

Elektrik Motorlarında Sargı Yalıtım Testleri: PI Testi

Coşkun Arslan
Elektrik-Elektronik Yüksek Mühendisi

Yalıtım direnci (Insulation Resistance - IR) ölçümü, elektrikli ekipmanların durum değerlendirmesinde en yaygın kullanılan tanı testlerinden biridir. Bu test, yalıtım sisteminde oluşabilecek zayıflıkların erken aşamada tespit edilmesini sağlayarak arıza öncesi önleyici bakım faaliyetlerine önemli katkı sunar. Bununla birlikte, uygun test prosedürleri ve yeterli teknik bilgi olmadan gerçekleştirilen ölçümler, yalıtım sistemine zarar vererek geri dönüşü olmayan arızalara yol açabilmektedir. Bu nedenle testlerin, ilgili standartlara ve üretici önerilerine uygun şekilde yapılması kritik öneme sahiptir. Yalıtım sisteminin durumunun daha kapsamlı değerlendirilmesi amacıyla kullanılan yöntemlerden biri de Polarizasyon İndeksi (PI) testidir. PI testi, özellikle döner elektrik makinelerinde sargı yalıtımının yaşlanma durumu, nem, yüzey kirliliği

ve karbonlaşma gibi olumsuzlukların belirlenmesinde etkin bir parametre sunar. Bu yöntem, yalnızca anlık bir yalıtım direnci ölçümü yapmak yerine, zamana bağlı değişimi analiz ederek daha güvenilir sonuçlar elde edilmesine olanak tanır. Polarizasyon indeksi, sabit bir doğru gerilim altında yalıtım direncinin zamanla artış karakteristiğine dayanır. Test prosedüründe, yalıtım direnci genellikle 1. dakika ve 10. dakika sonunda ölçülür.

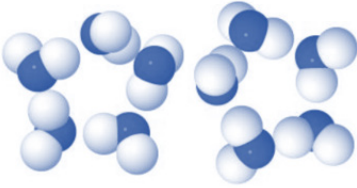
Bu oran, yalıtım malzemesinin dielektrik absorpsiyon özelliklerini yansıtır. Sağlıklı ve kuru bir yalıtım sisteminde, zamanla polarizasyon etkisi artacağından direnç değeri yükselir ve PI değeri genellikle 2.0 veya daha büyük olur. Buna karşılık, PI değerinin düşük çıkması; nem, kirlenme, yüzey iletkenliği artışı veya yalıtımın termal/elektriksel yaşlanması gibi durumların göster-

gesi olabilir. Özellikle $PI < 1.0$ olması ciddi bir yalıtım problemi işareti olarak değerlendirilir. Uluslararası standartlar da PI testinin önemini vurgulamaktadır. IEEE tarafından yayımlanan IEEE 43 standardı ve IEC tarafından yayımlanan IEC 60034-1 kapsamında, döner makinelerde yalıtım değerlendirmesinde PI değerlerinin yorumlanmasına ilişkin kriterler tanımlanmıştır. Bu standartlara göre $PI \geq 2.0$ değeri genellikle iyi bir yalıtım durumuna işaret ederken, daha düşük değerler detaylı inceleme ve ilave test gerekliliğini ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, PI testi klasik yalıtım direnci ölçümüne kıyasla yalıtımın zamana bağlı davranışını analiz etmesi bakımından daha ileri bir teşhis yöntemidir. Doğru uygulandığında, ekipmanın güvenilirliğini artıran ve plansız duruşları önlemeye yardımcı olan güçlü bir bakım aracıdır.

1. Giriş

Polarizasyon indeksi (PI), elektrik makinelerinde, elektrik motorunun yaşı arttıkça ortaya çıkan kalite ve yalıtım bozulmasını belirlemek için önemli bir ölçüm metodudur.

İzolasyon, dipolar karaktere sahip milyonlarca molekülden oluşur. Bu, bir molekülün farklı iki kutbu bulunuyor anlamına gelir.



Şekil 1. Dipol molekül

Polarizasyon genel olarak moleküllerin elektrik alanında dönme ve hizalanma yeteneği olarak ifade edilir. Elektriksel yalıtım görevi olan bu atomlar elektrik alanı altında kutuplaşır. Yalıtım ne kadar eskiyse, moleküllerin hareketliliği o kadar kötüdür. Sonuç olarak, kutuplaşma azsa elektrik yalıtımı zayıflamış demektir. Bu ciddi motor hasarlarına yol açabilir.

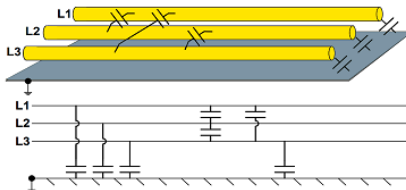
2. Eşdeğer sargı devre şemaları

Test yöntemlerinin işleyişinin daha iyi anlaşılması için genellikle test edilecek sargının eşdeğer devre şeması kullanılır. Bu eşdeğer devre şemaları yardımıyla fiziksel koşulları, ölçümleri, zamansal davranışı göstermek ve analiz etmek daha kolaydır. Bir sargı, sargı endüktansı ve sargı direncinden oluşur.



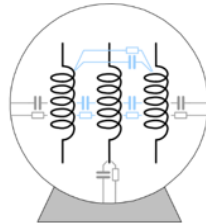
Şekil 2. Sargı endüktansı ve sargı direncinden oluşan eşdeğer devre

Sargılar ve motor gövdesi arasındaki yalıtımın eşdeğer devresi sadece bir dirençten oluşmaz. İki iletken yüzey ve arasında yalıtkan malzeme bulunan her eleman kapasitif etki gösterir. Buradaki kapasitif etki iletken metallerin yüzey alanına, aradaki yalıtkan malzemenin dielektrik özelliğine ve metal yüzeyler arasındaki mesafeye göre değişir. Elektrik motorlarında birden fazla iletken yüzey ile gövde arasında bu etki oluşur.



Şekil 3. İletken yüzeyler arasında oluşan kapasitanslar

Kapasiteler birbirinden izole edilmiş metal yüzeyler arasında oluşur. Yüzey ne kadar büyükse ve/veya her iki metal yüzey arasındaki mesafe ne kadar küçükse, kapasite o kadar büyük olur. Test nesnesinde elektrik sargıları ve gövde burada belirtilen metal yüzeyleri temsil eder. Şekil 4'te, üç sargı arasındaki ve sargılardan motor gövdesine kadar olan kapasiteleri göstermektedir. Yalıtım direnci, doğrudan her bir kondansatöre paraleldir.



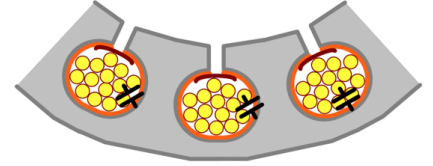
Şekil 4. İletken yüzeyler arasında oluşan kapasitanslar

Sargı ve motor gövdesi arasındaki kapasiteler nispeten yüksektir. Bunun nedeni, sipirlerin ankoş içine sıkı bir şekilde yer-

leştirilmesindedir. Bu nedenle sac paketine olan mesafe nispeten küçüktür.

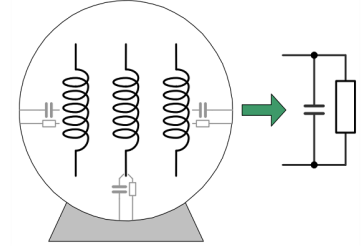
$$C = \epsilon \frac{A}{d}$$

Burada C kapasitans değerini, ϵ aradaki yalıtkanın dielektrik sabitini, A iletkenlerin yüzey alanını ve d iletken yüzeyler arasındaki mesafeyi gösterir. Mesafe küçüldükçe C artar.



Şekil 5. Sargılar ile motor gövdesi arasında oluşan kapasitans

Sargılar ve motor gövdesi arasındaki yalıtım için eşdeğer devre şeması özetle aşağıdaki gibidir. (Şekil 6.)

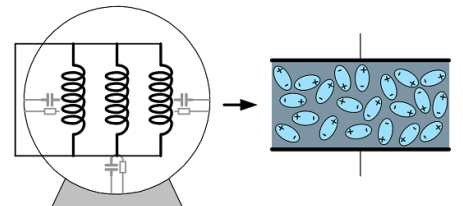


Şekil 6. Sargılar ve motor gövdesi arasındaki yalıtım için eşdeğer devre

Tüm kapasiteler ve yalıtım dirençleri, bir ortak kapasite ve bir ortak yalıtım direnci olarak özetlenmiştir.

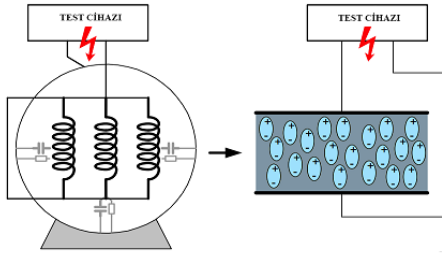
3. Polarizasyon indeksi

Test edilecek izolasyona gerilim bağlanmamışsa ve yakın zamanda herhangi bir test yapılmamışsa izolasyon malzemesindeki tüm moleküller kaotik diziliş şeklinde dizilidir.



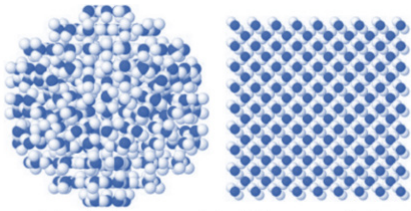
Şekil 7. İzolasyon malzemesindeki kaotik diziliş moleküller

Test gerilimi bağlanmasıyla, iki yalıtım yüzeyi arasında (örn. sargı ve stator/motor gövdesi arasında) bir elektrik alanı oluşur. Dipolar olan bu moleküller bu alan boyunca hizalanmaya başlar. Bu işleme polarizasyon denir. Molekülleri hareket ettirmek (polarize etmek) için akım gereklidir. Moleküllerin polarize olmaları tamamlandıkça bu akım seviyesi zamanla azalır. Tüm moleküller polarize olduğunda bu akım değeri sıfır olur. Polarizasyonun sonunda, tüm dipolar moleküller manyetik alan boyunca hizalanmış olur.



Şekil 7. İzolasyon malzemesindeki moleküllerin polarize olması

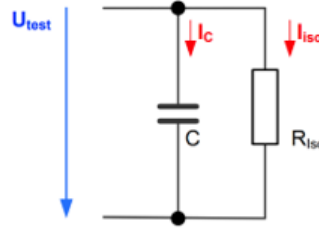
Şekil 7'de polarizasyon başlamadan önce tamamen dağınık halde bulunan moleküller ile test voltajı bağlandıktan ve polarizasyon gerçekleştikten sonra moleküllerin dizilişi "optimum hizalaması" gösterilir.



Şekil 7. Polarize olmadan önce ve polarize olduktan sonra moleküllerin dizilişi

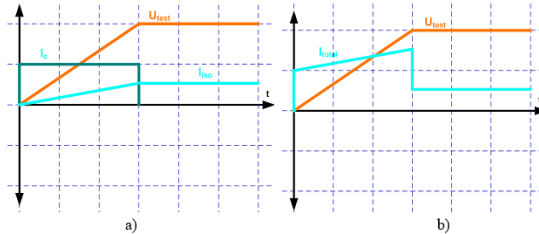
4. Polarizasyonun Ölçülmesi

Polarizasyonu ölçebilmek için, test sırasında akım analiz edilmelidir. Bununla birlikte, akım, birkaç fiziksel tabanlı akım bileşeninden kaynaklandığı için, bunları ayrıntılı olarak anlamak gerekir. Polarizasyon ölçümünün açıklaması, yalıtımın eşdeğer devresi aracılığıyla kolayca anlaşılabilir.



Şekil 8. Bileşenlerinin eş değer devresi

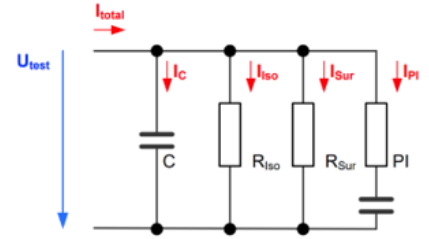
Basitleştirilmiş eşdeğer devrede I_C ve I_{iso} akımlarının olduğunu kabul ediyoruz. Bu akımlarını toplamını I_{total} ile göstereceğiz. Sadece toplam akım dışarıdan ölçülebilir. Eşdeğer devrenin bileşenlerinde meydana gelen akımlar, dışarıdan ölçülebilen toplam akımın temelini oluşturur. Kapasitedeki şarj akımı I_C , yalnızca test voltajı değiştiği sürece oluşur. Voltaj rampa şeklinde değiştiğinden, rampa süresi boyunca şarj akımı sürekli akar. Yalıtım direncinin akımı I_{iso} ise gerilimle orantılı olarak akar. Voltaj arttıkça bu akım da artar voltaj sabit olduğunda ise bu akım da sabittir.



Şekil 9. a) Bağlı test voltajı ve karşılık gelen akımların grafiği b) Toplam akımın grafiği

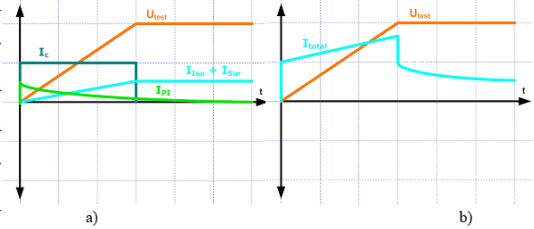
Dışarıdan ölçülebilen toplam akım I_{total} , I_C ve I_{iso} akımlarının toplamına bağlıdır. Bu durum gerçekte de gözlemlenebilir. Fakat burada moleküllerin polarize olması için gereken akım henüz hesaba katılmamıştır. Polarizasyon indeksi testinin doğru anlaşılması için genişletilmiş, daha karmaşık bir eşdeğer devre gereklidir. Hem kapasitansın yüklenmesini hem de polarizasyonla gecikmeli akım düşüşünü simüle etmek gereklidir. Ayrıca test nesnesinde tozlu metal yüzeyler, boş alanlar, bilezikler

veya kömürler gibi yalıtımı etkileyen dış etkenlerin de belirlenmesi gerekir. Bunu eşdeğer devrede yalıtım direncine paralel olarak eklenen R_{sur} (yüzey direnci) ile ifade edeceğiz.



Şekil 10. Yüzey direnci ve akımlar gerçek eşdeğer devre

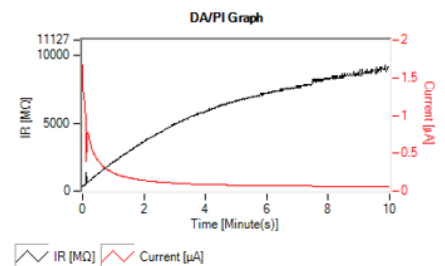
Bu eşdeğer devreye göre oluşan akımlara ait grafik aşağıda (Şekil 11.) gösterildiği gibi olur.



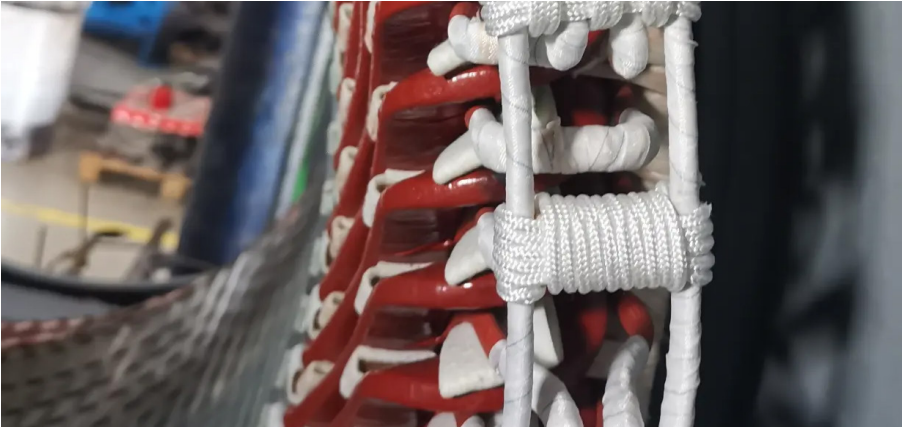
Şekil 11. a) Bağlı test voltajı ve karşılık gelen akımların grafiği b) Toplam akımın grafiği

Akım (I_{total}) gerilim rampası ve istenen test gerilimi U_{test} 'e ulaşıldıktan hemen sonra akım seviyesi I_{iso} 'ya düşmez, burada düşüş yavaş gerçekleşir ve birkaç dakika sürer. Yaklaşık 10 dakika sonunda polarizasyon akımı azalır ve yalnızca izolasyon direncine denk gelen akım kalır. Bu etki,

yalıtkanın polarizasyonu ile ilgilidir. Yavaş yavaş azalan polarizasyon akımı, eşdeğer devrede RC elemanı tarafından sağlanır. RC elemanındaki kondansatör, seri direnç tarafından geciktirilerek yavaşça şarj edilir.



Şekil 12. Gerçek ölçüm sonucu elde edilen IR ve I grafiği



Polarizasyon akımı çok düşük olduğundan, polarizasyon akımının ölçümüne başlamadan önce yüksek akımlı diğer etkiler beklenmelidir. Bu yaklaşık bir dakika olarak kabul edilir. Böylece moleküllerin hareketliliği, başlangıçtaki akım ile polarizasyondan sonraki indirgenmiş akım arasındaki ilişki ile belirlenebilir.

$$PI = \frac{1 \text{ dakika sonundaki akım}}{10 \text{ dakika sonundaki akım}}$$

Veya

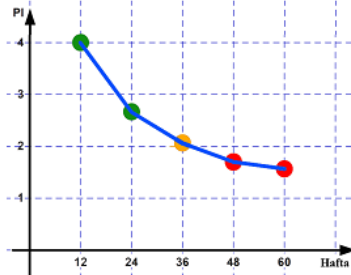
$$PI = \frac{10 \text{ dakika sonundaki direnç}}{1 \text{ dakika sonundaki direnç}}$$

İyi bir izolasyon durumunda, akımın 10 dakika sonunda üç veya dört kat azalması gerekir, çünkü bu süre içinde tüm dipolar moleküllerin polarize olması tamamlanmıştır. Bu, yüksek ve iyi bir PI oranı demektir. Örneğin. PI=4 veya PI=5. Eğer kötü bir yalıtım varsa polarizasyon gerçekleşmez veya çok yavaş gerçekleşeceği için azalmayan bir toplam akım görülür. Bu durumda yalıtımın eskidiği ve kötü anlamına gelir. Bu durumda düşük bir PI oranı hesaplanmış oluruz. Örneğin. PI=1,5 veya daha düşük bir seviye görürüz. Böyle bir elektrik motoruna acilen bakım yapılmalıdır.

Tablo 1. PI oranlarına göre yalıtımın durumu

PI : < 1,2	Kötü
PI : 1,2 ... 1,3	Eski veya yaşlanmış yalıtım
PI : 2 >	İyi
PI: 3 ... 4	Çok iyi

Bu oranlar, yalıtım durumu için bize genel bir bilgi verse de en doğru tespiti yapabilmek için tüm testlerin belli periyotlar halinde yapılması ve uzman kişi tarafından yorumlanması gerekir. PI testi, çoklu ölçümlerle yapıldığında önleyici ve kestirimci bakım gerçekleştirilebilir. Bu nedenle, PI-testi düzenli aralıklarla yapılmalıdır. Makinenin önleyici bakımı, tamamen arıza meydana gelmeden planlanabilir.



Şekil 13. 12 haftada bir düzenli olarak yapılan PI testi

5. PI testi için bilinmesi gerekenler

En sık yapılan hatalardan biri, PI testinin diğer elektriksel testlerin ardından uygulanmasıdır. Yalıtım direnci ölçümü veya yüksek gerilim DC testi sonrasında PI testinin tekrar edilmesi, sağlıklı sonuçlar vermez. Bunun nedeni, bu tür testler sırasında yalıtım içerisindeki moleküllerin zaten polarize olmuş olmasıdır. Önceden oluşan bu polarizasyon, PI testinde ölçülen akım değerlerini etkileyerek hatalı değerlendirmelere yol açar. Eğer daha önce herhangi bir DC test

(yalıtım direnci veya yüksek gerilim testi) uygulanmışsa, PI testi yapılmadan önce sistemde depolanan enerjinin mutlaka boşaltılması gerekir. Bunun için tüm sargı uçları birbirine ve gövdeye kısa devre edilmelidir. Güvenilir bir ölçüm elde edebilmek adına bu boşaltma işlemi en az 1 saat süreyle sürdürülmelidir. Öte yandan, yalıtım direncinin 5 GΩ'dan büyük olduğu durumlarda PI testi yapmanın pratik bir anlamı bulunmamaktadır. Bu seviyedeki bir yalıtım direnci zaten oldukça iyi kabul edilir ve bazı sargı yapılarında belirgin bir PI etkisi gözlemlenmeyebilir. Yalıtımın çok iyi olduğu durumlarda polarizasyon süreci daha kısa sürede tamamlanır. Bu nedenle 1. dakika ve 10. dakika akım değerleri arasındaki fark azalır ve PI oranı düşük çıkabilir.

Kaynaklar:

1. SCHLEICH GmbH, Polarization Index (PI) & DAR Test Method Guide, Schleich Technical Whitepapers, Germany.
2. IEEE Std 43-2013, IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Electric Machinery, IEEE Power and Energy Society.
3. IEC 60034-27-4:2018, Rotating electrical machines - Part 27-4: Measurement of insulation resistance and polarization index on winding insulation of rotating electrical machines, International Electrotechnical Commission
4. Megger Group Limited, A Stitch in Time... The Complete Guide to Electrical Insulation Testing, Technical Booklet, 2006.
5. Kuffel, E., Zaengl, W. S., & Kuffel, J., High Voltage Engineering: Fundamentals, Newnes, 2000.



İngiltere’de Mühendisliğe Dair

Yurtdışında Mühendislik Yapmak

Azem Alptekin
Elektrik Mühendisi

Yurtdışında mühendislik çok uzun zamandır devam eden bir merak konusuydu benim için. Daha üniversite sıralarındayken bu duyumlardan dolayı morali-min bozulduğu olurdu. İTÜ’nün ABET’i ile uluslararası standartlarda akreditasyonu beni acaba İTÜ’de mi okusaydım diye düşüncelere sevk etmişti defalarca. İngiltere yolculuğu düşüncesi kafamda yer etmeye başladığı zamandan bu yana ciddi araştırmalar yaptım. Doğru bildiğimizi sandığımız birçok şehir efsanesi olduğunun farkına vardım bu süreçte. ‘Diplomamızı kabul etmiyorlar’ savı oldukça yaygındı mesela. Yalnız gerçeğin bu kadar basit ve dosdoğru olmadığını öğreniyor insan zamanla.

Aynı hayat gibi. Gerçeği çok daha çetrefilli ve dalı budaklı.

Mühendis olarak mantıklı ve gerçekçi bir yaklaşım için öncelikle her ülkenin farklı eğitim standardına sahip olduğunu ve kendilerine özel sistemler uyguladığını kabul etmekle başlamamız lazım. Bu nedenle aldığınız eğitimin her ne kadar dünya standartlarında olduğunu düşünseniz de İngiltere’nin standartlarının sizin eğitim standartlarınızdan farklı olduğunu bilgisiyle başlayalım.

İngiltere’de Mühendislik

İngiltere her alanda kendi standartlarını oluşturan ve uygulayan bir ülkedir. Hatta standart ihracatı yaparlar ithalatı

yapmaktan ziyade. Bu nedenle de mühendisliğinizin buradaki pratik uygulaması tahmin ettiğiniz kadar kolay olmayabilir. Diğer bir deyişle dünyada birçok ülkede diplomanızla çalışabilmeniz dahi İngiltere’de çalışamayabilirsiniz. Yazılım mühendisliği diğer mühendislik türlerine göre çok daha yeni bir alan olduğundan, yazılımcıysanız, burada işiniz daha kolay olacaktır. Yalnız bu yazının ana amacı elektrik mühendisliği başta olmak üzere daha çok temel mühendislik alanları hakkında bilgi vermektir.

İngiltere’deki Mühendislik Süreçleri

İngiltere’de mühendislik derken üç farklı süreç var.

- İlki NVQ denen National Vocational Qualification. Yani Ulusal Mesleki Yeterlilik. NVQ'nün seviyeleri var 1'den 8'e kadar. NVQ Türkiye'deki meslek lisesi ve meslek yüksek okulları gibi denebilir. Piyasada uygulamacı olarak çalışıyorsanız, NVQ akademik eğitime göre daha çok tercih edilir. Seviye 3 Türkiye'deki ön lisans eğitime, seviye 6 Türkiye'deki lisans eğitime, seviye 7 Türkiye'deki yüksek lisans eğitime ve en üst seviye olan seviye 8 ise doktora seviyesine tekabül ediyor.
- İkinci yol akademik yeterlilik. Yani üniversitede aldığınız lisans eğitimi. Aldığınız eğitimin burada neye denk geldiğini öğrenmek için önce ciddi bir araştırma yapmanız gerekiyor. Elektrik mühendisi dediğinizde dahi bu alanın çok fazla alt dalı olduğunu araştırmalarınızda görebilirsiniz. Aldığınız eğitimin buradaki hangi seviyeye ve alana denk geldiğini tespit etmek size düşüyor yani.

Sonraki aşamada ise diplomanız ve transkriptiniz ile Ecctis'e (daha önceki adıyla NARIC) başvuruyorsunuz. Onlar sizden aldıkları bilgileri üniversiteniz ile teyit ediyor. Sonra da size bu eğitiminizin buradaki hangi seviyede eğitime denk geldiğini bildiren bir yazı gönderiyorlar. 1 ayı geçebilen bir süreç söz konusu bu aşamada. Ben Elektrik Mühendisi olarak başvurumu yaptığımda bana AQP yani Akademik olarak Kalifiye Kişi (Academically Qualified Person) Level 6 mektubu gönderdiler. Diğer bir deyişle aldığım eğitimin

buradaki üniversitelerde alınan elektrik mühendisliğine denk geldiğini kabul ettiler. Bu başvurumu CSCS kart almak için yapmıştım.

Yalnız burada iş bitmiyor. Daha yeni mühendis değilseniz eğitiminizden daha çok deneyimlerinizi soruyorlar. Deneyimlerinizin başvurduğunuz işle uyumlu olması bekleniyor.

İngiltere'de uygulamadaki elektrik standardı olan BS7671: 2018, diğer ve daha yaygın kullanımıyla 18th edition'ı bildiğinizi kanıtlayan sertifikayı almanızı birçok firma isteyebiliyor. Hele de sahada uygulama işleri yapacaksanız, bu standart olmazsa olmaz.

- Son yol ise biraz daha İngiliz yöntemi diyebileceğim ihtiyaca göre gelişen mühendislikler. Daha doğrusu adına mühendislik denen eğitimler. Buna verebileceğim örnek asansör mühendisliği. Asansör mühendisi olmak istiyorsanız asansör bakım, onarım, uygulama işi yapan bir firmaya girip 4 seneyi bulan bir çıraklık eğitiminden geçiyorsunuz. Bu süreçte size doğrudan asansörler üzerinde çalışarak işin elektrik, elektronik ve mekaniğini öğretiyorlar. Resmi bir eğitimi yok. Son aşamada asansör uygulamalarına dair (genelde iş güvenliğine dair) bazı resmi sertifikaları alınca asansör mühendisi oluyorsunuz. Sonrasında ise ilerleyip daha yüksek maaşlı asansör teknisyeni olabiliyorsunuz. 4 sene hiç bilmeyenlerin süresi. Daha önce aldığınız mühendislik eğitimi içeriğine göre bu süre çok daha kısa-

labiliyor. Çünkü asansör mühendisliğinde mekanik, elektrik ve elektronik bilmeniz gerekiyor.

Gaz mühendisliği biraz daha resmi sayılan, yine buraya özel bir mühendislik türü. Benzeri İngiltere'ye özel başka alanlar da var. İngiltere her alandaki mühendislerini kendi pratik uygulamalarına göre yetiştirdiğinden onlara uymanız gerekiyor. Yani çalışmak istediğiniz alana özel sertifikaları almanız iş bulma şansınızı oldukça artıracaktır.

Bahsetmeden geçmemem gereken bir konu da kimlere mühendis dendiği konusu. Teknik iş yapan, uygulama yapan hemen herkese mühendis denebiliyor burada. Lisans eğitimi almış mühendislerin ise daha sonrasında Charter Engineer, yani yeminli mühendis sürecine girmeleri de bir yol. Charter Engineer olduğunuzda eğitiminiz, yetkinlikleriniz tasdiklenmiş oluyor bir nevi.

İnşaat mühendisliği ve mimarlık konularıyla ilgili çok kısıtlı bilgiye sahip olduğum için bahsetmek istemedim şimdilik. Biraz daha detaylı araştırma konusu onlar.

Gelmeden önce çok sorularım ve endişelerim olsa da İngiltere'deki piyasayı araştırıp işlerin nasıl olduğunu öğrendikçe kafam daha da rahatlamıştı. Bu nedenle bu yazıyı okuyan arkadaşlara önerim alanınız ve eğitiminiz ne olursa olsun, İngiltere'ye gelmeyi düşünüyorsanız öncesinde iyice araştırmanızı tavsiye ederim. Araştırdıkça size en uygun alanı bulup ona dair çalışmanıza başlayabilirsiniz.