



A personnel scheduling model containing thermal comfort and equivalent metabolic rate factors

Aylin Adem*^{ID}, Metin Dağdeviren^{ID}

Industrial Engineering, Gazi University, Ankara, 06570, Turkey

Highlights:

- A mathematical model proposal was presented for the ergonomic job rotation scheduling.
- The importance of thermal comfort in the work environment was pointed out.
- Both metabolic ratio equal values and thermal comfort parameters were included in the proposed model.

Keywords:

- Job Rotation Schedules
- Ergonomics
- Mathematical Modeling
- Thermal Comfort
- Equivalent Metabolic Rate

Article Info:

Research Article
Received: 08.02.2020
Accepted: 20.07.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.685805

Correspondence:

Author: Aylin Adem
e-mail:
aylinadem@gazi.edu.tr
phone: +90 312 582 3822

Graphical/Tabular Abstract

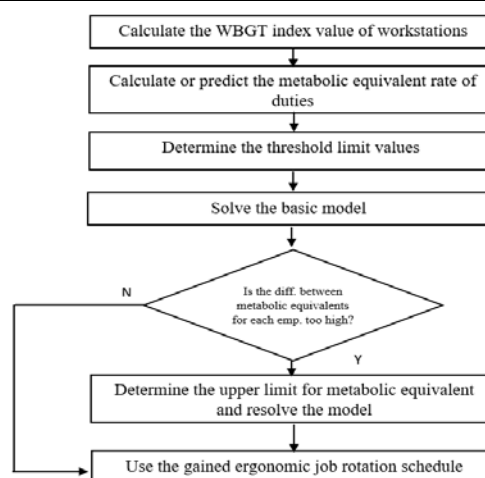


Figure A. The proposed approach

Purpose: Thermal comfort is one of the most important physical risks encountered in work systems. The applicability of the climatic precautions to be taken to provide thermal comfort for the employees in production environments may not be possible due to required quality characteristics of the products or economic reasons. In this case, protecting employees from heat stress and heat stress-related diseases is only possible with certain administrative measures. One of the quick and effective administrative measures that can be taken will be the rotation of employees among duties. The purpose of this study is to determine optimal job rotation schedules which includes thermal comfort and metabolic equivalent rates.

Theory and Methods: Firstly, a mathematical model with assignment cost minimization and thermal comfort constraint was proposed. After that, the proposed model was resolved by determining an upper limit on the equivalent metabolic rate to ensure the protection of the employees in every respect. The proposed models were developed using a mixed-integer mathematical modelling approach.

Results: The proposed models were solved with the help of the Game 24.9.2 package program. The job rotation schedules which include both traditional and ergonomic characteristics were obtained.

Conclusion: According to the gained results, there is a trade-off between ergonomic and economic aims. The proposed model can be employed in any production environment with small changes. Exposure to extreme temperatures in production environments causes a number of negativities such as attention deficit and somnolence. For this reason, it is an important requirement including the thermal comfort parameter to job rotation schedules



Termal konfor ve metabolik oran eşiti faktörlerini içeren personel çizelgeleme modeli

Aylin Adem*^{ID}, Metin Dağdeviren^{ID}

Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 06570 Maltepe Ankara, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Bu çalışmada ergonomik iş değişim çizelgesi için matematiksel model önerisi sunulmuştur
- İş ortamındaki termal konforun önemine dikkat çekilmiştir
- Hem metabolik oran eşiti değerleri hem de termal konfor parametreleri önerilen modele dahil edilmiştir

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 08.02.2020

Kabul: 20.07.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.685805

Anahtar Kelimeler:

İş değişim çizelgesi,
ergonomi,
matematiksel modelleme,
termal konfor,
metabolik oran eşiti

ÖZET

Termal konfor iş sistemlerinde karşılaşılan önemli fiziksel risklerden biridir. Özellikle yaz aylarındaki mevsimsel sıcaklıklara ek olarak çalışma ortamındaki artan sıcaklık çalışan verimliliğini olumsuz olarak etkilemektedir. İş sistemlerinde, çalışan açısından termal konforun sağlanması için alınması gereken iklimik önlemlerin uygulanabilirliği, ürünlerin taşınması gereken kalite özellikleri ya da ekonomik sebepler nedeni ile çoğu zaman mümkün olmamaktadır. Bu durumda çalışanların aşırı sıcaklardan ve bu sıcaklığın çalışmada oluşturacağı ısı stresi ve ısı stresine bağlı rahatsızlıklardan korunması ancak yönetsel birtakım önlemlerle mümkün olabilmektedir. Bu noktada alınabilecek hızlı ve etkili yönetsel önlemlerden biri de çalışanların işler arasında rotasyona tabi tutulması ile termal açıdan ortaya çıkabilecek risklerin çalışanlar arasında paylaşılmasıdır. Bu çalışmada çalışanların termal açıdan yaptıkları işlerin metabolik ağırlığına uygun sıcaklıklara maruz kalmalarını sağlayan, aynı zamanda klasik işletme amaçlarını da dikkate alan bir matematiksel model geliştirilmiştir. Termal konfor parametresinin sağlanması sırasında işlerin metabolik oran eşiti değerlerinin de dikkate alınması, çalışanların her iki parametre açısından da korunmasını sağlamıştır.

A personnel scheduling model containing thermal comfort and equivalent metabolic rate factors

H I G H L I G H T S

- In this study, a mathematical model proposal was presented for the ergonomic job rotation scheduling
- The importance of thermal comfort in the work environment was pointed out
- Both metabolic ratio equal values and thermal comfort parameters were included in the proposed model

Article Info

Research Article

Received: 08.02.2020

Accepted: 20.07.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.685805

Keywords:

Job-rotation schedules,
ergonomics,
mathematical modelling,
thermal comfort,
equivalent metabolic rate

ABSTRACT

Thermal comfort is one of the most important physical risks encountered in work systems. In addition to the seasonal temperatures, especially in the summer months, the rising temperature in the work environment negatively affect the productivity of the employees. The applicability of the climatic precautions to be taken to provide thermal comfort for the employees in production environments may not be possible due to required quality characteristics of the products or economic reasons. In this case, protecting employees from heat stress and heat stress-related diseases is only possible with certain administrative measures. One of the quick and effective administrative measures that can be taken in this sense will be the rotation of employees among duties and the distribution of risks that may arise thermally among employees. In this study, a mixed-integer mathematical model, which considers both the thermal conditions of the employees and the classical economic issues about the company simultaneously, was proposed. Taking into account the metabolic rate equal values of the duties while ensuring the thermal comfort parameter enabled the protection of the employees in terms of both parameters.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: aylinadem@gazi.edu.tr, metindag@gazi.edu.tr / Tel: +90 312 582 3822

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İş sistemlerindeki gelişmelere bağlı olarak, -her ne kadar fiziksel iş gücüne olan ihtiyaç azalsa da- ülkemizde ve diğer gelişmekte olan ülkelerde, özellikle Küçük ve Orta Büyüklükteki İşletmelerde (KOBİ) fiziksel iş gücü, üretim faaliyetlerinin gerçekleştirilmesinde hala çok önemli bir yere sahiptir. Üretimin sorunsuz devam edebilmesi, işletme ortamındaki diğer faktörlere (sermaye, makine-teçhizat vb.) olduğu kadar hatta daha yüksek oranda insan faktörünün sağlıklı ve konforlu olmasına bağlıdır. Motivasyonel sebepler ve diğer duygusal durumlar nedeni ile yönetilmesi zor olan insan kaynaklarının iş yerinde sağlıklı bir şekilde faaliyetlerini sürdürmesi aynı zamanda bazı yasal düzenlemelerle de kontrol edilmektedir. Birçok açıdan oldukça kritik olan işgücünün iş ortamındaki fiziksel ergonomik risk faktörlerine maruz kalmaları da bazı durumlarda kaçınılmaz olabilmektedir.

Demir çelik işletmeleri, briket ve seramik fabrikaları, otomotiv parçaları üreten işletmeler gibi cam ürünleri üretim işletmeleri, plastik ürünleri üreten işletmeler, mutfaklar, fırınlar gibi sıcak üretim ortamlarında görev yapan çalışanlar genellikle ağır çevresel sıcaklıklara maruz kalmakta ve bu durum onların sağlığı açısından da ciddi tehlike ve riskler oluşturarak iş verimliliğini düşürmektedir. Ayrıca bazı üretim ortamlarında genellikle ortam sıcaklığının ilgili makine ve teçhizatın sürekli çalışması nedeni ile arttığı ve yüksek sıcaklıklara maruz kalındığı da bilinmekte olup, üretilen ürünlerin sağlaması gereken kalite özelliklerinden dolayı makinelerin ya da üretim birimlerinin sıcaklıklarına doğrudan müdahale edilememektedir. Morris vd. [1] çalışmalarında özellikle emek yoğun işlerde çalışanların vücutlarında fazladan ısı üretilmesinin, çevresel sıcaklık faktörleri ile bütünleşerek sağlığa zarar verecek boyutlarda ısı stresine neden olabileceğini belirtmişlerdir. Birçok KOBİ'nin emek yoğun süreçler kapsamında üretim yaptığı ve küresel ısınma ile atmosferik şartların daha da ısındığı faktörü dikkate alınınca önümüzdeki yıllarda birçok işletme için ısı stresinin iş sağlığı ve güvenliği boyutunun ciddi bir önem kazanacağını söylemek mümkündür. Ergonominin temelinde işin insana, insanın da işe uyumu vardır. Aynı zamanda kişinin çalışma hayatını sağlıklı bir şekilde sürdürmesi de ergonominin önemli amaçlarından biridir. Üretim ortamındaki fiziksel risk faktörlerinin kontrol altına alınması ve bu yolla meslek hastalıklarının önlenmesi üretim verimliliği ve işgücünün korunması açısından da oldukça önemlidir. Üretim ortamındaki fiziksel risk faktörlerinin alt başlıklarından biri de termal konfordur. Çalışanları sağlıklarını olumsuz etkileyecek yüksek sıcaklıklardan kişisel önlemlerle korumak mümkün olmazsa bir takım yönetsel önlemlerin planlanması gerekir. Ancak ürünlerin üretimi sırasında belirli seviyede tutulması gereken sıcaklıklar mevcut ise ya da üretim ortamına ekonomik gerekçeler ile müdahale edilemiyorsa, üretim ortamında termal konforu sağlamak mümkün olmayabilmektedir. İnsan vücudu dış dünyadaki sıcaklık değişimlerine rağmen vücut içinde sahip olduğu bir denge mekanizması ile vücut iç

sıcaklığını sabit tutabilmektedir. Kişilerin yaşamlarını devam ettirebilmek için gerekli olan vücut iç sıcaklığı yaklaşık 37°C'dır. İnsan vücudunun ortamdaki sıcaklığa göre (sıcak-soğuk fark etmeksizin) vücut sıcaklığını yaklaşık 37°C'da sabit tutması için harcaması gereken bir enerji vardır. Bu enerjinin fazla olması, yani kişinin termal konforunu sağlamak için fazladan çaba sarf etmesi iş yerindeki üretim verimliliğini olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle iş yerindeki termal konfor şartlarının çalışanların kendilerini rahat hissedecekleri şekilde düzenlenmesi oldukça kritiktir. Ek olarak, termal konforun sağlanmadığı işletmelerde çalışanların mental olarak da olumsuz etkilendiği ve sıcaklığa bağlı olarak yapılan hataların sayısının arttığı da bilinmektedir [2]. Bununla birlikte çalışanları iş ortamındaki fiziksel risk faktörlerinden korumak için verilen kişisel koruyucu donanımların (KKD) (örn: gözlük, baret, eldiven, çelik burunlu ayakkabı, iş kıyafeti vb.) kişilerin vücudunda oluşan fazla ısının uzaklaşmasını engellediği de bilinmektedir. Çalışma ortamında KKD'lerin bu etkisini azaltmak isteyen çalışanların genellikle iş sırasında rahatsızlık duydukları KKD'leri kullanmama eğilimi gösterdikleri gözlemlenmektedir [3]. Bu nedenle kişilerin hem sıcaklığa bağlı hastalıklardan korunması, hem yüksek sıcaklık kaynaklı hata risklerinin en aza indirilmesi, hem de vücutlarından sıcaklığı uzaklaştırırken diğer risklere maruz kalmamaları için iş çözelgelerinde sıcaklık faktörünün de dikkate alınması bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, günlük, haftalık ya da aylık bazda personel atamaları yapılırken, çalışanların maruz kalacakları sıcaklıkların da dikkate alınması ergonomik açıdan ortaya çıkabilecek olası rahatsızlıkların (ısı çarpması, baygınlık, baş ağrısı, kas krampları, dikkat dağınılığı, baş dönmesi vb.) önlenmesi açısından önem arz etmektedir. Bütün bu açıklamalar ışığında, bu çalışmada, haftalık bir personel atama modeline termal konfora ilişkin kısıtların eklenmesine yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Frazer vd.[4] çalışmalarında, bazı vücut kısımlarına sürekli yüklenmenin kişinin sağlığı bozduğunu ve bu durumun iş değişim çözelgesi ile önlenebileceğini ifade etmişlerdir. Özellikle kas ve iskelet hastalıklarının önlenmesinde kolay ve ekonomik bir yönetsel kontrol aracı olarak görülen iş değişim çözelgelerinin hem iş yeri hem de çalışana katkılar sağladığı bilinmektedir. Çalışanların birçok farklı iş makinesinde ya da iş istasyonunda çalışması onların işletmede sadece bir işte özelleşen çalışanlar değil, tüm birimlerde çalışabilecek çalışanlar olmasına katkı sağlayacaktır. Aynı zamanda sürekli aynı işi yapmanın getirdiği tekdüzellik, motivasyon kayıpları ve bu tekdüzeliğin getirdiği hata yapma ihtimalinin düşürülmesi de yine iş değişim çözelgelerinin işletmelere ve çalışanlara yaptığı katkılar olarak değerlendirilebilir. Bir iş değişim çözelgesi stratejisinin başarılı bir çözelge olması, işlere ilişkin risklerin doğru belirlenmesine, ilgili risk maruziyeti limit değerlerinin doğru belirlenmesine ve iş değişiminin uygun planlanmasına bağlıdır [5]. Bu çalışmada termal konforun, ölçümü için literatürde en sık kullanılan WBGT (Wet Bulb Globe Temperature) indeksi ve American Conference of Governmental Industrial Hygienists-

ACGIH'in geliştirdiği limit değerleri kullanılacaktır. Çalışma kapsamında kişilerin ergonomik maruziyetlerinin günlük olarak hesaplanmasının ve farklı günlerdeki maruziyetler arasında bir ilişki kurulmamasının nedeni, Otto ve Scholl [6]'ün yaptıkları çalışmada da belirttikleri üzere, çalışanların vardiyalarından sonra ya da çalışma sürelerinin sonunda ilgili risk faktörüne olan maruziyetin bitmesi ve dinlenmek için yeterli sürenin olmasıdır. Termal konfora ilişkin teorik bilgilerin verildiği bir sonraki bölümde daha ayrıntılı bir şekilde ifade edildiği üzere, termal konfor parametresi daha çok yapılan işin ağırlığı ile ilgilidir. Kişinin çok daha ağır iş yaptığı durumlar için daha düşük sıcaklıklarda çalışması istenir. Bu durumun ergonomik açıdan ifadesi ise, yapılan işin ağırlığının artması dış çevre sıcaklığının yanı sıra kişinin metabolizması sonucunda da bir sıcaklık meydana gelmesi ve dış çevre sıcaklığı ile kişi üzerinde tümleşik bir etki oluşturması şeklinde açıklanabilir. Bu nedenle, bu çalışma kapsamında üretim ortamlarının sıcaklıklarının yanı sıra, yapılan işlerin metabolik oran eşiti değerleri de dikkate alınmıştır. Bu durum termal açıdan çalışanların daha rahat edebilecekleri iş atamalarının elde edilmesine olanak sağlarken, aynı zamanda ağır işlerin de çalışanlar arasında eşit bir şekilde dağıtılmasını sağlamıştır. Bu çalışma kapsamında önerilen model literatürde yer alan, sadece işletme amaçlarına hizmet eden iş değişim çizelgelerine termal konfor ve metabolik oran faktörleri açısından bir bakış getirdiği için literatürdeki çalışmalardan farklılaşmaktadır. Aynı zamanda çalışanın termal konforu üzerinde en etkili olan iki parametreyi dikkate alması (ortam sıcaklığı, görevlerin metabolik oran değerleri) ve çalışanların maruz kalacakları sıcaklıkların yapılan işin ağırlığına göre belirlenmesi, çalışanlar için çift yönlü bir koruma mekanizması oluşturmuştur. Ancak geliştirilen çizelgelerin sürdürülebilir ve başarılı çizelgeler olabilmesi için hem işletme amaçlarını hem de çalışan sağlığını gözeten çizelgeler olması gerekmektedir. Bu bağlamda, çalışanların termal açıdan ve metabolik oran değerleri açısından korunması sağlanırken, işletme amaçlarından en kıymetlilerinden biri olan çalışanların görevlere atanma maliyetleri de dikkate alınmıştır. Bu çalışma izleyen şekilde yapılandırılmıştır: Çalışmanın bir sonraki bölümünde iş ortamında termal konfor parametresi açıklanmış ve çalışanların termal konforlarının ölçülmesine ilişkin detaylı bilgi verilmiştir. Çalışmanın üçüncü bölümünde personel çizelgeleme çalışmalarında ergonomi kriterini göz önünde bulunduran araştırmacıların çalışmalarına yer verilmiştir. Çalışmanın dördüncü bölümünde, termal konfor ve metabolik oran eşiti parametrelerini dikkate alacak şekilde geliştirilen matematiksel model verilmiştir. Çalışmanın beşinci bölümünde, önerilen modelin uygulanabilirliğini göstermek için yapılan denemelere yer verilmiştir. Son olarak, çalışmanın altıncı bölümünde elde edilen sonuçlar tartışılmıştır.

2. TERMAL KONFOR VE ÖLÇÜMÜ (THERMAL COMFORT AND ITS MEASUREMENT)

Termal konfor şartları açısından bir üretim ortamı ele alındığında, iklim şartlarını etkileyen faktörler havanın hızı,

nemi, sıcaklığı ve ısı radyasyonu olarak ifade edilir [2]. Çalışma ortamı iklimini etkileyen faktörlerden en kritik olanları ortam sıcaklığı, ortamdaki nem düzeyi, hava akımı, radyant ısı, kişinin giyinme ve metabolizma düzeyleri olarak sıralanabilir. Çalışma ortamındaki sıcaklığın normal değerlerden çok yüksek ya da çok düşük olması, çalışanların bu sıcaklık seviyelerine uyumunu, buna bağlı olarak da sağlığını ve iş verimini etkileyebilir. Sıcaklığın insan üzerindeki etkisi ise birçok faktörün bütünlük etkisi ile ifade edilebilir. Bu faktörler ise: ortamdaki nem durumu, çalışanın yaşı, cinsiyeti ve kıyafeti olarak sayılabilir. Çalışma ortamının sıcaklığı, çalışanların gerek bedensel gerek zihinsel faaliyetlerini sürdürürken, belirli bir rahatlık içinde olmalarını sağlayacak nitelikte olmalıdır [2]. İnsan vücudu ancak belli bir dereceye kadar olan ısıyı dengeleyebilir. Dengelenemeyecek seviyede vücutta bir takım alarmlar başlar. Bu alarm seviyesi limit değer olarak adlandırılır. Limit değerler, iş yükü ve sıcaklığa maruz kalınan süre ile yakından ilişkilidir. Literatürde WBGT indeksi açısından geliştirilmiş çeşitli Isı Limit Değerleri (Threshold Limit Values-TLV) bulunmaktadır. Çevresel sıcaklık, nem, işin metabolik yükü ve çeşitli kıyafetlerin etkisinin toplam etkisi ısı stresini etkilemektedir [7]. Eğer mühendislik uygulamaları ve kontrolleri ile ısı stresi engellenemiyorsa yönetim kontrolleri devreye girecektir. Sıcaklığa maruz kalma zamanına bağlı olarak yapılan ısı kontrolleri iş gereklerini sağlayabilecek yeterli sayıda çalışanın olması durumunda uygun olacaktır (Zamana bağlı ortalama alan WBGT indeksine göre inceleme yapılması bu duruma bağlı olarak gelişmektedir.). Sıcaklığın yükselmesi bir takım fiziki rahatsızlıklara neden olmakla birlikte aynı zamanda çalışanın hata yapmasına da neden olacağı için bir takım kalite ve verim kayıplarına da neden olabilir. Isı stresi sadece iş performansını düşürmekle kalmaz, aynı zamanda birtakım hastalıklara da neden olarak (ısı çarpması, ısı krampları, isilik vb.) iş gücü kaybını da tetikleyebilir. Bu nedenle de çalışanların maruz kaldıkları sıcaklık seviyesinin de bir limiti olmalıdır. Bir iş periyodunda birden fazla iş yapılabileceği için kişilerin maruziyetleri belirlenirken ağırlıklı ortalama değerlerin hesaplanması gerekebilir. Bu durumda kullanılan formüller Tayyarı ve Smith tarafından Eş.1 ve Eş. 2 ile verilmiştir [8] :

$$M_{TWA} = \frac{M_1 * t_1 + M_2 * t_2 + \dots + M_n * t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n} \quad (1)$$

$$WBGT_{TWA} = \frac{WBGT_1 * t_1 + WBGT_2 * t_2 + \dots + WBGT_n * t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n} \quad (2)$$

Burada; t_i : Bir zaman çalışması ile ölçülen i dönemdeki dakika sayısı; M_i : Aktivite ya da dinlenme zamanında ölçülen/tahmin edilen metabolik oran; $WBGT_i$: Aktivite ya da dinlenme alanında hesaplanana WBGT değeri;

WBGT : Wet Bulb Globe Temperature ve yaş termometre sıcaklığı olarak açıklanabilir.

$WBGT_{out} = 0,7 * T_{nwb} + 0,2 * T_g + 0,1 * T_{db}$ (dış ortamda, güneş altında)

$$WGBT_{in} = 0,7 * T_{nwb} + 0,3 * T_g \text{ (kapalı ortamda, gölgede)}$$

$$T_{nwb} = \text{doğal ıslak ampul küre sıcaklığı (natural wet bulb globe temperature)}$$

$$T_g = \text{küre sıcaklığı (globe temperature)}$$

$$T_{db} = \text{kuru ampul sıcaklığı (dry bulb temperature)}$$

Islak ampul küre sıcaklığı, sıcaklık, nem, rüzgâr hızı ve görünür ve kızılötesi radyasyonun insanlar üzerindeki etkisini tahmin etmek için kullanılan görünür bir sıcaklık türüdür. Dış ortam sıcaklığı, kuru ampul (küre) sıcaklığı da denir. Genellikle cıvalı termometre ile ölçülür. Doğal ıslak ampul (küre) sıcaklığı da yine cıvalı termometre ile ölçülür ancak civanın olduğu kısım bir pamuk fitil ile kaplıdır. Fitil ölçümden 30 dk. önce saf su ile ıslatılmalıdır. Her yeni ölçümde temiz bir fitil kullanılmalıdır. Eğer yeni bir fitil kullanılıyorsa ilk kullanımdan önce yıkanmalıdır. Bu ölçümle havanın bağıl nemi veya buhar basıncı hakkında veri elde edilmiş olur. Bu ölçümlerden yola çıkarak WBGT indeksi hesaplanır [8].

Kişilerin iş yüklerine göre maruz kalabilecekleri en yüksek limit değerlere ilişkin literatürde geliştirilmiş WBGT indeksine bağlı maruziyet limitleri için çeşitli üst sınır tabloları bulunmaktadır. Tablo 1’de bu çalışma kapsamında benimsenen değerler belirtilmiştir [9].

Varley [10] WBGT endeks değerlerine ve aktivite seviyesine göre ısıya doğal olarak alışabilen (ısıya dayanıklı) ve ısıya belli bir süre geçse de alışamayan (ısıya dayanıksız) çalışanlar için geliştirilen ölçekleri de sunmuştur. WBGT indeksinin literatürde yer alan diğer ısı indekslerine göre (örn: Humidex) ısı stresine bağlı riskleri tespit etmede çok daha fazla duyarlı olduğu Morris vd. [1] tarafından ispatlanmışlardır. Literatürde verilen sınır değerlerinin ve ısı stresi indekslerinin tamamına yakını ısıya belli bir süre geçtikten sonra doğal olarak alışan insanlar için geliştirilmiştir [11]. Literatürde sıklıkla kullanılan ısı stresi indeksi WBGT indeksidir [11-13]. Bu indeks hava sıcaklığı, görel nem ve rüzgâr hızını dikkate alarak hesaplanan bir indekstir [14].

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI (LITERATURE REVIEW)

Literatür araştırması kısmında iki aşamalı bir yöntem izlenmiştir. İş atama modellerinde ya da personel çizelgeleme konusunda yapılan çalışmalarda termal konfor parametresinin eklendiği bir çalışma bulunmadığı için, termal konfor ve iş atama modellerinde ergonomi faktörünün

ele alan çalışmalara ilişkin literatür araştırmaları ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Termal konfor konusunda yapılan çalışmaların çoğu üretim ortamlarının termal açıdan değerlendirilmesi üzerine yapılan ve istatistiki temele dayanan çalışmalardır. Genel olarak açık ya da kapalı ortamda çalışanları ve hava sıcaklığını çeşitli faktörler açısından yapılan ölçümleri kayıt ederek, istatistiki temetotlar ile bir takım regresyon formülleri belirlemeye çalışan araştırmalar mevcuttur. Bahsi geçen çalışmalardan ilki, Bernard ve Kenney’in [7] çalışmasıdır. Araştırmacılar çalışmalarında çalışanların ısı yükünü kişisel bazda incelemek için 2 aşamalı bir uyarı sistemi geliştirmişlerdir. İlk aşamada kalp atım hızı gibi fiziksel bir uyarı ile kişi yüksek sıcaklıkta zorlanarak iş yaptığı konusunda uyarılır. Bu durumda çalışan daha serin bir görev yerine geçerek orada çalışmaya devam eder. Ya da 2. uyarının geleceğini bilerek ilk iş istasyonunda çalışmaya devam eder. İkinci uyarı da gelince artık tamamen daha güvenli bir bölgeye geçerek dinlenmeye çekilir. Yazarların dikkate aldıkları ısı stresi indeksi WBGT indeksi olup, iç vücut sıcaklığı oral sıcaklıktan yola çıkarak değerlendirilmiştir. Bir diğer çalışma da Dutta vd. [15]’in çalışmasıdır. Araştırmacılar çalışmalarını Hindistan’ın Gandhiganar kentinde faaliyet gösteren inşaat firmasındaki işçiler üzerinde yapmışlardır. 219 çalışandan ankete dayalı algıladıkları ısı stresini anlamlandırmaya çalışan veriler toplamışlardır. Çalışma yaz ve kış aylarını kapsayacak şekilde yapılmış ve elde edilen değerlerin uluslararası standartlarda verilen limit değerlerin üzerinde olduğu belirtilmiştir. Bernard ve Ashley [16] çalışmalarında farklı ısı geçirgenliği olan kıyafetlerin ısı stresi üzerindeki etkisini araştırmayı hedeflemişlerdir. 12 çalışan üzerinde, farklı kıyafetlerle ölçümler alınarak, işlerin metabolik oranlarını da dikkate alarak, çok yüksek sıcaklıklarda kişilerin en fazla çalışabilecekleri süreyi belirlemeye çalışmışlardır. Çalışmadaki tüm ölçümleri WBGT indeksini elde edecekleri şekilde toplayan yazarlar, kişilere maksimum çalışma süresini de yine WBGT indeksine bağlı olarak tanımlamışlardır. İşlerin metabolik gereksinimlerini de çalışanların oksijen tüketimlerinden yola çıkarak hesaplamışlardır. Sheffield vd. [17] yaptıkları çalışmada Nikaragua’daki iş yerlerinde iç ve dış ortamlarda 400’den fazla WBGT ölçümü aldıklarını ve bu ölçümlerin %10’undan fazlasının hafif ve %75 çalış - %25 dinlen rejimindeki izin verilen limit değerinin üzerinde olduğunu ifade etmişlerdir. Dang ve Dowell [18] yaptıkları deneye dayalı çalışmada sıcaklıkla ilgili kişilerin yaşadıkları rahatsızlıkları listelemişler; en çok karşılaşılan ısıya bağlı rahatsızlıkların kalp atımının hızlanması, baş ağrısı, kas

Tablo 1. İş yüküne göre katlanılabilecek maksimum sıcaklık değerleri
(Maximum temperature values that can be exposed according to workload)

Ortalama saatlik çalışma-dinlenme rejimi	İş yükünün metabolik oran (M) eşiti		
	Hafif M<200 kcal/h	Orta 200<M<350 kcal/h	Ağır 350<M<500 kcal/h
sürekli iş	30,8°C	28,2°C	26,6°C
%75 çalış, %25 dinlen	31,2°C	29°C	27,6°C
%50 çalış, %50 dinlen	31,8°C	30,1°C	28,8°C
%25 çalış, %75 dinlen	32,3°C	31,3°C	30,5°C

krampları ve baş dönmesi, kusma, denge kayıpları, bilinç kaybı olduğunu ifade etmişlerdir. Rowlinson vd. [11] bir iş yerinde iklimatik koşulların incelenmesi gerektiğine dair yaz aylarında ilgili iş yerinde hatalarda bir artış görülmesinin ciddi bir gösterge olacağını ifade etmişlerdir. Aynı zamanda ısı stresinin kişilerde fizyolojik etkilerin yanı sıra, mental kapasitede de bir düşüşe neden olabileceğini ifade etmişlerdir. Aynı zamanda ısıya alışabilen çalışanlarla, ısıya alışamayan çalışanlar için ACGIH 2012'de önerdiği 2 ayrı setten oluşan limit değerleri tanımladığını belirtmiştir. Isıya alışamayan çalışanların limit değerinin ısıya alışabilen çalışanların limit değerlerinden yaklaşık 3°C WBGT daha az olacağını ifade etmişlerdir. Methner ve Eisenberg [19] çalışmalarında 9 çalışanın kolaydan ağıra kadar çeşitli yüklerde işler yaptıkları 4 gün boyunca çalışanlardan kalp atım hızı, iç vücut sıcaklığı ölçümleri, dış ortamdan da hava sıcaklığı ölçümlerini alarak kayıt etmişlerdir. Vücut iç sıcaklığını ölçmek için kişilere vitamin büyüklüğünde termistörler yutturarak 15 dakikalık periyotlarla bilgi toplamışlardır. Deney ortamı yaklaşık 100 işçinin çalıştığı bir park ortamıdır. Bu deney ile çalışanların yasalarla belirtilen değerlerin üzerinde bir yüke maruz kalıp kalmadıklarının kontrolünün sağlanması amaçlanmıştır. Meshi vd. [20] ısı stresinin fiziksel iş ortamının bir özelliği olarak insan sağlığını güvenlik açısından doğrudan etkilediğini, aynı zamanda verimlilik açısından olumsuz sonuçlar doğurarak ekonomik bir yük olduğunu ifade etmişlerdir. Aynı zamanda araştırmacılar yaptıkları deneysel çalışma neticesinde her bir derece WBGT artışının, 0,174 derece iç vücut sıcaklığında artışa neden olacağını ifade etmişlerdir. Wang vd. [14] çalışmalarında kişilerin maruz kaldıkları ısı stresini tahmin etmeye çalışmışlardır. 51 kişinin ayak bileğine takılan termometreler yardımı ile iş günü boyunca sıcaklık ölçümlerine ilişkin bilgi toplanmıştır. İç ve dış mekân ölçümlerinden yola çıkarak, kişilerin maruz kaldıkları sıcaklık değerlerini düşürmek için çalış-dinlen periyotları açısından çalışma rejimi önerileri yapılmıştır. Al-Bouwarthan vd. [9] çalışmalarında özellikle çok sıcak bir iklime sahip olan Suudi Arabistan'daki inşaat işçileri üzerinde ölçüm alarak ısı stresini değerlendirmişlerdir. 81 gün ölçüm alan araştırmacılar kişilerin güneşe maruz kalma derecelerini, kıyafet gereksinimleri gibi birçok ek bilgiyi de kayıt altına almışlardır. WBGT indeksi ile kendi geliştirdikleri alternatif indeksleri de karşılaştırmışlardır. Kişinin maruz kaldığı iç vücut sıcaklığının ölçülmesi için en doğru sonucu verecek yöntem kişiye yutulabilir termometreler yutturmak ve ölçümleri doğrudan oradan almaktır. Ancak bu durum her gün ve her çalışan için tekrar edeceği ve yutulabilir termometre tek kullanımlık olduğu için oldukça maliyetlidir. Bu sebeple araştırmacıların çoğu ilgili değerleri tahmin ederek ya da sabit bir değer olarak kabul ederek çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir.

İş atama ya da iş değişim çizelgelerine ergonomik açıdan yapılan eklemeler ile ilgili literatür incelendiğinde ise, termal konfor açısından herhangi bir değerlendirmenin yapılmadığı görülmektedir. Ancak, çalışanların duruşları ile ilgili ya da fiziksel iş yüklenmesi ile ilgili çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalar içinden güncel olanları izleyen şekilde ifade

edilmiştir. Carnahan vd. [21] çalışmalarında kaldırma işlerindeki fiziksel iş yükünü hesaplamaya yarayan iş şiddeti indeksini (job severity index) kullanmışlardır. Optimizasyon yaklaşımları ve sezgisel yaklaşımları kullanarak en iyi sonuca ulaşmaya çalışan araştırmacıların nihai amacı çalışanların yaralanma potansiyellerini en aza indirecek bir iş değişim çizelgesi elde etmektir. Wongwien ve Nanthavanij [22] çalışmalarında günlük tehlike miktarının bir kısıt olarak geliştirdikleri personel çizelgeleme modeline eklemişlerdir. Çalışanların yetenek seviyesinin birbirinden farklı olduğunu belirtmişler ve çalışanların birlikte çalışmak istedikleri çalışana seçmelerine izin vererek toplam sistem verimliliğini iyileştirmeye çalışmışlardır. Modelin denemesini ise, bir günlük iş değişim çizelgesi üzerinde kendi oluşturdukları sayısal değerlere göre yapmışlardır. Akbari [23] çalışmasında yarı zamanlı çalışanların yorgunluklarını dikkate alarak tur çizelgeleme yaklaşımı geliştirmiştir. Amaç fonksiyonu olarak işçi maliyetlerini minimize ettiğini ifade eden araştırmacı çalışanların yorgunluk oranlarını dikkate alarak vardiyalara atanması problemini modellediğini belirtmiştir. Moussavi vd. [24] çalışmada üretim çevrim süresinin kısaltılmasını amacı ile birlikte ergonomik iş gücü çizelgelemesi problemini ele almışlardır. Tam sayılı doğrusal matematiksel modelleme yaklaşımı kullanarak modelledikleri problemi, GUROBI yazılımı ile çözmüşlerdir. Deneme verileri ile çözümledikleri problemde, ergonomik analiz olarak, boy, yaş, kişinin yetenek seviyesi ve tecrübesi durumlarını dikkate almışlardır. Montaj hattı özelinde modellediklerini problemlerinde, üretim hattının kesintisiz bir şekilde 7 gün çalışması gerektiğini ifade etmişlerdir ve her bir çalışanın bir gün boyunca aynı işe çalışması koşulunu eklemişlerdir. Hochdörffer vd. [25] çalışmalarında kısa dönemli planlama çalışmalarında iş değişim çizelgelerinin ergonomik açıdan işe iş istasyonun tüm vücudu çalıştırması ya da yoğunlukla el-parmak sistemini çalıştırması özelliğini dikkate alarak geliştirmişlerdir. Çalışmalarında uzun çözüm yaklaşımı olarak sezgisel yöntemleri kullanmışlardır. Moussavi vd. [26] fiziksel iş yükü ve verimlilik amaçlarını içeren çok amaçlı bir matematiksel model önerisi ile ergonomik iş değişim çizelgelerini elde etmeyi amaçlamışlardır. İşlere 1-10 arasında bir puan vererek iş yüklerini temsil etmeye çalışmışlardır. Puan olarak 4'e kadar düşük, 5-7 puan arası orta, 7'den sonra ise yüksek iş yüküne sahip işlerin olduğunu varsaymışlar ve verimlilik açısından ise üretim çevrim zamanını dikkate alan modellerinde maksimum iş yükünün en küçüklenmesini sağlamaya çalışmışlardır. Moussavi vd. [5] çalışmalarında, 2 aşamalı bir yöntem kullanarak günlük iş değişim çizelgelerini elde etmeye çalışmışlardır. İlk aşamada işlerin fiziksel iş yüklerini hesaplamışlar, daha sonra da matematiksel modelleme ile iş değişim çizelgelerini elde etmeye çalışmışlardır. Savino vd. [27] yaptıkları çalışmalarında yazarlar tarafından geliştirilen fiziksel iş yüküne ilişkin bir ergonomik indeks ile matematiksel modelleme yaklaşımını birleştirerek ergonomik iş değişim çizelgelerini elde etmeye çalışmışlardır. Seçkiner ve Kurt [28] çalışmalarında tur ve rotasyon çizelgelerini bütünlük bir şekilde kullanarak iş yükü en küçüklenmesini amaçlamışlardır. Ele aldıkları problemde hastanede

radyografi teknisyenlerinin maruz kaldıkları radyasyon miktarını dikkate almışlardır. Tur çizelgesinden elde ettikleri en az personel sayısını rotasyon çizelgeleme modelinin bir kısıtı olarak modele eklemişlerdir. Elde ettikleri model ile personel başına düşen hasta sayısını küçükmeyi amaçlamışlar ve modeli bir haftalık olarak düzenleyip, GAMS paket programında çözdürmüşlerdir. Önerdikleri modelin geçerliliğini kendi oluşturdukları rassal veriler ile denemişlerdir.

4. ÖNERİLEN MATEMATİKSEL MODEL (THE PROPOSED MATHEMATICAL MODEL)

Bu çalışmada ele alınan problemin çizilen sınırı kabaca, ortam sıcaklığın bir risk unsuru olduğu işletmelerde çalışanların en düşük risk seviyesine maruz kalarak görevlere atanması olarak tanımlanabilir. Bu amacı sağlamak üzere geliştirilen matematiksel modelin sahip olacağı özellikler aşağıda listelenmiştir:

- İşletmede gerçekleştirilmesi gereken çeşitli görevler bulunmaktadır. Çalışanların uzmanlık durumu farklı olduğu için kalifiye çalışanların firmaya daha fazla maliyet getireceği düşüncesi ile işçilik maliyetlerinin her çalışan için farklı olduğu kabul edilmiştir.
- Bir iş günü periyotlara ayrılmıştır. Her bir çalışma periyodu sonunda çalışanların rotasyonuna izin verilmektedir.
- Makinelerin birer periyotluk zamanlarda ihtiyacı olan çalışan sayısı aynı değildir. Makineler arasında çalışan sayısı ihtiyacı değişkenlik göstermektedir.
- Çalışanlar haftada bir gün izin yapmaktadır.

Setler:

$i = 1, \dots, m$ çalışan seti

$j = 1, \dots, n$ makinelerin seti

$k = 1, \dots, K$ planlama ufku (gün)

$l = 1, \dots, L$ çalışma periyodu

Karar Değişkenleri:

$$x_{ijkl} = \begin{cases} 1, & i.\text{çalışan}, j.\text{makinede}, k.\text{gün}, l.\text{periyotta çalışıyor ise} \\ 0, & \text{diğer durumda} \end{cases}$$

$$D_{ik} = \begin{cases} 1, & i.\text{çalışan } k.\text{gün izinli ise} \\ 0, & \text{diğer durumda} \end{cases}$$

$MOE_{ik} = i.$ çalışanın $k.$ günlük metabolik oran eşiti (kcal)

$TLV_{ik} = i.$ çalışanın $k.$ günlük metabolik oran eşitine göre sınırlandırılması gereken sıcaklık değeri

$CTWA_{ik} = i.$ çalışanın $k.$ günlük sıcaklık maruziyet değeri

Parametreler:

$c_{ij} = i.$ çalışanın $j.$ istasyona atandığına ortaya çıkan atama maliyetleri (pbr)

$w_j = j.$ istasyonun her periyotta ihtiyaç duyduğu çalışan sayısı

$WM_{ij} = i.$ çalışanın $j.$ istasyonda çalışmasının bir saatlik metabolik oran eşiti (kcal)

$WBGT_j = j.$ istasyonda hesaplanan sıcaklık indeksi değeri ($^{\circ}\text{C}$)

Matematiksel modelin kapalı formu ve ilgili kısıtların açıklamaları izleyen şekilde verilmiştir.

$$\min z = \sum_i \sum_j \sum_k \sum_l x_{ijkl} * c_{ij} \quad (3)$$

Eş. 3, modelin amaç fonksiyonunu göstermektedir. Amaç bu model için çalışanların işlere atanma maliyetlerinin en küçüklemeştir.

$$\sum_k D_{ik} = 1 \quad \forall i \quad (4)$$

Eş. 4 her çalışanın bir haftalık çalışma periyodunda bir gün izinli olmasını sağlamak için yazılmıştır.

$$D_{ik} \leq 1 - x_{ijkl} \quad \forall i, j, k, l \quad (5)$$

Eş. 5 numaralı kısıt çalışan izinli iken atama yapılmasını engellemek amacı ile yazılmış olan kısıttır.

$$\sum_j x_{ijkl} \leq 1 \quad \forall i, k, l \quad (6)$$

Eş. 6 çalışanın aynı anda birden fazla makineye atanmasını engellemek amacı ile yazılan kısıttır.

$$\sum_i x_{ijkl} \geq w_j \quad \forall j, k, l \quad (7)$$

Eş. 7 her makinenin ilgili günler ve periyotlar için her makineye ihtiyacı kadar çalışan atanmasını sağlamak amacı ile yazılmıştır.

$$\sum_{j=1}^n x_{ijkl} = \sum_{j=1}^n x_{ijk(l+1)} \quad \forall i, k, l \quad (8)$$

Eş. 8 eğer bir çalışan bir günün herhangi bir periyoduna atandı ise geri kalan periyotlara da atanmasını sağlamak amacı ile yazılmış olan kısıttır. Kısıt temel atama kısıtları arasında yer almakla birlikte, bu çalışmadaki modele eklenmesi noktasında Moussavi vd. [26] çalışmalarından esinlenilmiştir. Bu kısıt işletme amaçları açısından önem göstermektedir. Çünkü bu kısıt dâhil edilmeden model çözüldüğünde, çalışanların planlama periyodunda bazı günlerde birkaç periyoda atanıp, birkaç periyoda atanmaması durumu söz konusu olabilir. Bu durum aslında ergonomik açıdan çalışanı korumaya yönelik bir duruma işaret etmesine rağmen, klasik çizelgeleme amaçları ile çelişmektedir.

$$\frac{\sum_j \sum_l x_{ijkl} * WM_{ij}}{8} = MOE_{ik} \quad \forall i, k \quad (9)$$

Eş. 9, Tayyari ve Smith [8]'in önerdiği gibi çalışanların gün boyunca farklı metabolik oran değerlerine sahip işlerde çalışmaları ile oluşacak metabolik yükü, zaman ağırlıklı ortalama yöntemini kullanarak her gün ve her çalışan için hesaplatmaktadır.

$$\frac{\sum_j \sum_l x_{ijkl} * WBGT_j}{8} = CTWA_{ik} \quad \forall i, k \quad (10)$$

Eş.10 her gün ve her çalışan için gün boyunca çalıştıkları iş istasyonları için ortalama ortam sıcaklığını zamana bağlı ortalama yöntemini kullanarak hesaplatmaktadır.

$$CTWA_{ik} \leq TLV_{ik} \quad \forall i, k \quad (11)$$

Eş. 11 her gün ve her kişi için, ilgili kişilerin termal konforunu sağlamak için yazılmış olan kısıttır.

$$TLV_{ik} = 30,8 \text{ eğer } 0 < MOE_{ik} \leq 200 \quad \forall i, k \quad (12)$$

$$TLV_{ik} = 28,2 \text{ eğer } 200 < MOE_{ik} \leq 350 \quad \forall i, k \quad (13)$$

$$TLV_{ik} = 26,6 \text{ eğer } 350 < MOE_{ik} \leq 500 \quad \forall i, k \quad (14)$$

Eş.12, Eş.13 ve Eş.14 çalışanın gün boyu çalıştığı işlerdeki metabolik oran eşitinin alacağı değere göre çalışanın maruz kalacağı sıcaklık sınır değerinin doğru belirlenmesini sağlamak amacı ile yazılan kısıtlardır.

$$x_{ijkl} = 0,1 \quad (15)$$

$$D_{ik} = 0,1 \quad (16)$$

$$MOE_{ik} \geq 0 \quad (17)$$

$$CTWA_{ik} \geq 0 \quad (18)$$

Eş. 15-Eş.18 ilgili karar değişkenlerinin tipini de gösteren işaret kısıtlardır.

5. MODELİN DENENMESİ (İLLUSTRATIVE EXAMPLES)

Isı stresini ve ısıdan kaynaklı zorlanmayı etkileyen faktörler izleyen şekilde sıralanabilir: çevresel termal şartlar (hava sıcaklığı, radyant ısı, nem ve havanın hızı), fiziksel iş yükü, kıyafet, yaş, cinsiyet, ırk, beslenme, sağlık geçmişi, vücut kitle indeksi, ısıya alışma derecesi. Elbette ki bu faktörlerin tamamı ısı stresine aynı derecede etki edemez. Çevresel termal faktörler ve fiziksel iş yükü, ısı stresine doğrudan ve

en yüksek derecede etki eden faktörlerdir ki bu faktörler bu çalışma kapsamında dikkate alınmıştır. Çalışanlar aynı çalışma kıyafetini giydiği, sağlıklı, erkek ve 30-40 yaş aralığındaki kişilerden seçildiği için bu faktörlerin etkisi karar noktasını değiştirecek kadar ciddi etkiye sahip olmayacaktır. Bu nedenle ilgili faktörlerin göz ardı edilmesinin akademik anlamda çalışmayı olumsuz etkilemeyeceği düşünülmektedir. Normalde işlere ilişkin metabolik oran eşitinin belirlenmesi başlı başına ergonomi disiplinin çalışma konusu olup burada nihai amaç işlerin kolay, orta, ağır gibi farklı zorluk seviyelerinden hangisine girdiğini karar vermektir. Aynı zamanda ortam sıcaklığının hesaplanmasında kullanılan ve birçok araştırmacı tarafından da kullanılması önerilen WBGT indeksi havanın görel nemi, yaş ve kuru termometre sıcaklığı gibi verilerden yola çıkarak elde edilen bir indekstir. Kişilerde oluşacak termal stresi ölçmek, vücudun çekirdek sıcaklığındaki artışı ölçmek demektir ve bu da günümüz şartlarında ölçülebilirliği nispeten kolay olsa da izlenebilirliği zor olan bir durumdur. Boy, kilo ve sağlık geçmişi açısından yakın değerlere sahip sağlıklı yetişkinlerden ölçüm alınarak işlere ilişkin ortalama ve yaklaşık bir metabolik oran eşiti değeri elde edilebilir.

Önerilen modelin denenmesi için geliştirilen veriler elde edilirken MS Excel Mersenne Twister algoritmasını kullanarak rassal sayı üreten üreteçler kullanılmıştır. Rassal veriler ile yapılan yaklaşık 50 deneme setlerinden birisi modelin uygulanabilirliğini göstermek için burada verilmiştir. Model ilgili deneme verileri ile çalıştırılmak üzere GAMS 24.9.2 paket programında kodlanmış ve i5 6500T CPU, 2,5 GHz özelliklerine sahip bir bilgisayarda çözdürülmüştür. GAMS paket programı herhangi bir sınırlama yapılmadığında en uygun çözüme %5 uzaklıktaki ilk çözümü elde ettiğinde, bu çözümü vererek çalışmayı durdurmaktadır. İlgili model önerisinin çeşitli veri setleri ile yapılan denemeleri doğrudan çözdürüldüğünde %1-%2 GAP ile çözümlerin 10 sn. gibi kısa bir sürede elde edildiği gözlenmiştir. Ancak, konunun insan sağlığı olması ve elde edilecek iş atama çizelgelerinin stratejik seviyede kararlar olması nedeni ile *option optcr=0* komutu kullanılarak optimal çözüme ulaşılmaya çalışılmıştır. Hangi çalışma rejimine göre limit değerlerin seçileceğinin belirlenmesinde izlenecek yola ise Rowlinson vd. [11]'in yaptığı çalışmadan yola çıkarak karar verilmiştir. Rowlinson vd. [11] çalışmalarında çok yüksek sıcaklıklarda çalışanların çalıştırılma periyotlarına zorlanmasının verimin azalmasına yol açabileceğini, ancak çalışanın yüksek sıcaklıklarda sürekli çalıştırmanın sağlık açısından sorunlar oluşturabileceği de bilindiği için ilgili iki faktör arasında bir ödünleşme olacağını ifade etmişlerdir. Bu nedenle bu çalışmada sınır değer olarak çalışanların ilgili işlerde sürekli çalıştığı durumdaki limit değerler kullanılmıştır. Modelin denenmesinde kullanılan veriler Tablo 2, Tablo 3 ve Tablo 4 ile ifade edilmiştir.

Model bu veriler ile çalıştırıldığında, 8426 amaç fonksiyonu değeri ile, yaklaşık 3000 sn'de optimal çözümü vermiştir. Elde edilen çizelgeden örnek olması amacı ile birinci gün ve maruziyet değerleri Tablo 5, Tablo 6 ve Tablo 7 ile ifade edilmiştir.

Tablo 2. İş istasyonlarının çalışan ihtiyacı ve hesaplanan WBGT indeks değerleri
(Employee needs of workstations and calculated WBGT index values)

İş İstasyonu	Çalışan ihtiyacı	WBGT indeks değeri (°C)
1	4	31,25
2	2	28,10
3	3	26,75
4	3	24,15

Tablo 3. Çalışanların iş istasyonlarına atanmaları durumunda ortaya çıkacak atama maliyetleri (pbr)
(Assignment cost)

Çalışan / İş İstasyonu	1	2	3	4
1	16	17	19	15
2	18	14	14	18
3	20	14	14	18
4	16	17	14	11
5	11	12	20	18
6	13	15	20	15
7	15	14	11	12
8	16	15	10	19
9	14	19	19	11
10	17	18	12	18
11	19	15	16	12
12	13	12	11	17
13	12	16	20	20
14	16	12	14	14

Tablo 4. Çalışanların ilgili iş istasyonlarında çalışmaları sırasında ortaya çıkan enerjinin metabolik oran eşiti (kcal/ sa) (The metabolic rate equivalent of the energy generated during the work of the employees at the workstations (kcal / h))

Çalışan / İş İstasyonu	1	2	3	4
1	170,0	275,9	355,0	211,3
2	168,6	273,1	356,2	209,8
3	168,9	274,3	353,5	212,3
4	172,3	276,0	349,5	210,4
5	168,6	277,6	357,2	215,6
6	167,3	275,0	354,4	212,0
7	169,3	275,6	357,7	208,9
8	167,6	278,1	355,3	211,4
9	166,4	276,9	351,6	210,8
10	169,7	274,4	358,3	211,5
11	167,8	275,6	351,6	212,7
12	163,3	276,9	357,8	215,9
13	169,4	272,2	351,5	208,7
14	169,2	277,4	359,1	212,0

Tablo 7’de çalışanların 7 günlük çizelgeleme periyodunun birinci gününe ilişkin atama planı gösterilmiştir. Bu atama planının okuması şu şekilde yapılmalıdır: 5. çalışan günün ilk iki periyodunda (birinci ve ikinci periyotta) 2. iş istasyonunda, geri kalan altı periyot boyunca (üçüncü, dördüncü, beşinci, altıncı, yedinci ve sekizinci periyotlarda) 1. iş istasyonunda çalışacaktır. Modelin sadece termal konfor

kısıtlaması ile çözdürülmesinin işlerin metabolik oran eşitleri (Tablo 5) incelendiğinde, atamanın, model amacının maliyetin en küçüklenmesi olması sebebi ile maliyet odaklı olarak yapıldığı görülmüş ve kişilerin günlük metabolik oran eşiti ile ilgili de bir kısıtlama yapılması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Çünkü çalışanların bütüncül korunmaları amaçlandığı için, her ne kadar çalıştıkları işlerin ağırlığına uygun sıcaklıklarda çalışmalarının sağlandığı Tablo 6 ile gösterilse de, bir grup çalışanın yüksek metabolik oran eşitine sahip işlerde çalışması, bir grup çalışanın ise hafif sayılan düşük metabolik oran eşitine sahip işlerde çalışması ergonomik açıdan kabul edilebilir bir durum değildir. Temel model önerisinin sonuçları incelendiğinde, 334,725 metabolik oran eşiti değeri en yüksek değer olarak görülmektedir. Temel modelde MOE değişkenine koyulan çeşitli üst değerlerine göre yapılan denemelerin sonuçları Tablo 8’de özetlenmiştir.

Tablo 8 incelendiğinde, MOE değerine yapılan müdahalelerin, amaç fonksiyonu üzerinde doğrudan etki gösterdiği görülmektedir. MOE değerinin sınırlandırıldığı sağ taraf değeri azaldıkça, amaç fonksiyonu değerinin arttığı söylenebilir. Modellerin daha uzun sürelerde çalıştırılması daha iyi çözümlerin elde edilmesine olanak sağlayabilir ancak 1000 saniyelik çözümlerle bile ergonomik amaçlar ile ekonomik amaçların arasında bir ödünleşim olduğu Tablo 8’de yer alan verilerin yardımı ile net bir şekilde söylenebilir. MOE değerine yapılan müdahalenin modelde nasıl bir değişiklik oluşturduğunun gösterilebilmesi için, 265 MOE değerine sahip modelin sonuçları izleyen tablolarla gösterilmiştir.

Tablo 9, MOE değerine 265 üst sınırı koyulduktan sonra çalışanların maruz kaldıkları değerleri MOE değerlerini göstermektedir. Tablo 9 ve Tablo 5 birlikte değerlendirildiğinde çalışanlar arasındaki MOE değeri açısından olan dengesizliğin büyük oranda giderildiği görülmektedir. Tablodaki boş hücreler çalışanların izinli olduğu günleri ifade etmekle birlikte, çalışanların izinli oldukları günlerin de ilk modele göre değişkenlik gösterdiği görülmektedir.

Tablo 10, MOE değerine 265 üst sınırı koyulduktan sonra elde edilen çizelgede çalışanların bir haftalık planlama periyodunda maruz kaldıkları sıcaklık değerlerini göstermektedir. Tablo 10 ve Tablo 6 birlikte değerlendirildiğinde MOE değerine üst sınır koyulduğunda modelin, bu kısıtlamayı sağlayabilmek için, yine limit değerlerin altında ancak, bir önceki modele göre daha yüksek sıcaklıklarda çalışanları çalıştırdığı yorumu yapılabilir.

Aslında ekonomik amaçlar ve ergonomik faktörler arasında bir ödünleşim olduğu gibi, iki ergonomik faktör arasında da bir ödünleşim olduğu ifade edilebilir. Bu durumda karar vericilerin, çalışanları yine olması gereken limit değerlerin altında ancak sınırlara yakın sıcaklıklarda mı çalıştırmak istediklerine, yoksa sıcaklık açısından daha düşük sıcaklıklar ancak, çalışanlar arasında oldukça fark eden MOE değerlerine katlanarak mı çalıştıracaklarına karar vermeleri

Tablo 5. Çalışanların bir haftalık çizelgeleme periyodu boyunca maruz kaldıkları metabolik oran eşiti değerleri
(Metabolic rate equal values that employees are exposed to during the weekly scheduling period)

Çalışan / Gün	1	2	3	4	5	6	7
1	190,650	175,163	175,162	175,162	175,162	190,650	
2	325,037		293,875	335,425	293,875	325,037	283,488
3	323,800	294,100		313,900	333,700	323,800	284,200
4	210,400	210,400	210,400	210,400	210,400		210,400
5	195,850	195,850	195,850	195,850		195,850	195,850
6	172,887	172,887		172,887	172,887	172,887	172,887
7	320,500	334,150	334,150		217,600	320,500	334,150
8		331,837	331,838	331,838	331,838	331,837	331,838
9	210,800	199,700	199,700	194,150		210,800	199,700
10	334,725	334,725	334,725	334,725	334,725		334,725
11		212,700	212,700	212,700	212,700	212,700	212,700
12	187,612	187,612	187,612		187,612	187,612	187,612
13	174,312		174,312	174,312	174,312	174,312	174,312
14	277,400	277,400	277,400	277,400	277,400	277,400	

Tablo 6. Çalışanların bir haftalık çizelgeleme periyodu boyunca maruz kaldıkları sıcaklıklar
(Temperatures that employees are exposed to during a weekly scheduling period)

Çalışan / Gün	1	2	3	4	5	6	7
1	27,700	30,362	30,362	30,362	30,362	27,700	
2	27,256		27,763	27,087	27,762	27,256	27,931
3	27,256	27,762		27,425	27,088	27,256	27,931
4	24,150	24,150	24,150	24,150	24,150		24,150
5	30,463	30,462	30,462	30,462		30,462	30,463
6	30,362	30,362		30,362	30,362	30,362	30,362
7	26,100	27,312	27,313		26,250	26,100	27,312
8		27,312	27,312	27,312	27,312	27,312	27,312
9	24,150	25,925	25,925	26,813		24,150	25,925
10	27,312	27,312	27,312	27,312	27,313		27,312
11		24,150	24,150	24,150	24,150	24,150	24,150
12	30,687	30,687	30,687		30,687	30,687	30,687
13	30,362		30,362	30,362	30,362	30,362	30,362
14	28,100	28,100	28,100	28,100	28,100	28,100	

gerekmektedir. Tablo 11, MOE değerine üst sınır koyulduktan sonra elde edilen çizelgenin ilk gününü göstermektedir. Bu tablonun okuması Tablo 7 ile aynıdır.

Tablo 11 ve Tablo 7 birlikte değerlendirildiğinde modelin MOE değerine verilen üst sınırı sağlamak için çalışanları daha fazla rotasyona tabii tuttuğu görülmektedir.

Tablo 7. Elde edilen çizelgenin birinci günü (The first day of the obtained schedule)

1. Gün	1. Pr	2. Pr	3. Pr	4. Pr	5. Pr	6. Pr	7. Pr	8. Pr	Toplam
1. Çalışan									
WS1	1		1			1		1	4
WS4		1		1	1		1		4
2. Çalışan									
WS2			1	1		1			3
WS3	1	1			1		1	1	5
3. Çalışan									
WS2					1		1	1	3
WS3	1	1	1	1		1			5
4. Çalışan									
WS4	1	1	1	1	1	1	1	1	8
5. Çalışan									
WS1			1	1	1	1	1	1	6
WS2	1	1							2
6. Çalışan									
WS1	1	1	1	1	1		1	1	7
WS4						1			1
7. Çalışan									
WS3		1	1	1	1	1	1		6
WS4	1							1	2
9. Çalışan									
WS4	1	1	1	1	1	1	1	1	8
10. Çalışan									
WS1		1							1
WS3	1		1	1	1	1	1	1	7
12. Çalışan									
WS1	1	1	1	1	1	1	1		7
WS3								1	1
13. Çalışan									
WS1	1	1		1	1	1	1	1	7
WS4			1						1
14. Çalışan									
WS2	1	1	1	1	1	1	1	1	8

Tablo 8. Çeşitli MOE sınırlamalarına göre model önerisinin amaç fonksiyonu değerinin değerlendirilmesi (Evaluation of the objective function value of the model according to different Metabolic Rate Equivalent (MRE))

Süre (sn.)	1000		
MOE değeri	GAP	Amaç Fonksiyonu Değeri	En iyi Mümkün Çözüm
265	%3,24	9275	8974,173
270	%0,37	8936	8902,985
275	%0,62	8909	8853,592
280	%1,01	8868	8778,150
285	%1,27	8815	8702,834

Tablo 9. Çalışanların bir haftalık çizelgeleme periyodu boyunca maruz kaldıkları metabolik oran eşiti değerleri (MOE≤265 için) (MRE values exposed to employees during the one-week scheduling period (for MRE≤265))

Çalışan / gün	1	2	3	4	5	6	7
1		249,700	249,700	249,700	262,937	254,862	253,050
2	259,838	259,838	259,837	262,512	259,838	259,838	
3	260,000	263,275	260,000		263,275	263,275	263,275
4	262,562		262,563	262,563	262,562	262,563	262,563
5	195,850		262,500	195,850	195,850	195,850	195,850
6	190,687	190,687	190,687		190,687	190,687	194,225
7	263,138	263,138		263,137	259,750	264,700	263,137
8	262,750	262,750	262,750	262,750	262,750		262,750
9	188,600	205,250	194,150	183,050	246,000		258,050
10	250,875	250,875		263,962	263,962	250,875	250,875
11	264,788	264,788	264,788	264,787		264,788	264,787
12	261,100	261,100	261,100	261,100	261,100	261,100	
13		192,162	192,162	192,162	192,162	192,163	192,162
14	262,600	262,600	262,600	262,600		262,600	262,600

Tablo 10. MOE 265 modeli için çalışanların bir haftalık çizelgeleme periyodu boyunca maruz kaldıkları sıcaklıklar (Temperatures that workers are exposed to during the one-week scheduling period for the MRE≤265 model)

Çalışan / gün	1	2	3	4	5	6	7
1		27,788	27,788	27,788	27,394	26,900	27,563
2	28,056	28,056	28,056	27,831	28,056	28,056	
3	28,056	27,831	28,056		27,831	27,831	27,831
4	25,125		25,125	25,125	25,125	25,125	25,125
5	30,462		28,056	30,462	30,463	30,462	30,462
6	30,687	30,687	30,687		30,687	30,687	30,462
7	27,394	27,394		27,394	26,013	25,125	27,394
8	27,394	27,394	27,394	27,394	27,394		27,394
9	27,700	25,038	26,813	28,588	24,800		26,013
10	27,788	27,788		27,394	27,394	27,788	27,788
11	25,125	25,125	25,125	25,125		25,125	25,125
12	28,056	28,056	28,056	28,056	28,056	28,056	
13		30,687	30,687	30,687	30,687	30,688	30,687
14	28,056	28,056	28,056	28,056		28,056	28,056

Tablo 11. MOE 265 model için elde edilen çizelgenin birinci günü (First day of the obtained schedule of MRE \leq 265 model))

1. Gün	1. Pr	2. Pr	3. Pr	4. Pr	5. Pr	6. Pr	7. Pr	8. Pr	Toplam
2. Çalışan									
WS1		1						1	2
WS2	1				1	1			3
WS3				1			1		2
WS4			1						1
3. Çalışan									
WS1			1				1		2
WS2	1			1		1			3
WS3		1						1	2
WS4					1				1
4. Çalışan									
WS3	1				1	1			3
WS4		1	1	1			1	1	5
5. Çalışan									
WS1	1	1		1	1	1	1		6
WS2			1					1	2
6. Çalışan									
WS1	1	1	1	1	1	1	1		7
WS3								1	1
7. Çalışan									
WS1						1	1		2
WS2			1						1
WS3		1		1				1	3
WS4	1				1				2
8. Çalışan									
WS1	1							1	2
WS2		1							1
WS3				1		1	1		3
WS4			1		1				2
9. Çalışan									
WS1			1		1	1		1	4
WS4	1	1		1			1		4
10. Çalışan									
WS1			1	1	1				3
WS3	1	1					1		3
WS4						1		1	2
11. Çalışan									
WS3	1		1		1				3
WS4		1		1		1	1	1	5
12. Çalışan									
WS1	1							1	2
WS2		1		1			1		3
WS3			1		1				2
WS4						1			1
14. Çalışan									
WS1		1		1					2
WS2					1		1	1	3
WS3			1			1			2
WS4	1								1

6. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Bu çalışmada ergonomik iş çizelgeleme temelinde bir matematiksel model önerisi yapılmıştır. Bu model ile termal açıdan çalışanları rahatsız etmeyecek bir iş atamasının

yapılması amaçlanmıştır. Termal konfor sınırlaması yapılırken, çalışanların gerçekleştirdikleri işlerin metabolik oran eşiti değeri de dikkate alınmış ve sınır değerler bu oran eşiti değerine göre belirlenmiştir. Üretim ortamlarını doğrudan etkileyen düzenlemelerden biri olan iş atama faaliyetleri vb. faaliyetlerde üretim ortamındaki ergonomik

özelliklerin göz önünde bulundurulması çalışanın iş yerindeki sağlığı ve verimliliği ile yakından ilişkilidir [29, 30].

Çalışmanın sonuçlarına göre, maruz kalınan metabolik oran eşiti değeri sınırlandırıldığında, sınırlandırılmadığı duruma göre çalışanların işler arasında çok daha fazla rotasyon yaptıkları görülmektedir. Aynı zamanda amaç fonksiyonu değeri de artış göstermektedir. Üretim ortamlarında her zaman WBGT indeksine göre ölçüm alarak, limit değerlerden daha düşük seviyelere sahip üretim ortamları olmayabilir. Özellikle yaz aylarında 36-37°C ve daha üstü sıcaklıklar ile de karşılaşılması olasıdır. Bu durumda ACGIH'in önerdiği limit değerler hiçbir şekilde karşılanamayacağından önerilen modeldeki termal konfor kısıtlarının vücut iç sıcaklığının yaklaşık 37,6 da sabit tutulmasına yönelik kısıtlar ile değiştirilmesi gerekliliği ortaya çıkacaktır.

Bu çalışmada çalışanların doğal olarak çevresel ısıya uyum sağlayabilen çalışanları olduğu varsayımı ile maruz kalabilecekleri sıcaklık üst limiti için ACGIH tarafından geliştirilen değerler kullanılmıştır. Ancak üretim işletmelerinde nadiren de olsa işletmelerde ısıya dayanıksız ve doğal olarak alışmayan çalışanların da bulunması durumu da olasıdır. Bu durumda literatürde ısıya dayanamayan çalışanlar için geliştirilen limit değerler kullanılabilir gibi [10], bu çalışmada kullanılan değerlerden 3°C düşük değerler de limit değerler olarak kullanılabilir [11]. Literatürde çalışılan işlerin metabolik oran eşiti değerlerinden yola çıkarak her çalışan için farklı sıcaklık üst limiti de önerilmiştir [16]. M değeri Watt cinsinden işte harcanan enerjiyi göstermek üzere her kişi bazında limit değerlerin $TLV = 56,7 - 11,5 \cdot \log_{10}(M)$ eşitliği kullanılarak değerlendirilebileceği ifade edilmiştir. Ancak literatürde genel kabul görmüş limit değerleri ACGIH tarafından önerilen değerlerdir. Aynı zamanda logaritmik ifadeler modellerin çözüm zamanları üzerinde doğrudan olumsuz etki oluşturacağından, bu eşitliğin limit değerlerin belirlenmesinde kullanımı noktasında, çözüm zamanı kriteri de göz önüne alınmalıdır.

Model önerisinin mevcut hali dış ortam sıcaklıklarının değerlendirilmesine yönelik gibi görünse de, ergonomik anlamda dikkate alınan ikinci parametre olan yapılan işlerin metabolik oran eşiti değerleri dış ortam sıcaklığı ile birlikte vücudun yapılan işin ağırlığına göre ortaya çıkacak iç sıcaklığının da dikkate alınmasına imkân sağlamıştır. Aynı zamanda bu çalışma çalışanların tüm işleri yapabildiği varsayımı ile gerçekleştirilmiştir. Çalışanların heterojen yetenek seviyesine sahip olduğu işletmeler için ilgili kısıt güncellenerek model önerisi genişletilebilir.

Tüm bu açıklamalar ve kısıtlamalar altında bile çalışmanın literatüre yaptığı katkıları izleyen şekilde özetlemek mümkündür: a) önerilen model daha önceleri termal konforun dikkate alınmadan sadece işletme amaçları ile yapılan iş değişim çözelgelerine ergonomik bir bakış açısı sağlamıştır; b) ısı çarpması gibi birçok rahatsızlığa yol açabilecek olası iş gücü kayıplarını en aza indirebilecek

potansiyele sahip bu model önerisi küçük adaptasyonlar ile her türlü üretim ortamına kolaylıkla uyarlanabilecektir; c) üretim ortamı özelinde diğer fiziksel risklerin etkin olmadığı ancak sıcaklık parametresinin aktif bir şekilde risk olarak bulunduğu üretim ortamlarında (örn: cam ürünleri üretim sektörü, demir-çelik işletmeleri vb.) rahatlıkla kullanılabilir; d) termal konfor parametresi yapılan işin ağırlığına göre değerlendirildiği ve çalışanların gün sonunda maruz kalacakları ilgili değer kısıtlandırıldığı için çift yönlü bir koruma mekanizması ortaya koyulmuştur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Morris, C. E., Gonzales, R. G., Hodgson, M. J., Tustin, A. W., Actual and simulated weather data to evaluate wet bulb globe temperature and heat index as alerts for occupational heat-related illness, *Journal of occupational and environmental hygiene*, 16 (1), 54-65, 2019.
2. Babalık, F. Mühendisler için Ergonomi: İşbilim, Dora Yayıncılık, Bursa, 2011.
3. Adem, A., Dağdeviren, M., İş Sağlığı Ve Güvenliğinin Verimlilik Üzerindeki Etkisi: Bir Literatür Araştırması 5. Ulusal Verimlilik Kongresi Bildiriler Kitabı, 60-71, ISBN: 978-605-4889-17-4, 2015.
4. Frazer, M., Norman, R., Wells, R., Neumann, P. The effects of job rotation on the risk of reporting low back pain. *Ergonomics*, 46 (9), 904-919, 2003.
5. Moussavi, S. E., Zare, M., Mahdjoub, M., Grunder, O. Balancing high operator's workload through a new job rotation approach: Application to an automotive assembly line. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 71, 136-144, 2019.
6. Otto, A., Scholl, A. Reducing ergonomic risks by job rotation scheduling. *OR spectrum*, 35 (3), 711-733, 2013.
7. Bernard, T. E., Kenney, W. L. Rationale for a personal monitor for heat strain. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 55 (6), 505-514, 1994.
8. Tayyari, F., Smith J.L., *Occupational Ergonomics Principles and applications*, Chapman and Hall, London, 1997.
9. Al-Bouwarthan, M., Quinn, M. M., Kriebel, D., Wegman, D. H. Assessment of Heat Stress Exposure among Construction Workers in the Hot Desert Climate of Saudi Arabia. *Annals of work exposures and health*, 63 (5), 505-520, 2019.
10. Varley, F. A study of heat stress exposures and interventions for mine rescue workers, *Transactions*, 316, 133-142, 2004.
11. Rowlinson, S., YunyanJia, A., Li, B., ChuanjingJu, C. Management of climatic heat stress risk in construction: a review of practices, methodologies, and future research. *Accident Analysis & Prevention*, 66, 187-198, 2014.
12. Holmer, I. Climate change and occupational heat stress: methods for assessment. *Global Health Action*, 3 (1), 5719, 2010.
13. Garzón-Villalba, X.P., Wu, Y., Ashley, C.D., Bernard, T.E. Heat stress risk profiles for three non-woven

- coveralls. *Journal of occupational and environmental hygiene*, 15 (1), 80-85, 2018.
14. Wang, S., Richardson, M. B., Wu, C. Y., Cholewa, C. D., Lungu, C.T., Zaitchik, B.F., Gohlke, J.M. Estimating occupational heat exposure from personal sampling of public works employees in Birmingham, Alabama. *Journal of occupational and environmental medicine*, 61 (6), 518-524, 2019.
 15. Dutta, P., Rajiva, A., Anhare, D., Azhar, G. S., Tiwari, A., Sheffield, P., Climate Study Group. Perceived heat stress and health effects on construction workers. *Indian journal of occupational and environmental medicine*, 19 (3), 151, 2015.
 16. Bernard, T.E., Ashley, C.D. Short-term heat stress exposure limits based on wet bulb globe temperature adjusted for clothing and metabolic rate. *Journal of occupational and environmental hygiene*, 6 (10), 632-638, 2009.
 17. Sheffield, P.E., Herrera, J. G. R., Lemke, B., Kjellstrom, T., Romero, L. E. B., Current and future heat stress in Nicaraguan work places under a changing climate. *Industrial health*, 51 (1), 123-127, 2013.
 18. Dang, B.N., Dowell, C.H. Factors associated with heat strain among workers at an aluminum smelter in Texas. *Journal of occupational and environmental medicine/American College of Occupational and Environmental Medicine*, 56 (3), 313, 2014.
 19. Methner, M., Eisenberg J., Evaluation of heat stress and heat strain among employees working outdoors in an extremely hot environment, *Journal of Occupational And Environmental Hygiene*, 15 (6), 474-480, 2018.
 20. Meshi, E.B., Kishinhi, S.S., Mamuya, S.H., Rusibamayila, M.G., Thermal exposure and heat illness symptoms among workers in Mara Gold Mine, Tanzania. *Annals of global health*, 84 (3), 360, 2018.
 21. Carnahan, B. J., Redfern, M. S., Norman, B., Designing safe job rotation schedules using optimization and heuristic search. *Ergonomics*, 43 (4), 543-560, 2000.
 22. Wongwien, T. Nanthavanij, S., Ergonomic Workforce Scheduling with Productivity and Employee Satisfaction Consideration. *Proceedings of the 4th International Conference on Engineering, Project, and Production Management*, 1108-1116, 2013.
 23. Akbari, M., 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)*, March 3 – 5, 2015.
 24. Moussavi, S. E., Mahdjoub, M., Grunder, O., Reducing production cycle time by ergonomic workforce scheduling. *IFAC-PapersOnLine*, 49 (12), 419-424, 2016.
 25. Hochdörffer, J., Hedler, M., Lanza, G., Staff scheduling in job rotation environments considering ergonomic aspects and preservation of qualifications. *Journal of manufacturing systems*, 46, 103-114, 2018.
 26. Moussavi, S. E., Mahdjoub, M., Grunder, O., A multi-objective programming approach to develop an ergonomic job rotation in a manufacturing system. *IFAC-PapersOnLine*, 51 (11), 850-855, 2018.
 27. Savino, M. M., Riccio, C., Menanno, M., Empirical study to explore the impact of ergonomics on workforce scheduling. *International Journal of Production Research*, 1-19, 2019.
 28. Seçkiner S.U., Kurt M., Workload Minimization by Integrated Tour-Rotation Scheduling Approach, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 20 (2), 161-169, 2005.
 29. Baykasoğlu A., Akyol Ş.D., Ergonomic Assembly Line Balancing, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 29 (4), 785-792, 2014.
 30. Güner B., Hasgül S., U-Type Assembly Line Balancing with Ergonomic Factors for Balance Stability, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 27 (2), 407-415, 2012.

