



**THE SYSTEMATICAL DESIGN OF PLASTIC SPIRAL EXTRUSION DIES
AND VALIDATION OF THE DESIGN METHODOLOGY BY CFD ANALYSES**

Oktay YILMAZ* , Gün GÖREN, Mümin BALABAN, Kadir KIRKKÖPRÜ

İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Gümüşsuyu-İSTANBUL

Received/Geliş: 14.01.2013 Revised/Düzelme: 26.02.2013 Accepted/Kabul: 30.04.2013

ABSTRACT

A spiral mandrel die fed by coat-hanger type distributors was designed systematically in the present study. At the first stage, the preliminary design of the distributor was completed by use of analytical approach. At the second stage, the performance of the preliminary distributor design was evaluated based on the analogy between fluid flow systems and electrical network systems. Computational Fluid Dynamics (CFD) Simulations were performed for the preliminary distributor design. With respect to the pressure drop and velocity distribution at the die exit, it is confirmed that there is a good agreement between the results of electrical network analogy and CFD analysis. At the third stage, the geometric parameters of the coat-hanger die were optimized with the aid of reverse engineering approach in electrical network analogy in order to obtain uniform velocity distribution at the distributor exit. A CFD analysis was carried out for the designed distributor.

The geometric parameters of the spiral mandrel die were optimized using an analytical approach from literature [13]. A CFD simulation was performed for the designed spiral mandrel die and it is shown that a quite uniform velocity distribution is obtained at the die exit. Aforementioned analytical approach showed a satisfying performance in terms of estimating pressure drop and obtaining balanced flow at the die exit.

Keywords: Polymer extrusion, coat-hanger die, spiral mandrel die, electrical network, CFD.

PACS number/numarası: 47.85.md.

SPIRAL PLASTİK EKSTRÜZYON KALIPLARININ SİSTEMATİK TASARIMI VE SAD YARDIMIYLA TASARIM METODOLOJİSİNİN DOĞRULANMASI

ÖZET

Bu çalışmada askı-tipi dağıtıcılarla beslenen spiral kanallı kalıp sistematik olarak tasarlanmıştır. İlk aşamada, dağıtıcının ön tasarımı analitik yöntemle tamamlanmıştır. İkinci aşamada, akış sistemlerinin elektrik-şebekesi sistemlerine benzeşiminden yararlanarak ön tasarımın performansı değerlendirilmiştir. Ön tasarım dağıtıcı geometrisi için Sayısal Akışkanlar Dinamiği (SAD) analizi gerçekleştirilmiştir. Basınç kaybı ve kalıp çıkışı hız dağılımı sonuçlarına göre elektrik-şebekesi benzeşimi ile SAD analizi sonuçları arasında uyumun iyi olduğu tespit edilmiştir. Üçüncü aşamada, elektrik-şebekesi benzeşimi yönteminde tersine mühendislik yaklaşımı kullanılarak askı-tipi dağıtıcının geometrik parametreleri, dağıtıcı çıkış kesitinde üniform hız dağılımı sağlamak üzere optimize edilmiştir. Tasarlanan dağıtıcı için SAD analizi gerçekleştirilmiştir. Dağıtıcı çıkışında üniform hız dağılımı elde edilmiştir. Literatürdeki bir analitik yaklaşım [13] kullanılarak spiral kanallı kalıbın geometrik parametreleri optimize edilmiştir. Tasarlanan spiral kanallı kalıbın SAD analizi gerçekleştirilmiş ve kalıp çıkışında üniform hız dağılımının elde edildiği görülmüştür. Yukarıda bahsi geçen analitik yöntem, basınç düşüşü tahmini ve kalıp çıkışında üniform hız dağılımı açısından tatmin edici performans göstermiştir.

Anahtar Sözcükler: Polimer ekstrüzyonu, askı-tipi kalıp, spiral kalıp, elektrik-şebekesi, SAD.

*Corresponding Author/Sorumlu Yazar: e-mail/e-ileti: yilmazo@itu.edu.tr, tel: (212) 293 13 00/2706

1. GİRİŞ

Plastik endüstrisinde spiral kalıplardan meydana gelen koekstrüzyon kalıpları; çok katmanlı boru, film ve levha gibi ürünlerin üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Spiral kanallı kalıpların geleneksel kalıp geometrilerine göre önemli avantajları vardır. Bunlardan bazıları; geniş proses koşullarında kullanılabilirlikleri, düşük basınç kaybına neden olmaları, üniform hız dağılımı sağlamaları, homojen sıcaklık dağılımı sağlamaları, az yer kaplamaları, montaj, sökülme ve temizleme kolaylığı sağlamaları, ürün içinde birleşme çizgilerine neden olmamaları şeklindedir [1].

Spiral kanallı kalıp tasarımında tespit edilmesi gereken boyutlar ve dağıtıcı çeşitleri ön plana çıkmaktadır. Bunlar: spiral kanal sayısı, spiral kanal genişliği, spiral kanal derinliği, silindirin koni açısı ve spirallerin helis açısı olarak sayılabilir. İstenen tüm performans kriterlerinin tasarlanan kalıptan beklenmesi mümkün olmamaktadır. Yapılan çalışmalarda tasarımda en çok üzerinde durulan konu, basınç kaybının düşük olması ve kalıp çıkışında mümkün olduğunca üniform hız dağılımının elde edilebilmesidir [4]. Bu çalışmada kalıp tasarımı çalışmaları ikinci kritere göre yönlendirilmiştir.

Ekstrüder vidasından gelen plastik eriyiği spiral kanallı kalıp bölgesine üniform olarak dağıtmak önemlidir. Bunun için değişik dağıtım sistemleri mevcuttur. Her spiral kanalının bir kanal ile beslendiği klasik sistemlerin yanı sıra 1, 2, 4, 6 adet veya daha fazla askı-tipi dağıtıcının kullanıldığı sistemler de mevcuttur. Tasarımda kural olarak spiral sayısının fazla ve spiral kanalların kesit alanlarının küçük olması istenir. Ancak klasik yöntem konstrüktif nedenlerden dolayı spiral kanal sayısını sınırlamaktadır. Askı-tipi dağıtıcılar bu açıdan klasik tiplere göre avantaja sahiptir. Çünkü teorik olarak sınırsız sayıda spiral kanal kullanılabilen ve polimer eriyiği spiral kanal giriş kesitine üniform olarak beslenebilmektedir.

Dağıtıcı sistemler (askı veya balık kuyruğu tipi) üzerine literatürde çok sayıda çalışma mevcuttur [5-9]. Booy [5], dağıtıcı sistemlerin temel çalışma prensibine uygun, dairesel dağıtıcı kanala ve uzunluğu, kesiti sabit olan dağıtıcı düzlük kısma sahip bir geometriye sonlu hacimlere bölmüştür. Her sonlu hacim içerisindeki akışın izotermal olduğu kabul edilmiştir ve debi-basınç düşüşü ilişkisi için literatürdeki [10] bilindik ifadeler kullanılarak her sonlu hacim içerisindeki debi değerlerinin hesabı için oluşan matrisin çözümüne yönelik basit bir yöntem geliştirmiştir. Bu makale temel dağıtıcı sistemlerin tasarımı açısından temel çalışma olma niteliğindedir. Matsubara [6], Kuvvet Yasası (Power Law) 'na uyan bir polimer eriyik için dairesel dağıtıcı kanala sahip askı-tipi dağıtıcının tasarımı için analitik ifadeler geliştirmiştir. Bu çalışma, temelde askı-tipi dağıtıcı çıkışında üniform hız dağılımı sağlanması amacıyla yönelik çalışmaların yürütüldüğü başarılı bir çalışmadır. Michaeli [10], dairesel veya dikdörtgen kesitli dağıtıcı kanala sahip balık kuyruğu ve askı tipinde dağıtıcı tasarım yöntemlerini özetlemektedir. Farklı kriterlere göre askı-tipi dağıtıcı tasarımı ele alınmış ve bir çok analitik yöntemin yanısıra, tasarımda kullanılan sayısal yöntemlerden de bahsetmiştir.

Bugüne kadar spiral kanallı kalıp tasarımına yönelik, akış fiziğinde ve kalıp geometrisinde basitleştirmelere gidilerek Sonlu Hacimler Yöntemi 'nin kullanıldığı bir çok çalışma mevcuttur [11-14]. Tasarımı tamamlanan spiral kanallı kalıpların imalat öncesi performansları gerçekleştirilen sayısal akışkanlar dinamiği simülasyonlarıyla değerlendirilmektedir [16-18]. Saillard ve diğ. [11], biri spiral kanalın içinde diğeri spiral kanal ile dış kovan arasında kalan boşluktaki eksenel doğrultuda olmak üzere iki akış yolu tanımlamıştır. İki akış birbirini etkilememektedir. Spiral kanallı kalıp geometrisi düzlemsel olacak şekilde açılarak ve sonlu hacimlere bölünerek debi-basınç düşüşü ifadelerinde hidrolik çap kavramı kullanılmıştır. Vlcek ve diğ. [12], benzer kabuller yaparak akışı modellemişlerdir. Ancak her bir kontrol hacmi için spiral kanal içerisinde, spiral kanal ile dış kovan arasında ve spiral kanallar arasındaki kısım ile dış kovan arasında alt kontrol hacimleri oluşturulmuştur. Her bir alt kontrol hacminde iki akış yolu belirlenmiştir. Rauwendaal [13], Saillard ve diğ. [11] 'nin çalışmasına benzer olarak iki akış yolu belirlemiştir. Spiral kanal içerisindeki akış için debi-basınç

düşüşü arasındaki analitik ifade bünyesinde düzeltme katsayısı kullanmıştır. Eş basınç çizgilerinin kalıp eksenine dik olduğu kabul edilmiştir. Perdikoulis ve diğ. [15] yukarıda verilen 3 farklı modelin performansının deneysel sonuçlarla uyum içerisinde olduğunu belirlemiştir. Bu yöntemlerle yazılan kısa bir kod ile çeşitli geometrik parametrelerin kalıp performansına etkileri kısa sürede görülebilmektedir.

Kalıpların bilgisayar ortamında çizimi, çözüm ağı oluşturma ve SAD analizleri uzun süre almaktadır. Halbuki, yukarıda bahsedilen analitik yaklaşımların kullanıldığı bir bilgisayar kodu ile çeşitli geometrik ve fiziksel parametrelerin kalıp performansına etkileri kısa sürede değerlendirilebilmektedir. Dolayısıyla verilen bu basitleştirilmiş yaklaşımlar spiral kalıp tasarımı sürecinde zaman kazanılması açısından oldukça avantajlı yöntemlerdir.

Bu çalışmada boru üretimi için kullanılacak bir spiral kalıbın tasarımı sistematik olarak ele alınmıştır.

2. TASARIM VERİLERİ

Bu çalışmada, 32 mm çapında, 3.6 mm et kalınlığında bir borunun 20 m/dak hızda üretimi için askı-tipi dağıtıcıya sahip spiral kanallı kalıbın tasarımı ele alınmıştır. Proses malzemesi olarak, viskozitesi Denklem (1) 'deki Kuvvet Yasası 'na uyan yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) seçilmiştir.

$$\eta = m\dot{\gamma}^{n-1} \quad (1)$$

Bu malzemenin Kuvvet Yasası indeksi $n=0.5$ ve kıvam faktörü $m=5000 \text{ Pa.s}^n$ dir.

3. YÖNTEM

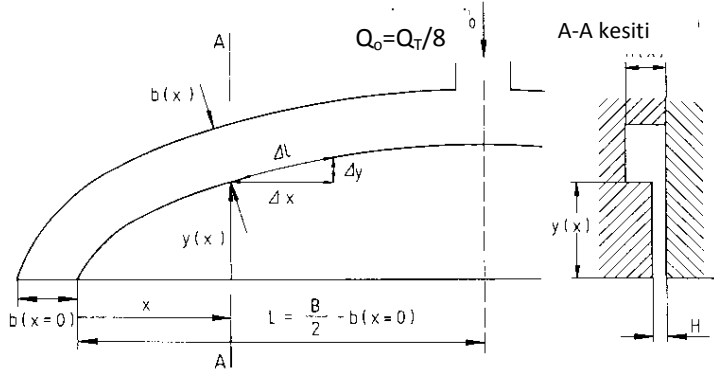
3.1. Askı-Tipi Dağıtıcının Ön Tasarımı

Spiral kanallı kalıp 4 adet askı-tipi dağıtıcıyla beslenecektir. Askı-tipi dağıtıcının tasarımı, dikdörtgen kesitli dağıtıcı kanala sahip olacak şekilde ele alınmıştır. Dağıtıcının ön tasarımı Michaeli [10] 'da verilen analitik yaklaşımla gerçekleştirilmiştir. Bu yaklaşımda basınç eş çizgilerinin dağıtıcı çıkış düzlemine paralel olduğu kabul edilmiştir. Dağıtıcı Şekil 1 'deki eksene göre simetrik olduğundan analitik tasarımda sadece kalıbın yarısı ele alınmıştır. Dağıtıcı çıkış kesitinde hız dağılımının üniform olabilmesi için sabit b genişliğindeki kanal içerisindeki hacimsel debinin x konumuna bağlı değişimi aşağıdaki gibi olmalıdır.

$$Q_k(x) = \frac{(x+b)}{(B/2)} Q_0 \quad (2)$$

Biri dağıtıcı kanal içerisinde, diğeri dağıtıcı çıkış düzlüğünde olmak üzere iki akış yolu tanımlanmıştır. Bu iki akış yolunda kenar etkilerinin ihmal edilebildiği dikdörtgen kesitli kanal içerisinde tam gelişmiş, eş-sıcaklıklı Newton tipi akışkanlar için debi-basınç düşüşü ilişkisinde (Denklem (3)) geçerli olan analitik ifadelerin kullanılabilmesi için temsili viskozite kavramından [10] yararlanılmıştır.

$$\Delta p = \frac{12\bar{\eta}y}{\Delta x.H^3} V \quad (3)$$



Şekil 1. Dikdörtgen kesitli askı-tipi dağıtıcının geometrik parametreleri [7]

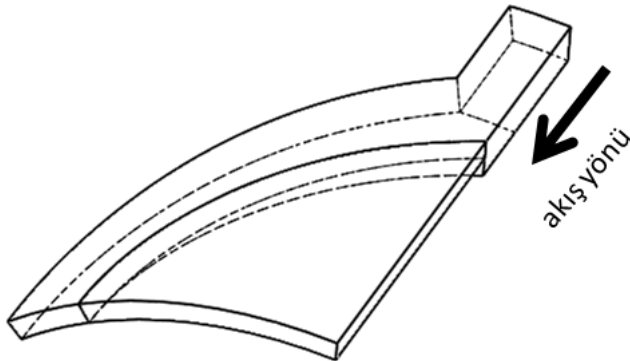
Denklem (3) dağıtıcı kalıp düzlüğündeki akış için kullanılmaktadır. $\bar{\eta}$ temsili viskoziteyi, V kalıp düzlüğündeki yerel debiyi ifade etmektedir. Denklem (3) 'e benzer bir ifade dağıtıcı kanal içindeki akış için kullanılmaktadır. Kayma şekil değiştirme hızının dağıtıcı kanal içerisinde sabit kalması koşulu sağlandığında dağıtıcı kanal yüksekliği değişimi için aşağıdaki ifade elde edilmektedir.

$$h(x) = h_E \sqrt{1 + x/b} \quad (4)$$

Dağıtıcı kanalın çıkış yüksekliği $h_E = H$ alınarak dağıtıcı kanal profili için aşağıdaki ifadeye ulaşılmıştır.

$$y(x) = 2\sqrt{bx} \quad (5)$$

Şekil 1 'de görüldüğü gibi dağıtıcı kanal düzlemsel olarak açılarak analize başlanmaktadır. Askı-tipi dağıtıcının işlendiği silindir çapı $D=125$ mm olarak belirlenmiştir. Bu durumda Şekil 1 'deki dağıtıcı kanalın çıkış genişliği $B=98.17$ mm olmaktadır. Dağıtıcı çıkış düzlüğü yüksekliği $H=3$ mm, dağıtıcı kanal genişliği $b=12$ mm olarak belirlenmiştir. Analitik yaklaşımla tasarlanan askı-tipi dağıtıcının akış hacmi Şekil 2 'de verilmiştir. Dağıtıcı merkezinde dağıtıcı kanal yüksekliği $h_0=6.07$ mm 'dir.



Şekil 2. Askı-tipi dağıtıcının akış hacmi (ön tasarım-analitik)

3.2. Askı-Tipi Dağıtıcının Ön Tasarım Geometrisinin Elektrik-Şebekesi Benzeşimi ile Performans Analizi

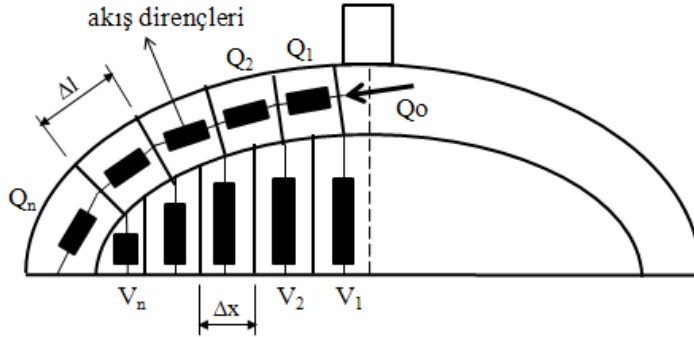
Bu yaklaşımda dağıtıcı kanal ve kalıp düzlüğü belirli sayıda sonlu hacimlere bölünmektedir. Her sonlu akış hacminde Şekil 3 'de görüldüğü gibi elektrik şebekelerinde olduğu gibi akış direnci tanımlamak mümkündür. Problem, şebekenin her bir kolundaki debi miktarının belirlenmesi şeklinde tanımlanmaktadır. Bu amaçla elektrik devrelerinde sıkça kullanılan Kirchoff Yasaları uygulanmaktadır. Her bir düğüm noktasındaki net debi sifıra eşittir ve kapalı bir çevrim boyunca toplam basınç kaybı sıfır değerindedir. Dağıtıcı kanalda kenar etkileri ihmal edilemeyeceğinden Denklem (6) 'daki debi-basınç düşüşü ifadesinde Şekil 4 'de verilen şekil faktörü değerlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

$$\Delta p = \frac{12\bar{\eta}\Delta l}{F_p b h^3} Q \quad (6)$$

Denklem (6) 'daki Δl dağıtıcı kanal içindeki kontrol hacminin uzunluğunu ifade etmektedir. Şekil 3 'ten anlaşılacağı üzere $2n$ adet bilinmeyen debi değeri bulunmaktadır. Lineer denklem sistemini oluşturan denklemler aşağıda verilmiştir.

$$Q_1 + V_1 = Q_0, \quad Q_2 + V_2 - Q_1 = 0, \dots, Q_{i+1} + V_{i+1} - Q_i = 0, \dots, Q_n + V_n - Q_{n-1} = 0 \quad (7)$$

$$R_{v1}V_1 - R_{q1}Q_1 - R_{v2}V_2 = 0, \dots, R_{vi}V_i - R_{qi}Q_i - R_{v(i+1)}V_{(i+1)} = 0, \dots, R_{vn}V_n - R_{qn}Q_n = 0 \quad (8)$$



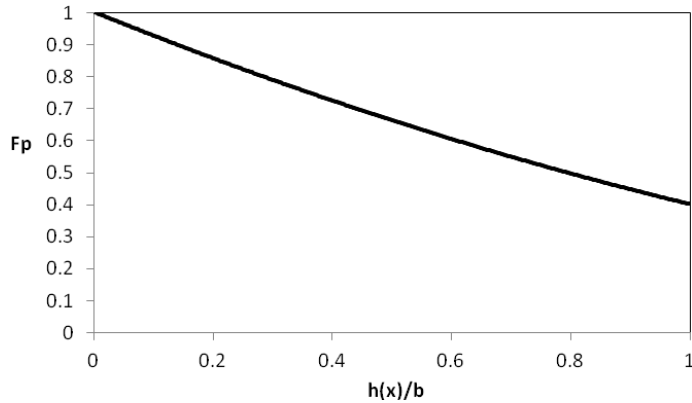
Şekil 3. Askı-tipi dağıtıcı içerisindeki akışın elektrik-şebekesi benzeşimi yardımıyla analizi

Denklem (8) 'de R_v ve R_q sırasıyla kalıp düzlüğündeki ve dağıtıcı kanaldaki akışa karşı dirençleri ifade etmektedir. Temsili viskozite kavramının kullanılması problemin lineer denklem sistemine indirgenmesini sağlamaktadır. Elektrik-şebekesi yaklaşımı kullanılarak gerçekleştirilen sayısal çözümlemede sonlu hacimlerdeki başlangıç debi değerlerinin belirlenebilmesi için öncelikle Kuvvet Yasası indeksi $n=1$ olan dolayısıyla viskozitesi $\mu=m=5000$ Pa.s olan Newton-tipi akışkan için çözüm elde edilmektedir.

Sonraki aşamada bu debi değerleri kullanılarak Kuvvet Yasası indeksi $n=0.5$ için her sonlu hacimde temsili viskozite değerleri hesaplanmakta ve bu değerler kullanılarak yeni debi değerleri hesaplanmaktadır. Debi değerlerinde yakınsama sağlanıncaya kadar işlemler iteratif olarak devam etmektedir. Sonuçlar SAD analiz sonuçlarıyla karşılaştırmalı olarak sonraki bölümde verilmiştir.

3.3. Askı-Tipi Dağıtıcının Ön Tasarım Geometrisi için SAD Analizi

Kalıp içerisindeki akışın sıkıştırılmaz olduğu kabul edilmiştir. Ekstrüzyon prosesinde nispeten düşük basınçlar nedeniyle yoğunluğun sabit kabul edilmesi makul bir yaklaşımdır [10]. Yerçekimi kuvveti ve düşük hızlar nedeniyle atalet kuvvetleri ihmal edilmiştir. Akış laminar karakterde olduğundan kalıp içerisinde sürünmeli akış söz konusudur. Dolayısıyla hareket denklemleri, akış sırasında viskoz kuvvetlerin basınç kuvvetleri ile dengelendiğini ifade etmektedir. Kalıbın belirli sabit sıcaklık değerinde kontrol edildiği ve kalıp girişine beslenen plastik eriyik sıcaklığının kalıp sıcaklığı ile aynı değerde kabulü ile izotermal akış koşulları için simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Böylece süreklilik denklemi ve hareket denklemleri kartezyen koordinatlar için aşağıdaki şekildedir.



Şekil 4. Dikdörtgen kesitli kanal için şekil faktörü [19]

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (10)$$

Denklem 10'daki gerilme terimleri Genelleştirilmiş Newton-tipi Akışkan (GNA) Modeli (Denklem 11) [3] ile modellenmiştir.

$$\tau_{ij} = \eta(\dot{\gamma})\dot{\gamma}_{ij} \quad (11)$$

Burada τ_{ij} gerilme tensörüdür. $\dot{\gamma}_{ij}$ şekil değiştirme hızı tensörüdür ve bileşenleri aşağıda verilmiştir.

$$\dot{\gamma}_{ij} = \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (12)$$

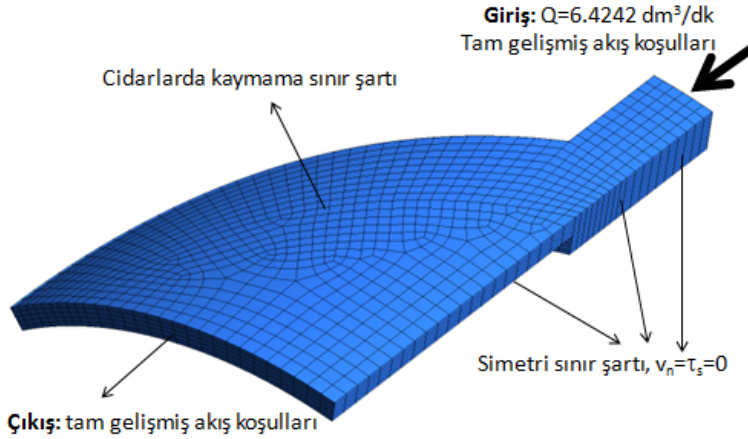
Denklem (11)'de viskozite fonksiyonu $\eta(\dot{\gamma})$ olarak Denklem (1)'deki Kuvvet Yasası kullanılmıştır. YYPE sanki-plastik davranış [10] gösteren, Newton-tipi olmayan akışkan karakteri sergilemektedir. $\dot{\gamma}$ skaler bir büyüklüktür ve şekil değiştirme hızı tensörünün bileşenleri kullanılarak aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\frac{1}{2} I_2} \quad (13)$$

Burada I_2 , şekil değiştirme hızı tensörünün ikinci invariantı olarak ifade edilir [3].

$$I_2 = \sum_i \sum_j \dot{\gamma}_{ij} \dot{\gamma}_{ji} \quad (14)$$

Şekil 5 'de hesaplama hacmini çevreleyen sınır yüzeyleri isimlendirilmiştir. Giriş kesitinden toplam debinin 1/8 'i olan $6.4242 \text{ dm}^3/\text{dk}$ değerinde hacimsel debi giriş yapmaktadır. Giriş ve çıkış kesitlerinde hız profili tam gelişmiş akış koşullarına sahiptir. Cidarlarda kaymama sınır şartı uygulanmıştır. Simetri yüzeyinde yüzey normali doğrultusundaki hız bileşeni ve yüzeye teğet gerilme bileşeni sıfır değerindedir. SAD analizi, *sonlu elemanlar yöntemini* kullanan PolyFlow [2] yazılımında gerçekleştirilmiştir. Hesaplama hacmi 5870 adet altı yüzlü sonlu eleman içermektedir.

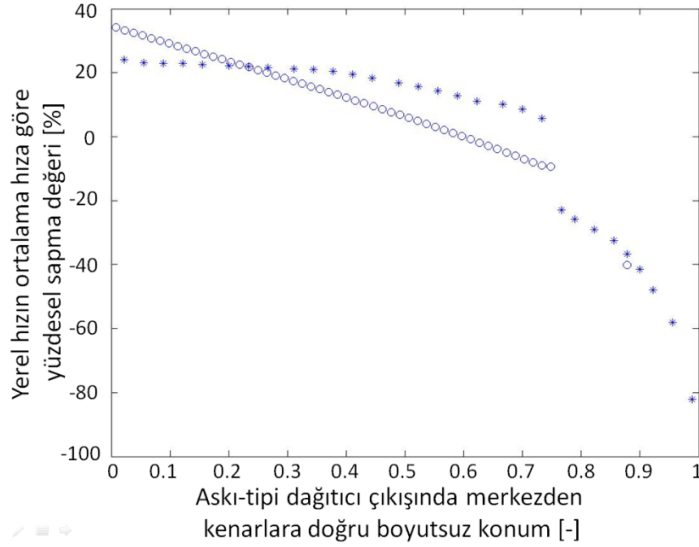


Şekil 5. Askı-tipi dağıtıcının ön tasarım akış hacmi için çözüm ağı yapısı ve sınır şartları

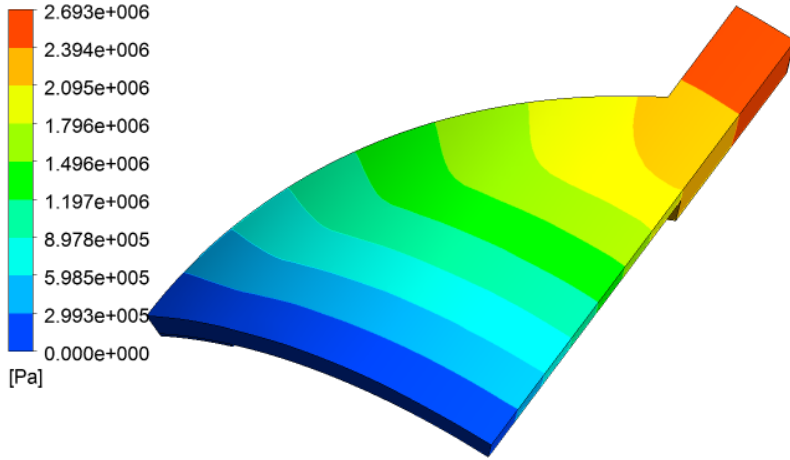
Şekil 6 'da askı-tipi dağıtıcı çıkış kesitinde elektrik-şebekesi benzeşimi yöntemiyle ve SAD analiziyle elde edilen yerel hızın, ortalama hıza göre yüzdesel sapma değerleri verilmiştir. Yüzdesel sapma değeri aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır.

$$\text{Yüzdesel sapma değeri} = 100 \times \frac{V_i - V_{ort}}{V_{ort}} \quad (15)$$

Bu ifadede V_i ve V_{ort} sırasıyla dağıtıcı çıkış kesitindeki yerel hızı ve ortalama hızı ifade etmektedir. Analitik yöntemle tasarlanan askı-tipi dağıtıcının beklenen performansı göstermekten uzak kaldığı anlaşılmaktadır. Kalıp çıkışı ekseninde yerel hızın ortalama hızdan %20 yüksek olduğu görülmektedir. Yüzdesel sapma değerlerinin dağıtıcı çıkış kesitinin dış kenarlarına doğru artmasının sebebi cidarda hızın sıfır olmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 7 'de dağıtıcı ön tasarım akış hacmindeki eş-basınç eğrilerinin analitik yöntemdeki kabule uygun olarak çıkış kesit düzlemine paralel olduğu görülmektedir. Askı-tipi dağıtıcıdaki basınç kaybı, SAD analizi ve elektrik-şebekesi benzeşimi yöntemlerinde sırasıyla 26.75 bar ve 24.87 bar olarak belirlenmiştir. Elektrik-şebekesi benzeşimi yöntemiyle -%7 bağıl hatayla basınç düşüşü hesaplanmıştır. Bu sonuçlara göre elektrik-şebekesi benzeşimi metodu oldukça başarılıdır.



Şekil 6. Dağıtıcı ön tasarım geometrisi için kalıp çıkış kesitinde yerel hızın ortalama hıza göre yüzdesel sapma değeri ('o' : elektrik-şebekesi benzeşimi yöntemi, '*' : SAD analizi)

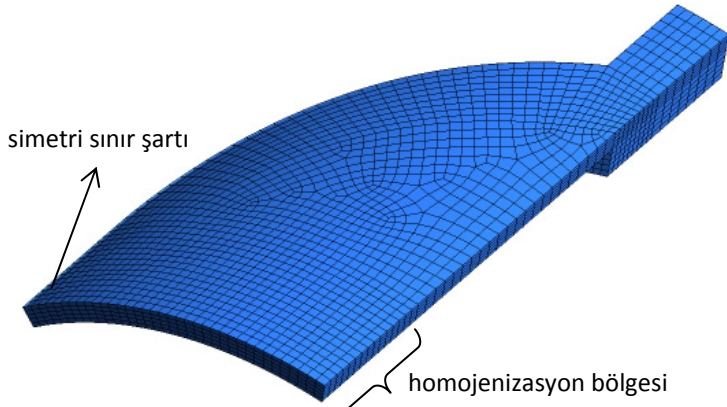


Şekil 7. Askı-tipi dağıtıcının ön tasarım akış hacminde eş-basınç eğrileri

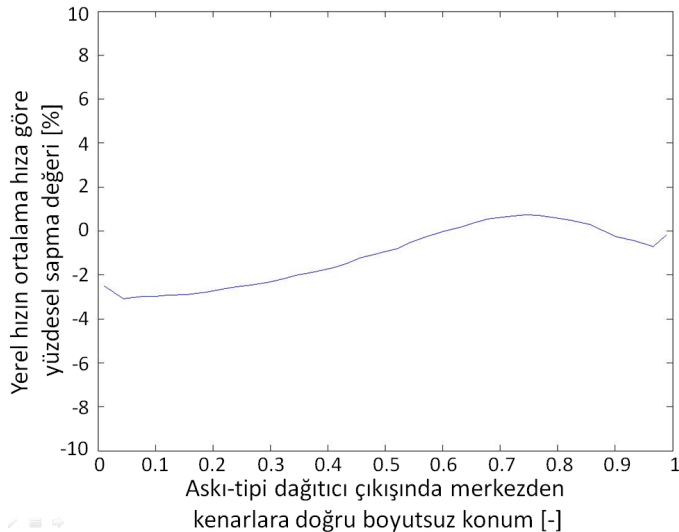
3.4. Askı-Tipi Dağıtıcı Tasarımının Tersine Mühendislik Yaklaşımıyla Optimizasyonu

Tersine mühendislik yaklaşımında dağıtıcı çıkışında yerel hızların eşit olması için gerekli çıkış debileri belirlenmiştir. Kütle korunumundan faydalanarak diğer sonlu hacimlerdeki debi değerleri bulunabilmektedir. Dağıtıcı kanal formu $y(x)$ sabit tutularak, dağıtıcı kanal yüksekliği $h(x)$ 'in optimum değerlerinin bulunması hedeflenmiştir. $h(x)$ 'in başlangıç değerleri için analitik tasarım yöntemiyle hesaplanan değerler kullanılmıştır. Denklem (8) 'deki R_q dirençleri kolaylıkla belirlenebilmektedir. R_q değerlerinden $h(x)$ değerleri hesaplanmakta, şekil faktörü F_p değerleri güncellenerek yeni $h(x)$ değerleri belirlenmektedir. Bu işlemler $h(x)$ değerleri yakınsayana kadar

iteratif olarak devam etmektedir. Optimizasyon sonucunda dağıtıcı ekseninde, h_0 'nin değeri 8 mm olarak hesaplanmıştır. Analitik tasarıma göre h_0 'ın değeri %30 artmıştır. Tersine mühendislik yaklaşımıyla optimize edilen dağıtıcı geometrisi Şekil 8 'de verilmiştir. Dağıtıcının çıkış kısmında 20 mm uzunluğunda homojenizasyon bölgesi mevcuttur. Optimum askı-tipi dağıtıcı tasarımı için SAD analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 9 'da kalıp çıkış kesitinde yerel hızın ortalama hıza göre sapma değerinin maksimum %3 mertebesinde olduğu görülmektedir. Bu sonuç dağıtıcı performansı açısından oldukça iyi seviyededir. Ayrıca askı-tipi dağıtıcıda meydana gelen basınç kaybı homojenizasyon bölgesi hariç tutulduğunda 23.28 bar dır. Bu basınç değeri, analitik yaklaşımla tasarlanan dağıtıcının ön tasarım geometrisine göre %13 daha düşüktür. Bunun nedeni akışkan daha dengeli dağıtıldığından kayma şekil değiştirme hızı, dolayısıyla cidar kayma gerilmesinin azalmasıdır.



Şekil 8. Optimum askı-tipi dağıtıcının hesaplama hacmi (dağıtıcı çıkış kısmında 20 mm uzunluğunda homojenizasyon bölgesi mevcuttur)



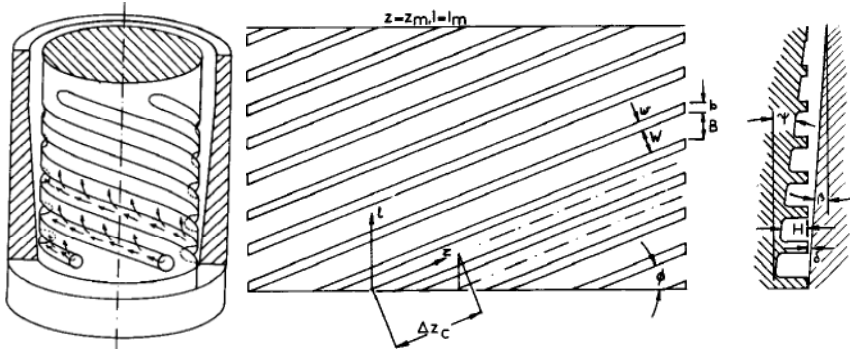
Şekil 9. Optimum askı-tipi dağıtıcı tasarımı için çıkış kesitinde yerel hızın ortalama hıza göre yüzdesel sapma değeri

3.5. Spiral Kanallı Kalıbın Basitleştirilmiş Performans Analizi

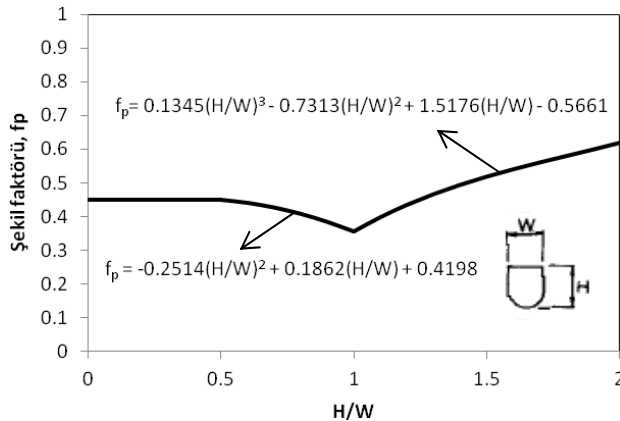
Spiral kanallı kalıbın içindeki akışın analizi için Rauwendaal [13] 'ın çalışmasındaki analitik yaklaşım kullanılmıştır. Tipik bir spiral kanallı kalıp Şekil 10a 'da görülmektedir. Burada bahsedilen yöntemde silindirin eğriliği ihmal edilmektedir, eş basınç çizgilerinin kalıp eksenine dik olduğu kabul edilmektedir. Spiral kanal içerisindeki akış, Şekil 11 'deki şekil faktörü kullanımı yardımıyla genişliği W , yüksekliği H olan dikdörtgen kanal içerisindeki basınç gradyeninin neden olduğu akış olarak ele alınabilmektedir. Silindirin yüzeyi ile dış kovanın iç yüzeyi arasındaki aralıktaki sızıntı akışı, yüksekliği δ olan dikdörtgen kanal içerisindeki basınç gradyenli akış olarak düşünülebilmektedir ve sızıntı akışı spiral kanal içerisindeki akışı etkilememektedir. Spiral kalıp Şekil 10b 'deki gibi düzlemsel olarak açılarak akış analiz edilecektir. Spiral kanal içerisindeki hacimsel debi-basınç gradyeni arasındaki ilişki aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$Q_{sp} = \frac{f_p WH^2}{2(1/n + 2)} \left(\frac{Hg_z}{2m} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (16)$$

$g_z = dp/dz$ spiral kanal boyunca basınç gradyenini ifade etmektedir. f_p spiral kanalda akış kesitinin şekil faktörüdür.



Şekil 10. a) Tipik bir spiral kanallı kalıp b) Düzlemselleştirilmiş spiral kanallı kalıp [13]



Şekil 11. Şekil faktörü f_p 'nin H/W ile değişimi [13]
(H/W 0.5 'ten küçük değerler için $f_p=0.45$)

Birim teğetsel uzunluk başına sızıntı akış debisi,

$$Q'_s = \frac{\delta^2}{2(s+2)} \left(\frac{\delta g_l}{2m} \right)^s \quad (17)$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu ifadede $g_l = dp/dl$ kalıp eksenine doğrultusundaki basınç gradyenidir. Yukarıda verilen kabullerden hareketle iki basınç gradyeni arasında,

$$g_z = g_l \sin \phi \quad (18)$$

ilişkisi vardır. Şekil 10b 'deki Δz_c mesafesi boyunca spiral kanal içerisindeki akış, bir önceki spiral kanaldan sızan akıştan etkilenmemektedir. Bu bölümde kütlelerin korunumu,

$$Q_{sp}(z + \Delta z) = Q_{sp}(z) - Q_s(z) \quad z \leq \Delta z_c \quad (19)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada,

$$Q_s(z) = Q'_s(z) \cdot \Delta z \cos \phi \quad (20)$$

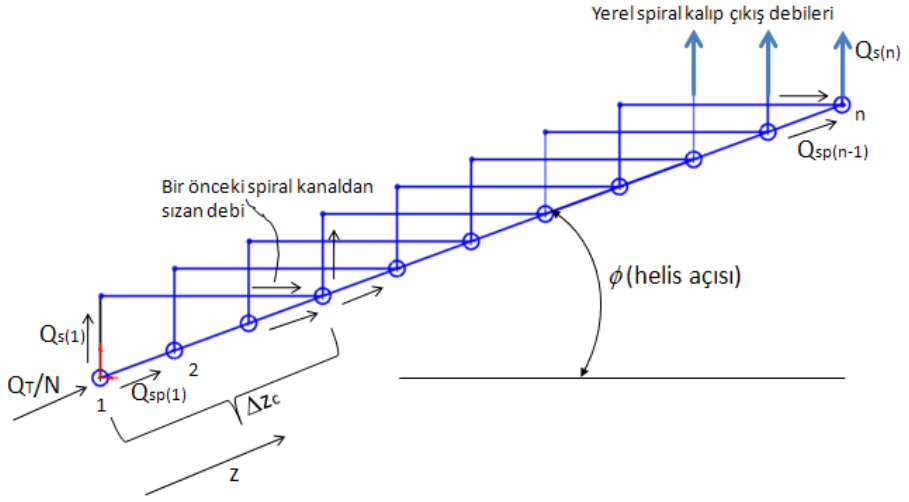
şeklindedir. Birinci Δz_c mesafesinden sonra kütlelerin korunumu aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$Q_{sp}(z + \Delta z) = Q_{sp}(z) + Q_s(z - \Delta z_c) - Q_s(z) \quad z > \Delta z_c \quad (21)$$

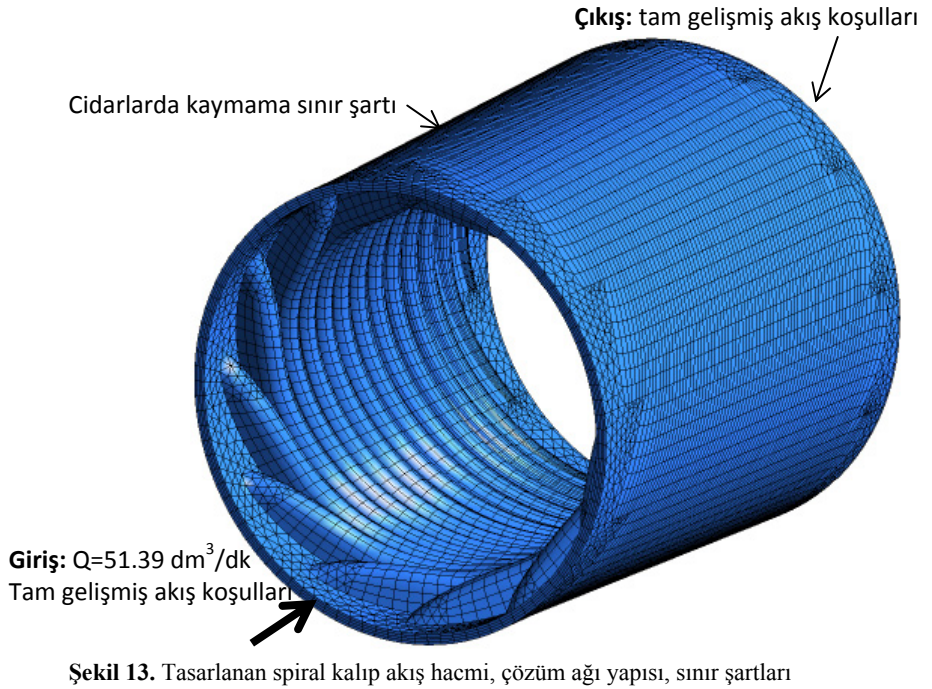
Denklem (16) ile (21) arasındaki ifadeler kullanılarak spiral kanallı kalıp içerisindeki debi dağılımı ve basınç değişimi kolaylıkla bulunabilmektedir. Şekil 12 'de yukarıda ayrıntıları verilen basitleştirilmiş yaklaşıma göre spiral kanallı kalıp içerisindeki akış yolları belirtilmiştir. N adet spiral kanaldan yalnız birini göz önünde bulundurmak yeterli olmaktadır. Spiral kanallı kalıba giren toplam debi N 'ye bölünerek giriş debisi belirlenir. Kalıp girişinden kalıp çıkışına kadar adım adım ilerlenerek tüm sızıntı ve spiral kanal debileri belirlenebilmektedir. Analiz sonucu iki spiral kanal arasındaki bölgede kalıp çıkışı yerel akış debileri saptanmış olur.

Yazılan Matlab kodu ile spiral kanallı kalıbın tasarım parametreleri, kalıp çıkışında olabildiğince üniform hız dağılımı ve basınç kaybının makul değerlerde tutulması sağlanacak şekilde tekrarlı denemelerden sonra spiral kanallı kalıbın çapı $D=123.5$ mm, spiral kanal sayısı $N=12$, spiral kanal helis açısı $\phi=20^\circ$, kalıp boyu $l_m = 126$ mm, spiral kanalın başlangıç derinliği $H_0=12$ mm, spiral kanal genişliği $W=7$ mm, dış haddenin koni açısı $\beta=1.5^\circ$, girişte iç ve dış hadde arasındaki aralık miktarı $\delta_0=3$ mm ve spiral kanalın sarım açısı $\alpha=360^\circ$ olarak belirlenmiştir. Burada verilen geometrik parametrelere göre oluşturulan spiral kalıbın akış hacmi için PolyFlow yazılımı yardımıyla SAD analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 13 'de tasarlanan spiral kalıbın hesaplama hacmi görülmektedir. Toplam 59597 adet altı yüzlü sonlu eleman kullanılmıştır. Şekil 14a 'da yerel hız yüzdesel sapma değerleri verilmiştir. Analitik yöntemle [13] ve SAD analizi ile hesaplanan yerel hız yüzdesel sapma değerleri merteye olarak birbirine yakındır. Her iki sonuç da tasarlanan spiral kanallı kalıp çıkışında hız dağılımının yeterince üniform olduğunu göstermektedir. Şekil 14b 'de spiral kanallı kalıp eksenine boyunca basıncın değişimi görülmektedir. Analitik yöntem, SAD analizi sonucuna göre kalıp giriş basıncını %5 daha yüksek tahmin etmiştir. Bu sonuç beklenen bir durumdur, çünkü analitik yaklaşımda spiral kanal ile iç-dış hadde arasındaki akışkan arayüzeyi hızın sıfır olduğu cidar olarak değerlendirilmektedir.

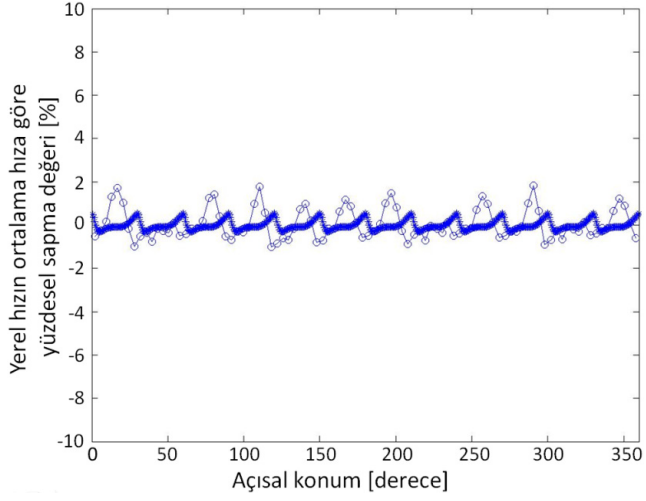
Bu çalışmada tasarımı gerçekleştirilen 4 adet askı-tipi dağıtıcıya sahip spiral kalıp Şekil 15 'te görülmektedir.



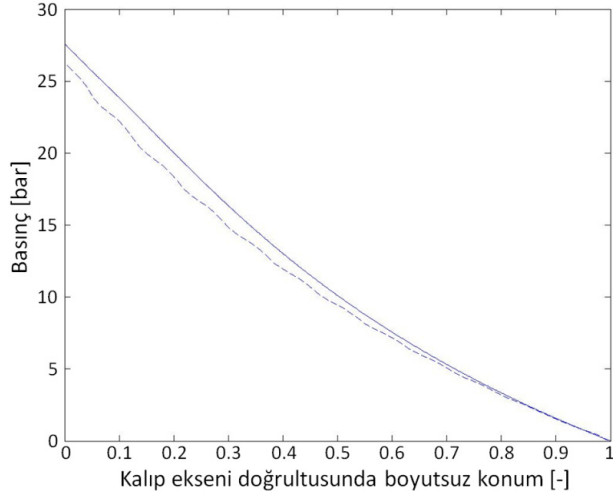
Şekil 12. Spiral kanallı kalıp içerisinde akış yolları



Şekil 13. Tasarlanan spiral kalıp akış hacmi, çözüm ağı yapısı, sınır şartları

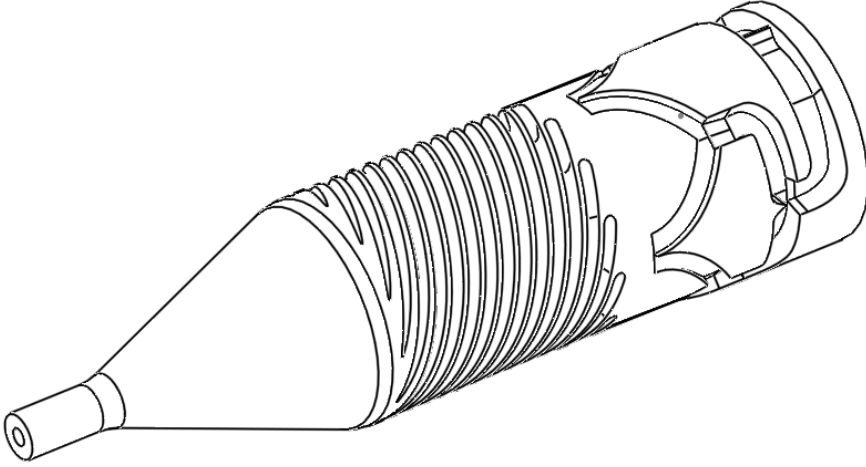


(a)



(b)

Şekil 14. SAD analizi ile analitik yöntem sonuçlarının karşılaştırılması a) Yerel hızın ortalama hıza göre yüzdesel sapma değerleri ('o':SAD analizi, '*': Analitik yöntem) b) Kalıp eksenine doğrultusunda basıncın değişimi ('-' : analitik yöntem, '--': SAD analizi)



Şekil 15. 4 adet askı-tipi dağıtıcı ile beslenen spiral kalıp

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada tek katmanlı boru üretimi için kullanılacak askı-tipi dağıtıcı ile beslenen bir spiral kalıbın sistematik tasarımı ele alınmıştır. Askı-tipi dağıtıcının ön tasarımında analitik yöntem kullanılmıştır ve elektrik-şebekesi benzeşimi yönteminde tersine mühendislik yaklaşımıyla askı-tipi dağıtıcı tasarımı optimize edilmiştir. Spiral kanallı kalıbın tasarım geometrisi analitik yaklaşımla belirlenmiştir. Spiral kanallı kalıp için yapılan SAD analiziyle tasarım sonlandırılmıştır.

Askı-tipi dağıtıcının tasarımında analitik yöntem, dağıtıcı çıkışında üniform hız dağılımı sağlama bakımından istenen performansı göstermekten uzaktır. Dolayısıyla bu çalışma, askı-tipi dağıtıcı sistemi tasarımında kullanılan analitik yöntemin ancak ön tasarım geometrisinin oluşturulmasında kullanılabilceğini göstermiştir. Başvurulan elektrik-şebekesi benzeşimi yöntemi askı-tipi dağıtıcı tasarımında oldukça başarılıdır. Askı-tipi dağıtıcı çıkışında yerel hız, ortalama hızdan maksimum %3 sapma göstermiştir. Dağıtıcı çıkışında hız dağılımının üniform olması sağlandığında akışkanın akış yollarına dengeli dağıtılması sayesinde basınç kaybı, dolayısıyla üretimde enerji tüketimi azalmaktadır. Spiral kanallı kalıp tasarımında yararlanılan analitik yöntem, kalıp çıkışında olabildiğince üniform akış hızı sağlanmasına yönelik olarak kullanılmıştır ve SAD analizlerine göre kalıp çıkışında yerel hızın ortalama hızdan maksimum %2 sapma gösterdiği belirlenmiştir. Analitik yöntem ve SAD analiziyle elde edilen basıncın kalıp boyunca değişimi birbirine oldukça yakındır. Analitik yaklaşımla hesaplanan basınç değerleri SAD analizine göre biraz yüksektir. Bunun nedeni analitik yöntemde spiral akışı ile sızıntı akışı arayüzünün kalıp cidarı olarak değerlendirilmesidir.

Acknowledgments / Teşekkür

“00309.STZ.2008-2, Katkılı Polimer Malzemelerin Reolojik Özelliklerinin Modellenmesi ve Ekstrüzyonda Kullanılmak Üzere Üç Katmanlı Spiral Kafa Tasarımı” başlıklı SAN-TEZ projesi kapsamında bu çalışmayı destekleyen T.C. Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı ile Mir Araştırma ve Geliştirme A.Ş. ’ne teşekkür ederiz.

REFERENCES / KAYNAKLAR

- [1] Fischer P. and Wortberg J. “New Spiral Mandrel Dies”, Innovation in Extrusion isimli SKZ Konferansı ’nda sunulan bildirinin genişletilmiş baskısı, Würzburg-Almanya, 1998.
- [2] Ansys Polyflow 13, Fluent Inc. (www.ansys.com).
- [3] Baird D.G. and Collias D.I., “Polymer Processing: Principles and Design”, Wiley-Interscience Publication, New York, 1998.
- [4] Fischer P., “Co-extrusion dies based on spiral mandrel technology”, 1st International Congress - Profile & Pipe Extrusion in Difficult Markets, ETA Kunststofftechnologie GmbH, Almanya, 2003.
- [5] Booy M.L., “A Network Flow Analysis of Extrusion Dies and Other Flow Systems”, Polym. Eng. Sci., 22, 7, 432-437, 1982.
- [6] Matsubara Y., “Geometry Design of a Coat-Hanger Die with Uniform Flow Rate and Residence Time Across the Die Width”, Polym. Eng. Sci., 19, 3, 169-172, 1979.
- [7] Reid J.D., Campanella O.H., Corvolan C.M., et.al., “The Influence of Power-Law Rheology on Flow Distribution in Coathanger Manifolds”, Poly. Eng. Sci., 43, 3, 693-703, 2003.
- [8] Winter H.H. and Fritz H.G., “Design of Dies for the Extrusion of Sheets and Annular Parisons: The Distribution Problem”, Poly. Eng. Sci., 26, 8, 543-553, 1986.
- [9] Huang Y., Gentle C.R. and Hull J.B., “A Comprehensive 3-D Analysis of Polymer Melt Flow in Slit Extrusion Dies”, Adv. Polym. Tech., 23, 2, 111-124, 2004.
- [10] Michaeli W., “Extrusion Dies for Plastics and Rubber: Design and Engineering Computations”, Hanser, Munich, 2003.
- [11] Saillard P. and Agassant J.F., “Polymer Flow in a Spiral Mandrel Die for Tubular Films”, Polym. Proc. Eng., 2, 37-52, 1984.
- [12] Vlcek J., Kral V. and Kouba K., “The Calculation of the Form of a Spiral Mandrel”, Plast. Rub. Proc. Appl., 4, 309-315, 1984.
- [13] Rauwendaal C., “Flow Distribution in Spiral Mandrel Dies”, Polym. Eng. Sci., 27, 3, 186-191, 1987.
- [14] Limper A. and Stieglitz H., “Recent Research on Mathematical Design of Spiral Mandrel Dies”, SPE Antec Tech. Papers, 1, 1-5, 1998.
- [15] Perdikoulis J., Vlcek J. and Vlachopoulos J., “An Experimental Evaluation of Flow Distribution Models for Spiral Mandrel Dies”, Adv. Polym. Tech., 10, 2, 111-123, 1990.
- [16] Sun Y. and Gupta M., An Analysis of the Effect of Elongational Viscosity on the Flow in a Spiral Mandrel Die, Adv. Polym. Tech., 25, 2, 90-97, 2006.
- [17] Skabrahova P., Svabik J. and Perdikoulis J., “A Non-Isothermal 3D Fem Study of Spiral Mandrel Dies with Non-Symmetrical Input”, SPE Antec Tech. Papers, 1, 305-309, 2003.
- [18] Zatloukal M., TZoganakis C.T., Perdikoulis J., et. al., “Numerical Simulations of Polymer Flow in Flat Spiral Dies, Polym. Eng. Sci., 41, 10, 1683-1694, 2001.
- [19] Tadmor Z. and Gogos C.G., “Principles of Polymer Processing”, 2nd ed., John Wiley & Sons. Inc. Publication, New Jersey, 2006.