

PENCERE CAMI VE LED AYDINLATMA ÖZELLİKLERİNİN OFİS KULLANICILARININ BİLİŞSEL/ÇALIŞMA PERFORMANSLARI, BEĞENİLERİ VE DUYGU DURUMLARI İLE İLİŞKİLENDİRİLMESİ

Tuğçe KAZANASMAZ¹, F. Büşra KÖSE¹, H. Engin DURAN², Gökmen
TAYFUR³,

³Prof. Dr., Mimarlık Bölümü, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İzmir, 35430, Türkiye,
tugcekazanasmaz@iyte.edu.tr

³Doktora Öğrencisi, Mimarlık Bölümü, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İzmir,
35430, Türkiye, fatmabusra.kose@gmail.com

³Prof. Dr., Şehir ve Bölge Planlama Bölümü, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İzmir,
35430, Türkiye, enginduran@iyte.edu.tr

³Prof. Dr., İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İzmir,
35430, Türkiye, gokmentayfur@iyte.edu.tr

ÖZET

İnsan odaklı aydınlatma, insanların sağlıklı ve iyi olmalarını hedefleyen bir aydınlatma kavramı olarak karşımıza çıkmaktadır. Aydınlatmanın insanlar üzerindeki görsel etkileri ile beraber görsel olmayan etkileri de bu çerçevede incelenmektedir. Aydınlatma tasarımı ölçütleri buna göre belirlenmektedir. İç mekanın aydınlatma koşullarının üretkenliğe/öğrenmeye, duyu durumlarına ve sağlık durumlarına olan etkisi kanıtlanmış ve çalışılmaktadır. Bu kapsamda, ofis çalışanlarının bilişsel performansları, uyanıklık ve duyu durumları ile görsel konfor ve beğenileri ile aydınlatma koşullarının ilişkilendirilmesi hedeflenmiştir. Dinamik LED/günüşiği aydınlatması ile pencere camı türlerinin bir arada kullanılması ile çeşitli aydınlatma koşulları elde edilmiştir. Kişilerin katılması ile deney ve testler uygulanarak hem aydınlatma ile ilgili objektif veriler hem de kişilere bağlı subjektif veriler elde edilmiştir. Bunlar istatistik yöntemler aracılığıyla ilişkilendirilmiş, yapay zeka modelleri ile kişilerin performansları tahmin edilmiş ve etkili parametreler belirlenerek de performansları sınıflandırılmıştır. Sonuçlar bize kişilerin performansını etkileyebilecek en uygun aydınlatma koşullarını sağlama potansiyeli olan, dinamik LED aydınlatma ile en uyumlu cam türlerini sunmaktadır. Bu çalışma, en iyi bilişsel performans, veya görsel konfor/beğeni değerlendirilmesini veya en iyi uyanıklık ve duyu durumu sağlayan aydınlatma koşulları hakkında bilgi birikimini ve geri bildirimini sağlamaktadır. Enerji korunumu sağlanırken insan-sağlık ilişkisinin de ortaya konması ve bununla ilgili bilinç/farkındalık sağlanması bu projenin sonuçları üzerinden olabilecektir. İnşaat sektöründeki profesyonellerin farkındalığının artması ile, bu proje sonucundaki önerilerin bina tasarımlarında ve uygulamalarında kullanılması mümkün olacaktır.

Anahtar Kelimeler: günüşiği, LED, insan odaklı aydınlatma, bilişsel performans, görsel konfor

1. GİRİŞ

"İnsan odaklı aydınlatma" kavramı başlangıçta güneş ışığının dinamik atmosferini insanların yaşam ve çalışma alanlarına taşımak, biyolojik saat ve sirkadiyen ritimlerin bozulmasını önlemek için ortaya çıkmıştır [1]. Bu tür aydınlatma tasarımlarında hedef, ışığın kişilerin sağlığı üzerindeki etkilerini ve

faydalarını dengelemektir. Gün ışığı, iyi bir aydınlatma kalitesi için referans olmaya devam etmektedir ve insan odaklı aydınlatmanın temelidir [2-4].

1.1. Günüşiği ve İnsan Odaklı Aydınlatma

Doğal aydınlatmanın faydası sadece enerji tüketimi ve konfor koşullarının sağlanması ile sınırlı olmamakta, insan sağlığını (psikolojisini, göz sağlığını, hormonların salınımını, uyku durumu, tavırlarını), çalışma performansını, öğrencilerin öğrenme performansını, bina kullanıcılarının estetik beğeni ve mekan/iç fiziksel çevrenin algısını etkilediği son dönem araştırmalarda sıkça vurgulanmaktadır [5,6]. Bu etkiler, ışığın görsel, biyolojik ve duygusal faydalarının bir araya gelmesiyle olmaktadır. Bu konular “insan odaklı aydınlatma” ile ilişkilidir; insanların enerjik veya dinlenmiş hissetmeleri; uyanıklık durumlarının artırılması; bilişsel performansları ve duygu durumlarının desteklenmesi; uyku ve uyanma döngülerinin desteklenmesi, bu kavramın içeriğini oluşturmaktadır. Günışığının spektral yapısı—her bir dalga boyunda yayılan enerji miktarı ve dağılımı—tüm bu etkilere sebep olur [6, 7].

Bu bağlamda, bina açıklıklarında kullanılan camın optik özellikleri belirlenirken ve pencere tasarımı düşünülürken içeri alınan günışığının spektral yapısının değişip değişmediği kontrol edilmelidir. Son yıllarda teknolojinin de gelişmesiyle ve enerji verimliliği (ısıtma-soğutma) kaygısı ile pencere camları çok katmanlı, film kaplamalı, elektrokromik özellikli ve de hatta güneş paneli gibi elektrik üreten hale dönüşmüştür.

1.2. LED’ler ve İnsan Odaklı Aydınlatma

LED ışık kaynaklarını içeren aydınlatma sistemleri özellikle enerji verimliliği hedef alındığında çok ekonomik çözümler sunar. Bu lambaların enerji tüketim değerleri yaydıkları ışık miktarı yüksek olmasına rağmen floresan lambalara göre görece çok düşüktür.

Lamba ömürleri çok yüksektir. Buna rağmen, ışık sağlık ilişkisi dikkate alındığında LED ışığın insan sağlığına olan etkileri detaylı bir şekilde kamaşma, optik hasarlar, LED titreşimi, LED ışığa gece maruz kalınması, LED lerin zehirli kimyasal içeriği gibi başlıklar altında incelenebilir [8]. LED ışığın spektrumu incelendiğinde mavi dalga boyunda (450-490nm) enerji dağılımının daha yüksek çıktığı görülür. Bunun da insanların sirkadyen ritmi dolayısıyla melatonin hormonu salınımına etkisi olabileceği son dönem araştırmalarda ele alınmaktadır. Işığın görsel olmayan etkisini değerlendirmek için önerilen bir yöntem, “melatonin” hormonunun salgı yüzdesi diğer bir deyişle CS (circadian stimulus) oranının hesaplanmasıdır. Bir ışık kaynağının (örn. LED veya günışığı) spectral yapısına (Spectral power distribution--herbir dalgaboyunda yayılan enerji miktarı ve dağılımı) bağlı olarak ve bir çok saha ölçümleri ile geliştirilen bir dizi formül ile CL (circadian light) hesaplanabilir [9]. Dersliklerde ve ofislerde, ışık kaynağının renk sıcaklığı, aydınlık düzeyi ve spektrumu ile sirkadyen ritm; öğrencilerin öğrenme performansı, insanların çalışma performansı, çeşitli yöntemler geliştirilerek ilişkilendirilmiştir [6, 10]. Bu çalışmalar son yıllarda önem kazanmış ve artarak devam etmektedir. En uygun ve doğru sonuç veren yöntemler araştırılmaktadır.

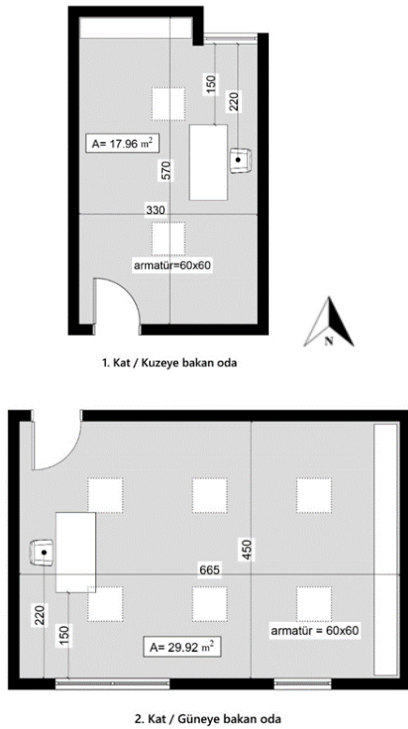
1.3. Çalışmanın Amacı

Pencere tasarımı, ofislerde günışığından en etkili şekilde yararlanılması için önemlidir. Gerek konvansiyonel pencerelerde gerekse giydirmeye cam cephelerde kullanılan camın doğru seçilmesi günışığının kullanıcılarda gözle görülmeyen etkileri açısından önemlidir. LED’li aydınlatma sistemlerinin de benzer etkileri olmaktadır. Bu çalışma ile LED’li

aydınlatma ile cam seçimi bir arada ele alınarak kullanıcıların beğeni, dikkat, uyanıklık durumu ve iş performansları ilişkilendirilmiştir. Böylece en uygun aydınlatma koşulları tanımlanarak (aydınlık düzeyi, renk sıcaklığı, spektral dağılım, cam türü) kullanıcıların performansı ve beğenisi yapay zeka modelleri ile tahmin edilmiş ve sınıflandırılmıştır.

2. METOD

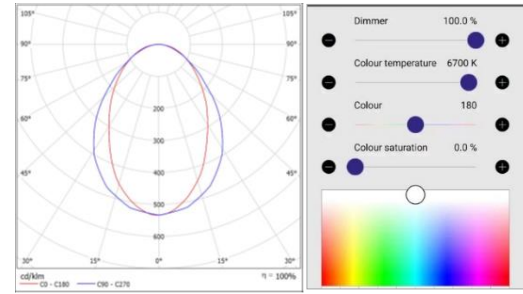
Bu çalışmada, iki ofisin mevcut durumun tespiti için, iç mekan aydınlık düzeyini etkileyen yüzey malzemelerin yansıtıcı özellikleri aydınlık ölçer ve parlaklık ölçer (luminance meter) kullanılarak yerinde ölçülmüştür. Ofisler deneyler için hazırlanmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Ofislerin planları

Kararlaştırılan LED aydınlatma armatürünün ismi “EAE A.ITR16.620 PUFIN 600mA CLEAR DİF.+MIKRO PRIZMATİK DİF.LU TUNABLE WHITE”, ışık akısı 3271 lm, ışıklık gücü

30.7 W ‘dır. Odalarda ortalama 500 lx sağlayacak şekilde ve düzgünlüğü elde edecek şekilde sayı ve yerlerine karar verilmiştir. Kuzey oda için 4 adet, güney oda için 6 adet armatür olması gerektiği anlaşılmıştır. LED lerin açıp kapatılması, aydınlık düzeyi ve renk sıcaklığı ayarları için bir uygulama programı (4remoteBT) kullanılmıştır (Şekil 2).



Şekil 2. Işık dağılım eğrileri.

DeneySEL çalışma ile hem objektif - aydınlatma koşullarının yerinde ölçülmesi hem de subjektif - kişilerin sağlık (uyanıklık ve duygu durumları), dikkat, algı, hafıza ve aydınlatma ortamının beğenisi/tercihi konularında anket ve testler yapılmıştır. Elde edilen veriler istatistiksel yöntemlerle analiz edilmiştir. Ölçülen objektif veriler, yapay zeka (yapay sinir ağları) modeli kurulmasında ve test edilmesinde kullanılmış, kişilerin subjektif değerlendirmeleri tahmin edilmiştir. Ölçüm değerleri ve subjektif veriler bir arada ele alınarak bulanık mantık modeli kurulmuş ve kişilerin performans/beğeni/duygu durum değerleri sınıflandırılmıştır.

2.1. DeneySEL Çalışma

DeneySEL çalışmaya başlarken, öncelikle cam türleri her bir deney aşamasından önce pencereye takılmıştır (Tablo 1). Ofislerin aydınlatma koşullarını belirlemek için çalışma masası

üzerinden ($h=80$ cm) ve yatay ölçüm noktalarından spektrofotometre ile aydınlık düzeyi (lux) ve renk sıcaklığı (K) ve spektral güç dağılımları (SPD) değerleri ölçülmüştür. Aynı ölçümler düşey yönlü olarak göz hizasından masa kenarı ve pencere önü noktalarından da alınmıştır. Ölçümler Ekim 2021’de başlayıp 12 ay boyunca, sabah saat 9:00 ve 11:00’de, öğleden sonra da 13:00 ve 15:00’te gerçekleştirilmiştir (Şekil 3).

Ofiste görüş alanı içerisine giren belirli noktalardan parıltı ölçümleri (cd/m^2) alınmıştır. EML değeri, The International Well Building Institute (2022) tarafından önerilen "melanopik oran hesaplayıcı"sı ile, CS değeri, Lighting Research Center (2022) tarafından önerilen "Circadian Stimulus hesaplayıcısı" ile hesaplanmıştır.



Şekil 3. Ofis A (üst) ve Ofis B (alt).

2.2. Anket ve Performans Testleri

Kişilerin sağlık (uyanıklık ve duyu durumları) (KSS ve PANAS), dikkat, algı, hafıza ve aydınlatma ortamının beğenisi/tercihi konularında anket ve performans testlerine (Stroop [11],

Landolt [12], N-back [13]) dayalı subjektif bir yöntem tasarlanmıştır. Böylece, ışığın insan üzerindeki görsel olmayan etkilerini incelemek hedeflenmiştir. Fiziksel ölçümlerin yanı sıra, ofis kullanıcılarına bir takım görsel ve algısal performans testleri uygulanıp kişilerin iç ortam aydınlatma kalitesini öznel olarak değerlendirmesi istenmektedir. Anket ve performans testleri için gerekli sorular ve yazılar hazırlanmış, katılacak kişilere duyuru posterleri hazırlanıp çeşitli eposta kanallarıyla duyurular yapılmıştır. Stroop ve N-back testleri bilgisayarda web üzerinden açılıp ayarları yapılmıştır. Katılımcıların kullanacağı anket ve performans testlerinin bilgisayar çıktıları bir form olarak hazırlanmıştır. Öznel ölçme zamanları aydınlık koşullarının ölçümlerinden hemen sonra başlamıştır.

2.3. Katılımcı Profili

Çeşitli cam türlerinin ayarlanabilir LED aydınlatma sistemleri ile birlikte kullanımıyla insanların sağlığı, duyu durumu, dikkati ve çalışma performansı bakımından en iyi aydınlatma koşullarının belirlenmesi amacıyla çeşitli yaş gruplarından (20-55) katılımcılar belirlenmiştir. Toplam 12 ay süren ve optik özellikleri farklılaşan toplam 10 tür camın uygulandığı deneysel çalışma aşaması, toplam 368 katılımcıyla tamamlanmıştır. Katılımcılar akademik, idari personel ve öğrencilerden oluşan bir grup içerisinde belirlenmiştir. Katılımcıların yaş aralığı 20 ile 55 arasında değişirken; %33’ü erkek, %67’si kadındır. Her bir cam türü, istatistik analize girecek grupları temel olarak temsil ettiğinden, bu temel koşulu sağlayan en az 31 ‘er kişilik katılımcı grupları ayarlanmıştır.

Tablo 1. Cam türlerinin özellikleri (geçirgenlik çarpanı değerlerine göre sıralanmışlardır)

	Cam türü	Katmanlar	Geçirgenlik
1	ÇİFT KATMANLI BERRAK CAM (MEVCUT)	4 mm+9 mm air+4mm	%90
2	AKILLI CAM	4 mm +12 mm Hava + 8 mm	% 82 transparan 2% opak
3	ISI KONTROL	Temperlenebilir Low-E Cam 6mm 71/53 +9mm Hava+ Renksiz Düzcam 4mm Renksiz	%72
4	ISI + GÜNEŞ	Temperlenebilir Solar Low-E Cam 6mm Nötral 50/33+9mm Hava+Şişecam Renksiz Düzcam 4mm Renksiz	%50
5	GÜNEŞ KONTROL	Renkli Düzcam 6mm Mavi+9mm Hava+ Low-E Cam 4mm Nötral	%49
6	GÜNEŞ KONTROL	Renkli Düzcam 6mm Bronz+9mm Hava+ Low-E Cam 4mm Nötral	%44
7	GÜNEŞ KONTROL	Renkli Düzcam 6mm Füme+9mm Hava+ Low-E Cam 4mm Nötral	%39
8	AMORPHOUS SILICON (A-SI) PV CAM MAVI	4+4 dış PV cam + 6mm Hava +4mm iç cam (Blue 0363)	%30
9	AMORPHOUS SILICON (A-SI) PV CAM TURUNCU	4+4 dış PV cam + 6mm Hava +4mm iç cam (Orange 008E)	%30
10	REFLEKTİF CAM	Tentesol 6mm Mavi+9mm Hava + Low-E Cam 4mm Nötral	%21

2.4. İstatistik Analizler

Aydınlatma koşullarının kullanıcıların uyanıklık, duygu durumu, dikkat, algı, hafıza ve beğenilerine olan etkileri ayrı ayrı t-test, regresyon ve ANOVA analizleri kullanılarak incelenmiştir. [14,15]. İstatistik analizler, R, Excel, Neural Tools programları kullanılarak yapılmıştır.

- Her bir cam için ayrı ayrı, performans göstergeleri ile aydınlatmanın fiziksel ölçülebilir parametreleri arasındaki ilişki korelasyon analizleri ile incelenmiştir.
- Eavg, ortalama aydınlık düzeyi değerleri üç gruba ayrılarak, bu üç grup (Eavg < 300 lux; 300lux < Eavg < 750 lux; Eavg > 750 lux) için performans

göstergeleri, anket sonuçları, duygu durum göstergelerinin anlamlı farklılıklar gösterip göstermediği ANOVA testleri kullanılarak yapılmıştır [11]. Her bir cam için ayrı ayrı yapılarak etkileri incelenmiştir.

- CCT, renk sıcaklık değerleri dört gruba ayrılarak, bu dört grup için (1. Günışığı; 2. CCT > 5000K; 3. 4000K < CCT < 5000K; 4. CCT < 4000 K) performans göstergeleri, anket sonuçları, duygu durum göstergelerinin anlamlı farklılıklar gösterip göstermediği ANOVA testleri kullanılarak yapılmıştır. Her bir cam için ayrı ayrı yapılarak etkileri incelenmiştir.
- Üç parıltı oranı (çalışma düzlemi/ekran parıltı oranı olan L1 (3/1 olmalı); duvar/ekran parıltı oranı olan L2

(10/1 olmalı); pencere/ekran olan L3 (10/1 olmalı) için kamaşma hissini orantısal olarak gösteren GSV derecelendirmesine göre gruplar oluşturulmuştur. Her bir GSV grubuna göre, parlıltı ölçümleri anlamlı olarak farklılık göstermiş midir diye ANOVA testi uygulanmıştır.

- Fiziksel çevre ve aydınlatma koşullarının ofis kullanıcılarının bilişsel performansı, memnuniyeti, uykululuk ve duyu durumu üzerindeki etkilerini tespit etmek amacıyla geniş ölçekli bir çoklu regresyon modeli kurulmuştur. Bağımlı ve bağımsız değişkenler belirlenmiştir.

2.5. Yapay Zeka Modelleri

Aydınlık düzeyi, CS değerleri, melatonin salgısı göstergesi, LED renk sıcaklığı, SPD değerleri, cam türü gibi parametreler kullanarak performans göstergelerinin yapay sinir ağı modeli(ANN) [16] ile tahmin edilmesi hedeflenmiştir. Modelin eğitilmesi (training) için veri setlerinin %60'ı kullanılmış, %40'ı tahmin etmesi (testing) amacıyla kullanılmıştır. Deneylerdeki girdi parametreleri ve istatistik analizlerdeki bağımsız değişkenlerden en ilgili olanları ile ANN girdileri belirlenmiştir. Landolt, Stroop ve N-back sonuçları için ayrı ayrı, anket değerlendirmelerinden konfor, doğallık, netlik ve beğeni sonuçları için ayrı ayrı, GSV (kamaşma), KSS (uyanıklık) ve PDD(duyu durumu) için ayrı ayrı modeller kurulmuştur.

Benzer model en etkili parametreler seçilerek (istatistik analizler ve ANN de en etkili bulunan parametreler doğrultusunda) bulanık mantık yöntemiyle (fuzzy model) kurulmuş, böylece düşük orta ve yüksek performans sınıfları CS, aydınlık düzeyi,

renk sıcaklığı, SPD, cam türü gibi parametrelere bağlı olarak oluşturulmuştur. Performans göstergeleri, ayrı ayrı ele alınarak minimum değerden maksimum değere göre sıralanmış; sınır değerleri verilerin dağılımına göre eşit olarak paylaştırılmış, belirlenmiş ve iyi, orta ve yüksek gruplara göre sınıflandırılmışlardır. Performans göstergelerinden Landolt için cam türü, CS ve CCT2, Stroop için cam türü, EV3, SPD2, ve CCT2, N-back için EML; Anket sonuçlarına göre konfor için cam türü, EV3 ve CCT1, beğeni için cam türü ve EML, doğallık için CCT2, SPD2 ve EH2, netlik için SPD2 ve EML; kamaşma göstergesi GSV için lum3 ve EV3; uyanıklık göstergesi KSS2 için cam türü, EML ve dimleme oranı; pozitif duyu durumu göstergesi PDD2 için cam türü ve dimleme oranı girdi parametreleri olmuştur.

3. SONUÇLAR

3.1.Cam türlerine göre

Bu bölüm, doğrusal regresyon modelleri ve grafik gösterimler aracılığıyla cam türlerinin iç mekan fotometrik ölçümleri, katılımcıların görev performansı ve aydınlatma değerlendirmeleri üzerindeki etkisinin değerlendirilmesini içermektedir. Gün ışığının özellikleri oda yönüne göre farklılık göstermektedir. Güney cephedeki gökyüzü SPD'leri tüm dalga boylarında daha fazla emisyon gösterirken, kuzey cephesinde ölçülen gökyüzü SPD'leri kısa dalga boylarından daha uzun dalga boylarına doğru hızlı bir düşüş göstermektedir. Pencereden yapılan ölçümler, mevcutta kullanılan çift camın güneydeki gökyüzü SPD'lerine en yakın eğilimi gösterdiğini, yani camın diğerlerinden daha nötr

davranışa sahip olduğunu gösteriyor. Ancak kuzeyde tüm cam türleri benzer davranış göstermekte ve kısa dalga boylarında iç kısımdaki ışınım azalmaktadır.

Çevresel değişkenlerin (yön, zaman, cam tipi ve hava koşulları) fotometrik ölçümler, katılımcıların bireysel LED ayarları (dim, CCT) ve sirkadiyen göstergeleri üzerindeki etkisi analiz edildiğinde katılımcıların LED aydınlatma tercihlerinin odanın yönüne göre farklılık gösterdiğini; güneye bakan odada daha yüksek aydınlatma ve CCT değerleri tercih edildiği anlaşılmaktadır. CS değerlerinde anlamlı bir fark olmamasına rağmen, EML değeri iki odada önemli ölçüde farklılık göstermektedir. Cam türleri de katılımcıların CCT tercihlerini ve EML değerlerini önemli ölçüde etkilemektedir. Çalışma düzlemi CCT ve baskın dalga boyu değerleri dışında, ölçüm sonuçları LED aydınlatma tercihlerini desteklemektedir. Cam tipi ve hava koşullarına bağlı olarak göz hizasındaki aydınlıkta güçlü değişimler gözlenir.

Aydınlatma koşulları ile çevresel ve demografik değişkenlere göre, iş performansındaki en gözle görülür değişiklik, kağıt bazlı Landolt testinde meydana gelmiştir. Bilgisayar tabanlı performans testlerinin aksine, Landolt sonuçları cam türü, göz hizası renk sıcaklığı-CCT ve baskın dalga boyu değerlerinde önemli farklılıklar göstermektedir. Katılımcılar, deneyin ikinci aşamasında halkaları doğru saymada daha iyi performans göstermektedir. Yüksek değerlerdeki CCT'ler (daha soğuk ışık) kontrastı/dikkati olumlu etkilemektedir. Yaş ve cinsiyet sırasıyla Stroop ve N-

back testlerinin performansını belirleyen faktörlerdendir. Genç bireyler Stroop testinde daha iyi performans gösterirken, erkekler N-back testinde daha yüksek puanlar almaktadır. GSV puanlarından elde edilen analiz sonuçlarına göre, katılımcıların kendi aydınlatma ayarlarında görsel rahatsızlık hissinin önemli ölçüde azaldığı söylenebilir. Sonuçlar, cam türlerinin de görsel konfor üzerinde oldukça etkili olduğunu ortaya koymuştur.

Oda koşulları, ölçümler, ve aydınlatma kalitesi/memnuniyeti hakkında anketten alınan yanıtlar arasındaki ilişkiler belirlendiğinde deney aşamasının görsel konfor değerlendirme soruları (rahatlık, homojenlik ve ışık kalitesi) üzerindeki güçlü etkinliğini önemli ölçüde göstermektedir. Cam türünün, ışığın homojen olarak dağılması önemli bir etkisi bulunmuştur. Göz seviyesindeki CCT'lerin aksine, aydınlık düzeyi, parıltı ve görsel konfor değerlendirmelerini önemli ölçüde değiştirebilir. CCT, görsel ortamın çekici olup olmadığını değiştirebilir; ancak, spektral dağılımın da güçlü bir belirleyiciliği olmaktadır. Görsel ortamın doğallığı da, aydınlatma koşullarından güçlü bir şekilde etkilenmektedir. Bu durumda dış manzaradan duyulan memnuniyet, odanın yönüne göre anlamlı farklılık göstermektedir. Aşamalarda aydınlık düzeyi ve renk sıcaklığı değiştiğinden, yapay ışığın kalitesi ile nesnelerin dokularının ve formunun nasıl algılandığı arasında güçlü bir ilişki bulunmuştur. Cam türünün bu değişkenler üzerinde benzer ancak daha az güçlü etkileri vardır. Odadaki renk algısı, aşamalardan, göz hizası CCT'den ve SPD'lerden hafif ve önemli ölçüde etkilenmektedir. Netlik değerlendirmesi,

kağıt üzerindeki metin, ekrandaki metin, kağıt ile üzerindeki yazılı metin arasındaki kontrast dengesi, nesnelerin dokularının, ayrıntıların ve renklerinin algılanmasıyla ilgilidir. Camların geçirgenliğinin metnin okunabilirliği, kontrast dengeleri, doku izlenimleri üzerinde önemli etkilerin nedeni olduğu sonucuna varabiliriz. Aydınlatma kalitesi değerlendirmesi, renklerin doygunluğu , ışığın ambiyansı , doğal veya yapay olarak aydınlatılmış olma durumu, iş için uygun ışık seviyesi ve genel ışık kalitesi ile ilgili sorulara dayanır. Cam değıştikçe, iş verimliliğinin ve genel memnuniyetin öznel değerlendirmesinde ve özellikle ortam ışığının doğal veya yapay olarak algılanmasında önemli farklılıklar olduğu bildirilmiştir. Spektral özelliklerdeki ve ışık miktarındaki değışim, genel aydınlatma kalitesinin değerlendirilmesini olumlu yönde etkilemektedir.

Bu çalışma kapsamında yapılan objektif ve sübjektif ölçümler, cam çeşitlerinin iç mekan yapay aydınlatma tercihlerine, kullanıcıların sağlığına, çalışma verimliliğine ve memnuniyetine etkisi konusunda önemli sonuçlar ortaya koymaktadır. İki odada yapılan ölçümler sonucunda gün boyunca kuzey ve güneyde farklı ışık karakteristiğinin hakim olduğu ve bu durumun kullanıcıların aydınlatma sisteminin CCT ve dim ayarını etkilediği tespit edilmiştir. Güneye bakan odada ilk aydınlatma daha yüksek olmasına rağmen, insanlar odadaki aydınlatma dağılımını dengelemek için LED kısma ayarını daha da artırma eğiliminde olmuşlardır. Katılımcılar, göz hizasında ortalama 680 lux aydınlatma ve soğuk beyaz ışığı (4798 K) tercih etmişlerdir. Kuzeye bakan odada 300 lux aydınlatma

ve aynı konumdaki nötr beyaz ışık (4200 K) katılımcıların tercihi olmuştur.

Mevcut camlar (C1) nispeten nötr bir davranış sergilemesine rağmen, gelişmiş cam (C2, C8, C9, C10) türleri gün ışığının yapısını aydınlatma ve CCT açısından değıştirerek iç mekânlarda farklı CCT seçeneklerine yol açmıştır. Aydınlatma tercihlerindeki bu değışimlerin kişilerin sağlık/sirkadiyen ritmi üzerindeki etkileri literatürde kabul gören iki hesaplama yöntemi ile incelenmiş ve cam türüne (maruz kalan ışık miktarının yanı sıra) göre EML değerlerinde önemli farklılıklar elde edilmiştir. Geçirgenlik değeri en düşük olan renkli PV camlar ve reflektif camlar, gün ışığı karakterinde en dikkat çekici değışimi oluşturmuş ve katılımcıları LED dim ve CCT ayarını diğer cam türlerine göre daha fazla artırmaya sevk etmiştir. Bu, diğerlerinde olduğu gibi nötr beyaz ışık yerine soğuk beyaz ışığın baskın olduğu bir ortam (5057 K) ile sonuçlanmıştır. Göz seviyesinde ölçülen aydınlık düzeyi, CCT ve EML'nin en düşük değeri low-e camlar varken elde edilmiştir. Ancak Landolt testi (kağıda dayalı bir kontrast testi) yüksek hata oranları, buranın ofis kullanıcıları için uygun bir aydınlatma ortamı olmayabileceğini göstermektedir. Diğer camların (şeffaf cam, akıllı cam ve solar low-e cam) uygulanması durumunda, yaklaşık 500 lx göz seviyesi aydınlatması, 4500 K CCT ve 450 EML elde edilmiştir ve katılımcılar daha fazla görev performanslarında başarılı olmuşlardır. Cam türü, CCT ve ışık spektrumu ile birlikte kağıt tabanlı performans görevlerini güçlü bir şekilde etkilese de, bilgisayar testleri aydınlatma koşullarından ziyade demografik

bilgilerle ilişkilendirilmiştir. Bu çıkarımlar, aydınlatma tasarımcılarına bina cephesinde kullanılan cam tipine göre armatür renk sıcaklığı ve ışık şiddeti seçiminde yol gösterici olabilir.

Aydınlatma kalitesi değerlendirmelerinde, ışığın homojenliği, doğal ve yapay ışığın uyumu, algılanan nesnelere doku ve renkleri, kağıt ve çevre arasındaki kontrast dengesi arasında güçlü bir ilişki bulunmuştur. Odadaki görsel konfor, doğallık, hassasiyet ve aydınlatma kalitesinin genel değerlendirmesi açısından, şeffaf cam en tatmin edici cam olurken, yansıtıcı cam ankette en düşük puanları almıştır. Odadaki ışık ayarlarının cam cinsine göre yönlendirilebilmesi genel memnuniyeti artırmıştır. Bu durum, iş yerlerinde kullanıcıların refahı, çalışma performansı ve memnuniyeti açısından temel unsurlardan biri olan aydınlatma tasarımında cam seçiminin dinamik LED sistemleri ile birlikte değerlendirilmesinin önemini ortaya koymuştur.

3.2. Performans testlerine göre

Bu bölüm, performans test sonuçları ile fiziksel ölçümlerin ilişkili olup olmadığını belirlemek için üzerinedir. Landolt testindeki hata oranları ile deneyin aşaması, cam türü, iç ortam ve masaüstü dominant dalga boyu, LED renk sıcaklığı ayarı ve özellikle iç ortam renk sıcaklığı arasında istatistiksel olarak anlamlı ilişki (Anlamlılık düzeyi $p < 0,05$) bulunmuştur. Deneyin ikinci aşamasında hata oranı azalmıştır. İç ortam renk sıcaklığı ve baskın dalga boyu azalmasıyla katılımcıların testteki performansında düşüş olduğu görülmektedir. Bu da, beyaz/soğuk ışığa

doğru kağıttaki kontrastın arttığına ve katılımcıların detayları daha iyi ayırt edebildiğine işaret etmektedir. Cam türü ve Landolt sonuçları arasındaki pozitif korelasyona göre camın geçirgenliği arttıkça da testteki başarının arttığı görülür. Katılımcının cinsiyetinin de testteki performans üzerinde anlamlı bir etkisi olmuştur, kadınlar daha başarılıdır.

Bilgisayarda yapılan Stroop testi sonuçlarına göre deneyin ikinci aşamasında tepki süresinde istatistiksel olarak anlamlı bir azalma olduğu, yani katılımcıların bu aşamada daha başarılı oldukları söylenebilir. Ayrıca tepki süresi ile yaş arasında pozitif anlamda yüksek korelasyon bulunmaktadır (yaş arttıkça tepki süresi artmıştır). Diğer bilgisayar testi olan n-back sonuçlarına göre cinsiyet değişkeni doğru eşleştirme oranında oldukça etkili olmuştur – erkekler daha başarılıdır. Kısa süreli hafıza ve dikkati ölçen bu testte performansı etkileyen diğer bir faktör zaman olmuştur. Katılımcılar, öğleden sonra (saat 13:00 ve 15:00) daha iyi performans göstermişlerdir. İstatistiksel olarak anlam derecesi düşük olsa da göz hizası aydınlık düzeyinin artmasıyla doğru eşleştirme oranının düştüğü görülmektedir. Diğer yandan yanlış eşleştirme oranlarının dış ortam aydınlık düzeyi ve renk sıcaklığının artmasıyla (soğuk ışık) arttığı söylenebilir.

CS değeri, stroop testinde verilen tepki süresi ile ters yönlü bir ilişkidir. CS değeri arttıkça tepki süresi azalmaktadır. N back hafıza testinde de doğru dilinen harflerin oranı CS ile pozitif yönlü atmaktadır. CS nin artması bu iki bilişsel performansı olumlu yönde etkilemektedir. EML değeri, uyanıklık durumu, N-back testi göstergelerinden doğru ve yanlış oranlarla ilişkili

çıkıştır. EML değeri arttıkça uyanıklık artmaktadır, doğru bilme oranı azalmakta yanlış bilme oranı artmaktadır. CS ile uyumlu bir sonuç çıkmamıştır. CS, melatonin değerlerinin sınıflandırılması performans test sonuçlarıyla ilişkilendirilmesi de ayrıca incelenmiştir. Buna göre, CS'nin 0.3 ten yüksek ve düşük olmasına göre göz hizası ve masaüstü aydınlık düzeyi, renk sıcaklığı ve dominant SPD ile anlamlı ilişkili çıkmıştır. Uyanıklık durumu pozitif ve negatif duygu durumu ile konfor, doğallık, netlik ve beğeni ile de anlamlı ilişkilidir. Standartlarda verilen eşik değerlerin bu anlamda bu çalışmanın sonucu ile uyumlu olduğu söylenebilir. 0.3 değeri anlamlı bir eşik değerdir. EML'nin 250 lux'ten yüksek ve düşük olması da benzer şekilde etkili çıkmıştır.

Bulanık mantık modelleri sonucunda elde edilen sınıflandırmalarda en performans değerlerine ulaşılan aydınlatma ve cam türü koşulları hem tasarımcılara/profesyonellere hem de araştırmacılara öneri olarak getirilebilir. Devamında sürdürülebilir bina değerlendirmelerinde artı puan alınabilir. Örneğin, Landolt testinde hata oranının %30'un altında kalması en iyi performans göstergesi olur. Buna göre,

- Cam türü: C1 (renksiz düzcama), C2 (akıllı cam) veya C4 (solar low-e)
- Sirkadyen Uyarıcı (CS): 0.15 – 0.30 veya 0.30 – 0.40 aralığında
- İç Ortam Renk Sıcaklığı (CCT2): 0-5500K aralığında olduğunda bu kategori için en iyi Landolt skoru elde edilebilmekte ve puan alınabilmektedir.

Stroop testinde tepki süresinin 800 ms'nin altında kalması en iyi performans göstergesi olur. Buna göre,

- Cam türü: C2 (akıllı cam), C3 (low-e), C4 (solar low-e) veya C7 (füme solar low-e)
- Göz Hizası Aydınlık Düzeyi (EV3): 200 – 350 lux aralığında
- İç Ortam Renk Sıcaklığı (CCT2): 5100K – 6700K aralığında olduğunda bu kategori için en iyi performans elde edilebilmekte ve puan alınabilmektedir.

N-back testinde doğru eşleştirme oranının %60'ın altında kalması en iyi performans göstergesi olur. Bunun için tek bir kriter bulunur,

- Eşdeğer Melanopik Lux (EML): 300 lux ve üzerinde olduğunda bu kategori için en iyi performans elde edilebilmekte ve puan alınabilmektedir.

Anketteki doğallık kategorisi için Likert ölçeğinde verilen cevapların toplamının 15'in üzerinde olması doğallık açısından en iyi aydınlatma koşulunu gösterir. Buna göre,

- Cam türü: C1 (renksiz düzcama), C3 (low-e), C4 (solar low-e) veya C6 (bronz solar low-e)
- Dış Ortam Aydınlık Düzeyi (EH2): 570 lux ve üzeri
- İç Ortam Renk Sıcaklığı (CCT2): 3000K – 7000K aralığında olduğunda bu kategori için en iyi aydınlatma ortamı elde edilebilmekte ve puan alınabilmektedir.

Anketteki netlik kategorisi için Likert ölçeğinde verilen cevapların toplamının 30'un üzerinde olması netlik açısından

en iyi aydınlatma koşulunu gösterir. Buna göre,

- Cam türü: C1 (renksiz düzcam), C2 (akıllı cam), C5 (fume solar low-e) veya C6 (bronz solar low-e)
- Eşdeğer Melanopik Lux (EML): 175 lux ve üzeri
- İç Ortam Spektral Güç Dağılımı (SPD2): 0 – 485.70 aralığında olduğunda bu kategori için en iyi aydınlatma ortamı elde edilebilmekte ve puan alınabilmektedir.

Uyanıklık değerlendirmesi için uygulanan KSS testinde “1, 2 ve 3” cevabının verilmesi kişinin “uyanık/dikkatli” olduğunu koşulunu gösterir. Buna göre,

- Cam türü: C1 (renksiz düzcam), C2 (akıllı cam), C3 (low-e) veya C6 (bronz solar low-e)
- LED Dimmer ayarı: 45 – 100 aralığında
- Eşdeğer Melanopik Lux (EML): 250 lux üzerinde olduğunda bu kategori için en iyi aydınlatma ortamı elde edilebilmekte ve puan alınabilmektedir.

Duygu Durum değerlendirmesi için uygulanan PANAS testinde 35 puan ve üzeri kişinin pozitif hissettiğini gösterir. Buna göre,

- Cam türü: C1 (renksiz düzcam) veya C6 (bronz solar low-e)
- LED Dimmer ayarı: 70 ve üzerinde olduğunda bu kategori için en iyi aydınlatma ortamı elde edilebilmekte ve puan alınabilmektedir.

4. TARTIŞMA VE SONUÇ

İnsan odaklı aydınlatma çalışmaları, özellikle kişilerin aydınlatılan fiziksel çevre ile ilgili görüşlerini ön plana alan bir yaklaşımdır. Aydınlatma standartlarında gerekli sayısal aydınlık düzeyleri sağlansa bile kişilerin beğenileri ve tercihleri farklı olabilmektedir. Benzer şekilde aydınlatma koşullarının kişiler üzerinde gözle görülmeyen etkilerinden de bahsedilebilir. Uyanık olmaları duygu durumları da bu kategoriye girmektedir. Kişilerin bilişsel performanslarının aydınlatma koşullarıyla bağlantılı olduğu çeşitli çalışmalarla gösterilmiştir. Bu nedenle bu üç kategoriye ele alacak olursak her biri için en iyi, en uygun performans sağlanması aydınlatma tasarımı olarak artı bir puan karşılığı değerlendirilebilir. Landolt, Stroop veya N-back testlerinden birinde en iyi performans grubunda olmak +1 puan; konfor, beğeni, netlik, doğallık ve GSV testlerinden birinde en iyi performans grubunda olmak +1 puan; uyanıklık ve duygu durum testlerinde en iyi performans grubunda olmak +1 puan olarak değerlendirilebilir.

Buna göre örneğin, nötral ısı kontrol low-e cam (C4) uygulandığında sirkadyen göstergesi 0,3 olarak hesaplandığında yada aydınlatma koşulu bu değeri oluşturduğunda ve renk sıcaklığı 5500K olduğunda Landolt'ta hata oranı en düşük seviyededir, performans en iyi şekilde sağlanmaktadır. Renkli bronz düz cam (C7) uygulandığında göz hizası aydınlık düzeyi 300 lx'u sağladığında ve 6000K renk sıcaklığı olduğunda Stroop testinde tepki süresi en hızlı olmakta, performans en iyi şekilde sağlanmaktadır. Cam türünden bağımsız olarak 150 lux'luk eşdeğer melanopik aydınlık düzeyi sağlandığında ise hafıza testinde doğruluk oranı en yüksek olmakta, performans en iyi şekilde

sağlanmaktadır. Bu koşullardan birinin yerine getirilmesi bile değerlendirme ölçütlerinde artı puan olarak kabul edilebilir. Nötral ısı kontrol low-e cam (C4) varken, pencere önü dış aydınlık düzeyi 1000 lx ve iç ortam renk sıcaklığı 3000 K (daha sıcak sarı ışık altında) iken; veya renkli mavi düz cam (C6) varken pencere önü dış aydınlık düzeyi 3000 lx ve iç ortam renk sıcaklığı 5000 K iken (daha soğuk beyaz aydınlık ışık altında) doğallık en iyi olarak değerlendirilmektedir. Bu da cam türünün farkını en belirgin şekilde gösteren bir durum olmaktadır. Ancak her iki koşul için de bina/aydınlatma tasarımı artı puan alabilmektedir. Renkli füme düz cam (C5) kullanıldığında EML 250 lx ve pencere önü SPD 485,70nm iken netlik değerlendirmesi için en iyi aydınlatma ortamı sağlanmaktadır. Nötral ısı kontrol low-e cam (C4) varken pencere/ekran parıltı oranı 80 olduğunda ve göz hizası aydınlık düzeyi 400 lx ölçüldüğünde kamaşma değerlendirmesi belli/belirsiz olarak en düşük seviyede elde edilmektedir. Renkli mavi düz cam (C6) da hem parıltı oranı hem de aydınlık düzeyi bir miktar daha yüksek olsa da yine GSV kamaşma değerlendirmesi benzer çıkmıştır. Bu şekilde puan alınabilir. Uyanıklık değerlendirmesinin en iyi çıktığı aydınlatma koşulu örneğin nötral solar low-e (C3) varken dim ayarı %50 iken ve EML 500lx ölçüldüğünde olmuştur. Renkli mavi düz cam varken dim ayarı %70 iken pozitif durumu en iyi bir şekilde elde edilmektedir. Bu koşullar altında bu camlar önerilebilir.

Çalışmanın genel sonucu olarak nötral (C4), mavi (C5) ve füme solar low-e (C7) camlar uygulanmışken hem performans hem anket hem de duyu durum uyanıklık göstergelerine etkiler görülmüştür. Bu nedenle, dinamik LED aydınlatma sisteminin etkilerini bütüncül olarak görebileceğimiz en uyumlu camlar olarak değerlendirilmiştir. Bu

camların uygulanması insan odaklı aydınlatma tasarımının insanlar üzerindeki olumlu etkileri daha net görülebilir. Yukarıda bahsedilen puan alma koşulları başarıyla sağlanabilir.

Konvansiyonel aydınlatma tasarımı, görsel performans için gerekli yatay çalışma düzlemi aydınlatmasını ve/veya görsel konfor için parlaklık kontrolü için belirli parıltı oranlarını karşılamayı hedefler. Son zamanlarda araştırmacılar ve aydınlatma şirketleri, ışığın fizyolojik ve psikolojik etkilerini bilmelerine rağmen, ışığın insanlar üzerindeki görsel olmayan etkileri hakkındaki bilgilerin gelişmesine tanık olmuşlar ve sirkadiyen aydınlatma tasarımının ortaya çıkmasına katkıda bulunmuşlardır. Böylece aydınlatma tasarımına yönelik standart yaklaşım, insan odaklı yaklaşıma dönüşmüştür.

Teşekkür

Bu çalışma 220M006 nolu TÜBİTAK projesinin sonuç raporundan hazırlanmıştır. Proje desteği için TÜBİTAK MAG'a teşekkür ederiz. Projeye ayrıca destek olan EAE Aydınlatma ve Şişecam'a teşekkür ederiz.

KAYNAKÇA

[1] K. W. Houser, T. Esposito, "Human-Centric Lighting: Foundational Considerations and a Five-Step Design Process," *Front Neurol*, vol.12, pp.630553, 2021.

[2] M.G. Figueiro, M. Kalsher, B.C. Steverson, J. Heerwagen, K. Kampschroer, and M.S. Rea, "Circadian-effective light and its impact on alertness in office workers," *Lighting Res. Technol.*, vol. 51, pp. 171-183, 2019.

[3] M. E. Kompier, K. C. H. J. Smolders, and Y. A. W. de Kort, "A systematic

literature review on the rationale for and effects of dynamic light scenarios," *Build Environ*, vol.186, 2020.

[4] M.S. Rea, and M.G. Figueiro, "Light as a circadian stimulus for architectural lighting," *Lighting Res. Technol.*, vol. 50, pp. 497–510, 2018.

[5] Andersen, M. J. Mardaljevic, and S.W. Lockley, 2012. "A framework for predicting the non-visual effects of daylight—Part I: photobiology-based model," *Lighting Research and Technology*, 44, 37-53.

[6] Bellia, L., Pedace, A., Barbato, G. 2013. "Lighting in educational environments: An example of a complete analysis of the effects of daylight and electric light on occupants", *Building and Environment*, 68, 50-65.

[7] Bellia, L., Seraceni, M. 2014. "A proposal for a simplified model to evaluate the circadian effects of light sources", *Lighting Research & Technology*, 46(5), 493-505.

[8] Ticleanu, C., Littlefair, P. 2015. "A summary of LED lighting impacts on health", *The International Journal of Sustainable Lighting*, 1(1).

[9] Rea, M. S., Figueiro, M. G., Bierman, A., Bullough, J. D. 2010. "Circadian light". *J Circadian Rhythms*, 8(1), 2.

[10] Gentile, N., Goven, T., Laike, T., Sjoberg, K. 2018. "A field study of fluorescent and LED classroom lighting", *Lighting Research & Technology*, 50(4), 631-650.

[11] Stroop, J. R. 1935. "Studies of interference in serial verbal reactions". *Journal of experimental psychology*, 18(6), 643.

[12] Linhart, F., Scartezini, J. L. 2011. "Evening office lighting—visual comfort vs. energy efficiency vs. performance?", *Building and Environment*, 46(5), 981-989.

[13] Zhu, Y., Yang, M., Yao, Y., Xiong, X., Li, X., Zhou, G., Ma, N. 2017. "Effects of Illuminance and Correlated Color Temperature on Daytime Cognitive Performance, Subjective Mood, and Alertness in Healthy Adults", *Environment and Behavior*, 51(2), 199-230.

[14] Fisher, R.A. 1925. *Statistical Methods for Research Workers*. Oliver and Boyd, Edinburgh, Scotland.

[15] (<https://cran.r-project.org/>).

[16] Tayfur, G, 2011. *Soft Computing in Water Resources*. WIT Press.