (1983). *Numerical prediction of fiber orientation in dilute suspensions*. Journal of composite materials, 17(4), 330-343.
- Guild, F. J., & Summerscales, J. (1993). *Microstructural image analysis applied to fibre composite materials: a review*. Composites, 24(5), 383-393.
- 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.
- Kardos, J. L., Piccarolo, S., & Halpin, J. C. (1978). *Strength of discontinuous reinforced composites: II. Isotropic crystalline polymers*. Polymer Engineering & Science, 18(6), 505-511.
- Herschel, W. H., & Bulkley, R. (1927). See Rudraiah, N. and Kaloni, PN 1990. *Flow of non-Newtonian fluids*. Encyclopaedia of Fluid Mechanics, 9.

- Hieber, C. A., & Shen, S. F. (1980). *A finite-element/finite-difference simulation of the injection-molding filling process*. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 7(1), 1-32.
- Hocking, L. M. (1976). *A moving fluid interface on a rough surface*. Journal of Fluid Mechanics, 76(4), 801-817.
- Huh, C., & Mason, S. G. (1977). *Effects of surface roughness on wetting (theoretical)*. Journal of colloid and interface science, 60(1), 11-38.
- Jansen, K. M. B., Van Dijk, D. J., & Keizer, K. P. (1998). *Warping of injection moulded plates and corner products*. International Polymer Processing, 13(4), 417-424.
- GB, J. (1922). *The motion of ellipsoidal particles in a viscous fluid*. Proc Roy Soc (London), Ser A-Containing Papers Mathematical Physical Character, 102, 161-179.
- Kikuchi, H. (1996). *Generalized Warpage*. Polyn. Eng. Sci.
- Kulkarni, A., Aswini, N., Dandekar, C.R. (2012). *Modeling of short fiber reinforced injection moulded composite*. International Conference on Structural Nano Composites (NANOSTRUC) 2, Book Series: IOP Conference Series-Materials Science and Engineering ,40, Article Number: 012025.
- Lenk, R.S. (1978). *Polymer Rheology*. London: Kluwer Academic Pub.
- Liu, F., Deng, L., & Zhou, H. (2013). *Residual Stress and Warpage Simulation*. Computer Modeling for Injection Molding: Simulation, Optimization, and Control, 157-193.
- Liu, I. S. (2013). *Continuum mechanics*. Springer Science & Business Media.
- McGrath, JJ., Wille, JM. (1995). *Determination of 3D fiber orientation distribution in thermoplastic injection molding*. Composites Science and Technology.
- Mlekusch, B. (1999). *The warpage of corners in the injection moulding of short-fibre-reinforced thermoplastics*. Composites science and technology, 59(12), 1923-1931.
- Mlekusch, B., Lehner, E. A., & Geymayer, W. (1999). *Fibre orientation in short-fibre-reinforced thermoplastics I. Contrast enhancement for image analysis*. Composites science and technology, 59(4), 543-545.
- Nassehi, V. (2002). *Practical aspects of finite element modelling of polymer processing*. Chichester: Wiley.
- Navier, C. L. M. H. (1823). *Mémoire sur les lois du mouvement des fluides*. Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de l'Institut de France, 6(1823), 389-440.
- Oldroyd, J. G. (1947, January). *A rational formulation of the equations of plastic flow for a Bingham solid*. In Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society (Vol. 43, No. 1, pp. 100-105). Cambridge University Press.
- Osswald, T. A. (1998). *Polymer processing fundamentals*. Hanser. Gardner Publications, Inc., Cincinnati, 1, 139.
- Pelosi, G. (2007). *The finite-element method, Part I: RL Courant [historical corner]*. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 49(2), 180-182.
- Ramorino, G., Cecchel, S., Cornacchia, G. (2020). *Effect of Fiber Orientation and Residual Stresses on the Structural Performance of Injection Molded Short-Fiber Reinforced components*, Adv.Syst. Sci. Appl.; 02;1-19.
- Renovales, D. (2020). *Minimal CNC Laptop Stand*, 26 Ekim 2021 tarihinde <https://grabcad.com/library/minimal-cnc-laptop-stand-1>- adresinden erişildi.
- Rodriguez, F., Cohen, C., Ober, C. K., & Archer, L. (2014). *Principles of polymer systems*. CRC Press.

- Kurkin, E. I., & 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.
- Shoemaker, J. (Ed.). (2006). *Moldflow design guide: a resource for plastics engineers* (Vol. 10). Hanser Verlag.
- Sikló, B., Cameron, K., & 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.
- Silliman, W. J., & Scriven, L. E. (1980). *Separating how near a static contact line: Slip at a wall and shape of a free surface*. *Journal of Computational Physics*, 34(3), 287-313.
- Wang, K. K. (1991). *Cornell Injection Molding Program Progress Report No. 16: Covering the Period from January 1990 Through December 1991*. College of Engineering, Cornell University.
- Zhou, H., Hu, Z., Zhang, Y., & Li, D. (2013). *Numerical Implementation for the Filling and Packing Simulation*. *Computer Modeling for Injection Molding: Simulation, Optimization, and Control*, Hubei, John Wiley & Sons, Inc, 71-128.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Sevil Dursun
Doğum Yeri ve Tarihi : Kazakistan / 22.01.1995
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu
Lise : Ali Karasu Anadolu Lisesi
Lisans : Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği
Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği/Konstrüksiyon ve İmalat A.B.D

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : Renault Groupe Ar-Ge Departmanı

İletişim (e-posta) : drsnsevil@gmail.com

Yayımları :