

PAPER DETAILS

TITLE: Ergonomik Personel Çizelgeleme Problemi: Savunma Sanayinde Bir Uygulama

AUTHORS: Tamer EREN,Rabia AKGÖNÜL,Haci Mehmet ALAKAS

PAGES: 43-68

ORIGINAL PDF URL: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/2759624>

Ergonomik Personel Çizelgeleme Problemi: Savunma Sanayinde Bir Uygulama

Ergonomic Personnel Scheduling Problem: An Application in Defense Industry

Rabia Akgönül¹, Tamer Eren¹, Hacı Mehmet Alakaş¹

¹Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü, 71451, Kırıkkale, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 08/11/2022

Kabul / Accepted: 19/12/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/12/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/12/2022

Öz

Hızlı ve dinamik bir çalışma temposu olan savunma sanayinde insan gücüne olan ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır. Firmalar hızlı ve titiz üretim yaparken, iş güvenliği önlemlerini almaları, iş sağlığına önem vermeleri ve personelin verimli çalışabileceği ortamları ergonomik olarak doğru planlaması firmanın sektörde gelişmesine yardımcı olmaktadır. Ergonomik riskler göz önüne alınarak yapılan çizelgelemeler meslek hastalıklarını ve iş kazalarını azaltmakta, gerekli işçilik maliyetlerini azaltmakta ve çalışanların verimliliğini arttırmaktadır. Bu çalışmada toplam 60 personeli olan bir savunma sanayisinin alt tedarikçisi olan firmada ergonomik personel çizelgeleme problemini gerçekleştirilmiştir. Çalışmada operatörlerin makinelerdeki yetkinlikleri ve özel istekleri tespit edilerek matematiksel model kurulmuştur. Daha sonra departmanlardaki görevler belirlenmiş ve görevlerin ergonomik risk değerleri REBA metodu ile hesaplanmıştır. Elde edilen risk değerlerini kullanarak görevlere atanmadaki toplam risk puanını en küçükleyecek matematiksel model kurulmuştur ve iki matematiksel model ILOG CPLEX Studio IDE programında çözülüp, çalışanlar için ergonomik riskler de göz önünde bulundurularak aylık çalışma çizelgeleri elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler

“ergonomik personel çizelgeleme, REBA, hedef programlama, savunma sanayi”

Abstract

The need for manpower in the defense industry, which has a fast and dynamic work pace, is increasing day by day. While companies are producing fast and meticulously, taking occupational safety precautions, giving importance to occupational health and ergonomically correct planning of the environments where the personnel can work efficiently help the company to develop in the sector. Scheduling, taking into account ergonomic risks, reduces occupational diseases and work accidents, reduces the necessary labor costs and increases the productivity of the employees. In this study, the ergonomic personnel scheduling problem was carried out for a total of 60 personnel in a company that is a sub-supplier of the defense industry. In the study, the competencies and special requests of the operators on the machines were determined and a mathematical model was established. Then, the tasks in the departments were determined and the ergonomic risk values of the tasks were calculated with the REBA method. Using the obtained risk values, a mathematical model was established to minimize the total risk score in assignment to tasks, and two mathematical models were solved in the ILOG CPLEX Studio IDE program, and monthly work schedules were obtained considering ergonomic risks for the employees.

Key Words

“ergonomic personnel scheduling, REBA, goal programming, defense industry”

1. Giriş

Savunma sanayi sektörü Türkiye'nin en önemli sektörlerinden birisidir. Türk savunmasında dışa bağılılığı azaltmak amacıyla başta Savunma Bakanlığı olmak üzere diğer kuruluşlar ve Türk milletinin de desteği ile hızla büyümeye devam etmektedir. Savunma sektörünün önde gelen büyük firmalarının yanı sıra çok fazla küçük ölçekli alt tedarikçi işletmeleri bulunmaktadır. Gelişen teknoloji ile birlikte makine, ekipman, hammadde ve işgücü gibi üretim kaynaklarını etkin kullanarak, rekabet avantajı sağlamak ve müşteri isteklerine daha hızlı bir şekilde geri dönüş yapmak mümkündür. Bu hızlı imalat süreçlerinde makine gücünün yanı sıra beden gücüne de fazlaca ihtiyaç duyulmaktadır. Beden gücünün etkin kullanılmasında hem personelin istek ve tercihlerine göre uygun çizelgelemelerinin oluşturulması hem de ergonomi kavramı önemli bir yere sahiptir.

Çizelgeleme, üretim ve hizmet sektöründe verimliliği arttırmak, sürekliliği sağlamak, gerekli işgücünü doğru planlamak, çalışan memnuniyetini arttırmak gibi çeşitli amaçlar için kullanılan bir karar verme sürecidir. Bu amaçları sağlamak için üretim kaynaklarının (makine, ekipman, işgücü, vb.) belirli zaman aralığında ve belirli kısıtlar çerçevesinde işlere ataması yapılır. Literatürde yapılan çizelgeleme çalışmalarını bir bütün olarak değerlendirmek amacıyla literatür taramaları yapılmıştır. Eren ve Güner (2002), tek ve paralel makinalı problemlerde çok ölçütlü çizelgeleme problemleri konusunda; Eren ve Güner (2004) çok ölçütlü akış tipi çizelgeleme problemleri konusunda; Özder vd. (2020) personel çizelgeleme problemleri konusunda detaylı literatür taramaları gerçekleştirmişlerdir. Son yıllarda üzerinde en çok araştırma yapılan çizelgeleme türü personel çizelgelemedir.

Personel çizelgeleme problemi üretim ve hizmet sektöründe sıklıkla karşılaşılan önemli bir çizelgeleme problemidir. Personel çizelgeleme problemi ile işletmelerdeki ürün ve hizmet üretimine olan talebi tam zamanında ve sistematik bir şekilde karşılayabilmeleri için işletmede iş zamanlaması ve iş ataması yapılabilir. (Ernst ve diğ. 2004). Etkin bir personel çizelgeleme ile doğru zamanda doğru göreve en uygun çalışanın atanmasını sağlanmaktadır. Personel çizelgeleme, çalışanın özel isteklerini ve ihtiyaçlarını da göz önünde bulundurularak bir model oluşturulmasını, bu modelin çözümü ile çalışan ve işletme için bir plan dahilinde ve sistematik olarak üretim veya hizmet üretebilmesini sağlamaktadır. (Eren ve Varlı, 2017)

Ergonomik personel çizelgeleme iş rotasyonu tabanlı bir çizelgeleme türüdür. Üretim sistemlerindeki ergonomik risklere olan maruziyetleri en aza indirmesinden, mesleki yaralanma ve kas-iskelet hastalıkları önlemeyi amaçlamasından dolayı gün geçtikçe tercih edilen bir uygulama haline gelmektedir. Ergonomik personel çizelgeleme yardımıyla işlerin maruziyet değerleri hesaplanarak personelin en uygun göreve atanması sağlanmaktadır. Maruziyeti azaltmak için personelin zorunlu izin günleri, nitelik ve yetkileri de hesaba katılır. Bu sayede hem personelin iş tatmini hem de motivasyonu artar (Otto ve Scholl, 2013). Bunların yanı sıra personellerin çeşitli görevleri yapabilmeleri için eğitilmelerini, iş devamlılığının yüksek oranda olmasını, personelin değişikliklere daha kolay adapte olmasını ve zamanla artan tramvasal hastalıkların azalmasını sağlamaktadır.

Bu çalışmada, ergonomik personel çizelgeleme problemi incelenmiştir. Çalışma, Ankara'daki Türk savunma sanayisinin alt tedarikçisi olan bir firmada gerçekleştirilmiştir. Problemin 2 ayrı matematiksel modeli ve 2 ana amacı bulunmaktadır. Birinci amaçta operatörleri yetkinliklerine göre atayarak dengeli bir çizelgeleme hazırlamaktır. İkinci amacı üretim dışındaki diğer departmanlarda çalışan personeller için görevlerin risklerine göre dengeli bir çizelgeleme oluşturmaktır. Her bir görevin risk değerini hesaplamak için "Hızlı Tüm Vücut Değerlendirme Yöntemi (REBA)" kullanılmıştır. Kalite kontrol, tesviye ve temizlik bölümlerinde çalışan personellerin daha verimli ve rahat bir ortamda çalışmaları için yaptıkları işlerin REBA puanları hesaplanarak ergonomik risk faktörü en küçüklenecek şekilde görevlere atanması sağlanmıştır. Bu modelde de her personel sadece kendi departmanındaki görevleri yapabilmektedir.

Çalışmanın ikinci bölümünde literatür araştırmasına yer verilmiş, üçüncü bölümde çalışmada kullanılan yöntemlere detaylı olarak yer verilmiş, dördüncü bölümde uygulamanın detaylarına yer verilmiş, beşinci bölümde sonuç ve önerilere yer verilmiştir.

2. Literatür Araştırması

Literatürde yer alan çizelgeleme çalışmaları incelendiğinde ergonomik personel çizelgeleme konusunun diğer çalışmalara göre daha yeni olduğu görülmektedir. Literatürde yapılan ergonomik personel çizelgelemeye ait bazı çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Carnahan vd. (2000) iş şiddeti indeksini kaldırma işlerinin fiziksel iş yükünü hesaplamada kullanarak iş değişim çizelgesi modeli önermişlerdir. Malladi ve Min (2004), deneme verilerini kullanarak ergonomik ve finans temelli kriterleri göz önünde bulunduran bir çizelge bulmaya çalışmışlardır. Seçkiner ve Kurt (2005), radyografi teknisyenleri üzerindeki ergonomik iş yükünü en aza indirmek amacıyla tur ve rotasyon çizelgelerini bütünsel bir şekilde kullanmışlardır. Yaoyuenyong ve Nanthavanij (2006), üretim ortamındaki gürültüyü göz önünde bulundurarak, çalışanlar için işitme kaybı sorununun çok önemli olduğunu belirtmişlerdir. Bu sorunun işler arasında değişim ile ortadan kaldırılabileceği fikrini ortaya atmışlardır. Aryanezhad vd. (2009), çalışanlar için gürültü maruziyeti ve iş kaynaklı sırt ağrısı potansiyeli toplamını minimize etmeyi amaçlayan bir iş değişim çizelge modeli önermişlerdir. Asensio-Cuesta vd. (2011), çalışanların işleri gerçekleştirirken maruz kaldıkları ergonomik risk değerlerinin azaltılması için iş değişim çizelgelerinin çalışan ve firma için faydalarını ayrı ayrı incelemişlerdir. Çok kriterli bir genetik algoritma kullanarak iş değişim çizelgelerini hazırlamışlardır. Cheshmehgaz vd. (2012), klasik montaj hattı dengeleme probleminin kısıtlarına ek olarak ergonomik olarak bozuk vücut duruşunun kümülatif riskinide göz önünde bulunduran bir model önermiştir. Wongwien ve Nanthavanij (2012), iş rotasyonuna

göre çalışan sayısını minimize etmeyi amaçlayan ve ergonomik tehlikeye maruz kalmayı bir kısıt olarak kullandıkları 0-1 tamsayılı programlama modeli geliştirmişlerdir. Xu vd. (2012), montaj hattı dengelemede ergonomi kriterleri ve verimlilik olgusu çerçevesinde vücudun üst bölümündeki kas-iskelet hastalıklarını engellemek amacıyla el aktivitesi ergonomi kriterinin seviyesini ölçerek problemi karışık tam sayılı matematiksel programlama yaklaşımı ile çözümlenmiştir. Otto ve Scholl (2013), montaj hattı dengeleme probleminde ergonomi kriterlerini kullanan matematiksel model geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri modeli, sezgisel çözüm yöntemleri ve OCRA indeksini kullanarak modellerini çözüme kavuşturmuşlardır. Rattanamane ve Nanthavanij (2013), ergonomi kısıtını işgücü çizelgeleme problemi ile incelemişlerdir. İşlerin yapıldığı istasyonlara ergonomik risk değerleri atayıp, çalışanların günlük olarak belirlenen sınırı geçmeyecek şekilde makineler arasında atanmasını sağlayacak günlük bir çizelgeleme için model geliştirmişlerdir. Wongwien ve Nanthavanij (2013), ergonomik personel çizelgelemesini verimlilik ve çalışan memnuniyeti açısından incelemeyi amaçlamışlardır. Toplam sistemin verimliliği ve çalışanın memnuniyetini en büyükleyecek amaç fonksiyonunu modele eklemişlerdir. Wang ve Liu (2014), vardiya çalışanlarının yorgunluklarını azaltmak amacıyla en uygun vardiya çizelgelemesini hazırlamak için üstel koşullu bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Karışık tam sayılı programlama yöntemini ve Xpress IVE kodlaması ile farklı parametrelere göre çalıştırarak çözmüşlerdir. Akbari (2015), işçi maliyetlerini minimize edecek tur çizelgeleme yaklaşımı geliştirmiştir. Bu yaklaşımda çalışanlar arasından yarı zamanlı olanların yorgunluk oranlarını dikkate alarak vardiyaların dengeli atanması problemini modellediğini belirtmiştir. Boenzi vd. (2015), yaş aralığı yüksek olan çalışanların bulunduğu bir işletmede ergonomik açıdan en uygun iş değişim çizelgelerini hazırlamayı amaçlamışlardır. Ergonomik açıdan OCRA indeksini kullanmışlardır. Dewi ve Septina (2015), lojistik hizmeti veren bir şirkette hem fiziksel hem de zihinsel iş yükünü dengeleyecek işgücü çizelgeleme modeli kurmuşlardır. Zihinsel iş yükünü ölçmede NASA TLX yöntemini, fiziksel iş yükünü ölçmede ise kalori tüketimini göz önünde bulundurarak modelleme yapmışlardır. Bautista vd.(2016), birden fazla ürünle montaj hatları için ergonomik risklere göre maksimum izin verilen risk sınırını dikkate alan bir matematiksel model önermişlerdir. Mossa vd. (2016), OCRA indeksi ve verimlilik faktörünü göz önüne alan iş-rotasyon çizelgelemesi üzerinde çalışmışlardır. Moussavi vd. (2016), çevrim süresinin kısaltılmasını amaçlayan ergonomik iş gücü çizelgelemesi problemini ele almışlardır. Montaj hattı özelinde kullandıkları modelin ergonomik analizi için boy ölçüsü, yaş aralığı, işe göre yetenek seviyesi ve tecrübe durumlarını kullanarak tam sayılı doğrusal matematiksel modelleme yaklaşımı ile model oluşturmuşlar ve GUROBI yazılımı ile çözmüşlerdir. Song vd. (2016), görevi yerine getirirken vücudun kullanılan bölgesine göre her işe özel puanlar atayarak, çalışan-görev atamasındaki puanların toplamının en küçükleyecek ergonomik personel çizelgesi hazırlamayı amaçlamışlardır. Yoon vd. (2016), işlere ilişkin duruşları REBA metodu ile değerlendirerek, tek günlük iş değişim çizelgeleme elde etmeyi amaçlamışlardır. Battini vd. (2017), bir çalışanın hem ergonomik hem de ekonomik yönden kaldırabileceği ağırlık miktarının belirlenmesi ve çalışma-mola sürelerini belirleyen matematiksel bir model geliştirmişlerdir. Bedir vd. (2017), bir hazır giyim mağazası için ergonomik risk faktörlerini ve çalışma saatlerini dengeleyecek bir aylık çalışma çizelgesi Analitik Hiyerarşi Yöntemi ve hedef programlama yöntemlerini kullanarak hazırlamışlardır. Hochdörffer vd. (2018), kısa süreli planlama çalışmalarında istasyonun tüm vücudu çalıştırması ya da yoğunluklu olarak el-parmak sistemini çalıştırması özelliğini dikkate alarak iş değişim çizelgeleri oluşturmayı amaçlamışlardır. Moussavi vd. (2018), ergonomik iş değişim çizelgeleri oluşturmak için hem fiziksel iş yükünü azaltmayı hem de verimliliği arttırmayı amaçlayan çok amaçlı bir matematiksel model önermişlerdir. Verimlilik açısından ise maksimum iş yükünü ve üretim çevrim zamanını en küçüklemeyi dikkate alan modeller oluşturmuşlardır. Şenyiğit ve Atıcı (2018), çalışanların işe bağlı öğrenme indeksini göz önüne alarak çevrim zamanının en küçüklemeyi amaçlayan tek makine çizelgelemesi için bir matematiksel model geliştirmişler. Modeli RULA yöntemini ile entegre ederek atama probleminde dönüştürmüşlerdir. Alakaş vd. (2019), orta gerilim sigorta üreten bir firma için ergonomik personel çizelgeleme problemini ele almışlardır. Görevlerin ergonomik risklerini ölçmek için REBA metodunu; problemi çözmek için ise hedef programlama yöntemini kullanmışlardır. Sana vd. (2019), sadece tek bir çalışanı değil de tüm çalışanların korunmasını sağlayan iş değişim çizelgeleme modeline OCRA, RULA ve NIOSH yöntemlerini kısıtlara eklemişler ve özel bir genetik algoritma çeşidi ile çözümlenmiştir. Aksüt vd. (2020), EBSCO veri tabanı üzerinden ergonomik risk faktörleri üzerinde yapılan 59 makaleyi incelemişler ve riskleri sınıflandırmışlardır. Ergonomik riskler; fiziksel, bilişsel, örgütsel, çevresel, kişisel ve psikososyal faktörler olmak üzere altı ana sınıf ve 55 alt sınıfa ayrılmıştır. Kaçmaz vd. (2020), bir cam fabrikasında, her bir çalışanı gün içinde uygun yetkinlik ve risk düzeyini tayin etmeyi amaçlamışlardır. REBA metodu ile her personelin duruş pozisyonu riske değerlendirmesini, hedef programlama ile de yeteneğe göre planlama yapmak için kullanmışlardır. Adem ve Dağdeviren (2021) çalışanların metabolik ağırlıklarına uygun sıcaklıklara maruz kalacakları işlere atayacak ve aynı zamanda işletmenin amaçlarını da etkileyen bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Aksüt vd. (2021), tekstil fabrikasında kadın çalışanlar için Analitik Ağ Süreci(ANP) ve PROMETHEE yöntemlerini kullanarak ergonomik risk değerlerini hesaplamışlardır. En yüksek riske sahip bölüm dikimhane olarak bulunmuştur. Pınarbaşı (2022), orta gerilim sigorta üretimi yapan bir firmadaki gerçek verileri kullanarak bir kısıt programlama modeli önererek ergonomik personel çizelgeleme gerçekleştirmişlerdir. İlk olarak personel ergonomik risk skorlarını REBA metodu ile belirlemiş, daha sonra da elde edilen risk skorlarını en küçükleyecek şekilde görevlere personel atamasını gerçekleştirmiştir. Aksüt vd. (2022), tişört üretimi yapan bir tekstil firmasında ergonomik risklere maruz kalan kadın çalışanlar için dikimden paketlemeye kadar olan bütün üretim sürecindeki 15 görevin ergonomik risk skorlarını REBA metodu ile belirlemişlerdir. Elde ettikleri risk skorlarını hedef programlama ile bütünleştirerek iş çizelgesi oluşturmuşlardır. Aksüt vd. (2022), Covid-19 döneminde uzaktan çalışan öğretmenlerin cep telefonu, tablet, dizüstü bilgisayar ve masaüstü bilgisayar kullanımında maruz kalacakları riskleri Analitik Ağ Süreci (ANP) ile hesaplamışlardır.

Literatürde yapılan çalışmaların özetlenmiş hali Tablo 1’de verilmiştir. Çalışmalar uygulandıkları alan bazında değerlendirildiğinde üretim ve hizmet sistemleri olarak iki farklı sektörel uygulamaya rastlanmaktadır. Literatürdeki çalışmalar için kullanılan yöntemlerde

çoğunlukla tamsayılı programlama, hedef programlama gibi model temelli yöntemler, REBA, OCRA gibi ergonomik risk ölçme yöntemlerinin kullanıldığı görülmektedir.

Tablo 1. Literatürde Yapılan Çalışmalar

YAZAR ADI	ERGONOMİK FAKTÖR	YÖNTEM
Carnahan vd. (2000)	Taşınan nesnelerin ağırlığı, taşıma mesafesi, tekraralama frekansı	Tamsayılı Programlama, Genetik Algoritma
Malladi ve Min (2004)	Ergonomik ve finansal kriterler	Analitik Hiyerarşi Yöntemi, Tamsayılı Programlama
Seçkiner ve Kurt (2005)	Radyasyon miktarı	Tamsayılı Programlama
Yaoyuenyong ve Nanthavanij (2006)	Gürültü miktarı	Sezgisel Yöntem
Aryanezhad vd. (2009)	Gürültü değeri ve sırt ağrısı	Hedef Programlama
Asensio-Cuesta vd. (2011)	Yorgunluk faktörü	ECRot
Cheshmehgaz vd. (2012)	Birikimli risk değeri	Bulanık Hedef Programlama
Wongwien ve Nanthavanij (2012)	Gürültü değerleri	Tamsayılı Programlama
Xu vd. (2012)	El aktivitesi	Karışık Tamsayılı Programlama
Otto ve Scholl (2013)	OCRA İndeksi	Tabu Arama
Rattanamanee ve Nanthavanij (2013)	Ergonomik tehlikeye maruz kalma risk değeri	Tamsayılı Programlama
Wongwien ve Nanthavanij (2013)	Rassal risk değeri üretimi	Karışık Tamsayılı Programlama
Wang ve Liu (2014)	Yorgunluk faktörü	Yorgunluk Kısıtlı MM
Akbari (2015)	Yorgunluk faktörü	Genetik Algoritma
Boenzi vd. (2015)	OCRA indeksi	OCRA
Dewi ve Septiana (2015)	Fiziksel ve zihinsel iş yükü	NASA TLX
Bautista vd. (2016)	Fiziksel iş yükü	Karışık Tamsayılı Programlama, GRASP
Mossa vd. (2016)	OCRA indeksi	OCRA, Tamsayılı Programlama
Moussavi vd. (2016)	Fiziksel özellikler	Tamsayılı Programlama
Song vd. (2016)	Fiziksel iş yükü	Tamsayılı Programlama
Yoon vd. (2016)	REBA Skoru	REBA, Matematiksel Modelleme
Battini vd. (2017)	Ergonomik ağırlık miktarı	Matematiksel Modelleme
Bedir vd. (2017)	Ergonomik risk faktörü	Analitik Hiyerarşi Yöntemi, Hedef Programlama
Hochdörffer vd. (2018)	El-parmak sistemi	Tamsayılı Programlama
Moussavi vd. (2018)	Fiziksel iş yükü	Hedef Programlama
Şenyiğit ve Atıcı (2018)	RULA Skoru	RULA
Alakaş vd. (2019)	REBA Skoru	REBA, Hedef Programlama
Sana vd. (2019)	OCRA, RULA ve NIOSH değerleri	Hedef Programlama, Genetik Algoritma
Aksüt vd. (2020)	Fiziksel, bilişsel, örgütsel, çevresel, bireysel ve psikososyal faktörler	-
Kaçmaz vd. (2020)	REBA Skoru	REBA, Hedef Programlama
Adem ve Dağdeviren (2021)	Metabolik faktörler	Karışık Tamsayılı Programlama
Aksüt vd. (2022)	Fiziksel, bilişsel, örgütsel, çevresel, bireysel ve psikososyal faktörler	ANP, PROMETHEE
Pınarbaşı (2021)	REBA Skoru	REBA, Kısıt Programlama
Aksüt vd. (2022)	REBA Skoru	REBA, Hedef Programlama
Aksüt vd. (2022)	Çalışma süresi, duruş, ve fiziksel çevre, fiziksel faktörler	ANP

Yapılan bu çalışma savunma sanayi alt tedarikçisi olan fabrikada uygulamalı olarak gerçekleştirilip, literatüre ergonomik personel çizelgeleme problemi hakkında örnek bir çalışma olarak sunulmuştur. Çalışmada ergonomik personel çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Operatörler için vardiya sapmalarını en küçükleyecek personel çizelgeleme ve diğer personeller için ergonomik risk maruziyetini en aza indireyecek ergonomik personel çizelgeleme yapılmıştır. İşletmeden alınan veriler kullanılarak, görevlerin ergonomik risk değerleri REBA metodu ile hesaplanmıştır. Daha sonra operatörlerin yetkinlikleri ve görevlerin ergonomik risk değerleri göz önünde bulundurularak model oluşturulmuştur. Modeller, ILOG CPLEX Optimization programı ile çözülerek çizelgeler elde edilmiştir. Bu çalışmanın literatürdeki diğer çalışmalardan farkı hem operatörler için yapılan vardiya çizelgeleme ve ergonomik risk faktörünün etkili olduğu departmanlardaki personeller için ergonomik personel çizelgeleme problemlerinin aynı çalışma içerisinde gerçekleştirilmesidir.

3.Kullanılan Yöntemler

Literatüre bakıldığında; ergonomik personel çizelgeleme çalışmalarında çoğunlukla REBA metodu ile birlikte hedef programlamanın kullanıldığı görülmektedir. Bu çalışmada da departmanlardaki görevlerin risk değerlerinin hesaplanmasında REBA metodu, personellerin vardiyalara eşit ve dengeli atanmasında ise hedef programlama yöntemi kullanılmıştır.

3.1. REBA (Hızlı Tüm Vücut Değerlendirmesi)

Ergonomik analiz uygulamaları için farklı çözüm yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemler, hareket esnasında kas-iskelet sisteminin hangi bölgesinde baskı oluştuğunu farklı teknikler ile değerlendirmektedir. Bu amaçla kullanılan ergonomik analiz yöntemleri arasında; RULA (Rapid Upper Limb Assessment), NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health), REBA (Rapid Entire Body Assessment), OWAS (Ovako Working Posture Analysing System) ve LMM (Lumbar Motion Monitor) bulunmaktadır.

Bu çalışmanın gerçekleştirildiği firma bir savunma sanayi firması olmasından ve ağır malzemeler kullanılmasından dolayı bir görev gerçekleştirilirken birden çok pozisyon değişikliği bulunmaktadır. Görevin yapılışı esnasında çalışanın duruşunu hem sabit hem de dinamik hareketlerle bir bütün olarak dikkate alınarak tüm vücut faaliyetleri üzerinde ergonomik risk faktörünün sayısal hesabının yapılmasında REBA metodunun uygun olduğu kararı verilmiştir.

REBA metodu bütün vücut bir bütün olarak düşünerek yapılan bir risk değeri ölçme yöntemidir. Yöntemin uygulanması ve duruş analizlerinin yapılması için çalışmanın fotoğraf ve/veya video ile analiz edilmesi önerilir. Elde edilen görüntülerde en çok yapılan, fiziksel kuvvet gerekli işler, işçiyi zorlayan, daha çok zaman gerektiren hareket seçilerek duruş analizi yapılır.

REBA metodunda; belirlenen bir çalışma duruşunun REBA skoru hesaplanırken vücut kısımları A ve B grubu olarak ikiye ayrılır. A grubu gövde, boyun ve bacaklardan oluşur; B grubu ise üst kollar, alt kollar ve bileklerden oluşur. REBA metodundaki diğer faktörler, yükün kaldırılmasındaki kolaylık derecesi, yükün nasıl kavrandığı, hareketin yapıldığı sıklık değeri ve hareket haline ek olarak dönme, bükülme hareketlerinin olup olmadığıdır (Kocabaş, M., 2009).

3.1.1. REBA metodunun adımları

Adım 1: Görevin Gözlemi

Görev gerçekleştirilirken; çalışanın vücut duruşu, ekipmanları kullanımı, kullanılan ekipmanın ile çalışan arasındaki uyum, çalışmanın gerçekleştirildiği ortam, genel çevre vb. gözlemlenmesi, imkan varsa fotoğraf ya da video ile görevlerin kayıt altına alınması gerçekleştirilir.

Adım 2: Değerlendirilecek Duruşun Seçilmesi

Görevlerin değerlendirilmesinden sonra görev için hangi duruşunun değerlendirileceği seçilir. Seçim yapılırken, çalışan kas sayısının fazla olması ya da güç gerektiren, tekrarı ve süresi en uzun olan, kas iskelet sistemi üzerinde oluşacak yükü en çok etkileyen duruş seçilebilir. Bahsedilen durumlardan bir ya da birden fazlasını içeren duruşlar göz önünde bulundurularak seçim yapılabilir.

Adım 3: Duruşların Puanlaması

A grubu olan gövde, boyun ve bacaklar için hareket biçimleri, skor ve skor değişimi Ek A'da Tablo A ile verilmiştir. Tablo A'daki Şekil 3 gövde hareketleri ve skorlarını, Şekil 4 boyun hareketleri ve skorlarını, Şekil 5 bacak hareketlerini ve skorlarını göstermektedir. Gövde ve boyun için harekete ek olarak yana esneme ve dönme varsa hareketin skoruna +1 eklenir. Bacaklarda 30°-60° arası fleksiyon varsa +1, 60°'den büyük fleksiyon varsa +2 eklenir.

Adım 4: Puanların İşlenmesi

Gövde, boyun ve bacaklar için hesaplanan skorlardan tek bir skor elde etmek için Ek A'de verilen Tablo B'da skor kesişimlerine denk gelen sayıya Ek A'daki Tablo C'de verilen Yük/kuvvet skoru eklenerek A skoru elde edilir. B grubu olan üst kollar, alt kollar ve bilekler için hareket biçimleri, skor ve skor değişimi Ek A'da Tablo D'de verilmiştir. Tablo D'deki Şekil 6 üst kol hareketleri ve skorlarını, Şekil 7 alt kol hareketleri ve skorlarını, Şekil 8 bilek hareketlerini ve skorlarını göstermektedir. Üst kollar, alt kollar ve

bilekler için hesaplanan skorlardan tek bir skor elde etmek için Ek A'da verilen Tablo E'de skor kesişimlerine denk gelen sayıya Tablo F'de verilen Kavrama skoru eklenerek B skoru elde edilir. Tablo G'de A skoru ve B skorunun kesişimine denk gelen sayı C skorunu verir. C skoruna Tablo H'de verilen Aktivite skoru eklenerek duruşun REBA skoru elde edilir.

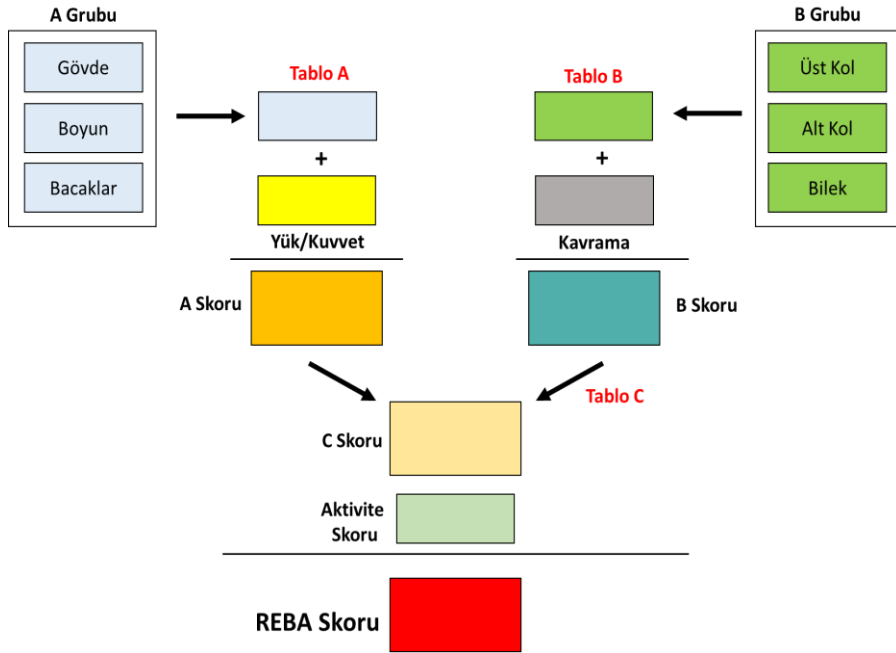
Adım 5: Önlemlerin Belirlenmesi

REBA skorlarının hangi risk düzeyine denk geldiği, hangi risk derecesine ve bu riski önlemek için ne yapılması gerektiği Tablo 2'de verilmiştir. Bu tabloya göre REBA Skoru 1 olan duruşun risk derecesi 0 olur ve herhangi bir önlem alınmasına gerekli değildir. Ancak REBA Skoru 11-15 olan duruşun risk derecesi 4 olur ve önlemin hemen alınması gereklidir.

Tablo 2. REBA Skoru

DERECE	REBA SKORU	RİSK SEVİYESİ	ÖNLEM
0	1	İhmal Edilebilir	Gerekli değil
1	2-3	Düşük	Gerekli olabilir
2	4-7	Orta	Gerekli
3	8-10	Yüksek	Kısa zaman içerisinde gerekli
4	11-15	Çok Yüksek	Hemen gerekli

Yapılan her bir görev için REBA skor değeri yukarıda anlatılan adımlar ve Şekil 1'de verilen hesaplama diyagramı ile belirlenir. Elde edilen REBA skorları önerilecek olan hedef programlama modelinin REBA skoru, A skoru ve B skoru olmak üzere ergonomik hedef kısıtları olarak kullanılacaktır. Önerilen modelin amaç fonksiyonu da elde edilen bu skorlarda oluşacak sapma değerlerinin en küçüklenmesi olarak belirlenmektedir. Oluşturulan modelde üç skurun birlikte değerlendirilmesi ile personelin vücut duruşundaki ergonomik dengeyi sağlayarak tüm organlara olan yükün daha dengeli dağılmasına olanak sağlamaktadır.



Şekil 1. REBA Metodu Planlama Diyagramı

3.2. Hedef programlama modeli

İlk hedef programlama çalışması 1955 yılında Charnes vd. tarafından gerçekleştirilmiştir. Sonrasında hedef programlamayı geliştirmek amacıyla 1961 yılında Charnes ve Cooper çalışmalar yapmışlardır (Aktürk vd., 2017)

Hedef programlama, bir ya da birden fazla amaca sahip problemlerin modellenmesinde sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem ile yapılmak istenen amaç fonksiyonunun maksimizasyonu veya minimizasyonu değil; var olan kısıtlar ile ulaşılmak istenen hedeflerdeki d_i^+ ve d_i^- simgeleriyle gösterilen sapma değişkenlerini minimize etmektir (Ignizio, 1985).

Hedeflerin önemleri karar vericilere göre birbirinden farklı olabilmektedir. Bu durumda amaç fonksiyonu yazılırken öncelikli ya da ağırlıklı yöntemler kullanılabilir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde hedef programlama; tek hedefli, eşit ağırlıklı çok hedefli, ağırlıklı çok hedefli, öncelikli çok hedefli, ağırlıklı-öncelikli çok hedefli programlama olmak üzere 5 farklı şekilde gruplandırılabilir (Bayraktar, 2019).

Gür ve Eren (2018), literatürde hedef programlama yönteminin kullanıldığı çalışmaları bir literatür taraması yaparak değerlendirmişlerdir. Ayrıca yine Gür ve Eren (2018) hedef programlama yönteminin kullanıldığı konulardan birisi olan ameliyathane çizelgeleme problemleri için de literatürde yapılan çalışmaları literatür taraması ile incelemiştir.

Matematiksel gösterimi şu şekildedir;

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^t (d_i^+ + d_i^-)$$

$$\sum_{j=1}^n w_{ij}x_j + d_i^+ + d_i^- = k_i$$

$$d_i^+ * d_i^- = 0$$

$$x_j, d_i^+, d_i^- \geq 0 \quad i = 1 \dots t \quad j = 1 \dots n$$

Değişkenler;

x_j = j. karar değişkeni

w_{ij} = i. hedefin j. karar değişkeni ağırlık katsayısı

k_i = i. hedef için ulaşılmak istenen değer

d_i^+ = i. hedefin pozitif sapma değişkeni

d_i^- = i. hedefin negatif sapma değişkeni

Hedef programlamada ilk olarak karar vericinin hedeflerini belirleyerek bu hedefleri ağırlıkları ve sapmaları ile beraber kısıt olarak yazması gerekir. Kısıtlardaki sapma değişkenlerinin negatif değer almaması ve hedefin hem üst hem de altında değer almaması için sapmalardan birisi mutlaka sıfır olmalıdır. Bu da sapmaların çarpımının sıfıra eşitlenmesi ile mümkün olmaktadır. Daha sonra amaç fonksiyonuna sapmaların önem sıralarına ya da ağırlıklarına göre yazılmasıyla hedeflerdeki sapmaların minimize edilmesi sağlanır (Ediz ve Yağdıran, 2009).

4. Uygulama

Ankara İvedik OSB’de 1500 m²’lik kapalı alana sahip Türk savunma sanayisine talaşlı üretim yapan bir fabrikada gerçekleştirilmiştir. Fabrika 2007 yılında ilk olarak madencilik sektörü için üretimler yapmak amacıyla kurulmuştur. Ancak sürekli gelişen savunma sanayisinin ihtiyaçlarını karşılamak ve büyüme elde etmek amacıyla devlet teşviği yardımıyla 2017 yılından itibaren üretim hattını baştan tasarlamıştır. İşletme 34’ü operatör, 8’i tesviye personeli, 10’u kalite kontrol personeli ve 8’i temizlik personeli olmak üzere toplam 60 personel haftanın 6 günü üç vardiya şeklinde üretim yapmaktadır. Gerekli durumlarda ek mesai yapılmaktadır.

Firmanın üretim bölümünde torna, freze ve beş eksen olmak üzere 3 makine grubundan toplam 15 makine bulunmaktadır. Üretilen parçaların savunma sanayinde kullanılmasından dolayı üretimde çalışan operatörler titiz ve kaliteli iş çıkarmak zorundadır. Bu nedenle operatör seçimi yapılırken dikkat edilmesi gereken en önemli husus operatörün makine bilgisi ve kullanım yetkinliğidir.

Üretimin yanı sıra üretilen parçaların son temizliklerinin yapıldığı tesviye bölümü ve hassas ölçümlerin yapılarak teslimat için hazırlandığı kalite kontrol bölümü de büyük öneme sahiptirler. Ayrıca firmaya sürekli müşteri ziyaretleri olduğu için firma içerisindeki temizliğe de önem verilmektedir. Bu sebeple bu bölümlerde çalışan personellerin verimlilikleri ve rahat bir ortamda çalışmaları firma için çok önemlidir. Aylık olarak çalışma çizelgeleri hazırlanırken; operatörlerin yetkinlikleri, personellerin özel istekleri ve görevlerin ergonomik risk faktörleri göz önünde bulundurulmaktadır.

4.1. Problemin tanımı

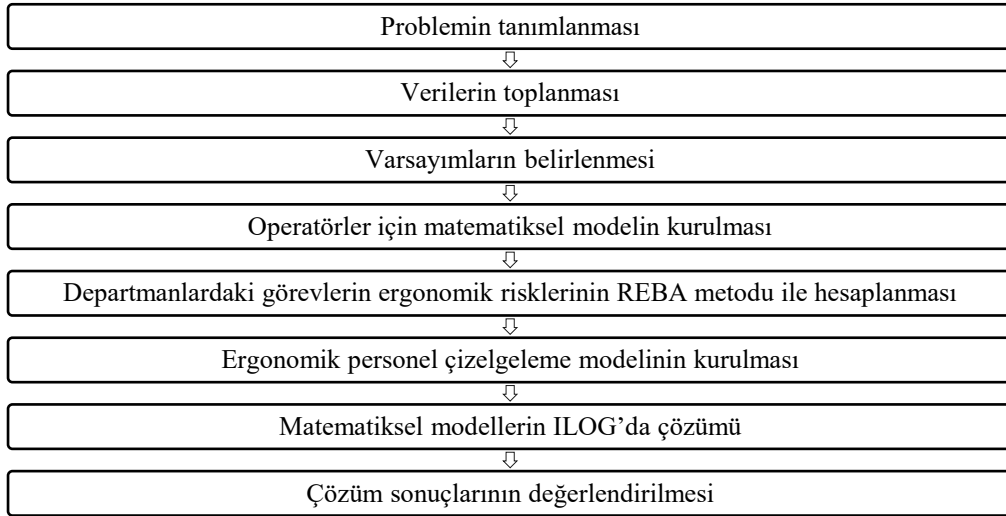
Bu çalışmada, iki ayrı matematiksel model ve iki amaç bulunmaktadır. Birinci amaç, operatörleri yetkinliklerine göre makinelerle atayarak dengeli bir çizelge elde etmektir. Bunun için ilk olarak operatörlerin makinelerdeki yetkinlikleri ve özel istekleri tespit edilmiştir. Her bir operatörün fabrika içerisindeki makinelerde yetkinlikleri farklıdır. Bazı operatörler tüm makinelerde çalışırken bazı operatörler sadece belli makinelerde çalışabilmektedir. Bu bilgiler göz önünde bulundurularak bir aylık vardiyalara atanmalarındaki sapmaları minimize edecek matematiksel model kurulmuştur. Problemin ikinci amacı da üretim dışındaki tesviye, kalite kontrol ve temizlik departmanlarındaki çalışan personellerin görevlere atanmasında risk değerini en küçükleyecek çizelge oluşturmaktır. Bu nedenle, ilk olarak departmanlardaki görevler belirlenmiştir. İkinci olarak REBA metodu görevlerin risk değerleri hesaplanarak bu değerler hedef programlama ile modellenmiştir. Model, personel üzerinde oluşacak toplam ergonomik yüklerin en küçüklenmesini amaçlamaktadır.

4.2. Problemin varsayımları

Modellerin geliştirilmesi aşamasında aşağıdaki varsayımlar dikkate alınmıştır:

- Bir personel için günlük çalışma süresi en fazla 480 dakikadır.
- Operatörler her gün yetkinlikleri oldukları makinelerden sadece birine atanabilmektedir.
- Kalite kontrol, tesviye ve temizlik bölümünde çalışan personeller her gün sadece bir göreve atanabilmektedir.
- Her personel sadece çalıştığı departmandaki görevlere atanabilmektedir.
- Görevlerin gerçekleşme süreleri önceden belirlenmiştir.
- İşletmenin bünyesindeki süreçler göz önünde bulundurularak her görevin gerçekleşmesi için gerekli personel sayısı belirlenmiştir.
- REBA metodu ile her bir görevin ergonomik değerlendirilmesi yapılmış ve skorları hesaplanmıştır.
- A skorunun, B skorunun ve toplam REBA skorunun en küçüklenmesi amaçlanmıştır.
- Her personel çalıştıkları hafta boyunca aynı vardiyaya atanmaktadır.

Problemin akış şeması Şekil 2’de verilmiştir. Bu şemaya göre önce uygulama için veriler toplanmıştır. Verilerin toplanmasından sonra varsayımlar belirlenmiştir. Departmanlardaki görevlerin ergonomik riskleri REBA metodu ile belirlendikten sonra matematiksel modeller kurulmuştur. Modellerin ILOG Cplex Optimization programında çözülmesi ile elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.



Şekil 2. Uygulamanın Akış Şeması

4.3. Operatörler için çizelgeleme

Firma, torna-freze ve beş eksen olmak üzere 3 makine grubundan toplam 15 makineye sahiptir. Bu makinelerde toplamda 34 operatör çalışmaktadır. Her makinenin kendine özgü farklı özellikleri bulunduğu için her operatör her makine hakkında yeterli bilgi birikimi ve kullanma tecrübesine sahip değildir. Aşağıda verilen Tablo 3’de hangi operatörlerin hangi makinelerde yetkinliği olduğu gösterilmiştir. Bu tabloda 1-4 arası makine torna grubunu, 5-12 freze grubunu ve 13-15 beş eksen CNC makinelerini temsil etmektedir.

<

$p2_i^-$ = Hedef 2'nin negatif sapması

$p3_i^-$ = Hedef 3'ün negatif sapması

Amaç Fonksiyonu:

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^{34} (p1_i^+ + p1_i^- + p2_i^+ + p2_i^- + p3_i^+ + p3_i^-) \quad (1)$$

Kısıtlar:

$$\sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^{15} x_{ijkl} \leq 1 \quad \forall i, j \mid j=7,14,21,28 \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{34} \sum_{k=1}^3 x_{ijkl} \leq 5 \quad \forall l, j \mid 7,14,21,28 \quad (3)$$

$$x_{ijkl} \leq T_{il} \quad \forall i, k, l, j \mid 7,14,21,28 \quad (4)$$

$$x_{4j3l} = 0 \quad \forall l, j \mid 7,14,21,28 \quad (5)$$

$$x_{13j3l} = 0 \quad \forall l, j \mid 7,14,21,28 \quad (6)$$

$$x_{28j3l} = 0 \quad \forall l, j \mid 7,14,21,28 \quad (7)$$

$$(h_{ij} + h_{i(j+1)} + h_{i(j+2)} + h_{i(j+3)} + h_{i(j+4)} + h_{i(j+5)} + h_{i(j+6)}) \geq 1 \quad \forall i \mid j = 1, \dots, 22 \mid 7,14,21,28 \quad (8)$$

$$\sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^{15} x_{ijkl} = (1 - h_{ij}) \quad \forall i, j \mid 7,14,21,28 \quad (9)$$

$$\sum_{l=1}^{15} (x_{ijkl} - x_{i(j+1)kl} - h_{i(j+1)}) \leq 0 \quad \forall i, j \mid 7,14,21,28, k \quad (10)$$

$$h_{8j} = 1 \quad j = 8, \dots, 13 \quad (11)$$

$$h_{12j} = 1 \quad j = 15, \dots, 27 \quad (12)$$

$$\sum_{j=1}^{28} \sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^{15} x_{ijkl} - d1_i^+ + d1_i^- = 24 \quad \forall i \quad (13)$$

$$\sum_{j=1}^{28} \sum_{l=1}^{15} x_{ij2l} - d2_i^+ + d2_i^- = 6 \quad \forall i \quad (14)$$

$$\sum_{j=1}^{28} \sum_{l=1}^{15} x_{ij3l} - d3_i^+ + d3_i^- = 6 \quad \forall i \quad (15)$$

Önerilen matematiksel modelin amaç fonksiyonu (1) operatörlerin bir aylık çizelgede atandıkları vardiya 1, vardiya 2 ve toplam vardiya sayısındaki sapmaları en küçüklemeyi hedeflemektedir. Kısıt (2) her operatörün her gün sadece bir vardiyaya ve bir makineye atanması gerektiğini göstermektedir. Her gün her makineye bütün vardiyalar boyunca atanacak operatör sayısı (3) ile sağlanmaktadır. Operatörlerin yetkinliğinin olduğu makine/makinelere atanması (4) kısıtı ile gerçekleşmektedir. 4'üncü, 13'üncü ve 28'inci personeller özel sebeplerden dolayı vardiya 3'e atanmak istememektedir. Bu özel durum (5), (6) ve (7) kısıtı ile sağlanmaktadır. (8) ile operatörün ardı ardına 6 günden fazla çalışmaması ve operatörün izinli olduğu gün çalışmaması (9) ile sağlanmaktadır. Operatörlerin haftalık olarak tek vardiyaya atanması (10) ile gerçekleşmektedir. (11) kısıtı 8'inci operatörün 8-13. günler arasında senelik izinde olmasını ve (12) 12'inci operatörün 15-27. günler arası senelik izinde olmasını sağlamaktadır. (13), (14) ve (15) amaç fonksiyonuna etki eden kısıtlardır. Bu kısıtlarda oluşacak pozitif ve negatif sapmalar operatörlerin bir aylık çalışmasında vardiyardan sapmaları belirlemeyi sağlayacaktır.

4.4. Departmanlar için çizelgeleme

Üretimden sonra parçaların son temizlik işlemleri tesviye bölümünde yapılmaktadır. Tesviye bölümünde toplamda 8 personel, 3 vardiyada görev almaktadır. Hassas ölçümlerin yapılarak teslimat için hazırlandığı kalite kontrol bölümünde 10 personel 2 vardiya şeklinde çalışmaktadır. Firma sürekli müşterilerin uğrak yeri olduğu için temizliğe büyük önem verilmektedir. Temizlik için 8 personel vardiya 1 ve vardiya 2’de görev yapmaktadır. Bu 3 departmanda yapılan toplam 10 görev aşağıda detaylı olarak açıklanmaktadır.

Firmada üretilen her parçaların kenarlarında çapaklar kalmaktadır ve bu da üretilen parçanın hem ölçümünde hata yapılmasına hem de diğer dış proseslerde (kaplama, kumlama, boya, tahribatsız muayene gibi) sorun çıkmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle tesviye bölümünde son çapak alma işlemi yapılmaktadır. Ayrıca parçalara diş açmak için kılavuz çekilmekte ve açılan dişlinin uzun süre kullanılması için helicoil takılmaktadır. Bu görevlerin gerçekleşmesinde daha çok kol gücü gereklidir. Bu nedenle bu 3 görevin Grup B puanı (üst kol- alt kol- bilek) daha yüksek çıkmıştır.

Firmada üretilen her parça her aşamada kalite kontrolden geçmektedir. Firmaya giriş yapan hammaddelere ilk olarak giriş kalite kontrol yapılmaktadır. Giriş kalite kontrolde hammaddeler kaldırılır, taşınır ve ölçümü yapılır. Hammaddelerin giriş alanından alınıp ölçüm noktasına taşınmasında beden gücü çok fazla gereklidir. Daha sonra hammaddeler teknik resimlere uygun şekilde makinelerde işlem görmektedir. Makine başında operatör ile birlikte üretilen parçaların ara kontrolleri yapılmaktadır. Bu ara kontrolün yapılmasındaki en büyük amaç oluşabilecek hataya yerinde ve anında müdahale etmektir. Üretimi bitip tesviye bölümünde temizlikleri yapılan tüm parçalar %100 ölçüme tabi tutulmaktadır. Ölçüm yapılırken; parçanın hassas, manuel olarak ölçümü zor ölçüleri hassas ölçüm cihazı olan CMM cihazıyla ölçülürken manuel ölçümleri yapılacak ölçüler kumpas, mikrometre, mihengir gibi ölçüm aletleri ile yapılmaktadır. Ölçümü ve kaynağında muayenesi tamamlanan ürünler sevkiyata hazırlanır. Hassas olan parçaların sevkiyatta herhangi bir zarar görmemesi için özenle paketlenmesi ve her ürünün izlenebilirliğinin sağlanması için ayrı ayrı etiketlenmesi gerekir. Paketleme ve etiketleme işlemi daha çok eğilip doğrulama eylemi gerektirdiği için REBA puanı çok yüksek çıkmaktadır. Bu 4 görevin yapılmasında daha çok beden gücüne ihtiyaç duyulduğu için REBA skorları ortalamasının üzerindedir.

Firma savunma sanayisine çalışmakta olduğu için en küçük hataya karşı hem müşteriler hem de firma çalışanları büyük özveriyle çalışmaktadır. Üretilen parçalar büyük projelerin parçaları olduğu için müşteriler üretimi yakından takip etmek, hataları minimum seviyede tutmak ve kaliteyi ön plana çıkarmak için sık sık firma ziyaretinde bulunmaktadır. Bu ziyaretlerde müşterilerin gözünde firma imajını arttırmak için temizliğe büyük önem verilmektedir. Her gün tüm firma süpürülmekte, paspaslanmakta ve toz alınmaktadır. Bu görevlerden yer süpürme diğer iki göreve nazaran daha çok beden gücü gerektirmektedir. Yer süpürme görevinin REBA skoru ortalamasının üzerindedir.

3 departmandaki personellere karşılık gelen numaralar, toplam 10 görevin; hangi departmanlara ait olduğu, görev numaraları, hangi vardiyalarda yapılacağı, her görev için vardiyalarda kaç personelin bulunması gerektiği Tablo 4’de verilmiştir.

Tablo 4. Tesviye, Kalite Kontrol ve Temizlik Departmanları Görev, Vardiya ve Gerekli Personel Bilgisi

Departman	Karşılık Gelen Numaralar	Görev No.	Görevler	Vardiya			Gereken Personel Sayısı
				1	2	3	
Tesviye Departmanı	35,...,42	1	Çapak alma	√	√		2
		2	Kılavuz çekme	√		√□	1
		3	Yüzey parlatma		√	√□	1
		4	Giriş kalite kontrol	√	√□		1
Kalite Kontrol Departmanı	43,...,52	5	Operatörler ile ara kontrol	√□	√□		1
		6	Parçaların ölçülmesi	√□			2
		7	Etiketleme ve kolileme	√□	√□		2
Temizlik Departmanı	53,...,60	8	Yer süpürme	√□			2
		9	Paspaslama	√□	√□		2
		10	Toz alma	√□			2

Görevlerin Grup A (Gövde – boyun – bacaklar), Grup B (üst kol – alt kol – bilek) ve REBA skorları ile görev süreleri Tablo 5’de verilmiştir. 10 görevin Skor A ortalaması 5 ve Skor B ortalaması 5 bulunmuştur. Skor A ve Skor B’nin REBA metodundaki tablosu

kullanılarak elde edilen Skor C'ye Aktivite skoru da eklenerek her görevin REBA puanı hesaplanmıştır. 10 görevin REBA ortalaması da 7 bulunmuştur.

Tablo 5. Görevlerin REBA Skorları

Görev No.	Görevler	Grup A					Grup B										Aktivite Skoru	REBA Skoru	Görev Süresi (Dk)
		Gövde	Boyun	Bacaklar	Toplam	Yük Kuvvet	Skor A	Üst Kol	Alt Kol	Bilek	Toplam	Kavrama	Skor B	Skor C					
1	Çapak alma	2	2+1	1	4	0	4	3	2	1+1	5	0	5	5	1+1	7	475		
2	Kılavuz çekme	2+1	1+1	1	4	0	4	3+1	2	2+1	7	0	7	7	1	8	390		
3	Yüzey parlatma	2+1	2+1	1	5	0	5	2	2	1	2	0	2	4	1+1	6	430		
4	Giriş kalite kontrol	4	1	1+2	6	0	6	2	1	1+1	2	2	4	7	1	8	360		
5	Operatörler ile ara kontrol	1	2+1	1+2	5	0	5	3+1	2	2+1	7	1	8	8	0	8	383		
6	Parçaların ölçülmesi	2	2+1	1	4	0	4	3+1	2	2+1	7	1	8	8	1	9	473		
7	Etiketleme ve kolileme	3+1	2+1	1+1	7	1	8	3+1	1	1+1	5	1	6	10	1+1	12	310		
8	Yer süpürme	3+1	2+1	1+1	7	0	7	2+1	1	1	3	0	3	7	1+1	9	253		
9	Paspaslama	2+1	1	1	2	0	2	2+1	2	2+1	5	0	5	4	1	5	280		
10	Toz alma	2	1	1	2	0	2	1+1	1	1+1	2	0	2	2	1	3	440		
							5						5						

Parametreler:

i=personel (35,...,60)

j= gün (1,...,28)

k= vardiya (1,2,3)

l= görev (1,...,10)

Karar Değişkenleri:

$$y_{ijkl} = \begin{cases} \text{i. personel j. gün k. vardiyada l. göreve atanırsa 1,} \\ \text{diğer durumlarda 0} \end{cases} \quad i = 35, \dots, 60 \quad \forall j \mid 7, 14, 21, 28 \quad \forall k, \quad \forall l$$

$$h_{ij} = \begin{cases} \text{i. personel j. gün izinliyse 1,} \\ \text{diğer durumlarda 0} \end{cases} \quad i = 35, \dots, 60 \quad \forall j \mid 7, 14, 21, 28$$

T_{kl} = k. vardiyada l. görev için gerekli personel sayısı

$s1_i^+$ = REBA A puan hedefinden pozitif sapma

$s2_i^+$ = REBA B puan hedefinden pozitif sapma

$s3_i^+$ = REBA puan hedefinden pozitif sapma

$s1_i^-$ = REBA A puan hedefinden negatif sapma

$s2_i^-$ = REBA B puan hedefinden negatif sapma

$s3_i^-$ = REBA puan hedefinden negatif sapma

Amaç Fonksiyonu:

$$\text{Min } z = \sum_{i=35}^{60} (s1_i^- + s1_i^+ + s2_i^- + s2_i^+ + s3_i^- + s3_i^+) \quad (16)$$

Kısıtlar:

$$\sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^{10} y_{ijkl} = 1 \quad \forall i, j \mid 7,14,21,28 \quad (17)$$

$$y_{ijkl} = 0 \quad i = 35, \dots, 42 \quad \forall j \mid 7,14,21,28 \quad \forall k, \quad \forall l \mid 1,2,3,4 \quad (18)$$

$$y_{ijkl} = 0 \quad i = 43, \dots, 52 \quad \forall j \mid 7,14,21,28 \quad \forall k, \quad \forall l \mid 5,6,7 \quad (19)$$

$$y_{ijkl} = 0 \quad i = 53, \dots, 60 \quad \forall j \mid 7,14,21,28 \quad \forall k, \quad \forall l \mid 8,9,10 \quad (20)$$

$$\sum_{i=35}^{60} y_{ijkl} \geq T_{kl} \quad \forall j \mid 7,14,21,28 \quad \forall k \quad (21)$$

$$(h_{ij} + h_{i(j+1)} + h_{i(j+2)} + h_{i(j+3)} + h_{i(j+4)} + h_{i(j+5)} + h_{i(j+6)}) \geq 1 \quad \forall i \quad j = 1, \dots, 22 \mid 7,14,21,28 \quad (22)$$

$$h_{i7} = 1 \quad \forall i \quad (23)$$

$$h_{i14} = 1 \quad \forall i \quad (24)$$

$$h_{i21} = 1 \quad \forall i \quad (25)$$

$$h_{i28} = 1 \quad \forall i \quad (26)$$

$$\sum_{l=1}^{10} (y_{ijkl} - y_{i(j+1)kl}) - h_{i(j+1)} \leq 0 \quad \forall i \quad \forall j \mid 7,14,21,28 \quad \forall k \quad (27)$$

$$y_{42j3l} = 0 \quad \forall j \mid 7,14,21,28 \quad \forall l \quad (28)$$

$$y_{55jk10} = 1 \quad \forall j \mid 7,14,21,28 \quad \forall k \quad (29)$$

$$\sum_{j=1}^{28} \sum_{l=1}^{10} y_{ij2l} \leq 12 \quad \forall i \quad (30)$$

$$\sum_{j=1}^{28} \sum_{l=1}^{10} y_{ij3l} \leq 12 \quad \forall i \quad (31)$$

$$\sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^{10} y_{ijkl} * t_l * R_j - d1_i^+ + d1_i^- = \sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^{10} y_{ijkl} * t_l * 7 \quad \forall i, j \mid 7,14,21,28 \quad (32)$$

$$\sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^{10} y_{ijkl} * t_l * A_j - d2_i^+ + d2_i^- = \sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^{10} y_{ijkl} * t_l * 5 \quad \forall i, j \mid 7,14,21,28 \quad (33)$$

$$\sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^{10} y_{ijkl} * t_l * B_j - d3_i^+ + d3_i^- = \sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^{10} y_{ijkl} * t_l * 5 \quad \forall i, j \mid 7,14,21,28 \quad (34)$$

Önerilen matematiksel modelin amaç fonksiyonu (16) REBA, REBA A ve REBA B puanlarındaki sapmayı enküçükleyecek ergonomik risk değerleri minimum olacak görevlere atanmasını sağlamaktadır. Kısıt (17) her personelin her gün sadece bir vardiyaya atanması gerektiğini göstermektedir. (18), (19) ve (20) kısıtları ile her personelin kendi departmanı dışındaki görevlere atanmaması sağlanmaktadır. Her gün her görev için her vardiyada gerekli olan personel sayısı (21) ile karşılanmaktadır. (22) ile personelin ardı ardına 6 günden fazla çalışmaması; her personelin ayın 7'inci, 14'üncü, 21'inci ve 28'inci günlerinde çalışmaması (23), (24), (25), (26) kısıtları ile sağlanmaktadır. Personellerin haftalık olarak tek vardiyaya atanması (27) ile gerçekleşmektedir. 42'inci personel özel sebeplerden dolayı vardiya 3'e atanmak istememektedir. Bu özel durum (28) kısıtı ile sağlanmaktadır. 55'inci personelin isteği doğrultusunda sadece 10'uncu göreve atanması (29) ile gerçekleşmektedir. Her personelin aylık olarak Vardiya 2'ye 12 kez atanması (30) kısıtı ile, Vardiya 3'e 12 kez atanması (31) kısıtı ile sağlanmaktadır. (32), (33) ve (34) amaç fonksiyonuna etki eden kısıtlardır ve bu kısıtlarda oluşacak pozitif ve negatif sapmalar personelin ergonomik olarak risk değerini enküçükleyecek görevlere atanmasındaki sapmaları belirlemeyi sağlayacaktır.

4.5. Matematiksel modellerin sonuçları

Problemler için kurulan matematiksel modellerin çözülmesinde "Intel (R) Core (TM) i5-4210U CPU@1.70 GHz 2.40 GHz" işlemcisi, 8.00GB belleği, 64 bit İşletim Sistemi ve Windows 10 sürümüne sahip bilgisayar kullanılmıştır. Elde edilen veriler ve kurulan modeller ILOG CPLEX Studio IDE programına yazılmış ayrı ayrı yazılmış ve CPLEX çözücüsü ile çözülmüştür.

Modellerin sonuçlarına göre operatörler için yapılan yeni aylık ergonomik çizelge Ek B’de Tablo I’da verilmiştir. Tablo I’ya bakıldığında her bir operatörün bir aylık çizelgede hangi gün hangi vardiyada hangi makineye atandığı net olarak görülmektedir. Tablodaki “V1” Vardiya-1’e, “V2” Vardiya-2’ye ve “V3” Vardiya-3’e denk gelmektedir. Operatörlerin hangi makinalara atandığı 1-15 arasında makinalara karşılık gelen sayılar ile ifade edilmiştir. 1-4 arası makine torna grubunu, 5-12 freze grubunu ve 13-15 beş eksen CNC makinelerini temsil etmektedir.

Operatörlerin aylık olarak vardiyalara atanma sayıları ve toplam atandıkları vardiya sayısı Tablo 6’da gösterilmiştir. Çizelgede verilen toplam vardiya sayılarına bakıldığında tüm operatörler için aylık toplam vardiya sayıları mümkün olduğunca eşit ve dengeli olarak dağıtılmıştır. Bu tabloda görüldüğü üzere vardiya sayısı hedefindeki en büyük negatif sapma 12 iken en küçük negatif sapma 0’ dır. 4’üncü, 13’üncü ve 28’inci operatörlerin özel isteği olan 3’üncü vardiyalara atanmaması matematiksel modelle sağlanmıştır. Bu çizelgeye bakıldığında eşit ve dengeli atanmaları için diğer operatörler gibi toplam vardiya sayısı 24 olacak şekilde bir atamanın gerçekleştiği görülmektedir. Modelin amaç fonksiyonu değeri 36 olarak bulunmuştur.

Tablo 6. Operatörlerin Aylık Atandıkları Vardiya Sayıları

Operatör	V1	V2	V3	Toplam Vardiya	Operatör	V1	V2	V3	Toplam Vardiya
1	12	6	6	24	18	12	6	6	24
2	12	6	6	24	19	12	6	6	24
3	12	6	6	24	20	12	6	6	24
4	18	6	-	24	21	12	6	6	24
5	12	6	6	24	22	12	6	6	24
6	12	6	6	24	23	12	6	6	24
7	12	6	6	24	24	12	6	6	24
8	6	6	6	18	25	12	6	6	24
9	12	6	6	24	26	12	6	6	24
10	12	6	6	24	27	12	6	6	24
11	12	6	6	24	28	18	6	-	24
12	-	6	6	12	29	12	6	6	24
13	18	6	-	24	30	12	6	6	24
14	12	6	6	24	31	12	6	6	24
15	12	6	6	24	32	12	6	6	24
16	12	6	6	24	33	12	6	6	24
17	12	6	6	24	34	12	6	6	24

Departmanlardaki diğer personeller için ergonomik risk değerleri göz önünde bulundurularak kurulan matematiksel modelin çözülmesi sonucu yeni aylık ergonomik çizelge Ek B’de Tablo J’de verilmiştir. Tablo J’ye bakıldığında tesviye, kalite kontrol ve temizlik departmanlarındaki her bir personelin bir aylık çizelgede hangi gün hangi vardiyada hangi göreve atandığı net olarak görülmektedir. Tablodaki “V1” Vardiya-1’e, “V2” Vardiya-2’ye ve “V3” Vardiya-3’e denk gelmektedir. Personellerin hangi görevlere atandığı 1-10 arasında görevlere karşılık gelen sayılar ile ifade edilmiştir. Tesviye departmanındaki çapak alma, kılavuz çekme ve yüzey parlatma görevleri 1-3 arası sayılarla; kalite kontrol departmanındaki giriş kalite kontrol, operatörler ile ara kontrol, parçaların ölçülmesi ve etiketleme ve kolileme görevleri 4-7 arası sayılarla; temizlik departmanındaki yer süpürme, paspaslama ve toz alma görevleri 8-10 arası sayılarla ifade edilmektedir.

Tablo J’e bakıldığında tesviye, kalite kontrol ve temizlik departmanlarında çalışan toplamda 26 personelin yapmış oldukları görevlerin ergonomik risk değerleri göz önünde bulundurularak kurulan matematiksel modeldeki kısıtları sağlayacak şekilde atamasının yapıldığı görülmüştür. Her personel sadece bulunduğu departmandaki görevleri yerine getirecek şekilde haftanın 6 günü 3 vardiya şeklinde atanmıştır. Her görev için her gün her vardiyada gerekli olan personel sayısının karşılanacak şekilde atamanın yapıldığı görülmüştür. 7’inci, 14’üncü, 21’inci ve 28’inci günler tüm personeller için izin günüdür ve hiçbir şekilde atama yapılmamıştır. Her personelin çalışma haftası boyunca sadece tek vardiyaya atandığı görülmüştür. 55’inci personelin kendi isteğiyle sadece 10’uncu göreve atandığı kısıtının sağlandığı görülmektedir.

Tablo 7’a bakıldığında departmanlardaki personellerin bir aylık çalışma çizelgesinde vardiyalara kaç kez atandığı ve bir ayın sonunda toplam REBA değerleri görülmektedir.

Tablo 7. Departman Personellerinin Aylık Atandıkları Vardiya Sayıları ve REBA Değeri

Personel	V1	V2	V3	Toplam Vardiya	Görev ve Çalışma Süreleri	Toplam REBA Değeri	Personel	V1	V2	V3	Toplam Vardiya	Görev ve Çalışma Süreleri	Toplam REBA Değeri
35	12	12	-	24	1 (475)	11400	48	12	12	-	24	4 (360)	8640
36	12	12	-	24	1 (475)	11400	49	24	-	-	24	6 (473)	11352
37	12	-	12	24	2 (390)	9360	50	12	12	-	24	7 (310)	7440
38	-	12	12	24	3 (430)	10320	51	12	12	-	24	5 (383)	9192
39	-	12	12	24	3 (430)	10320	52	12	12	-	24	7 (310)	7440
40	12	12	-	24	1 (475)	11400	53	24	-	-	24	8 (253)	6072
41	12	-	12	24	2 (390)	9360	54	12	12	-	24	9 (280)	6720
42	12	12	-	24	1 (475)	11400	55	24	-	-	24	10 (440)	10560
43	12	12	-	24	7 (310)	7440	56	24	-	-	24	10 (440)	10560
44	12	12	-	24	5 (383)	9192	57	12	12	-	24	9 (280)	6720
45	12	12	-	24	4 (360)	8640	58	24	-	-	24	8 (253)	6072
46	24	-	-	24	6 (473)	11352	59	12	12	-	24	9 (280)	6720
47	12	12	-	24	7 (310)	7440	60	12	12	-	24	9 (280)	6720

5. Sonuç

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde bu çalışmanın ergonomik personel çizelgeleme çalışmalarında savunma sanayine yön vereceği düşünülmektedir. Bu çalışmada Türk savunma sanayisinin alt tedarikçilerinden birisi olan firmada bulunan üretimdeki 34 operatörün ve tesviye, kalite kontrol, temizlik departmanlarındaki 26 personelin ergonomik personel çizelgelemesi yapılmıştır. Toplamda 60 personelin bir aylık olarak dengeli ve istenilene uygun olarak vardiyalara atanması sağlanmıştır. Veriler firmadan alındıktan sonra varsayımlar belirlenmiştir. İlk olarak üretimdeki operatörler için matematiksel model kurulmuştur. Daha sonra diğer departmanlardaki görevler belirlenmiş ve görevlerin ergonomik risk değerleri REBA metodu ile hesaplanmıştır. Elde edilen değerler kullanılarak matematiksel model kurulmuştur. Kurulan iki model ILOG CPLEX Studio IDE programında ayrı ayrı çözdürülerek optimal çözüme ulaşılmaya çalışılmıştır.

Firmadaki mevcut durumda operatörlerin makinalara ve vardiyalara ataması rastgele ve özel istekler göz ardı edilerek yapılmaktaydı. Yeni önerilen model ile operatörlerin yetkinliklerine uygun makinalara atanması, özel isteklerinin karşılanması ve adil bir çalışma ortamının oluşturulması sağlandı. Modelin kısa sürede sonuç vermesi ile de çizelgenin hazırlanmasındaki zaman kaybı en az seviyeye indirgenmiş oldu. Yapılan bu çizelge; operatörlerin verimliliğinin artması, iş kalitesinin artması, iş kazalarının azalması ve daha sistemli bir çalışma ortamının oluşmasına olanak sağlayacaktır.

Tesviye, kalite kontrol ve temizlik departmanlarındaki personellerin mevcut durumda görevlere atanması gerçekleştirilirken ergonomik riskler gözardı edilmekteydi. Bu çalışma ile birlikte personeller görevlere ergonomik risk değerleri göz önünde bulundurularak atanmıştır. Bu yeni çizelge sayesinde hem personellerin maruz kaldıkları ergonomik risk değerleri azaltılmış hem de iş yorgunluğu azaltılmış ve yorgunluğa bağlı meslek hastalıkları önlenmeye çalışılmıştır. Ayrıca yapılan yeni çizelge iş verimliliğinin de artmasına katkı sağlayacaktır.

İleride yapılacak çalışmalarda savunma firmasındaki tüm görevlerin ergonomik risk değerleri farklı hesaplama yöntemleri ile hesaplanabilir. Elde edilen değerler diğer programlama yöntemlerinde kullanılarak sonuçlar karşılaştırılabilir. Aylık çizelge yerine haftalık olarak da vardiya çizelgelenebilir. Daha fazla personel, daha fazla görev, daha fazla birim ve daha fazla vardiya için matematiksel modellemeler yerine sezgisel algoritmalar kullanılabilir, personellerin talepleri ve tercihleri de göz önüne alınarak özel kısıtlı hedef programlama ile yeni çözümler üretilebilir.

Bilgilendirme

Bu çalışma 28. Ulusal Ergonomi Kongresi'nde sunulmuştur.

Referanslar

- Adem, A. & Dağdeviren, M. (2021). A personnel scheduling model containing thermal comfort and equivalent metabolic rate factors, *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 36(1), 303-317.
- Akbari, M. (2015). Tour scheduling for part-time employee with variable productivity, *Proceedings of the 2015 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Dubai, United Arab Emirates (UAE)*, 3 – 5 March.
- Aksüt, G. Alakaş H.M. Eren, T., & Karaçam, H. (2022). Fiziksel ergonomik riskli personel çizelgeleme problemi için model önerisi: Kadın çalışanlar için tekstil sektöründe bir uygulama, *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Dergisi*, 38(1), 245-256.
- Aksüt, G., Eren, T., & Tüfekçi, M. (2021) Tekstil sektöründe kadın çalışanların maruz kaldığı ergonomik risklerin çok kriterli karar verme yöntemleri ile belirlenmesi, *Endüstri Mühendisliği*, 32 (1), 12-33.
- Aksüt, G., Eren, T. & Tüfekçi, M., (2021). Tekstil sektör çalışanlarının maruz kaldığı ergonomik risklerin analitik ağ süreci ile değerlendirilmesi, *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 13 (1), 231-242.
- Aksüt, G., Tüfekçi, M., & Eren, T., (2020). Ergonomik Risk Faktörlerinin Sınıflandırılması Bir Literatür Taraması, *Ergonomi*, 3(3), 169-192.
- Aksüt, G., Alakaş, H.M., & Eren, T., (2022-baskıda). Determining ergonomic risks arising from the use of information technologies in the covid-19 environment, *International Journal of Human-Computer Interaction*.
- Aktürk M.S., Varlı E., & Eren T., (2017). Tam Gün Vardiyalı ve Özel İzin İstekli Hemşire Çizelgeleme Probleminin Hedef Programlama İle Çözümü, *Kırıkkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 7(2), 1-16.
- Alakaş, H.M., Pınarbaşı, M., Sönmez, İ. & Yüksel, A. (2019). Ergonomic staff task scheduling problem: A medium voltage insurance production application, *5th International Conference on Engineering Sciences-ICES*. Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Ankara,Turkey, 19 September.
- Aryanezhad, M. B., Kheirkhah, A. S., Deljoo V., & Mirzapour Al-e-hashem, S. M. J., (2009).Designing safe job rotation schedules based upon workers' skills, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 41(1-2), 193-199.
- Asensio-Cuesta S., Diego-Mas J. A., Canós-Darós L., & Andrés-Romano, C., (2011). A genetic algorithm for the design of job rotation schedules considering ergonomic and competence criteria, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 60(9-12), 1161-1174.
- Battini D., Glock C., Grosse E., Persona A., & Sgarbossa F., (2017).Ergo-lot-sizing: An approach to integrate ergonomic and economic objectives in manual materials handling, *International Journal of Production Economics*, 185, 230–239.
- Bautista J., Garcia C., & Pozo R., (2016). Models for assembly line balancing bytemporal, spatial and ergonomic risk attributes, *European Journal of Operational Research*, 251, 814–829.
- Bayraktar E., (2019).Tamsayılı Hedef Programlama ve Hemşire Çizelgeleme Problemi için Bir Uygulama, *Yüksek Lisans Tezi*, Pamukkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Denizli.
- Bedir N., Eren T., & Dizdar E.N., (2017). Ergonomik Personel Çizelgeleme ve Perakende Sektöründe Bir Uygulama, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 5(3), 657-674.
- Boenzi, F., Mossa, G., Mummolo, G., & Romano, V. A., (2015). Workforce aging in production systems: Modeling and performance evaluation, *Procedia Engineering*, 100, 1108-1115.
- Carnahan, B. J., Redfern, M. S., & Norman, B., (2000). Designing safe job rotation schedules using optimization and heuristic search, *Ergonomics*, 43(4), 543-560.
- Cheshmehgaz, H.R., Haron, H., Kazemipour, F., & Desa, M. I., (2012). Accumulated risk of body postures in assembly line balancing problem and modeling through a multi-criteria fuzzy-genetic algorithm, 63, 503–512.
- Dewi, D.S., & Septiana, T., (2015). Workforce scheduling considering physical and mental workload: A case study of domestic freight forwarding, *Procedia Manufacturing*, 4, 445 – 453.

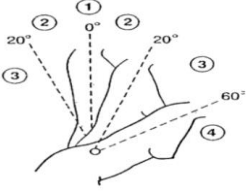
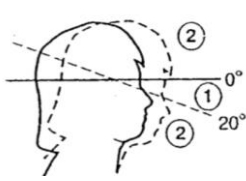
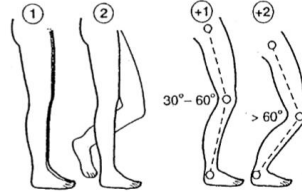
- Eren T. & Güner E., (2002). Tek ve paralel makinalı problemlerde çok ölçütlü çizelgeleme problemleri için bir literatür taraması, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 17 (4), 37-69.
- Eren T. & Güner E., (2004). Çok ölçütlü akış tipi çizelgeleme problemleri için bir literatür taraması, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 10 (1), 19-30.
- Eren T., Özder E.H., & Varlı E., (2017). Hedef Programlama Yaklaşımı İle Temizlik Personeli Çizelgeleme Problemi İçin Bir Model Önerisi, Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi, 7(2), 114-127.
- Ernst, A.T. Jiang, H., Krishnamoorthy, M., Owens, B., & Sier, D. (2004). An annotated bibliography of personnel scheduling and rostering, *Annals of Operations Research*, 127, 21–144.
- Gür, Ş., & Eren, T., (2018). Scheduling and planning in service systems with goal programming: literature review, *Mathematics*, 6, 265.
- Gür, Ş., & Eren, T., (2018). Application of operational research techniques in operating room scheduling problems: a literature overview, *Journal of Healthcare Engineering*, 1-15.
- Hochdörffer, J., Hedler, M., & Lanza, G., (2018). Staff scheduling in job rotation environments considering ergonomic aspects and preservation of qualifications, *Journal of Manufacturing Systems*, 46, 103-114.
- Ignizio J., (1985). *Introduction to Goal Programming*, Sage Publications Inc, Beverley Hills, California, Usa.
- Kaçmaz S.Ö., Alakaş H.M., & Eren T., (2020). Ergonomic staff scheduling problem with goal programming in glass industry, *Journal of Turkish Operations Management*, (4)1, 369-377.
- Kocabaş, M. (2009). Ağır ve Tehlikeli İşlerde Çalışan İş Görenlerde Zorlanmaya Neden Olan Çalışma Duruşlarının Analizi, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Malladi, S. & Min, K. J. (2004). Workforce scheduling with costs and ergonomic considerations. Paper presented at the IIE Annual Conference, Institute of Industrial Engineers, May 15-19, 2004, Hilton Americas, Houston, Texas.
- Mossa, G., Boenzi F., Digiesi, S., Mummolo, G., & Romao, V.A., (2016). Productivity and ergonomic risk in human based production systems: A job-rotation scheduling model, *International Journal of Production Economics*, 171, 471–477.
- Moussavi, S. E., Mahdjoub, M., & Grunder, O., (2018). A multi-objective programming approach to develop an ergonomic job rotation in a manufacturing system, *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 850-855.
- Moussavi, S.E., Mahdjoub, M., & Grunder, O., (2016). Reducing production cycle time by ergonomic workforce scheduling, *IFAC-PapersOnLine*, 419–424.
- Otto, A., & Scholl, A., (2013). Reducing ergonomic risks by job rotation scheduling, *OR spectrum*, 35(3), 711.
- Özder, E.H., Özcan E., & Eren T., (2019). Staff task-based shift scheduling solution with an ANP and goal programming method in a natural gas combined cycle power plant, *Mathematics*, 7(192), 2-26.
- Özder, E.H., Özcan, E.C., & Eren, T., (2020). A Systematic Literature Review for Personnel Scheduling Problems, *International Journal of Information Technology and Decision Making*, 19 (6): 1695-1735.
- Pınarbaşı M. (2022). Ergonomik Personel Görev Çizelgeleme Problemi: Çok Amaçlı Bir Kısıt Programlama Modeli ve Vaka Çalışması, *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 14(1), 141-154.
- Rattanamane, T. & Nanthavanij, S. (2013). Multi-Workday Ergonomic Workforce Scheduling With Days Off, *Proceedings of the 4th International Conference on Engineering, Project, and Production Management*, 1(1), 1117-1125.
- Sana S. S., Ospina-Mateus H., Arrieta F. G., & Chedid J. A., (2019). Application of genetic algorithm to job scheduling under ergonomic constraints in manufacturing industry, *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 10(5), 2063-2090.
- Seçkiner S.U., & Kurt M., (2005). Bütünleşik Tur-Rotasyon Çizelgeleme Yaklaşımı İle İşyükü Minimizasyonu”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 20(2), 161-169.

- Song J., Lee C., Lee W., Bahn S., Jung C., & Yun M. H., (2016). Development of a job rotation scheduling algorithm for minimizing accumulated work load per body parts, *Work*, 53(3), 511-521.
- Şenyigit, E., & Atıcı U., (2018). Scheduling with Job Dependent Learning Effect and Ergonomic Risk Deterioration, 2nd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT) IEEE, 1-4.
- Wang T.C., & Liu C.C., (2014). Optimal Work Shift Scheduling with Fatigue Minimization and Day Off Preferences”, *Mathematical Problems in Engineering*, 1(1), 1-8.
- Wongwien, T. & Nanthavanij, S. (2012). Ergonomic workforce scheduling under complex worker limitation and task requirements: Mathematical model and approximation procedure, *Songklanakarin Journal of Science ve Technology*, 34(5), 541-549.
- Wongwien, T. ve Nanthavanij, S. (2013). Ergonomic Workforce Scheduling With Productivity And Employee Satisfaction Consideration, *Proceedings of the 4th International Conference on Engineering, Project, and Production Management*, 1(1), 1108-1116.
- Xu, Z., Ko, J., Cochran, D., & Jung, M., (2012). Design of assembly lines with the concurrent consideration of productivity and upper extremity musculoskeletal disorders using linear models, *Computers ve Industrial Engineering*, 62, 431–441.
- Yaoyuenyong, S. & Nanthavanij, S. (2006). Hybrid procedure to determine optimal workforce without noise hazard exposure, *Computers ve Industrial Engineering*, 51(4), 743-764.
- Yoon, S., Ko, J., & Jung, M., (2016). A model for developing job rotation schedules that eliminate sequential high workloads and minimize between-worker variability in cumulative daily workloads: Application to automotive assembly lines, *Applied Ergonomics*, 55, 8-15.

Ek A. REBA Skor Tabloları

Bu ek bölümünde REBA metodunun anlatıldığı Bölüm 3’deki REBA skorunun hesaplanması için gerekli skor tablolarına yer verilmiştir. Bölüm 3’teki bahsi geçen ilgili tablolar Tablo A, Tablo B, Tablo C, Tablo D, Tablo E, Tablo F, Tablo G ve Tablo H’de verilmiştir.

Tablo A. REBA Metodu Grup A Puan Tablosu

		GÖVDE		
		Hareket	Skor	Skor Değişimi
	Şekil 3. Gövde Hareketleri ve Skorları	Dik	1	
		0°-20° Fleksiyon	2	Yana esneme
		0°-20° Ekstansiyon		veya dönme varsa
		20°-60° Fleksiyon	3	+1
		> 20° Ekstansiyon		
	Şekil 4. Boyun Hareketleri ve Skorları	BOYUN		
		Hareket	Skor	Skor Değişimi
		0°-20° Fleksiyon	1	
	Şekil 5. Bacak Hareketleri ve Skorları	BACAKLAR		
		Hareket	Skor	Skor Değişimi
		Bilateral (iki taraflı) ağırlık taşıma, yürüme veya oturma	1	Diz(ler)de 30°-60° arası fleksiyon +1
		Unilateral (tek taraflı) ağırlık taşıma veya sabit olmayan duruş	2	Diz(ler)de >60° fleksiyon (oturma hariç) +2

Tablo B. A Grubu Skor Kesişimleri
BOYUN

		1				2				3			
		BACAKLAR				BACAKLAR				BACAKLAR			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
GÖVDE	1	1	2	3	4	1	2	3	4	3	3	5	6
	2	2	3	4	5	3	4	5	6	4	5	6	7
	3	2	4	5	6	4	5	6	7	5	6	7	8
	4	3	5	6	7	5	6	7	8	6	7	8	9
	5	4	6	7	8	6	7	8	9	7	8	9	9

Tablo C. Yük/Kuvvet Skoru

YÜK / KUVVET	SKOR
<5 kg	0
5 – 10 kg	1
> 10 kg	2
Ani veya hızlı kuvvet artışı	+1

Tablo D. REBA metodu Grup B Puan Tablosu

Şekil 7. Üst Kol Hareketleri ve Skorları

Şekil 8. Alt Kol Hareketleri ve Skorları

Şekil 9. Bilek Hareketleri ve Skorları

ÜST KOLLAR

Hareket	Skor	Skor Değişimi
20° Fleksiyon - -20° Ekstansiyon	1	Kol dönmüş veya dışarı çekilmişse +1
20°-45° Fleksiyon	2	
> 20° Ekstansiyon	3	Omuz yükseltilmişse +1
45°-90° Fleksiyon		
> 90° Fleksiyon	4	Eğer hareket yerçekimi desteği ile yapılıyorsa -1

ALT KOLLAR

Hareket	Skor	
60°-100° Fleksiyon	1	
< 60° Fleksiyon		
> 100° Ekstansiyon	2	

BİLEKLER

Hareket	Skor	Skor Değişimi
0°-15° Fleksiyon veya Ekstansiyon	1	Bilekte yana esneme veya dönme varsa +1
> 15° Fleksiyon veya Ekstansiyon	2	

Tablo E. B Grubu Skor Kesişimleri

		ALT KOL					
		1 BİLEK			2 BİLEK		
		1	2	3	1	2	3
ÜST KOL	1	1	2	2	1	2	3
	2	1	2	3	2	3	4
	3	3	4	5	4	5	5
	4	4	5	5	5	6	7
	5	6	7	8	7	8	8
	6	7	8	8	8	9	9

Tablo F. Kavrama Skoru

DERECE	AÇIKLAMA	SKOR
İyi	İyi bir tutma kolu ve orta şiddette kavrama gücü	0
Uygun	El tutuşu uygun fakat ideal değil veya vücudun başka bir bölgesi le kavrama uygun	1
Kötü	El tutuşu uygun olmamasına rağmen mümkün	2
Uygun Değil	Zor ve güvenli olmayan tutuş, tutma kolu yok Vücudun başka bir bölgesi kullanılarak tutuş uygun değil	3

Tablo G. A Skoru ve B Skoru Kesişimi (C Skoru)

		B SKORU											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A SKORU	1	1	1	1	2	3	3	4	5	6	7	7	7
	2	1	2	2	3	4	4	5	6	6	7	7	8
	3	2	3	3	3	4	5	6	7	7	8	8	8
	4	3	4	4	4	5	6	7	8	8	9	9	9
	5	4	4	4	5	6	7	8	8	9	9	9	9
	6	6	6	6	7	8	8	9	9	10	10	10	10
	7	7	7	7	8	9	9	9	10	10	11	11	11
	8	8	8	8	9	10	10	10	10	10	11	11	11
	9	9	9	9	10	10	10	11	11	11	12	12	12
	10	10	10	10	11	11	11	11	12	12	12	12	12
	11	11	11	11	11	12	12	12	12	12	12	12	12
	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12

Tablo H. Aktivite Skoru

AKTİVİTE	SKOR
Bir veya daha fazla vücut bölgesi sabit (ör: 1 dakikadan uzun süre tutma)	+1
Kısa aralıklarla tekrar eden işler (ör: 1 dakikada 4'ten fazla tekrar eden iş)(yürüme hariç)	+1
Yapılan iş duruşta hızlı ve büyük değişikliğe neden oluyorsa veya sabit olmayan zeminde çalışılıyorsa	+1

Tablo J. (devam) Departmanlardaki Personeller İçin Aylık Vardiya Çizelgesi**GÜNLER**

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
56	V1	10	10	10	10	10	10		10	10	10	10	10	10		10	10	10	10	10	10		10	10	10	10	10	10	
	V2																												
	V3																												
57	V1								9	9	9	9	9	9		9	9	9	9	9	9								
	V2	9	9	9	9	9	9																9	9	9	9	9	9	
	V3																												
58	V1	8	8	8	8	8	8		8	8	8	8	8	8		8	8	8	8	8	8		8	8	8	8	8	8	
	V2																												
	V3																												
59	V1	9	9	9	9	9	9																9	9	9	9	9	9	
	V2								9	9	9	9	9	9		9	9	9	9	9	9								
	V3																												
60	V1								9	9	9	9	9	9									9	9	9	9	9	9	
	V2	9	9	9	9	9	9									9	9	9	9	9	9								
	V3																												