

DÜZ ve EĞİK DİKDÖRTGEN DİŞLİ LABİRENT SIZDIRMAZLIK ELEMANLARININ DÜZ ve BALPETEKLİ STATOR UYGULAMASINDA KAÇAK DEBİ PERFORMANSI

Yahya DOĞU¹, Abdulkadir YALÇINKAYA², Uğur Baran TÜRKMEN³, Gürkan ERTUĞRAL⁴

Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Yahşihan, Kırıkkale

ÖZET

Sızdırmazlık elemanları, sabit stator ve dönen rotor ikilisinin bulunduğu tüm turbomakina uygulamalarında kullanılmaktadır. Yüksek ve düşük basınç bölgeleri arasında rotor-stator ikilisi üzerinde en yaygın kullanılan labirent sızdırmazlık elemanı; rotora yerleştirilen dişler, dişler arasındaki boşluklar ve düz veya balpetekli stator yüzeyinden oluşmaktadır. Bu çalışmada, dişler ile stator arasındaki açıklıktan kaçan debinin kontrolü/azaltılması için; dikdörtgen kesitli dişlerin düz veya eğik yerleştirilmesinin etkileri hem düz stator yüzeyi için ve hem de balpetekli stator yüzeyi için incelenmiştir. Dikdörtgen diş eğimleri; 30°, 45°, 60°, 75°, 90° olarak alınmıştır. Diş-stator açıklığı; tipik uygulama değerlerini genişçe kapsayacak şekilde 0,127-0,254-0,381-0,508 mm olarak incelemeye bir diğer inceleme parametresi olarak dahil edilmiştir. İncelemelerde labirent keçenin yüksek ve düşük basınç taraflarındaki basınçların oranı olarak; uygulamadaki aralıklar dikkate alınarak 1,5 değeri alınmıştır. Bu geometrik konfigürasyonlar ve çalışma şartları için kaçak debiler HAD analizleri ile hesaplanmıştır. HAD analizleri; 2-B eksenel simetrik koordinatlarda, sürekli rejimde ve sabit rotor durumu için yapılmıştır. Balpetekleri 2-B olarak modele dahil edilmiştir. Sıkıştırılabilir hava akışı için k-epsilon türbülans modeli kullanılmıştır. Sonuç olarak, dikdörtgen diş eğim açısının kaçak debiye etkisi düz stator ve balpetekli stator için belirlenmiştir. Düz stator uygulamasında incelenen açıklıklar için (0,127-0,254-0,381-0,508 mm) en düşük kaçak debiyi veren eğim açıları sırasıyla 60°, 75°, 45°, 30° olarak belirlenmiştir. Yani, açıklık ile en düşük debiyi veren eğim açısı ters orantılı olarak değişmektedir. Balpetekli stator uygulamasında ise; eğim açısı yanında, eğime göre diş-petek duvarı konumlanması ile kısılma miktarının ve petek gözlerindeki girdaplarla birlikte kavite girdaplarının form değişikliklerinin de kaçak debi üzerinde etkisi bulunmaktadır. Dolayısıyla, hangi eğim açısının kaçak debiyi azaltmada daha etkin olacağı diş-petek konumlanmalarına da bağlı olmaktadır.

GİRİŞ

Turbomakinalarda sızdırmazlık elemanları rotor-stator ve stator-stator arasındaki yüksek ve alçak basınç bölgeleri geçişlerindeki kaçak debiyi kontrol etmek amacıyla kullanılır. Bu amaçla kullanılan en yaygın sızdırmazlık elemanı labirent dişler ve dişler arasındaki labirent boşluklardan oluşan labirent keçelerdir. Labirent keçe uygulamalarında dişlerin eğik hale getirilmelerinin etkisi hakkında açık literatürde oldukça sınırlı çalışma bulunmaktadır.

¹ Prof. Dr., Makina Mühendisliği Bölümü, E-posta: yahya.dogu@hotmail.com

² Yüksek Lisans Öğrencisi, E-posta: abdulcadir0671@outlook.com

³ Yüksek Lisans Öğrencisi, E-posta: ugurbaran41@hotmail.com

⁴ Lisans Öğrencisi, E-posta: gurkan.ert@outlook.com

Düz bir stator için labirent diş eğim açısının kaçak debiye etkisi konik dişler için detaylı olarak Dağıdır [Dağıdır, 2018] tarafından HAD analizleri ile incelenmiştir. Dişler yüksek basınç tarafına doğru eğimlendirildikçe açıklığa bağlı olarak %7'ye kadar kaçak debide azalma olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, yüksek basınç tarafındaki ilk dişin eğik olmasının kaçak debi azaltılmasında etkin olduğu belirlenmiştir.

Düz ve balpetekli bir stator yüzeyi için yapılan HAD analizleri ile konik ve çentikli dişlerin kaçak debiye etkisi incelenmiştir [Chougule, Mirzamoghadam, 2015]. Çentikli dişlerin %12,5'e kadar kaçak debiyi azalttığı belirtilmiştir.

Dogu ve arkadaşları [Dogu ve arkadaşları 2016, 2017, 2017] ve Sertçakan [Sertçakan, 2017] tarafından yapılan detaylı çalışmalarda labirent dişte ve statorda çalışma esnasında oluşan aşınmaların kaçak debiye etkileri HAD analizleri ile belirlenmiştir. Aşınma durumuna göre kaçak debideki değişimler hesaplanmıştır.

Gezer [Gezer, 2018] ise 3B HAD analizleri ile balpeteği geometrisinin ve çalışma şartlarının kaçak debideki etkilerini incelemiştir. Farklı büyüklükteki bal petekleri farklı çalışma şartlarında analiz edilmiştir.

Bu HAD analizleri yanında düz labirent keçe kaçak debisinin hesaplanması için geometri ve çalışma şartlarına bağlı değişik korelasyonlar geliştirilmiştir [Martin, 1908; Vermes, 1961; Zimmerman, Wolff, 1987]. Bu korelasyonlar düz diş uygulamaları içindir.

Düz dişin düz ve balpetekli stator ile uygulanması konusunda literatürdeki çalışma sayısı fazla iken eğik diş uygulaması konusunda çalışma sayısı sınırlı kalmıştır.

Bu çalışmada, rotora yerleştirilen eğik dişlerin kaçak debi üzerindeki etkileri hem düz stator hem de bal petekli stator için incelenmiştir. Stator tarafında yerleştirilen bal peteği yapının, motorun geçici rejimdeki radyal ve aksenal genleşmelerini tolere edebilecek aşınabilirliği sağlamanın yanında yüzeydeki balpeteklerinin oluşturacağı girdaplar sayesinde de kaçak debiyi azaltma potansiyeli vardır.

İncelemede dikdörtgen diş eğimleri 30°, 45°, 60°, 75°, 90° olmak üzere 5 farklı eğim göz önüne alınmıştır.

Ayrıca; diş-stator açıklığı; tipik uygulama değerlerini genişçe kapsayacak şekilde 0,127-0,254-0,381-0,508 mm olmak üzere 4 farklı açıklık incelenmiştir.

İncelemelerde labirent keçenin yüksek ve düşük basınç taraflarındaki basınçların oranı olarak; uygulamadaki aralıklar dikkate alınarak 1,5 değeri alınmıştır.

İncelemeye dahil edilen tüm parametreler ve değerlerinin listelendiği inceleme matrisi Tablo 1'de gösterilmiştir. Ayrıca, komple analiz matrisi Tablo 2'de gösterilmiştir.

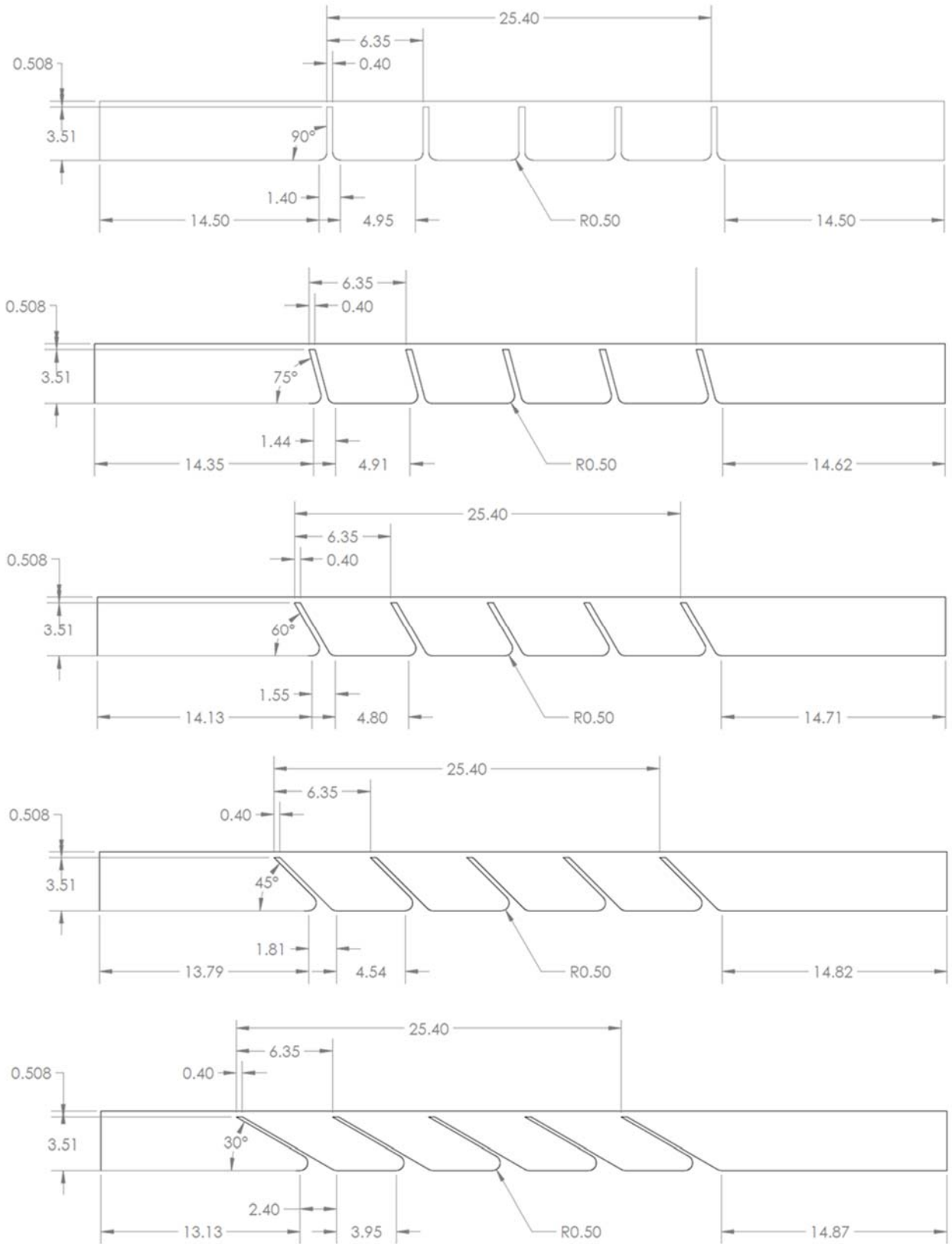
Düz stator uygulaması için eğik dişlerin geometrileri 0,508 mm açıklık için Şekil 1'de gösterilmiştir. Balpetekli stator uygulaması için ise Şekil 2'de gösterilmiştir. Balpeteği boyutu tipik bir uygulama değeri olarak 1,59 mm alınmıştır. Balpetekli stator uygulamasında, analiz matrisindeki analiz sayısının aşırı artmasından dolayı balpeteğinin etkisini temsili olarak görebilmek amacıyla sadece 0,254 mm açıklık çalışılmıştır.

Tablo 1. İnceleme parametreleri ve değerleri

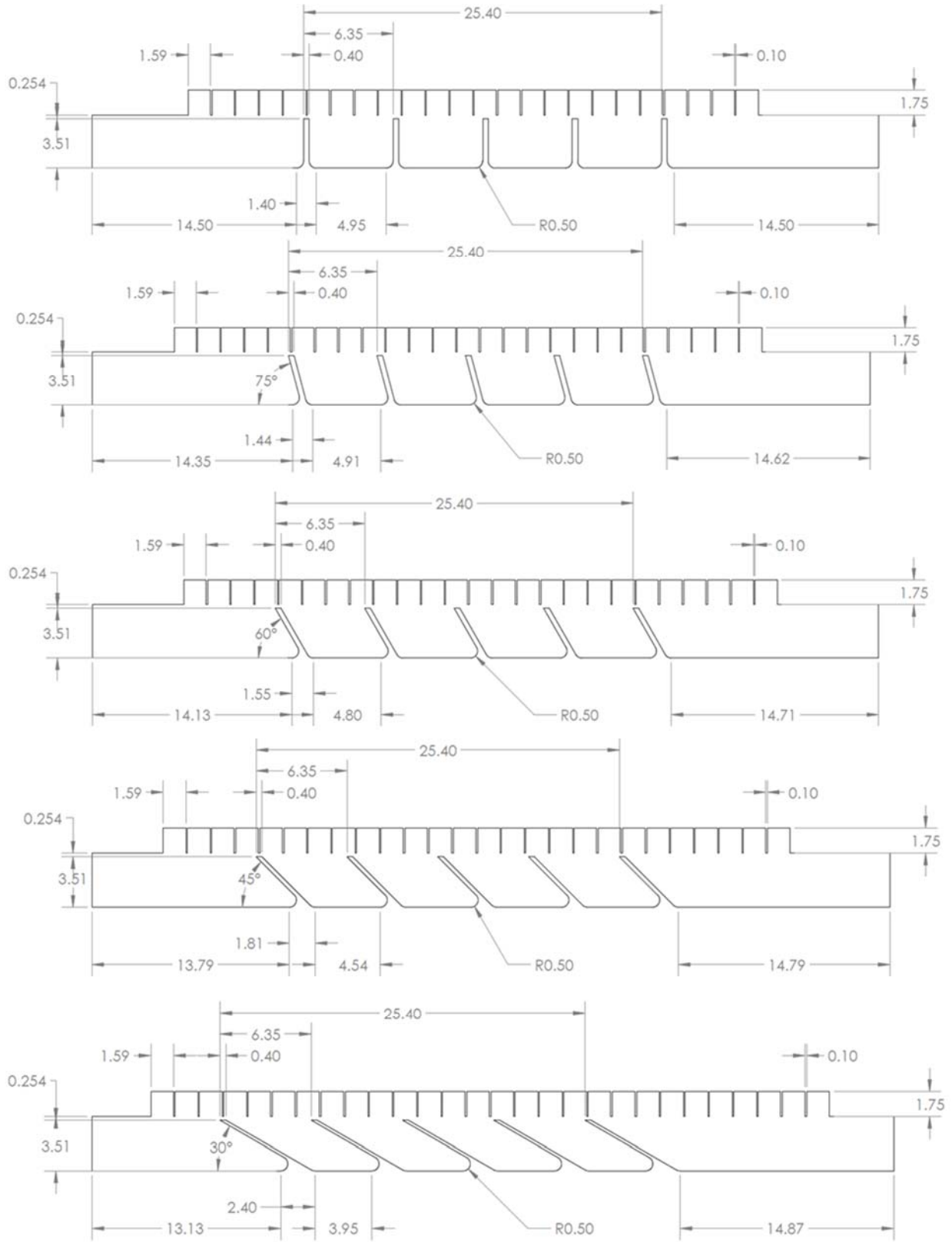
Analiz parametreleri					
Eğim açısı (°)	30	45	60	75	90
Açıklık (mm)	0,127	0,254	0,381	0,508	
Stator	düz	balpeteği			
Basınç oranı	1,5				
Devir sayısı	0				
Balpeteği boyutu (mm)	1,59				

Tablo 2. Analiz matrisi

Analiz matrisi						
Analiz	Stator	Açıklık (mm)	Diş eğim açısı (°)	Basınç oranı	Devir sayısı	Petek boyutu (mm)
1	düz	0,127	90	1,5	0	1,59
2	düz	0,127	75	1,5	0	1,59
3	düz	0,127	60	1,5	0	1,59
4	düz	0,127	45	1,5	0	1,59
5	düz	0,127	30	1,5	0	1,59
6	düz	0,254	90	1,5	0	1,59
7	düz	0,254	75	1,5	0	1,59
8	düz	0,254	60	1,5	0	1,59
9	düz	0,254	45	1,5	0	1,59
10	düz	0,254	30	1,5	0	1,59
11	düz	0,381	90	1,5	0	1,59
12	düz	0,381	75	1,5	0	1,59
13	düz	0,381	60	1,5	0	1,59
14	düz	0,381	45	1,5	0	1,59
15	düz	0,381	30	1,5	0	1,59
16	düz	0,508	90	1,5	0	1,59
17	düz	0,508	75	1,5	0	1,59
18	düz	0,508	60	1,5	0	1,59
19	düz	0,508	45	1,5	0	1,59
20	düz	0,508	30	1,5	0	1,59
21	balpeteği	0,254	90	1,5	0	1,59
22	balpeteği	0,254	75	1,5	0	1,59
23	balpeteği	0,254	60	1,5	0	1,59
24	balpeteği	0,254	45	1,5	0	1,59
25	balpeteği	0,254	30	1,5	0	1,59



Şekil 1. Düz stator için eğik diş geometrileri (0,508 mm açıklık)



Şekil 2. Balpetekli stator için eğik diş geometrileri (0,254 mm açıklık)

YÖNTEM

Labirent keçe için belirlenen tüm geometrik konfigürasyonlar ve çalışma şartları için kaçak debiler HAD analizleri ile hesaplanmıştır. HAD analizleri; 2-B eksenel simetrik koordinatlarda, sürekli rejimde ve sabit rotor durumu için yapılmıştır. Balpetekleri 2-B olarak modele dahil edilmiştir. Sıkıştırılabilir hava akışı için k-epsilon türbülans modeli kullanılmıştır.

HAD analizlerinde rotor sabit alınmıştır. Gerçekte rotor çalışma şartlarına bağlı olarak belli devir sayısında dönmektedir. Dönmenin kaçak debiye etkisinin düşük mertebelerde olduğu bilinmektedir [Sertçakan, 2017]. Bu gerçek bilinmekle birlikte, sızdırmazlık elemanlarının kaçak debi karşılaştırmaları daha çok bir referans durum olarak sabit rotor için yapıldığından bu çalışmada rotor sabit alınmıştır. Mevcut HAD analiz matrisi oldukça geniştir. İlaveten rotor dönme hızının incelenmesi matrisi daha da genişletecektir. Takip eden çalışmalarda rotor dönme hızının etkisinin incelenmesi planlanmaktadır.

Yöntemsel olarak bir diğer konu; balpeteği uygulamaları, balpeteklerinin açılal yönde tekrar eden bir geometrilerinin dikkate alınacağı 3-B bir HAD modeli gerektirir. Bu çalışmadaki 2-B eksenel simetrik modelde balpetekleri 2-B olarak dikkate alınmıştır ki bu durumda hesaplaman kaçak debinin 3-B HAD modeli ile çok yakın olduğu bilinmektedir [Gezer, 2018].

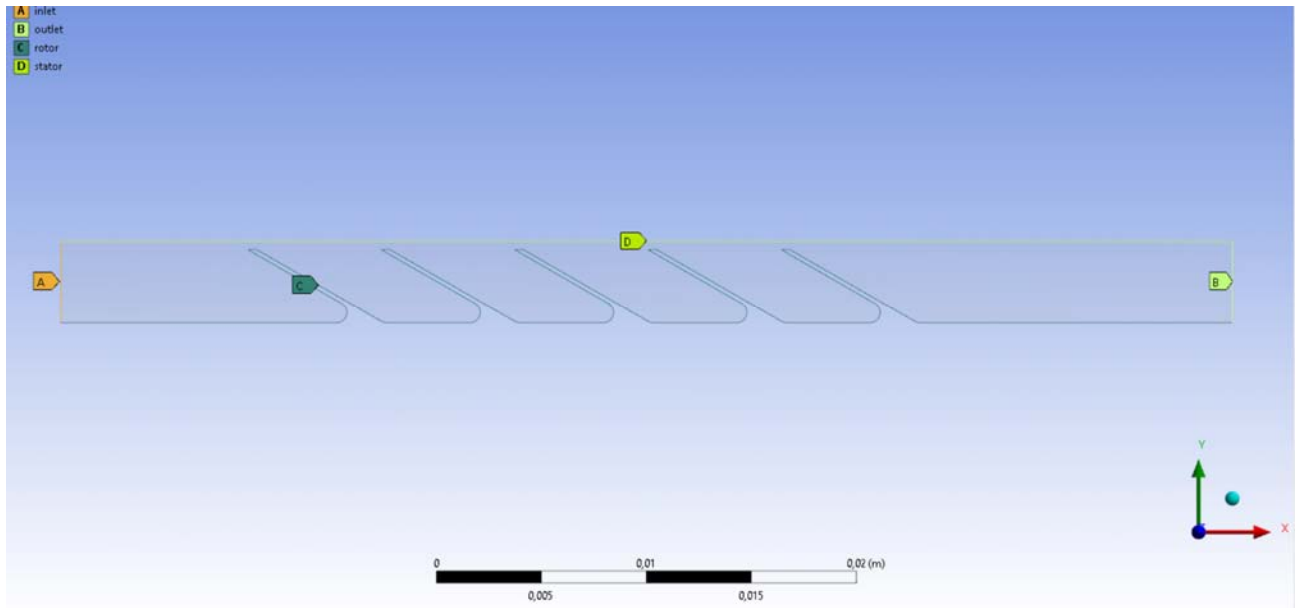
HAD model bölgesi ve uygulanan sınır şartları Şekil 3'de gösterilmiştir. HAD model bölgesinde bulunan toplam 4 sınır bölgesi aşağıda listelenmiştir:

- A) Giriş (Inlet)
- B) Çıkış (Outlet)
- C) Stator (Wall)
- D) Rotor (Wall)

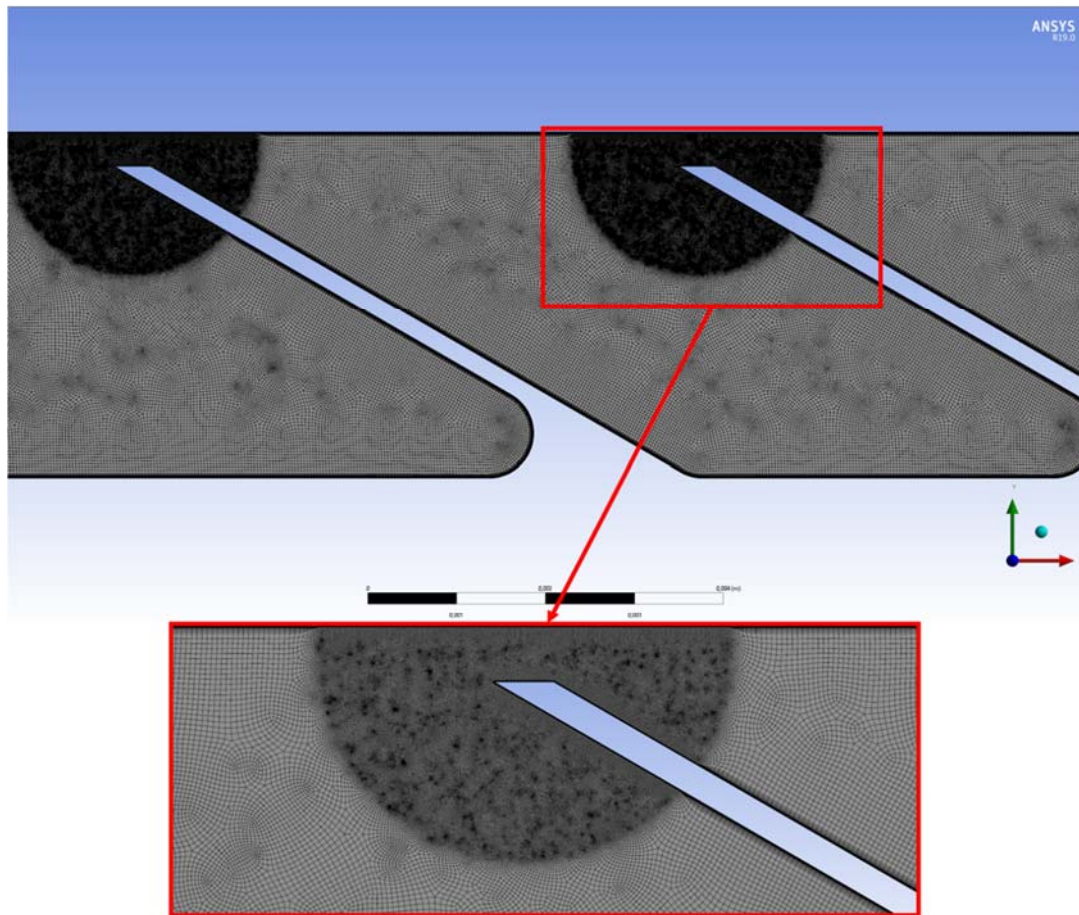
Bu sınır bölgelerinde aşağıda açıklanan sınır şartları uygulanmıştır.

- A) Giriş (Inlet): Hava girişi olan bu bölgede toplam basınç (151987,5 Pa) ve sıcaklık (298 K) tanımlanmıştır. Çıkış basıncı atmosfer basıncı (101325 Pa) tanımlandığından buradaki giriş basıncı basınç oranı 1,5 olacak şekilde belirlenmiştir.
- B) Çıkış (Outlet): Çıkış basıncı statik basınç olarak atmosfer basıncı (101325 Pa) tanımlanmıştır.
- C) Stator (Wall): Stator, adyabatik sabit duvar olarak tanımlanmıştır.
- D) Rotor (Wall): Rotor, yine adyabatik sabit duvar olarak tanımlanmıştır.

HAD analizlerinde kullanılan tipik çözüm ağı (mesh) yapısı Şekil 4'de gösterilmiştir. Mesh yapısı olarak dikdörtgensel (quadrilaterel) mesh kullanılmıştır. Mesh oluşturulurken tüm stator ve rotor yüzeylerinde ince bir tabakada (inflation layer) daha yoğun mesh oluşturulmuştur. Ayrıca dış üstlerindeki kısılma bölgelerine yerleştirilen küresel bölgelerde de (sphere of influence) daha yoğun mesh kullanılmıştır. Mesh sayısından bağımsız bir çözüm elde edilmesi için yapılan tekrarlı analizler neticesinde, analizlerdeki mesh sayılarının yaklaşık 500000 seviyelerinde olmasının yeterli olacağı görülmüştür.



Şekil 3. HAD model bölgesi ve sınır şartı bölgeleri



Şekil 4. HAD modeli tipik çözüm ağı (mesh) yapısı

UYGULAMALAR

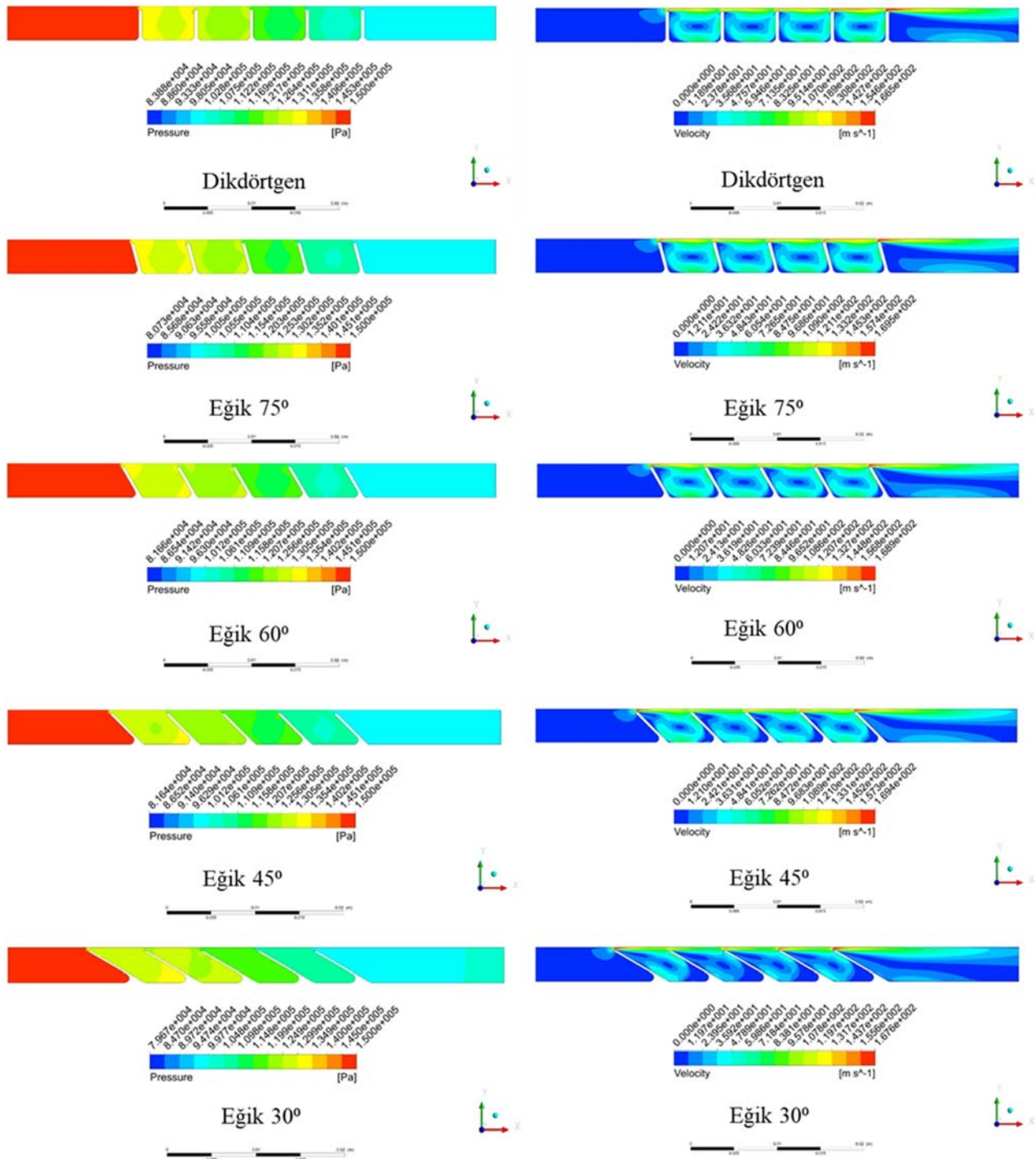
Labirent keçe için Tablo 2'deki verilen analizler çalıştırılmış be kaçak debiler hesaplanmıştır. Ayrıca, tüm akış bölgesindeki akış özellikleri de elde edilmiştir. Aşağıda elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

Düz stator sonuçları:

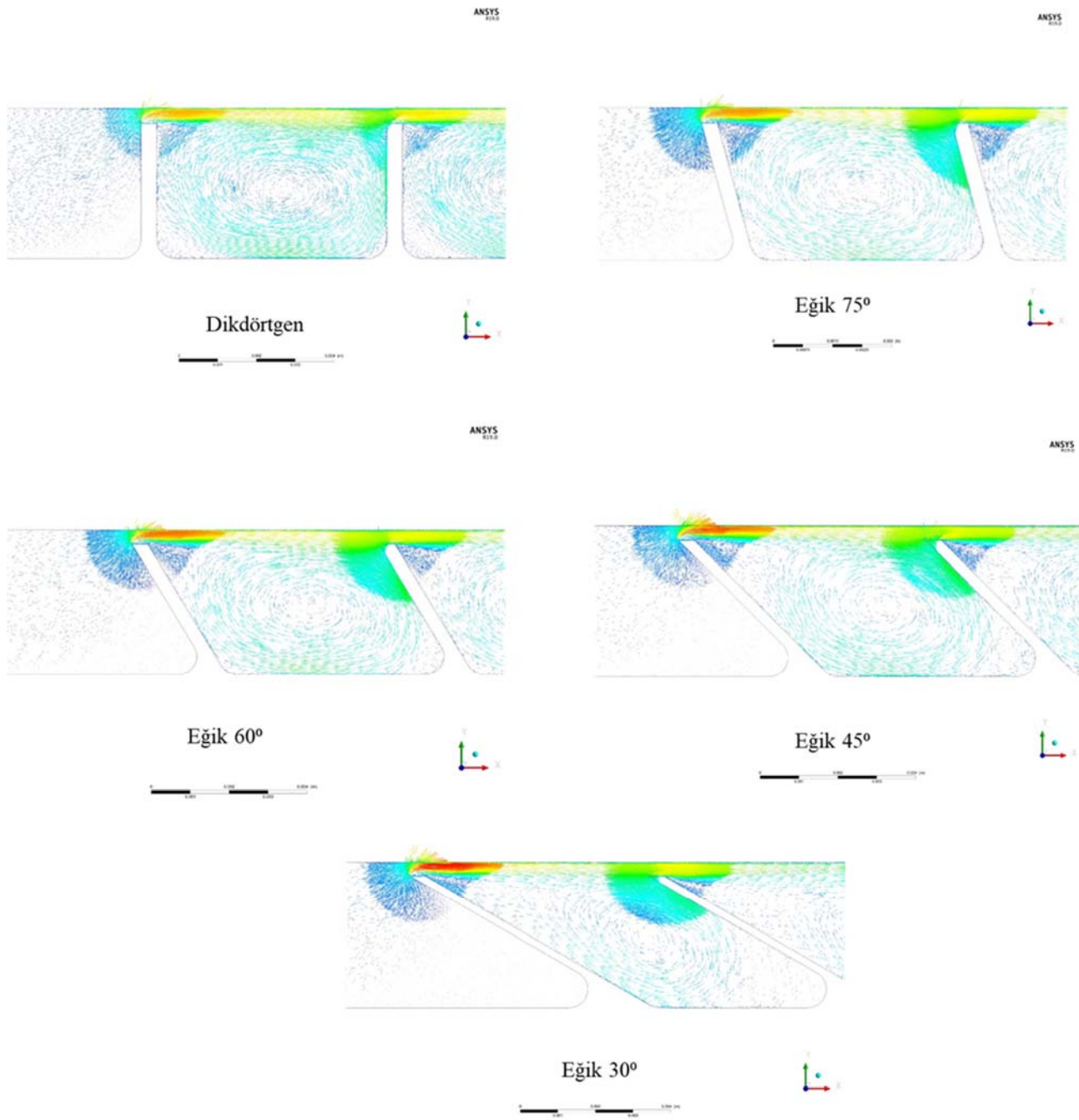
Labirent keçede oluşan akış formu, düz stator durumunda 0,508 mm açıklık için Şekil 5'da basınç ve hız dağılımı ve Şekil 6'da hız vektörleri çizilerek görsellenmiştir. Basınç dağılımından, basıncın ilk dişten son dişe doğru düştüğü görülmektedir. Hız dağılımında ise diş üstündeki kısılma bölgelerinde artan hız ve dişler arasındaki boşluklardaki girdaplar görülmektedir. Bu hız oluşumu Şekil 6'daki hız vektörlerinde de görülmektedir.

Labirent keçe boyunca basınç giriş basıncından çıkış basıncına düşmektedir. Her bir diş kısılma bölgesinde oluşan basınç düşmesinin görsellenmesi amacıyla diş üstündeki açıklığın ortasından geçen eksenel çizgideki basınç ve hız dağılımı düz stator uygulamasındaki 0,508 mm açıklık için sırasıyla Şekil 7 ve Şekil 8'de gösterilmiştir. İlk dişten son dişe doğru basınç kademeli olarak düşmektedir. En yüksek basınç yükünü ilk diş almaktadır. Ardından en yüksek basınç düşmesi son dişte oluşmaktadır. Diş eğimine bağlı olarak basınç dağılımlarında farklılıklar görülmektedir.

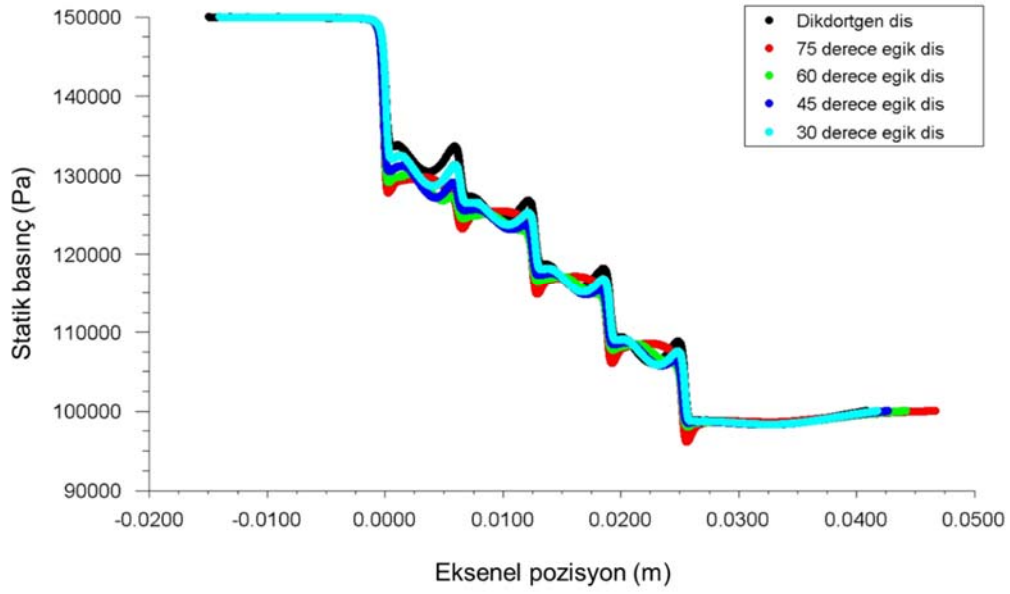
Düz stator için debinin diş eğimine ve açıklığa göre değişimi Şekil 9'da gösterilmiştir. Öncelikle tüm eğik dişler için artan açıklıkla debi artmıştır. Eğim açısının etkisi farklı açıklıklarda farklı olarak oluşmuştur. Düz yani 90° açılı dişe göre debinin düşük olduğu eğim açıları farklı açıklıklar için farklı değerlerde gerçekleşmiştir. Dolayısıyla hangi diş eğim açısının faydalı olacağı yani kaçak debiyi azaltacağı açıklığa göre değişmektedir. Şekil 9'da görüldüğü gibi, 0,127-0,254-0,381-0,508 mm açıklıklar için en düşük kaçak debiyi veren eğim açıları sırasıyla 60°, 75°, 45°, 30° olarak belirlenmiştir. Yani, açıklık ile en düşük debiyi veren eğim açısı ters orantılı olarak değişmektedir.



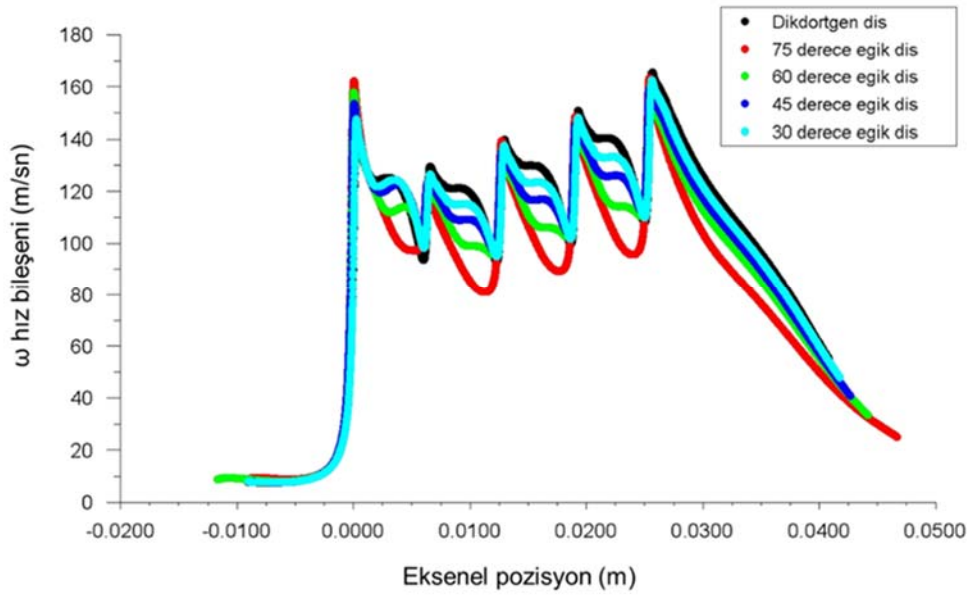
Şekil 5. Statik basınç ve hız dağılımları (Düz stator, 0,508 mm açıklık)



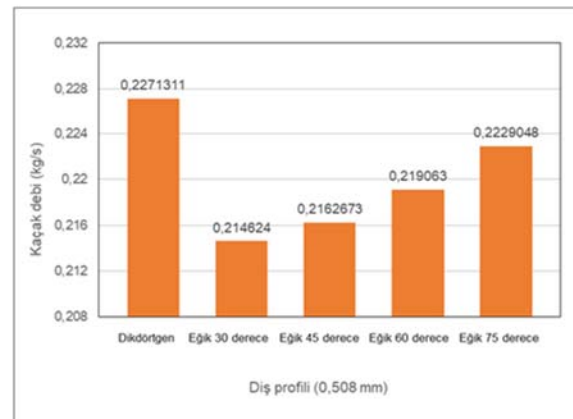
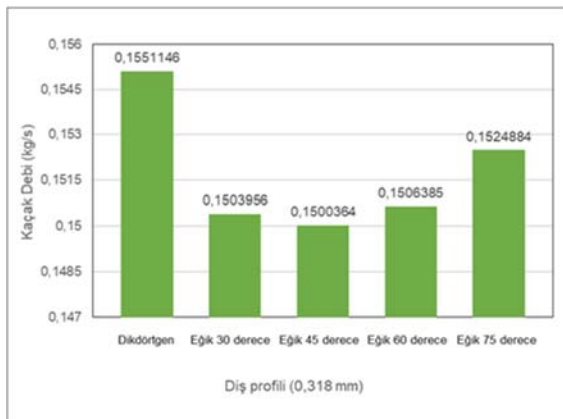
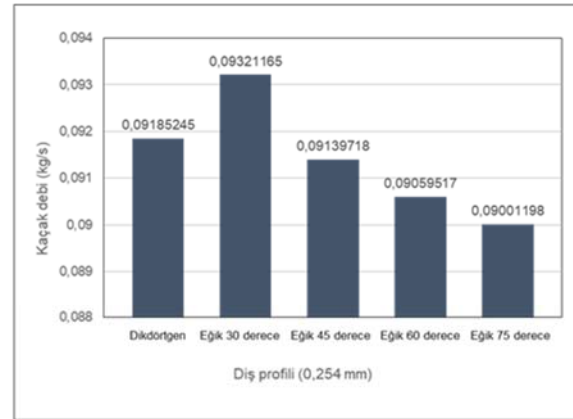
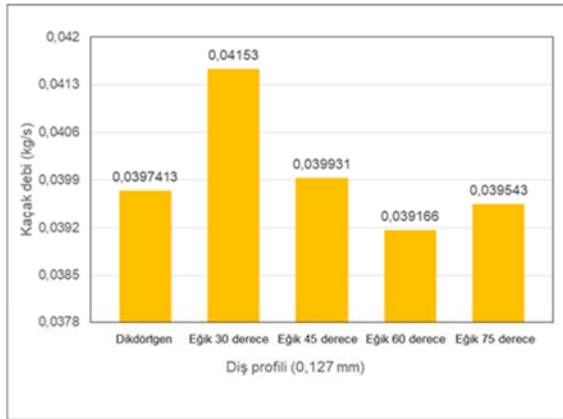
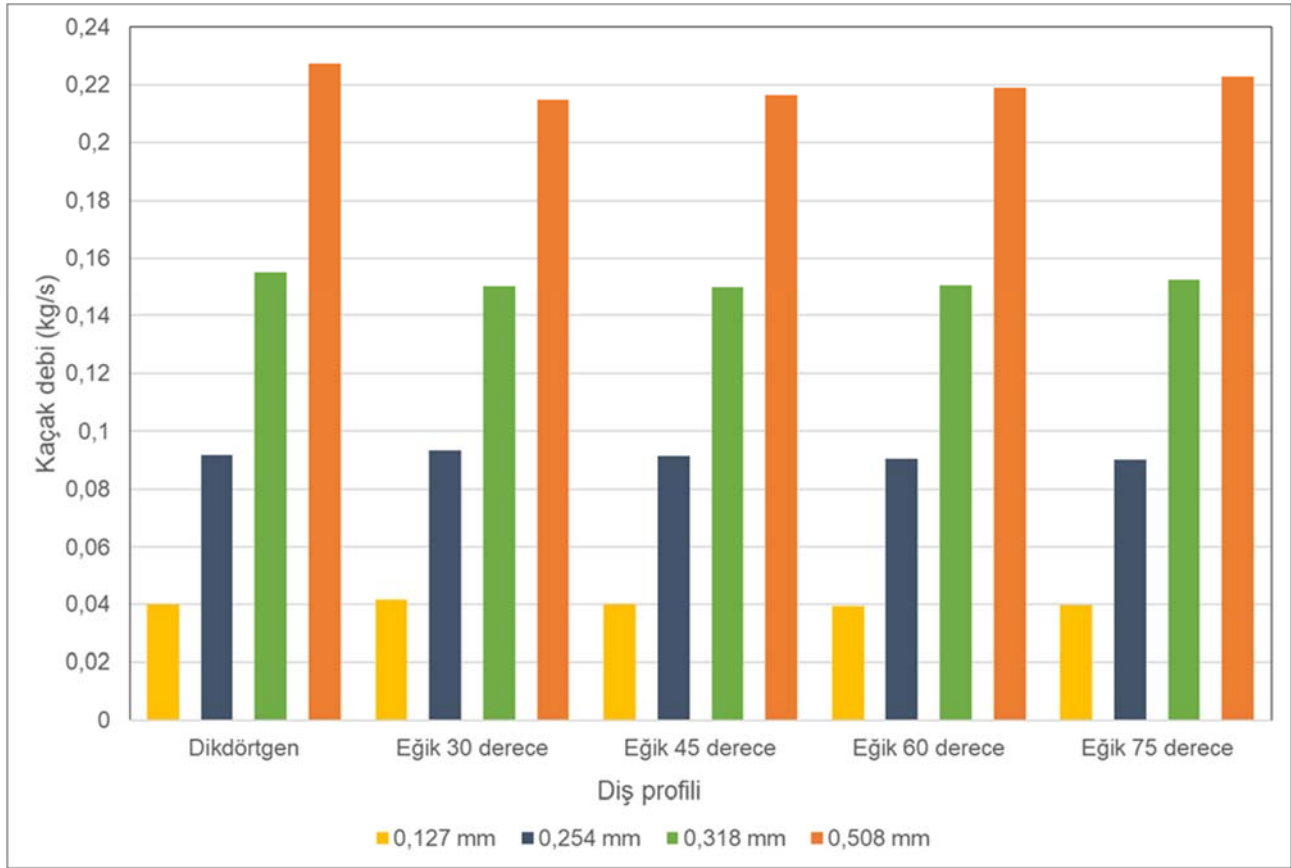
Şekil 6. Hız vektörleri (Düz stator, 0,508 mm açıklık)



Şekil 7. Açıklık ortasındaki aksel çizgideki basınç dağılımı (Düz stator, 0,508 mm açıklık)



Şekil 8. Açıklık ortasındaki aksel çizgideki aksel hız dağılımı (Düz stator, 0,508 mm açıklık)



Şekil 9. Düz stator için debi değişimi

Balpetekli stator sonuçları:

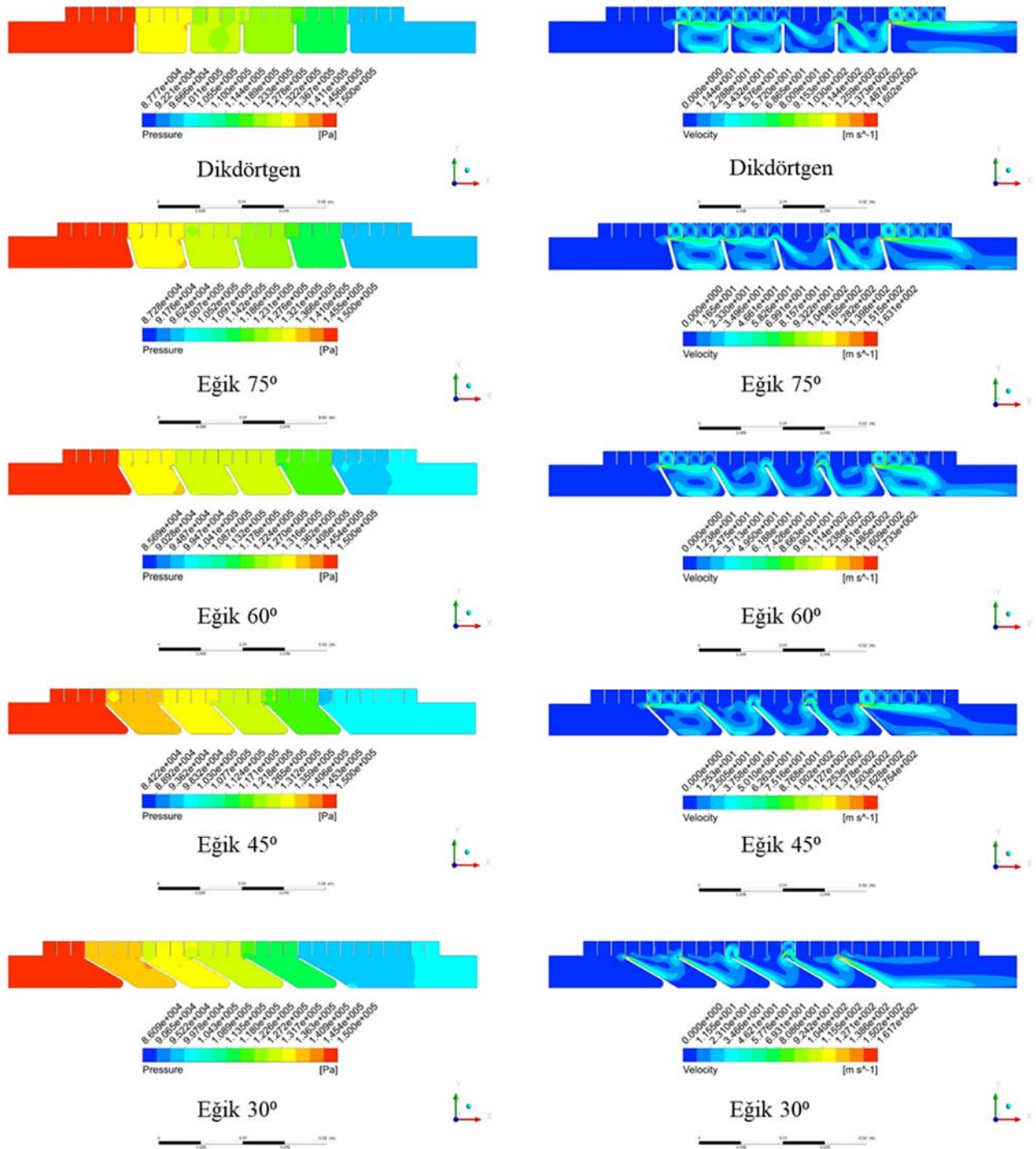
Balpetekli stator için HAD analizleri, analiz matrisindeki analiz sayısının aşırı artmasından dolayı balpeteğinin etkisini temsili olarak görebilmek amacıyla sadece 0.254 mm açıklık için yapılmıştır.

Balpetekli stator için labirent keçede oluşan akış formu, 0,254 mm açıklık için Şekil 10'da basınç ve hız dağılımı ve Şekil 11'de hız vektörleri çizilerek görsellenmiştir. Basınç dağılımından, basıncın ilk dişten son dişe doğru düştüğü görülmektedir. Hız dağılımında ise diş üstündeki kısılma bölgelerinde artan hız ve dişler arasındaki boşluklardaki girdaplar yanında balpeteği gözlerinde oluşan girdaplar görülmektedir. Bu hız ve girdap oluşumu Şekil 11'deki hız vektörlerinde de görülmektedir. Balpeteği girdaplarının oluşum formu, tamamıyla dişin petek duvarına göre konumlanmasına göre şekillenmektedir. Bu konumlanma labirent kaviterler içindeki girdap formunu da etkilemektedir.

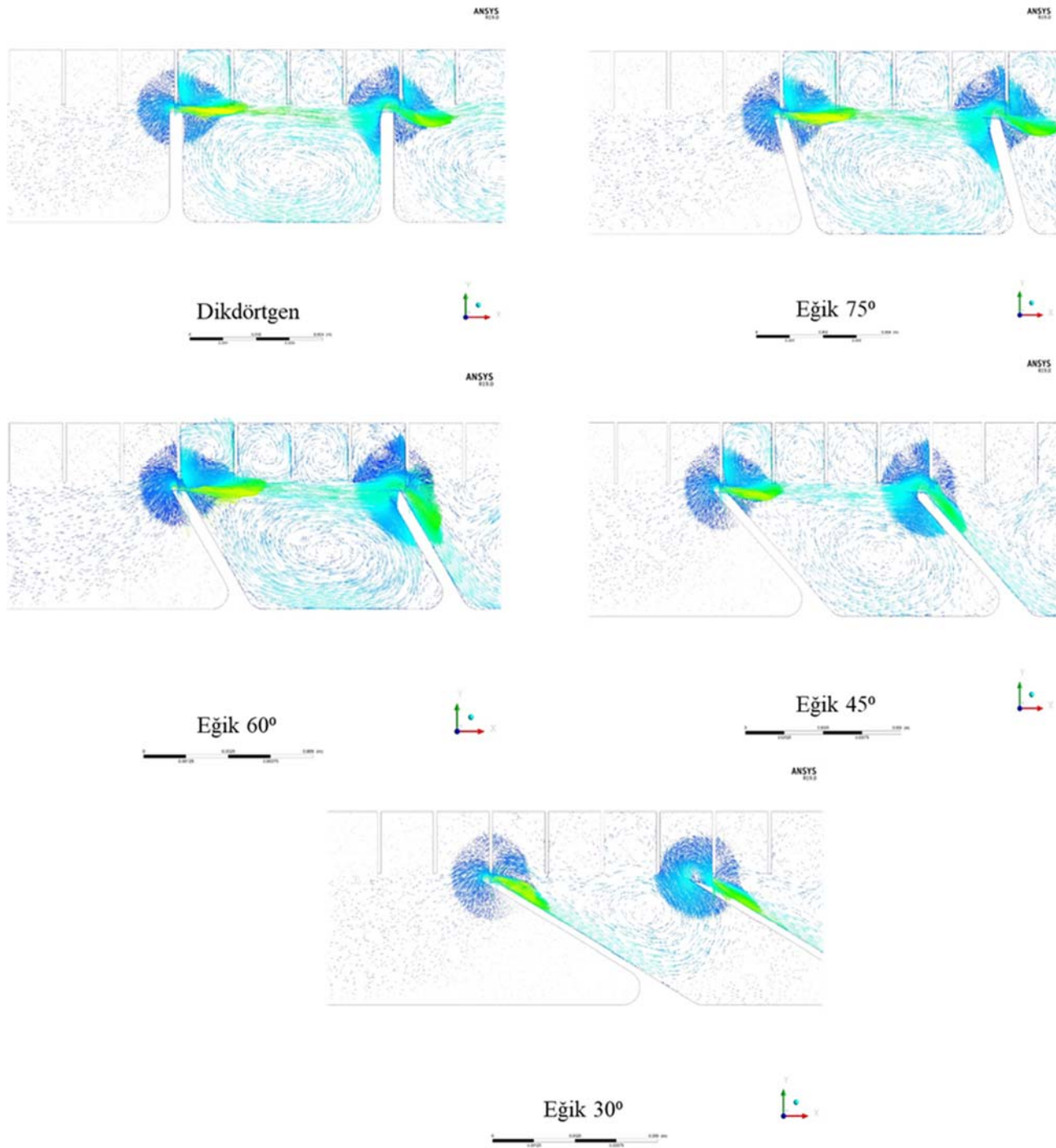
Bu diş-petek konumlanması aynı zamanda labirent keçe boyunca oluşan basınç düşmesini de etkilemektedir. Bu etkilenme diş üstündeki açıklık ortasında çizilen aksel basınç ve hız dağılımında da görülmektedir (Şekil 12 ve Şekil 13). Basınç, ilk dişten son dişe doğru kademeli olarak düşerken en yüksek basınç yükünü sırasıyla son diş ve ilk diş almıştır. Ara dişlerin aldıkları basınç yükleri tamamıyla diş-petek konumlanmasına bağlıdır. Diş ve petek duvarının karşı karşıya gelerek kısılma sağlanan dişlerdeki basınç düşmesi fazla gerçekleşmektedir. Diş eğimine bağlı olarak diş-petek konumları değiştiğinden bu değişim basınç dağılımlarına da yansımıştır.

Balpetekli stator için kaçak debinin diş eğimine göre değişimi Şekil 14'de gösterilmiştir. Öncelikle, Şekil 14'de balpetekli statorda düz statora göre tüm eğik diş durumlarında kaçak debinin düştüğü görülmektedir ki en büyük debi düşmesi de 30° diş eğiminde olmuştur.

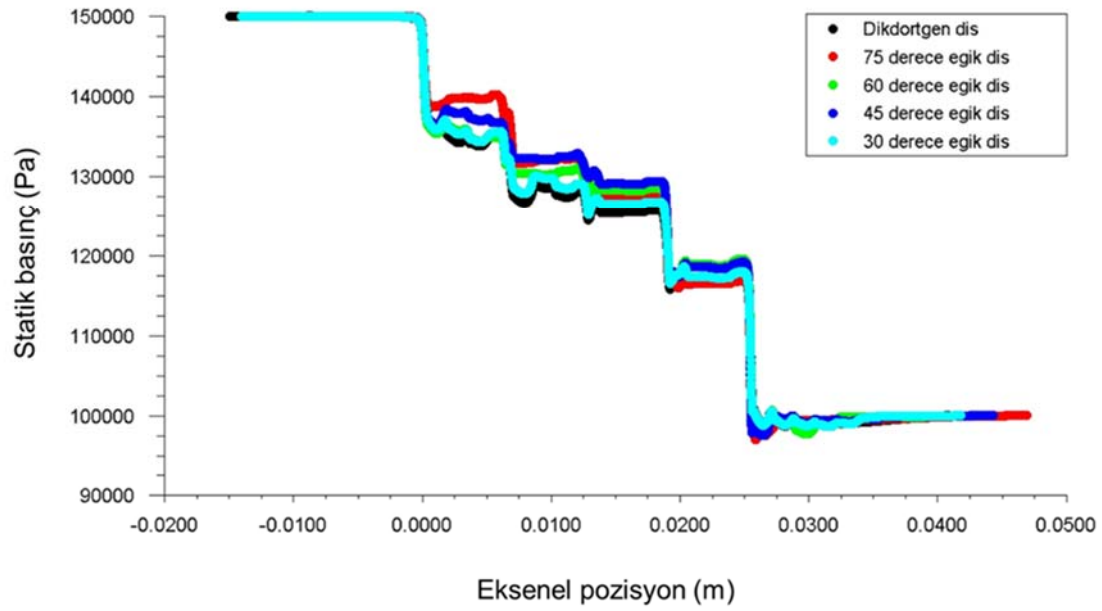
Balpetekli stator için kaçak debi tüm eğimlerde düşerken, yine benzer şekilde 30°'lik eğim açısı diğer eğim açıları arasında en düşük kaçak debiyi vermiştir. Burada; eğim açısı yanında, eğime göre diş-petek duvarı konumlanması ile kısılma miktarının ve petek gözlerindeki girdaplarla birlikte kavite girdaplarının form değişikliklerinin de kaçak debi üzerinde etkisi olmaktadır. Dolayısıyla, hangi eğim açısının kaçak debiyi azaltmada daha etkin olacağı diş-petek konumlanmalarına da bağlı olmaktadır.



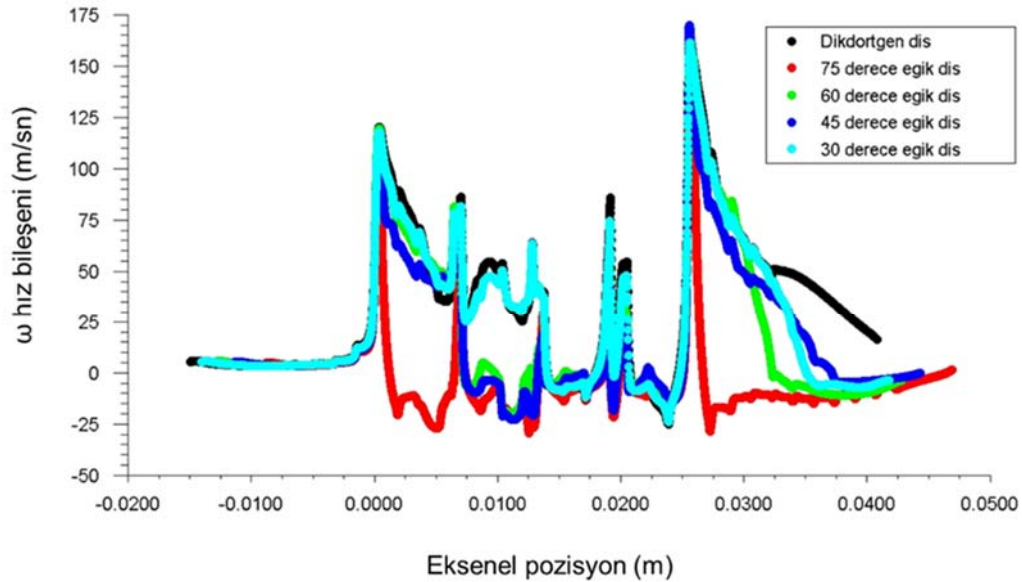
Şekil 10. Statik basınç ve hız dağılımları (Balpetekli stator, 0,254 mm açıklık)



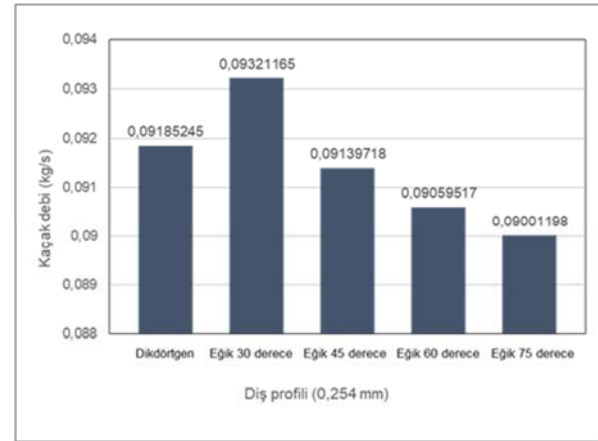
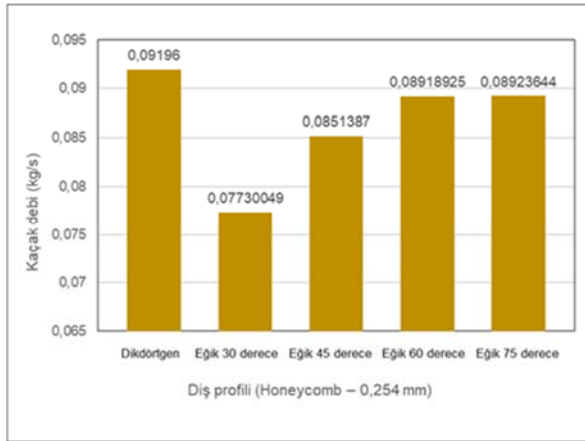
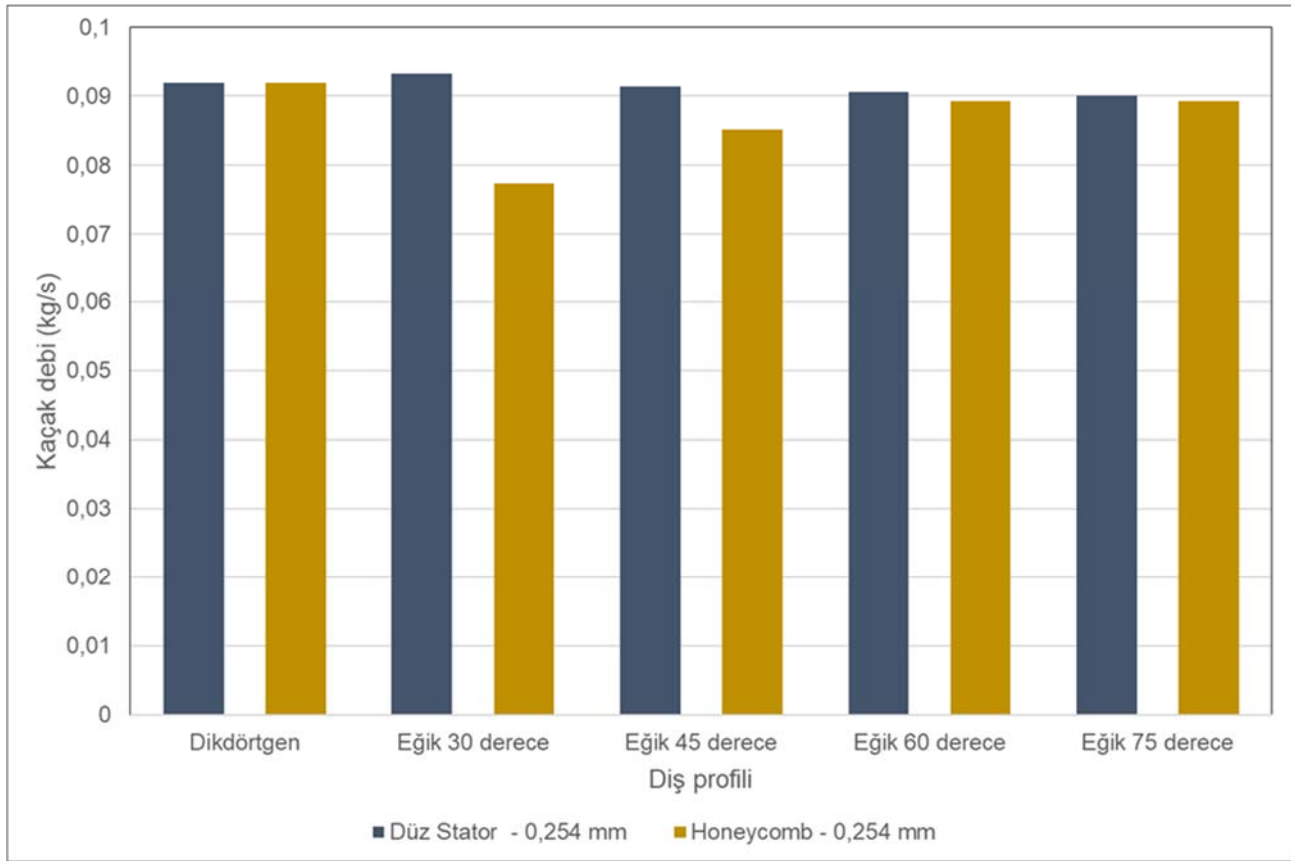
Şekil 11. Hız vektörleri (Balpetekli stator, 0,254 mm açıklık)



Şekil 12. Açıklık ortasındaki eksenel çizgideki basınç dağılımı (Balpetekli stator, 0,254 mm açıklık)



Şekil 13. Açıklık ortasındaki eksenel çizgideki eksenel hız dağılımı (Balpetekli stator, 0,254 mm açıklık)



Şekil 14. Balpetekli stator için debi değişimi

SONUÇ

Bu çalışmada, labirent sızdırmazlık elamanlarına yönelik olarak, rotora yerleştirilen eğik dişlerin kaçak debi üzerindeki etkileri hem düz stator hem de bal petekli stator için HAD analizleri ile incelenmiştir.

Düz stator:

Düz stator durumu için 5 farklı eğim (30° , 45° , 60° , 75° , 90°) değeri 4 farklı açıklık (0,127-0,254-0,381-0,508 mm) için analiz edilmiştir. Elde edilen önemli sonuçlar aşağıda listelenmiştir.

- 1) En yüksek basınç yükünü ilk diş almaktadır. Ardından en yüksek basınç düşmesi son dişte oluşmaktadır. Diş eğimine bağlı olarak basınç dağılımlarında farklılıklar görülmektedir.
- 2) Tüm eğik dişler için artan açıklıkla debi artmıştır.
- 3) Eğim açısının etkisi farklı açıklıklarda farklı olarak oluşmuştur. Düz yani 90° açılı dişe göre debinin düşük olduğu eğim açıları farklı açıklıklar için farklı değerlerde gerçekleşmiştir. Dolayısıyla hangi diş eğim açısının faydalı olacağı yani kaçak debiyi azaltacağı açıklığa göre değişmektedir.
- 4) İncelenen açıklıklar için (0,127-0,254-0,381-0,508 mm) en düşük kaçak debiyi veren eğim açıları sırasıyla 60° , 75° , 45° , 30° olarak belirlenmiştir. Yani, açıklık ile en düşük debiyi veren eğim açısı ters orantılı olarak değişmektedir.

Balpetekli stator:

Balpetekli stator için 5 farklı eğim (30° , 45° , 60° , 75° , 90°) değeri bir açıklık (0,254 mm) için analiz edilmiştir.

Elde edilen önemli sonuçlar aşağıda listelenmiştir.

- 1) Basınç, ilk diştten son dişe doğru kademeli olarak düşerken en yüksek basınç yükünü sırasıyla son diş ve ilk diş almıştır. Ara dişlerin aldıkları basınç yükleri tamamıyla diş-petek konumlanmasına bağlıdır. Diş ve petek duvarının karşı karşıya gelerek kısılma sağlanan dişlerdeki basınç düşmesi fazla gerçekleşmektedir. Diş eğimine bağlı olarak diş-petek konumları değiştiğinden bu değişim basınç dağılımlarına da yansımıştır.
- 2) Balpetekli statorda düz statora göre tüm eğik diş durumlarında kaçak debinin düştüğü görülmektedir ki en büyük debi düşmesi de 30° diş eğiminde olmuştur.
- 3) Balpetekli stator için kaçak debi tüm eğimlerde düşerken, yine benzer şekilde 30° 'lik eğim açısı diğer eğim açıları arasında en düşük kaçak debiyi vermiştir. Burada; eğim açısı yanında, eğime göre diş-petek duvarı konumlanması ile kısılma miktarının ve petek gözlerindeki girdaplarla birlikte kavite girdaplarının form değişikliklerinin de kaçak debi üzerinde etkisi olmaktadır. Dolayısıyla, hangi eğim açısının kaçak debiyi azaltmada daha etkin olacağı diş-petek konumlanmalarına da bağlı olmaktadır.

Takip eden çalışmalarda; rotor dönme hızının, basınç oranının, balpetekli stator için farklı açıklıkların ve balpeteği boyutlarının etkilerinin incelenmesi planlanmaktadır.

Kaynaklar

- Chougule, H. H., Mirzamoghadam, A., 2015. *CFD Simulation of Lab Seal Tooth Tip Geometry Variations to Reduce Leakage*. Proceedings of ASME Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition, Montreal, Canada, June 15-19.
- Dağıdır, K., 2018. *Gaz Türbinli Motorlarda Kullanılan Labirent Sızdırmazlık Elemanlarında Diş Eğim Açısının Sızdırmazlık Performansına Etkisinin HAD Analizleri ile İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Dogu, Y., Sertçakan, M. C., Bahar, A. S., Pişkin, A., Arıcan, E., and Kocagül, M., 2016. *Computational Fluid Dynamics Investigation of Labyrinth Seal Leakage Performance Depending on Mushroom-Shaped Tooth Wear*. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Paper no. 032503, 10 pages.
- Dogu, Y., Sertçakan, M. C., Gezer, K., Kocagül, M., Arıcan, E., and Ozmusul, M. S., 2017. *Leakage Degradation of Straight Labyrinth Seal due to Wear of Round Tooth Tip and Acute Trapezoidal Rub-Groove*. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Paper no. 072506, 12 pages.
- Dogu, Y., Sertçakan, M. C., Gezer, K., Arıcan, E., Kocagül, M., Ozmusul, M. S., 2017. *Labyrinth Seal Leakage Degradation due to Various Types of Wear*. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Paper no. 062504, 11 pages.
- Gezer, K., 2018. *Gaz Türbinlerinde Kullanılan Bal Peteği Sızdırmazlık Elemanı Geometrisi ve Çalışma Şartlarının Kaçak Debiye Etkisinin HAD Analizi ile İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Martin, H., 1908. Labyrinth Packings. *The Engineer*, pp. 35-36.
- Sertçakan, M. C., 2017. *Labirent Sızdırmazlık Elemanlarındaki Aşınmış Diş Geometrisinin Sızdırmazlık Performansına Etkisinin HAD Analizi ile İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Vermes, G., 1961. *A Fluid Mechanics Approach to Labyrinth Seal Leakage Problem*. *Journal of Basic Engineering*, vol. 83, pp. 161 – 169.
- Zimmerman, H. and Wolff, K. H., 1987. *Comparison between Empirical and Numerical Labyrinth Flow Correlations*. ASME 87-GT-86, ASME 1987 International Gas Turbine Conference and Exhibition, May 31–June 4, 1987, Anaheim, California, USA.