

**BASKILI DEVRE KARTI MONTAJINDA
HATA BİRLİKTELİKLERİNİ VE ÖRÜNTÜLERİNİ
KEŞFEDEREK ÜRÜN KALİTESİNİ İYİLEŞTİRMEK İÇİN
VERİ MADENCİLİĞİ**

**DATA MINING FOR DISCOVERING DEFECT
ASSOCIATIONS AND PATTERNS TO IMPROVE
PRODUCT QUALITY IN PRINTED CIRCUIT BOARD
ASSEMBLY**

AYŞE MERVE TURANLI PARLAKTUNA

PROF. DR. MURAT CANER TESTİK

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2020

Canım Aileme

ÖZET

BASKILI DEVRE KARTI MONTAJINDA HATA BİRLİKTELİKLERİNİ VE ÖRÜNTÜLERİNİ KEŞFEDEREK ÜRÜN KALİTESİNİ İYİLEŞTİRMEK İÇİN VERİ MADENCİLİĞİ

Ayşe Merve TURANLI PARLAKTUNA

Yüksek Lisans, Endüstri Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Murat Caner TESTİK

Eylül 2020, 116 sayfa

Operasyonel mükemmellik için müşterilerin kalite beklentilerini karşılarken, üretim esnasında karşılaşılan hataları ve yeniden işleme oranlarını da en aza indirmek hedeflenmelidir. Bu ancak, ilk seferde doğru ürünü üreterek sağlanabilir. Bu çalışmada, baskılı devre kartı montaj hatlarında meydana gelen hataların kök sebeplerinin geleneksel yöntemler yerine veri madenciliği uygulamalarıyla incelenmesi hedeflenmiştir. Hem hataların birliktelikleri hem de zaman içerisindeki örüntüleri incelenmiş, aynı kök sebebi tetikleyebilecek farklı hata türlerinin belirlenmesi sağlanmıştır. Birliktelik kurallarının keşfi için Apriori algoritması, sıralı örüntü madenciliği için ise, Eşdeğerlik Sınıfları kullanılarak Sıralı Örüntü Keşfi (Sequential Pattern Discovery using Equivalence Classes - SPADE) algoritması kullanılarak baskılı devre kartı montajı yapan farklı iki firmada uygulama yapılmıştır. Hem kart tipi bazında, hem de yıl bazında birliktelik kuralları keşfedilirken, sıralı örüntü analizi ile ise birlikte oluşan hataların zamana bağlı ilişkileri anlamlandırılmaya çalışılmıştır. Üretilen birliktelik kurallarının sayıca çok olduğu

durumlarda, meta kurallardan faydalanılmıştır. Bu tez kapsamında, kullanılan metodunun standartlaştırılması ve farklı firmalarda farklı alanlarda uygulanabilmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, gerçek veriler ikinci bir firmada uygulanmış ve metodun uygulanabilirliği doğrulanmıştır. Standartlaşma ve kök sebep çalışmalarına kolay entegrasyon çalışmaları kapsamında, R üzerinden bir ara yüz oluşturarak, analizlerin görselleştirilmesi sağlanmıştır. Bu çalışmada, kullanılacak verinin hazırlanması, gerçek veri setine metotların uygulanması, elde edilen çok sayıda kuralın elenerek anlamlandırılması, görselleştirilmesi ve son olarak çalışmanın uygulanabilirliğinin farklı bir firmanın üretim hattında doğrulanması örneklerle açıklanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Birliktelik Kuralı Madenciliği, Apriori Algoritması, Sıralı Örüntü Madenciliği, Süreç İyileştirme, Baskılı Devre Kartı

ABSTRACT

DATA MINING FOR DISCOVERING DEFECT ASSOCIATIONS AND PATTERNS TO IMPROVE PRODUCT QUALITY IN PRINTED CIRCUIT BOARD ASSEMBLY

Ayşe Merve TURANLI PARLAKTUNA

Master of Science, Department of Industrial Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Murat Caner TESTİK

September 2020, 116 pages

To achieve operational excellence, companies must satisfy the customers' quality expectations while reducing the number of encountered defects and reworks. This can be achieved only if companies produce the product right at the first time. In this study, defects, which are encountered while producing printed circuit board cards are investigated via data mining rather than conventional methods. Both associations and sequential patterns of defects were analyzed to find out a common root cause that can trigger different kind of defects. Two different sets of defect data are investigated in this study. Apriori algorithm was selected for association rules, while Sequential Pattern Discovery using Equivalence Classes – SPADE algorithm was considered for sequential pattern mining. Defects are analyzed in two ways for association mining; card-based and year-based. On the other hand, in sequential pattern mining, associated defects relationship over time were investigated. During the investigations, there were huge number of rule sets to be analyzed and these rule sets are not easy to analyze or have a meaningful conclusion. Thus, meta rules approach was utilized to come up with reliable

results. One goal of this thesis is to standardize this analysis method for different companies at different application areas. To achieve this goal, two companies' data were used to standardize the method and compare the results. R software is used to create an interface for visualization of data, which extends the standardization procedure. Within this thesis, exemplifications for organizing data, implementation methods for analysis, a procedure for generating meaningful rule sets as well as visualization tools for comparison of results is provided.

Keywords: Association Rule Mining, Apriori Algorithm, Sequential Pattern Mining, PCB Assembly, Process Improvement.

TEŞEKKÜR

Bana akademik hayatı tekrardan sevdiren, karşılaştığım tüm sıkıntı ve sorunlarda yönlendirmeleri, sabrı ve anlayışı ile hep destek olan saygıdeğer hocam Sayın Prof. Dr. Murat Caner TESTİK'e,

Hacettepe Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü'ndeki lisansüstü eğitimim süresinde emeği geçen tüm hocalarıma,

Değerli görüşleri ve yorumlarıyla tezime değer katan tez savunma jürimdeki hocalarıma,

Hoşgörü ve desteklerini esirgemeyen yöneticilerime ve çalışma arkadaşlarıma,

Hiçbir zaman desteklerini esirgemeyen, her daim moral ve motivasyon sağlayan halam, amcam ve kardeşime,

Yoğun çalışma temposunda bana her zaman destek olan anlayışlı eşime çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ŞEKİLLER	ix
ÇİZELGELER.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Problem Tanımı	2
1.2. Motivasyon.....	2
1.3. Yöntem	3
1.4. Organizasyon.....	3
2. GENEL BİLGİLER.....	5
2.1. Veri Madenciliği	5
2.2. Birliktelik Analizleri	6
2.3. Tipik PCB Montaj Hattı	11
3. METODOLOJİ.....	15
3.1. Veri Setinin Hazırlanması	16
3.2. Birliktelik Kuralları	20
3.2.1 Apriori Algoritması	20
3.2.2 Meta Kurallar	24
3.2.3 İlginçlik Ölçütleri	25
3.3. Sıralı Örüntü Madenciliği.....	29
3.4. Süreç Performansının Ölçümü için Anahtar Performans Göstergeleri	30
3.5. Verilerin Görselleştirilmesi	31
4. ANALİZ VE YORUMLAR.....	39
4.1. Birliktelik Kuralları	39

4.1.1 Yıl Bazlı Analiz	41
4.1.2. Kart Bazlı Analiz	47
4.2. Meta Kurallar	53
4.3. Sıralı Örüntü Madenciliği	56
4.3.1 Veri Ön İşleme.....	57
4.3.2 Yıl Bazlı Analiz	59
4.3.3 Kümülatif Veri Analizi	62
4.4. Süreç Performansının Ölçümü	63
4.5. Metodolojinin Uygulanabilirliği	64
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	69
KAYNAKLAR	72
EKLER.....	76
EK 1 - Pareto Grafikleri.....	76
EK 1a – 2012 Yılı Hata Türleri Pareto Grafiği.....	76
EK 1b – 2013 Yılı Hata Türleri Pareto Grafiği	77
EK 1c – 2014 Yılı Hata Türleri Pareto Grafiği.....	77
EK 1d – 2015 Yılı Hata Türleri Pareto Grafiği	78
EK 1e – 2016 Yılı Hata Türleri Pareto Grafiği.....	78
EK 1f– 2017 Yılı Hata Türleri Pareto Grafiği	79
EK 2 – Birliktelik Kuralları	80
EK 2a – 2012 Yılı Kural Listesi (Destek = %10, Güven = %65).....	80
EK 2b – 2012 Yılı Kural Listesi (Destek = %5, Güven = %65)	80
EK 2c – 2013 Yılı Kural Listesi (Destek = %1, Güven = %65).....	81
EK 2d – 2014 Yılı Kural Listesi (Destek = %1, Güven = %65)	82
EK 2e – 2015 Yılı Kural Listesi (Destek = %1, Güven = %65).....	84
EK 2f – 2016 Yılı Kural Listesi (Destek = %1, Güven = %65)	85
EK 2g – 2017 Yılı Kural Listesi (Destek = %1, Güven = %65)	85
EK 3 - Sıralı Örüntü Madenciliği	86
EK 3a – 2013 Yılı Sıralı Örüntü Madenciliği Çıktıları	86
EK 3b – 2014 Yılı Sıralı Örüntü Madenciliği Çıktıları	86
EK 3c – 2015 Yılı Sıralı Örüntü Madenciliği Çıktıları	87
EK 3d – 2016 Yılı Sıralı Örüntü Madenciliği Çıktıları	87

EK 3e – 2017 Yılı Sıralı Örüntü Madenciliği Çıktıları	87
EK 3f – 2013 ve 2014 Yılları Örüntü Madenciliği Çıktıları	87
EK 3g – 2013, 2014 ve 2015 Yılları Örüntü Madenciliği Çıktıları	88
EK 3h – 2013, 2014, 2015 ve 2016 Yılları Örüntü Madenciliği Çıktıları	88
EK 3j – 2013, 2014, 2015, 2016 ve 2017 Yılları Örüntü Madenciliği Çıktıları	88
EK 4 - Hata Türü Açıklamaları	89
EK 5 - Tez Çalışması Orjinallik Raporu	91
ÖZGEÇMİŞ	92

ŞEKİLLER

Şekil 2.1 Veri Madenciliği Yöntemlerinin Görevlere Göre Sınıflandırılması.....	5
Şekil 2.2 Birliktelik Örüntü Madenciliği Araştırma Konuları	8
Şekil 2.3 Tipik bir PCB hattının şematik görünüşü	13
Şekil 2.4 Gerçek bir PCB üretim hattı	14
Şekil 3.1. İş Akış Şeması	16
Şekil 3.2 Tipik bir PCB montaj hattı veri toplama noktaları	17
Şekil 3.3 Apriori Algoritması Akış Şeması	23
Şekil 3.4 İlginçlik Ölçütleri	26
Şekil 3.5 Ana Panel.....	33
Şekil 3.6 Dağılım Grafiği.....	34
Şekil 3.7 Matris Grafiği	35
Şekil 3.8 Grup Matris Grafiği	36
Şekil 3.9 Balon Grafiği	37
Şekil 3.10 Paralel Koordinat Grafiği	38
Şekil 4.1 2012 Yılı Hata Türleri Pareto Grafiği.....	42
Şekil 4.2 2013 Yılı Hata Türleri Pareto Grafiği.....	44
Şekil 4.3 2013 Yılı Mezar Taşı Hatası Birliktelik Kuralları Balon Grafiği.....	45
Şekil 4.4 2014 Yılı Hata Türlerinin Pareto Grafiği	46
Şekil 4.5 A Kartı Hata Türleri Pareto Grafiği.....	48
Şekil 4.6 B Kartı Hata Türleri Pareto Grafiği.....	50
Şekil 4.7 B Kartı Lehim Topları veya Sıçraması Hatası Birliktelik Kuralları Balon Grafiği	50
Şekil 4.8 F Kartı Hata Türleri Pareto Grafiği	52
Şekil 4.9 Meta Kuralların Gösterimi.....	56
Şekil 4.10 2013 Yılı Sıralı Örüntü Madenciliği İle Oluşan Hataların İlişkileri Görseli .	60
Şekil 4.11 2014 Yılı Sıralı Örüntü Madenciliği İle Oluşan Hataların İlişkileri Görseli .	60
Şekil 4.12 Hata Türleri Pareto Grafiği.....	66

ÇİZELGELER

Çizelge 2.1. Yatay Veri Düzeninde Örnek Veri.....	6
Çizelge 2.2 Dikey Veri Düzenine Örnek Veri	7
Çizelge 2.3 Sıralı Örüntü için Örnek Veri.....	9
Çizelge 3.1 IPC Hata Türleri ve Kategorileri.....	19
Çizelge 3.2 Örnek Veri Tabanı	21
Çizelge 3.3 İhtimal Tablosu	26
Çizelge 3.4 Örnek Sıralı Veri Tabanı.....	29
Çizelge 4.1 Ham Veri Formatı	39
Çizelge 4.2 Birleştirilmiş Veri Formatı.....	39
Çizelge 4.3 Olayların Sıklıklarına Göre Destek ve Güven Aralıkları.....	40
Çizelge 4.4 Yıl Bazlı Birliktelik Kuralları Analizi	41
Çizelge 4.5 2012 Yılı Kural Listesi (Destek = %10, Güven = %75).....	42
Çizelge 4.6 2012 Yılı Kurallarının İlginçlik Ölçütleri	43
Çizelge 4.7 2013 Yılı Kural Listesi (Destek = %5, Güven = %65).....	44
Çizelge 4.8 2013 Yılı Kural Listesi (Destek = %1, Güven = %95).....	45
Çizelge 4.9 2014 Yılı Kural Listesi (Destek = %10, Güven = %75).....	47
Çizelge 4.10 Kart Özelinde Birliktelik Kuralları Analizi	48
Çizelge 4.11 A Kartı Kural Listesi (Destek = %1, Güven = %65).....	49
Çizelge 4.12 B Kartı Kural Listesi (Destek = %1, Güven = %75)	51
Çizelge 4.13 F Kartı Kural Listesi (Destek = %10, Güven = %65).....	52
Çizelge 4.14 2012 Yılı Meta kuralları.....	54
Çizelge 4.15 Kuralların Açıklaması	55
Çizelge 4.16 Hata Türleri ve Numaraları	58
Çizelge 4.17 2013 Yılı Kural Listesi.....	59
Çizelge 4.18 2014 Yılı Kural Listesi.....	61
Çizelge 4.19 2017 Yılı Kural Listesi.....	61
Çizelge 4.20 2012 ve 2013 yıllarının Kümülatif Kural Listesi	62
Çizelge 4.21 2012, 2013 ve 2014 yıllarının Kümülatif Kural Listesi	63
Çizelge 4.22 2012, 2013, 2014 ve 2015 yıllarının Kümülatif Kural Listesi	63
Çizelge 4.23 Örnek Hata Verisi	64
Çizelge 4.24 Düzenlenen örnek hata verisi.....	65

Çizelge 4.25 İş Emri Bazlı Birliktelik Kuralları Analizi	66
Çizelge 4.26 İş Emri Bazlı Birliktelik Kuralları (Destek = %5, Güven=%65)	67
Çizelge 4.27 İş Emri Bazlı Birliktelik Kuralları (Destek = %5, Güven=%65)	67

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Yoktur.

Kısaltmalar

AQAP	Endüstriyel Kalite Teminatı Seviye Belgesi (Allied Quality Assurance Publications)
DPMO	Milyon Olasılıktaki Fırsattaki Hata (Defect per Million Opportunity)
DPU	Birim Başına Hata (Defect per unit)
ECLAT	Eşdeğerlik Sınıf Dönüşümü (Equivalence Class Transformation)
ESD	Elektro Statik Yük Boşaltma (Electrostatic Discharge)
FMEA	Hata Türü ve Etkileri Analizi (Failure Mode and Effects Analysis)
FPY	İlk Seferde Sonuç (First Pass Yield)
IPC	Baskılı Devre Kart Enstitüsü (Institute for Interconnecting and Packaging Electronic Circuits)
ISO	Uluslararası Standartlar Organizasyonu (International Organization for Standardization)
MIL-STD	Askeri Standartlar (Military Standards)
PCB	Baskılı Devre Kartı (Printed Circuit Board)

1. GİRİŞ

Üretimde kullanılan kalite kontrol yöntemleri zaman içerisinde evrilmiş, üretim durdurularak yapılan muayeneler yerini süreç parametrelerinin sürekli izlenerek kontrol altında tutulduğu ve sürecin doğru işletildiğinin güvence altına alındığı yöntemlere bırakmıştır. Bu yöntemler üretim aşamasında ürüne ve sürece özel verilerin kayıtlarının tutulmasını gerektirmektedir. Üretim miktarlarının ve üretimde yapılan ölçümlerin artışı ile toplanan veri miktarı artmakta, büyük veri setlerinin analizi ve anlamlandırılması gün geçtikçe daha zor bir hal almaktadır. Büyük veri setlerinin analizi ve bilgi keşfi amacıyla, literatürde çeşitli veri madenciliği algoritmaları geliştirilmiş, çeşitli amaçlarla üretim süreçlerinde uygulamaları yapılmıştır [1,2].

Hemen hemen tüm elektronik ürünlerde farklı amaçlarla kullanılmak üzere üretilen baskılı devre kartları (Printed Circuit Board – PCB) tipik bir üretim hattı akışına sahiptir. Üretim miktarlarının artması ile baskılı devre üretiminde toplanan veri miktarı da artmakta, kalite iyileştirme çalışmaları için yeni fırsatlar doğmaktadır. Baskılı devre kartı üretiminin çok paydaşlı bir faaliyet olması ve paydaşlar arasında ortak bir dil kullanılması gerekliliği dolayısıyla bir dizi standart geliştirilmiş, bu standartlar ile üretimde oluşan hata tanımlarının standartlaştırılması sağlanmıştır. Hataların standartlaştırılmasının avantajı, büyük veri setlerinin analizi ile süreçlerin iyileştirilmesi için geliştirilebilecek yaklaşımların, farklı hatlarda ve farklı üretim sistemlerinde kullanılabilir olmasıdır.

Bu çalışmada, yüksek teknolojili üretim sistemlerinden baskılı devre kartı üretim süreçleri ele alınarak üretimde oluşan hatalar arasındaki ilişkiler incelenmektedir. Literatürdeki diğer çalışmalardan farklı olarak, baskılı devre kartı montajı sürecinin doğal bir sonucu olarak oluşan (hata oluşma sebepleri ve ilgili süreç parametreleri dikkate alınmayan) hata türleri arasındaki birliktelikler hem zamandan bağımsız hem de zamana bağlı olarak incelenmiştir. Bu amaçla, veri madenciliği yöntemlerinden birliktelik kuralları ve sıralı örüntü madenciliği kullanılmıştır.

Sadece verilerin analiz edilmesi değil aynı zamanda kullanıcıların interaktif olarak sürece dahil olmaları bu çalışma kapsamında ele alınacaktır. Verilerin anlık olarak erişilmesi, istenilen kısıtlarla verilerin görselleştirilmesi çalışmaları da bu çalışma kapsamındadır.

Daha önceden, farklı alanlara uygulanan bu algoritmaların üretim alanında kök sebep çalışmalarına entegre olduğu ve görsellerle desteklendiği bu çalışma, farklı iki firma da

uygulanarak hem metodolojinin standartlaştırılması hem de farklı firmaların çıktılarının karşılaştırılması ile sonuçlandırılmıştır.

1.1. Problem Tanımı

Tipik bir baskılı devre kartı üretim süreci; malzemelerin hazırlanması, karta lehimin sürülmesi, devre parçalarının kartın üzerine yerleştirilmesi, fırınlanması ve yıkanması aşamalarından oluşmaktadır. Bu süreçte her istasyonda çeşitli hata türlerinin oluşması mümkündür. Baskılı Devre Kart Enstitüsü (IPC) Standartlarına göre tipik bir baskılı devre üretim sürecinde toplam 59 adet olası hata türü tanımlanmıştır [3].

Primitif olarak nitelendirilebilecek bazı üretim hatlarında, her üretim aşamasından sonra bir muayene istasyonu eklenerek kartın sahip olduğu hataların giderilmesi hedeflenir. Ancak bu hem yüksek maliyetli hem de uzun zaman gerektiren bir süreçtir. Daha gelişmiş kalite kontrol aktivitelerini uygulayan hatlarda ise, istatistiksel süreç kontrol yöntemleri kullanılarak sürecin doğal değişkenliği içerisinde çalışması beklenir ve bundan sapmalar takip edilir. Ancak, konvansiyonel istatistiksel süreç kontrol yöntemleri de zaman zaman yetersiz kalabilmekte, bu yöntemlerle elde edilebilecek kazanımlar sınırlarına ulaşabilmektedir. Nitekim, bu yöntemlerle hatalar belirli bir noktaya kadar azaltılabilir de kronik hataların yeterince azaltılamaması ve harcanan efor karşısında iyileşme hızının yeterli olmaması veya iyileşme hızının azalan eğilimde olması farklı yöntemlerin geliştirilmesini gerekli kılmaktadır. Bu amaçla veri madenciliği yöntemleri fayda sağlayabilecektir.

1.2. Motivasyon

Üretim hatlarında gerçekleşen hataların çözümlenmesi için; insan, malzeme ve makine kaynakları fazladan kullanılmakta ve bir işin ilk seferinde doğru yapılmaması yüksek maliyetler oluşturmaktadır. Bu çalışmanın temel motivasyonu, mevcut uygulamalarda hataların düzeltilmesi için israf edilen kaynakların, bir başka ifadeyle katma değersiz aktivitelerin (yeniden işleme, tamir vb.) azaltılmasıdır. Bu amaçla önleyici yaklaşımlara girdi sağlayacak bilginin hata ilişkilerinden edinilmesi hedeflenmektedir. Bununla beraber, kök sebep analitiğine geçiş yaparak, hatanın kaynağının tespiti için farklı bir yaklaşımla çevrim içi hata takibi imkânı sunulacaktır.

1.3.Yöntem

Tez kapsamında, PCB üretim süreçlerinde hataların önlenmesi amacıyla kullanılacak bilginin keşfi için, genelde müşterilerin alışveriş alışkanlıklarını anlamlandırmada pazarlama ekipleri tarafından kullanılan birliktelik kurallarının uyarlanmasına çalışılmıştır.

Birliktelik kuralları, her zaman tanımlanan ilişkinin nedensellik içerdiği anlamına gelmez. Örneğin, pazar sepeti analizi çalışmalarının klasik bir örneği olan bebek bezi ve biranın birlikte satışı neden – sonuç ilişkisi içermez, bu bir alışveriş tercihidir. Ancak, bir ilişkiden nedensellik sonucuna varılabilmesi için birliktelik olması gerekliliği de genel olarak kabul edilmiştir. Örneğin, üretim sistemlerinde hataların süreç parametreleri ile birlikteliği neden-sonuç ilişkileri kapsamında değerlendirilebilir. Bu çalışmada, nedensellik aranmadan üretimdeki hataların birliktelikleri incelenmektedir.

Birliktelik kuralları ilişkileri zamandan bağımsız olarak ele almaktadır. Çalışma kapsamında, zaman içerisinde oluşan hata örüntüleri için sıralı örüntü madenciliği yöntemleri de ele alınmıştır. Kalite iyileştirme çalışmalarının, pazarlama uygulamalarından farkı, yöntemlerin kullanımında sadece sık oluşan ve toplamda ticari değeri yüksek örüntülerin değil, nadir ancak kritik olabilecek hata birlikteliklerinin de ortaya çıkarılmasıdır.

Birliktelik kurallarının daha kolay anlaşılması ve kök sebep analizlerine entegrasyonun sağlanması için görselleştirme çalışmaları yapılmıştır. Sonrasında ise, uygulanan metodun başka bir firmada tekrar uygulanabilirliği doğrulanmıştır.

1.4. Organizasyon

Tez çalışmasının 2. Bölümünde ilişki bazlı veri madenciliği ve birliktelik analizleri ile ilgili temel bilgiler verilmekte, bunun ardından tipik bir PCB montaj hattının özellikleri ve bu hatta yapılabilecek veri madenciliği uygulamaları anlatılmaktadır. Metodolojinin yer aldığı 3. Bölümde, çalışmada kullanılacak verinin hazırlanmasına yönelik yöntemler, birliktelik kuralları, meta kurallar, ilginçlik ölçütleri ve sıralı örüntü madenciliği için kullanılacak algoritmalar ve verilerin görselleştirilmesi ile bilgiler verilmektedir. Metodolojinin uygulanması kapsamında PCB üretim hattında gerçek veri seti kullanılarak yapılan bilgi keşfi, bulunan meta kurallar ve metodolojinin ikinci bir firmada uygulaması

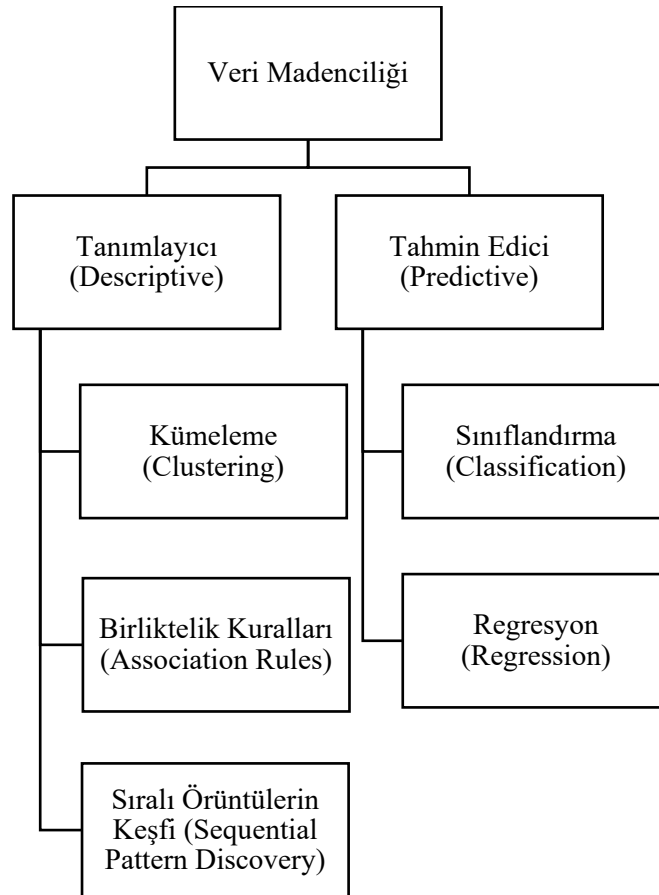
4. Bölümde tartışılmıştır. Son bölüm ise çalışmanın sonuçlarını, çalışma kapsamındaki öneri ve tavsiyeleri içermektedir.

2. GENEL BİLGİLER

Bu bölümde ilk olarak veri madenciliğinin temel prensipleri, ardından da ilişki temelli veri madenciliği için kullanılacak olan birliktelik kuralları ile sıralı örüntü madenciliğinin amaç ve uygulamaları sunulmaktadır. Bölümün devamında, çalışma kapsamında verilerin toplandığı PCB hatlarının tipik özellikleri ve bu hatlarda meydana gelebilen olası hata türleri açıklanmaktadır.

2.1. Veri Madenciliği

Veri madenciliği, büyük veri setleri içerisinde gizli olan, kullanıcıların ilk bakışta anlamasının mümkün olmadığı bilgilerin ortaya çıkarılmasına ve kullanıcılara anlamlı ve yararlı örüntülerin sunulmasına olanak tanıyan süreç olarak tanımlanmaktadır [4]. Veri madenciliğinde kullanılacak çok sayıda yöntem geliştirilmiştir [5]. Bu yöntemlerin görevlere göre bir sınıflandırması Şekil 2.1’de sunulmuştur. Veri madenciliği, durumların tanımlanması ve tahmin edilmesi için kullanılabilir.



Şekil 2.1 Veri Madenciliği Yöntemlerinin Görevlere Göre Sınıflandırılması

Tez kapsamında ele alınan ve tanımlayıcı sınıfında giren birliktelik kuralları ve sıralı örüntü madenciliği konuları Bölüm 2.2’de açıklanmaktadır.

2.2. Birliktelik Analizleri

Birliktelik analizleri büyük veri setlerinde saklı kalmış ilginç ilişkilerin tespitinde kullanılan bir metottur. Bu ilişkiler, birliktelik kurallarıyla ve örüntüler ile gösterilir.

Birliktelik kuralları ilk olarak 1993 yılında Agrawal, Imielinski ve Swami [5] tarafından geliştirilmiştir. Birliktelik kurallarıyla, birbiriyle ilişkili olan özellikler kurallar olarak ifade edilir ve bu kuralların ne kadar güçlü olduğu değerlendirilir. Birliktelik kurallarının oluşturulmasında geçmiş veriler kullanılır ve olasılık hesaplamaları ile ilişkiler hakkında çıkarımlar yapılır.

Birliktelik kurallarının öne çıkan ilk uygulaması, Amerika Birleşik Devletleri’ndeki bir market zincirinde müşterilerin alışveriş hareketlerinde ortaya çıkan ilginç ilişkilerin tespit edilmesidir. Cuma akşamı bebek bezi alan erkek müşterilerin çoğunlukla bira alarak alışverişlerini tamamladığı bilgisi pazarlama ekipleri tarafından kullanılmıştır [6].

Birliktelik analizlerinde hareket verisi (transaction) kullanılır. Bu veri farklı gösterim şekillerine sahip olabilir. Gösterim şekli tercihi sayısal hesaplama maliyetlerini etkileyecektir. Çizelge 2.1 ve Çizelge 2.2 alışveriş verileri için farklı iki gösterim şeklini temsil etmektedir.

Çizelge 2.1’de veri yatay düzende listelenmiştir. ID sütununda müşteriler temsil edilirken, hareket sütununda her bir müşterinin aldığı ürünler listelenmektedir. Apriori algoritması dahil olmak üzere, birçok birliktelik kuralı madenciliği algoritmasında bu gösterimdeki veri düzeni kullanılmaktadır.

Çizelge 2.1. Yatay Veri Düzeninde Örnek Veri

ID	Hareket
M1	Ü1, Ü2, Ü5
M2	Ü2, Ü4, Ü7
M3	Ü1

Bu çalışma kapsamında birliktelik kurallarının tespit edilmesi amacıyla Apriori algoritması kullanılmıştır. Apriori algoritması, 1994 yılında Agrawal ve Srikant tarafından geliştirilmiştir [7]. Algoritma, hareket içeren veri tabanlarındaki tüm yaygın öğeler kümelerini üretmeyi hedeflemiştir. Apriori algoritmasının dezavantajlarından biri, çok fazla hesaplama yapılmasından kaynaklı olarak kuralların üretilme süresinin uzun olmasıdır. Bu sürenin azaltılması, algoritmanın etkinliğinin ve etkililiğinin geliştirilmesi için bir çok çalışma yapılmıştır [8].

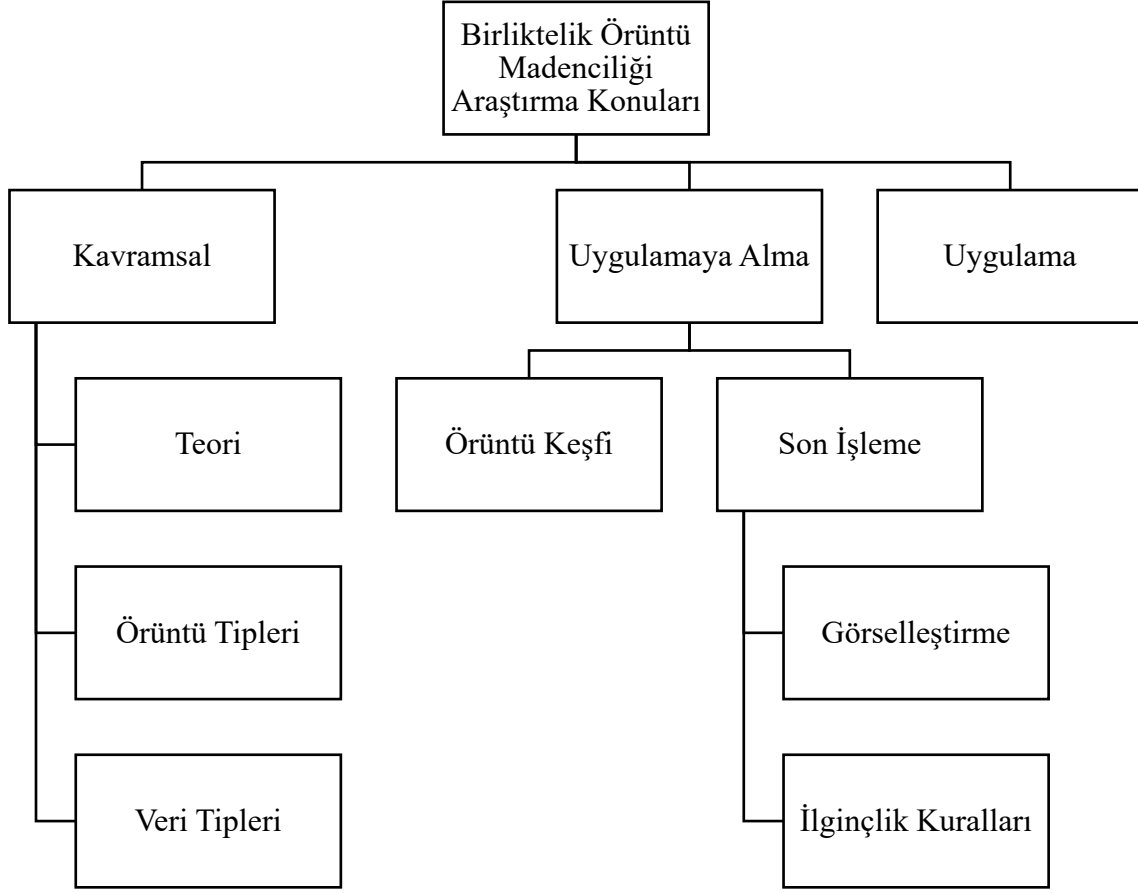
Verinin bir diğer gösterim şekli ise dikey düzen bazlı gösterimdir (Çizelge 2.2). Bu gösterimde, sütunlarda ürünler yer alırken, satırlarda bu ürünü alan müşteriler listelenmektedir. Örneğin, ECLAT (Equivalence Class Transformation - Eşdeğerlik Sınıf Dönüşümü) algoritmasında dikey veri düzenindeki veri birliktelik analizine girer ve kurallar oluşturulur [9]. Kısaca, Apriori algoritmasında ürün (Ü1, Ü2, Ü3 vb.) bazlı hesaplama yapılırken, ECLAT algoritmasında ise hareket (M1, M2, M3 vb.) bazlı hesaplama yapılır.

Çizelge 2.2 Dikey Veri Düzenine Örnek Veri

Ü1	Ü2	Ü4	Ü5	Ü7
M1	M1	M2	M1	M2
M3	M2	-	-	-

Birliktelik analizlerine dair araştırmalar; kavramsal, uygulamaya alma ve uygulama olarak üç temel sınıfta incelenebilir (Şekil 2.2) [4].

Kavramsal araştırmaların öncelikli hedefi birliktelik kurallarının teorik olarak temellerini tanımlayan bir çerçeve oluşturmaktır. Buna ek olarak, mevcut formüllerin yeni örüntü türlerini karşılamaları konusunda ve asimetrik iki terimli (binary) verilerin de ele alınabilmesi için formül güncelleme çalışmaları mevcuttur.



Şekil 2.2 Birliktelik Örüntü Madenciliği Araştırma Konuları

Agrawal ve diğerlerinin çalışmaları [10] ile başlayan kavramsal çalışmaların ardından, gereksiz kuralların azaltılması için yeni bir çerçeve geliştirilmiş ve kapalı yaygın öğeler kümesi kavramı sunulmuştur [11,12]. Zaman içerisinde profil birliktelik kuralları [13], çevrimsel (cyclic) birliktelik kuralları [14], bulanık (fuzzy) birliktelik kuralları [15], negatif birliktelik kuralları [16] ve ağırlık birliktelik kuralları [17] gibi yeni örüntü tipleri keşfedilmiştir. Bu çalışmaların yanı sıra, birliktelik analizleri farklı veri tiplerinde de uygulanmıştır. Sıralı veri [18] ve grafik temelli veri [19,20] ile yapılan çalışmalar farklı veri tiplerindeki çalışmalara örnek olarak verilebilir. Orijinal birliktelik kuralı formülleri, sınıflama (nominal) [21], sıralama (ordinal) [22], aralıklı [23] ve oranlı [21] değişkenler için de uyarlanmıştır.

Uygulamaya alma araştırmalarında ise, veri madenciliği kabiliyetlerinin mevcut veri tabanı teknolojilerine entegrasyonu, etkin veri madenciliği algoritmalarının geliştirilmesi,

kullanıcı ve alan bazlı kısıtlamaların yönetilmesi ve üretilen örüntülerin işlenmesi konuları ele alınmıştır.

Etkin veri madenciliği algoritmalarının geliştirilmesi için Apriori algoritmasının zaman ve saklama kompleksitesi araştırılmıştır [24]. Bu kapsamda, Yaygın Örüntü Gelişim (Frequent Pattern Growth) algoritması geliştirilmiştir [25]. Bir diğer yaygın öğeler kümesi madenciliği algoritması ise dinamik karma ve budama (Dynamic Hashing and Pruning) algoritmasıdır [26]. Diğer algoritmalar için de detaylı çalışmalar mevcuttur [27,28].

Uygulamaya almanın bir diğer konusu olan görselleştirme, keşfedilen örüntülerin yapısının daha hızlı algılanmasında yardımcı olur. Genellikle, tüm kuralların destek ve güven değerlerinin sırasıyla x ve y eksenlerine konumlandırıldığı grafikler sunulur. Buna ek olarak matris grafiği, grup matris grafiği, balon grafiği, paralel koordinat grafiği gibi yöntemler de birliktelik kurallarının görselleştirilmesinde kullanılmaktadır [29].

Bu tez çalışması kapsamında, birliktelik kurallarının ve örüntülerin keşfi gerçekleştirilecektir. Bununla beraber, uygulamaya alma adımlarından hem ilginçlik ölçütlerinin kullanımına hem de son işleme adımında görselleştirme ile ilgili çalışmalara yer verilecektir.

Birliktelik analizlerinden bir diğeri ise sıralı örüntü madenciliğidir. Sıralı örüntü madenciliği ile sıralanmış hareketlerin listelendiği sıralı veri tabanlarında sıklıkla gerçekleşen alt dizi örüntüleri keşfedilir. Sıralı veri tabanlarında her satırda ilgili hareketin gerçekleşme sırası listelenir. Örneğin Çizelge 2.3'te Sıralı ID (SID) değeri 10 ile tanımlanan müşteri ilk alışverişinde birinci ürünü (Ü1) almış, ardından Ü1, Ü2 ve Ü3'ü birlikte almış ve son alışverişinde ise Ü4'ü almıştır.

Çizelge 2.3 Sıralı Örüntü için Örnek Veri

SID	Dizi
10	Ü1, (Ü1, Ü2, Ü3), Ü4
20	Ü2, Ü3, (Ü1, Ü3), Ü4
30	(Ü1, Ü2), Ü4, (Ü5, Ü6)

Yaygın öğeler kümesi temelli birliktelik kurallarında olayların sıralamaları dikkate alınmadan aralarındaki ilişkiler incelenmektedir. Ancak bu durum verinin sahip olduğu bazı önemli örüntülerin gözden kaçmasına veya fayda sağlamayan kuralların ortaya

çıkmasına neden olabilmektedir. Çevrimiçi mağazacılık, medikal tedaviler gibi birçok alanda olay sıralaması dikkate alınmalıdır [30,31].

Sıralı örüntü madenciliği, Apriori bazlı ve Örüntü – Gelişim (Pattern – Growth) bazlı yaklaşımlar olarak ele alınabilir [32]. Apriori bazlı yaklaşımlar genellikle hareketlerin kendi içlerindeki birlikteliklerini keşfetmek ve keşfedilen birliktelikler için kuralların üretilmesinde kullanılır. Sıralı örüntü keşfinde hareketler arasındaki birliktelikler incelendiğinden sıralı örüntü madenciliğinde Apriori bazlı yaklaşımlarda ilk olarak bu değişiklik üzerinde çalışılmıştır. Bu sebeple, Çizelge 2.1’deki yatay veri formatı ele alınmış ve AprioriAll, AprioriSome, DynamicSome algoritmaları önerilmiştir [18]. Daha sonrasında, Apriori bazlı yaklaşımdaki aksaklıkların giderilmesi için Apriori modeli geliştirilerek Genelleştirilmiş Sıralı Örüntü (Generalized Sequential Patterns – GPS) algoritması önerilmiştir [33].

Veri formatı yatay formattan düşey formata çevrilerek hesaplama sürelerinin kısılması da sağlanmıştır. Zaki [34] tarafından düşey veri formatını kullanan Eşdeğerlik Sınıfları kullanılarak Sıralı Örüntü Keşfi (SPADE) algoritması önerilmiştir. Bu algoritma orijinal problemi kafes (lattice) arama tekniklerini kullanarak daha kolay çözülebilir alt problemlere ayırır ve basit birleştirme operasyonları ile sonuca ulaşır [34]. Kafesteki örüntülerin bulunması için iki çeşit araştırma stratejisi mevcuttur:

- Yayılım Öncelikli Arama (Breath First Search): Eşdeğerlik sınıfları aşağıdan yukarı yaklaşımı ile ele alınır ve tüm alt sınıflar bir sonraki aşamaya geçilmeden işlenir.
- Derinlik Öncelikli Arama (Depth First Search): Tüm eşdeğerlik sınıfları için tüm yollar bir sonraki aşamaya geçmeden işlenir.

Örüntü – gelişim bazlı sıralı örüntü madenciliği yaklaşımları ise aday üretmeden büyük sıralı veri tabanlarında etkin veri madenciliği sağlar. Sık Örüntü-Öngörülen Sıralı Örüntü Madenciliği (Frequent Pattern-Projected Sequential Pattern Mining - FREESPAN)) [35] ve Ön ek – Öngörülen Sıralı Örüntüler (Prefix-Projected Sequential Patterns - PrefixSpan) [36] algoritmaları bu kapsamda önerilmiştir.

Birliktelik kuralları önceleri pazarlama alanında yaygın olarak kullanıldıktan sonra üretim alanında da kullanılmaya başlanmıştır. Arıza ve anomalilerin tespit edilmesi konusunda veri madenciliğine sıralı birliktelik örüntülerine dayalı bir çerçeve geliştirilmiştir [37]. Bu çerçevede, makine titreşim verisinden faydalanılarak, rulmanlardaki hata izi örüntülerinin arızaları tespit etmek için kullanabileceği bir

algoritma geliştirilmiştir. Bir başka çalışmada ise, üretim çıktılarının (yield) tahminlenmesi için kestirimci birliktelik kurallarını önermişlerdir [38]. Bu çalışmada, alarm, değişim ve bakım olayları sırasına bağlı olarak tahmin edilen üretim çıktılarını gösteren kurallar üretilmiştir. Makine ve hata ilişkileri incelenerek, en çok hataya sebep olan makinenin tespit edilmeye çalışıldığı bir çalışma da mevcuttur [39]. Yukarıda anlatılan çalışmalarda ilişkilerin analiz edilmesiyle, hata analizlerine bir başlangıç noktası bulunması hedeflenmiştir.

Sıralı örüntü madenciliği ise yine öncelikli olarak müşteri alışkanlıklarının anlaşılmasında kullanıldıktan sonra üretim süreçlerinin analizinde ve arızaların tespitinde kullanılmıştır [37,40]. Örüntü madenciliği tekniklerini kullanarak kablo büküm sürecinde olayların sıralamasına göre arıza tahminlemesi yapmak için bir model geliştirilmiştir [41]. Bir diğer çalışmada ise otomotiv garanti veri tabanından faydalanarak gelecekte olabilecek ürün arızaları ile ilgili örüntülerin keşfedilmesi sağlanmıştır ve böylece arızaların birliktelikleri ile yapılacak olan iyileştirme çalışmalarının yeniden düzenlenmesi sağlanmış ve hata oluşmadan önleyici operasyonların yapılması tavsiye edilmiştir [42].

2.3. Tipik PCB Montaj Hattı

Bu kısma kadar çalışmada kullanılacak yöntemlerden bahsedilmiştir. Bu yöntemlerin nerelere ve nasıl uygulanacağını daha iyi anlaşılması için tipik bir PCB hattı özellikleri bu bölümde açıklanmıştır.

Standart bir PCB montaj hattında süreçler üretime hazırlık ve üretim olmak üzere iki aşamadan oluşur. Üretime hazırlık aşaması ilgili karta dizilecek tüm elektronik komponentlerin ve uygun çelik eleğin temini, lehimin uygun koşullara getirilmesi, serigrafî makinesine ve dizgi makinesine gerekli programların yüklenmesi adımlarından oluşur. Üretim aşaması ise sırasıyla krem lehimin sürülmesi, komponentlerin yerleştirilmesi, kartın fırınlanması ve yıkanması adımlarından oluşur. Bu aşamalarda, serigrafî makinesi (Solder Paste Printer), dizgi makinesi (Pick and Place) ve fırın (Reflow Oven) kullanılır. Bunların dışında, yıkama makinesi, nem kabinleri, elektro statik yük boşaltma (ESD) ekipmanları da montaj hattında bulunması gereken ekipmanlardır.

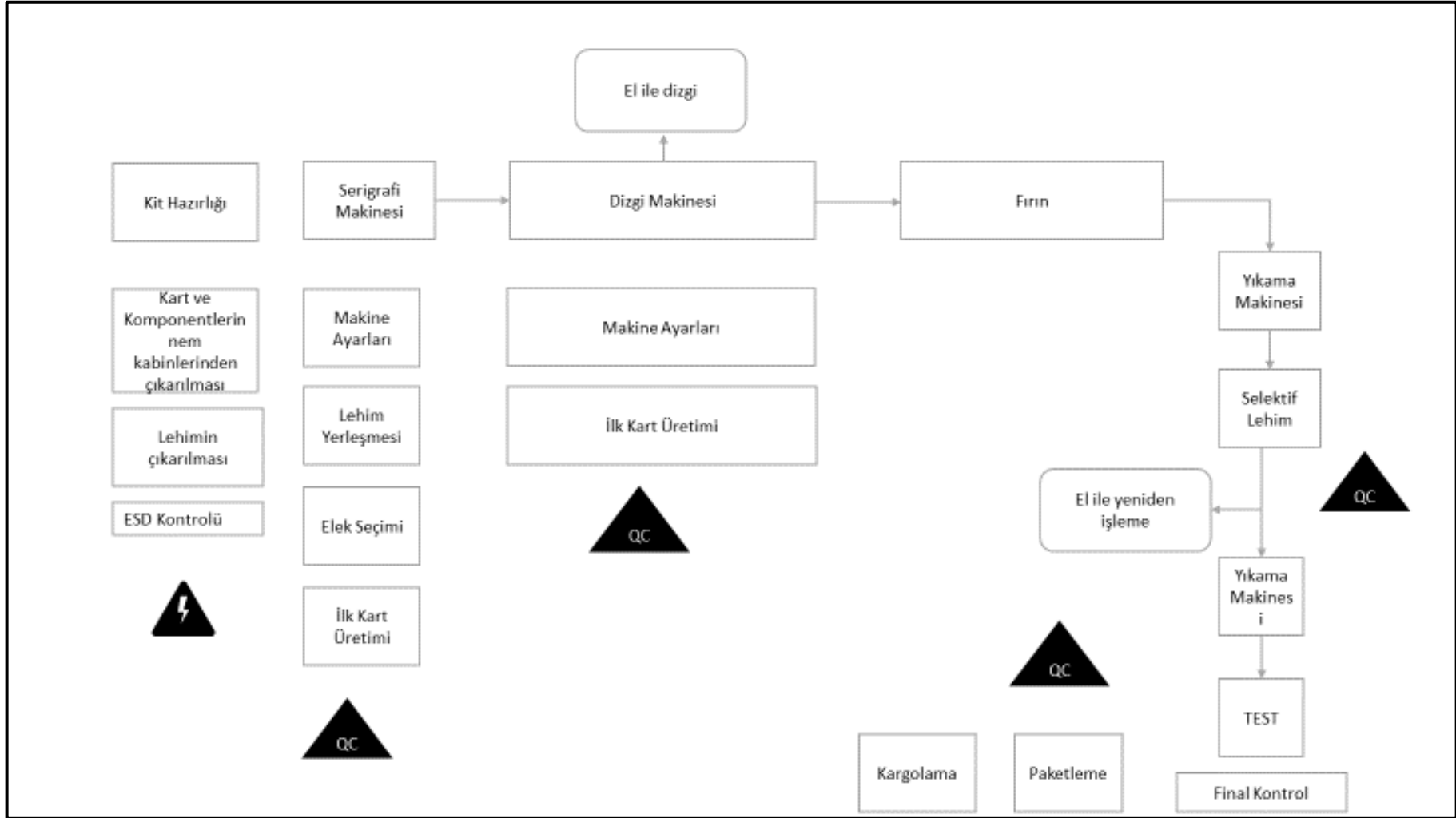
Üretim hazırlık aşamasının tamamlanmasıyla, ilk istasyon olan serigrafî makinesinde kartların üzerine çelik elek aracılığıyla krem lehim sürülür. Krem lehim, lehim ve reçine

karışımından oluşur. Bu karışım, komponentlerin karta iyi bir şekilde bağlanmasını sağlar. Bu aşamada, dikkat edilmesi gereken süreç parametreleri; krem lehimin cinsi, çelik eleğin tasarımı ve programa girilen koordinatların hassasiyetidir. Lehim ile alakalı hataların büyük bir kısmı bu aşamada oluşmaktadır.

İkinci istasyon, dizgi makinesidir. Yüklenen programın gereksinimlerine göre komponentler tek tek cihaza alınarak karta yerleştirilir. Ancak her dizgi makinesinin dizebileceği komponent sayısı ve boyutu sınırlıdır. Boyutları nedeniyle dizilemeyen komponentler el ile dizilir. Yüklenen programın hassasiyeti ve doğru paketlenmiş malzeme temini bu sürecin değişkenleridir. Dizgi makinesine komponentler bir kılıf içerisinde verilir, makine kılıfı delerek içerisinden komponenti alır ve programa göre noktasal olarak kartın üzerine yerleştirir. Komponentler ve komponentlerin pozisyonlarıyla ilgili hatalar genelde bu aşamada ortaya çıkmaktadır.

Krem lehim sürülmüş kartların üzerine gerekli komponentler yerleştirildikten sonra kartlar fırına alınır. Lehimin erimesiyle kartın üzerine dizilmiş olan komponentler karta tamamen lehimlenir. Bu aşamada, karta verilen ısının belirlenmiş ısı profilinde uygulanması ve uygulanma süresi kart kalitesini etkileyen önemli değişkenlerdir. Genellikle ısının doğru iletimiyle ilgili hatalar bu aşamada oluşmaktadır.

Bu aşamada tamamlandıktan sonra kartlar yıkanarak ilgili müşteriye gönderilmek üzere paketlenir ve PCB montaj hattı operasyonları tamamlanmış olur. PCB üretiminin şematik bir gösterimi Şekil 2.3'te sunulmuştur.



Şekil 2.3 Tipik bir PCB hattının şematik görünüşü

Şekil 2.4'te ise gerçek bir PCB hattının görseli bulunmaktadır.



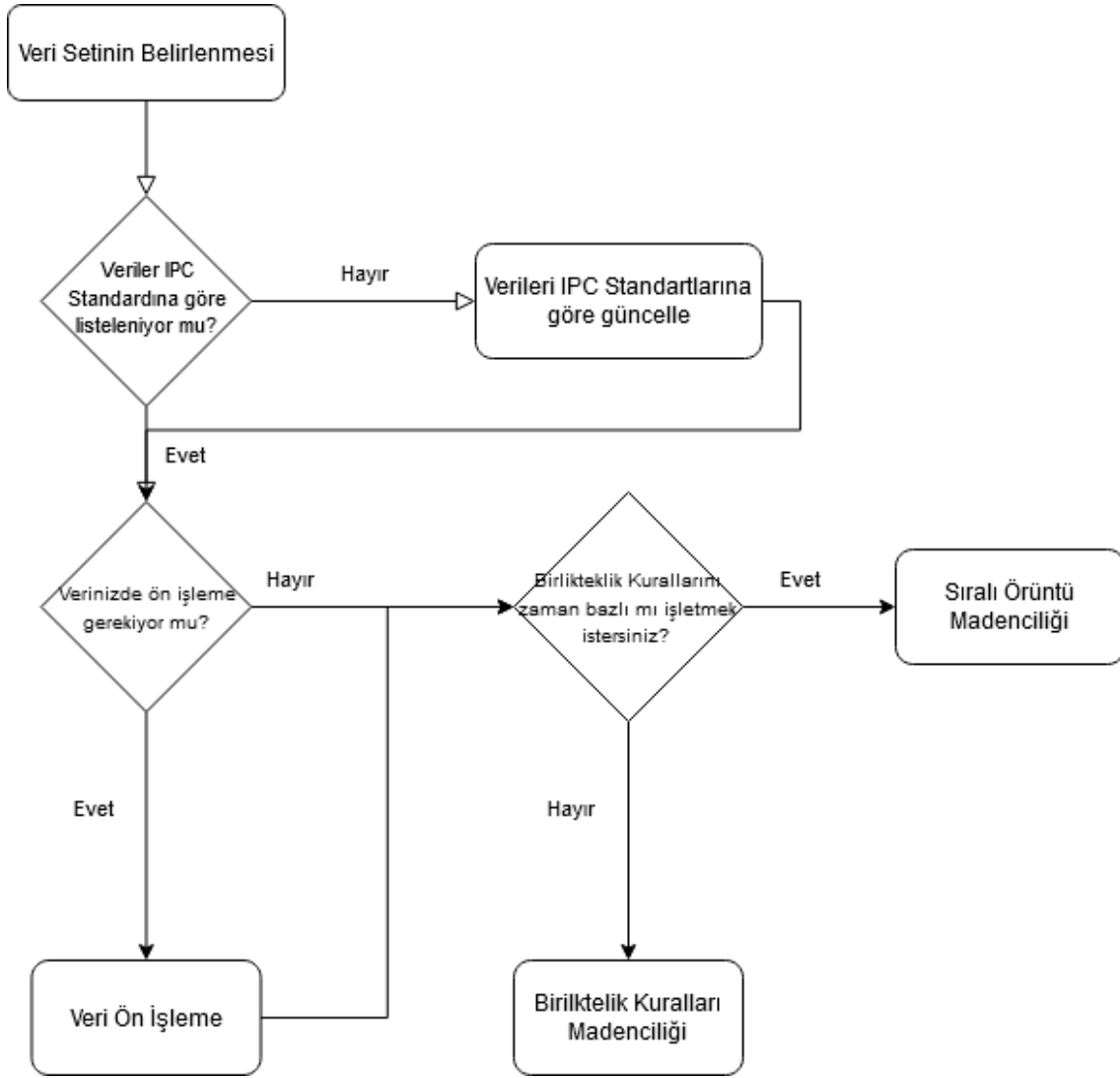
Şekil 2.4 Gerçek bir PCB üretim hattı

3. METODOLOJİ

Bu bölümde, PCB montaj hatlarından toplanabilecek veriler kullanılarak, zamandan bağımsız ve zamana bağımlı olarak meydana gelebilecek hata ilişkilerin çalışılabilmesi için metodolojiler anlatılacaktır. Ardından, sayıca fazla üretilen kuralların elenmesi kapsamında meta kurallar ve kuralların yorumlanmasında kullanılacak ilginçlik ölçütlerinden bahsedilecektir. Son olarak, birliktelik kurallarının görselleştirilmesine değinilecektir.

Metodoloji olarak seçilen birliktelik kuralları ve sıralı veri madenciliği yöntemlerinin uygulanmasında R ve SMTF yazılımları kullanılmıştır. Cevap aranan araştırma soruları aşağıda belirtilmiş olup bu sorulara cevap bulunması için Şekil 3.1'deki akış şeması takip edilmiştir;

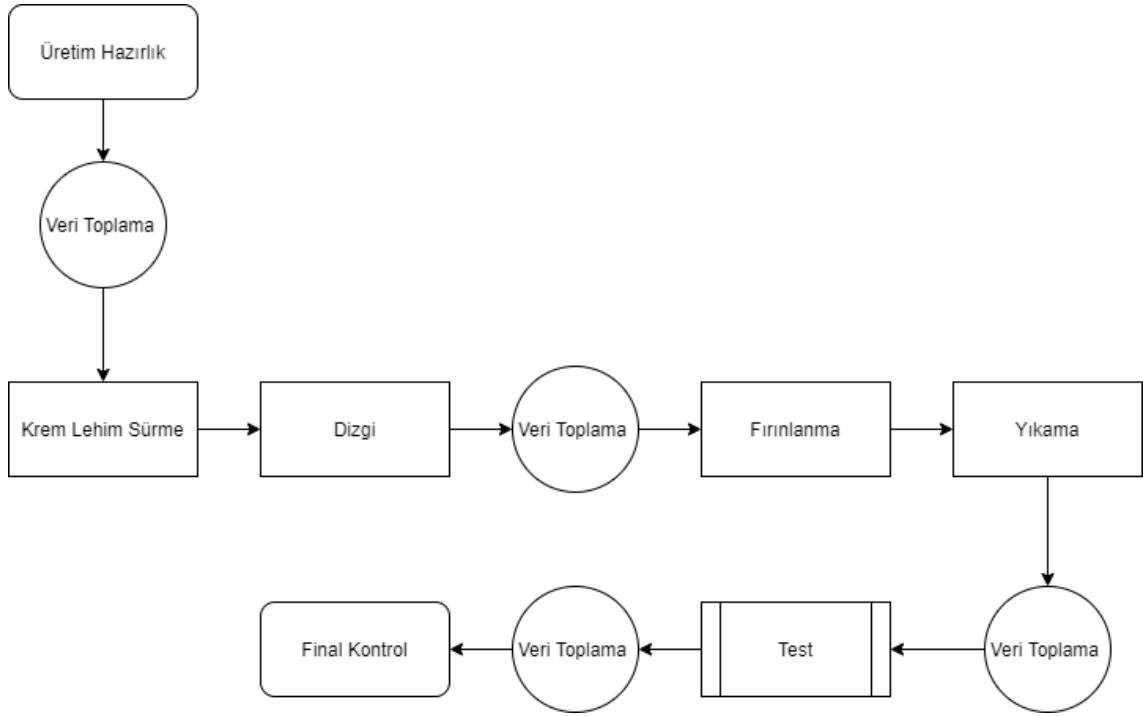
1. Birliktelik kuralları kullanılarak PCB montaj hatlarındaki hataların ilişkilerinden anlamlı çıkarımlar yapılabilir mi?
2. Varsa bu çıkarımlar hataların analizinde ve çözümünde kullanılabilir mi?
3. Zaman değişkeninin de dikkate alınmasıyla PCB montaj hatlarında hatalar arasında sıralı örüntüler tespit edilebilir mi?
4. Varsa bu örüntüler hata analizi yaklaşımlarına entegre edilerek hata giderme ve önleme faaliyetlerinde kullanılabilir mi?
5. Hataların çevrim içi takibi için interaktif bir platform oluşturularak birliktelik kuralları kullanılabilir mi?



Şekil 3.1. İş Akış Şeması

3.1. Veri Setinin Hazırlanması

Veri madenciliği uygulamalarında verinin hızlı ve kolay bir şekilde toplanması önemlidir. Tipik bir PCB hattında veri toplama noktaları Şekil 3.2'deki akışta gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Tipik bir PCB montaj hattı veri toplama noktaları

Bu tez kapsamında, toplanmasının gerekli olduğuna karar verilen veriler; üretim tarihi, katile ve kart numarası, kart revizyonu, hata kategorisi, hata türü, hata adedi ve lokasyon bilgisidir.

Katile, sürecin aynı koşullarda olduğunu güvence altına almak için yıl – hafta – üretim sayısını içeren bir numaralandırmadır. Örneğin 20200601; 2020 senesi 6. Haftasının 1.üretimi temsil eder.

PCB montaj hattında üretim yapan birçok firma hem firma içinde hem de endüstride ortak bir dil oluşturulmasını sağlayan IPC'nin oluşturduğu standartlarına göre hata kategorilerini ve türlerini kayıt altına alır. IPC, ürünlerin üretilebilirliği, karmaşıklığı, fonksiyonel performans gereklilikleri ve doğrulama sıklığı gibi farklılıklarını yansıtan üç ürün sınıfı oluşturmuştur. Bu sınıflar; genel elektronik ürünler, sürekli performans ve uzun ömürlülüğün gerekli olduğu elektronik ürünler ile sürekli yüksek performansın veya istek üzerine performansın kritik önem taşıdığı ve ekipmandaki aksaklık sürelerinin tolere edilemeyeceği ürünler olarak 1'den 3'e sıralanmıştır. Ürün sınıfı ürünün kabul kriterlerine de etki eden bir durumdur. Bu çalışma kapsamında çalışılan PCB kartlar Sınıf-3 (sürekli yüksek performansın veya istek üzerine performansın kritik önem taşıdığı ve ekipmandaki aksaklık sürelerinin tolere edilemeyeceği ürün) olarak alınmıştır.

PCB montaj hattındaki hatalar; komponent, yerleşme, sonlandırma ve montaj hataları olmak üzere dört ana grup olarak sınıflandırılmaktadır. Komponent hataları, komponent spesifikasyon limitleri veya kullanılabilirliği ile ilgili hataları kapsar. Yerleşme hataları ise, görünen ve görünmez hem fiziksel hem de elektriksel hataları içerir. Bu hatalar komponent varlığı ya da yerleştirilmesi ile ilgili hatalardır. Sonlandırma hataları elektriksel sıkıntıları kapsar. Yukarıda belirtilen üç hata sınıfına dahil olmayan hatalar ise montaj hatası olarak listelenir.

Hata türleri, kısaltmaları ve karşılık gelen kategorileri Çizelge 3.1’te listelenmiştir:

Çizelge 3.1 IPC Hata Türleri ve Kategorileri

Hata Türü	Hata Kodu	Hata Kategorisi
Bacak büküm problemi	BBP	1- Komponent
Eksik malzeme	EM	1- Komponent
Havada bacak	HB	1- Komponent
Hazır olmayan malzeme (kirli, oksitlenmiş vs.)	HOM	1- Komponent
Küçük / Büyük Lehim Top	LT	1- Komponent
Lehimlenebilirlik problemi (lehim almama)	LP	1- Komponent
Malzeme kaplama ya da benzer hatalar	MK	1- Komponent
Oynanmış lehim (lehimde stres çizgileri ve/veya dalgalanma)	OL	1- Komponent
Soğuk lehim	SL	1- Komponent
Tinlenmemiş bacak	TB	1- Komponent
Az lehim	AL	2- Yerleştirme
Dönmüş malzeme (yan)	DM	2- Yerleştirme
Hatalı kablo teli bağlantısı	HKTB	2- Yerleştirme
Hatalı malzeme	HM	2- Yerleştirme
Hatalı malzeme montajı (polarizasyon)	HMM	2- Yerleştirme
Lehimde hava boşluğu	LHB	2- Yerleştirme
Malzemede hasar	MH	2- Yerleştirme
Mezar taşı (dik)	MT	2- Yerleştirme
Uygun hizalanmamış malzeme	UHM	2- Yerleştirme
Yabancı madde	YM	2- Yerleştirme
Yanlış malzeme yüksekliği	YMY	2- Yerleştirme
Yanlış markalama	YMR	2- Yerleştirme
Elektronik kartta hasar	EKH	3- Sonlandırma
Fazla lehim	FL	3- Sonlandırma
Fazla malzeme	FM	3- Sonlandırma
Head and pillow	HP	3- Sonlandırma
Kablo izolasyonu ya da iletken hasarı	KI	3- Sonlandırma
Lehim köprüsü	LK	3- Sonlandırma
Lehimde delik (gaz kaçağı)	LD	3- Sonlandırma
Lehimsiz bağlantı	LB	3- Sonlandırma
Uygun olmayan lehim yapışması (yayılmaması)	UOLY	3- Sonlandırma
Uygun olmayan montaj	UOM	3- Sonlandırma
Lehim topları veya sıçraması	LTS	4 -Montaj
Lehimde çatlak	LC	4 -Montaj

Veri seti hazırlanmasında ilk aşama veri temizliğidir. Bu aşamada, eksik veriler ve yanlış veriler tespit edilir ve gerekli düzeltmeler yapılır. Bu çalışma kapsamında, operatörün veri girişi ile ilgili hatalarının önlenmesi için veri girişi alanları sınırlandırılmış, hata türleri seçilebilir kutulardan oluşturulmuştur. Operatöre bağlı hataların önlenmesi için hem kesinliğe (precision) hem de doğruluğa (accuracy) bakılması sağlanmalıdır. Bu amaçla, operatöre benzer hatalar gösterilerek hep aynı şekilde hata tanımlayıp tanımlamadığı kontrol edilmektedir.

Verilerin eksik olması durumunda, operatörler ile görüşülmektedir. Duruma göre veri eklenmekte ya da ilgili kayıt, veri setinden çıkarılmaktadır. Tutarsız veriler gözlemlendiğinde, mevcut veri ile düzenleme yapılabilirse veri düzenlenmektedir. Ekstra bilgi gerekliliği ortaya çıktığı durumlarda üretimden gerekli bilgi talep edilmektedir.

3.2. Birliktelik Kuralları

Veriler toplanıp düzenlendikten sonra çalışmanın bir sonraki adımı toplanan verilerin birliktelik kuralları ile incelenmesi olarak belirlenmiştir. Birliktelik kurallarının çıkarılması amacıyla kullanılabilir birçok yöntem bulunmaktadır.

3.2.1 Apriori Algoritması

Bu çalışma kapsamında, birliktelik kurallarının madenciliği için en temel algoritma olarak Apriori [43] hatalar arasındaki zamana bağlı olmayan ilişkilerin bulunması için seçilmiştir. Algoritmanın ismi, bilgileri bir önceki adımdan aldığı için “önceki (prior)” anlamındaki Apriori’dir ve bu iteratif bir algoritmadır [44]. Bu algoritma, hareket bilgilerini içeren veri tabanlarında sık geçen öğeler kümesinin keşfedilmesinde kullanılır. Böylelikle, bir öğenin veya öğeler kümesinin varlığını harekette bulunan başka öğelerin varlıklarına dayanarak öngörülmesi sağlanacaktır.

Öğeler kümesi (itemset) bir ya da birden çok öğeden oluşan küme anlamına gelmektedir. “k – öğeler kümesi” denildiğinde, k adet öğeden oluşan küme ifade edilmektedir.

Bütün öğelerden oluşan küme I ile gösterilsin. “ i_n ” n’inci öğeyi temsil ederse, $I = \{i_1, i_2, i_3, \dots, i_n\}$ olarak gösterilir. Örneğin, bir marketteki ürünlerin $\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{U}_3, \dot{U}_4$ ve \dot{U}_5 olduğunu varsayarsak $I = \{\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{U}_3, \dot{U}_4, \dot{U}_5\}$ ’dir.

Bir hareket T , I kümesinin öğelerinden oluşur ($T_j \subseteq I$) ve $T_j = \{i_{j1}, i_{j2}, \dots, i_{jk}\}$ ile gösterilir. Burada, " i_{jk} " j hareketinin k . öğesini temsil etmektedir.

Hareketlerden oluşan veri kümesi ise D ile gösterilir; $D = \{T_1, T_2, \dots, T_D\}$ Veri tabanı, I ve D kümelerinden oluşmaktadır (Çizelge 3.2 Örnek Veri Tabanı Çizelge 3.2)

Çizelge 3.2 Örnek Veri Tabanı

Hareket	Öğeler
T1	Ü ₁ , Ü ₂
T2	Ü ₁ , Ü ₃ , Ü ₄ , Ü ₅
T3	Ü ₂ , Ü ₃ , Ü ₅
T4	Ü ₁ , Ü ₂
T5	Ü ₁ , Ü ₂ , Ü ₄ , Ü ₅

Birliktelik kurallarının oluşturulabilmesi için, kullanıcı tarafından yaygın öğeler kümesinin belirlenmesinde kullanılacak en küçük destek (*minsup*) değerlerinin belirlenmesi gerekir [43]. Destek değeri, öğeler kümesinin içinde bulunduğu hareket sayılarının toplam hareket sayılarına oranlanması ile bulunur. Yaygın öğeler kümesi, destek değeri *minsup* eşik değerinden daha büyük ya da eşit olan öğeler kümesidir. Bu algoritmanın temel amacı önceki yaygın öğeler kümesi özelliklerini kullanarak veri tabanından tüm yaygın öğeler kümelerini bulmaktır.

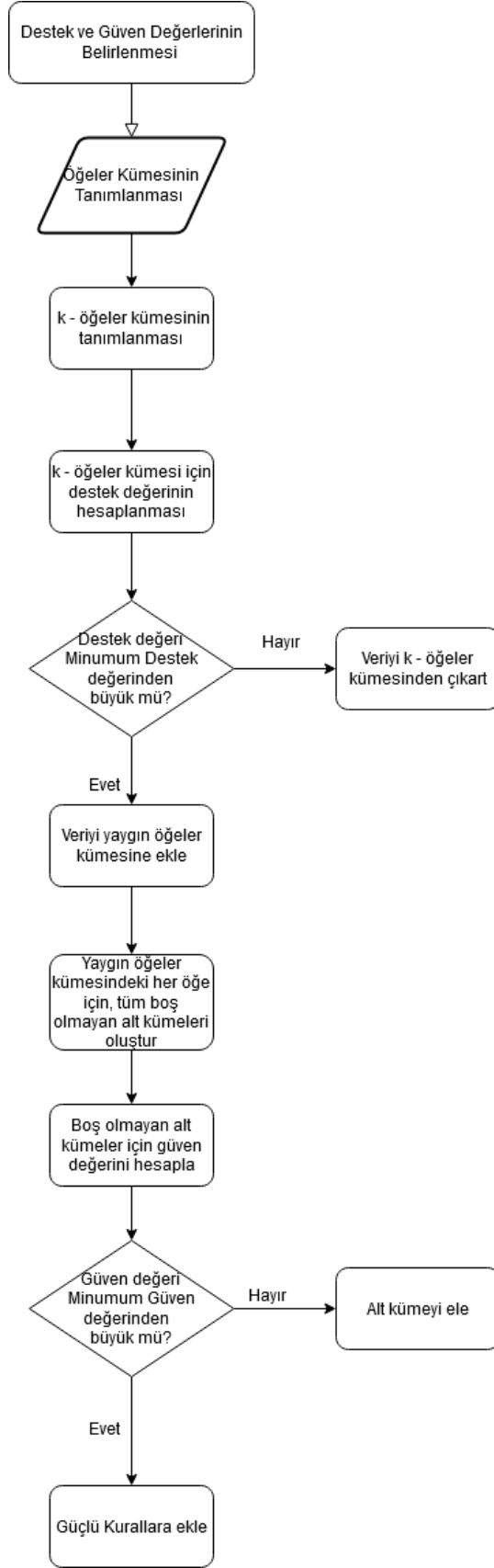
$X \rightarrow Y$ şeklinde gösterilen birliktelik kuralları oluşturulurken, en az en küçük destek (*minsup*) ve güven değerlerine sahip kurallar bulunur. Burada, X ve Y ile I kümesinin alt kümeleri olan öğeler kümeleri temsil etmektedir ve X ile Y 'nin kesişim kümesi boş kümedir. X kümesi, öncül ya da sol taraf, Y ise ardıl ya da sağ taraf olarak isimlendirilir. Birliktelik kuralları iki ana adımda oluşturulur. İlk adımda yaygın öğeler belirlenirken ikinci adımda kurallar oluşturulur.

İlk adımda, destek değeri *minsup* değerinden büyük ya da eşit tüm öğeler kümeleri listelenir. Ardından, her bir yaygın öğeler kümesi adayını için veri kümesi taranarak hareketlerde yaygın öğeler kümesi adaylarının bulunup bulunmadığı kontrol edilir ve her biri için destek değeri bulunur ancak bu yöntemde hesaplama maliyeti çok yüksektir.

Apriori algoritmasıyla, eğer bir öğeler kümesi yaygın ise, onun tüm alt kümeleri de yaygındır [4] prensibi temel alınarak yaygın öğe aday sayısı azaltılır. Örneğin; $\{\ddot{U}_1, \ddot{U}_2, \ddot{U}_4, \ddot{U}_5\}$ kümesi yaygınsa $\{\ddot{U}_1, \ddot{U}_5\}$ kümesi de yaygındır. Yaygın olmayan kümenin üst kümeleri de oluşturulmayarak aday sayısı düşürülmüş olur.

İlk aşamada, algoritmanın kullanıcısı en düşük destek ve güven değerlerini belirler. Bu değerleri belirlerken, problemin değişkenleri ve istenilen sonuçlar dikkate alınır. Algoritma “1- yaygın öğeler kümesi” adayı ile başlar ve her iterasyonda küme öğesi sayısını 1 artırır. En düşük destek ve güven değeri ile veri setlerinin değerlerini kıyaslayarak, kurallar kümesine dahil edilip edilememesine karar verir. Algoritma, yeni yaygın öğeler kümesi oluşturamadığı zaman durur.

Apriori algoritmasının akış diyagramı Şekil 3.3’de verilmiştir.



Şekil 3.3 Apriori Algoritması Akış Şeması

3.2.2 Meta Kurallar

Birliktelik kuralları oluşturulduğunda kurallar anlamlandırılmayacak kadar çok sayıda olabilir. Bu kuralların birçoğu tekrarlayan veya birbirlerini kapsayan kurallar olabilecektir. Bunun önüne geçilmesi için oluşturulan kurallar arasındaki ilişkilerin keşfedilmesini sağlayan ve meta kural olarak adlandırılan kurallar bulunmuştur [45]. Meta kurallar metodu, birliktelik kuralları ile keşfedilen ve aynı ardıla sahip olan kuralların birbirleriyle örtüşmesini temel alır.

Hareketlerden oluşan veri kümesi $D = \{T_1, T_2, \dots, T_D\}$ ve üretilen kuralların kümesi $R = \{r_1, r_2, \dots, r_m\}$ olsun. Öncelikle, D kümesindeki her harekete karşılık bir $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$ kümesi oluşturulur. Eğer kural r_i 'nin tüm öncülleri d_j 'nin öğeleri ise, R kural kümesinden r_i , veri satırı d_j tarafından desteklenir denebilir ve bu $r_i \subseteq d_j$ ile gösterilir. Bir başka deyişle, R kurallarını içeren Q kümesindeki her q öğesi, bir T hareketi ile desteklenmektedir.

Q kümesine apriori algoritması uygulanarak kurallar arasındaki birliktelik kuralları ortaya çıkarılır. Destek limiti olarak %0 ve güven değeri limiti olarak da %90 ve üstü alınması önerilir. Güven değeri meta kuralların gücünü temsil eder.

Denk kuralların tekrardan organize edilmesi için $OUT(r_i)$ ve $IN(r_i)$ tanımlanmıştır.

$$OUT(r_i) = \{r_j \in R \mid r_i \rightarrow r_j \in MR\}$$

$$IN(r_i) = \{r_j \in R \mid r_j \rightarrow r_i \in MR\}$$

Eğer r_i kuralı r_j kuralından daha spesifikse, aşağıdaki koşul sağlanır:

$$r_j \in OUT(r_i) \text{ and } r_j \notin IN(r_i)$$

Eğer c_{ij} ve c_{ji} sırasıyla $r_i \rightarrow r_j$ ve $r_j \rightarrow r_i$ meta kurallarının güven değerlerini temsil eder ve aşağıdaki 3 koşul sağlanırsa, r_i kuralı ve r_j kuralı eşdeğerdir denilebilir.

1. $r_i \in OUT(r_j)$ ve $r_i \in IN(r_j)$,
2. $OUT(r_i) \setminus \{r_j\} = OUT(r_j) \setminus \{r_i\}$,
3. $IN(r_i) \setminus \{r_j\} = IN(r_j) \setminus \{r_i\}$,

Yukarıda ki kural setinde $OUT(r_i) \setminus \{r_j\}$ $OUT(r_i)$ 'nin r_j kuralını barındırmayan alt kümesini ifade etmektedir. Bir diğer ifade ile $OUT(r_i) \setminus \{r_j\} \cup \{r_j\} = OUT(r_i)$ denilebilir. Bununla birlikte eğer r_i ve r_j eşdeğer ise ve $c_{ij} = c_{ji} = 100\%$ olursa bu iki kuralı

destekleyen hareketler birbirlerinin aynısıdır. Yani aynı ilişkinin farklı bir şekilde ifade edilmiş hali olarak anlaşılabilir.

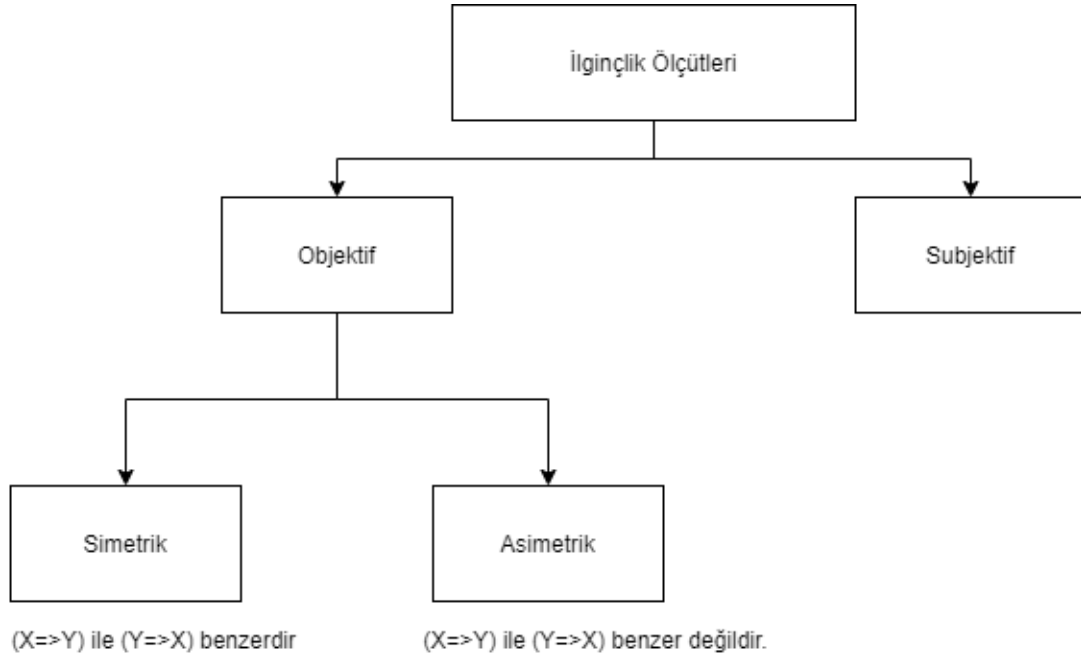
Her ne kadar meta kural yaklaşımı kuralları organize etmek ve gruplama için kullanılsa da, kuralların elenmesi içinde kullanılmaktadır [45]. Güven ve destek değerlerine bakılmaksızın denklik kümesindeki bir kural eğer aynı set içerisindeki kuraldan daha spesifikse, o kural elenir.

PCB kart montaj hattındaki hata verisine metodun uygulanmasına başlamadan önce ilk olarak veri seti hazırlanır, her satırda kart bazında hatalar listelenir. Ardından, veri setini aynı ardıla sahip hale getirmek için, ardıl olarak en çok görülen hata olarak seçilir ve Apriori algoritması çalıştırılarak, kurallar arasındaki birliktelik kuralları çıkartılır. Bu kurallara göre Q kümesi oluşturulur. Bu Q kümesinde güven değeri %90 olacak şekilde tekrardan apriori algoritması çalıştırılır ve kurallar arasındaki birliktelik ilişkileri ortaya çıkartılır. Son olarak kurallar arasında birbirlerini kapsayan kurallar elenir.

3.2.3 İlginçlik Ölçütleri

İlginçlik ölçütleri, bir örüntüdeki ilgi çekiciliğin değerlendirilmesi için kullanılan ölçütlerdir ve mümkün bir kural seti içerisinde ilginç olan kuralları seçmek için kullanılır. Bir kuralın ilginç olabilmesi için; kolay anlaşılabilir olması, belli oranda kesinlikle yeni ya da test verisinde geçerli olması, potansiyel olarak kullanılabilir olması ve orijinal olması gerekmektedir.

Bu ölçütler, subjektif ve objektif olmak üzere ikiye ayrılmıştır (Şekil 3.4). Bu çalışma kapsamında objektif olan ölçütler ele alınmıştır. Objektif ölçütler, istatistik bilgisine dayanır, simetrik ve asimetrik olarak iki şekilde sınıflandırılır. Simetrik ölçütlerde, $X \rightarrow Y$ kuralı ile $Y \rightarrow X$ kuralı benzer, asimetrik durumlarda ise benzer değildir. Bu çalışma kapsamında hem simetrik hem asimetrik ölçütler tartışılacaktır.



Şekil 3.4 İlginçlik Ölçütleri

İlginçlik kurallarının daha iyi anlaşılması için X ve Y öğeler kümeleri için ihtimal tablosu oluşturulur (Çizelge 3.3). Bu tabloda, X ve Y öğe kümelerine sahip toplam hareket sıklık sayıları gösterilmektedir. Bu tabloda, içerisinde X olan hareketlerin bulunduğu öğeler kümesi X , Y olan hareketlerin bulunduğu öğeler kümesi Y , içerisinde X hareketi olmayan öğeler kümesi \bar{X} , içerisinde Y elemanı olmayan öğeler kümesi ise, \bar{Y} sembolü ile temsil edilmektedir.

Çizelge 3.3 İhtimal Tablosu

	Y	\bar{Y}	
X	f_{11}	f_{10}	f_{1+}
\bar{X}	f_{01}	f_{00}	f_{0+}
	f_{+1}	f_{+0}	N

Burada, N toplam hareket sayısıdır. f_{11} hem X hem de Y öğe kümelerinin bulunduğu hareketlerin sayısı, f_{00} ise içerisinde ne X ne de Y öğe kümeleri olan hareketlerin sayısıdır. Hareket içerisinde X öğe kümesi varken, Y öğe kümesi olmayanların sayısı f_{10} ile gösterilirken, Y öğe kümesi varken X öğe kümesi olmayanlar f_{01} ile gösterilir. f_{1+}

içerisinde X öge kümesi olan tüm hareketlerin sayısını, f_{+1} ise içerisinde Y öge kümesi olan tüm hareketlerin sayısını temsil eder. Y öge kümesinin olmadığı tüm hareketlerin sayısının toplamı f_{+0} iken X öge kümesinin olmadığı tüm hareketlerin sayısının toplamı ise f_{0+} ile gösterilir.

Destek değeri ($Supp(X)$), içerisinde X öğeler kümesi olan öğeler kümelerinin toplam sayısının toplam hareket sayısına oranıdır:

$$Supp(X) = \frac{\text{İçerisinde X Öğeler Kümesi olan Hareket Sayısı}}{\text{Toplam Hareket Sayısı}} = \frac{f_{1+}}{N} \quad (1)$$

Düşük destek değerleri, kuralın sadece şans eseri oluşabileceğinin bir göstergesidir.

Güven ($Conf(X \rightarrow Y)$) ise, Y öğeler kümesinin X öğeler kümesi ile birlikte oluşmasının ihtimalini anlamak için kullanılır:

$$Conf(X \rightarrow Y) = \frac{Supp(X \cup Y)}{Supp(X)} = \frac{f_{11}}{f_{1+}} \quad (2)$$

Güven değeri aynı zamanda bir koşullu olasılık $P(Y|X)$ değeri olarak, X öğeler kümesini içeren hareketlerde Y öğeler kümesinin de bulunma olasılığı olarak da yorumlanabilir. Güven değeri sadece X öğeler kümesinin görünme sıklığını değerlendirir, Y'nin oluşma sıklığını dikkate almaz. Eğer X ve Y öğeler kümeleri eşit sıklıkla gözlemleniyorsa, hareketlerde X barındıranların Y de barındırma olasılığı artar. Bu noktada, Y öğeler kümesinin gözlenme sıklığını da dikkate alan kaldırma (lift) ölçütü kullanılır.

$$Lift(X \rightarrow Y) = \frac{Supp(X \cup Y)}{Supp(X) * Supp(Y)} = \frac{Nf_{11}}{f_{1+} * f_{+1}} \quad (3)$$

Bu ölçüt, Y'nin de gözlemlenme sıklığını dikkate alarak X öğeler kümesinin olduğu durumlarda Y öğeler kümesinin de olma olasılığıdır.

Bir diğer ölçüt olan kanaat ($Conv(X \rightarrow Y)$) kuralların şans eseri oluşup oluşmadıklarının anlaşılmasında kullanılır. Güven ölçütünün yerine önerilmiştir [46] ancak bir ilişkinin yönü bu ölçütten anlaşılabilir.

$$Conv(X \rightarrow Y) = \frac{1 - Supp(Y)}{1 - Conf(X \rightarrow Y)} = \frac{f_{1+} + f_{0+}}{N * f_{10}} \quad (4)$$

Her ne kadar birçok çalışmada destek değeri yüksek olan sık olaylar önem kazansa da bu çalışma kapsamında nadir olaylarla sık olaylar arasındaki ilişkiler de incelenmiştir. Nadir olaylar, destek değerleri düşük olan olaylardır. Nadir olan iki olay ya da nadir ve sık olan olaylar arasındaki birliktelik kurallarına nadir birliktelik kuralları denir.

Tıbbi teşhislerden örnek verilecek olursa, mamografi filmindeki piksellerin sınıflandırılması durumunda, kanserli pikseller tüm görüntünün çok ufak bir kısmını temsil etmektedir. Aynı şekilde, kredi kartı dolandırıcılığı tespitinde de milyonlarca normal işlemin arasından çok az sayıda bir kısmında dolandırıcılığa dair veri bulunabilir. Eksik malzeme ya da yabancı malzeme gibi göreceli olarak daha nadir görülen hata türlerinin, müşterinin de tespiti sonucunda ciddi yaptırımları olacağı için bu nadir ilişkiler çalışma kapsamına dahil edilmiştir.

Nadir birliktelik kurallarında kullanılacak olan farklı ilginçlik ölçütleri mevcuttur [47]. Bu ölçütlerin simetrik olanları kosinüs ($\text{Cosine}(X \rightarrow Y)$), tam-güven ($\text{all-confidence}(X)$) ve Jaccard İndeksi, asimetrik olanları ise karşılıklı bilgi ($\text{Mutual Information}(X, Y)$) ölçütleridir. Bu ölçütler aşağıda açıklanmaktadır:

$$\text{Cosine}(X \rightarrow Y) = \frac{P(X, Y)}{\sqrt{P(X) \cdot P(Y)}} = \frac{f_{11}}{\sqrt{f_{1+} \cdot f_{+1}}} \quad (5)$$

Kosinüs ölçütü değeri 1'e yaklaştıkça, X barındıran öğeler kümesinde Y'de barındıran hareket sayısı artmaktadır. Buna karşılık, değer 0'a yaklaştıkça X barındırırken Y barındırmayan hareket sayısı artar.

Tam-güven aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$\text{all-confidence}(X) = \frac{\text{Supp}(X)}{\max_{I \subset X} \text{Supp}(I)} = \min\left[\frac{f_{11}}{f_{1+}}, \frac{f_{11}}{f_{+1}}\right] \quad (6)$$

Tüm olası üretilen kural setleri en az verinin tam güven değerinde bir güven değerine sahip olmalıdır [48].

Jaccard İndeksi birliktelik kurallarındaki öncül ve ardılların örtüşme derecesini ölçer:

$$\text{Jaccard İndeksi} = \frac{P(X \cap Y)}{P(X) + P(Y) - P(X \cap Y)} = \frac{f_{11}}{f_{1+} + f_{+1} - f_{11}} \quad (7)$$

Jaccard indeksi 1'e eşit olduğunda, en ilginç kuralların kural setinde var olduğu kabul edilirken, 0'a eşit olduğunda ise en az ilgi çeken kuralların kural setinde olduğu kabul edilir.

Karşılıklı Bilgi bir rastgele değişkenin diğeri hakkında ne kadar bilgi verdiğini tanımlar:

$$\text{Karşılıklı Bilgi}(X, Y) = \frac{\sum_i \sum_j P(X_i, Y_j) \log \frac{P(X_i, Y_j)}{P(X_i)P(Y_j)}}{\min\left(-\sum_i P(X_i) \log P(X_i) - \sum_j P(Y_j) \log P(Y_j)\right)} = \frac{\sum_i \sum_j \frac{f_{ij}}{N} \log \frac{N \cdot f_{ij}}{f_{i+} \cdot f_{+j}}}{\left(-\sum_i \frac{f_{i+}}{N} \log \frac{f_{i+}}{N}\right)} \quad (8)$$

İlginçlik ölçütleri ile ilgili detaylı araştırmalar mevcuttur [49].

3.3. Sıralı Örüntü Madenciliği

Sıralı örüntü madenciliği, birliktelik kurallarında dikkate alınmayan sıra bilgisini kullanarak anlamlı örüntüler oluşturur. Sıralı örüntü madenciliğinde, sıralı veri tabanı kullanılır.

Dizi, öğelerin sıralı listesidir ve $s = \langle e_1 e_2 \dots e_n \rangle$ olarak gösterilir. Örneğin, Çizelge 3.4’de M1’e ait sıralı örüntüye bakılacak olursa olaylar zamana göre $\langle (2,3,5) (6,1) 1 \rangle$ olarak sıralanmıştır. k adet öğenin bulunduğu diziler “k-dizi” olarak ifade edilir.

Çizelge 3.4 Örnek Sıralı Veri Tabanı

Müşteri	Zaman	Ürün
M1	10	2,3,5
M1	20	6,1
M1	30	1
M2	10	4,5,6
M2	20	2
M3	10	1,8,7

Sıralı örüntü madenciliğinde, birliktelik kurallarında olduğu gibi amaç destek değeri belirlenen en küçük destek değerine eşit ya da yüksek olan tüm dizileri listelemektir. Veri kümesinde çok sayıda sıralı dizi örüntüsü oluşabilir. Burada da Apriori prensibi uygulanabilir. Eğer sıralı dizi *minsup* değerini sağlamazsa, veri kümesinin hiçbir alt kümesi de *minsup* değerini sağlamayacaktır. Örneğin, göre $\langle (2,3,5) \rangle$ *minsup* değerini sağlamazsa, göre $\langle (2,3,5) (6) \rangle$ sıralı dizisi de *minsup* değerini sağlamaz.

Sıralı örüntü madenciliği algoritmasında, iteratif olarak yeni aday k-dizileri üretilir, (k-1)-dizilerinden yaygın olmayan adaylar budanır ve kalanların destek sayılarına göre sıralı örüntüler belirlenir. Aday üretme, bir çift yaygın (k-1)- dizisi birleşerek aday k-dizisini oluşturmasıyla elde edilir. Tekrarlayan adayların üretilmemesi için sadece (k-1) öge aynı ise birleştirme işlemi yapılır. Aday budama adımında ise, aday k-dizisi ancak en az bir (k-1) dizi yaygın değilse elenir.

Bu çalışmada SPADE algoritması kullanılmıştır. SPADE algoritması, sıralı örüntüleri tespit etmek için kullanılan hızlı bir algoritmadır. Bu yöntemin kullanılabilmesi için zaman damgalı verinin dikey liste formatında hazırlanması gerekir. Her sıranın kendine has kimlik numarası ve zamansal sıralaması mevcuttur.

3.4. Sürecin Performansının Ölçümü için Anahtar Performans Göstergeleri

Sürecin mevcut durumu ile, birliktelik kuralları ve sıralı örüntü madenciliği uygulamaları sonrasındaki sürecin durumunun karşılaştırılması için anahtar performans göstergelerinden faydalanılacaktır.

PCB montaj hattı sürecinin performansını ölçmek için çeşitli anahtar performans göstergeleri tanımlanmıştır. Kart başına düşen hata sayısı üretilen kartlarda meydana gelen hata sayılarının toplamının üretilen kart sayısına bölünmesiyle bulunur:

$$DPU = \frac{\text{Toplam Hata Sayısı}}{\text{Toplam Kart Sayısı}} \quad (9)$$

Bir diğer gösterge milyon fırsattaki hata sayısıdır (DPMO). Hatalar; komponent, yerleştirme, sonlandırma ve montaj hatalarından oluşur ve toplam hata sayısı denklem (2) de tanımlanmıştır:

$$\text{Toplam Hata Sayısı} = H_{\text{komponent}} + H_{\text{yerleştirme}} + H_{\text{sonlandırma}} + H_{\text{montaj}} \quad (10)$$

$$H = \text{Hata Sayısı}$$

Milyon fırsattaki hata ise toplam hata sayısının kart üzerindeki toplam hata fırsatlarına bölünüp 10^6 ile çarpılması ile bulunur:

$$DPMO = \frac{\text{Toplam Hata Sayısı}}{\text{Toplam Hata Fırsatı Sayısı}} * 10^6 \quad (11)$$

Bu formülde;

Fırsat sayısı hesaplamaları da aynı hata sayısı hesaplamalarında olduğu gibi komponent, yerleştirme, sonlandırma ve montaj fırsatlarından oluşur. Her bir fırsat, hata olma olasılığını temsil eder.

Komponent fırsatı, kart üzerine yerleştirilen donanım parçalarından kaynaklanır. Bir komponentin kart üzerindeki varlığı ve/veya pozisyonu yerleştirme fırsatını oluşturur. Sonlandırma fırsatını komponentin elektriksel sonlandırmaya sebep olan tüm delik ya da yüzeyleri oluşturur. Montaj fırsatı ise toplam üretilen kart sayısı ile aynıdır.

İlk seferde sonuç (FPY) verisi testin sonunda ortaya çıkar ve testi ilk seferde geçen kart sayısının toplam test edilen karta bölünmesi ile bulunur:

$$FPY = \frac{\text{İlk Seferde Testi Geçen Kart Sayısı}}{\text{Test Edilen Kart Sayısı}} \quad (12)$$

Bu göstergeler ile çalışma tamamlandıktan sonra yapılan iyileştirme miktarları ölçülecek, hatalar arasındaki ilişkilerin kök sebep çözümleriyle olan ilişkileri doğrulanacaktır.

3.5. Verilerin Görselleştirilmesi

Bu tez çalışması kapsamında, birliktelik kurallarının görselleştirilmesi ve analizlerin otomatik hale getirilirken kullanıcıya daha interaktif bir ortam sağlaması için R programı aracılığıyla bir ara yüz geliştirilmiştir. Bu ara yüz, güncel verinin çevrim içi sisteme yüklenebilmesini ve analiz sonuçlarına hızlı erişimi sağlamıştır. Bununla beraber, verilerin analize hazırlanması için gereken işçilik minimuma indirilmiştir.

Ara yüz temel olarak değişken değerlerin Apriori algoritması üzerinde kullanılmasını sağlayarak, kullanıcıya interaktif analiz deneyimi sunar.

Ara yüzün ekranı, ana ve yan panellerden oluşmaktadır. Ekranın yan panelinde birliktelik kurallarının oluşturulabilmesi için belirlenmesi gereken değişkenler bulunmaktadır. Bu değişkenler, oluşturulması istenen kural sayısı, destek değeri, güven değeri, sıralama kriteri gibi kullanıcı tarafından belirlenmesi gerekli girdilerdir. Aynı zamanda bu panelde, destek ve güven değerlerinin 0 – 1 arasında 0.001 aralıklarla seçilebilmesi için kullanılacak kaydırma butonu bulunmaktadır. Son olarak, birliktelik kuralları sıralamasında kriterlerin seçilebileceği açılır menü paneli bulunmaktadır.

Ana panelde, birliktelik kurallarının tablo halinde verilmesini ve analizlerin görselleştirilmesini sağlayan bölüm bulunmaktadır. Bu bölümde, 8 farklı seçenek yer almaktadır. Bu seçenekler sırasıyla; tablo, interaktif tablo, sıklık grafiği, dağılım grafiği, balon grafiği, matris grafiği, grup matris grafiği ve paralel koordinat grafiğidir (Şekil 3.5).

Tablo seçeneğinde, birliktelik kuralları ile ilgili çıktılar yer almaktadır. İnteraktif tablo ise kullanıcının istediği şekilde sıralama yapılabilmesi ve hem birliktelik kurallarını hem de ilginçlik ölçütlerini inceleyebilmesi içindir.

Ara yüzdeki grafik çeşitlerinin ilki sıklık grafiğidir. Bu grafik, hata türlerinin histogram grafiği olarak da adlandırılabilir. Ara yüzdeki ikinci grafik ise, dağılım grafiğidir. Bu grafik, birliktelik kurallarının doğrudan görselleştirilmesinde destek ve güven ölçütlerinden faydalanılarak hazırlanır. Bu ölçütlere ek olarak grafikte kaldıraç ölçütü değerleri renk yoğunluğu ile temsil edilir. Koyu renk yüksek kaldıraç değerlerini ifade

ederken açık renkler daha düşük değerleri belirtmektedir. Örnek bir dağılım grafiği Şekil 3.6'de görölmektedir. Dağılım grafiği, optimal kural setlerinin belirlenmesi için üst ve alt destek- güven sınırlarının belirlenmesinde kullanılmıştır [50].

PCB Hattı Birliklik Kuralları

Choose variables:

- AL
- BBP
- CM
- DM
- EKH
- EM
- FL
- HB
- HKTb
- HOM
- KAL
- KI
- LD
- LK
- LP
- TS
- MH
- MK
- MT
- OL
- SL
- JHM
- JOLY
- YM

Örnekleme

Tüm Kurallar Örnekleme

Support:

0.01

Confidence:

0.5

Tablo [Interaktif Tablo](#) [Sıklık Grafığı](#) [Dağılım Grafığı](#) [Balon Grafığı](#) [Matris Grafığı](#) [Grup Matris Grafığı](#) [Paralel Koordinat Grafığı](#)

Apriori

Parameter specification:

```
confidence minval smax arem aval originalSupport maxtime support minlen maxlen target ext
0.5 0.1 1 none FALSE TRUE 5 0.01 2 3 rules FALSE
```

Algorithmic control:

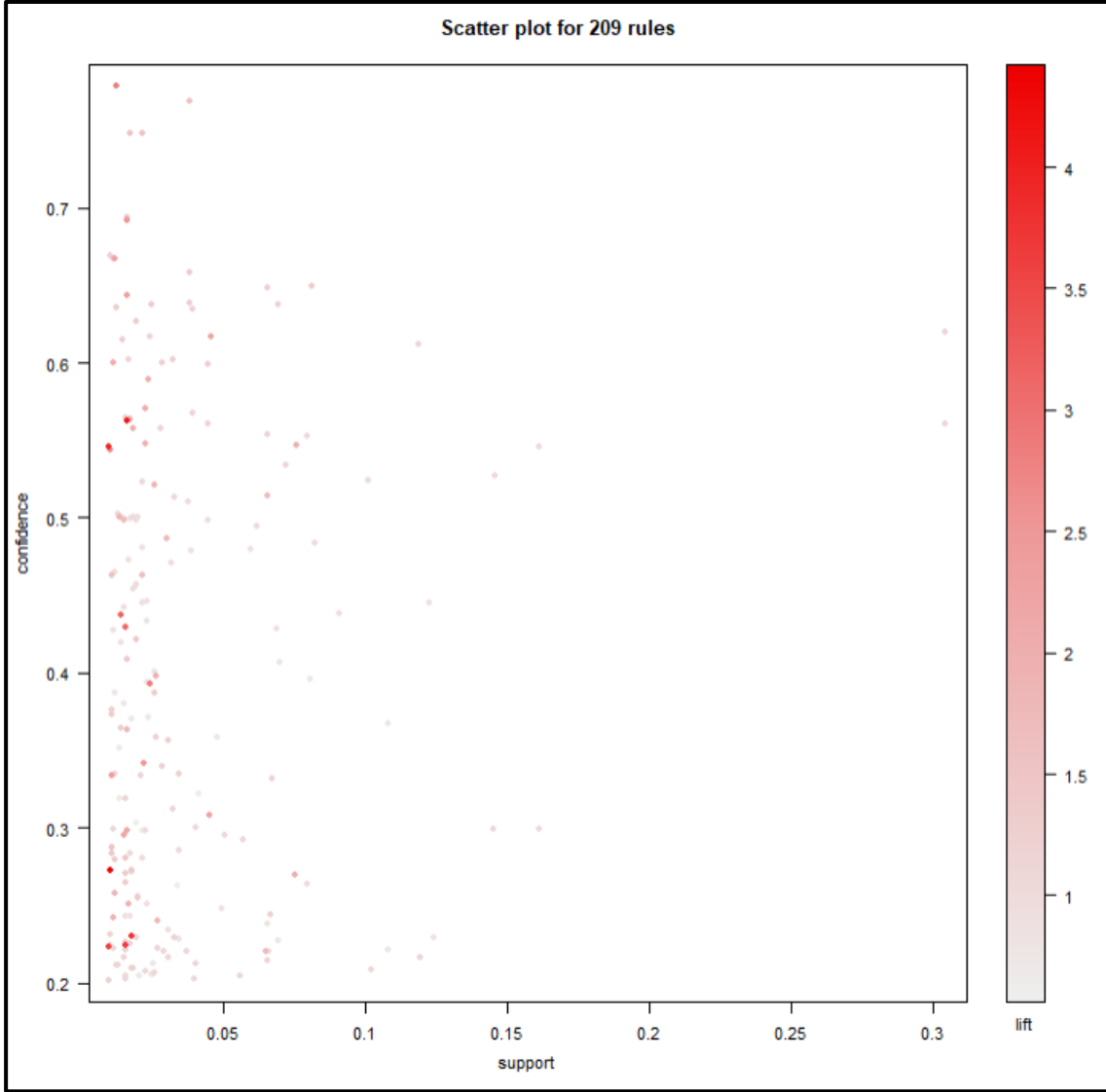
```
filter tree heap memopt load sort verbose
0.1 TRUE TRUE FALSE TRUE 2 TRUE
```

Absolute minimum support count: 0

set item appearances ...[0 item(s)] done [0.00s].
set transactions ...[24 item(s), 58 transaction(s)] done [0.00s].
sorting and recoding items ... [24 item(s)] done [0.00s].
creating transaction tree ... done [0.00s].
checking subsets of size 1 2 3 done [0.00s].
writing ... [387 rule(s)] done [0.00s].
creating 54 object ... done [0.00s].

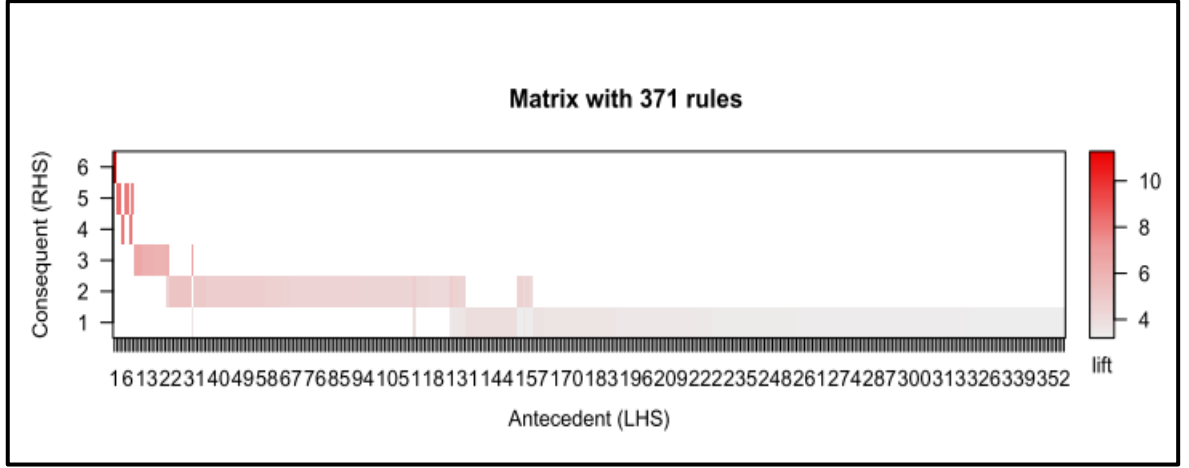
lhs	rhs	support	confidence	lift	count	conviction	hyperConfidence	cosine
[1] {MK,UOLY}	=> {EKH}	0.01724138	1.0	58.000000	1	NA	0.9827586	1.0000000
[2] {FL,UOLY}	=> {LD}	0.01724138	1.0	58.000000	1	NA	0.9827586	1.0000000
[3] {FL,MK}	=> {KI}	0.01724138	1.0	58.000000	1	NA	0.9827586	1.0000000
[4] {FL,LK}	=> {KI}	0.01724138	1.0	58.000000	1	NA	0.9827586	1.0000000
[5] {CM,MK}	=> {KI}	0.01724138	1.0	58.000000	1	NA	0.9827586	1.0000000
[6] {CM,LK}	=> {KI}	0.01724138	1.0	58.000000	1	NA	0.9827586	1.0000000
[7] {MT,OL}	=> {LP}	0.01724138	1.0	58.000000	1	NA	0.9827586	1.0000000
[8] {FL,MH}	=> {SL}	0.01724138	0.5	29.000000	1	1.965517	0.9655172	0.7071068
[9] {CM,FL}	=> {KI}	0.01724138	0.5	29.000000	1	1.965517	0.9655172	0.7071068
[10] {MT,UOLY}	=> {LP}	0.01724138	0.5	29.000000	1	1.965517	0.9655172	0.7071068
[11] {MT,UHM}	=> {LP}	0.01724138	0.5	29.000000	1	1.965517	0.9655172	0.7071068
[12] {LP}	=> {MT}	0.01724138	1.0	19.333333	1	NA	0.9482759	0.5773503
[13] {LP,OL}	=> {MT}	0.01724138	1.0	19.333333	1	NA	0.9482759	0.5773503
[14] {HB,LP}	=> {MT}	0.01724138	1.0	19.333333	1	NA	0.9482759	0.5773503
[15] {LP,UOLY}	=> {MT}	0.01724138	1.0	19.333333	1	NA	0.9482759	0.5773503
[16] {LP,UHM}	=> {MT}	0.01724138	1.0	19.333333	1	NA	0.9482759	0.5773503
[17] {EM,FL}	=> {DM}	0.01724138	1.0	19.333333	1	NA	0.9482759	0.5773503
[18] {EM,HB}	=> {DM}	0.01724138	1.0	19.333333	1	NA	0.9482759	0.5773503
[19] {HB,HOM}	=> {MT}	0.01724138	1.0	19.333333	1	NA	0.9482759	0.5773503
[20] {MT,UHM}	=> {HOM}	0.01724138	0.5	14.500000	1	1.931034	0.9316394	0.5000000
[21] {AL,MT}	=> {HOM}	0.01724138	0.5	14.500000	1	1.931034	0.9316394	0.5000000
[22] {SL}	=> {FL}	0.01724138	1.0	11.600000	1	NA	0.9137931	0.4472136
[23] {LD}	=> {FL}	0.01724138	1.0	11.600000	1	NA	0.9137931	0.4472136
[24] {KI}	=> {FL}	0.01724138	1.0	11.600000	1	NA	0.9137931	0.4472136
[25] {MH,SL}	=> {FL}	0.01724138	1.0	11.600000	1	NA	0.9137931	0.4472136
[26] {SL,UHM}	=> {FL}	0.01724138	1.0	11.600000	1	NA	0.9137931	0.4472136
[27] {AL,SL}	=> {FL}	0.01724138	1.0	11.600000	1	NA	0.9137931	0.4472136
[28] {HB,LD}	=> {FL}	0.01724138	1.0	11.600000	1	NA	0.9137931	0.4472136

Şekil 3.5 Ana Panel



Şekil 3.6 Dağılım Grafiği

Bir diğer grafik seçeneği matris temelli görselleştirmedir. Burada öncül ve ardıl öğeler x ve y eksenlerinde konumlandırılır. Belirlenen ilginçlik ölçütü değerleri, kuralın öncül ve ardıl öğeleri ile kesiştiği yerde gösterilir. Eğer öncül ve ardılın ortak olduğu bir kural yoksa, o alan boş bırakılır (Şekil 3.7). Kaldıraç değeri renklerin yoğunluğu ile doğru orantılıdır.



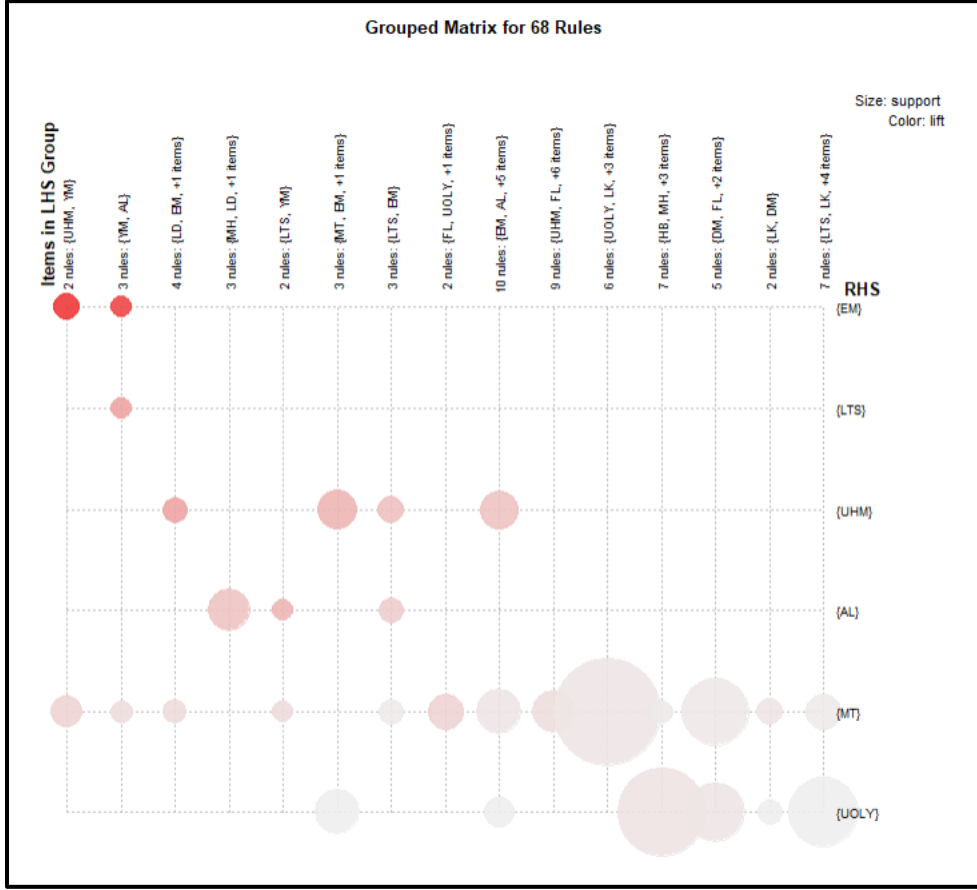
Şekil 3.7 Matris Grafiği

R kümesi birliktelik kurallarını temsil etsin:

$$R = \{ \langle a_1, c_1, m_1 \rangle, \dots, \langle a_i, c_i, m_i \rangle, \dots, \langle a_n, c_n, m_n \rangle \}$$

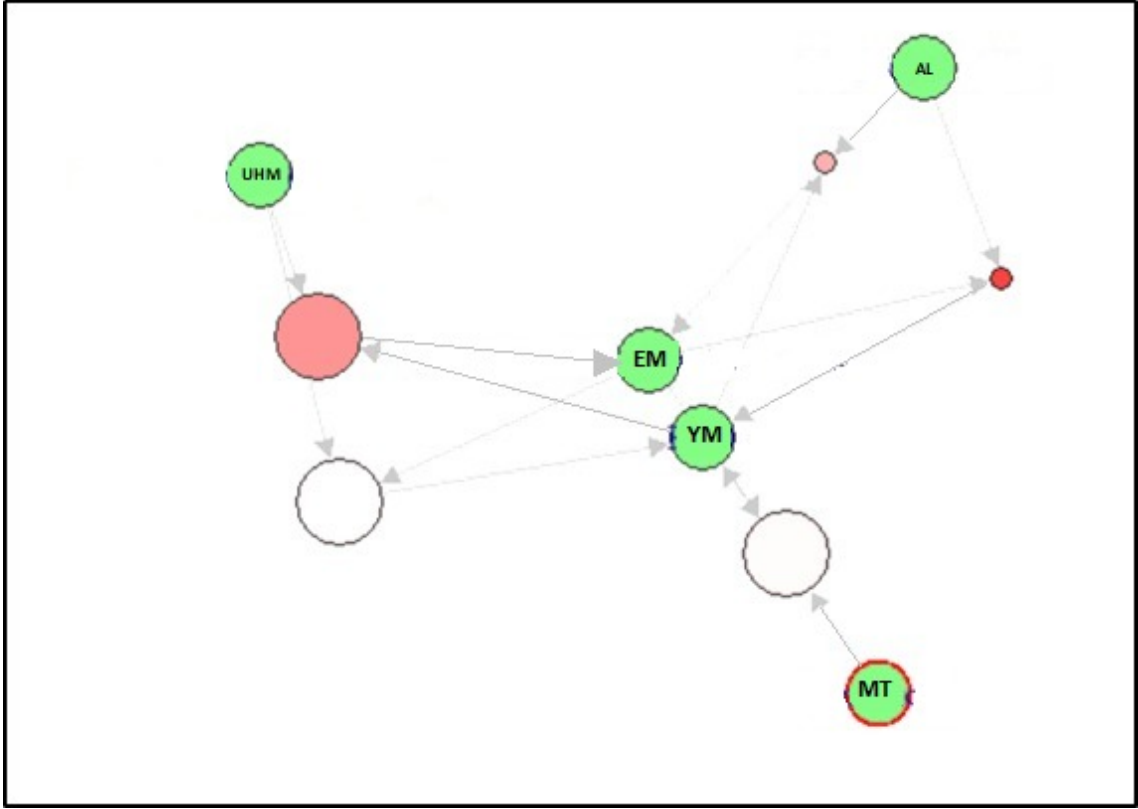
Burada, $i = 1, \dots, n$ kuralı, a_i öncülü, c_i ardılı, m_i ise seçilen ilginçlik kuralını temsil etmektedir. R kümesinden K benzersiz öncül ve L benzersiz ardıl kümeleri belirlenmektedir ve böylece M (L x K) matrisi oluşturulur. $M_{lk} = m_i$ için l ve k değerleri matristeki a_i ve c_i değerlerinin pozisyonuna karşılık gelmektedir.

Büyük veri setlerinde çok sayıda benzersiz öncül ve ardıl öge olacağı için matris temelli görselleştirme de kısıtlı olmaktadır. Grup matris temelli görselleştirmede, kurallar gruplar halinde ele alınarak matris temelli görselleştirme geliştirilmiştir. Böylelikle çok sayıda kuralın tek bir grafik üzerinde görselleştirilmesi sağlanmıştır. Öncüllerin gruplanması, M matrisindeki sütunların gruplanması problemine dönüşmüştür. Gruplama için K-ortalama kümeleme metodu kullanılır [29]. Bu metotta, aynı ardıla istatistiksel olarak bağımlı olan öncüllerin birbirine benzer olduğu varsayımı yapılarak öncüller gruplandırılır. Aynı gruplama yöntemi ardıl öğeler için de uygulanabilir. Bu grafiklerde, öncül grupları sütun ve ardıl grupları satır olacak şekilde balon şeması ile görselleştirmiştir. Balonların renk yoğunlukları tümleşik ilginçlik ölçütü değerini, boyutları ise tümleşik destek değerini temsil etmektedir. İlginçlik ölçütlerinin tümleşik değeri hesaplanırken grubun medyan değeri kullanılır. Öncül öğelerin sayısı ve en sık (önemli) ögenin ismi sütunların etiketinde listelenmektedir. Şekil 3.8’de gösterilen grup matris grafiğinde yukarıdan aşağı ve soldan sağa doğru tümleşik ilginçlik ölçütlerinin değeri azalmaktadır. Böylelikle en ilginç kural üst sol köşede görselleştirilmektedir.



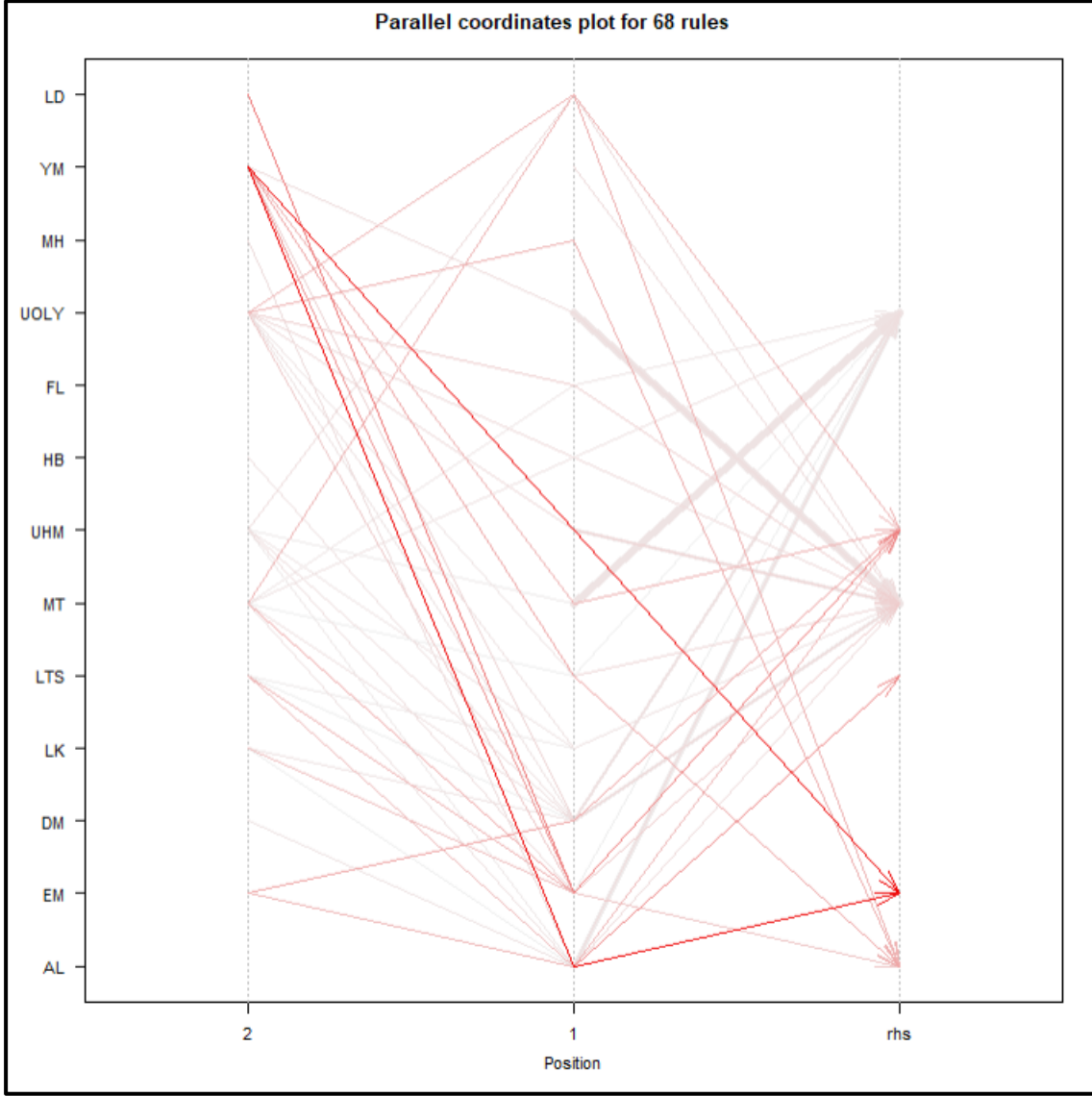
Şekil 3.8 Grup Matris Grafiği

Balon grafiği görselleştirmesinde öğeler birbirlerine ok ile bağlanır (Şekil 3.9). Okun çıktığı öğenin öncülü, gösterdiği öğe ise ardılı temsil eder. İlginçlik ölçütleri, renk yoğunluğu ve şekillerin boyutuyla temsil edilir. Her ne kadar bu grafiklerle açıklayıcı bir görsel oluşturulsa da artan kural sayısı ile grafik dağınık bir hal alabilir. Bu çalışmada, bunu önlemek için interaktif grafik metodu kullanılmış ve kullanıcının grafik üzerinde değişiklik yapmasına imkân verilmiştir.



Şekil 3.9 Balon Grafiği

Paralel koordinat grafikleri çok boyutlu verinin boyutlarının x ve y ekseninde görselleştirilmesi için tasarlanmıştır (Şekil 3.10). Her bir veri noktası boyutları birbirine bağlayan çizgilerden oluşmaktadır. y ekseni öğeleri, x ekseni ise öğelerin kural içerisindeki yerini temsil etmektedir. Çizgilerin kalınlığı destek değerini, renk yoğunluğu ise güven değerini temsil etmektedir.



Şekil 3.10 Paralel Koordinat Grafiği

Bu ara yüz sayesinde, değişken destek ve güven değerleri ile hatalar arasındaki ilişkiler daha kolay bir şekilde gözlemlenebilecek, görselleştirebilecek ve analizi desteklemek için gerekli olan ilginçlik ölçütlerine de hızlı bir şekilde ulaşılabilecektir. Aynı zamanda, odaklanılmak istenen hatalar filtrelenerek hata analizleri için gerekli olan anlamlı bilgiye sahip olunabilecektir. Böylelikle, veri analizi uzmanları dışında, işi bire bir yapan kişiler de rahatlıkla farklı senaryolar için birliktelik kuralları oluşturabilecek ve kök sebep analizine hızlıca girdi sağlayabilecektir.

4. ANALİZ VE YORUMLAR

Çalışmanın bu bölümünde gerçek hata verisi ile yapılan birliktelik kuralları ve sıralı örüntü madenciliği analizlerinin sonuçlarına ve yorumlarına yer verilmiştir.

4.1. Birliktelik Kuralları

Bu çalışma kapsamında, R programı kullanılarak birliktelik kuralları Apriori algoritmasıyla üretilmiştir. Hatalar arasındaki ilişkilerin daha iyi bir şekilde anlaşılabilmesi için birliktelik kuralları iki alt bölümde incelenecektir.

İlk olarak hata ilişkileri birer yıllık periyotlarla analiz edilmiştir. İkinci aşamada ise kartın kendine özgü tasarımı sebebiyle ortaya çıkabilecek hata ilişkilerini daha iyi anlamak için kart tipi bazlı incelemeler gerçekleştirilmiştir.

Kullanılan ilk veri seti 2012 – 2017 yıllarının verisini kapsamaktadır. Veri setinin ham formatı Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Ham Veri Formatı

Kafile No	Kart No	Hata Türü
20180101	10	Eksik Malzeme
20180101	10	Az Lehim
20180102	20	Yabancı Malzeme
20180102	20	Az Lehim
20180102	20	Yanlış Markalama
...

Mevcut veri hatanın oluşum sıralaması önemsenmeden, kafile numarası ve kart numarasının birleştirilip, hata türlerinin listelendiği bir formata dönüştürülmüştür (Çizelge 4.2).

Çizelge 4.2 Birleştirilmiş Veri Formatı

Kart No	Hata Türü
10	Eksik Malzeme, Az Lehim
20	Yabancı Malzeme, Az Lehim, Yanlış Markalama
...	...

Birliktelik kurallarının en önemli parametrelerinden olan sıklık; bu çalışmada birim zamanda tekrar eden hata türü sayısı olarak tanımlanmıştır. Veri tabanındaki her satır bir hareket olarak isimlendirilmektedir. Örneğin, Çizelge 4.2’de iki adet hareket bulunmaktadır.

Nadir olay, veri tabanında çok az harekette görülen ve muhtemelen uygulayıcı tarafından belirlenen minimum destek değerini karşılamadığı için elenen olaylardır. Her ne kadar bazı hatalar nadir olsa da, oluştuklarında sonuçları büyük olabilir. Bu çalışmada nadir olaylarla ilgili kuralların elenmesini engelleyebilmek için birden çok destek değeri kullanılmıştır. Böylece, yüksek destek değeri (%10) sebebiyle elenen nadir olayları içeren kurallar da çalışma kapsamına dahil edilmiştir. Öncül ve ardıl olayların oluşum sıklığına bağlı olarak Çizelge 4.3’de seçilen destek ve güven değerleri belirtilmiştir.

Çizelge 4.3 Olayların Sıklıklarına Göre Destek ve Güven Aralıkları

	Olay Sıklığı	Ardıl (RHS) Olay(lar)	
		Nadir	Sık
Öncül (LHS) Olay(lar)	Nadir	Düşük Destek (%1), Yüksek- Orta Güven (>%75)	Orta- Yüksek Destek (%5- %10), Yüksek- Orta Güven (>%75)
	Sık	Düşük -Orta Destek (%1- %5), Yüksek- Orta Güven (>%75)	Yüksek Destek (%10), Yüksek Güven (>%85)

Bunlara ek olarak, Apriori algoritmasının destek ve güven değerleri seçiminde Pareto grafiklerinden elde edilen toplam gözlemlenen hata sayılarından faydalanılmıştır.

Nadir ancak kritik olabilecek hata birlikteliklerinin incelenmesi için destek değerleri %10, %5 ve %1 olarak belirlenmiştir.

Güven değeri olarak ise; %65, %75, %85 ve %95 değerleri seçilmiştir. Nadir birliktelik kurallarında, ilginçlik ölçütü olarak destek ve güven ölçütlerinin yanı sıra, nadir birliktelik kuralları için literatürde önerilen diğer ilginçlik ölçütlerinden de faydalanılmıştır.

4.1.1 Yıl Bazlı Analiz

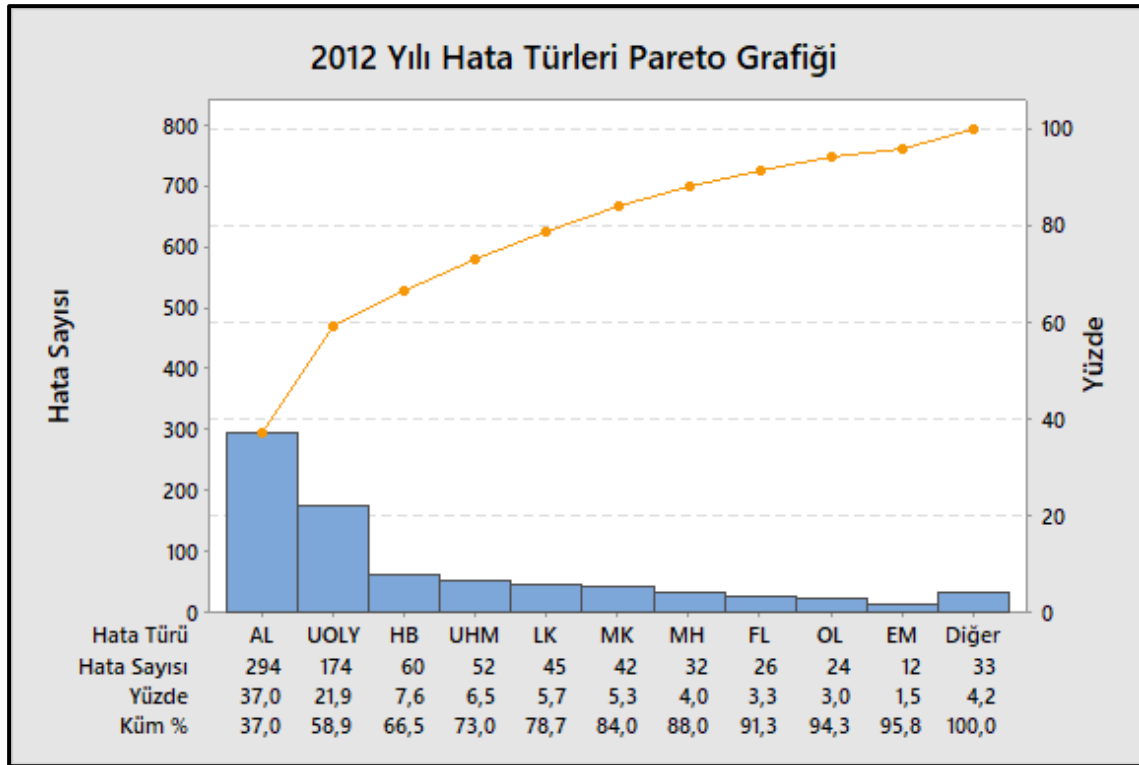
Hatalar arasındaki ilişkilerin anlaşılması için öncelikle birer yıllık periyotlarla hata verileri incelenmiştir. Bu analizde, süreç değişkenlerine dayalı ilişkilerin oluşması beklenmektedir. Bir yıl, periyot olarak uzun görünüyorsa da firma hat kalifikasyonunu yıllık olarak güncellediği için analiz periyodu bu şekilde tercih edilmiştir. İlk adımda, veriler ön işleme sürecinden geçirildikten sonra, veri seti R programına yüklenmiş ve sonuçlar analiz edilmiştir.

Yıl bazlı analizin yapılmasında kullanılan destek ve güven değerleri ve toplamda oluşan kural sayıları Çizelge 4.4’de verilmiştir.

Çizelge 4.4 Yıl Bazlı Birliktelik Kuralları Analizi

	Destek (%)	10				5				1				Hareket Sayısı
		65	75	85	95	65	75	85	95	65	75	85	95	
Üretilen Kural Sayısı	2012	2	2	0	0	40	34	13	13	924	888	867	867	293
	2013	0	0	0	0	1	0	0	0	27	11	3	1	3863
	2014	5	4	0	0	7	5	1	0	72	49	29	6	7424
	2015	5	0	0	0	8	1	0	0	44	16	5	0	3914
	2016	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	1893
	2017	0	0	0	0	0	0	0	0	5	4	3	1	2798

2012 yılında, toplam 293 satır hata türü kayıt altına alınmıştır. Şekil 4.1’de sunulan Pareto grafiği incelendiğinde, “az lehim” ve “uygun olmayan lehim yapışması” hatalarının, 2012 yılının toplam hatalarının %59’unu oluşturduğu görülmüştür. Yüksek destek (%10) ve yüksek güven (%95) değerlerine sahip bir kural oluşturulamamıştır. Bu durum öncül ve ardıl olayların ikisinin de sık olarak görüldüğü bir ilişkinin bulunmadığının göstergesidir.



Şekil 4.1 2012 Yılı Hata Türleri Pareto Grafiği

Orta güven (%75) ve yüksek destek (%10) değerleri ile yapılan analiz sonucunda sadece iki adet kural oluşmuştur (Çizelge 4.5). Üretilen birinci kuralda; “malzemede hasar” hatasının “az lehim” hatası ile birlikte oluşma sıklığı %77 olarak, “havada bacak” ve “uygun hizalanmamış malzeme” hatalarının “az lehim” hatasıyla birlikte oluşma olasılığı %75 olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.5 2012 Yılı Kural Listesi (Destek = %10, Güven = %75)

Kurallar	Öncül	Ardıl	Destek	Güven	Kaldıraç	Sayaç
[1]	Malzemede Hasar	Az Lehim	0,12	0,78	1,41	7
[2]	Havada Bacak, Uygun hizalanmamış Malzeme	Az Lehim	0,1	0,75	1,359	6

Konvansiyonel hata analiz yöntemleri ile bakıldığı zaman Şekil 4.1’de en sık gözlenen hata olan “az lehim” hatasının çözümüne odaklanılır. Bu hatanın kaynağı serigrafik makinesi olarak düşünüleceği için, o istasyonun tüm parametreleri kontrol edilir ancak diğer istasyonlar ikinci planda bırakılır. Ancak bu çalışmanın yaklaşımı olan birliktelik

kuralları incelendiğinde ve Çizelge 4.5 değerlendirildiğinde çok rastlanan “az lehim” hatasının çözümünde serigrafi sürecinden sonraki dizgi sürecinde ortaya çıkan hata türlerinin bu hatanın oluşumunu tetikleyebileceği düşünülmektedir. Bu varsayım, problem çözümü için harcanan efor, dizgi hattı istasyonundaki “hatalı malzeme”, “havada bacak” ve “uygun hizalanmamış malzeme” hatalarının oluşmasına sebep olan değişkenlere harcanarak birden çok hatanın çözümü mümkün olabilecektir. Böylece toplam hata sayısının azalmasıyla, harcanacak toplam efordan ve yeniden işleme süresinden tasarruf edilecektir.

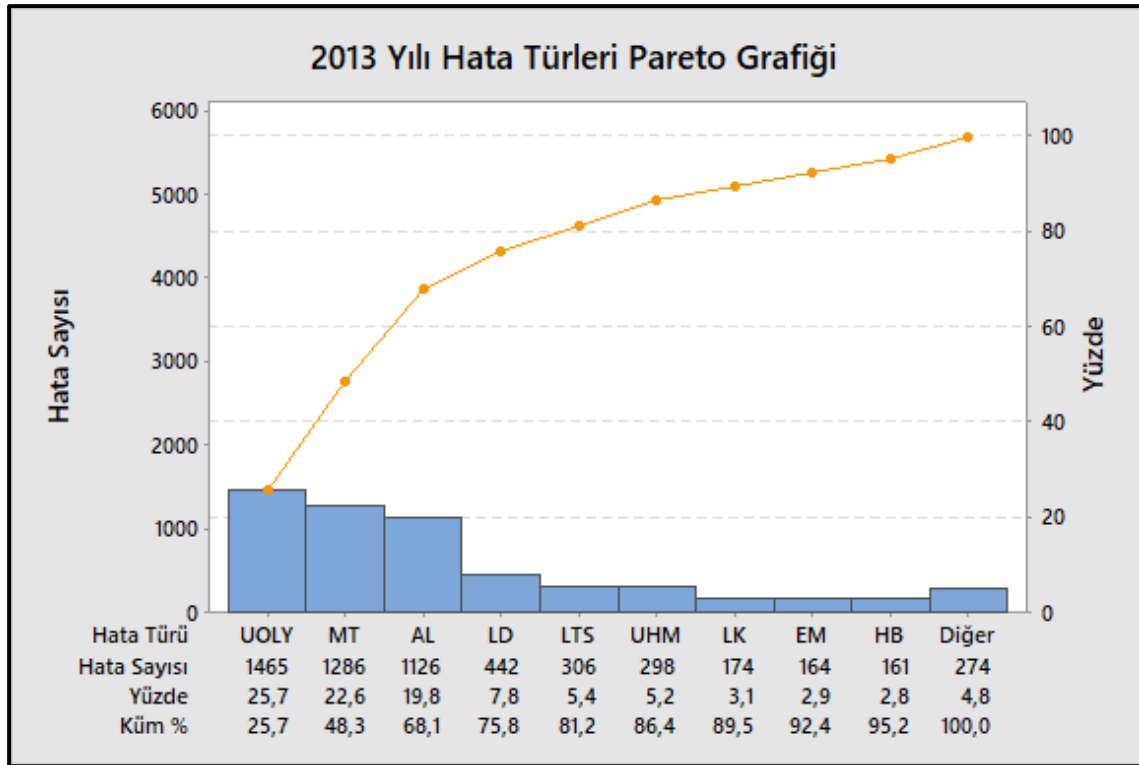
Hatalar arasındaki ilişkinin çift yönlü (simetrik) olduğu varsayılırsa, örneğin “malzemede hasar” → “az lehim” ile “az lehim” → “malzemede hasar” kuralları aynı ise, simetrik ilginçlik ölçütlerinden kanaat ve Jaccard indeksi değerleri, olayların öncül veya ardıl olmasının önemli olduğu durumlarda ise karşılıklı bilgi değeri hesaplanabilir.

Çizelge 4.6 2012 Yılı Kurallarının İlginçlik Ölçütleri

Kurallar	Kanaat	Jaccard İndeksi	Karşılıklı Bilgi
[1]	2,017	0,206	0,046
[2]	1,793	0,176	0,033

Çizelge 4.6 incelendiğinde iki kuralda da kanaat değeri 1'e eşit olmadığından öncül ve ardıl hatalar birbirinden bağımsız değildir. Ancak Jaccard İndeksi değerlendirildiğinde, kural setinde öncül ve ardıl hareketlerin birbirine benzediği bilgisine de ulaşamaz. Birinci kuralın karşılıklı bilgi değeri ikinci kurala göre daha büyük olduğu için “malzemede hasar” ve “az lehim” hataları birbiri hakkında daha çok bilgi verir.

2013 yılında en sık karşılaşılan hataların analizi için Şekil 4.2'deki Pareto grafiği elde edilmiş ve hataların %80'ini ilk 5 hatanın oluşturduğu görülmüştür.



Şekil 4.2 2013 Yılı Hata Türleri Pareto Grafiği

Çizelge 4.7’te görüleceği üzere toplamda 3863 adet harekette 43 kere “uygun hizalanmamış malzeme” ve “uygun olmayan lehim yapışması (yayılması)” hataları “mezar taşı” hatasıyla aynı anda görülmüştür.

Çizelge 4.7 2013 Yılı Kural Listesi (Destek = %5, Güven = %65)

Kurallar	Öncül	Ardıl	Destek	Güven	Kaldıraç	Sayaç
[1]	Uygun hizalanmamış malzeme, Uygun olmayan lehim yapışması (yayılması)	Mezar Taşı	0,081	0,651	1,33	43

Destek değeri %1 ve güven değeri %95 olarak algoritma tekrar çalıştırıldığında, 1 adet kural oluşturulmuştur. Üç farklı hata türü “eksik malzeme”, “dönmüş malzeme” ve “mezar taşı” hataları ile “uygun hizalanmamış malzeme” hatası yüksek güven (>%85) seviyelerinde karşılaşılmıştır.

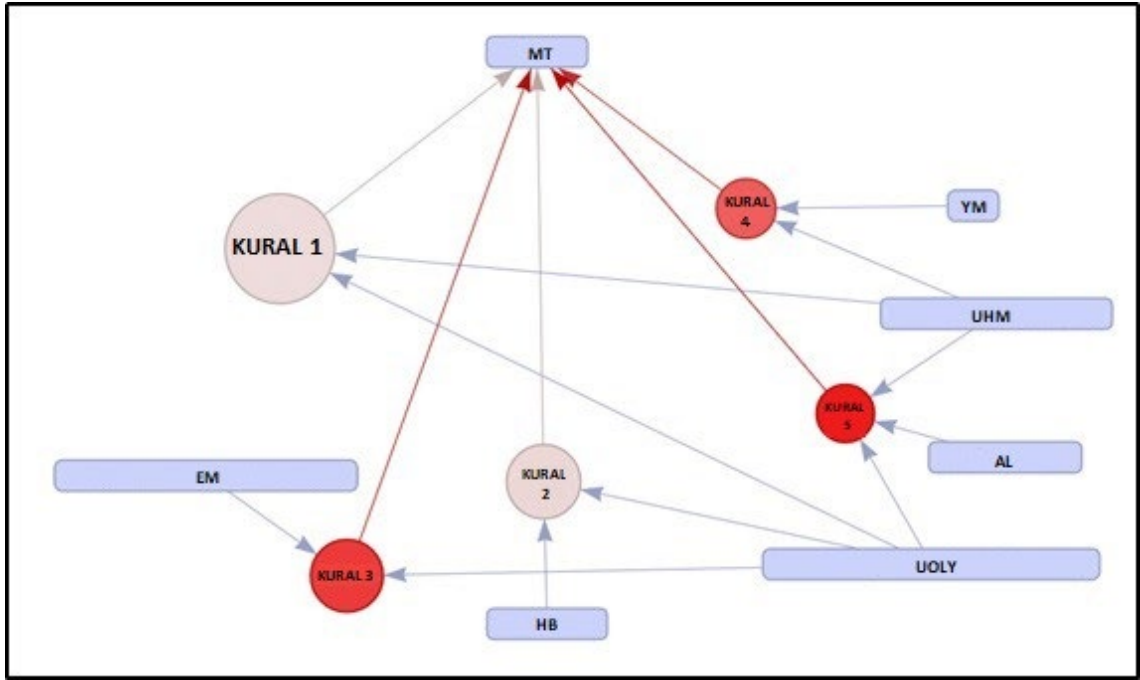
Birliktelik kuralları doğrudan bir sebep sonuç ilişkisi olarak kabul edilemeyecek olsa da, bu analiz sonunda yukarıda listelenmiş üç hataya sebep olan durumların “uygun

hizalanmamış malzeme” hatasına sebep olduğu üretimde çalışan personel tarafından doğrulanmıştır.

Çizelge 4.8 2013 Yılı Kural Listesi (Destek = %1, Güven = %95)

Kurallar	Öncül	Ardıl	Destek	Güven	Kaldıraç	Sayaç
[1]	Eksik malzeme, Dönmüş malzeme, Mezar taşı	Uygun hizalanmamış malzeme	0,011	1	3,601	6

2013 yılının en sık görülen hatası olan “mezar taşı” hatasının kök sebebini anlayabilmek için bu hata ile birlikte görülen en yüksek destek (%10) değerli ilk beş kural setinin arasındaki ilişki Şekil 4.3’de sunulmuştur.



Şekil 4.3 2013 Yılı Mezar Taşı Hatası Birliktelik Kuralları Balon Grafiği

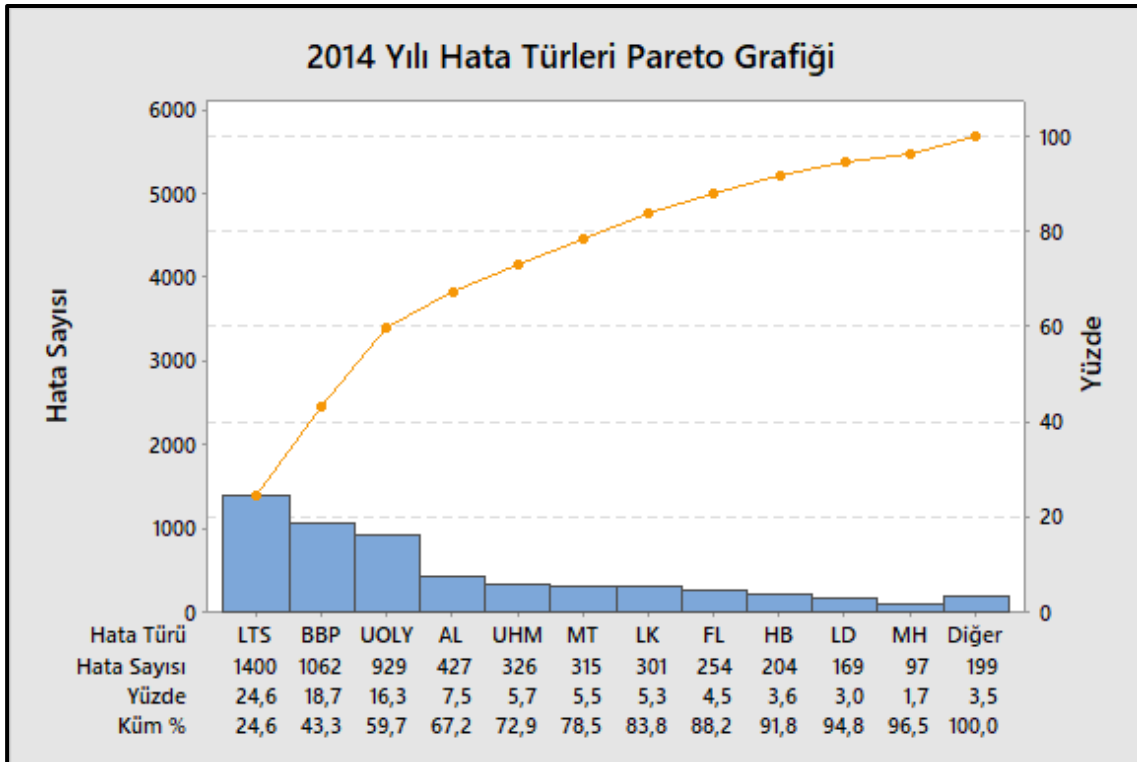
Bu şekilde, kural setlerinin rengi güveni, büyüklüğü ise destek değerlerini temsil etmektedir. Şekil incelendiğinde “mezar taşı” hatasını azaltmak için ele alınacak yöntem ikiye ayrılır.

Birincisi, yüksek destek (%10) değerli fakat görece düşük güven değerlerine sahip Kural 1 (“Uygun hizalanmamış malzeme” ve “uygun olmayan lehim yapışması (yayılması)”) ”

ve Kural 2'nin (“Havada bacak” ve “uygun olmayan lehim yapışması (yayılması)”) incelenmesidir.

İkincisi ise, Kural 3,4 ve 5'deki gibi görece düşük destek ve yüksek güven değerlerine sahip kuralların dikkate alınması ile kök neden analizi çalışmalarında bu kurallara öncelik verilmesidir. Bu iki yöntemde hatanın çözülmesinde uygulanabilir çözümlerdir. Ancak, hangi yöntemin seçileceği firmaların üretim süreçlerine ve çözüme yaklaşımlarına bağlıdır.

Bununla beraber, Şekil 4.2'de sunulan Pareto grafiğinde toplam hata sayısına etkisi düşük olduğu için diğerleri grubuna giren “uygun olmayan lehim yapışması (yayılması)” hatası en sık gözlenen hata türü olan “mezar taşı” ile ilgili ilk 5 kuralın 4'ünde de mevcuttur. Bu durumdan yola çıkarak, düşük adetlerde olan hatanın kök sebeplerinin çözülmesi sayıca daha fazla olan hata türlerinin azalmasında etkili olabilir.



Şekil 4.4 2014 Yılı Hata Türlerinin Pareto Grafiği

2014 yılında “lehim topları veya sıçraması” hatası 1400 adet ile en çok gözlemlenen hata türü olarak kaydedilmiştir (Şekil 4.4). Çizelge 4.9’da yüksek destek (%10) ve orta güven (%75) değerleri ile kurallar oluşturulduğunda iki kuralın ardıl elemanı olarak yine bu hata

türü gözlemlenmiştir. Bununla beraber, birlikte olduğu hatalardan “fazla lehim” hatası sayıca az gözlemlendiği için problem çözümünde ele alınmamaktadır. Halbuki, “fazla lehim” hatası hem “lehim topları veya sıçraması” hatası ile hem de “bacak büküm” hatası ile aynı anda oluşmakta, yani hem tek başına hem de diğer hatalarla en çok görünen hata ile birlikte oluşmaktadır. Bu çalışma kapsamında, problem çözümünde ve kök sebep analizinde “fazla lehim” hatasının değerlendirilmesi önerilmiştir.

Çizelge 4.9 2014 Yılı Kural Listesi (Destek = %10, Güven = %75)

Kurallar	Öncül	Ardıl	Destek	Güven	Kaldıraç	Sayaç
[1]	Fazla Lehim	Lehim Topları veya Sıçraması	0,127	0,809	1,55	76
[2]	Fazla Lehim	Bacak büküm problemi	0,12	0,766	1,512	72
[3]	Fazla Lehim, Bacak büküm problemi	Lehim Topları veya Sıçraması	0,102	0,803	1,584	61
[4]	Fazla Lehim, Lehim topları veya sıçraması	Bacak büküm problemi	0,102	0,803	1,584	61

4.1.2. Kart Bazlı Analiz

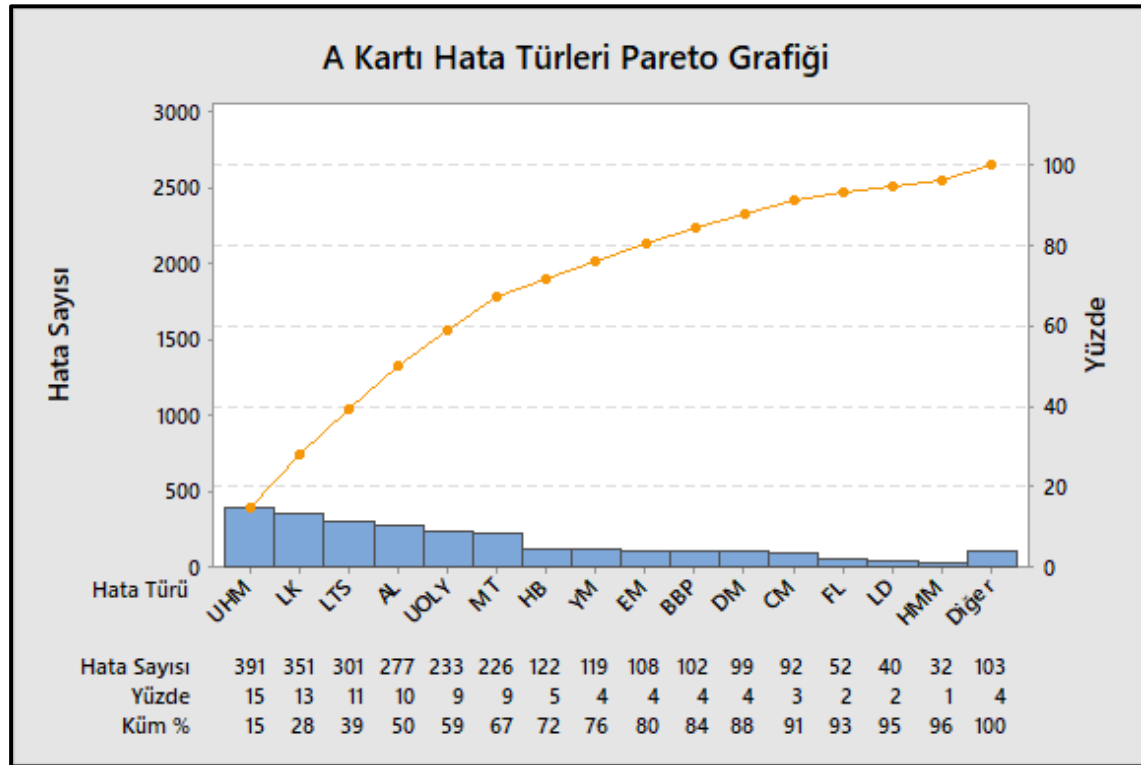
Kartın üzerindeki komponentlerin boyutları, dizilimleri, adetleri gibi özellikler, hata türlerini ve dağılımlarını etkilemektedir. Bununla beraber, çelik elek tasarımı gibi karta has olan özellikler de kart bazlı hata ilişkilerinin oluşmasında önem taşımaktadır.

Çizelge 4.10’da kart özelinde hatalar arasındaki ilişkileri analiz edebilmek için veri yıldan bağımsız olarak hazırlanmış ve ilişkiler değerlendirilmiştir.

Çizelge 4.10 Kart Özelinde Birliktelik Kuralları Analizi

Destek (%)	10				5				1				Hareket Sayısı	
	65	75	85	95	65	75	85	95	65	75	85	95		
Üretilen Kural Sayısı	A	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	2217	
	B	0	0	0	0	0	0	0	8	2	0	0	2469	
	C	0	0	0	0	0	0	0	10	7	3	1	6334	
	D	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3765	
	E	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	2410	
	F	1	0	0	0	4	1	0	0	32	16	3	1	3659
	G	0	0	0	0	1	0	0	0	9	5	3	2	2807

2012 – 2017 yılları arasında yedi farklı kart tipinde üretim yapılmıştır. Kartlar yıllar içerisinde minör ve majör olarak sınıflandırılan tasarım değişiklikleri geçirmişlerdir.



Şekil 4.5 A Kartı Hata Türleri Pareto Grafiği

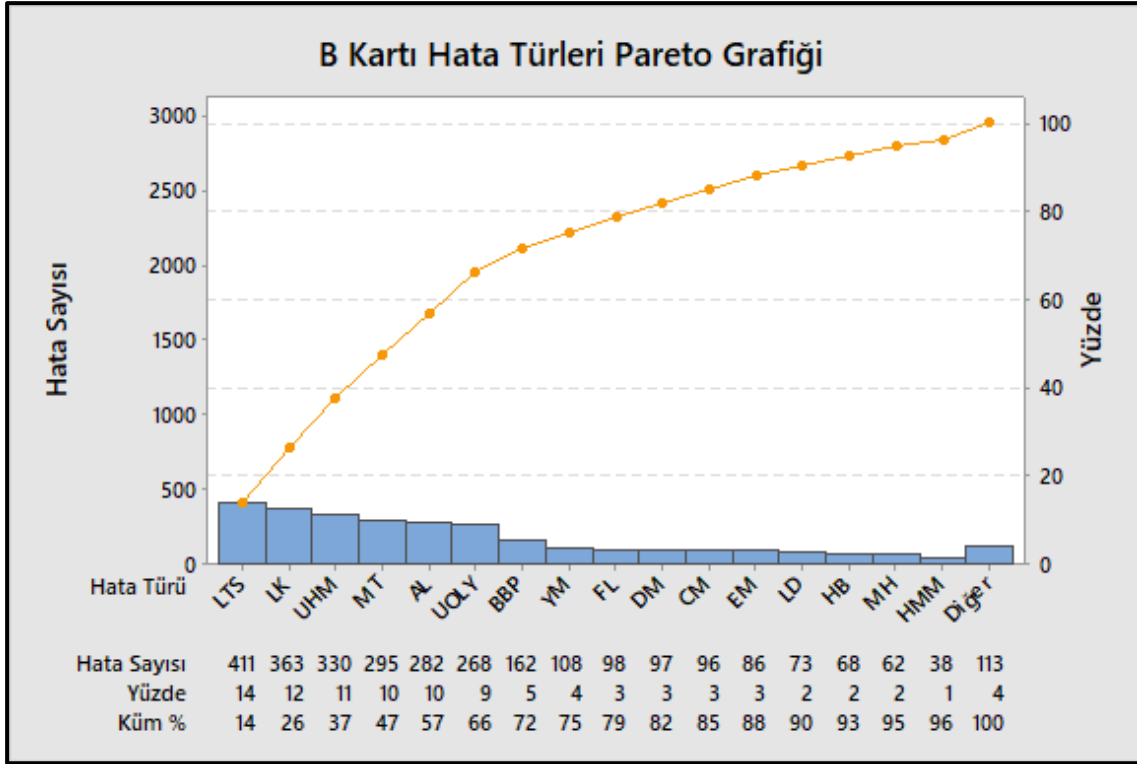
A tipi kart için en sık gözlemlenen hata “uygun hizalanamamış malzeme” hatasıdır. Bu hata sık olmasına karşın, göreceli olarak daha seyrek oluşan “head and pillow” hatasıyla birlikte görülmektedir (Çizelge 4.11).

Analiz detaylandırıldığında, bu hatanın belirli bir tasarım revizyonu ve kafiye yoğunlaştığı görülebilmektedir. “Uygun hizalanmamış malzeme” hatasının “head and pillow” hatasına neden olabileceği ile ilgili çalışmalar mevcuttur [51].

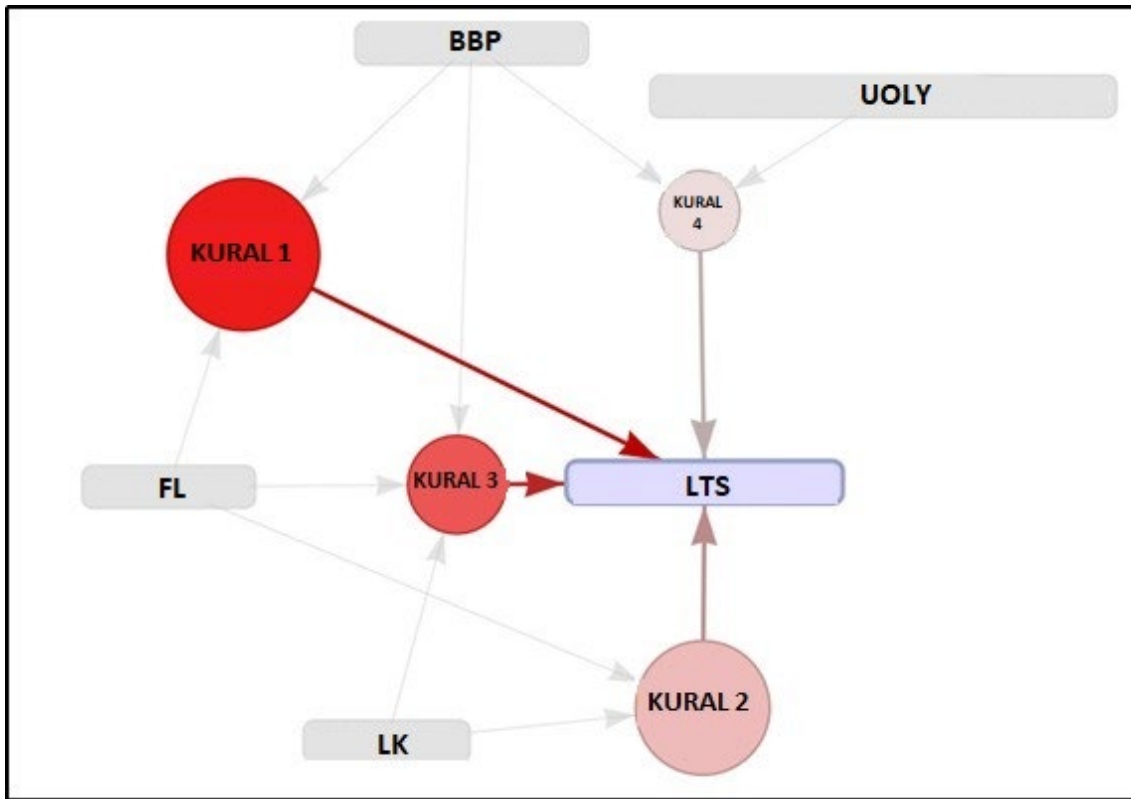
Çizelge 4.11 A Kartı Kural Listesi (Destek = %1, Güven =%65)

Kurallar	Öncül	Ardıl	Destek	Güven	Kaldıraç	Sayaç
[1]	Head and Pillow	Uygun hizalanmamış malzeme	0,0131	0,769	2,314	10

B kartı hata sıklıklarına göre analiz edildiğinde, “lehim topları veya sıçraması” hatası en sık gözlenen hatadır (Şekil 4.6). Bu hata, destek değeri büyükten küçüğe olacak şekilde sırasıyla; “fazla lehim, bacak büküm problemi”, “fazla lehim, lehim köprüsü”, “bacak büküm problemi, uygun olmayan lehim yapışması/ yayılması” ve “fazla lehim, bacak büküm problemi, lehim köprüsü” ile birlikte oluşmaktadır (Çizelge 4.12). Şekil 4.7’de de görüleceği gibi Kural 3, Kural 1 ve Kural 2’yi kapsamaktadır. Kural 3 ve Kural 4’ün analiz edilmesi bu kart tipi için yeterli olacaktır. Üretim sırasında uygulanan fazla lehimin, “lehim köprüsü” ve “lehim topları veya sıçramasına” sebep olduğu bilgisi mevcut olmakla beraber bu çalışma ile de tekrar doğrulanmıştır.



Şekil 4.6 B Kartı Hata Türleri Pareto Grafiği



Şekil 4.7 B Kartı Lehim Topları veya Sıçraması Hatası Birliktelik Kuralları Balon Grafiği

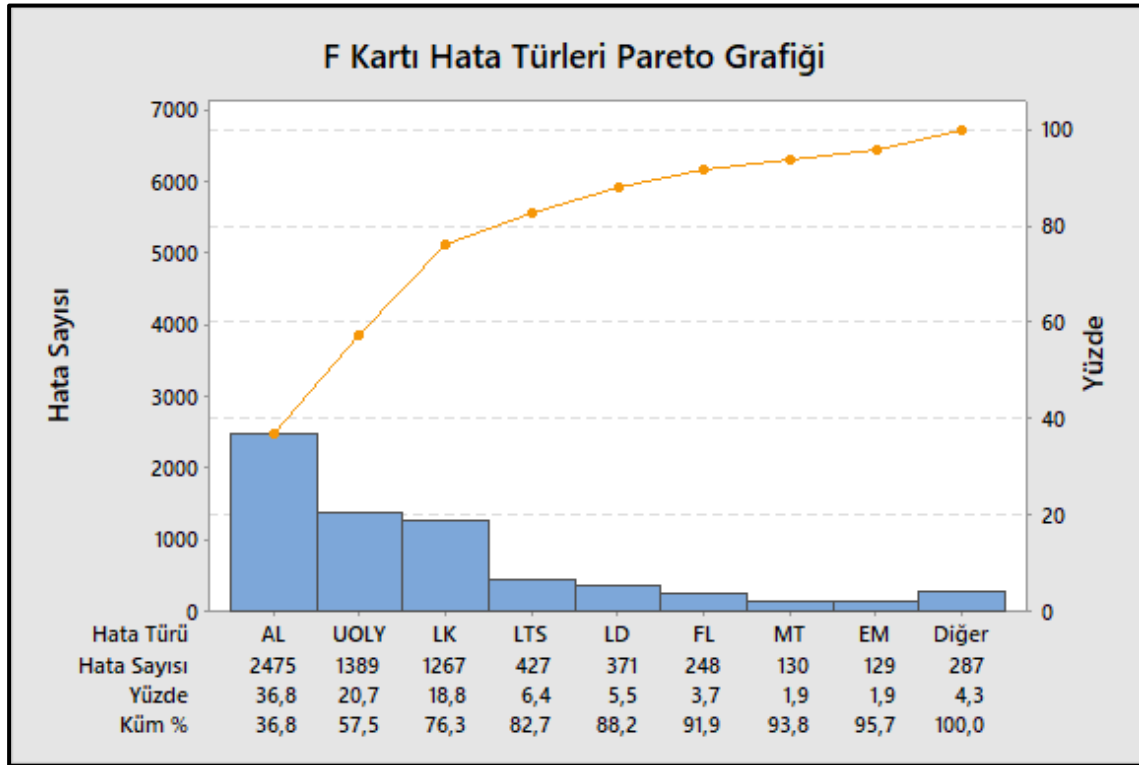
Çizelge 4.12 B Kartı Kural Listesi (Destek = %1, Güven = %75)

Kurallar	Öncül	Ardıl	Destek	Güven	Kaldıraç	Sayaç
[1]	Fazla Lehim, Bacak büküm problemi	Lehim Topları veya Sıçraması	0,020	0,800	3,627	16
[2]	Fazla Lehim, Bacak büküm problemi	Lehim köprüsü	0,016	0,650	2,482	13
[3]	Fazla Lehim, Lehim Köprüsü	Bacak büküm problemi	0,016	0,650	2,482	13
[4]	Fazla Lehim, Lehim Köprüsü	Lehim Topları veya Sıçraması	0,018	0,700	3,174	14
[5]	Bacak büküm problemi, Uygun olmayan lehim yapışması (yayılması)	Lehim Topları veya Sıçraması	0,010	0,667	3,023	8
[6]	Fazla Lehim, Bacak büküm problemi, Lehim köprüsü	Lehim Topları veya Sıçraması	0,013	0,769	3,488	10
[7]	Fazla Lehim, Lehim topları veya Sıçraması, Lehim köprüsü	Bacak büküm problemi	0,013	0,769	3,488	10
[8]	Bacak büküm problemi, Lehim topları veya sıçraması, Lehim köprüsü	Fazla Lehim	0,013	0,769	3,488	10

F tipi kart en çok hareket gözlemlenen ikinci karttır (Şekil 4.8). Bununla beraber, yüksek destek değerli kural üreten tek kart tipidir.

Yüzde on destek değeri yüzde altmış beş güven değeri ile “fazla lehim” hatası ile “lehim köprüsü” hatalarının bir arada görüldüğü kural üretilmiştir. Lehim köprüsü, lehimin fazla sürülmesi ile ortaya çıkan bir hatadır. Bu noktada, bu çalışma ile beraber “fazla lehim” hatasının nedenlerine odaklanarak, lehim köprüsü hatalarının da elimine edilmesi hedeflenecektir. Çoğunlukla yanlış çelik elek kalınlığı ve sürülen lehim hacminin yanlış olması sebebiyle bu hatalar oluşmaktadır.

Ancak Pareto grafiği referans alınacak olursa hata analizlerinde öncelik olarak “fazla lehim” hatasının yerine “az lehim” hatasının seçilmesi kaçınılmazdır (Şekil 4.8).



Şekil 4.8 F Kartı Hata Türleri Pareto Grafiği

Çizelge 4.13 F Kartı Kural Listesi (Destek = %10, Güven = %65)

Kurallar	Öncül	Ardıl	Destek	Güven	Kaldıraç	Sayaç
[1]	Fazla Lehim	Lehim Köprüsü	0,151	0,667	1,468	66

Çalışma sırasında mevcut verinin yıl ve kart temelinde yapılan analizlerinin sonuçları detaylı bir şekilde Ek-1’de verilmiştir. Bir sonraki bölümde, ilişkilerdeki olay sıralamalarının anlaşılması ve yorumlanabilmesi için sıralı örüntü madenciliği algoritmaları aynı veri seti ile çalışılmıştır.

4.2.Meta Kurallar

2012 senesinde oluşan kural sayısı göz önüne alındığında düşük destek ve güven değerlerinde yüksek sayıda kural oluşmuştur. Bu kuralları anlamlandırabilmek için meta kural metodu uygulanmıştır.

En çok görünen hata olan “az lehim” hatasının ardıl olduğu tüm kurallar listelenmiştir. Ardından çıkan kurallara göre Q kümesi oluşturulmuş ve güven değeri %90 olarak verilmiştir. İlk aşamada 387 adet meta kural oluşmuştur. Daha sonra gereksiz olanlar elenmiş ve Çizelge 4.14 elde edilmiştir:

Çizelge 4.14 2012 Yılı Meta kuralları

Meta Kural Numarası	Meta Kurallar	Destek	Güven
1	{r8} → {r5}	0,063	1
2	{r10} → {r1}	0,063	1
3	{r10} → {r4}	0,063	1
4	{r9} → {r6}	0,083	1
5	{r9} → {r1}	0,083	1
6	{r9} → {r4}	0,083	1
7	{r3,r5} → {r6}	0,021	1
8	{r3,r6} → {r5}	0,021	1
9	{r10,r5} → {r8}	0,021	1
10	{r10,r8} → {r9}	0,021	1
11	{r8,r9} → {r10}	0,021	1
12	{r10,r8} → {r6}	0,021	1
13	{r6,r8} → {r10}	0,021	1
14	{r1,r8} → {r10}	0,021	1
15	{r2,r5} → {r8}	0,021	1
16	{r2,r8} → {r4}	0,021	1
17	{r5,r9} → {r8}	0,021	1
18	{r4,r5} → {r8}	0,042	1
19	{r6,r8} → {r9}	0,021	1
20	{r1,r8} → {r9}	0,021	1
21	{r6,r8} → {r1}	0,021	1
22	{r1,r8} → {r6}	0,021	1
23	{r6,r8} → {r4}	0,021	1
24	{r1,r8} → {r4}	0,021	1
25	{r10,r2} → {r9}	0,021	1
26	{r2,r9} → {r10}	0,021	1
27	{r10,r2} → {r6}	0,021	1
28	{r2,r6} → {r10}	0,021	1
29	{r1,r2} → {r10}	0,021	1
30	{r10,r5} → {r9}	0,021	1
31	{r5,r9} → {r10}	0,021	1
32	{r10,r5} → {r6}	0,021	1
33	{r10,r6} → {r9}	0,042	1
34	{r2,r5} → {r4}	0,021	1
35	{r2,r6} → {r9}	0,021	1
36	{r1,r2} → {r9}	0,021	1
37	{r2,r6} → {r1}	0,021	1
38	{r1,r2} → {r6}	0,021	1
39	{r2,r6} → {r4}	0,021	1
40	{r1,r2} → {r4}	0,021	1
41	{r1,r6} → {r9}	0,083	1
42	{r4,r6} → {r9}	0,083	1
43	{r1,r6} → {r4}	0,083	1

Çizelge 4.14 Devamı

44	{r4,r6} → {r1}	0,083	1
45	{r1,r5,r6} → {r8}	0,021	1
46	{r1,r5,r6} → {r10}	0,021	1
47	{r4,r5,r6} → {r10}	0,021	1
48	{r1,r4,r5} → {r10}	0,021	1
49	{r1,r4,r5} → {r9}	0,021	1
50	{r1,r4,r5} → {r6}	0,021	1

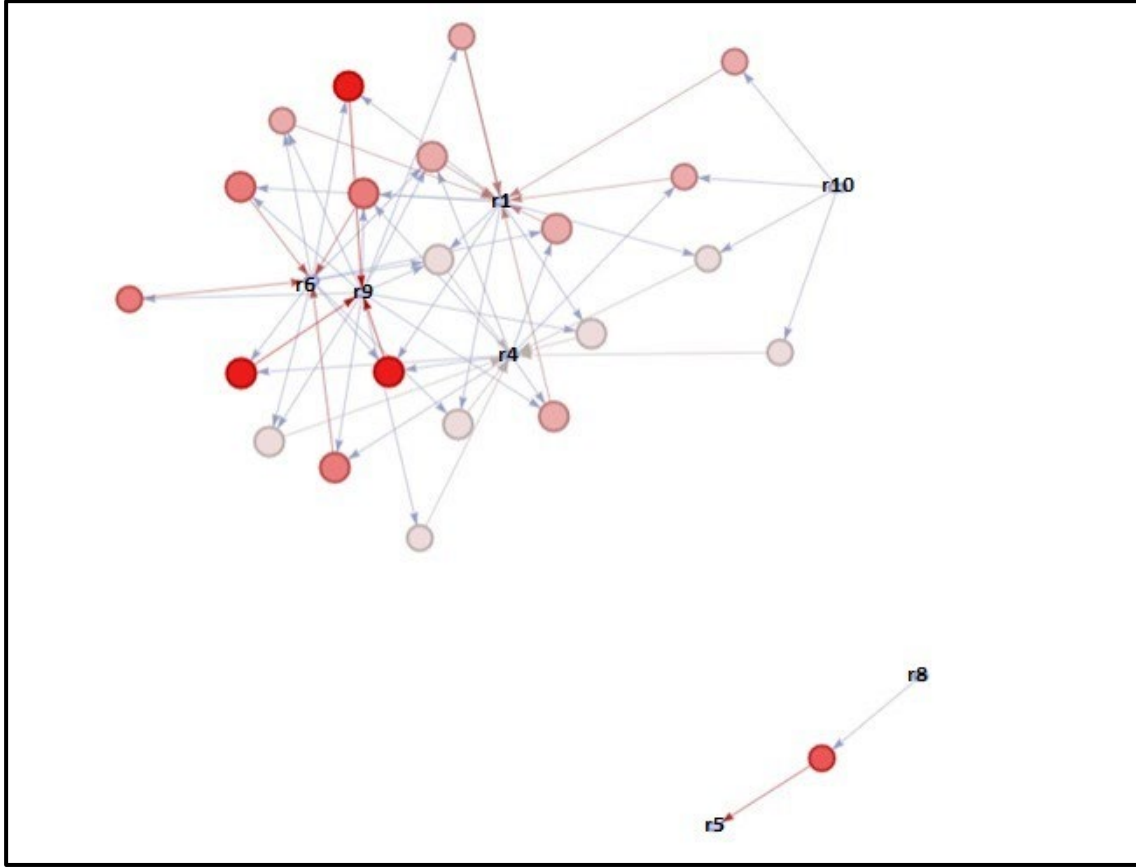
Çizelge 4.15 Kuralların Açıklaması

Kural Numarası	Kural
r1	{MH} → {AL}
r2	{HB, UHM} → {AL}
r3	{MK} → {AL}
r4	{OL} → {AL}
r5	{FL} → {AL}
r6	{CM} → {AL}
r7	{YM} → {AL}
r8	{FL, HB} → {AL}
r9	{CM, MH} → {AL}
r10	{HB, MH} → {AL}

Destek değeri yüksek ilk altı kuralın ilişkisi tekrar ele alınmıştır. Kural 6, 9 ve 10'nun Kural 1 ile ilişkili olduğu sonucuna varılmıştır. “Çalışmayan malzeme”, “malzemede hasar”, “havada bacak” hataları “az lehim” hatası ile birlikte oluşmaktadır. Bu çıkan sonuç ile kök sebep analizlerinde öncelikli olarak bu üç hatanın ele alınması sağlanmalıdır.

Oluşturulan meta kurallar incelendiğinde, meta kural 1 diğer gruplardan bağımsız olarak bulunmaktadır (Şekil 4.9). “Fazla lehim” ve “fazla lehim, havada bacak” hataları “az lehim” hatası ile birlikte oluşmaktadır. Bu noktada, üretim personeli ile lehim miktarlarının ayarlanması ile ilgili çalışmalara başlanması yönünde karar almıştır. Her ne kadar “fazla lehim” hatası pareto analizinde dikkate alınmayacak bir hata olsa dahi, bu analiz sonucunda kök sebep çözümünde kullanılması değerlendirilmiştir.

Diğer kural seti incelendiğinde ise, kuralların r1, r4, r6, r9 ve r10 kuralları çevresinde toplandığı görülmektedir.



Şekil 4.9 Meta Kuralların Gösterimi

2012 senesinde birliktelik analizleri daha yüksek destek değerleri ile yapılan çalışmada yine “az lehim” hatası ile “malzemede hasar” ve “havada bacak” hataları ile birlikte oluşma durumu tespit edilmiştir. Ancak “fazla lehim” hatası ile olan ilişkisi değerlendirilmemiştir.

4.3.Sıralı Örüntü Madenciliği

Bu bölümde, birliktelik kurallarından farklı olarak, olay sıralamalarının dikkate alındığı bir yaklaşım olan sıralı örüntü madenciliği algoritmalarından faydalanılmıştır. SPADE algoritmasının SPMF yazılım aracıyla gerçek veriye uygulanmasıyla elde edilen sonuçlar tartışılacaktır.

4.3.1 Veri Ön İşleme

Bu çalışmada kullanılan veri setinin ham formatı ve birleştirilmiş veri formatı birliktelik kuralları bölümünde de kullanılan veri formatlarıyla aynıdır (bkz. Çizelge 4.1, Çizelge 4.2). Çizelge 4.16'de de görüldüğü üzere verilerin SMPF yazılımında daha kolay yönetilebilmesi için hatalar sayı olarak kodlanmıştır. 2012 – 2017 yılları arasında 36 farklı türde hata tespit edildiği görülmüştür.

Sıralı veri madenciliği kapsamında yapılan analizler iki bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, hatanın meydana geldiği yıl içerisindeki ilişkiler incelenmiş, ikinci bölümde ise, veri setine her iterasyonda bir yıllık veri daha eklenerek incelemeler gerçekleştirilmiştir. Analiz için kullanılan minimum destek değeri %50 ve minimum güven değeri de %60 olarak seçilmiştir.

Çizelge 4.16 Hata Türleri ve Numaraları

Hata Türü	Numara
Lehim Köprüsü	1
Az lehim	2
Uygun hizalanmamış malzeme	3
Eksik malzeme	4
Uygun olmayan lehim yapışması (yayılmaması)	5
Çalışmayan malzeme	6
Dönmüş malzeme (yan)	7
Malzemede hasar	8
Havada bacak	9
Fazla lehim	10
Head and pillow	11
Hazır olmayan malzeme (kirli, oksitlenmiş vs.)	12
Mezar taşı (dik)	13
Malzeme kaplama ya da benzer hatalar	14
Kablo izolasyonu ya da iletken hasarı	15
Soğuk lehim	16
Lehimde delik (gaz kaçağı)	17
Lehim topları veya sıçraması	18
Yabancı madde	19
Lehimsiz bağlantı	20
Bacak büküm problemi	21
Lehmlenebilirlik problemi (lehim almama)	22
Oynanmış lehim (lehimde stres çizgileri ve/veya dalgalanma)	23
Hatalı malzeme montajı (polarizasyon)	24
Hatalı malzeme	25
Üretim	26
Uygun olmayan montaj	27
Küçük / Büyük Lehim Top	28
Lehimde hava boşluğu	29
Yanlış malzeme yüksekliği	30
Tedarikçi	31
Yanlış markalama	32
Fazla malzeme	33
Elektronik kartta hasar	34
Hatalı kablo teli bağlantısı	35
Lehimde çatlak	36

4.3.2 Yıl Bazlı Analiz

2012 yılında hareket sayısının az olması ve belirlenen minimum destek değerini karşılayan hareketler olmaması sebebiyle herhangi bir kural oluşturulamamıştır.

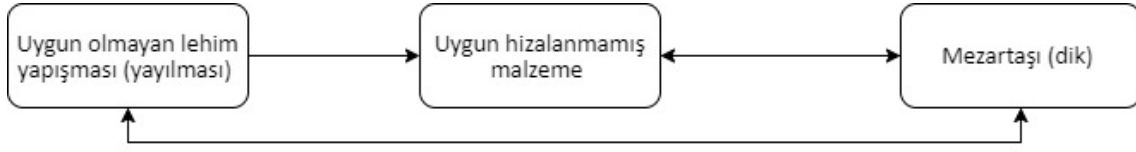
Yedi yıl boyunca toplamda 36 değişik türde hata olmasına karşın, 2013 yılında üretilen 7 farklı tipte kartta sadece 13 farklı tür hata kaydedilmiş ve 5 adet kural çıkarılmıştır (Çizelge 4.17).

Çizelge 4.17 2013 Yılı Kural Listesi

Kural Numarası	Kural Açıklaması	Destek	Güven
[1]	Uygun olmayan lehim yapışması (yayılması) → Uygun hizalanmamış malzeme	42	0.769
[2]	Uygun hizalanmamış malzeme → Mezar Taşı	44	0.833
[3]	Mezar Taşı → Uygun hizalanmamış malzeme	44	0.82
[4]	Uygun olmayan lehim yapışması (yayılması) → Mezar Taşı	49	0.815
[5]	Mezar Taşı → Uygun olmayan lehim yapışması (yayılması)	46	0.869

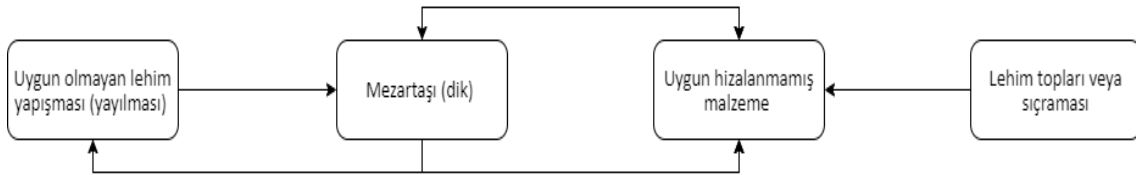
2013 yılı için Şekil 4.10’da gösterilen ve Kural 1’de açığa çıkan “uygun olmayan lehim yapışması (yayılması)” hatasını “uygun hizalanmamış malzeme” hatası takip etmektedir. Bu bilgi, ilk hatanın önlenmesiyle ikinci hatanın oluşumu da önlenebilir mi sorusunun araştırılmasını teşvik eder. İkinci hatanın oluşmasını engellemek için, önleyici faaliyetler ilk hataya yoğunlaşırken potansiyel olarak oluşabilecek olan ikinci hata ile ilgili parametrelerde değerlendirilmelidir.

2013 yılının Pareto grafiği (Şekil 4.2) incelendiğinde, “uygun hizalanmamış malzeme” hatası ilk 3 hata içerisinde yer almamaktadır, bu sebeple büyük bir ihtimalle kök sebep analizinde değerlendirmeye alınmayacaktır. Önleyici faaliyet olarak, “uygun hizalanmamış malzeme” hatasına sebep olabilecek parametrelerinde değerlendirilmesi önerilmiştir. Diğer kurallar incelendiğinde, hataların gerçekleşme sıraları ile ilgili anlamlı bilgiye erişilememektedir.



Şekil 4.10 2013 Yılı Sıralı Örüntü Madenciliği İle Oluşan Hataların İlişkileri Görseli

2014 yılında, 22 farklı hata türü kayıt altına alınmıştır. Sıralı örüntü madenciliği algoritmaları ile 7 adet kural üretilmiştir (Çizelge 4.18). Şekil 4.11’den da görüldüğü üzere, “lehim topları veya sıçraması” hatasından sonra “uygun hizalanmamış malzeme” hatası görülmektedir. Bu durum uzman personele aktarıldığında karta yapılan dizgi sırasında komponentlerin veya serigrafî sırasında kartın doğru hizalanamaması sonucunda “lehim topları veya sıçraması” hatasının oluşabileceği bilgisi edinilmiştir. Önceliğin serigrafî makinesinin bulunduğu istasyon yerine dizgi makinesinin bulunduğu istasyona verilmesi kök sebep ve düzeltici faaliyet adımlarında farklılaşarak daha hızlı iyileşmeyi sağlayacaktır.



Şekil 4.11 2014 Yılı Sıralı Örüntü Madenciliği İle Oluşan Hataların İlişkileri Görseli

Çizelge 4.18 2014 Yılı Kural Listesi

Kural Numarası	Kural Açıklaması	Destek	Güven
[1]	Uygun hizalanmamış malzeme → Uygun olmayan lehim yapışması (yayılması)	21	0,827
[2]	Uygun olmayan lehim yapışması (yayılması) → Uygun hizalanmamış malzeme	22	0,857
[3]	Mezar Taşı → Uygun hizalanmamış malzeme	22	0,821
[4]	Uygun hizalanmamış malzeme → Mezar Taşı	20	0,793
[5]	Lehim topları veya sıçraması → Uygun hizalanmamış malzeme	19	0,792
[6]	Uygun olmayan lehim yapışması (yayılması) → Mezar Taşı	21	0,821
[7]	Uygun olmayan lehim yapışması (yayılması), Mezar Taşı → Uygun hizalanmamış malzeme	20	0,913

2017 yılı verilerini incelediğimizde 26 farklı türde hatanın kayıt altına alındığı görülmüştür. Bu sene için belirlenen destek değerinde kural üretilememiştir. Bu sebeple destek değeri %30, güven değeri ise %60 alınarak analizler yapılmıştır (Çizelge 4.19).

Çizelge 4.19 2017 Yılı Kural Listesi

Kural Numarası	Kural Açıklaması	Destek	Güven
[1]	Lehim Köprüsü → Uygun hizalanmamış malzeme	34	0,725
[2]	Eksik Malzeme → Uygun hizalanmamış malzeme	28	0,783
[3]	Dönmüş malzeme (yan) → Uygun hizalanmamış malzeme	27	0,778

Kurallar incelediğinde, “uygun hizalanmamış malzeme” öncesinde oluşan 3 adet hata türü görülmüştür. Bu hatanın kök sebeplerine yönelmeden önce eksik malzeme gibi aslında tedarik ile ilgili ya da malzeme boyutları sebebi ile el ile dizilen malzemelerin sebep olabileceği hatalar incelenerek saklı kök sebeplerin ortadan kaldırılmasına çalışılabilir. Bir diğer yaklaşım olarak, muayene noktalarının yerlerini değiştirerek hataların daha öncesinde engellenmesi ile ilgili tedbirler alınabilir.

4.3.3 Kümülatif Veri Analizi

Çalışmanın bu bölümünde, birer yıllık periyotlar kümülatif olarak eklenerek sıralı örüntü madenciliği kurallarının yıllar içinde değişiminin gözlemlenmesi hedeflenmiştir. Destek ve güven ölçütlerinin minimum değerleri sırasıyla %50 ve %60 olarak seçilmiştir.

2012 ve 2013 yılları kümülatif veri seti oluşturulduğunda Çizelge 4.20'deki kural listesi elde edilmiştir.

Çizelge 4.20 2012 ve 2013 yıllarının Kümülatif Kural Listesi

Kural Numarası	Kural Açıklaması	Destek	Güven
[1]	Uygun olmayan lehim yapışması (yayılması) → Uygun hizalanmamış malzeme	48	0,789
[2]	Mezar Taşı → Uygun hizalanmamış malzeme	47	0,828
[3]	Uygun hizalanmamış malzeme → Mezar Taşı	46	0,779
[4]	Mezar Taşı → Uygun olmayan lehim yapışması (yayılması)	49	0,875
[5]	Uygun olmayan lehim yapışması (yayılması) → Mezar Taşı	51	0,789

2012 ve 2013 yılları verilerine 2014 yılı verisi eklendiğinde ise

Çizelge 4.21 'deki kurallar elde edilmektedir. Bu kurallar incelendiğinde, kümülatif veri setinden üretilen kuralların, 2012, 2013 ve 2014 yılları içinde ayrı ayrı üretildiği görülmüştür. Üretilen kurallar hataların oluşum sırası ile ilgili anlamlı bir bilgi üretmemektedir. 2015 verisi mevcut veri setine eklendiğinde ise birinci kuralın elendiği görülmüştür (Çizelge 4.22). Böylelikle, “uygun hizalanmamış malzeme” hatasının “mezar taşı” hatasından sonra oluştuğu bilgisine erişilmiştir.

Diğer yıllar sırasıyla veri setine eklendiğinde de Çizelge 4.22'de listelenmiş kurallarda bir değişiklik olmadığı tespit edilmiştir. Genel kümülatif verilere baktığımızda “mezar taşı” hatasından sonra “uygun hizalanmamış malzeme” hatası görüldüğü bilgisi mevcuttur. Bu hatalar ile ilgili bir ilişki bulunamamasına karşın hataların oluşma durumundaki süreç parametrelerinin incelenmesi önerilmektedir.

Bu bölümde hataların gerçekleşme sıralamaları incelenmiş ve özellikle hata analizlerinde nereye odaklanılacağı ile ilgili anlamlı bilgiler üretilmiştir.

Çizelge 4.21 2012, 2013 ve 2014 yıllarının Kümülatif Kural Listesi

Kural Numarası	Kural Açıklaması	Destek	Güven
[1]	Uygun olmayan lehim yapışması (yayılması) → Uygun hizalanmamış malzeme	70	0,808
[2]	Uygun hizalanmamış malzeme → Uygun olmayan lehim yapışması (yayılması)	66	0,825
[3]	Mezar Taşı → Uygun hizalanmamış malzeme	69	0,826
[4]	Uygun hizalanmamış malzeme → Mezar Taşı	66	0,783
[5]	Mezar Taşı → Uygun olmayan lehim yapışması (yayılması)	67	0,859
[6]	Uygun olmayan lehim yapışması (yayılması) → Mezar Taşı	72	0,798

Çizelge 4.22 2012, 2013, 2014 ve 2015 yıllarının Kümülatif Kural Listesi

Kural Numarası	Kural Açıklaması	Destek	Güven
[1]	Mezar Taşı → Uygun olmayan lehim yapışması (yayılması)	53	0,814
[2]	Mezar Taşı → Uygun hizalanmamış malzeme	47	0,779
[3]	Uygun olmayan lehim yapışması (yayılması) → Mezar Taşı	47	0,838

4.4. Süreç Performansının Ölçümü

Kök sebep analitiği yaklaşımının verimliliğini ve etkililiğini ölçmek için doğrudan süreç performans parametreleri değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, 2017 ile 2018 ve 2019 yılları süreç performansları ölçülmüş ve kıyaslanmıştır.

2017 yılında toplam 1494 adet kart üretilmiş ve toplamda 3250 adet farklı hata kayıt altına alınmıştır. DPMO indeksi 258.6 ve kart başına hata 2.17 olarak hesaplanmıştır.

2018 yılına gelindiğinde, kök sebep yaklaşım farklılıkları ile toplamda 4561 adet hata kayıt altına alınırken, toplam üretilen kart adedi 2281'e yükselmiştir. DPMO indeksi 248.9 ve kart başına hata 1.99 olarak hesaplanmıştır. 2019 senesinin ilk yarı dönemine

bakıldığında ise, 544 adet kart üretiminde toplam 638 adet hata kayıt altına alınarak, DPMO indeksi 121.8'e düşürülmüş ve kart başına hata ise 1.17 seviyesine gerilemiştir.

Bu parametreler göz önüne alındığında, özellikle 2019 senesinde uygulamanın hayata geçirilmesi ile birlikte hem DPMO indeksi değerlerinde hem de kart başına hata adetlerinde anlamlı bir düşüş olduğu gözlemlenmiş ve bu yaklaşımın verimliliği ve etkinliği doğrulanmıştır.

4.5. Metodolojinin Uygulanabilirliği

Bu bölümde, Metodoloji bölümünde anlatılan aşamalar farklı bir firmada uygulanarak metodun standartlaştırılması ve uygulanabilirliğinin doğrulanması sağlanacaktır.

İlk firmada, hatalar IPC standardına göre tutulmaktaydı ancak ikinci firmanın mevcut durumu analiz edildiğinde, operatör ve mühendislerin IPC eğitimleri olmasına karşın hataların IPC hata türlerine göre kayıt altına alınmadığı gözlemlenmiştir. Bununla beraber, yine serigrafi makinesi, dizgi makinesi ve fırından oluşan tipik bir PCB montaj hattı mevcuttur.

Hat incelendiğinde farklı olarak, serigrafi makinesine lehim verilmeden önce karıştırılması gerektiği gözlemlenmiştir. Bu işlem, krem lehim karıştırma makinesi ile yapılmaktadır. Bu durum, hata verilerinin toplanmasında ve analizinde farklılık yaratmamaktadır. Hatalar, kalite operatörü tarafından Çizelge 4.23'deki şekilde tutulmaktadır.

Çizelge 4.23 Örnek Hata Verisi

Sıra No	Seri No	Açıklama	Kalite Not1	Çözüm	Kalite Not 2	Onay	İş Emri
01	0001	Kart yüzeyinde kirlilik mevcut	İslah Edilmesi	İslah	Uygun	Uygun	<u>Proje Adı:</u> AA <u>Kart Stok No:</u> 111 <u>İş Emri</u> <u>Adedi:</u> 2 <u>Denetim Adedi:</u> 2 <u>Doküman Revizyonu:</u> AA <u>Kafile No:</u> 111 <u>Seri No:</u> 0001

Çizelge 4.23’de açıklamalar sütununda hatanın tanımlaması IPC standardı referans alınarak operatörlerin kendi kelimeleri ile ifade edilmektedir. Bu noktada, hata türlerinin standartlaştırılması gerekmektedir. Kalite not 1 sütünü, hatanın nasıl ele alınacağını tanımlamaktadır. Hatanın şiddeti ve tekrarlanabilirliği değerlendirilerek ele alma yönetimi belirlenmektedir. Çözüm ise, alınan kararı ifade etmektedir. Yeniden işleme, olduğu gibi kullanma veya hurda kararı bu aşamada alınmaktadır. Kalite güvence departmanı, kararı değerlendirerek Kalite Not 2 alanını doldurur. İşlem onaylanır ve kapatılır. İş emri alanında, Proje Adı, Kart Stok No, İş Emri Adedi, Denetim Adedi, Doküman Revizyonu, Kafile No ve Seri No bilgileri bulunur.

Bir önceki çalışmada eşsiz numaralandırma için kafile bilgisi kullanılmıştı. Burada da eşsiz numaralandırma için iş emri numarası kullanılacaktır.

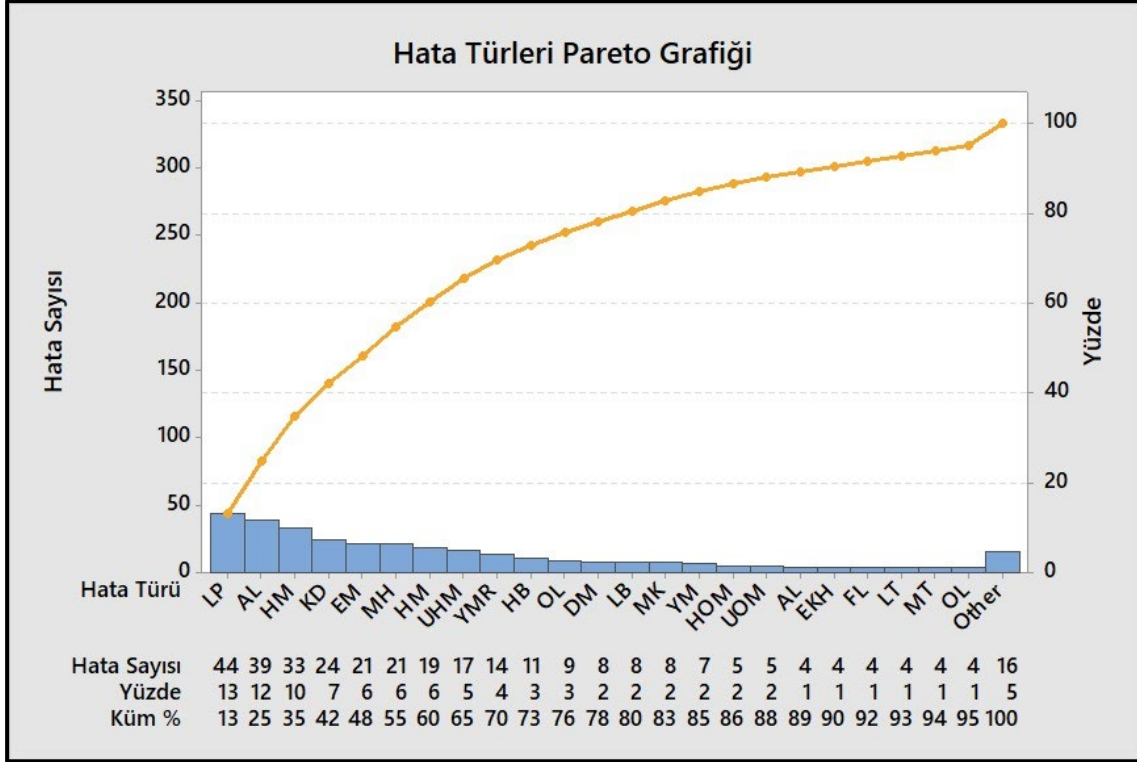
Veri setinin hazırlanması kısmında, mevcut veri Çizelge 4.24’te gösterildiği şekilde tekrar oluşturulmuştur:

Çizelge 4.24 Düzenlenen örnek hata verisi

Sıra No	Seri No	Hata Tanımı	IPC Hata Türü	İş Emri	Proje	Lokasyon
01	001	Kart yüzeyinde kirlilik mevcut	Yabancı Malzeme	1111	AA	Dizgi

Böylelikle veri standart hale getirilmiş ve analize hazır duruma gelmiştir. İlk aşamada, veri temizliği yapılmıştır, eksik veriler tamamlanmış ve yanlış veriler çıkarılmıştır. Hataların doğru girilmesi ile ilgili olarak, operatörlere eğitim verilmiş ve operatör ölçüm sistemi analizi çalışmaları başlatılmıştır.

Toplamda 13 iş emri verisi incelenmiştir. Öncelikle hata türleri sıklıklarının anlaşılması için pareto grafiği çizdirilmiştir (Şekil 4.12). En sık gözlemlenen hata “lehimlenebilirlik problemi” olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.12 Hata Türleri Pareto Grafiği

Birliktelik kurallarının ortaya çıkarılması için veri, iş emrine karşılık gelen hata türleri olacak şekilde tekrar düzenlenmiş ve Apriori algoritması R programı kullanılarak uygulanmış ve sonuçlar analiz edilmiştir. Belirlenen farklı destek ve güven değerleri ile analizler yapılmış ve hem nadir hem sık hatalar için birliktelik kuralları üretilmiştir (Çizelge 4.25).

Çizelge 4.25 İş Emri Bazlı Birliktelik Kuralları Analizi

Destek (%)	10				5				1				Hareket Sayısı
	65	75	85	95	65	75	85	95	65	75	85	95	
Üretilen Kural Sayısı	0	0	0	0	13	11	6	6	877	867	862	862	54

İlk analizde Çizelge 4.26'deki sonuçlar elde edilmiş ve üretim personeli ile paylaşılmıştır.

Çizelge 4.26 İş Emri Bazlı Birliktelik Kuralları (Destek = %5, Güven=%65)

Kurallar	Öncül	Ardıl	Destek	Güven	Kaldıraç	Sayaç
[1]	{LT}	{LP}	0,056	0,750	2,025	3
[2]	{HOM}	{YMR}	0,056	1,000	1,080	3
[3]	{HOM}	{HM}	0,056	1,000	4,154	3
[4]	{YMR}	{EM}	0,074	0,800	5,400	4
[5]	{YMR}	{HM}	0,093	1,000	4,154	5
[6]	{HOM, YMR}	{HM}	0,056	1,000	4,154	3
[7]	{HM, HOM}	{YMR}	0,056	1,000	1,080	3
[8]	{EM, YMR}	{HM}	0,074	1,000	4,154	4
[9]	{HM, YMR}	{EM}	0,074	0,800	5,400	4
[10]	{EM, HM}	{YMR}	0,074	0,800	8,640	4
[11]	{KD, UHM}	{LP}	0,093	0,833	2,250	5
[12]	{LP, UHM}	{KD}	0,093	0,714	2,755	5
[13]	{KD, LP}	{UHM}	0,093	0,714	3,506	5

Bu analizden gereksiz kurallar elendiğinde, aşağıdaki 9 adet kural kalmaktadır (Çizelge 4.27).

Çizelge 4.27 İş Emri Bazlı Birliktelik Kuralları (Destek = %5, Güven=%65)

Kurallar	Öncül	Ardıl	Destek	Güven	Kaldıraç	Sayaç
[1]	{LT}	{LP}	0,056	0,750	2,025	3
[2]	{HOM}	{YMR}	0,056	1,000	1,080	3
[3]	{HOM}	{HM}	0,056	1,000	4,154	3
[4]	{YMR}	{EM}	0,074	0,800	5,400	4
[5]	{YMR}	{HM}	0,093	1,000	4,154	5
[6]	{EM, HM}	{YMR}	0,074	0,800	8,640	4
[7]	{KI, UHM}	{LP}	0,093	0,833	2,250	5
[8]	{LP, UHM}	{KI}	0,093	0,714	2,755	5
[9]	{KI, LP}	{UHM}	0,093	0,714	3,506	5

Yukarıdaki kurallar incelendiğinde, kurallar iki gruba ayrılmaktadır. İlk grupta, “lehim topu”, “lehimlenebilirlik problemi” hataları birlikte oluşurken, “lehimlenebilirlik problemi”, “uygun hizalanamamış malzeme” ve “iletken hasarı” hataları da birlikte oluşmaktadır. Uygun hizalanamamış malzeme” hatasının “lehimlenebilirlik problemi” hatasına yol açabileceği bilgisi üretim personeli tarafından doğrulanmış ve kök sebep analizi yapılırken dikkate alınması sağlanmıştır.

Diğer grupta ise, “hazır olmayan malzeme” hatası, “hatalı malzeme” ve “yanlış markalama” hatalarıyla birlikte oluşurken, “yanlış markalama” hatası ve “hatalı malzeme” hatası, “eksik malzeme” hatası ile birlikte oluşmaktadır. Bu noktada uzman görüşünden faydalanılmıştır. “Hazır olmayan malzeme” hatasının “yanlış markalama” hatasına sebep olabileceği belirtilmiştir. Bu noktada “markalama” ile ilgili kök sebep çalışmalarından önce “hazır olmayan malzeme” hatasının önlenmesine çalışılmasına karar verilmiştir.

İlk uygulamada, “uygun olmayan lehim yapışması (yayılması)” ile “uygun hizalanmamış malzeme” birlikteliklerinden bahsedilirken ikinci veri setinde ise “uygun hizalanmamış malzeme” hatası daha çok “lehimlenebilirlik problemleri” ile bir arada görülmektedir. Bu kapsamda ikinci veri setinin daha detaylı analizi ile “uygun olmayan lehim yapışması (yayılması)” hataları da incelenmesine karar verilmiştir. Benzer hatlarda benzer hataların oluşabileceği ve hatlardaki hata ilişkilerinin başka hatlara önleyici faaliyet kapsamında uygulanabilirliği doğrulanmıştır.

İlk veri seti uygulamasında, 2017 senesi analizleri incelendiğinde ise, “eksik malzeme” hatasının “uygun hizalanmamış malzeme” ile birlikte olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ancak uygulanabilirliğin doğrulanması kapsamındaki ikinci uygulamada, “eksik malzeme” hatasının “hatalı malzeme” ile bir ilişkisi olduğu ortaya konmuştur.

Sıralı örüntü madenciliği için verinin zamana göre sıralanması gerekmektedir. Ancak ikinci çalışmada veri sayısı az olduğu ve sıralama mevcut olmadığı için analiz gerçekleştirilememiştir. Ancak sonraki analizlerde sıralı örüntü madenciliğinin uygulanabilmesi için veriye zaman damgası sütunu eklenmiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Genel olarak finans ve ekonomi alanlarında kullanılan veri madenciliği metotları, modern üretim sistemlerinde de tercih edilmeye başlanmıştır. Bunun en temel sebebi, gelişen teknoloji sayesinde üretim hatlarında çok sayıda veri toplanabilmesi ve veri madenciliği araçlarının geleneksel veri analizi metotlarından farklı olarak büyük veride rahatlıkla kullanılabilmesidir. Üretimde toplanan büyük veri daha iyi anlamlandırılabilen ve birçok alanda fayda sağlayabilmektedir.

Bu tez çalışmasında, PCB üretimi montaj hatlarında ortaya çıkan hataların birliktelik verisinden anlamlı bir sonuç elde edilebilir mi sorusuna cevap aranmış ve bu kapsamda birliktelik kuralları ve sıralı örüntü madenciliği metotları kullanılarak verilerin anlamlandırılmasına çalışılmıştır. Amaç, hata verisinden faydalanılarak tespit edilen ilişkilerin hata analizi yöntemlerine dâhil edilmesi ve yeni bir kök sebep yaklaşımı perspektifi oluşturulmasıdır.

Veri madenciliği metotlarının uygulanabilmesi için çalışmaya başlamadan önce, verinin tipine, toplama yeri ve sıklığına, kayıt altına alacak personele ve kayıt formatına karar verilmelidir. Tüm analizin en kritik kısmı veri hazırlık aşamasıdır, bundan sonraki tüm aşamalar verinin doğru toplandığı varsayımı üzerine devam etmektedir. Verilerin doğru şekilde, istenilen formatta saklanabilmesi için standartlaştırma oldukça önemlidir. PCB üretimi montaj hatlarında, tedarikçi ilişkilerindeki problemlerin önlenmesi için geliştirilen IPC standartlarının kullanılması verinin standartlaştırılması ile ilgili problemin büyük bir bölümünü çözmektedir. Ancak, veri girişi yapacak olan personelin bu standart ve hata türleri hakkındaki yetkinliği de bir o kadar önemlidir. Bu noktada, IPC ve hata türleri ile ilgili eğitimlerin personele periyodik olarak görseller yardımıyla verilmesi büyük önem arz etmektedir.

Birliktelik kurallarının oluşturulabilmesi için veri seti kategorik olmalı, dikey ya da yatay veri formatına sahip olmalıdır. Sıralı örüntü madenciliği için ise verinin zaman bazlı tanımlanması gerekmektedir. Bununla beraber, konunun hassasiyetine göre destek ve güven değerleri analizi yapacak kişiler tarafından belirlenmelidir.

Verinin doğru olarak kayıt altına alındığından emin olunduktan sonra veri tabanının iyi muhafaza edilmesi ve verinin kişilerce değiştirilmesinin önlenmesi gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında, verilerin toplanması, temizlenmesi ve işlenmesi aktiviteleri toplam analizin %40'ını oluşturmuştur.

Kartlarda meydana gelen hatalar arasındaki ilişkiler iki farklı yaklaşımla ele alınmıştır. İlk yaklaşımda, Apriori algoritması kullanılarak farklı türdeki üretim hatalarının birlikte oluşma durumunu ortaya çıkaracak kural setleri oluşturulmuştur. Bu yaklaşımla, birliktelikler kart tipi ve yıl bazlı analize tabi tutularak, ilişkiler anlamlandırılmıştır. İkinci yaklaşımda ise, hata türü verisinin zamana dayalı ilişkilerini tespit etmek için sıralı örüntü madenciliği algoritmalarından SPADE algoritması kullanılmıştır. Böylelikle, art arda gelen hataların analizi yapılmıştır.

Birliktelik kuralları sadece korelasyonları keşfetmemizi sağlar ancak nedensellik bilgisi vermez. Bu sebeple elde edilen kurallar arasında bir nedensellik olup olmadığını keşfetmek için hatta çalışan personelin deneyimlerinden faydalanmalıdır. Bu çalışmanın uygulanabilmesi için farklı disiplinlerin birlikte çalışması gerekmektedir. Bulunan kuralların çevrim içi olarak paylaşılması ve kalite güvence aktivitelerine entegre olması da önem taşımaktadır. Oluşan kurallar üretimi besleyerek önleyici faaliyet çalışmalarına dönüşmelidir. Bu kapsamda, birliktelik kurallarının daha iyi anlaşılması için görselleştirme çalışmaları R Shiny programı ile yapılmıştır. Böylelikle, üretimde çalışan personel istediği destek ve güven değerlerinde mevcut verinin durumunu inceleyebilecek ve kök sebep analizlerine hızlıca girdi sağlayabilecektir.

Çok sayıda kural oluşması, kuralların anlamlandırılması açısından zorluk çıkarabilir. Bu durumda, meta kurallar metodu uygulanarak ihtiyaç dışı olan (redundant) kurallar elenir ve kurallar arasındaki ilişkilere ortaya konur.

Sıralı örüntü madenciliği sonucunda önerilen hata analizi yaklaşımı hem kalite mühendisleri hem de üretim mühendisleri için hataların tahmini ve zamansal ilişkilerinin tespiti konusunda anlamlı bilgi sağlar. Böylelikle, yıl bazlı analizlerin sonuçları operatörlerle periyodik olarak paylaşılarak, hatalar konusunda farkındalığın oluşturulması sağlanır. Art arda gelen hatalar konusunda daha dikkatli olunarak hata tespit zamanı ve hassasiyeti konusunda iyileştirme sağlanır.

Ayrıca, hata – hata ilişkileri incelenerek, önleyici faaliyet çalışmalarında bu ilişkilere dayalı önleyici faaliyetler geliştirilerek kök sebep analitiği yaklaşımı ile hatalar daha oluşmadan önlenabilir.

Planlama aşamasında ise, ortalama yeniden işleme süreleri göz önünde bulundurularak hata analiz sonuçlarına göre planlama sağlanabilir.

Bu çalışma sonucunda, hata – hata ilişkilerinin hem zamandan bağımsız hem de zamana bağlı olarak keşfedilmesinin standartlaştırılması ve görselleştirilmesi sağlanmıştır. Farklı iki veri seti ile yapılan çalışmada, verilerin standartlaştırılması ve aynı metodun uygulanması sağlanmıştır. Çıktılar kıyaslanarak, farklı firmalarda yapılacak çalışmaların kurumsal hafızaya işlenmesi hedeflenmiştir.

Çalışmanın devamı niteliğinde, ilk aşamada tez kapsamında tanımlanan süreç parametreleri ile iyileştirme miktarlarının ölçülerek firmalar arasında benchmarkların yapılması sağlanarak hangi ilişkilerin daha güçlü olduğu, hangi kök sebep analizlerinin daha etkin olduğuna bakılması hedeflenmektedir.

Sonraki çalışmalar olarak süreç parametre verilerinin toplanması sağlanarak birden fazla hataya sebep olan süreç parametre değerlerinin analizde kullanılması hedeflenmektedir. Ayrıca, bu metotların PCB montaj hattından sonra kablaj hatlarında da hata türü standartlaştırılması yapılabilecek alanlarda kullanılarak kök sebep analizine yön vermesi hedeflenmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] A.K. Choudhary, J.A. Harding, M.K. Tiwari, Data mining in manufacturing: A review based on the kind of knowledge, *J. Intell. Manuf.* 20 (2009) 501–521.
- [2] A. Mangal, N. Kumar, Using big data to enhance the bosch production line performance: A Kaggle challenge, *Proc. - 2016 IEEE Int. Conf. Big Data, Big Data 2016.* (2016) 2029–2035.
- [3] IPC, IPC-9261 A In-Process DPMO and Estimated Yield for PCAs, (n.d.).
- [4] S.T. Kumar, *Introduction to Data Mining*, First Edit, Pearson, 2014.
- [5] R. Agrawal, Mining Association Rules between Sets of Items in Large Databases, (1993) 1–10.
- [6] A.N. Sagin, B. Ayvaz, Determination of Association Rules with Market Basket Analysis: Application in the Retail Sector, *Southeast Eur. J. Soft Comput.* 7 (2018).
- [7] R. Agrawal, R. Srikant, Fast Algorithms for Mining Association Rules, in: *Proc. 20th VLDB Conf. Santiago , Chile*, 1994.
- [8] S. Parthasarathy, M.J. Zaki, M. Ogihara, W. Li, Parallel Data Mining for Association Rules on Shared-Memory Systems, *Knowl. Inf. Syst.* 3 (2001) 1–29.
- [9] M.J. Zaki, S. Parthasarathy, M. Ogihara, W. Li, Parallel algorithms for discovery of association rules, *Data Min. Knowl. Discov.* 1 (1997) 343–373.
- [10] R. Agrawal, T. Imielinski, A. Swami, Mining Association Rules between Sets of Items in Large Databases, *JSIGMOD '93 Proc. 1993 ACM SIGMOD Int. Conf. Manag. Data.* (1993) 207–216.
- [11] M.J. Zaki, Generating Non-Redundant Association Rules, *Data Min. Knowl. Discov.* 9 (2004) 223–248.
- [12] N. Pasquier, Y. Bastide, R. Taouil, L. Lakhal, Discovering frequent closed itemsets for association rules, in: *Comput. Sci.*, (1998) 398–416.
- [13] C.C. Aggarwal, P.S. Yu, Online generation of association rules, *Proc. - Int. Conf. Data Eng.* (1998) 402–411.
- [14] B. Ozden, S. Ramaswamy, A. Silberschatz, Cyclic association rules, *Proc. - Int. Conf. Data Eng.* (1998) 412–421.

- [15] C.M. Kuok, A. Fu, M.H. Wong, Mining Fuzzy Association Rules in Databases, SIGMOD Rec. (ACM Spec. Interes. Gr. Manag. Data). 27 (1998) 41–46.
- [16] S. Brin, R. Motwani, C. Silverstein, Beyond Market Baskets: Generalizing Association Rules to Correlations, in: SIGMOD '97, 1997.
- [17] C.H. Cai, A.W.C. Fu, C.H. Cheng, W.W. Kwong, Mining association rules with weighted items, Proc. - IDEAS 1998 Int. Database Eng. Appl. Symp. (1998) 68–77.
- [18] R. Agrawal, R. Srikant, Mining Sequential Patterns, Proc. - Int. Conf. Data Eng. (1995) 3–14.
- [19] A. Inokuchi, T. Washio, M. Hiroshi, An Apriori-based Algorithm for Mining Frequent Substructures from Graph Data, Princ. Data Min. Knowl. Discov. (2000) 13–23.
- [20] X. Yan, J. Han, gSpan: Graph-based substructure pattern mining, Proc. - IEEE Int. Conf. Data Mining, ICDM. (2002) 721–724.
- [21] R. Srikant, R. Agrawal, Mining Quantitative Association Rules in Large Relational Tables, in: SIGMOD Int. Conf. Manag. Data, 1996.
- [22] A. Marcus, J.I. Maletic, K.-I. Lin, Ordinal association rules for error identification in data sets, (2001) 589.
- [23] Y. Yang, J. Miller, Rules over Interval Data, Science . (n.d.) 452–461.
- [24] B. Dunkel, N. Soparkar, Data Organization and Access for Efficient Data Mining, in: Proc. 15th Int. Conf. Data Eng., IEEE, (1999) 522–529.
- [25] J. Han, J. Pei, Y. Yin, Mining Frequent Patterns without Candidate Generation, Data Min. Knowl. Discov. 8 (2004) 53–87.
- [26] J.S. Park, M.S. Chen, P.S. Yu, An Effective Hash-Based Algorithm for Mining Association Rules, SIGMOD Int. Conf. Manag. Data. 24 (1995) 175–186.
- [27] J. Hipp, U. Güntzer, G. Nakhaeizadeh, Algorithms for association rule mining - A general survey and comparison, ACM SIGKDD Explor. Newsl. 2 (2000) 58–64.
- [28] P. Yazgana, A.O. Kusakci, A Literature Survey on Association Rule Mining Algorithms, Southeast Eur. J. Soft Comput. 5 (2016).
- [29] M. Hahsler, Visualizing Association Rules : Introduction to the R-extension

Package arulesViz, (n.d.).

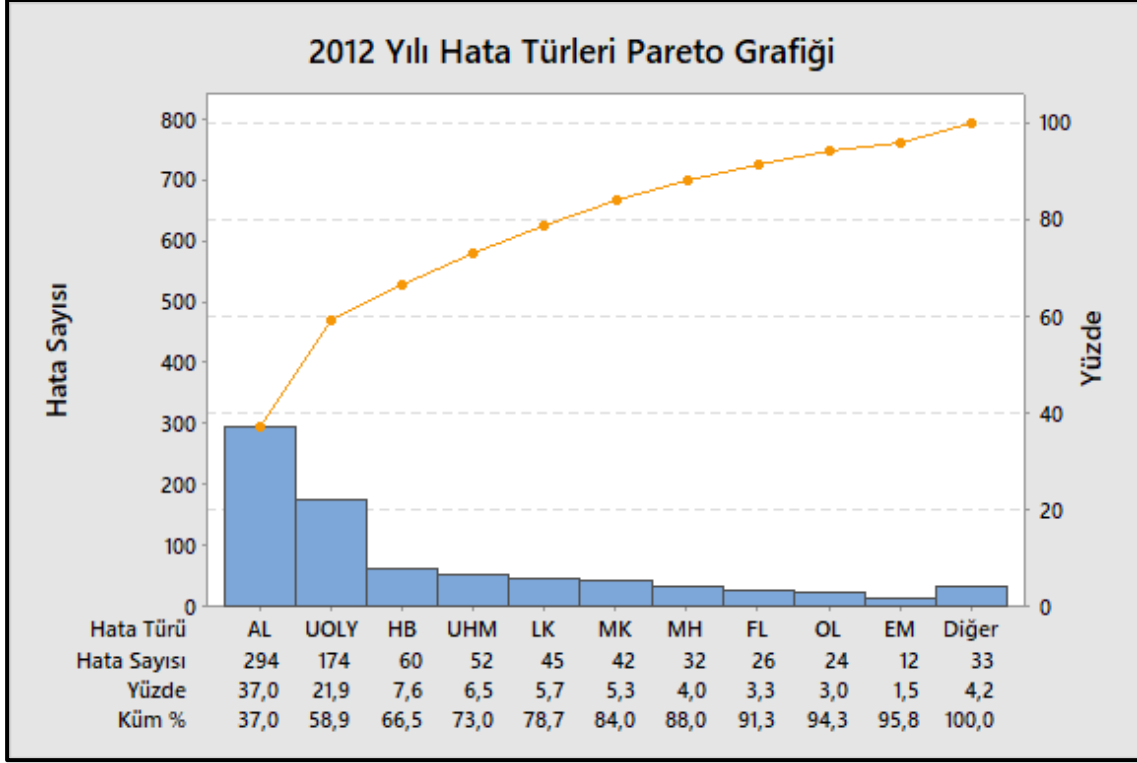
- [30] Y. Guo, M. Wang, X. Li, Application of an improved Apriori algorithm in a mobile e-commerce recommendation system, (2017).
- [31] M. Ilayaraja, Mining Medical Data to Identify Frequent Diseases using Apriori Algorithm, 2013 Int. Conf. Pattern Recognition, Informatics Mob. Eng. (2013) 194–199.
- [32] Introduction to Data Mining, in: Discov. Knowl. Data, 2005.
- [33] R. Srikant, R. Agrawal, Mining Sequential Patterns: Generalizations and Performance Improvements, in: Int. Conf. Extending Database Technol., (1996) 1–17.
- [34] M.J. Zaki, SPADE: An efficient algorithm for mining frequent sequences, Mach. Learn. 42 (2001) 31–60.
- [35] J. Han, J. Pei, B. Mortazavi-Asl, Q. Chen, U. Dayal, M.-C. Hsu, FreeSpan, (2000) 355–359.
- [36] J. Pei, J. Han, B. Mortazavi-Asl, H. Pinto, Q. Chen, U. Dayal, M.C. Hsu, PrefixSpan: Mining sequential patterns efficiently by prefix-projected pattern growth, Proc. - Int. Conf. Data Eng. (2001) 215–224.
- [37] M. Rashid, M. Amar, I. Gondal, J. Kamruzzaman, A data mining approach for machine fault diagnosis based on associated frequency patterns, Appl. Intell. (2016) 638–651.
- [38] H. Lee, C.O. Kim, H.H. Ko, M. Kim, Yield Prediction Through the Event Sequence Analysis of the Die Attach Process, 28 (2015) 563–570.
- [39] H. Sim, D. Choi, C.O. Kim, A Data Mining Approach to the Causal Analysis of Product Faults In Multi-Stage PCB Manufacturing, 15 (2014) 1563–1573.
- [40] T. Truong-Chi, P. Fournier-Viger, A Survey of High Utility Sequential Pattern Mining, 1 (2019) 97–129.
- [41] H.K. Lim, Y. Kim, M.K. Kim, Failure Prediction Using Sequential Pattern Mining in the Wire Bonding Process, IEEE Trans. Semicond. Manuf. 30 (2017) 285–292.
- [42] J. Buddhakulsomsiri, Y. Siradeghyan, A. Zakarian, X. Li, Association rule-generation algorithm for mining automotive warranty data, 7543 (2007).

- [43] C. Kaur, Association Rule Mining using Apriori Algorithm: A Survey, IJACSA) Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl. J. Adv. Res. Comput. Eng. Technol. 2 (2013) 2081–2084.
- [44] J. Han, M. Kamber, J. Pei, Data Mining Concepts and Techniques, Third, Elsevier Inc., MA, 2012.
- [45] A. Berrado, G.C. Runger, Using metarules to organize and group discovered association rules, (2007) 409–431.
- [46] S. Brin, M. R, U. JD, S. Tsur, Dynamic Itemset Counting and Implication Rules for Market Basket Data, in: SIGMOD Int. Conf. Manag. Data, Tucson, Arizona, USA, (1997) 255–264.
- [47] A. Surana, R.U. Kiran, P.K. Reddy, Selecting a Right Interestingness Measure for Rare Association Rules Introduction, (2010) 1–49.
- [48] E.R. Omiecinski, Alternative Interest Measures for Mining Associations in Databases, IEEE Trans. Knowl. Data Eng. 15 (2003) 57–69.
- [49] H.J. Hamilton, L. Geng, Interestingness Measures for Data Mining : A Survey, ACM Comput. Surv. (2006).
- [50] R.J. Bayardo, R. Agrawal, Mining The Most Interesting Rules, (1999) 145–154.
- [51] R. Pandher, R. Raut, M. Liberatore, N. Jodhan, K. Tellefsen, A Procedure To Determine Head-In-Pillow Defect And Analysis Of Contributing Factors, (n.d.).

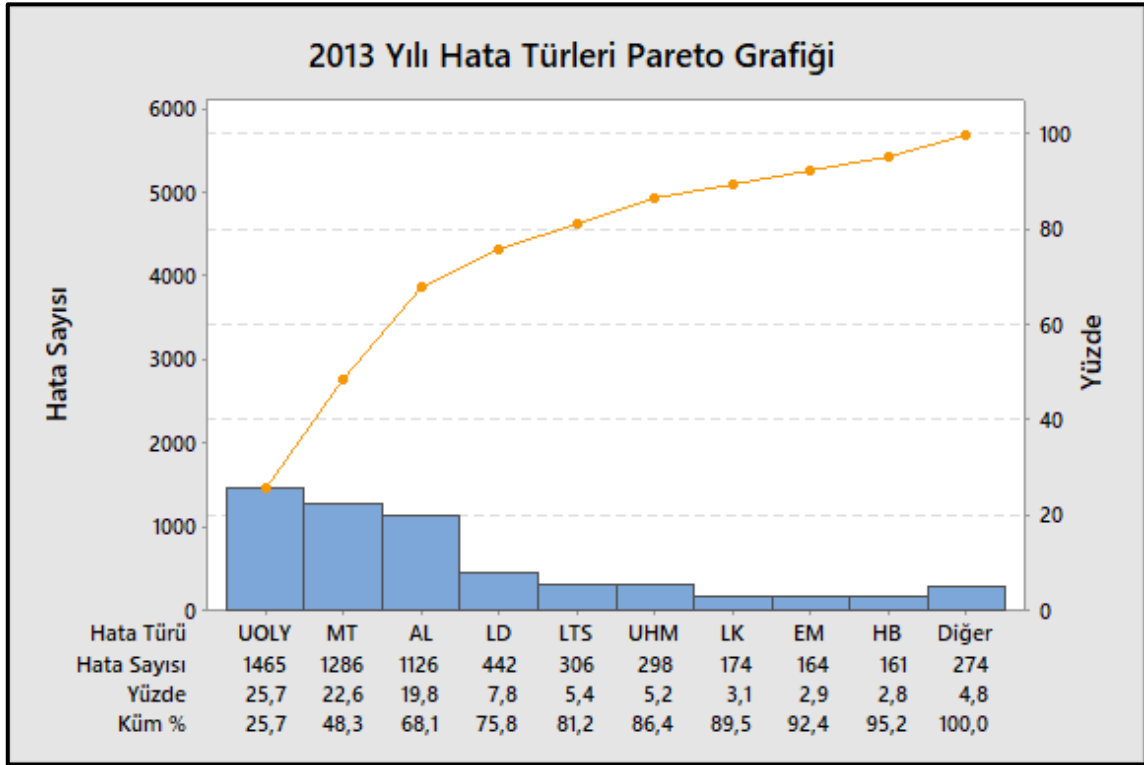
EKLER

EK 1 - Pareto Grafikleri

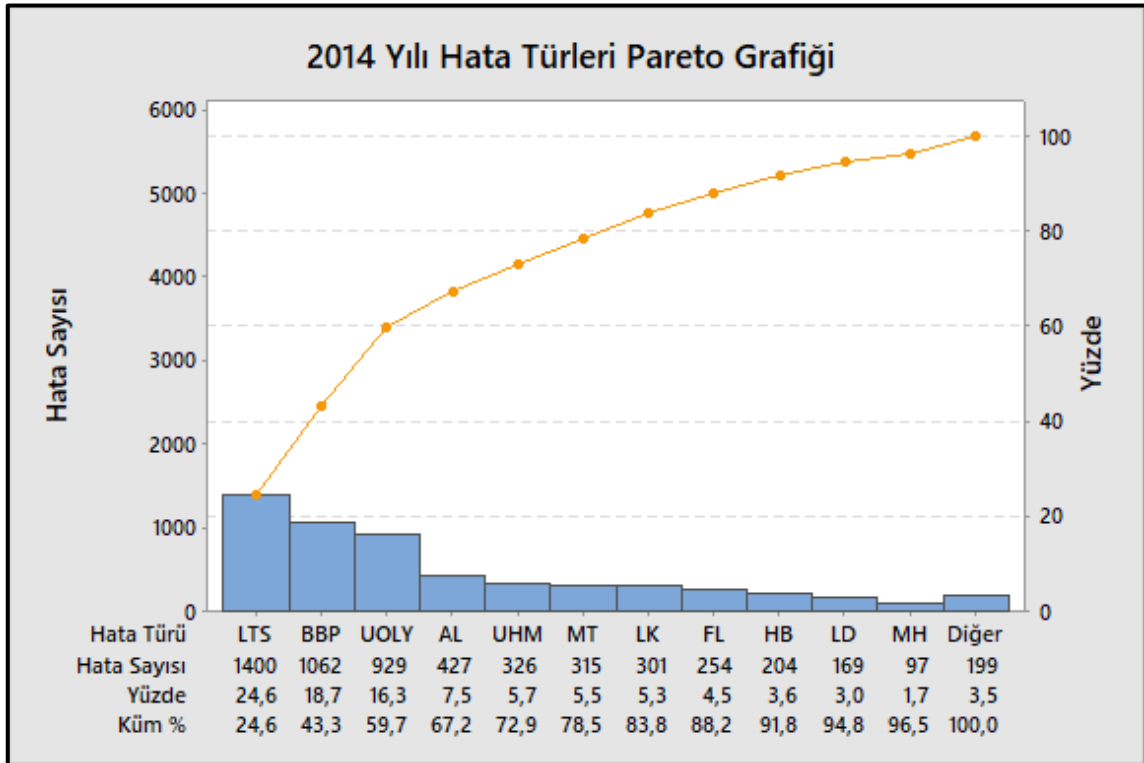
EK 1a – 2012 Yılı Hata Türleri Pareto Grafiği



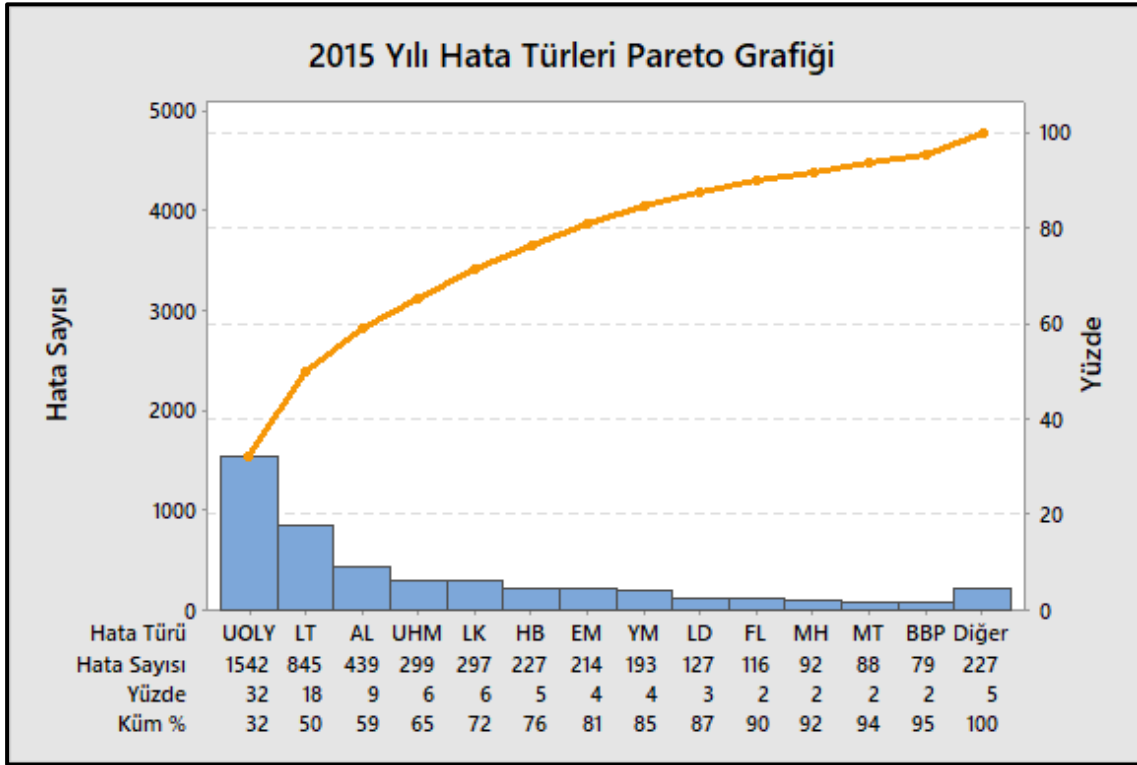
EK 1b – 2013 Yılı Hata Türleri Pareto Grafiği



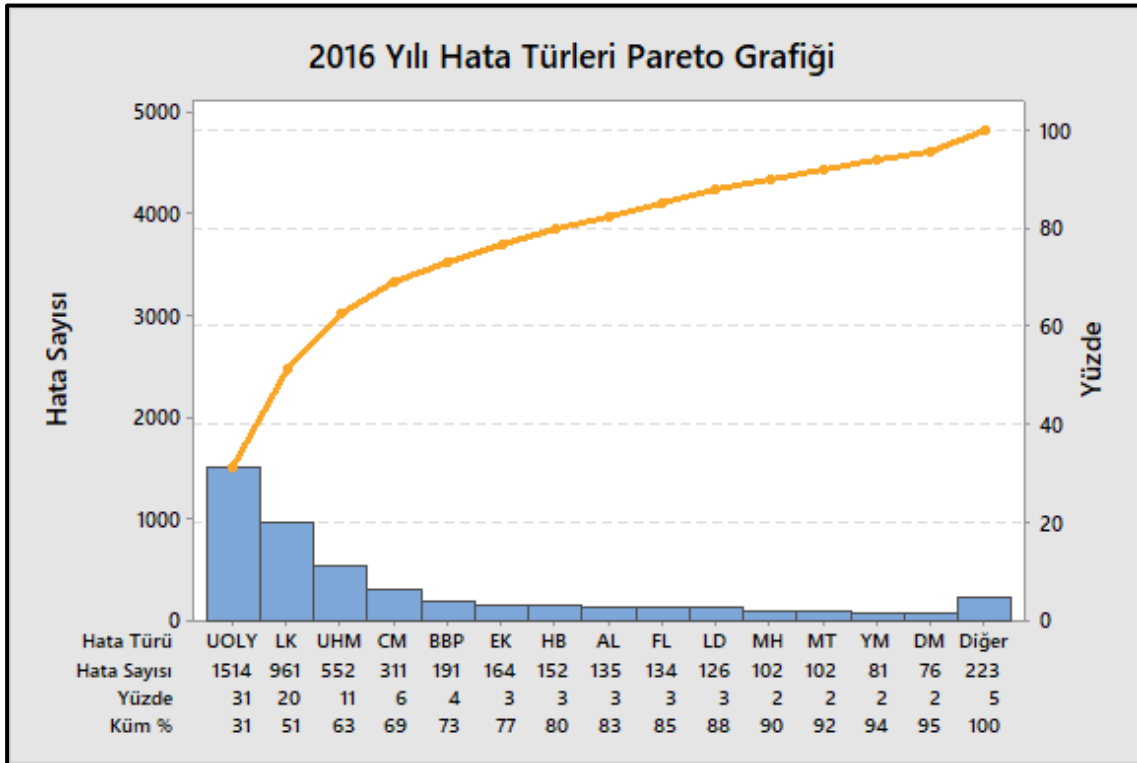
EK 1c – 2014 Yılı Hata Türleri Pareto Grafiği



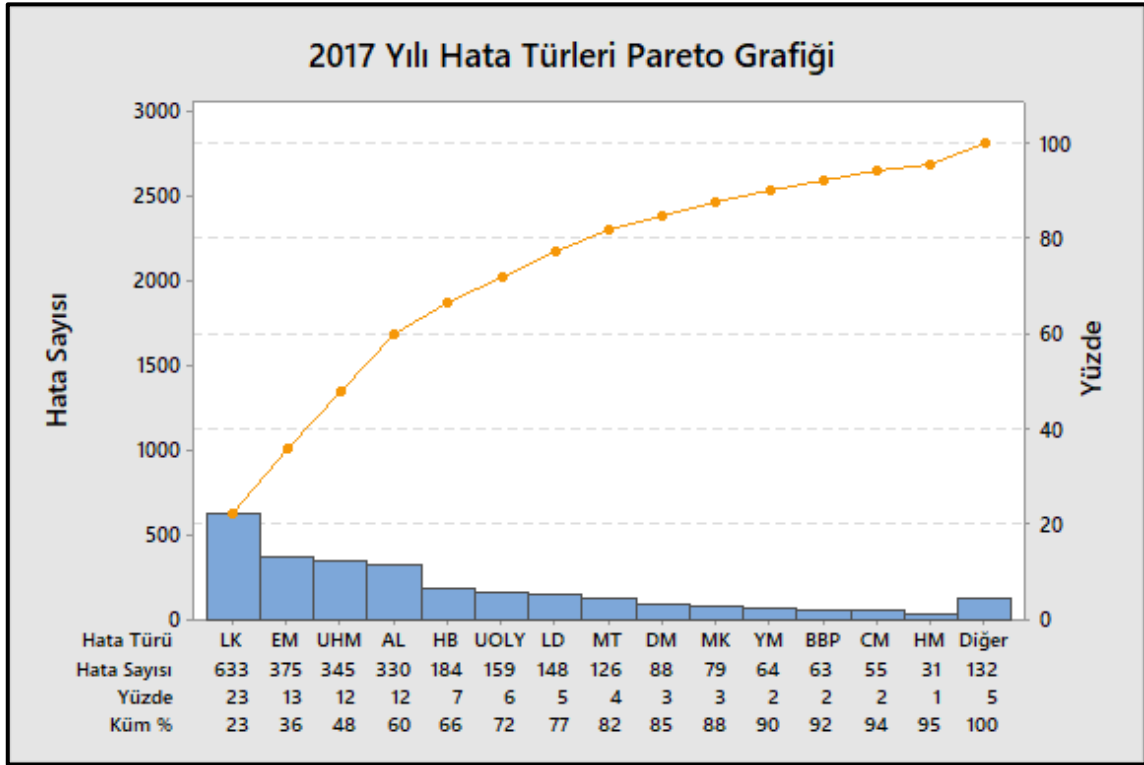
EK 1d – 2015 Yılı Hata Türleri Pareto Grafiği



EK 1e – 2016 Yılı Hata Türleri Pareto Grafiği



EK 1f- 2017 Yılı Hata Türleri Pareto Grafiği



EK 2 – Birliktelik Kuralları

EK 2a – 2012 Yılı Kural Listesi (Destek = %10, Güven = %65)

Kurallar	Öncül	Ardıl	Destek	Güven	Kaldıraç	Sayaç
1	{MH}	{AL}	0.1206897	0.7777778	1,46	7
2	{HB, UHM}	{AL}	0.1034483	0.7500000	1,40	6

EK 2b – 2012 Yılı Kural Listesi (Destek = %5, Güven = %65)

Kurallar	Öncül	Ardıl	Destek	Güven	Kaldıraç	Sayaç
1	{YM}	{AL}	0,052	0,750	1,403	3
2	{MT}	{HB}	0,052	1,000	2,148	3
3	{FL}	{AL}	0,069	0,800	1,497	4
4	{MK}	{AL}	0,086	0,714	1,336	5
5	{CM}	{MH}	0,069	0,667	4,296	4
6	{CM}	{UHM}	0,069	0,667	1,487	4
7	{CM}	{AL}	0,069	0,667	1,247	4
8	{OL}	{HB}	0,086	0,714	1,534	5
9	{OL}	{AL}	0,086	0,714	1,336	5
10	{MH}	{AL}	0,121	0,778	1,455	7
11	{FL,HB}	{AL}	0,052	1,000	1,871	3
12	{AL,FL}	{HB}	0,052	0,750	1,611	3
13	{LK,MK}	{UHM}	0,052	0,750	1,673	3
14	{MK,UHM}	{LK}	0,052	0,750	4,833	3
15	{LK,UHM}	{MK}	0,052	0,750	6,214	3
16	{HB,LK}	{UOLY}	0,052	1,000	1,871	3
17	{CM,MH}	{UHM}	0,052	0,750	1,673	3
18	{CM,UHM}	{MH}	0,052	0,750	4,833	3
19	{CM,MH}	{UOLY}	0,052	0,750	1,403	3
20	{CM,UOLY}	{MH}	0,052	1,000	6,444	3
21	{CM,MH}	{AL}	0,052	0,750	1,403	3
22	{AL,CM}	{MH}	0,052	0,750	4,833	3
23	{CM,UHM}	{UOLY}	0,052	0,750	1,403	3
24	{CM,UOLY}	{UHM}	0,052	1,000	2,231	3
25	{OL,UHM}	{HB}	0,052	0,750	1,611	3
26	{OL,UOLY}	{HB}	0,052	0,750	1,611	3
27	{OL,UHM}	{UOLY}	0,069	1,000	1,871	4
28	{OL,UOLY}	{UHM}	0,069	1,000	2,231	4
29	{HB,MH}	{AL}	0,052	1,000	1,871	3
30	{MH,UHM}	{UOLY}	0,069	0,800	1,497	4
31	{MH,UOLY}	{UHM}	0,069	0,800	1,785	4
32	{HB,UHM}	{AL}	0,103	0,750	1,403	6
33	{CM,MH,UHM}	{UOLY}	0,052	1,000	1,871	3
34	{CM,MH,UOLY}	{UHM}	0,052	1,000	2,231	3
35	{CM,UHM,UOLY}	{MH}	0,052	1,000	6,444	3
36	{MH,UHM,UOLY}	{CM}	0,052	0,750	7,250	3
37	{HB,OL,UHM}	{UOLY}	0,052	1,000	1,871	3
38	{HB,OL,UOLY}	{UHM}	0,052	1,000	2,231	3
39	{OL,UHM,UOLY}	{HB}	0,052	0,750	1,611	3
40	{HB,UHM,UOLY}	{OL}	0,052	0,750	6,214	3

EK 2c – 2013 Yılı Kural Listesi (Destek = %1, Güven = %65)

Kurallar	Öncül	Ardıl	Destek	Güven	Kaldıraç	Sayaç
1	{AL,MH}	{UOLY}	0,011	0,667	1,234	6
2	{FL,UOLY}	{MT}	0,017	0,750	1,532	9
3	{EM,YM}	{UHM}	0,017	0,692	2,493	9
4	{EM,YM}	{MT}	0,017	0,692	1,414	9
5	{DM,YM}	{MT}	0,011	0,667	1,361	6
6	{LTS,YM}	{AL}	0,011	0,667	2,249	6
7	{LTS,YM}	{MT}	0,011	0,667	1,361	6
8	{UHM,YM}	{MT}	0,023	0,750	1,532	12
9	{EM,LD}	{UHM}	0,013	0,778	2,801	7
10	{EM,LD}	{MT}	0,011	0,667	1,361	6
11	{HB,UOLY}	{MT}	0,039	0,656	1,340	21
12	{EM,UOLY}	{MT}	0,038	0,769	1,571	20
13	{UHM,UOLY}	{MT}	0,081	0,652	1,330	43
14	{EM,UHM,YM}	{MT}	0,015	0,889	1,815	8
15	{EM,MT,YM}	{UHM}	0,015	0,889	3,201	8
16	{MT,UHM,YM}	{EM}	0,015	0,667	4,868	8
17	{DM,EM,UHM}	{MT}	0,011	0,667	1,361	6
18	{DM,EM,MT}	{UHM}	0,011	1,000	3,601	6
19	{AL,EM,LTS}	{UHM}	0,011	0,750	2,701	6
20	{EM,LTS,UHM}	{AL}	0,011	0,667	2,249	6
21	{EM,LTS,UHM}	{MT}	0,011	0,667	1,361	6
22	{EM,LTS,MT}	{UHM}	0,011	0,750	2,701	6
23	{AL,EM,UHM}	{MT}	0,015	0,667	1,361	8
24	{AL,EM,UOLY}	{MT}	0,015	0,727	1,485	8
25	{EM,UHM,UOLY}	{MT}	0,019	0,833	1,702	10
26	{LK,UHM,UOLY}	{MT}	0,013	0,700	1,430	7
27	{AL,UHM,UOLY}	{MT}	0,021	0,786	1,605	11

EK 2d – 2014 Yılı Kural Listesi (Destek = %1, Güven = %65)

Kurallar	Öncül	Ardıl	Destek	Güven	Kaldıraç	Sayaç
1	{AL}	{LTS}	0,058	0,686	1,313	35
2	{FL}	{BBP}	0,120	0,766	1,509	72
3	{FL}	{LTS}	0,127	0,809	1,547	76
4	{LK}	{LTS}	0,119	0,676	1,294	71
5	{DM,UHM}	{BBP}	0,013	0,667	1,314	8
6	{HB,MT}	{UOLY}	0,012	0,700	2,066	7
7	{EM,LK}	{LTS}	0,010	0,857	1,640	6
8	{EM,LD}	{LTS}	0,013	0,667	1,276	8
9	{AL,MT}	{LTS}	0,022	0,684	1,309	13
10	{AL,UHM}	{LTS}	0,025	0,682	1,305	15
11	{AL,UOLY}	{LTS}	0,040	0,857	1,640	24
12	{AL,LTS}	{UOLY}	0,040	0,686	2,023	24
13	{FL,LK}	{BBP}	0,037	0,815	1,606	22
14	{FL,LK}	{LTS}	0,040	0,889	1,701	24
15	{FL,LD}	{BBP}	0,025	0,882	1,739	15
16	{FL,LD}	{LTS}	0,023	0,824	1,576	14
17	{FL,MT}	{LTS}	0,042	0,833	1,595	25
18	{FL,UHM}	{BBP}	0,037	0,846	1,667	22
19	{FL,UHM}	{LTS}	0,033	0,769	1,472	20
20	{FL,UOLY}	{LTS}	0,020	0,706	1,351	12
21	{BBP,FL}	{LTS}	0,102	0,847	1,621	61
22	{FL,LTS}	{BBP}	0,102	0,803	1,582	61
23	{LD,LK}	{LTS}	0,023	0,875	1,675	14
24	{LK,MT}	{LTS}	0,047	0,778	1,488	28
25	{LK,UOLY}	{LTS}	0,062	0,860	1,647	37
26	{BBP,LK}	{LTS}	0,048	0,690	1,321	29
27	{LD,MT}	{LTS}	0,042	0,676	1,293	25
28	{AL,LD,UOLY}	{LTS}	0,010	0,857	1,640	6
29	{AL,LD,LTS}	{UOLY}	0,010	0,667	1,967	6
30	{AL,MT,UHM}	{LTS}	0,010	0,750	1,435	6
31	{AL,MT,UOLY}	{LTS}	0,015	0,818	1,566	9
32	{AL,LTS,MT}	{UOLY}	0,015	0,692	2,043	9
33	{AL,UHM,UOLY}	{LTS}	0,017	0,833	1,595	10
34	{AL,LTS,UHM}	{UOLY}	0,017	0,667	1,967	10
35	{FL,LD,LK}	{BBP}	0,010	0,857	1,689	6
36	{FL,LK,MT}	{BBP}	0,017	0,909	1,791	10
37	{BBP,LK,MT}	{FL}	0,017	0,667	4,248	10
38	{FL,LK,MT}	{LTS}	0,017	0,909	1,740	10
39	{FL,LK,UHM}	{BBP}	0,010	1,000	1,970	6
40	{FL,LK,UHM}	{LTS}	0,010	1,000	1,914	6
41	{FL,LK,UOLY}	{LTS}	0,013	1,000	1,914	8
42	{FL,LTS,UOLY}	{LK}	0,013	0,667	3,803	8
43	{BBP,FL,LK}	{LTS}	0,032	0,864	1,653	19

EK 2d - Devami

44	{FL,LK,LTS}	{BBP}	0,032	0,792	1,560	19
45	{BBP,LK,LTS}	{FL}	0,032	0,655	4,175	19
46	{BBP,FL,LD}	{LTS}	0,020	0,800	1,531	12
47	{FL,LD,LTS}	{BBP}	0,020	0,857	1,689	12
48	{FL,MT,UHM}	{BBP}	0,013	0,800	1,576	8
49	{FL,MT,UHM}	{LTS}	0,013	0,800	1,531	8
50	{FL,MT,UOLY}	{LTS}	0,010	0,857	1,640	6
51	{BBP,FL,MT}	{LTS}	0,028	0,895	1,712	17
52	{FL,LTS,MT}	{BBP}	0,028	0,680	1,340	17
53	{BBP,FL,UHM}	{LTS}	0,032	0,864	1,653	19
54	{FL,LTS,UHM}	{BBP}	0,032	0,950	1,872	19
55	{LD,LK,MT}	{LTS}	0,010	0,857	1,640	6
56	{BBP,LD,LK}	{LTS}	0,013	0,800	1,531	8
57	{LK,MT,UHM}	{LTS}	0,013	0,727	1,392	8
58	{LK,MT,UOLY}	{LTS}	0,027	0,842	1,612	16
59	{BBP,LK,MT}	{LTS}	0,017	0,667	1,276	10
60	{BBP,LK,UHM}	{LTS}	0,013	0,667	1,276	8
61	{BBP,LK,UOLY}	{LTS}	0,012	0,875	1,675	7
62	{LD,MT,UHM}	{LTS}	0,013	0,667	1,276	8
63	{LD,MT,UOLY}	{LTS}	0,015	0,900	1,722	9
64	{BBP,LD,UOLY}	{LTS}	0,017	0,667	1,276	10
65	{BBP,FL,LK,MT}	{LTS}	0,015	0,900	1,722	9
66	{FL,LK,LTS,MT}	{BBP}	0,015	0,900	1,773	9
67	{BBP,LK,LTS,MT}	{FL}	0,015	0,900	5,735	9
68	{BBP,FL,LK,UHM}	{LTS}	0,010	1,000	1,914	6
69	{FL,LK,LTS,UHM}	{BBP}	0,010	1,000	1,970	6
70	{BBP,LK,LTS,UHM}	{FL}	0,010	0,750	4,779	6
71	{BBP,FL,MT,UHM}	{LTS}	0,012	0,875	1,675	7
72	{FL,LTS,MT,UHM}	{BBP}	0,012	0,875	1,724	7

EK 2e – 2015 Yılı Kural Listesi (Destek = %1, Güven = %65)

Kurallar	Öncül	Ardıl	Destek	Güven	Kaldıraç	Sayaç
1	{}	{LTS}	0,719	0,719	1,000	694
2	{HP}	{LTS}	0,012	0,857	1,192	12
3	{DM}	{LTS}	0,017	0,842	1,171	16
4	{CM}	{LTS}	0,031	0,833	1,159	30
5	{MK}	{UOLY}	0,047	0,789	2,295	45
6	{BBP}	{LTS}	0,046	0,710	0,987	44
7	{EM}	{LTS}	0,051	0,803	1,117	49
8	{MH}	{LTS}	0,050	0,706	0,982	48
9	{MT}	{LTS}	0,054	0,693	0,964	52
10	{HB}	{LTS}	0,084	0,711	0,988	81
11	{YM}	{LTS}	0,137	0,721	1,003	132
12	{LK}	{LTS}	0,132	0,726	1,009	127
13	{AL}	{LTS}	0,120	0,671	0,932	116
14	{UHM}	{LTS}	0,146	0,738	1,026	141
15	{CM,UOLY}	{LTS}	0,013	0,765	1,063	13
16	{AL,MK}	{UOLY}	0,013	0,765	2,223	13
17	{LTS,MK}	{UOLY}	0,020	0,731	2,124	19
18	{EM,YM}	{LTS}	0,015	0,933	1,298	14
19	{EM,LK}	{LTS}	0,010	0,909	1,264	10
20	{EM,UHM}	{LTS}	0,010	0,714	0,993	10
21	{EM,UOLY}	{LTS}	0,015	0,778	1,081	14
22	{HB,MH}	{LTS}	0,011	0,688	0,956	11
23	{LK,MH}	{LTS}	0,011	0,917	1,275	11
24	{MH,UHM}	{LTS}	0,010	0,714	0,993	10
25	{MH,UOLY}	{LTS}	0,013	0,684	0,951	13
26	{MT,YM}	{LTS}	0,013	0,765	1,063	13
27	{LK,MT}	{LTS}	0,012	0,667	0,927	12
28	{AL,MT}	{LTS}	0,013	0,650	0,904	13
29	{MT,UOLY}	{LTS}	0,016	0,714	0,993	15
30	{AL,HB}	{LTS}	0,013	0,722	1,004	13
31	{HB,UHM}	{LTS}	0,016	0,682	0,948	15
32	{HB,UOLY}	{LTS}	0,021	0,690	0,959	20
33	{LK,YM}	{LTS}	0,021	0,667	0,927	20
34	{AL,YM}	{LTS}	0,018	0,810	1,126	17
35	{UHM,YM}	{LTS}	0,024	0,697	0,969	23
36	{UOLY,YM}	{LTS}	0,034	0,688	0,956	33
37	{AL,LK}	{LTS}	0,038	0,804	1,118	37
38	{LK,UHM}	{LTS}	0,034	0,750	1,043	33
39	{AL,UHM}	{LTS}	0,032	0,705	0,980	31
40	{UHM,UOLY}	{LTS}	0,039	0,704	0,978	38
41	{AL,LK,UHM}	{LTS}	0,013	0,722	1,004	13
42	{AL,LK,UOLY}	{LTS}	0,013	0,929	1,291	13
43	{AL,UHM,UOLY}	{LTS}	0,010	0,714	0,993	10

EK 2f – 2016 Yılı Kural Listesi (Destek = %1, Güven = %65)

Kurallar	Öncül	Ardıl	Destek	Güven	Kaldıraç	Sayaç
1	{CM,HB}	{UOLY}	0,010	0,667	1,158	6
2	{EM,HB}	{UOLY}	0,017	0,833	1,447	10

EK 2g – 2017 Yılı Kural Listesi (Destek = %1, Güven = %65)

Kurallar	Öncül	Ardıl	Destek	Güven	Kaldıraç	Sayaç
1	{FL}	{LK}	0,011	0,714	2,147	10
2	{AL,EM}	{LK}	0,035	0,825	2,480	33

EK 3 - Sıralı Örüntü Madenciliği

EK 3a – 2013 Yılı Sıralı Örüntü Madenciliği Çıktıları

Kurallar	Destek Sayısı	Güven
5 → 3	42	0,769
3 → 13	44	0,833
13 → 3	44	0,820
5 → 13	49	0,815
13 → 5	46	0,869

EK 3b – 2014 Yılı Sıralı Örüntü Madenciliği Çıktıları

Kurallar	Destek Sayısı	Güven
3 → 5	21	0,828
5 → 3	22	0,857
13 → 3	22	0,821
3 → 13	20	0,793
18 → 3	19	0,792
5 → 13	21	0,821
5,13 → 3	20	0,913

EK 3c – 2015 Yılı Sıralı Örüntü Madenciliği Çıktıları

Kurallar	Destek Sayısı	Güven
3 → 18	7	1,00
18 → 3	6	0,70
5 → 18	6	1,00

EK 3d – 2016 Yılı Sıralı Örüntü Madenciliği Çıktıları

Kurallar	Destek Sayısı	Güven
8 → 3	7	1,00

EK 3e – 2017 Yılı Sıralı Örüntü Madenciliği Çıktıları

Kurallar	Destek Sayısı	Güven
1 → 3	34	0,725
4 → 3	28	0,784
7 → 3	27	0,778

EK 3f – 2013 ve 2014 Yılları Örüntü Madenciliği Çıktıları

Kurallar	Destek Sayısı	Güven
3 → 13	45	0,828
13 → 3	47	0,779
5 → 13	53	0,826
13 → 5	47	0,838

EK 3g – 2013, 2014 ve 2015 Yılları Örüntü Madenciliği Çıktıları

Kurallar	Destek Sayısı	Güven
13 → 3	47	0,779
13 → 5	47	0,838
5 → 13	53	0,814

EK 3h – 2013, 2014, 2015 ve 2016 Yılları Örüntü Madenciliği Çıktıları

Kurallar	Destek Sayısı	Güven
13 → 3	47	0,779
13→5	47	0,838
5 → 13	53	0,814

EK 3j – 2013, 2014, 2015, 2016 ve 2017 Yılları Örüntü Madenciliği Çıktıları

Kurallar	Destek Sayısı	Güven
13 → 3	47	0,779
5 → 13	53	0,814
13 → 5	47	0,838

EK 4 - Hata Türü Açıklamaları

Hata Türü	Açıklaması
Bacak büküm problemi	Bacaklı malzemede bacağın eğilmesi
Eksik malzeme	Kart üzerinde olması gerekli olan komponentlerin bir ya da birkaçının olmaması
Havada bacak	Komponentin bacaklarından bir ya da birkaçının lehim almayarak havada kalma durumu
Hazır olmayan malzeme (kirli, oksitlenmiş vs.)	Kart ya da komponentlerin montaja hazır olamama durumu
Lehimlenebilirlik problemi (lehim almama)	Kart ile komponenti birbirini tutmasını sağlayan lehim ile ilgili hatalar
Malzeme kaplama ya da benzer hatalar	Kaplama sürecinde meydana gelen tüm hatalar
Oynanmış lehim (lehimde stres çizgileri ve/veya dalgalanma)	Lehimin sertleşmesi aşamasında hareket sonucu meydana gelen lehim hatası
Soğuk lehim	Lehimin bir kısmının erimemesi
Tinlenmemiş bacak	Kalaylanmamış komponent bacağı
Az lehim	Serigrafik makinesinden yeterli miktarda lehimin sürülebilmesi
Dönmüş malzeme (yan)	Kart üzerine yerleştirilen komponentin olması gerektiği pozisyonda olamaması
Hatalı kablo teli bağlantısı	Kart ve komponent kablosu arasındaki boşluk veya zayıf akış profili gibi kusurlu bağlantılar
Hatalı malzeme	Kart üzerine talimatlarda yazandan farklı bir malzeme takılması
Hatalı malzeme montajı (polarizasyon)	Komponentlerin yanlış yere montaj edilmesi
Lehimde hava boşluğu	Lehim içerisinde gözlemlenen küçük hava kabarcıkları kaynaklı hata türü
Malzemede hasar	Komponentlerin fiziksel olarak zarar görmesi
Mezar taşı (dik)	Lehimin sertleşme sürecindeki uyuşmazlık sebebiyle oluşur. Komponentin bir kısmındaki lehimin daha önce katılaşmasıyla komponent katılaştıran kısma doğru eğilmesi
Uygun hizalanmamış malzeme	Dizgi makinesinde komponent doğru koordinatlarda yerleştirilememesi

EK 4 – Devamı

Fazla lehim	Serigrafi makinesinden olması gerekenden fazla miktarda lehimin sürülmesi
Fazla malzeme	Talimatta yer almayan komponentin karta dizilmesi
Head and pillow	Yüzey oksidasyonu veya lehimin doğru eriyememesi sebebiyle oluşan hatalar
Kablo izolasyonu ya da iletken hasarı	Eğer varsa, kart ile komponentler arasında yer alan kablo özellikleri ile ilgili hatalar
Lehim köprüsü	Fazla lehim sebebiyle iki komponent arasında bağlantı kurulması
Lehimde delik (gaz kaçağı)	Lehim üzerinde oluşan hava kabarcıkları sebebiyle oluşan boşluklar
Lehimsiz bağlantı	Kart ile komponent arasında lehim olmama durumu
Uygun olmayan lehim yapışması (yayılması)	Erimiş lehimin önce kart yüzeyini kaplaması daha sonrada geri çekildiğinde bıraktığı düzensiz biçimli lehim birikintisi
Uygun olmayan montaj	Talimata uygun montaj yapılmaması
Lehim topları veya sıçraması	Lehim uygulandıktan sonra top şeklindeki lehim kalıntıları
Lehimde çatlak	Lehim üzerinden gözlenen çatlaklar.
Yanlış markalama	Markalama sırasında komponent ya da kartın yanlış markalanması
Elektronik kartta hasar	Kartın fiziksel olarak hasar görmesi
Yabancı madde	Montaj hattında olmaması gereken kıl, tüy vb. maddenin montaj sırasında kart üzerinde görülmesi
Yanlış malzeme yüksekliği	Kart üzerine yerleştirilen komponentin pozisyon hatası