

YÜKSEK KAYMA GERİLMELİ KARIŞTIRICILARDA BESLEME HATTI TASARIMININ KARIŞTIRICI PERFORMANSINA ETKİSİ

^{*1}Furkan KORKMAZ ²Selim ÜNAL ²Avni ERTAŞ ²Hasan KARABAY

^{*1} Adapazarı Meslek Yüksekokulu, Mekatronik Programı Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Türkiye

²Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Kocaeli Üniversitesi, Türkiye

Özet

Karıştırma teknolojisi, imalat ve geri dönüşüm sanayisinde önemli bir yer tutmaktadır. Karıştırıcıdaki verim direkt olarak ürün kalitesini etkilemektedir. Katı-Sıvı karışım proseslerinde karşılaşılan en önemli problem topaklaşma iken sıvı-sıvı karışımlarda damlacıkların karışmamasıdır. Bu çalışmada hat içerisinde bulunan yüksek gerilmeli rotor-stator karıştırıcılarda ön karıştırıcı boru tesisatı tasarımının topaklaşmaya ve karışım kalitesine olan etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Farklı tasarımlar bilgisayar destekli analizler ile birlikte karşılaştırılarak tasarımın karışım kalitesine olan katkısı irdelenmiştir. Sıvı-sıvı karışımlarda, ön karıştırma hattının doğru konumlandırılmasının ürünlerin karıştırma hacmine istenilen oranda ulaşmasını ve dolayısıyla karışım kalitesine önemli oranda etki ettiği tespit edilmiştir. Katı-sıvı karışımlarında ise topaklaşma için en kritik noktanın sıvı hattı ile katı besleme hatlarının birleşim noktalarında olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Enerji Verimliliği, Emülsiyon, Rotor-Stator Mikser, Süspansiyon, Yüksek Kayma Gerilmeli Karıştırıcı

FEED LINE DESIGN'S EFFECT OF MIXER'S PERFORMANCE IN HIGH SHEAR MIXER

Abstract

Mixing technology has an important place in manufacturing and recycling industry. Quality of the product is directly affected by yield of mixer. Agglomeration is most important problem in solid-liquid mixing process, the other side the most important problem for liquid-liquid mixing process is droplets not mix. In this study, the effect of pre-mixer piping design on agglomeration and mixture quality in in-line high shear rotor-stator mixer were investigated numerically. Different designs were compared with computer aided analyzes and the contribution of the design to the mixture quality was examined. In liquid-liquid mixtures, it has been found that the correct positioning of the pre-mixing line allows the products to reach the mixing volume at the desired location and thus has an important effect on the quality of the mixture. In the solid-liquid mixtures, it has been determined that the most critical point for agglomeration is at the junction of the solid line and the liquid line.

Keywords: Energy Dissipation, Emulsion, Rotor-Stator Mixer, Suspension, High Shear Mixer.

1. Giriş

Günümüzde karıştırma teknolojisi pek çok üretim ve dönüşüm prosesinde anahtar rol oynamaktadır. Bulundukları proseslerin işlem süresi ve ürün kalitesi öncelikli olarak karıştırma teknolojisine bağlıdır. Karıştırma teknolojisi; kimya, gıda, ilaç, petrokimya, boya, kağıt gibi birçok alanda proseslerin önemli aşamalarında kilit rol oynamaktadır.

Yüksek kayma gerilmeli rotor-stator mikserlerde (RSM); rotorun yüksek hızda rotasyonel hareketi ile oluşan merkezkaç kuvveti sayesinde akışkan merkezden statora doğru hareket eder. Partikül ya da damlacıkların önce rotor-stator arasında kalan boşlukta ardından da statorun açıklıklarında maruz kaldığı hidrolik ve mekanik kuvvetler sayesinde parçalanma ve karışım gerçekleşir. Rotor-stator mikserler 2 şekilde kullanılır. Bunlar; “batch” ve “in-line” olarak adlandırılır. “Batch” mikserlerde karıştırıcı başlık tankın içerisinde bulunur. “In-line” RSM’lerde ise karıştırıcı hat üzerinde bulunur.

Konu üzerine yapılmış olan çalışmalar genel itibari ile akış alanları, güç dağılımı ve karışım kalitesi üzerine gerçekleştirilmiştir. Hall ve ark., hat-ıçi mikserlerde damlacık boyutlarını küçültmek için en uygun karıştırıcı tasarımı üzerine çalışmışlardır. Rotor hızının ve dağılmış faz viskozitesinin kayda değer bir etkisi olduğunu belirlerken, debi, giriş damlacık boyutu, viskozite oranı ve dağılmış faz hacminin karışım kalitesine düşük miktarda etkisi olduğunu tespit etmişlerdir. Ancak enerji verimliliğini arttırmak için debinin yüksek tutulması gerektiği vurgulanan bir diğer noktadır [1] [2].

Hall ve ark., boyutlandırmanın, proses koşullarının, ara yüzey gerilimlerinin ve viskozitenin, güç çizgisi ve parçalanmış ürün dağılımına olan etkisini incelemişlerdir. Tek geçişli bir sistemde farklı 3 tip başlıkla yapılan çalışmada, ürünlerin karıştırma haznesinde kalma süreleri eşit tutulmuştur. Bu sayede karıştırıcının uç kısmındaki rotasyon hızının tasarım açısından en önemli unsur olduğunu tespit etmişlerdir [3]. Deshavar ve Kumar ise bunu doğrular nitelikte olarak, tek tip karıştırıcıyı farklı rotor hızlarında çalıştırarak ortaya çıkan ürün kalitesini karşılaştırmıştır.

Özcan Taşkın ve ark., yapmış oldukları 2 farklı çalışmada, 3 farklı rotor-stator başlık tasarımının topaklaşma oluşumunu engellemeye olan etkilerini incelemişlerdir. Buna göre, statordaki delik çapı ve delik sayısının artması ve rotor-stator arasında kalan boşluğun daraltılması topaklaşmayı etkileyici yönde önemli bir etki göstermektedir. Ayrıca ürünlerin karışım hacminde kalma sürelerinin de ürün kalitesini yüksek oranda etkilediği tespit edilmiştir [4] [5] [6].

Bu çalışmada, yapılmış olan çalışmalara ek olarak boru tesisatı tasarımlarında değişiklik yapılarak hat-ıçi mikserlerde boru tasarımının akış alanlarına ve kayıplara olan etkisi incelenmiştir. Bilgisayar ortamında tasarım 3 boyutlu olarak gerçekleştirilerek, CFD programında çift fazlı sıvı-sıvı karışımların analizi gerçekleştirilmiştir.

2. Hat-İçi Yüksek Kayma Gerilmeli Karıştırıcılar

Hat-ıçi yüksek kayma gerilmeli rotor-stator karıştırıcılar, bir hat üzerinde bulunan rotor-statorun oluşturduğu vakum etkisi sayesinde hat içerisinde bulunan ürünlerin karıştırıcı haznesine ulaşması ve burada rotor-statorun oluşturduğu kayma gerilmesi ile parçalanması prensibi ile çalışırlar. Oluşan yüksek kayma gerilmesi ile partikül ve damlacıkların boyutları mikron mertebesine indirgeyerek karışım kalitesi önemli derece de arttırılmaktadır. Şekil 1’de karıştırıcı başlıklarına birkaç örnek verilmiştir. Rotorun oluşturduğu merkez kaç kuvveti ile ürünler statora doğru hareket eder. Rotor-stator arasında bulunan küçük açıklıkta ve statorun üzerinde bulunan küçük açıklıklar sayesinde parçalanma prosesi gerçekleştirilir.



Şekil 1. Farklı boyutlarda, farklı amaçlarla kullanılan rotor-stator başlıkları

3. Besleme Hattı CFD Analizi

Analizimizde su ve silikon yağı kullanılmıştır. Tablo 1’de suyun ve silikon yağının 25°C’deki yoğunluğu ve viskozitesi belirtilmiştir. Silikon yağı, Newtoniyel bir özellik göstermektedir. Silikon yağlarının viskozitesi sıcaklık ile birlikte hassas bir şekilde değişmektedir. Ancak deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlara göre hat-içi rotor-stator karıştırıcılarda, karışım prosesinde sıcaklık değişiminin çok az miktarda gerçekleştiği tespit edilmiştir [4] [6]. Bu nedenle sıcaklık 25°C sabit tutulmuştur.

Süreklilik Denklemi;

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

Reynold Averaged Navier Stokes denklemi;

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_i u_j}) \quad (2)$$

Bu denklemin kapanması için “Reynold Stress” olarak ifade edilen $-\rho \overline{u_i u_j}$ terimin modellenmesi gerekmektedir. Denklemin kapanması için k-ε Realizable modeli kullanılmıştır. Sıklıkla kullanılan Boussinesq hipotezine göre “Reynold Stress” ifadesi hız gradientleri ile ilişkilendirilebilir;

$$-\rho \overline{u_i u_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \quad (3)$$

K için kullanılan denklem;

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (4)$$

ϵ için kullanılan denklem;

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \epsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 \partial_\epsilon - q C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b + S_\epsilon \quad (5)$$

$$C_{1\epsilon} = \max \left[0,43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right] \quad (6)$$

$$\eta = S \frac{k}{\epsilon} \quad (7)$$

- ρ : Özkütle (kg/m^3)
 η : Dinamik Viskozite (kg/ms)
 μ_t : Türbülans Eddy Viskozitesi (kg/ms)
 σ_ϵ : Türbülans Prandtl Sayısı (Epsilon için)
 σ_k : Türbülans Prandtl Sayısı (k için)

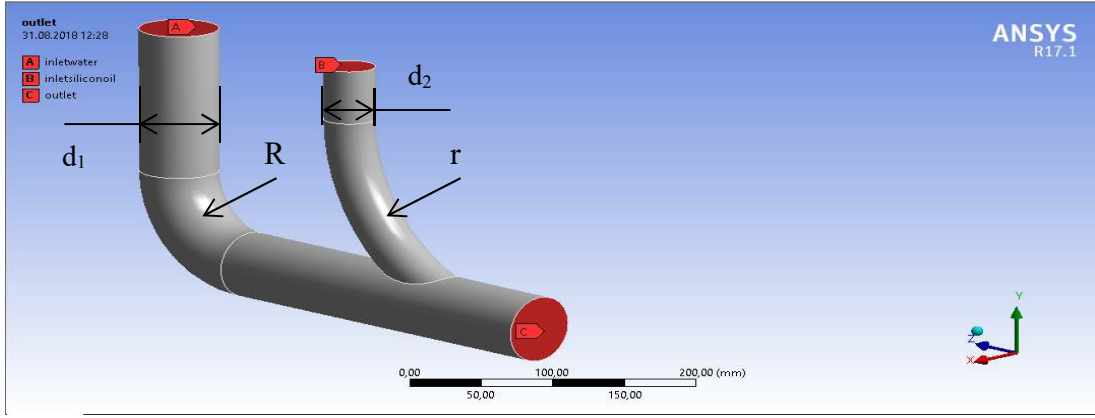
Ortalama hız değişimlerine göre, türbülans kinetik enerjisi “ G_k ”, Buoyancy kuvvetlerine göre türbülans kinetik enerjisi “ G_b ”, dalgalanan dilatasyonun türbülansın genel dağılıma oranına katkısı “ Y_M ” ve kaynak terimi “ S_k ” olarak ifade edilir. Modelde Buoyancy etkileri olmadığı için $C_{1\epsilon}$ sabiti kullanılmamıştır. Diğer sabitler $C_2=1,9$, $\sigma_k=1,0$, $\sigma_\epsilon=1,2$ standart değerler kullanılmıştır. Basınç, Momentum, Türbülans Kinetik Enerjisi ve Türbülans Yayınım Oranı 2. mertebeye kadar ayrıştırılmıştır ve problemin çözümünde sıcaklık sabit tutulduğu için enerji denklemleri çözülmemiştir. Süreklilik ve momentum denklemleri yukarıda ifade edildiği şekilde çözülmüştür. Bu iki denklemi birlikte çözen Coupled çözücü kullanılmıştır.

Tablo 1. 25°C’de silikon yağı ve suyun karakteristik özellikleri

	Yoğunluk [kg/m^3]	Viskozite [$\text{mPa}\cdot\text{s}$]
Su	998,02	0,89
Silikon Yağı	969	969

3.1. Geometrik Özellikler

Çalışmamızda 2 ürün girişine sahip bir besleme hattı tasarımı üzerinde durulmuştur. Şekil 2’de belirtilen “A” girişi su, “B” girişi ise silikon yağının girişi için belirlenmiştir. Analizler 3 boyutlu tasarım üzerinde gerçekleştirilmiştir, ancak sonuçlar yorumlanabilirliğini arttırabilmek adına Besleme Hattı’nın X eksenine göre orta noktasından kesit alınarak YZ düzlemi üzerinde 2 boyutlu olarak verilmiştir. Besleme hattında su girişinin (Ana Hat) çapı (d_1) 56,30mm olarak belirlenmiş iken, silikon yağının girişinin gerçekleştirileceği hat (Ürün Hattı) (d_2) 36,60mm çapına sahiptir. Dirsek eğim değerleri değiştirilerek, besleme hattı tasarımının karışım kalitesine etkisi incelenecektir.



Şekil 2. Besleme hattının 3 boyutlu geometrisi

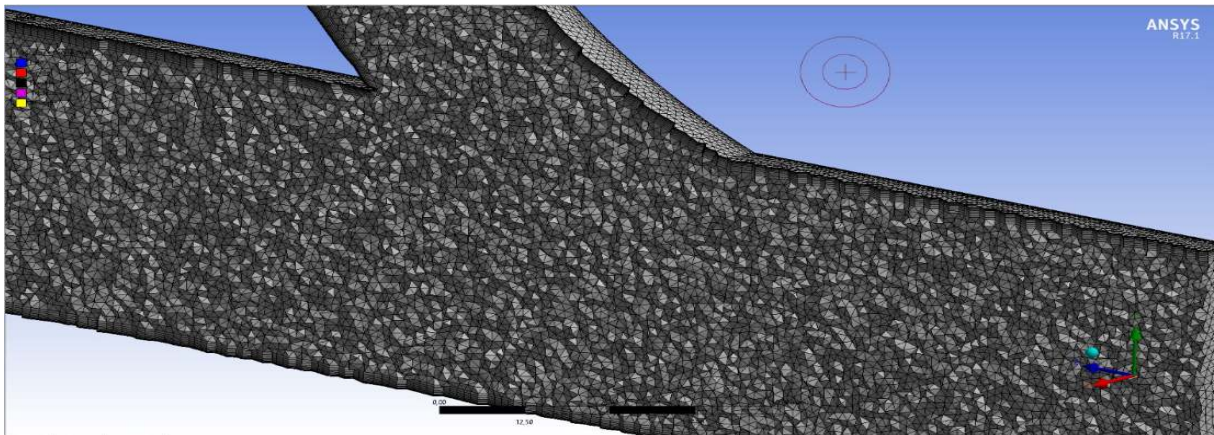
3.2. Sayısal Ağ

Çalışmamızda analiz edilecek geometri için tetrahedral sayısal ağı kullanılmıştır. Şekil 3’de geometri üzerinde gösterilmiş olan bu sayısal ağ tipinin kullanılmasındaki ana sebep her geometriye kolaylıkla uygulanabilmesi ve geometri üzerinde ekstradan işlem gerektirmemesidir.

Geometrinin boyutları göz önüne alındığında analiz süresi çok önemli bir etken olmamaktadır. Hız vektörlerinin özellikle sınır tabaka yakınında hareketini gözlemleyebilmek için sık sayısal ağ tanımlanmıştır. Bunun için Gövde Boyutlandırma ile geometrideki sayısal ağ boyutunun 1,5 mm olması sağlanmıştır.

Sınır tabakası için 10 adet sınır tabaka katmanı kullanılarak y^+ değeri düşürülmeye çalışılmıştır. Bununla birlikte sıvıların kesişim bölgesindeki akış alanı için daha doğru yaklaşım sağlanmıştır.

Dik ürün hattına sahip tesisat tasarımı için 1.720.323 eleman 412.113 düğüm noktası, 43,6mm dirsek yarıçapına sahip tasarım için ise 1.749.284 eleman 419.351 düğüm noktası kullanılmıştır.



Şekil 3. Besleme hattının sayısal ağ görünümü

3.4. Sınır Şartları

Tesisatın debisine üretici firmaların katalogları ve belirlemiş olduğumuz hattımızın çapı referans alınarak 6-7 kg/s olarak ele alınmış [10], bu doğrultuda su ve silikon yağı için hız girişi (velocity inlet) şartı tanımlanmıştır.

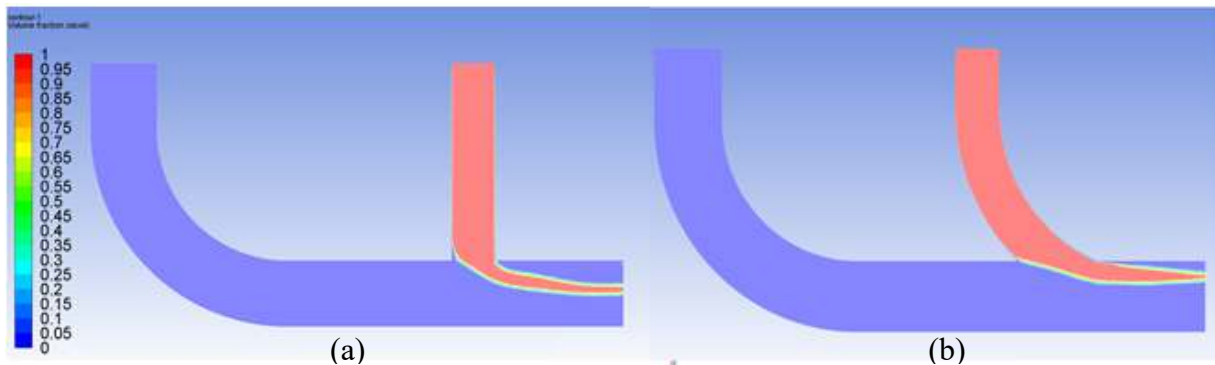
Çıkış sınır şartı olarak 1 atm atmosfer basıncı kullanılmıştır (Pressure Outlet).

Türbülans yoğunluğu (intensity) %5 ve Hidrolik çap (Hydraulic Diameter) 56,3 mm girilmiştir. Türbülans modeli olarak k-ε Realizable modeli standart duvar fonksiyonu ile kullanılmıştır.

Sonuçlar

Bu çalışmada bir geometriye ait iki kısmın karışım kalitesine olan etkisi ayrı ayrı incelenmiştir. Bunlardan ilki, ürün hattının dik ve eğimli olan tasarımlarının karışım kalitesine olan etkisidir. Şekil 3’de verilmiş olan geometri üzerinde yapılan 3 boyutlu analiz sonucunda elde edilen su ile silikon yağının faz karışımı Şekil 4’de 2 boyutlu olarak gösterilmiştir.

Karıştırıcı performansını etkileyen hususların başında, karışım malzemelerinin belirlenmiş formüle uygun olarak karışıma eklenmesidir. Bu nedenle katılan ürünlerin karışım hacmine eşit miktarda ulaşması gerekmektedir. Ana hat ile ürün hattının birleşim noktası Şekil 5’de görüldüğü gibi dik ve eğimli ($r=43,6\text{mm}$) tasarımlar olarak gözlemlendiğinde; dik ürün hattına sahip tasarımda, ürünün ana hattın merkezine doğru hareket ettiği ve ana hat üzerinde iki akışkanın eşit miktarda akış dağılımı gerçekleştiremediği tespit edilmiştir. Eğimli olan tasarımda ise akışkanın ana hat üzerinde üst bölümde besleme hattından gelen ürüne paralel bir akış sergilediği tespit edilmiştir. Bu sonuçlara sıvı-sıvı ürünlerin karışım analizleri üzerinden ulaşılmıştır. Ancak bu sonuçlara göre katı-sıvı karışımlardaki en önemli problem olan topaklaşma hakkında yorum yapmakta mümkündür. Şekil 4a’daki gibi dik bir tasarımda ürün hattından gelen ürünün ana hattın merkezine doğru hareket etme eğiliminde olması, ana hat üzerinde topak oluşumu riskini oldukça arttırmaktadır. Aynı zamanda da ürünlerin karışım hacmine eşit miktarda ulaşmasına da engel olacaktır. Şekil 4b’de olduğu gibi eğimli bir tasarım ile besleme hattında oluşabilecek olası topaklaşma durumunun önüne geçilebilir.

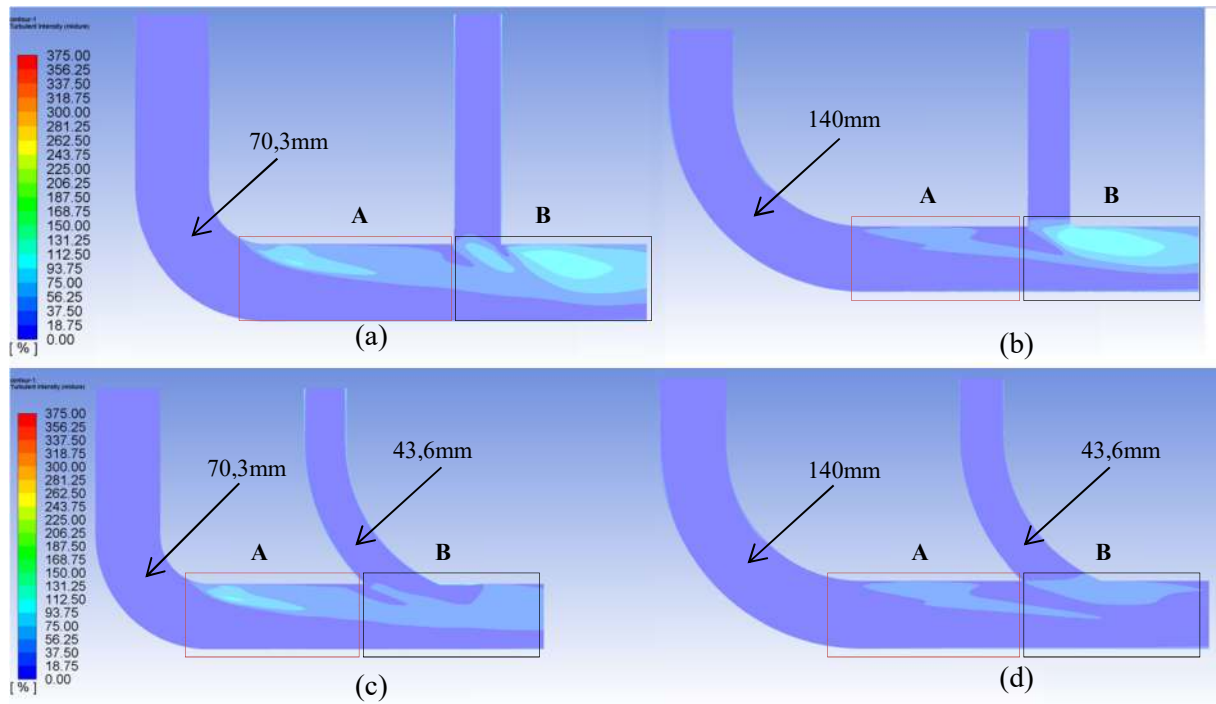


Şekil 4. Ürün hattının a)dik ve b)eğimli ($r=43,6\text{mm}$) tasarımlarının karışıma olan etkisi

Şekil 5’de besleme hattına ait 4 farklı tasarımın 3 boyutlu analiz sonuçları verilmiştir. Şekil 5a ve Şekil 5b’de ürün hatları dik olarak tanımlanmıştır. Besleme hattının dirsek yarıçapları, 70,3mm ve 140mm olarak alınmıştır. Ürün hattının dik olmasından dolayı, türbülans yoğunluğu ürün hattı ile ana hattının birleşim noktası olan B bölgesinde önemli derecede artmaktadır. Ürün hattının dirsek eğiminin artırılması ile birlikte A bölgesinde türbülans yoğunluğu azalmaktadır, B bölgesinde ise türbülans yoğunluğu azalmanın aksine daha geniş bir alanda yüksek türbülans yoğunluğu görülmektedir.

Şekil 5c ve Şekil 5d’de ise ürün hattında 43,6mm’lik bir dirsek yarıçapı tanımlanmıştır. Başlangıçta ürün hattının tasarımını eğimli bir şekilde gerçekleştirmenin türbülans yoğunluğuna olan etkisi açık bir şekilde görülmektedir. Dirsek yarıçapı sabit tutularak Şekil 5d’de dirsek yarıçapı 70,3mm’den 140mm’ye artırılarak türbülans yoğunluğunun hem A bölgesinde hem de B bölgesinde oldukça azaltılabileceği tespit edilmiştir. Özellikle Şekil 5b ile Şekil 5d arasındaki fark türbülans yoğunluğunun azaltılması için dirsek yarıçaplarının önemini göstermektedir.

Türbülans yoğunluğunun artması, karışım prosesinde önemli bir enerji kaybına neden olmaktadır. Besleme hattı üzerinde oluşan türbülans bölgesinde kavitasyon oluşum riski artmaktadır. Ayrıca ürünlerin karışımına istenilen oranda karışamama riski doğacaktır. Dirsek yarıçapı değeri gerek besleme hattı için gerekse ürün hattı için artırıldığında türbülans yoğunluklarının azaldığı, dolayısıyla bahsi geçen risklerin azaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 5. Farklı tasarımlar için türbülans yoğunluğundaki değişim

REFERANSLAR

- [1] Hall S, Cooke M, El-Hamouz A, Kowalski AJ. Droplet break-up by in-line silverson rotor–stator mixer. *Chemical Engineering Science* 2011;66:2068-79.
- [2] Rodgers TL, Cooke M. Rotor–Stator devices: the role of shear and the stator. *Chemical Engineering Research and Design* 2012;90:323-7.
- [3] Hall S, Pacek AW, Kowalski AJ, Cooke M, Rothman D. The effect of scale and interfacial tension on liquid–liquid dispersion in in-line silverson rotor–stator mixers. *Chemical Engineering Research and Design* 2013;91:2156-68.
- [4] Özcan Taşkın GN, Kubicki D, Padron G. Power and flow characteristics of three rotor-stator heads. *The Canadian Journal of Chemical Engineering* 2011;89:1005-17.
- [5] Özcan Taşkın GN, Padron GA, Kubicki D. Comparative performance of in-line rotor-stators for de-agglomeration. *Chemical Engineering Science* 2016;156:186-96.
- [6] Padron GA, Özcan Taşkın GN. Particle de-agglomeration with an in-line rotor-stator mixer at different solids loadings and viscosities. *chemical engineering research and design* 2018;132:913-21.
- [7] Deshavar VD, Kumar V. Hydrodynamics and mixing characterization in a novel high shear mixer. *Chemical Engineering & Processing: Process Intensification* 2017;120:57-67.
- [8] Çengel YA, Cimbala JM. *Akışkanlar mekaniği: temelleri ve uygulamaları*, 1. Baskı, İzmir: Güven Kitabevi, 2008.
- [9] Paul EL, Atiemo-Obeng VA, Kresta SM. *Handbook of industrial mixing*, 4th ed. New Jersey. John Wiley & Sons. 2004.
- [10] <http://www.ikausa.com/wp-content/uploads/2016/02/IKA-Process-technology.pdf> (Ziyaret tarihi: 10 Mayıs 2018).