



Yanıt yüzey yöntemi ve genetik algoritma kullanılarak transformatör sargı en sıcak nokta sıcaklığının modellenmesi ve optimizasyonu

Engin Ufuk ERGÜL*

Amasya Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Amasya
engin.ergul@amasya.edu.tr ORCID: 0000-0003-0100-5199, Tel: (358) 260 00 67 (1435)

Cenk GEZEGİN

Amasya Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Amasya
cenk.gezegin@amasya.edu.tr ORCID: 0000-0002-4442-904X

Aytaç YILDIZ

Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Bursa,
aytac.yildiz@btu.edu.tr ORCID: 0000-0002-0729-633X

Geliş: 09.05.2018, Kabul Tarihi: 12. 09. 2018

Öz

Elektrik enerjisine olan talebin artmasıyla, bu enerjinin iletimi ve dağıtımında kullanılan en önemli donanımlardan birisi olan transformatörlerin önemi de artmaktadır. Transformatörlerin verimli bir şekilde uzun süreli çalışabilmeleri için izlenmesi gereken en önemli parametrelerden birisi sargı en sıcak nokta sıcaklığı (Hot-Spot Temperature-HST) değeridir. Bu parametrenin belirlenmesi için çeşitli termal modeller kullanılmaktadır. Fakat transformatör içindeki termal olaylar karmaşık olduklarından HST değerini tam olarak veren termal modeller geliştirilememiştir. Bu çalışmanın amacı, yanıt yüzeyi yöntemi (Response Surface Method-RSM) ile kombine edilen üç seviye Box-Behnken tasarımı ve genetik algoritma (GA) yöntemlerini kullanarak maksimum HST'nin tahmin edilmesinde kullanılan optimum parametre değerlerini bulmak için regresyon modeli oluşturmaktır. Böylece HST değeri tahmin edilerek transformatörlerin ömrü ve verimi artırılabilir. Çalışmada, 5kVA 380/220V tek fazlı kuru tip transformatör ile deney düzeneği hazırlanmıştır. Deneyler, üç farklı akım değeri (4, 8 ve 12 A), akım uygulama süresi (3, 6 ve 9 saat) ve ortam sıcaklığında (20, 25 ve 30 °C) Box-Behnken tasarımı dikkate alınarak yapılmıştır. Deneylerden elde edilen yanıtlar Design Expert 11.0.5 programında analiz edilerek HST için matematiksel bir tahmin modeli geliştirilmiş ve parametrelerin optimum değerleri elde edilerek maksimum HST tahmin edilmiştir. Daha sonra, RSM'den elde edilen matematiksel tahmin modelinden yararlanılarak HST tahmini için GA kullanılmıştır. Çalışma sonunda her iki yöntem vasıtasıyla elde edilen tahmin değerleri karşılaştırılmış ve birbirine çok yakın olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Transformatör, Sargı En Sıcak Nokta Sıcaklığı, Yanıt Yüzey Yöntemi, Box-Behnken, Genetik Algoritma

* Yazışmaların yapılacağı yazar

Giriş

Dünya üzerinde elektrik enerjisine olan talep her geçen yıl artmaktadır. Bu talebi karşılamak için sürekli olarak üretim, iletim ve dağıtım yatırımları yapılmaktadır. Transformatörler elektrik enerjisinin üretim, iletim ve dağıtımında kullanılan en önemli ve maliyetli donanımlardan birisidir. Bu donanımların uzun süre verimli bir şekilde işletmesini sağlamak için izleme sistemleri kullanılmaktadır. En temel izleme sistemlerinde genel olarak yağ sıcaklığı, yağda çözünmüş gazlar, sargı en sıcak nokta sıcaklığı ve kademe değiştirici ve soğutma sistemi durumu bilgilerinin hepsi veya bazıları bulunmaktadır (Chu vd., 1999; Betta vd., 2000; Feng vd., 2002; McArthur vd., 2004; Zhang vd., 2008). Sargı en sıcak nokta sıcaklığı (Hot-Spot Temperature-HST) bir transformatörün yüklenmesini belirleyen en önemli parametrelerden birisidir (Susa vd., 2005a; Susa vd., 2005b; Radakovic ve Feser, 2003). Son yıllarda transformatör HST'nin doğrudan ölçümü için fiber optik sıcaklık sensörleri kullanılmaktadır (Riberio vd., 2008; Nordman ve Lahtinen, 2003; Weekes vd., 2004; Picanço vd., 2010). Bu sensörler ancak yeni imalatı yapılan transformatörlere imalat aşamasında monte edilebilir. Fiber optik sensörler ile HST'yi izlemek güç transformatörleri için toplam maliyet içinde çok fazla olmasa da özellikle dağıtım transformatörü maliyetinin oldukça artmasına neden olmaktadır. Literatürde HST'nin belirlenmesi için çeşitli termal modeller kullanılmaktadır (Susa vd., 2005a; Susa vd., 2005b; Radakovic ve Feser, 2003; Riberio vd., 2008; Nordman ve Lahtinen, 2003). Ayrıca IEEE ve IEC tarafından geliştirilmiş termal modellerde bulunmaktadır (IEC 60076-7, 2005; IEEE Std C57.91, 2011). Transformatör sıcaklık artışı kuru tip güç transformatörlerinde IEC standartlarına göre sargı direncindeki değişim ile belirlenebilir. Kuru tip ve yağa daldırılmış transformatörler hakkında sıcaklık artışının ölçülmesi için çeşitli teknikler önerilmiştir (Popescu vd., 2009). Kuru tip transformatörlerin yalıtım sınıflarına göre anma işletme durumları için ortalama sargı sıcaklık artışları ve en sıcak nokta sıcaklıkları Tablo 1'de verilmektedir (Feng vd., 2002;

McArthur vd., 2004; Nordman ve Lahtinen, 2003).

Tablo 1. Sürekli yüklenme durumunda kuru tip trafo sargıları için sıcaklık artış sınırları

Yalıtım Sınıfı Sıcaklığı °C	Anma Akımında Ortalama Sargı Sıcaklık Artış Sınırı °C		HST Sınırı °C	HST Artışı °C
	IEC 60076-11	IEEE C57.12.01		
105 (A)	60	-	130	-
120 (E)	75	-	145	-
130 (B)	80	75	155	90
155 (F)	100	95	180	115
180 (H)	125	115	205	140
200	135	135	225	160
220	150	150	245	180

Kuru tip transformatörlerin hastaneler, madenler, okullar, çok katlı binalar, kimya fabrikaları ve ulaşım sistemleri gibi birçok ticari ve endüstriyel alanlarda kullanımı artmaktadır. Kuru tip trafolar sıvı içine daldırılmış transformatörlere göre oldukça avantajlıdır (Mamizadeh ve Iskender, 2010). Kuru tip transformatörün güvenilirliği içeride sargı etrafında üretilen sıcaklığı dağıtma yeteneğine bağlıdır. Transformatör üreticileri sargılardaki sıcaklık artışını kestirmek için termal ilişki yöntemleri veya bazı standart tasarım eğrileri kullanırlar (Meshkatoddini, 2008). Kullanılan standart eğriler sargılardaki ortalama sıcaklık artışını tahmin edebilmektedir. Kuru tip transformatörlerin ortalama sargı sıcaklığının ve en sıcak nokta sıcaklığını tahmin eden deneysel ve teorik birkaç çalışma vardır. Fan soğutmalı kuru tip transformatörün sargı en sıcak nokta sıcaklığını sıcaklık artış testlerindeki sayısal değerleri kullanarak tahmin eden matematiksel model geliştirilmiştir (Amoda vd., 2011). Kuru tip transformatörde sıcak sargı direncinin belirlenmesinde Çoklu Değişken Regresyon (Multiple Variable Regression (MVR)), Çoklu Polinom Regresyon (Multiple Polynomial Regression (MPR)), Yapay Sinir Ağları (Artificial Neural Networks -ANN) ve Uyarlamalı Bulanık Sinir Ağı Çıkarım Sistemi (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System-ANFIS) gibi istatistiksel metotlar kullanılmıştır. Modelleme çalışmalarında ortalama sargı sıcaklığına göre en sıcak noktanın çeşitli parametrelere etki oranları kullanılmıştır (Srinivasan ve Krishnan, 2012). Kuru tip

transformatörlerin sargı sıcaklık davranışını modellemek için yapay sinir ağ (YSA) modelleri kullanılmıştır. Yapay sinir ağlarının kullanılmasındaki amaç, karmaşık ve lineer olmayan yapıların öğrenilme yeteneğidir. Transformatörlerin sargı sıcaklığı davranışı dinamik olduğu için geri beslemeli yapay sinir ağ modelleri kullanılmıştır. YSA'ya uygulanan üç girişin (yük akımı, çevre sıcaklığı ve giriş gerilimi) transformatörün sargı sıcaklığı tahmininde kullanılmıştır (Aksin, 2011).

Bu çalışmada transformatörlerin verimli bir şekilde uzun süreli çalışabilmeleri için izlenmesi gereken en önemli parametrelerden birisi olan HST'nin tahmin edilmesi için yanıt yüzeyi yöntemi ile kombine edilen üç seviye Box-Behnken tasarımı ve genetik algoritma kullanılmıştır.

Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada kullanılan yanıt yüzey yöntemi ve genetik algoritma ile ilgili aşağıda özet şeklinde bilgi verilmiştir.

Yanıt Yüzey Yöntemi

İstatistiksel temele dayanan kullanılabilir yöntemlerin başında yanıt yüzeyi yöntemi (Response Surface Method-RSM) gelmektedir (Öney ve Salmanlı, 2017; Öztürk ve Nuran, 2012). Bu yöntem, optimal bir yanıt elde etmek için bir dizi tasarlanmış deney kullanarak çeşitli değişkenler ve bir veya daha fazla yanıt değişkeni arasındaki etkileşimi inceler (Öney ve Salmanlı, 2017; Öztürk ve Nuran, 2012; Gangil ve Pradhan, 2017). RSM, bir polinom denklemi oluşturan ve bir veri kümesinin davranışını tanımlamaya yardımcı olan matematiksel ve istatistiksel bir yöntemdir (Mao vd., 2018; Mia, 2018). Karmaşık süreçlerin geliştirilmesi, iyileştirilmesi, modellenmesi ve optimizasyonu için ilk olarak Box ve Wilson tarafından sunulmuştur (Tan vd., 2017; Gangil ve Pradhan, 2017; Kassem vd., 2017; Koç ve Kaymak-Ertekin, 2010). İlgilenilen çıktının değişkenler tarafından etkilendiği ve amacın bu çıktıyı optimize etmek olduğu problemlerin modellenmesi ve analizi için kullanılan

istatistiksel temele dayanan bir yöntemdir (Tan vd., 2017; Gangil ve Pradhan, 2017; Kassem vd., 2017; Koç ve Kaymak-Ertekin, 2010). RSM'nin ana amacı, optimal bir tepki elde etmek için tasarlanmış bir grup deneyin yapılması ve bu deneyler kullanılarak bir regresyon modeli elde edilmesidir. Yöntemin ana avantajı, istatistiksel olarak kabul edilebilir sonuçlar için yeterli olan deneysel çalışmaların sayısını azaltmasıyla birlikte pahalı olan analiz yöntemlerinin maliyetini düşürmesidir (Gangil ve Pradhan, 2017; Kassem vd., 2017; Koç ve Kaymak-Ertekin, 2010; Kumar ve Patil, 2016). RSM üç adımı içermektedir: (1) deney tasarımı, (2) veri toplama, (3) çalışma parametrelerine dayanan yanıt değişkenlerinin tahmin modellerini oluşturma (Mao vd., 2018). Problemin tanımlanmasında probleme uygun biçimde karar verici tarafından tanımlanan girdi değişkenleri

$(X_i, i=1, 2, \dots, k)$ ve yanıt değişkenleri $(Y_j, j=1, 2, \dots, r)$ olarak ele alınan karakteristikler kullanılmaktadır (Box ve Draper, 2007). Çok yanıtlı yüzey problemlerinin modellenmesi aşamasında, yanıt değişkeni ile girdi değişkenleri arasındaki ilişkiyi tanımlayacak uygun bir fonksiyonun belirlenmesi gerekmektedir (Türkşen ve Apaydın, 2012). Gerçek yanıt fonksiyonunun biçimi bilinmediğinden tepki ve bağımsız değişkenler arasındaki gerçek fonksiyonel ilişki için uygun bir model bulunmalıdır. Sistemin yanıtı, bağımsız değişkenin bir lineer fonksiyonu olarak iyi bir uyum veriyorsa, yaklaşım Eşitlik (1) de verildiği gibi birinci dereceden bir modeldir.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (1)$$

İkinci dereceden bir model ise sistemin yanıt yüzeyinde bir eğrilik olduğunda daha uygun olmaktadır.

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2)$$

Bu eşitlikte; y yanıt değişkenini, $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ bilinmeyen regresyon parametrelerini, x_i, x_j süreç (karar) değişkenlerini

$(i=1, 2, \dots, k)$ ve $(j=1, 2, \dots, k)$ ve ε hata terimini göstermektedir (Myers vd., 2016).

RSM'de üç ana tasarım metodu vardır: merkezi kompozit tasarım (CCD), optimal tasarım (OD) ve tam faktöriyel tasarım (FFD). (Mao vd., 2018). En çok kullanılan RSM; CCD ve Box-Behnken tasarımıdır (Erdoğan, 2007). Box-Wilson tarafından geliştirilen CCD ve Box-Behnken tarafından bulunan Box-Behnken tasarım yaklaşımı RSM ile kullanabilecek iki temel tasarım yaklaşımıdır (Sönmez vd., 2016, Güvercin ve Yıldız, 2018). Box-Behnken deneysel tasarım yöntemi tam faktöriyel deneysel tasarım yöntemine kıyasla daha az sayıda deneysel/sayısal sonuç gerektirir (Erler vd., 2008). Box-Behnken tasarımlarında her bir etken üç düzeye sahiptir. Box-Behnken tasarımları CCD'lere kıyasla daha ekonomik bir tasarım sınıfıdır (Köksoy, 2001).

Genetik Algoritma

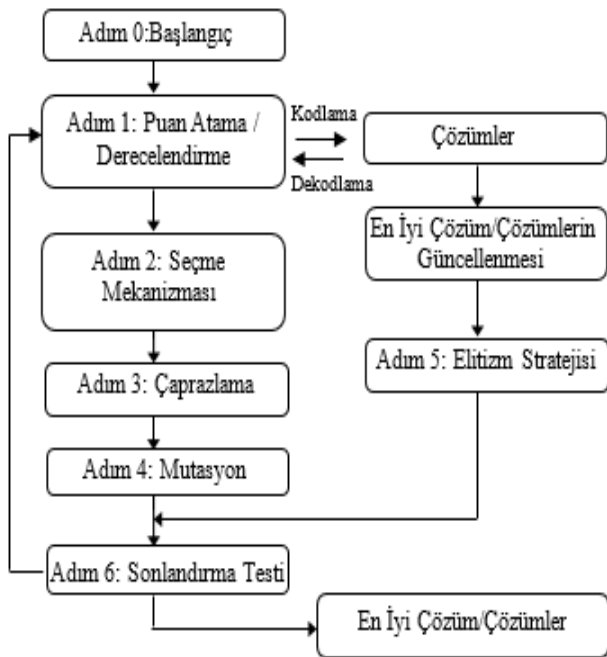
Optimizasyon, daha iyi bir sonuç bulununcaya kadar olası tüm çözümlerin amaç fonksiyonuna göre aranması ve karşılaştırılması işlemidir. Optimizasyon problemlerinin çözülebilmesi için topluluk tabanlı optimizasyon yöntemleri (Genetik Algoritma, Parçacık Sürü Optimizasyonu, Karınca Kolonisi Optimizasyonu vb.) sıklıkla kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden içinde en sık kullanılanlardan bir tanesi Genetik Algoritma (GA)'dır. GA, en iyi çözümü arama işlevini, biyolojik kökenli bazı işlevleri (seçme, çaprazlama, mutasyon, elitizm vb.) taklit ederek yapar. GA'larda bir problemin potansiyel çözümü birey (kromozom) olarak adlandırılır. Bireyler parametreleri temsil eder. Bu parametreler ise bir kromozomun genleri olarak adlandırılır. Bu genler, ikili sayı veya gerçel sayı dizileri kullanılarak oluşturulabilir. Problem çözümünde bir bireyin ya da kromozomun ne kadar iyi olduğu, amaç fonksiyonunda aldığı değerle yakın ilişkili olan puan (uygunluk) değerine göre belirlenir. GA'da en iyi bireylerden her zaman daha iyi bireyler üretilebileceği beklenmektedir. GA uygulamalarında bireylerden oluşan bir topluluk (genellikle rasgele) oluşturulur. Bu topluluğun boyutu, probleme göre değişebilir. Her bir GA

adımında, seçme mekanizması kullanılarak bir alt topluluk seçilir. Seçilen bireylerden oluşan bu alt topluluk, ebeveynler veya eşleşme havuzu olarak adlandırılır. Ebeveynlerin genleri çaprazlama işlevi kullanılarak karıştırılır ve birleştirilerek bir sonraki nesil oluşturulur. Bireylerin birbirinden farklı olmasını sağlamak ve aynı çözümlerin elde edilmesinden kurtulmak için mutasyon işlevi uygulanır. Ayrıca doğada en güçlülerin yaşamını sürdürmesinden esinlenilerek, GA'da da her adımda en iyi birey/bireyler saklanır ve bir sonraki topluluğa eklenir. Böylece en iyi bireylerden en iyi çözümler üretilmesi amaçlanmaktadır. Bu işleme ise elitizm adı verilir. Elitizm mekanizması genetik algoritmaların başarımına önemli ölçüde etki etmektedir (Ergül, 2010).

Michigan Üniversitesinde psikoloji ve bilgisayar bilimi uzmanı olan John Holland bu konuda ilk çalışmaları yapan kişidir (Holland, 1975). Mekanik öğrenme konusunda çalışan Holland, Darwin'in evrim kuramından etkilenerek canlılarda yaşanan genetik süreci bilgisayar ortamında gerçekleştirmeyi düşünmüştür. Araştırmalarını, arama ve en iyiyi bulma için, doğal seçme ve genetik evrimden yola çıkarak yapmıştır. Biyolojik sistemde bireyin bulunduğu çevreye uyum sağlaması örnek alınarak, en iyiyi bulma ve makine öğrenme problemlerinde bilgisayar yazılımı modellenmiştir. Holland'ın çalışmalarının sonucunu açıkladığı kitabının 1975'te yayınlanmasından sonra geliştirdiği yöntemin adı "Genetik Algoritmalar" olarak yerleşmiştir. Goldberg (Goldberg, 1989)' in GA'yı gerçek bir probleme uygulaması ve çığır açan kitabı sayesinde GA'lar konusuna olan ilgi giderek artmıştır. GA'larla ilgili ilk gerçek uygulama 1984 yılında Holland'ın öğrencisi olan David Schaffer tarafından yapılmıştır (Schaffer, 1984). Schaffer tarafından önerilen vektör hesaplamalı genetik algoritma (VEGA), tek amaçlı genetik algoritmanın basit bir iyileştirmesidir ve çoklu çözümleri genetik algoritmaların yalnızca birkaç adımda bulabileceğini göstermiştir.

Genetik algoritmaların genel yapısı Şekil 1'de verilmektedir. GA'da ilk olarak optimizasyon

problemini tanımlayan bir amaç fonksiyonunun belirlenmesi gerekmektedir. Bu işlemden sonra, GA adımları, çözüm önerilerini yani bireyleri içeren bir başlangıç topluluğunun belirlenmesiyle ve probleme ilişkin parametrelerin girilmesiyle başlar. Başlangıç topluluğu rasgele belirleneceği gibi dışarıdan kullanıcı tarafından da girilebilir. Daha sonra, amaç fonksiyonunun hesabı parametrelere ve girişlere göre yapılır. En iyi birey/bireyler bellekte saklanır (elitizm). Seçme mekanizmasıyla (Rulet çarkı, stokastik evrensel örnekleme, turnuva seçimi) bir sonraki nesli yani çözüm önerilerini üretecek anne-baba bireyler seçilir. Çaprazlama ile çocuk bireyler (yeni çözüm önerileri) üretilir. Farklı bireylerin oluşturulması (çeşitlilik) için ise mutasyon işlemi uygulanır. Elitizm mekanizması ile en iyi birey/bireyler çözümlere eklenir. Girilen adım sayısına ve sonlandırma kriterine göre GA'nın bir adımı tamamlanmış olur.



Şekil 1. GA'ların genel yapısı

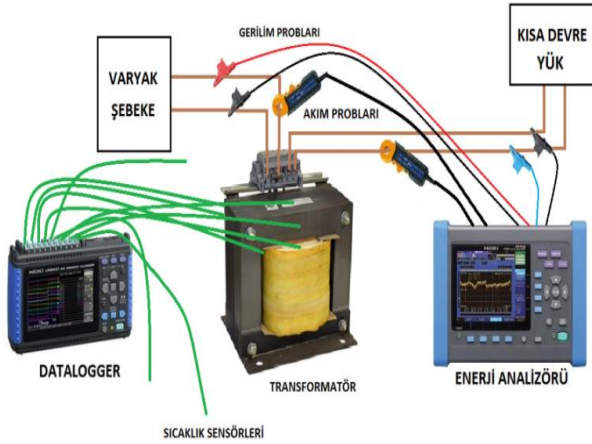
GA'lar problem sayısına göre tek amaçlı veya çok amaçlı, parametrelerin kodlanma biçimine göre gerçel ya da ikili, problem tipine göre ise kısıtlamalı veya kısıtlamasız olarak adlandırılırlar. GA'larda üç temel işlev bulunmaktadır: seçme, çaprazlama ve mutasyon. Bu işlevler dışında, genetik algoritalarda

kullanılan bazı parametreler de vardır: örneğin topluluk boyutu ya da birey sayısı. Bu parametre probleme göre belirlenir ve çok iyi seçilmesi gerekir. Parametrelerin çözünürlüğü ya da bit sayısı ise GA'nın başarımını etkileyen önemli bir faktördür. Aşağıda RSM ve GA ile ilgili yapılan bazı çalışmaların özeti yer almaktadır.

Kılıçkap ve Hüseyinoğlu (2010) AISI 316'nın delinmesinde oluşan çapak yüksekliğinin modellenmesi ve optimizasyonu için RSM ve GA yöntemlerini birlikte kullanmışlardır. Elde edilen modeli kullanarak minimum çapak yüksekliğinin elde edilebileceği optimum parametre değerlerini bulmuşlardır. Güvercin ve Yıldız (2018) AISI 1040 çeliğinin optimum yüzey pürüzlülük değerini ve bu değer sağlandığı optimum giriş parametrelerinin belirlenmesi için RSM yöntemini kullanmışlardır. Wang and Wan (2008) GA tabanlı sinir ağlarını ve RSM yöntemi kullanarak fermente hidrojen üretim sürecinin optimizasyonunu yapmışlardır. Sonuç olarak GA tabanlı sinir ağı yönteminin bu işlem için RSM yönteminden daha iyi sonuçlar verdiğini belirlemişlerdir. Sangwan ve Kant (2017) AISI 1045 çeliğinin tornalanması sırasında minimum güç tüketimine yol açan işleme parametrelerinin tahmini ve optimizasyonunda RSM ve GA yöntemlerini kullanmışlardır. Padhee vd. (2012) RSM ve NSGA-II yöntemlerini kullanarak toz karışımı elektro-deşarj işleminin çok amaçlı parametre optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Jolly vd. (2005) sürekli mıknatıslı motorların tasarım parametrelerinin optimizasyonu için RSM ve GA kullanmışlardır. Bulunan parametrelerin değerlendirilmesi için de sonlu elemanlar yöntemini kullanmışlardır. Hasaniien vd. (2010) kalıcı mıknatıslı tipli çapraz akılı doğrusal motorun ağırlığının azaltılması, itme kuvvetinin iyileştirilmesi ve tutma kuvvetinin azaltılması gerekli olan için optimum parametrelerin belirlenmesinde RSM ve GA'yı kullanmışlardır. Vijayan vd. (2018) çalışmalarında lazer kaynak işleminin parametre optimizasyonunda RSM ve GA'yı kullanarak bu yöntemleri karşılaştırmışlardır. Alvarez vd. (2009) RSM yönteminde GA'nın kullanımı ile ilgili bir literatür taraması yapmışlardır.

Deneysel Çalışmalar

Laboratuvar ortamında elektriksel bağlantıları Şekil 2’de gösterildiği gibi yapılan bir 5kVA 380/220V tek fazlı kuru tip trafo ile deney düzeneği hazırlanmıştır.



Şekil 2. Deney donanımları ve ölçüm sisteminin bağlantısı

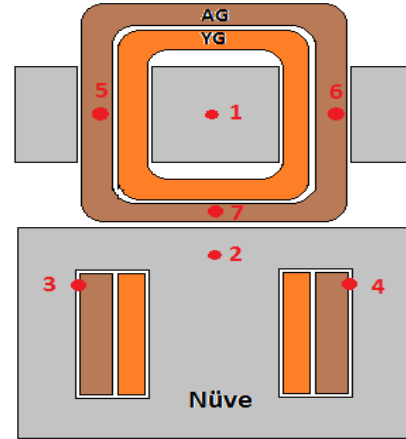
Akım, gerilim ve güç gibi elektriksel büyüklüklerin ölçümü ve kayıt işlemleri için bir adet Hioki 3198 Enerji Analizörü kullanılmıştır. Testler sırasında trafonun beslemesi için kısa devre testinde varyak gerilimi kullanılmıştır. Deney çalışmasında kullanılan prototip trafoya ait anma değerleri Tablo 2’de verilmektedir.

Tablo 2. Prototip trafo anma değerleri

Bölüm	Özellik	
Kayıplar	Boşta	110W
	Yükte	111W
	Toplam	221W
Anma Gerilimi	380/220V	
Anma Kapasitesi	Tek Fazlı, 5kVA,50Hz	
Yalıtım Sınıfı	Class F	
En Yüksek Çalışma Sıcaklığı	155°C	
Sıcaklık Artışı	115°C	
Soğutma Yöntemi	Hava Soğutmalı	
Tasarım	EN-61558-2-2	
Sargı Pozisyonu	AG: Dış Sarım	
	YG: İç Sarım	

Trafo üzerinde Şekil 3’te konumları gösterilen, çekirdek ve sargılar üzerine yerleştirilmiş toplam 7 adet termokupul ile sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Ayrıca çevre sıcaklığı ölçümü için

trafonun 3 tarafına 1’er metre mesafeyle 3 adet termokupul yerleştirilerek ortam sıcaklığı ölçülmüştür. Sıcaklık ölçümü ve kayıt işlemleri Hioki LR8431-20 Datalogger ile yapılmıştır. Ortam sıcaklığı için 3 termokupuldan gelen değerlerin ortalaması alınmıştır.



Şekil 3. Sıcaklık sensörlerinin yerleşimi

Test transformatörünün bulunduğu oda sıcaklığı bir iklimlendirme sistemi ile 20°C’ ye getirilerek deney boyunca sabit kalması sağlanmıştır. Transformatörün alçak gerilim tarafı kısa devre edildikten sonra yüksek (380V) gerilim tarafındaki akımı 4A olacak şekilde varyak ile gerilim ayarlanarak sıcaklık artışının kalıcı duruma geldiği ana kadar sıcaklık artış testi yapılmıştır. Test sırasında sıcaklıklar ve elektriksel büyüklükler kayıt edilmiştir. Daha sonra oda (çevre) sıcaklığı 25°C’ ye getirilerek transformatörün enerjisi kesilip soğuması yani sargı sıcaklıkları oda sıcaklığı ile aynı sıcaklığa gelmesi beklenmiştir. Transformatörün yüksek gerilim sargısından yine aynı akımı (4A) geçecek şekilde ısınma testi 25°C çevre sıcaklığında tekrarlanmış ve sıcaklık artışı kalıcı hale gelene kadar veriler kaydedilmiştir. Daha sonra transformatörün enerjisi kesilerek soğuması beklenmiştir. Son olarak oda sıcaklığı 30°C’ ye ayarlanarak transformatör sargı sıcaklıkları oda sıcaklığına eşit olduğunda yüksek gerilim sargı akımı 4A’ye ayarlanarak ısınma testi tekrarlanmış veriler kaydedilmiştir. Aynı test adımı yüksek gerilim akımı 8A ve 12A olacak şekilde tekrarlanarak veriler her bir

adımda ayrı ayrı kaydedilmiştir ve Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Deneysel sonuçlar

Akım (Amper)	Süre (Saat)	Çevre Sıcaklığı (°C)			Sargı En Sıcak Nokta Sıcaklığı (°C)
		20	25	30	
4A	3	24,6	29,7	34,7	
	6	26,1	31,2	36,1	
	9	27,3	32,3	37,4	
8A	3	42,3	47,8	52,2	
	6	46,1	51,2	56,3	
	9	47,7	52,8	57,9	
12A	3	71,2	76,1	82,2	
	6	79,1	84,2	89,1	
	9	82,9	87,8	92,8	

HST'nin RSM'ye Dayalı Matematiksel Modeli ve Optimizasyonu

Transformatörlerin ömrünü ve verimini artırabilecek HST'yi maksimum yapacak parametrelerin optimizasyonu için yapılan deneysel çalışmada 5kVA 380/220V tek fazlı kuru tip transformatör ile deney düzeneği hazırlanmıştır. Bu çalışmadaki deney tasarımı için, RSM ile oluşturulan deney sistemlerinde en az deney sayısını oluşturan Box-Behnken tasarımı tercih edilmiştir. Çalışmada kullanılacak deneysel tasarım belirlendikten sonra HST'ye etki eden parametreler ve seviyeler belirlenmiş ve Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. HST parametreleri ve seviyeleri

HST parametreleri	Sembol	Seviye		
		Düşük	Merkez	Yüksek
Akım	<i>I</i>	4	8	12
Akım Süresi	<i>t</i>	3	6	9
Ortam Sıcaklığı	<i>T</i>	20	25	30

Deneyler Tablo 5'te verilen Box-Behnken tasarımı dikkate alınarak yapılmış ve yapılan deneyler sonucunda elde edilen HST değerleri ölçülerek tabloya eklenmiştir. Tablo 5'te verilen değerler hem Box-Behnken tasarımında kullanılan 3 seviyeli yapıyı hem de bu seviyelere karşılık gelen gerçek değerleri göstermektedir.

Tablo 5. Box-Behnken deney tasarımı

D deney No	Değişkenlerin gerçek ve kodlanmış seviyesi			Deneysel yanıt HST
	Akım, <i>I</i> (amper)	Akım Süresi, <i>t</i> (saat)	Ortam, <i>T</i> Sıcaklığı	
1	4 (-1)	3 (-1)	25 (0)	29,7
2	12 (+1)	3 (-1)	25 (0)	76,1
3	4 (-1)	9 (+1)	25 (0)	32,3
4	12 (+1)	9 (+1)	25 (0)	87,8
5	4 (-1)	6 (0)	20 (-1)	26,1
6	12 (+1)	6 (0)	20 (-1)	79,1
7	4 (-1)	6 (0)	30 (+1)	36,1
8	12 (+1)	6 (0)	30 (+1)	89,2
9	8 (0)	3 (-1)	20 (-1)	42,3
10	8 (0)	9 (+1)	20 (-1)	47,7
11	8(0)	3 (-1)	30 (+1)	52,3
12	8 (0)	9 (+1)	30 (+1)	57,8
13	8 (0)	6 (0)	25 (0)	51,3
14	8 (0)	6 (0)	25 (0)	51,3
15	8 (0)	6 (0)	25 (0)	51,3

Elde edilen deneysel yanıtları için Design Expert 11.0.5 paket programı kullanılarak istatistiksel analizler yapılmış olup, optimum HST için uygun olan ikinci dereceden bir regresyon modeli Denklem (3)'deki gibi oluşturulmuştur.

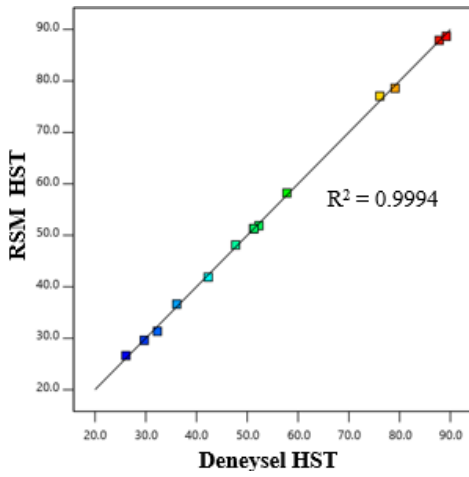
$$HST = -3.387 - 1.056I + 1.108t + 1.11T + 0.189It + 0.0013IT + 0.0017tT + 0.399I^2 - 0.1347t^2 - 0.0025T^2 \quad (3)$$

Elde edilen HST ile ilgili modelin ve modeldeki katsayıların doğruluğunu belirleyen F testi ve parametrelerin HST'ye katkısını belirlemek için varyans analizi (ANOVA) yapılmış sonuçları Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. HST için ANOVA tablosu

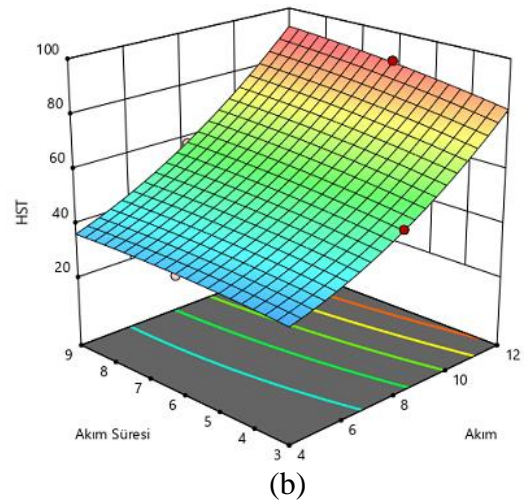
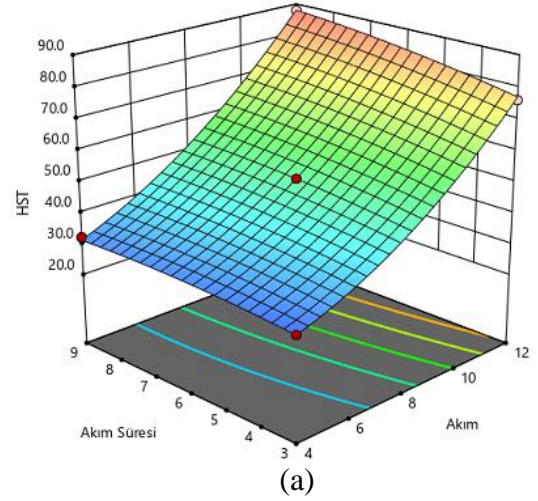
Kaynak	Kareler toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	F-değeri	p- değeri
Model	5872.22	9	652.47	893.79	< 0.0001
<i>I</i> -Akım	5408.00	1	5408.00	7408.22	< 0.0001
<i>t</i> -Akım Süresi	79.38	1	79.38	108.74	0.0001
<i>T</i> -Ortam Sıcaklığı	202.01	1	202.01	276.72	< 0.0001
<i>It</i>	20.70	1	20.70	28.36	0.0031
<i>IT</i>	0.0025	1	0.0025	0.0034	0.9556
<i>tT</i>	0.0025	1	0.0025	0.0034	0.9556
<i>I</i> ²	150.65	1	150.65	206.37	< 0.0001
<i>t</i> ²	5.43	1	5.43	7.44	0.0414
<i>T</i> ²	0.0144	1	0.0144	0.0198	0.8937
Kalan	3.65	5	0.7300		
Toplam	5875.87	14			
Adequate precision = 88.946			R ² = 0.9994		
R ² (predicted) = 0.9901			R ² (adjusted) = 0.9983		

Tablo 6 incelendiğinde 893.79 F değeri ile modelin ve I (Akım), t (Akım Süresi), T (Ortam Sıcaklığı), I^2 , t^2 model parametrelerinin anlamlı olduğu ($p < 0.0001$) görülmektedir. R^2 (adjusted) = 0.9983 değeri de deneysel yanıtta varyansın % 99.83' ünün ikinci dereceden modelle açıklanabileceğini ifade etmektedir. Deneysel ve RSM denklemi kullanılarak elde edilen tahmini HST değerlerinin Şekil 4'de görüldüğü gibi uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Bu, modelde kullanılan kuadratik regresyon modelinin deney tasarımındaki herhangi bir değişkendeki yanıt faktörlerini hesaplamak için uygun olabileceğini göstermektedir.



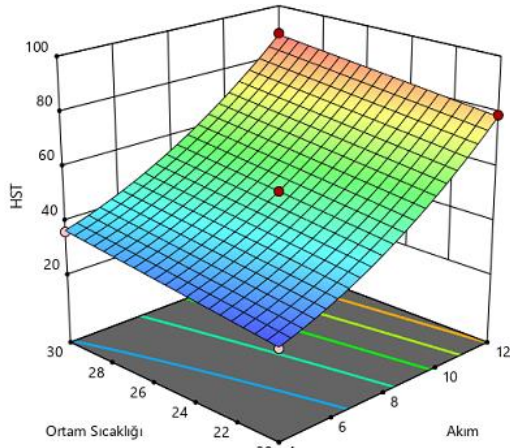
Şekil 4. Deneysel ve RSM HST değerleri

ANOVA analizinden sonra parametrelerin HST üzerinde birlikte oluşturdukları etkiler incelenmiş ve elde edilen bulgular Şekil 5-7'de verilmiştir. Buna göre, akım ve akım süresinin HST'ye etkisi Şekil 5'te görülmektedir.

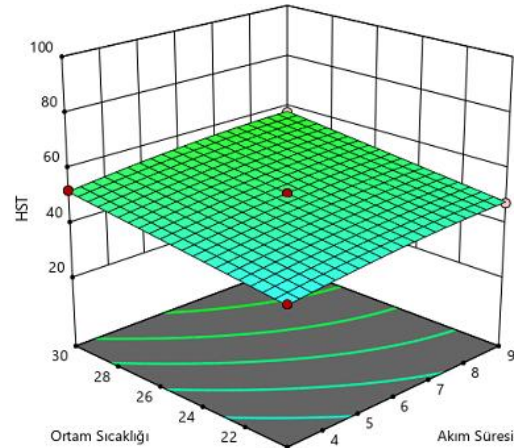


Şekil 5. Akım ve akım süresinin HST'ye etkisi

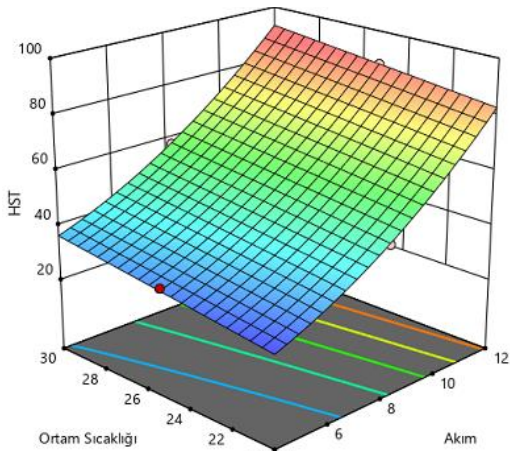
Şekil 5a incelendiğinde HST üzerinde akımın önemli bir etkisi olduğu görülmektedir. Buna göre akım değeri yükseltildiğinde HST'nin de ciddi bir şekilde yükseldiği görülmektedir. Akım süresinin ise HST üzerinde çok büyük bir etkisi olmadığı tespit edilmiştir. Ayrıca akım ve akım süresi parametrelerinin sabit tutulup ortam sıcaklığı parametresinin değeri artırıldığında (Şekil 5b) HST'nin de arttığı gözlemlenmiştir. Şekil 6'da ortam sıcaklığı ve akım parametrelerinin HST'ye etkisi verilmiştir.



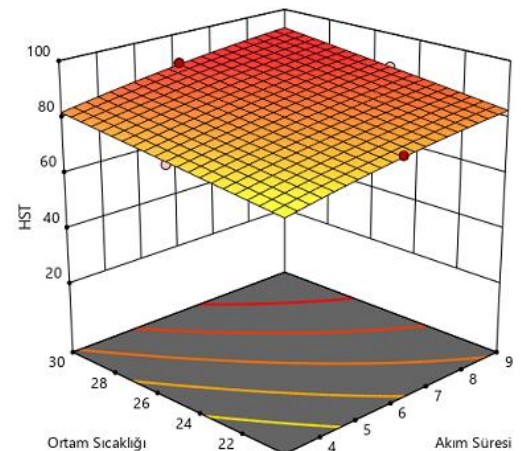
(a)



(a)



(b)



(b)

Şekil 6. Ortam sıcaklığı ve akım parametrelerinin HST'ye etkisi

Şekil 7. Ortam sıcaklığı ve akım süresi parametrelerinin HST'ye etkisi

Şekil 6a incelendiğinde hem ortam sıcaklığı hem de akım parametrelerinin değerleri arttığında HST'nin de arttığı görülmektedir. Ancak akım parametresinin etkisinin daha büyük olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 6b'de her iki parametrenin sabit tutulup akım süresi parametresinin değeri artırıldığında HST'de çok az miktarda da olsa artma olduğu görülmektedir.

Ortam sıcaklığı ve akım süresi parametrelerinin HST'ye etkisi ise Şekil 7'de görülmektedir.

Şekil 7a'ya göre ortam sıcaklığı ve akım süresi parametrelerinin değeri arttığında HST'nin de arttığı görülmektedir. Şekil 7b'deki her iki parametrenin sabit tutulup akım değerinin artırıldığı durumda HST'nin önemli oranda arttığı tespit edilmiştir.

Parametrelerin HST üzerindeki etkileri incelendikten sonra maximum HST için optimum parametre değerleri Design Expert 11.0.5 programından elde edilmiştir. Elde edilen optimum parametre değerleri ve bu optimum değerlere karşılık gelen HST değeri Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. Optimum parametre ve HST değerleri

Akım, I (amper)	Akım Süresi, t (saat)	Ortam Sıcaklığı T (°C)	HST
11.999	8.849	29.599	92.360

Elde edilen bu optimum parametre değerlerine göre tekrar deney yapılmış ve yapılan deneyler sonucunda maksimum HST 92,8 °C olarak elde edilmiştir. Bu sonuca göre Box-Behnken tasarımı ve deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar birbirine çok yakın çıkmıştır ve dolayısıyla birbirleriyle uyumlu olduğu söylenebilir.

HST'nin GA ile optimizasyonu

Bu bölümde HST'nin GA ile optimizasyonu amaçlanmaktadır. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen veriler kullanılarak HST'nin tahmini için RSM yöntemi ile bir matematik model oluşturulmuştur. Bu model, sargı en sıcak nokta sıcaklığının, akım, akımın süresi ve ortam sıcaklığı ile olan ilişkisini göstermektedir (Bkz. Denklem 3) Bu model kullanılarak sargı en sıcak nokta sıcaklığını oluşturan en iyi parametrelerin belirlenmesi gerekmektedir. GA ile bu problemin çözümü için öncelikle amaç fonksiyonun belirlenmesi gerekmektedir. Amaç fonksiyonu olarak Denklem (3) kullanılmıştır. Bu amaç fonksiyonunda yer alan parametrelerin alt ve üst sınırları Tablo 8'de verilmektedir.

Tablo 8. Amaç fonksiyonundaki parametrelerin alt ve üst sınırları

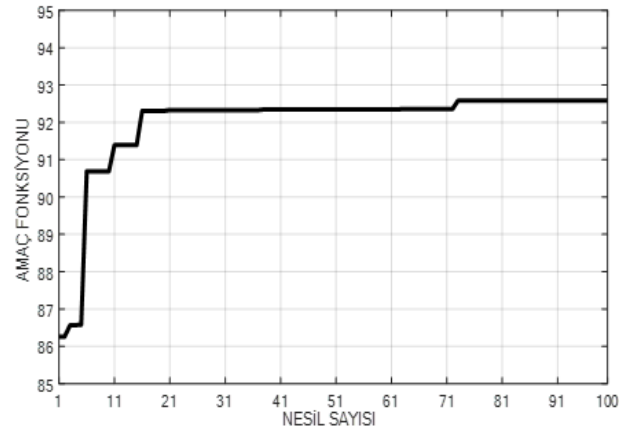
Parametreler	Alt Sınır	Üst Sınır
Akım (Amper)	4	12
Akım Süresi (Saat)	3	9
Ortam Sıcaklığı (°C)	20	30

GA, Tablo 9'de verilen parametrelerle çalıştırılarak sargı en sıcak nokta sıcaklığı ve bu sıcaklıktaki parametreler elde edilmiştir. Seçme mekanizması olarak Stokastik evrensel örnekleme kullanılmıştır. İki noktalı çaprazlama ve uniform mutasyon yöntemleri kullanılmıştır. Elitizm mekanizması ile her adımdaki en iyi bireyler saklanmış ve bir sonraki neslin oluşturulmasında kullanılmıştır.

Tablo 9. GA parametreleri

GA Parametresi	Değeri
Birey Sayısı	100
Bit Sayısı	30
Nesil Sayısı	100
Çaprazlama Olasılığı	0.85
Mutasyon Olasılığı	0.08

Belirlenen parametreler ve yöntemler kullanılarak GA programı çalıştırılmıştır. Amaç fonksiyonun nesil sayısına göre değişimi Şekil 8'de verilmektedir.

**Şekil 8.** Amaç fonksiyonunun nesil sayısı ile değişimi

GA ile yapılan optimizasyon işleminde sargı en sıcak nokta sıcaklığı değeri $HST_{max}=92.5791$ olarak elde edilmiştir. Bu değer elde edildiği optimum parametre değerleri Tablo 10'da verilmiştir.

Tablo 10. Sargı en sıcak nokta sıcaklığı değeri için en iyi parametre değerleri

Parametre	Değer
Akım (Amper)	11.9844
Akım Süresi (Saat)	8.9062
Ortam Sıcaklığı (°C)	29.9218

Tablo 10'daki parametre değerleri dikkate alınarak 11.9844 A akım, 8.9062 saat akım süresi ve 29.9218 °C ortam sıcaklığı ile deney tekrarlanmıştır ve deney sonucunda HST değeri 92,7 °C olarak elde edilmiştir. Sonuç olarak, deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların GA'dan elde edilen sonuçlar ile uyumlu olduğu görülmektedir.

Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada, transformatörlerin verimli olması için en önemli parametrelerinden biri olan sargı en sıcak nokta sıcaklığının bulunmasında optimum parametre değerlerinin belirlenmesi için RSM ile kombine edilen üç seviye Box-Behnken tasarımı ve GA yöntemi kullanılmıştır.

Çalışmada, 5kVA 380/220V tek fazlı kuru tip bir transformatör ile deney düzeneği hazırlanmıştır. Deneyler, üç farklı akım değeri (4, 8 ve 12 A), üç farklı akımın uygulama süresi (3, 6 ve 9 saat) ve üç farklı ortak sıcaklığında (20, 25 ve 30 °C) yapılarak HST yanıtları elde edilmiştir. Elde edilen HST yanıtları Design Expert 11.0.5 programında analiz edilerek HST'ye etki eden parametrelerin optimum değerleri tespit edilmiştir. RSM yöntemi ile elde edilen amaç fonksiyonu kullanılarak GA ile de problemin çözümü yapılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

- Box-Behnken faktöriyel tasarımı ile yapılan deney sonuç tahminlerinde R^2 (adjusted) = 0.9983 olarak elde edilmiş ve bu tasarımın bu problem için doğru tahminler yapabileceği,
- Deneylerde kullanılan parametreler ve seviyelere göre akımın HST'yi etkileyen en önemli parametre olduğu,
- Sargı en sıcak nokta sıcaklığına etkisi en az olan parametrenin akım süresi olduğu,
- HST'nin optimizasyonu için akımın 11.999 A, akım süresinin 8.849 saat ve ortam sıcaklığının 29,599 °C kullanılması gerektiği,
- Box-Behnken tasarımı ve deneysel çalışmadan elde edilen optimum sargı en sıcak nokta sıcaklığı değerinin birbirine çok yakın olduğu ve bu sebeple HST optimizasyonu problemlerinin çözümünde Box-Behnken tasarımının kullanılabilirliği, tespit edilmiştir.

Ayrıca, RSM ve GA' dan elde edilen sonuçlar birbirlerine oldukça yakın değerlerde çıkmıştır. Buna göre elde edilen model sargı en sıcak nokta sıcaklığının tahmin edilmesinde kullanılabilir.

Bu şekilde pahalı donanımlar kullanılmasının önüne geçilerek benzer transformatörlerde kullanılabilir ekonomik bir izleme sistemi gerçekleştirilebilir. Gelecek çalışmalarda daha fazla deney yapılarak nominal değer üstündeki ani aşırı yüklenmeler ve dinamik yük akımlarında da sargı en sıcak nokta sıcaklığının tahmin edilmesine çalışılacaktır.

Teşekkür

Bu çalışma Amasya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından desteklenmiştir (Proje Numarası: FMB-BAP 17-0294).

Kaynaklar

- Amoda, O., Tylavsky, D.J., McCulla G. ve Knuth W., (2011). Evaluation of hottest-spot temperature models using field measured transformer data, *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, **12**, 5, 1-18.
- Box, G. E. ve Draper, N. R., (2007). *Response surfaces, mixtures, and ridge analyses*, **649**, John Wiley & Sons.
- Betta, G., Pietrosanto A. ve Scaglione A., (2000). An enhanced fiber optic temperature sensor system for power transformer monitoring, *Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 1, 153-158.
- Chu D. ve Lux, A., (1999). On-line monitoring of power transformers and components: a review of key parameters, *Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference*, 669-675.
- Erdoğan, F., (2007). Yükseltmiş d-optimal dizayn yöntemi kullanılarak mühendislik dizaynlarında etkinliğin geliştirilmesi: 'sentetik jet' dizayn optimizasyonu çalışması, *Journal of Aeronautics and Space Technologies*, **3**, 1, 51-63.
- Ergül, E. U., (2010). Çok amaçlı genetik algoritmalar: temelleri ve uygulamaları, *Doktora tezi*, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.
- Erler, E., Akçayöz, E. ve Tuncer, İ. H., (2008). Sentetik jet parametrelerinin eliptik profil ve kanat kesidi üzerindeki akışın kontrolü için yanıt yüzeyi yöntemi ile eniyileştirilmesi, *II. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı*, İTÜ, İstanbul.
- Feng J.Q., Sun P., Tang W.H., Buse D.P., Wu Q.H., Richardson Z. ve Fitch J., (2002). Implementation of a power transformer temperature monitoring

- system, *International Conference on Power System Technology*, **3**, 1980-1983.
- Goldberg, D.E., (1989). *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*, Addison- Wesley, Reading, ABD, 432 s.
- Güvercin, S. ve Yıldız, A., (2018). Optimization of cutting parameters using the response surface method, *Sigma*, **36**, 1, 113-121.
- Holland, J., 1975. *Adaptation in natural and artificial systems*, University of Michigan Press, Ann Arbor, ABD.
- International Electrotechnical Commission (2005). IEC 60076-7 Power transformers Part 7: Loading guide for oil-immersed power transformers.
- Kassem, Y., Çamur, H. ve Esenel, E., (2017). Adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) and response surface methodology (RSM) prediction of biodiesel dynamic viscosity at 313 K, *Procedia Computer Science*, **120**, 521-528.
- Koç, B. ve Kaymak-Ertekin, F., (2010). Yanıt yüzey yöntemi ve gıda işleme uygulamaları, *Gıda Dergisi*, **35**, 1, 1-8.
- Köksoy, O., (2001). Taguchi ve cevap yüzey felsefelerinin birleştirilmesi: problem ve çözüm stratejileri, *Doktora tezi*, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Kumar, A. ve Patil, P. P., (2016). FEA simulation and RSM based parametric optimisation of vibrating transmission gearbox housing, *Perspectives in Science*, **8**, 388-391.
- Mamizadeh, A. ve Iskender, I., (2010). Winding thermal analyzing of dry type transformers, *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering*, **2**, 4, 80-84.
- Mao, N., Song, M., Pan, D. ve Deng, S., (2018). Comparative studies on using RSM and TOPSIS methods to optimize residential air conditioning systems, *Energy*, **144**, 98-109.
- McArthur, Stephen D.J., Scott M. Strachan ve Jahn G., (2004). The design of a multi-agent transformer condition monitoring system, *IEEE Transactions on Power Systems*, **19**, 4, 1845-1852.
- Meshkatoddini, M. R. ve Abbospour, S. (2008). Aging study and lifetime estimation of transformer mineral oil, *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, **1**, 4, 384-388.
- Mia, M., (2018). Mathematical modeling and optimization of MQL assisted end milling characteristics based on RSM and Taguchi method, *Measurement*, **121**, 249-260.
- Myers, R. H., Montgomery, D. C. ve Anderson-Cook, C. M., (2016). *Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments*, John Wiley & Sons, Inc.
- Nordman H. ve Lahtinen M., (2003). Thermal overload tests on a 400-MVA power transformer with a special 2.5-p.u. Short time loading capability, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **18**, 1, 107 -112
- Öney, Ö. ve Samanlı, S., (2017). Kütahya/Altıntaş grafitlerinin kaba flotasyon parametrelerinin box-behken deney tasarımı kullanılarak optimizasyonu ve modellenmesi, *Dokuz Eylül University-Faculty of Engineering Journal of Science and Engineering*, **19**, 56, 532-542.
- Öztürk, Z. B. ve Nuran, A. Y., (2012). Yanıt yüzey metodu ile porselen karo küçülmesinde ergiticilerin optimizasyonu, *Journal of Engineering and Architecture Faculty of Eskişehir Osmangazi University*, **25**, 2, 57-65.
- Picanço, A. F., Martinez M. L., ve Rosa P.C., (2010). Bragg system for temperature monitoring in distribution transformers, *Electric Power Systems Research*, **80**, 1, 77-83.
- Popescu, M. C., Mastorakis N. E., Bulucea C. A., Manolea G. ve Perescu-Popescu L., (2009). Nonlinear thermal model for transformers study, *WSEAS Transactions on Circuits and Systems*, **8**, 6, 487-497.
- Radakovic Z. ve Feser K., (2003). A new method for the calculation of the hot-spot temperature in power transformers with ONAN cooling, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **18**, 4, 1284-1292.
- Ribeiro, A. L., Eira, N. F., Sousa, J. M., Guerreiro, P. T. ve Salcedo, J. R. (2008). Multipoint fiber-optic hot-spot sensing network integrated into high power transformer for continuous monitoring, *IEEE Sensors Journal*, **8**, 7, 1264-1267.
- Schaffer, J.D., (1984). Some experiments in machine learning using vector evaluated genetic algorithms, *Doktora tezi*, Vanderbilt University, Nashville, ABD.
- Sönmez, F., Başak, H. ve Baday, Ş., (2016). Haddeme işleminin yüzey yanıt yöntemi ile analizi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part:C, Tasarım ve Teknoloji*, **4**, 4, 275-283.
- Srinivasan, M. ve Krishnan A., (2012). Hot resistance estimation for dry type transformer using multiple variable regression, multiple polynomial regression and soft computing techniques. *American Journal of Applied Sciences*, **9**, 2, 231-237.

- Susa, D., Lehtonen M. ve Nordman H., (2005a). Dynamic thermal modelling of power transformers, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **20**, 1, 197-204.
- Susa, D., Lehtonen M. Ve Nordman H., (2005b). Dynamic thermal modeling of distribution transformers, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **20**,3 1919-1929.
- Tan, Y. H. ve Abdullah, M. O., Nolasco-Hipolito, C., Zauzi, N. S. A., (2017). Application of RSM and Taguchi methods for optimizing the transesterification of waste cooking oil catalyzed by solid ostrich and chicken-eggshell derived CaO, *Renewable Energy*, **114**, 437-447.
- The Institute of Electrical and Electronics Engineers (2012). IEEE Std C57. 91–2011 Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers and Step-Voltage Regulators.
- Türkşen, Ö. ve Apaydın, A., (2012). Bulanık yaklaşım ile çok yanıtli yüzey problemlerinin modellenmesi ve optimizasyonu, *Anadolu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi –A*, **13**, 1, 65-79.
- Weekes, T., Molinski T. ve Swift G., (2004). Transient transformer overload ratings and protection, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, **20**, 2, 32-35.
- Zhang, X. ve Gockenbach E., (2008). Asset-management of transformers based on condition monitoring and standard diagnosis, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, **24**, 4, 26-40.

Modeling and Optimization of Transformer Hot-Spot Temperature Using Response Surface Method and Genetic Algorithm

Extended abstract

Due to the increase in electric energy demand, the importance of transformers, one of the most important equipment used for the transmission and distribution of this energy, has increased. One of the most important parameters to be monitored for the long-term efficient operation of the transformers is Hot-Spot Temperature (HST) value. Various thermal models have been used to determine HST value. Since the thermal events in the transformers are complex, thermal models that give the correct HST value cannot be developed. The aim of this study is to create a regression model to determine optimal parameter values used in the estimation of maximum HST by using three levels Box-Behnken design combined with Response Surface Method (RSM) and Genetic Algorithm (GA) methods. Thus, the lifetime and the efficiency of the transformers can be increased by estimating the HST value. In this study, 5 kVA 380 / 220V single phase dry-type transformer was used for the experiments. The experiments were performed considering the Box-Behnken design with three different current values (4, 8 and 12 A), current application time (3, 6 and 9 hours) and ambient temperature (20, 25 and 30 ° C). The responses obtained from the experiments were analyzed in the Design Expert 11.0.5 program. As a result, a mathematical estimation model for HST was developed and maximum HST was estimated by obtaining optimum values of the input parameters. Then, GA was used to estimate the HST value by using the mathematical estimation model obtained from RSM. At the end of the study, the estimated values of RSM and GA were compared, and it was seen that the results were very close to each other.

In this study, three levels of Box-Behnken design combined with RSM and GA method were used to determine the optimal parameter values for finding the hot-spot temperature of winding, which is one of the most important parameters for the efficiency of transformers.

The obtained results of the study are as follows:

- Experimental results with the Box-Behnken factorial design were obtained as R^2 (adjusted) = 0.9983, and this design can make accurate estimations for this problem,
- According to the parameters and levels used in the experiments, it was determined that the current was the most important parameter effecting HST,
- The parameter with the smallest effect on the winding hot-spot temperature is the duration of current application,
- For optimization of the HST, the current should be 11,999 A, the duration of current application should be 8,849 hours and the ambient temperature should be 29,599 ° C,
- The optimal winding temperature obtained from the Box-Behnken design and the experimental work is very close to each other. Therefore, the Box-Behnken design can be used to solve the HST optimization problems.

In addition, the results obtained from RSM and GA are very close to each other. Accordingly, the obtained model can be used by estimating the hot-spot temperature.

An economic monitoring system, which can be used in similar transformers, can be realized without using expensive equipment. In future works, more experiment will be done to estimate the instantaneous overloads above the nominal value and to estimate the hot-spot temperature of the winding in dynamic load currents.

Keywords: Transformer, Hot-Spot Temperature, Response Surface Method, Box-Behnken, Genetic Algorithm