

BİR TURBOPROP MOTORA AİT KANATÇIK BUZLANMA SİSTEMİNDEKİ DELİK ÇIKIŞ AÇI TOLERANSLARININ BELİRLENMESİ

Volkan Tatar*
TEI, Tusaş Motor Sanayi, Eskişehir

Nadir Kaçar†
TEI, Tusaş Motor Sanayi, Eskişehir

ÖZET

Uçak motorunun ön bloğunda yer alan ve yapısal yükleri taşıyan parçanın kanatçıklarında, hava şartlarına bağlı olarak buzlanma görülebilmektedir. Uçuş güvenliği açısından risk oluşturan bu durumu ortadan kaldırmak için buzlanma önleyici sistem kullanılmaktadır. Bu çalışmada söz konusu olan buzlanma önleme sisteminin çalışma prensibi, kompresör kademesinden çekilen sıcak havanın kanat içinden geçirilerek firar kenarındaki delikler vasıtası ile ana akışa tahliye edilmesine dayanmaktadır. Böylece kanatçık yüzeyine ısı iletimi sağlanarak metal sıcaklığının artması sağlanır. Ayrıca kanatçık yüzeyinde sıcak hava film tabakası oluşturularak sıvı partiküllerin yüzeyde donması engellenmiş olur. Deliklerin çıkış açılarındaki değişim sistemin çalışmasını etkileyen önemli bir parametredir. Bu ölçü dolaylı olarak delik konum ölçüsü ile kontrol edilmektedir. Fakat bu durumun değerlendirme zorluğuna ve gözden kaçabilecek uygunsuzluklara yol açabileceği anlaşıldığından; tahliye deliklerinin çıkış açısı ölçüsünün üretim kabiliyetinin istatistiksel yöntemlerle incelenmesi, iyileştirilmesi ve açı toleransının belirlenmesini amaçlanmaktadır. Literatür taraması yapılarak film etkinliğinin açı ile değişimi araştırılmıştır. Buzlanma testi gerçekleştirilen motorda elde edilen bulgular incelenmiştir. Kanat profili göz önünde bulundurularak yüzey ile delik arasındaki açı araştırılmıştır. Ayrıca 25 adet parçanın ölçüm sonucu alınarak üretim kabiliyeti belirlenmiştir. Çalışma sırasında gerekli görülen iyileştirmeler üretime adapte edilerek açı değerlerinin değişkenliği azaltılmaya çalışılmıştır. Bu çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçlar ile 6 sigma araçlarının yardımıyla deliklerin açı ölçüsü toleransı belirlenmiştir. Böylece açının doğrudan kontrol edilmesi ile olası kalite problemlerinin de önüne geçilmiştir.

GİRİŞ

Buzlanma olayı, gaz türbin motorlarında tasarım aşamasında göz önünde bulundurulması gereken en önemli problemlerden biridir. Son olarak 1 Haziran 2009'da Air France'ın A330-200 model uçağı buzlanma sebebiyle atlas okyanusuna düşmüş ve 228 kişinin hayatına mal olmuştur. Bu problemin ise en önemli kriteri öngörünün zor olması ve sonuçların çok kolay belirlenememesidir. Buzlanma, çoğunlukla atmosfer havası ile doğrudan karşılaşan bölgelerde gerçekleşmektedir ve bundan dolayı motor girişindeki hava alığı, havaya yön vererek kompresöre ileten kanatçıklar bu konu dikkate alınarak tasarlanmaktadır. Bu çalışmanın konusu olan hava yönlendirici kanatçıkların diğer bir görevi de yapısal yükleri taşımak ve yatak bölgesinin yağlanması sağlamaktır. Parça üzerinde farklı aero profile sahip sabit kanatçıklar bulunmaktadır. Bu kanatçıklar profillerine göre sınıflandırılmıştır ve bazılarının üzerine buzlanmayı önleme amaçlı sıcak hava tahliye eden delikler açılmaktadır. Bu deliklerin yardımıyla yüzeyde sıcak hava filmi oluşturulmaktadır. Yüzey üzerinde akışkan filmi oluşturulması literatürde türbin kanadı soğutma uygulamalarında detaylı bir şekilde incelenmiş olup soğutucu akışkanın sıcak ana akış etkisiyle yüzeye yapışarak yüzeyde ince bir film oluşturmasını konu edinmektedir. Benzer şekilde buzlanma önleyici sistemlerde de soğuk ana

* Termal Analiz Mühendisi, E-posta: Volkan.Tatar@tei.com.tr

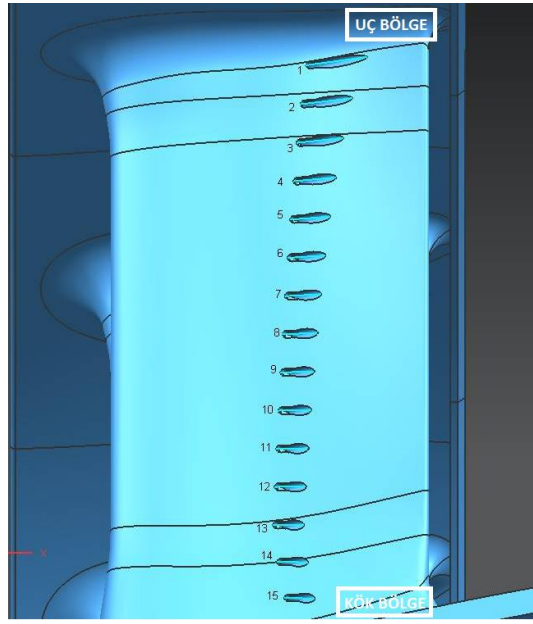
† Termal Analiz Mühendisi, E-posta: Nadir.Kacar@tei.com.tr

akış, sıcak akışkanın yüzeyi takip etmesini sağlayarak istenen bölgenin ısıtılmasını sağlamaktadır. Bu yöntemin tasarımında başlıca parametrelere dikkat edilmelidir. Film etkinliğini belirleyen en önemli olgu film ile ana akışın kütle akıları oranıdır [Bogard ve Thole, 2006]. Ayrıca, ana akış türbülans değeri, yüzey kıvrımı, deliğin şekli ve delik açısı da diğer önemli parametrelerdir. Literatürde, delik çıkış açısının ana akış ile film arasındaki ısı transferine etkisi 30°, 45° ve 90° derecelik çıkış açılarında sahip iki boyutlu ve üç boyutlu modeller hazırlanarak hesaplanmıştır [Vu, 2008]. Benzer şekilde 30°, 90° ve 150°'lik çıkış açılarında deneyler yapılmış, en iyi performansın 30°'lik çıkış açısına sahip olan durumda sağlandığını belirlemiştir [Han, Dutta ve Ekkad, 2000]. 35° çıkış açısına sahip delikler kullanarak filmin yüzeyde kapladığı alanı görme amaçlı deneysel çalışmalar gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada konkav akış yolu kullanılmış ve akışın döndüğü yerden film akışı sisteme enjekte edilmiştir [Lee, Chen ve Chyu, 2008]. Bir diğer deneysel çalışmada ise yine sabit 35° çıkış açısına sahip delikler kullanılarak 0°, 30°, 60° ve 90° olmak üzere dört farklı yerleşim açısı (ana akış ile ikincil akış çıkış doğrultusunun delik çıkış yüzeyine izdüşümleri arasındaki açı) ile film testleri yapılmıştır. Aynı zamanda belirlenen farklı hız oranlarında yüzey sınır tabakasında sıcaklık ölçümleri yapılmış ve değerleri karşılaştırılmıştır [Jung ve Lee, 2000]. Literatür araştırması sonucunda; 35° delik çıkış açısının film etkinliği bakımından yeterli olduğu sonucuna varılmıştır ve söz konusu çalışmada bu açı değeri, aşılması gereken üst limit olarak belirlenmiştir.

Tolerans imalat ölçülerinde ortaya çıkabilecek fakat kabul edilebilir sınırlar içerisinde kalan hata payı anlamına gelmektedir. Toleransı belirlemek için bu çalışma kapsamında 6 sigma yöntemlerinden biri olan istatistiksel toleranslandırma metodu kullanılmıştır. Bu yöntem kullanılarak karakteristikler için uygun toleranslar belirlenebilir ve böylece ekstra parça maliyetinden kaçınılabılır [Scholz, 1995]. Buna ek olarak; tolerans belirleme, iyileştirme uygulayarak herhangi bir bireysel bileşenin özellikleri için seçim yapmaktır [Allen, 2006]. Ayrıca istatistiksel tolerans analizi parça fonksiyon karakterizasyonu için öngörü sağlayan bir yöntemdir. Bunun sayesinde maliyet gerçeğe çok yakın tahmin edilebilir, parametre değişikliğinin etkileri belirlenebilir ve girdileri değiştirmenin sonuçları açıkça ortaya koyulabilir [Sehlhorst, 1995]. Mevcut çalışma ile, genellikle sabit açılarda çalışılan çıkış açısı ölçüsünün üretimden kaynaklanan değer sapmalarını hangi oranda tolere edebileceği belirlenmektedir. Bunun için üretimden alınan ölçümlerin istatistiksel sonuçları 6 sigma yöntemleriyle incelenmiştir.

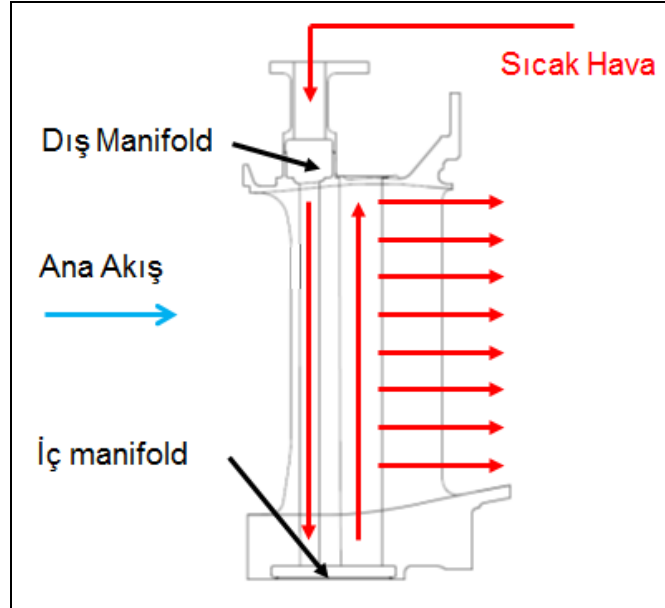
YÖNTEM

Bu bölümde çalışmaların yapıldığı parça detaylı bir şekilde incelenmiştir. Çalışılan parça gaz türbin motorunun girişinde bulunan ve sahip olduğu sabit kanatçıklarla havayı yönlendiren bir parçadır. Bu parça üzerinde buzlanmayı önleme amaçlı delikler bulunmakta ve deliklerden tahliye edilen havayla yüzeyde sıcak hava filmi oluşturmak amaçlanmaktadır. Şekil 1'de kanatçıklardan bir tanesi ve üzerindeki tahliye delikleri gösterilmektedir. Kanatçık uç bölgede "konkav profil"e, kök bölgeye doğru daha düz bir profile sahiptir.



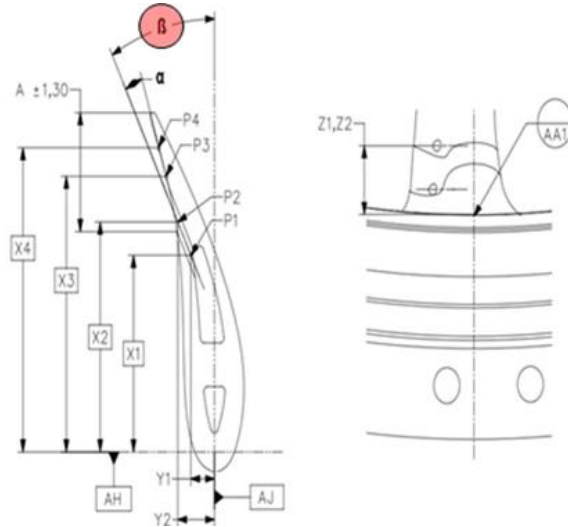
Şekil 1: Kanatçık üzerindeki film delikleri

Buzlanma önleyici sistemin akış yolu Şekil 2'de gösterilmektedir. Kanatçık içerisindeki kanal vasıtasıyla dış manifolddan gelen sıcak hava, kanatçığın içerisinden geçirilecek şekilde tasarlanmıştır. Böylece kanatçığın hücum kenarının ve orta bölgesinin ısıtılması amaçlanmıştır. Diğer taraftan kanatçığı terkeden sıcak hava firar kenarına yakın bölgeden ana akışa karışmaktadır.



Şekil 2: Buzlanma Sistemi Akış Şeması

Parçanın üretimi sonrasında delik eksenini ile motor eksenini arasındaki ölçü kontrol edilmektedir ve bu ölçü Beta açısı (β) olarak tanımlanmıştır. Bununla birlikte delik eksenini ve kanatçık yüzeyi arasındaki açı Alfa açısı (α) olarak tanımlanmıştır. Şekil 3'de belirtilen ölçüler gösterilmektedir.



Şekil 3: Kanatçık üzerindeki açı ve mesafe gösterimleri

Sözkonusu parçanın hem termal analizleri hem de test çalışmaları gerçekleştirilerek buzlanma sistemi gereksinimleri belirlenmiştir. Havanın en kötü olduğu şartlar düşünülerek, termal analizler ile, kanatçık üzerindeki sıcaklık dağılımı hesaplanmıştır. İmalat sırasında oluşabilecek düzensizliklerin neden olabileceği durumlar düşünülerek açı ölçüsüne tolerans verilmeli ve takip edilmelidir. Açı toleransının, hem teknik gereklilikleri hem de imalat kabiliyetini göz önünde bulundurarak verilmesi gerekmektedir. Bundan dolayı imalat kabiliyeti somut olarak ortaya konulmalıdır.

UYGULAMALAR

Tolerans değerinin belirlenebilmesi ve uygunsuzlukların ortadan kaldırılabilmesi için çalışmalar üç ana başlık altında toplanmıştır;

- 1- Deneysel çalışma
 - Buzlanma testinde kullanılan parçanın değerlendirilmesi
- 2- İstatiksel çalışmalar
 - Üretimi gerçekleşen parçalardan ölçüm alınması
 - İstatiksel araçların kullanılarak imalat kabiliyetinin belirlenmesi
- 3- İmalat sürecinin iyileştirilmesi
 - Uygunsuzluğa neden olabilecek durumların araştırılması
 - İyileştirmelerin belirlenerek uygulanması

Buzlanma Test Parçasının Değerlendirilmesi

Buzlanma önleyici sistemin etkinliğinin belirlenebilmesi için motor, buzlanma şartlarında test edilmiştir. Farklı yüzey profiline sahip 5 grup kanatçık mevcuttur. Buzlanma oluşabilmesi için ana akış içerisinde sıvı akışkan enjekte edilerek firar kenarında biriken buz şekli ve miktarı incelenmiştir. Kanatçıkların β açıları ile buz oluşumu ilişkilendirilmeye çalışılmıştır. Şekil 4'de test sonuçları kanatçık gruplarına göre verilmektedir.



Şekil 4: Motor buzlanma test sonuçları

Test sonuçlarına göre Grup 1-2-3 kanatçıklarının firar kenarında az miktarda buzlanma oluşumu gözlemlenmiş fakat Grup 4 ve Grup 5 kanatçıklarında daha fazla buz birikimi gözlemlenmiştir. Bundan dolayı Grup 4 ve 5'e, β açıları için tolerans belirlenirken daha hassas davranılması gerektiği ortaya çıkmıştır. Buzlanma oluşumundaki farklılığın en önemli nedenlerinden biri, kanatçıklara gelen sıvı fazdaki akışkan miktarıdır.

Parçaların Ölçülmesi

β açısı değerlerinin analizi, imalatı tamamlanan 14 adet parçadan alınan ölçümler ile gerçekleştirilmiştir. Bir parçada 14 adet buzlanma önleyici sisteme sahip kanatçık ve herbir kanatçıkta 15 adet delik olduğu düşünüldüğünde (14 parça x 20 kanatçık x 15 delik) toplam 4200 adet ölçüm sonucu elde edilmiştir. Bu ölçüm değerleri, 6 sigma araçları kullanılarak Minitab programında analiz edilmiş ve popülasyonun %99.73'ünü kapsayacak tolerans değerleri istatistiksel olarak belirlenmiştir. Daha sonra kontrol amaçlı 9 parçadan toplam 1890 ölçüm alınarak parça imalatının sürdürülebilirliği araştırılmıştır.

İstatistiksel Araçların Kullanılarak Süreç Kabiliyetinin Belirlenmesi

İşletmelerin istenilen kalite düzeyini sağlayabilmesi için ürünler, tüketici beklentilerini ifade eden spesifikasyonlar dahilinde üretilmelidir. Buna göre, üretim sürecinin spesifikasyonları karşılayan ürün oluşturabilme yeteneği sürekli olarak incelenmelidir. Bu inceleme, süreç yeterlilik indeksleri ile yapılabilir. Süreç yeterlilik indeksleri ile, normal ve normal olmayan dağılımlar için sürecin spesifikasyonları sağlama derecesi belirlenebilir. Yeterlilik indekslerinin periyodik olarak hesaplanması ile süreç sürekli olarak kontrol altında tutulabilir. Süreç yeterlilik çalışmalarında kullanılan indekslerin doğru olarak hesaplanabilmesi ve elde edilen değerlerin güvenilir olabilmesi için bazı koşulların sağlanması gerekir. Buna göre, üç temel varsayım vardır. Bunlar; sürecin istikrarlılığının sağlanması, sürecin özel sebepli değişkenlikten arındırılmış olması ve sürecin normal dağılıma sahip olmasıdır [Chou, Owen ve Borrego, 1990]. Süreç ortalamasının yerleşimini ve süreç yayılımının miktarını tüketici spesifikasyonları ile birlikte analiz etmek daha güvenilir sonuçlar verebilmektedir. Bu çalışmada, genel kabul görmüş olan C_p , C_{pk} ve C_{pm} indeksleri sırasıyla incelenmiştir. Süreç potansiyel indeksi (C_p), süreç standart sapmasının, spesifikasyon sınırları ile ilişkilendirilmesiyle oluşturulur ve verilerin yayılımını inceler. Süreç ortalama değerinin ne ölçüde hedef değerde olduğu C_{pk} değeri ile incelenmektedir. C_{pm} indeksi ise, hedef değer ile, süreç ortalaması arasındaki farkı temel aldığından, süreç ortalamasının yerleşimi hakkında daha sağlıklı bilgiyi sağlayabilir. Herbir grup kanatçık için süreç yeteneği belirlenerek yetenek

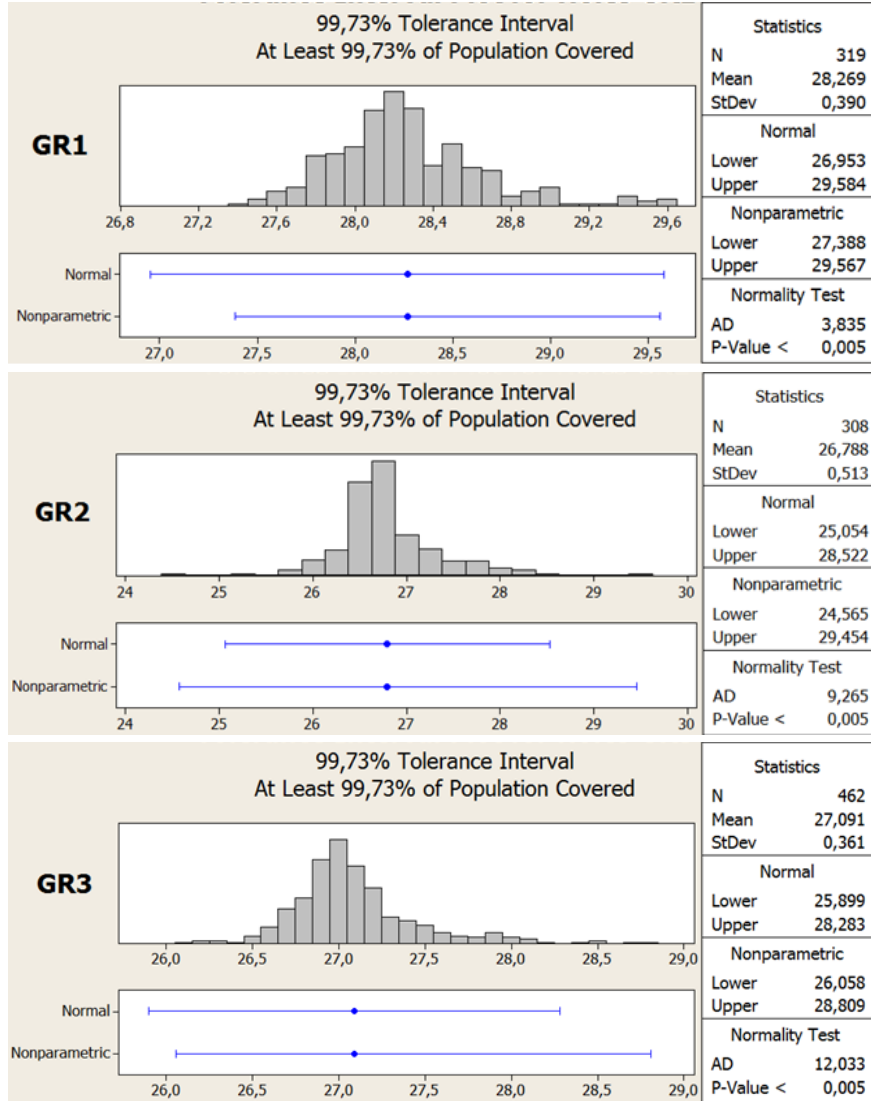
indeksleri hesaplanmıştır. C_p ve C_{pk} değerleri denklem 1 ve 2'de gösterilmiştir [Kane, 1986]. Denklem 1'de USL üst yayılım limitini, LSL alt yayılım limitini, NT ise doğal toleransı (6σ) temsil etmektedir.

$$C_p = \frac{\text{İzin verilen süreç yayılımı}}{\text{Gerçek süreç yayılımı}} = \frac{USL - LSL}{NT} \dots\dots\dots (\text{Denklem 1})$$

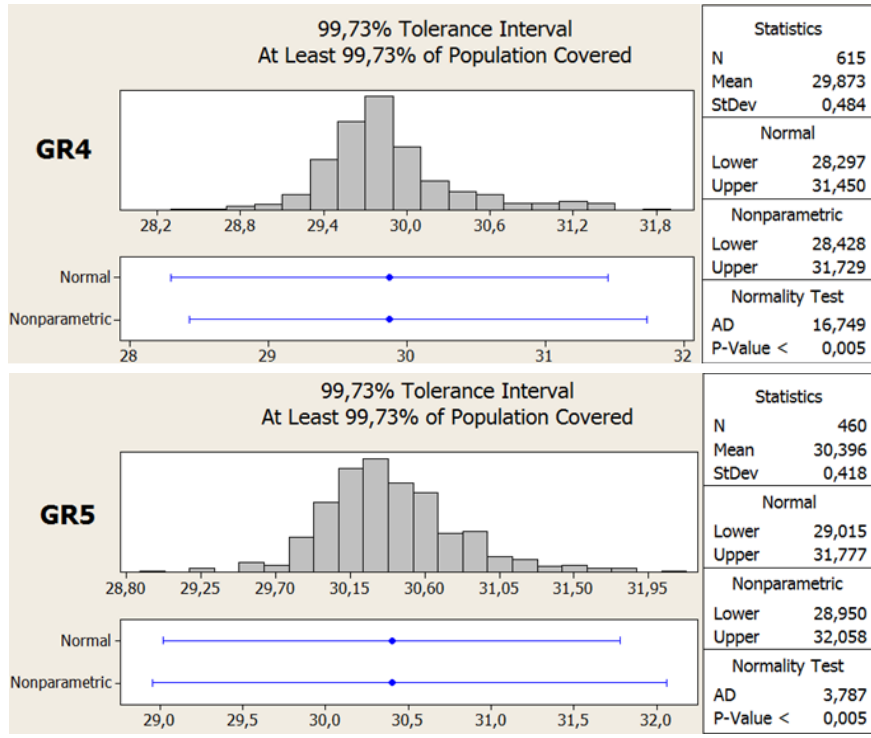
$$C_{pk} = \text{Küçük olan} \left(\frac{\text{ort.} - LSL}{NT/2}, \frac{USL - \text{ort.}}{NT/2} \right) \dots\dots\dots (\text{Denklem 2})$$

C_p değerinin 1'den büyük olması istenen bir durumdur. Uygulamalarda, genellikle bu değer 1,33'ten büyük ($C_p > 1,33$) olması önerilir. Ayrıca güvenilir sonuçlar elde edebilmek için de, örnek sayısının en az 50 olması gerekmektedir [Kotz ve Johnson, 1993].

Bütün gruplar için ölçülen Beta açısı değerlerinin nasıl bir dağılım gösterdiği belirlenmiştir (Şekil 5). Dağılımın 99,73%'ünü kapsayacak biçimde üst ve alt tolerans limitleri Minitab programından elde edilmiştir. Beta açısının üst limiti akış açısından önemli olduğu için bu çalışmada daha çok üst limitin ne olması gerektiği üzerinde durulmaktadır. Alt limit ise, delik çıkışlarında geometrik olarak keskin köşelerin meydana gelmemesi açısından önemlidir. Aksi taktirde delik çevresinde yüksek stres konsantrasyonu oluşabilir.



Şekil 5: Beta açısı normal olasılık dağılımı ve istatistiksel özellikleri



Şekil 5 (devam): Beta açısı normal olasılık dağılımı ve istatistiksel özellikleri

Uygunluğa Neden Olabilecek Durumların Araştırılması

Uygunlukların doğru bir biçimde değerlendirilebilmesi için hata türleri ve etkileri analizi gerçekleştirilmiştir. Tablo 1’de hata türleri etkisinin şiddeti, oluşum sıklığı ve kontrol sırasında saptanabilme değerlerine göre 1 ile 10 arası puanlanma yapılmış ve her üç puan değerinin çarpılmasıyla nihai risk puanı hesaplanmıştır. 120 puan üzerinde olan başlıklara iyileştirme planı yapılması gerektiğinden, tüm 5 olasılık için de iyileştirme uygulanmıştır.

Tablo 1: Hata türleri ve etkileri analizi

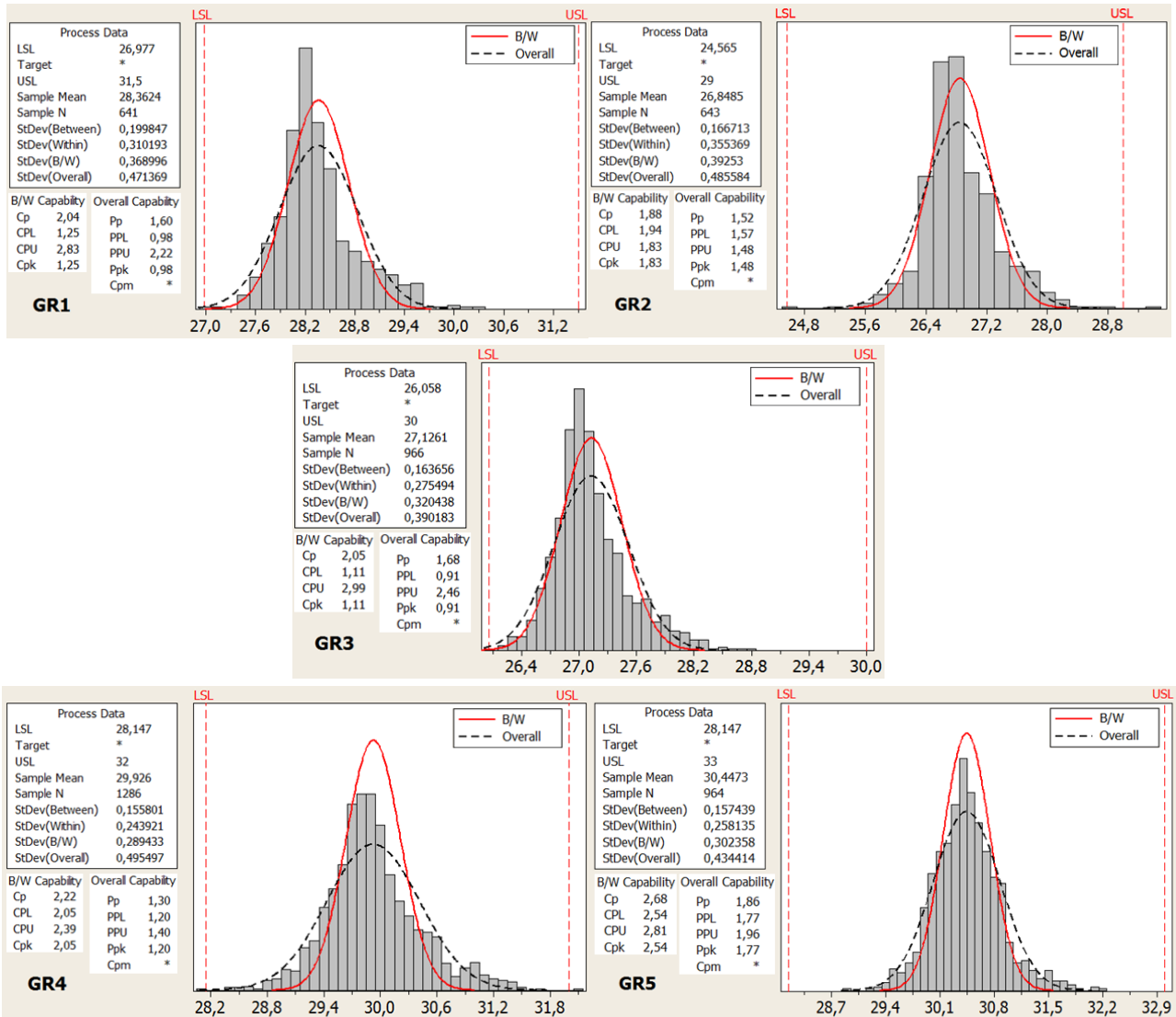
İşlem	Girdi	Pot. Hata	Pot Hata Etk.	Etki	Neden	Olu Sık.	Kontrol	Belirleme	PUAN
Delik delinmesi	Beta açısı	Fikstürleme problemleri	Delik açısının değişmesi	8	Fikstürde meydana gelen hatalar	7	Fikstür datum noktalarından sabitlenmektedir	6	336
Delik delinmesi	Delik konumu	Kullanılan imalat araçlarında zamana bağlı aşınma	Delik konumunda sapmalar	7	Aşınmalar ve yıpranmalar	7	Araç,gereçlerin sistematik kontrolü	8	392
Delik delinmesi	Delik konumu	Fikstürleme problemleri	Delik konumunda sapmalar	7	Yanlış grup fikstürü kullanma	3	Kullanılacak fikstürün manuel seçimi	8	168
Delik delinmesi	Delik konumu	Tabla açısı problemi	Delik açısının değişmesi	8	Yanlış tabla açısı	7	Tabla açısının manuel ayarlanması	8	448
Kontrol	Delik konumu nun ölçümü	Noktalara bağlı ölçüm hassasiyeti	Delik ekseninin yanlış belirlenmesi	8	Yanlış ölçüm metodu	6	Belirli bir kontrol yok	9	432

Yapılan araştırmalar sonucunda; parça üzerinde delik delme amaçlı kullanılan makinanın tezgah ayarlarının tam yapılamadığı, delik delerken kullanılan kılavuzların zamanla erozyona uğrayarak yanlış delmeye yol açtığı ve parça sabitlemesinin tam olarak yapılamadığı belirlenmiştir ve ölçümün hassas bir şekilde yapılamadığı saptanmıştır.

İyileştirmelerin Belirlenerek Uygulanması

Uyumsuzluğa yol açan durumların ortadan kalkması için; elle yapılan makina tezgah ayarı otomatikleştirilmiş, delik kılavuzları erozyona uğramayan malzemeden yapılmış ve sabitleme desteklerinin şekilleri değiştirilerek herhangi bir kaymaya sebep olması engellenmiştir. Ölçüm yönteminde iyileştirme yapılarak sonuçların daha doğru ölçülmesi sağlanmıştır.

İyileştirmeler sonucunda alınan ölçümler ile birlikte süreç kabiliyeti tekrar değerlendirilmiştir ve herbir grup için tolerans değerleri belirlenmiştir. Şekil 6'da bütün gruplar için elde edilen indeks değeri grafikler ile gösterilmektedir. Nominal değerler üzerine eklenen tolerans değerleri üst limit (USL) olacak şekilde grafiklerde yer almaktadır. Giriş bölümünde belirtilen 35 derecelik açısı değeri literatürde kabul görmektedir ve elde edilen sonuçlar bu bilgi ile uyum göstermektedir. Grafiklere bakıldığında genel anlamda Cp değerleri bütün gruplar için 1.33'ün üzerindedir ve bu durum sürecin, belirlenen sınırlar içerisinde kalacağını işaret etmektedir.



Şekil 6: İyileştirmeler sonrası dağılım ve limitler

SONUÇ

Sonuç olarak, istatistiksel yöntemler kullanılarak ve teknik bilgilerden yararlanılarak başarılı bir 6 sigma uygulaması gerçekleştirilmiştir. Farklı aero profile sahip kanatçık grupları için tolerans değerleri elde edilerek Beta açısı üst limitleri belirlenmiştir. Bu çalışma neticesinde üretilen parçalardan kontrol amaçlı ölçüm alınmıştır. Bu ölçüm sonuçlarına göre açılı ölçüsü değerlerinin, belirlenen limitleri aşmadığı gözlemlenmiştir. Böylece hem üretilebilirliği hem de teknik gerekliliği sağlanmış parça imalatı mümkün olmaktadır. Çalışmanın devamlılığı açısından ölçümler daha sonraki parçalarda da devam edecek ve uygunsuzluklarla karşılaşılırsa iyileştirmelerle doğrudan müdahale edilecektir.

Kaynaklar

- Allen, T. T., 2006. *Introduction to engineering statistics and six sigma*, Springer, s. 479
- Bogard, D. G. ve Thole, K. A., 2006. *Gas Turbine Film Cooling*, Journal of Propulsion and Power, Cilt.22, No. 2, s.249-270
- Chou, D.B., Owen, L.H. ve Borrego, A., 1990. *Lower Confidence Limits on Process Capability Indices*, Journal of Quality Technology, Cilt.22, No.3
- Han, J. C., Dutta, S. ve Ekkad, S. V., 2000. *Gas turbine heat transfer and cooling technology*, Taylor&Francis, s. 237
- Jung, J. S. ve Lee, J. S., 2000. *Effects of Orientation Angles on Film Cooling Over a Flat Plate: Boundary Layer Temperature Distributions and Adiabatic Film Cooling Effectiveness*, Journal of Turbomachinery, Cilt.122, s.153-160
- Kane, V.E., 1986. *Process Capability Indices*, Journal of Quality Technology, Cilt.18, No.1
- Kotz, S. ve Johnson, N.L., 1993. *Process Capability Indices*, Chapman and Hall
- Lee, I. C., Chen, P. H. ve Chyu, M. K., 2008. *An Experimental Investigation of Jet Flows Through a Row of Forward Expanded Holes into a Mainstream over a Concave Surface*, Experimental Thermal and Fluid Science, Cilt.32, s.1068-1080
- Scholz, F., 1995. *Tolerance stack analysis methods*, Boeing information & support services, s. 17-31
- Sehlhorst, S., 1995. *Six sigma design and statistical tolerance analysis*, TI Technical journal, November-December, s. 54-63
- Vu, K., 2008. *Steady State Heat Transfer of a Flat Plate with Cooling Hole in a High Temperature Environment*, Mechanical Engineering M.S. Thesis, 56 s.