

BİNA KABUĞUNUN NEMSEL-ISIL PERFORMANSININ BİLGİSAYAR BENZETİMİ İLE BELİRLENMESİ

Ecem EDİS, Hülya KUŞ

İ.T.Ü. Mimarlık Fakültesi Mimarlık Bölümü 34437 Taksim / İstanbul
ecem@itu.edu.tr, kushu@itu.edu.tr

(Geliş/Received: 06.04.2012; Kabul/Accepted: 15.05.2014)

ÖZET

Bina kabuğunda neme bağlı olarak karşılaşılan yoğuşma, rutubetlenme, yüzey kaplamalarının ayrılması, kullanıcı konforunun yeterince sağlanamaması gibi sorunlar, genellikle malzemelerin mikro çevresi ve sistemin diğer bileşenleri ile ilişkisinin tasarımda tam irdelenmemiş olmasından kaynaklanmaktadır. Günümüzde, deneysel yöntemler dışında bilgisayarlı benzetimle de kabuğun kullanım sırasındaki davranışı tahmin edilebilmektedir. Binada uygun iç ortam koşullarını sağlayacak iklimlendirme sistemini ve enerji performansını belirlemeye yönelik yazılımların kullanımı artarken, bina kabuğunda nemsel-ısıllı davranışı değerlendiren yazılımların kullanımı ise yeni yaygınlaşmaktadır. Yazıda, öncelikle, bina kabuğunun nemsel-ısıllı davranışını analize yönelik yazılımlar genel olarak ele alınıp, yapıları ve kullanımları ile ilişkili konulara yer verilmiştir. Bu yazılımlardan WUFI 2D ile yapılan bir tip duvar tasarım çalışması açıklanarak yazılımların kullanımı örneklenmiş ve benzetimin pratikte etkin kullanımına ve yaygınlaşmasına katkıda bulunmak üzere akış diyagramları oluşturulmuştur. Sonuç olarak, bina kabuğunun nemsel-ısıllı performansını değerlendiren yazılımların kullanımında ‘yazılımın seçimi’ ve ‘yapılacak benzetimlerin planlanması’ süreçlerinin benzetim ile sağlanması beklenen hedeflere erişmekte önemli olduğu belirtilmiştir.

Anahtar kelimeler: Nemsel-ısıllı performans, bina kabuğu, bilgisayarlı benzetim, WUFI2D.

DETERMINATION OF HYGROTHERMAL PERFORMANCE OF BUILDING ENVELOPE BY COMPUTER SIMULATION

ABSTRACT

Moisture-related building envelope problems such as condensation, damp, delamination of coatings, unsatisfied user's comfort requirements usually arise from the unexamined/unforeseen interactions of materials with ambient environment, and with other system components during design. Today, it is possible to estimate the in-use performance of building envelopes by computer simulations except for test methods. While use of building simulation software intended to determine indoor climate systems providing appropriate environmental conditions and to assess building energy performance is increasing, the use of simulation software to assess hygrothermal performance of building envelopes has only been recently started to spread. This paper primarily deals with computer simulation software analysing hygrothermal performance of building envelopes, and important issues associated with their structure and use are considered. A typical wall design case performed by WUFI 2D is explained for contributing to extend the efficient use of simulation software in practice. Finally, when using simulation software to assess hygrothermal performance, ‘selection of appropriate software’ and ‘planning of simulation work’ processes are found matters of utmost importance in achieving goals set by the use of simulation.

Keywords: Hygrothermal performance, building envelope, computer simulation, WUFI 2D.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Bina kabuğunun katmanlaşması tasarlanırken kullanımdaki iklim koşulları ve kullanıcı gereksinimleri dikkate alınmadığında, kullanıcı konforu yeterince karşılanamamakta ve bina kabuğunda rutubet, küflenme, donma-çözölmeye bağlı kopma gibi kabuğun nemsal-ısı (hygrothermal) performansı ile ilişkili hasarlar oluşabilmektedir. Tasarımda bina ve elemanlarının performansının ve olası hizmet ömrünün tahmin edilmesi, özellikle sürdürülebilir bina açısından önemlidir (ISO 15686 [1]). Teknolojik gelişimle birlikte yapı teknikleri ve bina ürünlerindeki çeşitliliğin artması, dış ve iç iklim koşullarında projeye bağlı farklılıklar olması nedenleriyle, bina ve bina ürünlerinin kullanım performansına ve dayanıklılığına ilişkin verilerin sadece deneysel çalışmalarla elde edilmesi olanaklı değildir. Günümüzde, bu verilerin bir bölümü hesap yoluyla elde edilebilir hale gelmiştir ve benzetim yazılımları aracılığıyla da üretilebilmektedir. Yazılım kullanımındaki en önemli amaç, binanın yapıldığı bölgedeki iklim şartları altında daha uzun ömürlü, sağlıklı ve sürdürülebilir olmasını sağlamaktır.

Bilgisayarlı benzetim, bina ve bileşenlerinin kullanımdaki performanslarının tasarım sırasında tahmin edilmesi, bina ürünleri geliştirilirken olası kullanım ortamlarındaki davranışlarının analizi gibi farklı süreç, amaç ve ölçeklerde kullanılabilir ve buna bağlı farklı yazılımlar geliştirilmektedir. Nemsal ve ısı davranışı ele alan yazılımlar da, inceleme amacı ve ölçeği açısından çeşitlilik göstermektedir: EnergyPlus [2] gibi yazılımlarda odak binanın enerji performansı ve uygun iç ortam koşullarının sağlanması için kullanılacak sistemlerin değerlendirilmesi iken, WUFI [3] gibi yazılımlarda yapısal elemanlarda bütünlük (coupled) nemsal-ısı davranışının incelenmesi; COMIS [4] gibi yazılımlarda ise hava kalitesi gibi gereksinimleri sağlamak için iç ortam koşullarının analizidir. Uygun nemsal-ısı performansı gösteren bina tasarımı için, farklı amaç ve ölçekteki yazılımların birlikte kullanılması önerilmektedir [5] ve HamFitPlus gibi tüm bina analizine yönelik bütüncül yazılımlar geliştirilmeye başlanmıştır [6]. Günümüzde, enerji performansını değerlendiren yazılımlar sık kullanılırken, yapısal elemanların performansını değerlendiren yazılımların kullanımı ise o kadar yaygın değildir.

Yazıda, bu doğrultuda, yazılımların doğru ve etkin kullanımı ile yaygınlaşmasını sağlamak amacıyla önemli konular ele alınmış ve tartışılmıştır. Bu kapsamda, yapısal elemanların bütünlük nemsal-ısı performansını değerlendiren yazılımlar ve önemli özellikleri açıklanmış, bu yazılımlardan biri olan WUFI 2D ile yapılan bir tip duvar tasarım çalışması ayrıntılandırılarak yazılımların kullanımı örneklendirilmiştir.

2. ELEMAN ÖLÇEĞİNDE NEMSAL-ISIL BENZETİM YAZILIMLARI (HYGROTHERMAL SIMULATION SOFTWARE AT ELEMENT SCALE)

Nemsal-ısı benzetim yazılımlarının yapısı, işleyişi ve kullanımı; hesaplama modeli, sayısal model ve hesaplama değişkenleri ile performans eşik değerleri açısından irdelenebilir.

2.1. Hesaplama modeli (Computation model)

Yazılımların **hesaplama modellerinde** ısı, nem ve hava akışı tek tek veya birlikte dikkate alınabilmekte, her akış altında da farklı akış tipleri modele dahil olabilmektedir. Kullanılacak yazılım belirlenirken elemanın yeri, malzemeleri gibi özelliklerine bağlı olarak etkili olacak akışların belirlenmesi ve hesaplama modelinde bu akışları gözönüne alan yazılımların tercih edilmesi gerekmektedir. Benzetimlerde hesaplama modeline bağlı olarak tek, iki veya üç boyutlu akış ve durağan, durağan-değişken veya değişken rejimde akış modellenmektedir [7]. Genellikle, elemanın yapısı kaç boyutlu hesap yapılması gerektiğini tanımlamaktadır. Çok katmanlı elemanlarda bir doğrultuda malzeme farklılaşması var ise tek boyutlu hesap yeterli olabilirken, iki ya da üç doğrultuda malzeme farklılaşmasında ise buna uygun hesaplama modeli seçilmelidir.

Uluslararası ortamda 50'den fazla bütünlük nemsal-ısı benzetim yazılımı bulunmaktadır [8]. Bunlar, hesaplama modeli, oluşturulma amacı ve inceleme ölçeğine göre farklılaşmaktadır. Genel kullanıma açık, yapı elemanı ölçeğinde bazı yazılımların bu bölüm kapsamında incelenen konulara ilişkin özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

2.2. Sayısal model ve hesaplama değişkenleri (Numerical model and computational variables)

Benzetimle analizde, öncelikle yapısal elemanın **sayısal modeli** oluşturulmaktadır. Bu kapsamda, yazılımın kendi araçları veya ek yazılımlar kullanılarak, elemanın biçim, boyut ve katmanlar gibi özelliklerini tanımlayan **geometrik model** ve sonlu farklar gibi ağ gerektiren yöntemler kullanan yazılımlarda **sayısal ağ** tanımlanmaktadır. Modelde kullanılacak biçimler (ör. dikgen, üçgen), modelin elemanın gerçekteki biçimine ne düzeyde benzerlik göstereceğini belirlemektedir. Sayısal ağdaki eleman sayısı, boyutları ve dağılımı hesaplamının doğruluğunu etkilemektedir. Farklı sayıda, boyutta ve dağılımda elemana sahip ağlar ile hassasiyet analizi yapılarak uygun sayısal ağın seçilmesi önemlidir.

Model oluşturulurken bileşen **malzemeleri** ve elemanın bulunduğu **ortam koşulları** da tanımlanmaktadır. Malzemeler, yazılımın veritabanından seçilebilir veya istenen özgün özellik verileri ilgili arayüze girilebilir. Her yazılımda

Tablo 1. Yapı elemanı ölçeğinde bazı nemsal-ısı benzetim yazılımları (Some hygrothermal simulation software at building element scale)

Yazılım	Boyut-Temel akış	Nem akış tipi	Nem tipi	Isı akış tipi	Malzeme özellikleri	Dış ortam bileşenleri
1D-HAM [10,11,12]	1B-IHN	I, II	A, C	i, ii, iii, iv	1, 3, 4, 5, 6, 13	a, b, c, d, h
DELPHIN 5 [6, 9,13]	1B/2B-IHNC	I, II, III	A, B, C	i, iii,iv	1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 11, 13	a, b, c, d, e, f, g, h
HygIRC-1D [9,14,15]	1B-IHN	II, III	A, B	i, iii, iv	1, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 13	a,b, d, e, f, g, i, j
GLASTA [9,16]	1B-IN	II, III	A, B	i	1, 3, 4, 6,7	a, b, d, h
WUFI 2D [3,9]	2B-IN	II, III	A, B	i, iii, iv	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 11, 12	a, b, d, e, f, g, h, i

Kısaltmalar/semboller:

Boyut-Temel akış-	B: Boyut	I: Isı	H: Hava	N: Nem	K: Kirlenici
Nem akış tipi-	I: Taşınım	II: Difüzyon	III: Kılcallık		
Nem tipi-	A: Buhar	B: Sıvı	C: Nemli hava		
Isı akış tipi-	i: İletim	ii: Taşınım	iii: Işınım (Güneş)	iv: Gizli ısı	
Malzeme özellikleri-	1: Yoğunluk	2: Gözeneklilik	3: Özgül ısı kapasite	4: Isı iletkenlik	5: Sorpsiyon
	6: Buhar geçirgenlik	7: Buhar difüzyonu	8: Sıvı difüzyonu	9: Emme	10: Difüzyon direnç f.
	11: Su iletkenlik	12: Özgül nem kapasitesi	13: Hava geçirgenlik	14: Histeresis	
Dış ortam bileşenleri-	a: Sıcaklık	b: Nemsal bileşenler	c: Hava basıncı	d: Güneş ışması	e: Rüzgar hızı
	f: Rüzgar yönü	g: Yağış	h: Uzun dalga değişim	i: Bulutluluk	j: Su sızıntısı

kullanılan özgün özellikler farklıdır. Kimi özellik verileri standart deneylerle elde edilebilir iken, kimi özellik verileri ise kapsamlı deneyler gerektirmekte ve her malzeme için kolaylıkla bulunamamaktadır. Bu nedenle, gerekli verilerin tipi ve veritabanındaki malzemelerin çeşitliliği yazılımın etkin kullanımını etkilemektedir. Ortam koşullarını belirleyen iklimsel veriler de her yazılımda farklılık göstermektedir. Tanımlamada, yazılımın veritabanı, yardımcı iklim yazılımları ve diğer kaynaklar kullanılabilir. İklim verilerinin elle düzenlenmesi uzun zaman gerektirdiğinden, veritabanında bulunmaları veya kolay elde edilebilmeleri yazılımın etkin kullanımını sağlamaktadır. Malzeme özellikleri ve ortam koşullarına ilişkin belirsizlikler hesaplama sonuçlarını etkileyeceğinden, hassasiyet analizi için benzetimler yapılması önerilmektedir [9].

Hesaplama değişkenleri; tekrar sayısı, hesaplama zaman aralığı gibi hesaplamanın nasıl yapılacağına ilişkin değişkenlerdir ve sonuçların doğruluğu ile hesaplama süresini etkilemektedir. Küçük zaman aralığı sonuçların doğruluğunu arttırmakla birlikte, uygun iklim verisi bulunmadığında yapılan enterpolasyon hataya neden olabilmektedir [17]. Büyük yakınsama ölçütü ve az tekrar sayısı hesaplama süresini düşürürken sonuçların doğruluğunu azaltabilmektedir. Hesaplama çıktılarında, sonuçların tipi (ör. ölçme birimi) ve sunum biçimi değerlendirmeyi sınırlayabileceğinden, amaca uygunlukları önemlidir.

2.3. Performans eşik değerleri (Performance limit values)

Binada performans eşik değerleri; insan sağlığı ve konforu, mekan içindeki işlevler veya nesnelere için uygun koşullar ve binanın dayanıklılığı dikkate alınarak belirlenmektedir [18]. Benzetim sonuçları değerlendirilirken, eşik değerlerine ihtiyaç duyulmakta ve bu değerler, yönetmelik, standart, bilimsel rapor, vb. dokümanlarda bulunabilmektedir.

3. UYGULAMA ÖRNEĞİ - TİP DUVAR TASARIMI (CASE STUDY - TYPICAL WALL DESIGN)

Örnek olarak verilen çalışmada; malzeme, bileşen ve eleman ölçeğinde deney ve benzetim çalışmalarını içeren bir araştırma projesinden [19] yararlanılmıştır. Bina tasarımı sırasında dış duvar katmanlaşmasına karar verilirken, belirli ortam şartlarında nemsal-ısı davranışı önceden bilinen, performans gereksinmelerine uygun seçenekleri belirlemeyi amaçlayan çalışma, İstanbul ili iklim koşulları için gerçekleştirilmiştir [20].

Duvar seçeneklerinde gövde olarak 19 cm kalınlığında pomza agregalı beton (PAB) blok kullanılmıştır. İstanbul'daki binaların dış duvarlarında, kolonlar ve kirişler de dahil olmak üzere, kabul edilebilir en yüksek ısı geçirgenlik değeri $0,60 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 'dir [21]. Seçilen blok ile bu değeri elde edebilmek için ısı yalıtımı kullanılması gerekmektedir. Çekme veya genişletilmiş polistren (XPS ve EPS) tercih edildiğinde, 2 cm kalınlığında levhalar ile bu değer sağlanabilmektedir. Uygulamada ise, taşıyıcı bileşenlerdeki ısı köprülerini engellemek için 3-4 cm kalınlığında levhalar kullanılmaktadır. Bu nedenle, tip duvarlarda da 4 cm kalınlığında XPS veya EPS ısı yalıtımı kullanılmıştır. Dış ve iç kaplama, konutlardaki yaygın kullanımı nedeniyle, sırasıyla mineral ve alçı sıva olarak belirlenmiştir (Şekil 1). Yalıtım ve sıva katmanlarının performans etkisini analiz için, 'kaplamalı-yalıtımsız' ve 'kaplamasız-yalıtımsız' iki kontrol duvarı oluşturulmuştur. Kaplamalı-yalıtımsız duvar, mevcut eski binalarda da sık görülen bir duvar tipidir. Bu tip katmanlaşmaya karşılaştırma amaçlı olarak yalıtım eklenerek analizler yapılmıştır.

Benzetimlerde, iklimsel koşullar etkisindeki çok katmanlı elemanlarda zamana bağlı iki boyutlu bütünlük nemsal-ısı davranışı hesaplayan WUFI 2D kullanılmıştır. Yazılımın hesaplama modelinde; ısı

akışı için ısı iletimi, faz değişikliklerine bağlı entalpi akışları, kısa dalga güneş ışınımı ve uzun dalga ışınım soğuması; su buharı akışında buhar ve çözelti difüzyonu; sıvı akışında kılcal iletim ve yüzey difüzyonu dikkate alınmaktadır [3]. Model, deneysel ölçümlerle büyük oranda onanmıştır [7].

3.1. Sayısal modelin kurulması (Generation of numerical model)

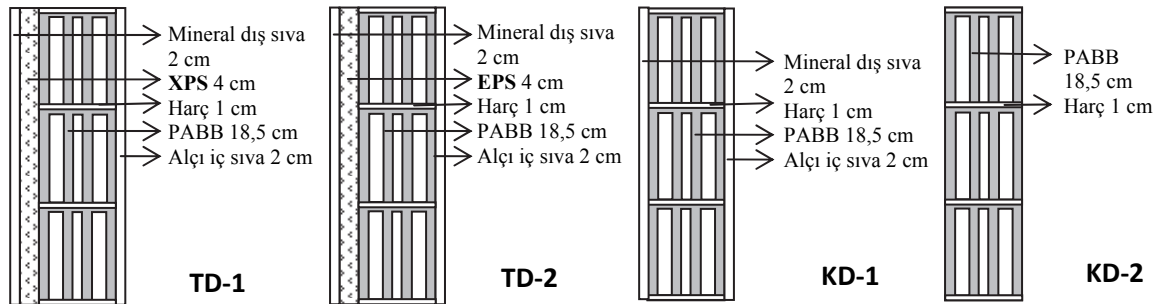
Benzetimlerde kullanılan sayısal modeller 5 sıra blokla oluşturulmuştur. Gövdeyi temsil eden bölümde x-/y-ekseninde 38/404 ağ elemanı bulunmaktadır. Türkiye'deki ürünler için bazı özgün özellik değerleri bilinmediğinden malzemeler tanımlanırken yazılımın veritabanı kullanılmış; Türkiye'de üretilen ürünlerin bilinen özellikleri derlenerek bunlara en yakın değerlere sahip veritabanı seçenekleri kullanılmıştır. Duvar gövdesi ve sıva yaş uygulama olduğundan tüm katmanların başlangıç bağıl nemi %80, sıcaklığı 20 C° olarak tanımlanmıştır. Dış yüzeyde, karşılaştırma için, rüzgarla itilen yağmur (RIY) yükü yüksek, güneşlenme miktarı düşük olan, şiddetli koşullara sahip kuzeybatı (KB) ve görece ortalama koşullara sahip güneydoğu (GD) yönleri için benzetimler yapılmıştır (Şekil 2a). İç yüzeyde, EN 15026 standardına göre normal kullanım için İstanbul ili iklimine göre yazılım tarafından oluşturulan veriler kullanılmıştır (Şekil 2b). Duvarın alt ve üst yüzeyleri ısı geçirmez olarak seçilmiştir. Model kurma süreci, modelde kullanılan diğer değişkenler ve yazılım

olanakları ile ihtiyaç duyulan veriler Tablo 2'de verilmiştir.

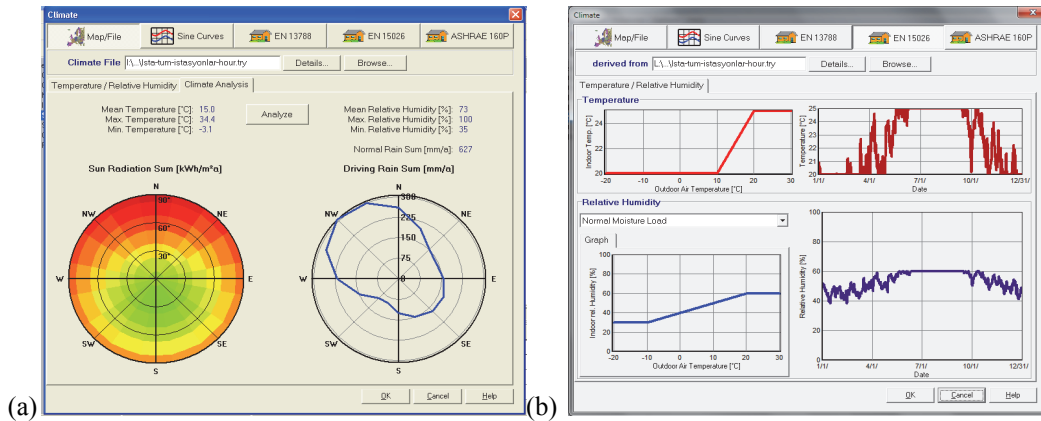
Duvar seçeneklerini değerlendirmeye yönelik benzetimlerden önce, sayısal modeli denetlemek üzere kontrol benzetimleri ile elemandaki blok sıra sayısı, ağ elemanı sayısı, RIY katsayısı ve yağmur suyu emme çarpanının uygunluğu irdelenmiştir.

Eleman ölçeğinde benzetimde, elemanın gerçekteki boyut ve biçimine benzer şekilde modellenmesi, gerçek koşullarla benzeşim için önem taşımakla birlikte, ağ elemanı sayısı ve hesaplama süresi arttığı için sonuçların doğruluğu dikkate alınarak ortalama bir çözüme gidilmesi gerekmektedir. Örneğin, RIY yükü üzerine bir çalışmada, detaylandırılmamış geometrik model ile, ölçümle belirlenen değerlerden farklı RIY yükü hesaplanabildiği bildirilmektedir [22]. Bu doğrultuda, blok sıra sayısını belirlemek için; 5 ve 10 sıra blokla oluşturulan KD-2 duvarı KB yönünde yüksek yağmur etkisi ile çalışılmıştır. 3. sıradaki bloklar karşılaştırıldığında, gözlenen en yüksek bağıl nem ve sıcaklık farkları çok düşük olduğu için benzetimlerde 5 sıralı model kullanılmıştır.

Uygun ağ elemanı sayısı belirlenirken, eleman sayısı iki katına çıkartıldığında sonuçların değişmemesi veya benzer değerler elde edilmesi gösterge olabilmektedir. Bu kapsamda; 5 sıralı KD-2 duvarı KB yönü için, x/y-ekseninde 28/304 ve 38/404



Şekil 1. Tip duvar ve kontrol duvarı seçenekleri (Typical and control wall alternatives)



Şekil 2. İklim verileri: (a) güneş radyasyonu, $kWh/m^2 \cdot yıl$ ve RIY, $mm/yıl$ yükü; (b) iç ortam sıcaklığı, C° ve bağıl nem, % (Weather data: (a) solar radiation, $kWh/m^2 \cdot a$ and wind-driven rain, mm/a load (b) interior temperature, $^\circ C$ and relative humidity, %)

Tablo 2. Yazılımın olanakları/ihtiyaç duyulan veriler ve modellerde kullanılan değerler (Capabilities and required inputs of software, and values used in the models)

Süreç	Yazılımın olanakları, ihtiyaç duyulan veriler ve modelde kullanılan değerler ^a																																
1. Geometriyi tanımlama	- Dikgenler ile (ölçü birimi: mm veya cm) 5 sıra blokla oluşturulan duvar																																
2. Sayısal ağı tanımlama	- Otomatik ağ atama (seyrek, ortalama ve sık elemanlı ağ) - Kullanıcı tanımlı ağ (eşit aralıklı veya sınırlarda sıklaşan ağ) x-/y-eksenlerinde 38 / 404 eleman																																
3. Malzemeleri tanımlama	- Veritabanından seçim - Malzemelerin bazı temel özgün özellik değerleri: <table border="1" style="margin-left: 40px;"> <thead> <tr> <th></th> <th>Isı iletkenlik değeri (W/m·K)</th> <th>Isıl kapasite (J/kg·K)</th> <th>Difüzyon direnç faktörü (-)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Pomza agregalı beton</td> <td>0,14</td> <td>850</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>Harç</td> <td>0,8</td> <td>850</td> <td>16,12</td> </tr> <tr> <td>Mineral sıva</td> <td>0,8</td> <td>850</td> <td>25</td> </tr> <tr> <td>Alçı sıva</td> <td>0,2</td> <td>850</td> <td>8,3</td> </tr> <tr> <td>XPS (cidarlar)</td> <td>0,03</td> <td>1500</td> <td>450</td> </tr> <tr> <td>XPS (çekirdek)</td> <td>0,03</td> <td>1500</td> <td>100</td> </tr> <tr> <td>EPS</td> <td>0,04</td> <td>1500</td> <td>30</td> </tr> </tbody> </table>		Isı iletkenlik değeri (W/m·K)	Isıl kapasite (J/kg·K)	Difüzyon direnç faktörü (-)	Pomza agregalı beton	0,14	850	4	Harç	0,8	850	16,12	Mineral sıva	0,8	850	25	Alçı sıva	0,2	850	8,3	XPS (cidarlar)	0,03	1500	450	XPS (çekirdek)	0,03	1500	100	EPS	0,04	1500	30
	Isı iletkenlik değeri (W/m·K)	Isıl kapasite (J/kg·K)	Difüzyon direnç faktörü (-)																														
Pomza agregalı beton	0,14	850	4																														
Harç	0,8	850	16,12																														
Mineral sıva	0,8	850	25																														
Alçı sıva	0,2	850	8,3																														
XPS (cidarlar)	0,03	1500	450																														
XPS (çekirdek)	0,03	1500	100																														
EPS	0,04	1500	30																														
	- Kullanıcı tanımlı malzeme ^b																																
4. Başlangıç koşullarını tanımlama	- Başlangıç sıcaklığı: 20 C° Tüm malzemeler - Başlangıç bağıl nemi: %80 Tüm malzemeler																																
5. Yüzeylerin ve iklimin tanımlanması	- Isı geçirimsiz yüzeyler: duvar alt ve üst sınırları - Çevre ile ilişkili yüzeyler: düsey duvar sınırları - Yüzey ısı geçirgenlik katsayısı (dış-iç): 25 - 8 W/m²·K – rüzgarla değişen veya değişmeyen - Su buharı difüzyonu eşdeğer hava tabakası kalınlığı (m): 0 - Kısa dalga güneş ışını yutuculuğu (-) / uzun dalga ışın salıcılığı (-): 0,5 / 0,9 - Yağmur suyu emme çarpanı (-): 0,5 - İklimle ilişkili unsurlar: - Dış yüzeyin yönü / yere göre açısı: KB, GD / 90° - Dış yüzeyin çevre bileşenlerle rüzgardan korunma katsayısı: 0,07 - İklim - iç ortam: (sinüs eğrileri veya dış iklim verilerinden EN 13788, EN 15026 (İstanbul) veya ASHRAE 160P ^c ’ye uygun hesaplama ile belirlenen) - İklim - dış ortam: - Yazılımın veritabanından seçim - Yardımcı iklim yazılımı kullanımı - Meteororm 6.1 ile oluşturulan .TRY dosyası - Kullanıcı tanımlı iklim dosyası ^c																																

^a: Sayısal modellerde kullanılan seçenekler ve/veya değerler kalın harflerle verilmiştir.

^b: Gerekli özgün özellik verileri - kuru birim hacim ağırlığı (kg/m³), gözeneklilik (porosity) (m³/m³), özgül ısı kapasitesi (J/Kg·K), kuru malzemenin ısı iletkenlik değeri (W/m·K), kuru malzemenin su buharı difüzyon direnç faktörü (-), nem depolama kapasitesi (kg/m³), su emme için sıvı taşıma katsayısı (m²/s), malzeme içinde yayılma sırasında sıvı taşıma katsayısı (m²/s), nemliliğe bağlı ısı iletkenlik değeri (W/m·K), nemliliğe bağlı su buharı difüzyon direnç faktörü (-).

^c: Gerekli iklim verileri - saatlik yağmur yükü (lt/m²·h), güneş ışıması (W/m²), dış ortam hava sıcaklığı (C°), dış ortam bağıl nemi (%), ortalama barometre basıncı (hPa), atmosferin uzun dalga karşı ışıması (W/m²), rüzgar hızı (m/s) ve yönü

eleman bulunan ağlar için çalışılmıştır. Y-eksenindeki eleman sayısı fazla olduğu için her iki yönde de yalnızca %25 arttırım yapılmıştır. Sonuçlar arasında önemsiz farklılıklar olmakla birlikte, y-eksenindeki eleman sayısı çok fazla olduğu için, benzetimlerde yeni arttırım yapılmadan x-/y-ekseninde 38/404 eleman bulunan ağ kullanılmıştır.

Yağmur suyu emiciliği ve RIY yükünü belirleyen değişkenler de, sonuçları etkileyebilmektedir. WUFI 1D ile yapılan bir çalışmada, yağmur suyu emme çarpanı 0,03’den 0,1’e çıkarıldığında dış sıvanın bağıl neminin yaklaşık %20 oranında değiştiği bildirilmiştir [23]. Bu çalışmada, RIY etkisini tanımlayan katsayılar için; 5 sıralı TD-1 duvarı KB yönünde üç durum için çalışılmıştır: (i) yağmur suyunun sıçrayıp uzaklaştığı durum - *yağmur etkisi yok*, (ii) çevre binalarla korunan duvarda, yüzeye gelen yağmur suyunun %50’sinin yüzeyde kaldığı durum - *ortalama yağmur etkisi*, ve (iii) binalarla korunmayan duvarda, yağmur suyunun %50’sinin yüzeyde kaldığı durum - *yüksek yağmur etkisi*. Karşılaştırmada, 3. sıradaki blok katmanlarında ve katman sınırlarındaki ağ elemanlarında görülen ortalama sıcaklık ve bağıl nem değerleri kullanılmıştır. Bağıl nem açısından, artan

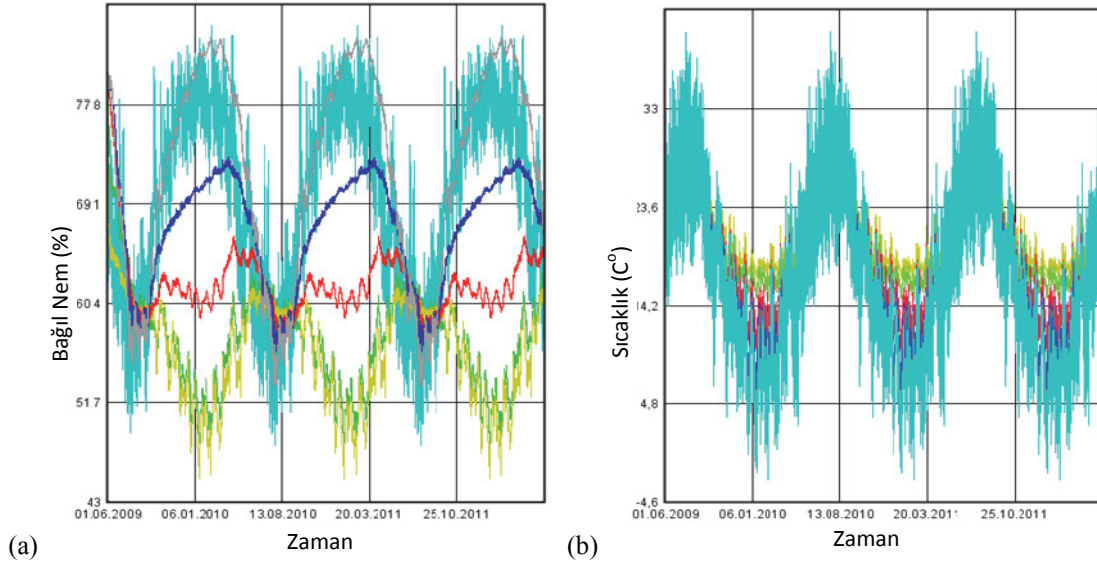
yağmur yükü ile birlikte yalnızca dış sıva katmanında farklılık olduğu, pomza katmanlarında ise önemli farklılıklar oluşmadığı görülmüş ve tip duvar tasarımı için hesaplamalar ortalama yağmur etkisine göre yapılmıştır.

3.2. Hesaplama (Computation)

Benzetim başlangıç tarihi, yapım suyunun kuruması sırasındaki davranışı da gözlemek üzere, dış duvarların çoğunlukla inşa edildiği yaz dönemi temel alınarak 1 Haziran olarak belirlenmiş ve bir yıllık benzetimler yapılmıştır. Ayrıca, çeşitli durum ve tip duvarlar için üç yıllık benzetim yapılarak katmanların davranışındaki değişim kontrol edilmiş ve yıllık olarak tekrar eden bir davranış olduğu gözlenmiştir (Şekil 3).

3.3. Sonuçların değerlendirilmesi (Assessment of results)

Sonuçlar, benzetim süresince elemandaki davranışı gösteren 2B videolar veya istenen bölgelerin benzetim süresince davranışını gösteren 1B grafikler ile verilmektedir. Analizlerde, videoda istenmeyen davranış görülen bölge için 1B grafik



Şekil 3. KD-1 duvarı için üç yıllık (a) bağıl nem ve (b) sıcaklık sonuçları (Three-year (a) relative humidity and (b) temperature results of KD-1 wall)

hazırlanabileceği gibi, amaca göre önceden seçilmiş bölgeler için doğrudan 1B grafikler oluşturulabilir. Bu çalışma farklı durumları karşılaştırmayı amaçladığından ikinci yaklaşım kullanılmıştır.

Performans eşik değerlerine ilişkin veri bulunmadığında, genellikle, Abuku vd.lerinin [24] veya Koci vd.lerinin [25] çalışmalarında olduğu gibi, yoğunlaşma ve küf oluşma riski, nemin yıllar içinde artıp artmadığı gibi hasara neden olabilecek koşulların varlığını inceleyen, karşılaştırmalı değerlendirmeler yapılmaktadır. Bu çalışmada da, eşik değerlerine ilişkin yeterli veri yazında olmadığı için bu yaklaşım izlenmiştir.

Değerlendirme için, ısı geçirimsiz sınırların etkisini önlemek üzere, 3. sıradaki katmanların ortalama bağıl nem ve sıcaklıkları kullanılmıştır. Değerlendirmede; (i) yapım suyunun kuruma süresi ve kuruma sırasındaki davranış, (ii) kuruma sonrasında duvarda nem birikimi riski, (iii) farklı ısı yalıtım malzemelerinin davranışa etkisi ve (iv) yönlenmenin etkisi analiz edilmiş ve önemli bulunan sonuçlar aşağıda tartışılmıştır.

Yapım suyunun kuruma süresi: Isı yalıtımlı TD-1 ve TD-2 duvarlarında kuruma, KB yönünde yaklaşık 13-15 hafta sürmektedir. Bu süre sonunda tüm katmanların bağıl nemi yaklaşık %60-65'dir. Sıvalı fakat ısı yalıtımsız KD-1 duvarında ise, katmanların bağıl nemi, ısı yalıtımlı tiplere göre 3-5 hafta daha önce aynı düzeye gelmektedir. Torres ve de Freitas [26] da, zeminden yükselen nemi azaltan bir tekniği inceledikleri çalışmada, kireçtaşı ile oluşturulan deney duvarında başlangıçtaki bağıl nemin %65 olduğunu belirtmişlerdir. Sıvasız ve ısı yalıtımsız KD-2 duvarında ise, kuruma yaklaşık 3 hafta sürmekle beraber, yağmur yağdığına bağıl nem %95-100'e kadar çıkabilmektedir. Koci vd.leri [25] gazbeton ile

yaptıkları çalışmada eşik değeri olarak en fazla higroskopik nem miktarına karşılık gelen %97,6 bağıl nemi kullanmışlardır. Bu açıdan bakıldığında, KD-2 duvarında kuruma hızlı gerçekleşmekle birlikte, yağmur yağdığına bağıl nem %95-100'e çıktığı için, yalıtım ve/veya kaplamanın yağmur riski oluşmadan yapılması bloklarda nem artışı önleyecektir. Ancak, malzemeler için seçilen başlangıç koşulu değerleri hesaplanan kuruma süresini etkilediğinden gerçek kuruma süresi farklılaşabilir. Bu değerler farklı duvar tiplerinde bağıl davranışı öngörmek için referans alınabilir.

Yapım suyunun kuruması sonrasında davranış: TD-1 ve TD-2 duvarlarının katmanlarında kuruma sonrası nem birikimi gözlenmemiştir. Katmanların bağıl nemi, iç ve dış ortam bağıl nemindeki değişime benzer yapıda bir değişim göstermekte ve KB yönünde en fazla %80-85'e çıkmaktadır. Dış siva ve yalıtım katmanlarındaki bağıl nem, tüm yıl boyunca yalnızca kısa süreler için dış ortam ortalama bağıl neminden fazladır. Steeman vd.lerinin yüzeyi boyalı ve boyasız alçı plakalar üzerinde yaptıkları deneysel çalışmada [27], yüzeye etkiyen havanın bağıl nemi değiştiğinde numune bağıl neminin de ilişkili bir biçimde değiştiği ve boya özelliğine bağlı olarak farklılaştığı görülmektedir. TD-1 ve TD-2 duvar katmanlarında ortam bağıl nemine ve katman yerine bağlı değişim, bu doğrultuda, anlamlı bulunmuştur. KD-1 duvarında ise, dış PAB katmanının bağıl nemi, bazı dönemlerde dış sıvadan yüksek olmakla birlikte %85'i aşmamaktadır. Yapılan üç yıllık benzetimde, nemin yıllar içinde birikmediği görülmüştür (Şekil 3).

Farklı ısı yalıtım malzemelerinin davranışa etkisi: Buhar difüzyon direnci görece yüksek XPS kullanılan TD-1 duvarı ile EPS kullanılan TD-2 duvarı karşılaştırıldığında; KB yönünde, yılın büyük bir

bölümü için, TD-1 duvarının dış sıva ve yalıtım katmanlarında bağıl nem daha düşük, PAB ve iç sıva katmanlarında ise daha yüksektir. TD-1 duvarında, dış kaplamaların geçirimsizliğine bağlı olarak duvar gövdesinin yeterince kuruyamadığı, daha geçirgen dış kaplamaları olan TD-2 duvarında ise duvar gövdesinin kurummasına bağlı olarak dış kaplamanın daha nemli olduğu anlaşılmaktadır. Bağıl nem düzeyleri eşik değerlerin üzerine çıkmadığı için, oluşan fark ihmal edilebilir.

Yönlenmenin davranışa etkisi: Yöne bağlı olarak farklı şiddette iklim bileşenlerine maruz kalan TD-1 ve TD-2 duvarlarında bağıl nemdeki en büyük değişim dış sıva ve ısı yalıtımı katmanlarında görülmektedir. Şiddetli koşulları olan KB yönünde bu katmanlar için hesaplanan değerler, ortalama koşulları olan GD yönü için hesaplanan değerlerden 0-16 birim daha yüksektir. PAB blok ile iç sıva ise pek fazla etkilenmemektedir. Abuku vd.leri [24], Essen için farklı RIY koşullarında küf oluşumu riskini değerlendirdikleri çalışmada, RIY yükünün en yüksek, güneş radyasyonu kazancının ortalama düzeyde olduğu batı ve RIY yükünün ortalama, güneş radyasyonu kazancının en düşük olduğu kuzey yönlerinde, yılın belirli dönemlerinde duvarın orta bölgesindeki nem miktarının daha yüksek olduğunu göstermekte ve açıklamalarında güneş radyasyonu kazancına bağlı kuruma etkisini belirtmektedirler. Bu çalışmada da, RIY yükünün yüksek, güneş radyasyonu kazancının düşük olduğu KB yönünde bağıl nem daha yüksek bulunmuştur.

Tüm değerlendirmelere bağlı olarak, benzetim sonuçlarının referans olarak kullanılabilmesi ve 19 cm kalınlığında PAB bloklar ve dıştan 4 cm kalınlığında XPS veya EPS ısı yalıtımı ile oluşturulan tip duvarların İstanbul ili iklim şartları için nemsal-ısı performans açısından uygun olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, Türkiye'deki dıştan ısı yalıtımı uygulamalarında dış sıvanın ~0,5 cm kalınlığında kullanıldığı dikkate alınarak yapılan hesaplamalarda katmanlarda nem birikimi olmadığı, sonuçlardaki değişimin performansa etkisinin ise ihmal edilebilir düzeyde olacağı görülmüştür.

4. TARTIŞMA (DISCUSSION)

Yapılan çalışmalar [16, 22, 28, 29, 30] benzetimle değerlendirmede; malzeme özgün özellik değerleri, iklim verileri, geometrik model gibi girdilerin doğruluğu ile incelenen nesnede etkili olması beklenen akışların/fiziksel olayların hesaplama modelinde dikkate alınıp alınmamasının sonuçların doğruluğunu etkilediğini göstermektedir. Girdiler ve hesaplama modeli büyük oranda doğru/uygun olsa dahi, hesaplama ve deney sonuçları arasında farklılıklar oluşabilmektedir. Her bileşen/katmanlaşma ve olası her farklı ortam koşulu için deney yapılması verimli bir yaklaşım olmayacağından, hesaplama

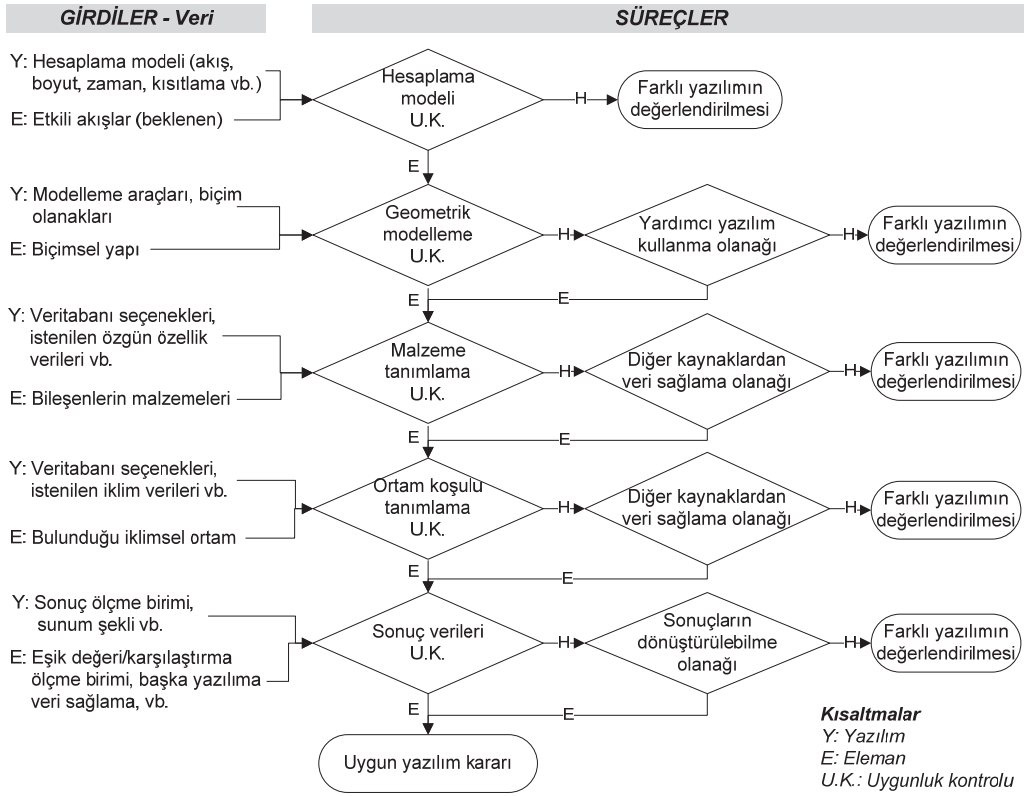
sonuçlarında deney sonuçlarına göre sapmalar olabileceği göz ardı edilmeden, tasarım öncesinde ve sırasında benzetimlerden yararlanılması, istenen performansı gösteren bir bina ve yapı elemanlarını elde etmek için önemli bir katkı sağlayacaktır.

Verilen uygulama örneğinin hazırlık ve gerçekleştirme aşamalarında, amaca uygun yazılımın belirlenmesi ve etkin kullanımı için; (i) hesaplama modelinde incelenen elemanda etkili olması beklenen fiziksel akışların, gerekli veya istenen rejimde ve boyutta dikkate alınması; (ii) incelenen elemanı oluşturan malzemeler için hesaplamada gerekli özgün özellik verilerine yazılımın veritabanı, dış kaynaklar veya deney çalışmaları aracılığıyla erişilebilirliği ve (iii) ortam koşullarını tanımlamak üzere gerekli içerikte ve tipte iklimsel verilere yazılımın veritabanı, yardımcı yazılımlar veya dış kaynaklar aracılığıyla erişilebilirliği temel önemde yazılım özellikleri olarak belirlenmiştir. Sunum biçimi gibi sonuçların yapısına ilişkin unsurlar ve yazılımın geometrik modelleme araçları ve özellikleri de yazılımın etkin kullanımında önemlidir. Bu kapsamda, uygun ve etkin olarak kullanılacak yazılımın seçimi için ardışık olması gerekmeyen bir akış diyagramı (Şekil 4) oluşturulmuştur. Yazılım seçiminde, ayrıca, yazılımın ticari ya da serbest olması, hesaplama modelinin onanma düzeyi gibi diğer özellikler de planlanan çalışmanın hedef ve sınırlarına bağlı olarak ölçüt olabilir.

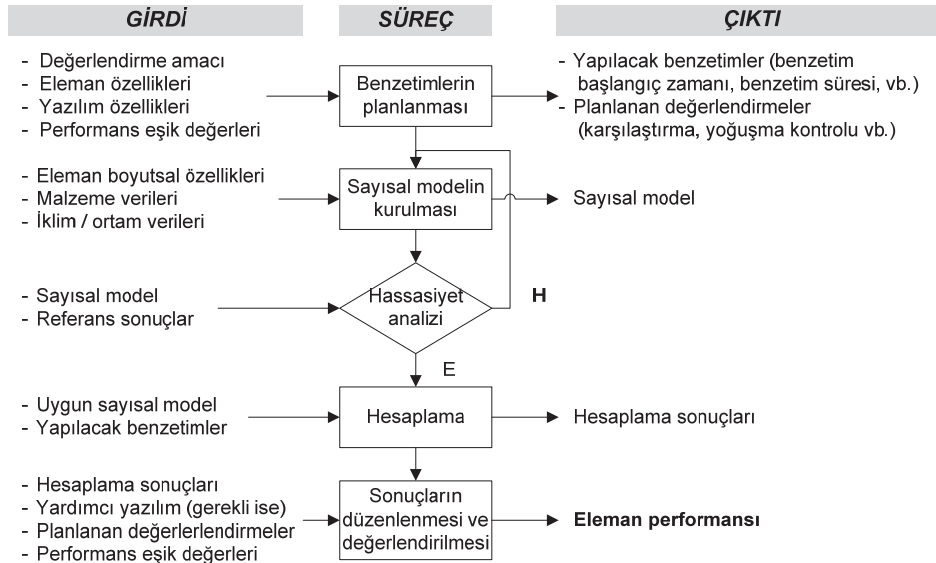
Yazılımın kullanımı sırasında; (i) inceleme amacına ve değerlendirme için gerekli performans eşik değerlerinin varlığına bağlı olarak, benzetim süresi, ortam koşulları, eleman modeli vb. açısından gerçekleştirilecek benzetimlerin önceden doğru planlanmasının ve (ii) gerçek benzetimlerden önce, eleman modelini değerlendirmek üzere sonuçların doğruluğa yakınlığı ve uygun hesaplama süreleri açısından hassasiyet analizine yönelik ön benzetimlerin yapılmasının sonuçların etkin kullanımı ve ilgili paydaşların yararlanabilmesi açısından önem taşıdığı görülmüştür. Bu doğrultuda, benzetimle değerlendirmenin genel aşamalarını ve önemli girdiler ile çıktıları gösteren bir akış şeması oluşturulmuştur (Şekil 5).

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Binaların kullanım döneminde, yapısal elemanlarda görülen hasarların ve düşük performans problemlerinin genellikle 'davranışı bilinen ve tanınan malzemelerin sistemin diğer bileşenleri ve bulunduğu çevre ile beklenmedik etkileşimleri' sonucu ortaya çıktığı yaygın olarak kabul görmektedir. Nemsal-ısı etkileşim ve buna bağlı oluşan sorunlar, özellikle bina kabuğunda sıklıkla görülmektedir. Olası hasarların ve performans sorunlarının önceden tahmin edilerek gerekli önlemlerin alınabilmesi için bina tasarımı öncesinde veya sırasında yapılan deneysel ve



Şekil 4. Yazılım seçimi (Software selection)



Şekil 5. Benzetim ile değerlendirme süreçleri (Processes of assessment by simulation)

bilgisayarlı benzetim çalışmalarının, ekonomik ve çevresel açıdan 'dayanıklı ve sürdürülebilir binaların elde edilmesine' katkısı göz önüne alındığında, önemi giderek artmaktadır.

Karşılaşılan sorunların yaygınlığı nedeniyle önemli bir inceleme alanı olan 'bina kabuğunun bütünlük nemsal-ısısal davranışı'nı değerlendirmeye yönelik yazılımların ele alındığı bu yazıda, kullanılacak yazılımı belirlerken ve yazılımı kullanırken dikkat edilmesi gereken önemli konular üzerinde durulmuş

ve bunlara yönelik akış diyagramları oluşturulmuştur. Konunun anlaşılabilirliğini artırmak amacıyla bir tip duvar tasarım çalışması açıklanarak yazılımların kullanım süreci örneklendirilmiştir.

Bina kabuğunun bütünlük nemsal-ısısal performansına ilişkin doğru ve güvenilir bilgisayarlı benzetim sonuçlarının, bulunduğu ortam şartlarında uygun davranış gösteren bina kabuğu tasarımı ve uygulamasına girdi sağlayarak kullanıcı konforunun artmasına, sağlıklı ve sürdürülebilir bina için uygun

yapısal çözümlerin geliştirilmesine katkı yapması beklenmektedir. Ayrıca, yapı ürünlerinin geliştirilmesine katkıda bulunacağı ve araştırmacılara kaynak oluşturacağı da düşünülmektedir. Bu açıdan, bilgisayarlı benzetim uygulamaları içeren çalışmaların deney ve ölçmelerle de desteklenerek geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması önemli görülmektedir.

Bilgi notu: Uygulama örneği için TÜBİTAK 107M532 numaralı “Pomza Taşı Agregalı Beton Bloklarla Yapılan Dış Duvarların Isıl ve Nemsel Performansı, Yaşam Dönemi Enerji ve Ekonomik Etkinliği” isimli araştırma projesinden yararlanılmıştır.

6. KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. ISO, **ISO 15686 - Buildings and constructed assets - Service life planning - Part 1: General principles and framework**, ISO, İsviçre, 2011.
2. UI-EOLBNL, **Getting started with EnergyPlus - Basic concepts manual**, University of Illinois & Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, A.B.D., 2011.
3. IBP, **Software/WUFI/Downloads – WUFI 2D online help**, Fraunhofer - Institut für Bauphysik, 2011. www.hoki.ibp.fhg.de, Erişim: 6.3.2012.
4. EOLBNL, **COMIS multizone air flow model**, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, A.B.D., 2003. <http://epb.lbl.gov/comis/>, Erişim: 8.1.2012.
5. Karagiozis, A., “Advanced numerical models for hygrothermal research”, **Moisture analysis and condensation control in building envelopes**, ASTM Manual 40, Editör: Trechsel, H., ASTM, Philadelphia, A.B.D., 90-106, 2001.
6. Wolonszyn, M., Rode, C., ‘Tools for performance simulation of heat, air and moisture conditions of whole buildings’, **Building Simulation**, Cilt 1, No 1, 5-24, 2008.
7. Straube, J., Burnett, E., “Overview of hygrothermal (HAM) analysis methods”, **Moisture analysis and condensation control in building envelopes**, ASTM Manual 40, Editör: Trechsel, H., ASTM, Philadelphia, A.B.D., 81-89, 2001.
8. Ramos, N.M.M., Delgado, J.M.P.Q., Barreira, E., de Freitas, V.P., “Hygrothermal numerical simulation: Application in moisture damage prevention”, **Numerical simulations - examples and applications in computational fluid dynamics**, Editör: Angermann, L., InTech, Rijeka, Hırvatistan 97-122, 2010. www.intechopen.com/articles/, Erişim: 3.2.2012.
9. Holm, A.H., Kuenzel, H.M., “Practical application of an uncertainty approach for hygrothermal building simulations - drying of an AAC flat roof”, **Building and Environment**, Cilt 37, No 8-9, 883-889, 2002.
10. Delgado, J.M.P.Q., de Freitas, V.P., Ramos, N.M.M., Barreira, E., “Numerical simulation of exterior condensations on façades: The undercooling phenomenon”, **Thermal performance of the exterior envelopes of whole buildings XI int. conference**, Florida, Aralık 2010. www.ornl.gov/sci/buildings/2010/B11%20papers/43_Delgado.pdf, Erişim: 3.2.2012.
11. BLOCON, **1D-HAM**, BLOCON, İsveç. www.buildingphysics.com/index-filer/Page1762.htm, Erişim: 6.3.2012.
12. Hagentoft, C.E., Blomberg, T., **1D-HAM coupled heat, air and moisture transport in multi-layered wall structures - Manual with brief theory and an example**, Lund-Gothenburg Group for Computational Building Physics, İsveç, 2000. www.buildingphysics.com/manuals/1dham.pdf, Erişim: 6.3.2012.
13. Nicolai, A., Grunewald, J., **Delphin 5 - User manual and program reference**. <http://bauklimatik-dresden.de/downloads.php>, Erişim: 6.3.2012.
14. Cornick, S., Maref, W., Abdulghani, K., van Reenen, D., **1-D hygIRD: A simulation tool for modeling heat, air and moisture movement in exterior walls**, National Research Council, Kanada, NRCC-46896, 2003. www.nrc-cnrc.gc.ca/obj/irc/doc/pubs/nrcc46896/nrcc46896.pdf, Erişim: 6.3.2012.
15. Karagiozis, A., Salonvaara, M., “Appendix I – LATENITE”, **Moisture analysis and condensation control in building envelopes**, ASTM Manual 40, Editör: Trechsel, H., ASTM, Philadelphia, A.B.D., 179-181, 2001.
16. Physibel, **GLASTA - Diffusion - Condensation - Drying - Extended Glaser Method**, Physibel, Belçika. <http://www.physibel.be/v0n2gl.htm>, Erişim: 6.3.2012.
17. dos Santos, G.H., Mendes, N., “Analysis of numerical methods and simulation time step effects on the prediction of building thermal performance”, **Applied Thermal Engineering**, Cilt 24, No 8-9, 1129-1142, 2004.
18. Trechsel, H.R. “Moisture Primer”, **Moisture analysis and condensation control in building envelopes**, ASTM Manual 40, Editör: Trechsel, H., ASTM, Philadelphia, A.B.D., 1-15, 2001.
19. Kus, H., Edis, E., Göcer, Ö., Özkan, E., “Performance assessment of pumice aggregate concrete block walls”, **8th Int. Masonry Conference**, Dresden, 1037-1046, 4-7 Temmuz 2010.
20. Edis, E., Kus, H., Göcer, Ö., “Pumice aggregate concrete block wall assembly design by hygrothermal performance simulation”, **ICBEST 2010**, Vancouver, 161-168, 27-30 Haziran 2010.
21. TSE, **Binalarda ısı yalıtım kuralları**, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1998.
22. Briggen, P.M., Blocken, B., Schellen, H.L., “Wind-driven rain on the facade of monumental tower: Numerical simulation, full-scale validation

- and sensitivity analysis”, **Building and Environment**, Cilt 44, No 8, 1675-1690, 2009.
23. Decareau, C.P.; Kan, L.; Pinon J.P., “Inputs and Analyses: An End User’s Perspective of Heat-Air-Moisture Data”, **Journal of ASTM Int.**, Cilt 4, No 8, 1-8, 2007.
 24. Abuku, M., Janssen, H., Roels, S., “Impact of wind-driven rain on historic brick wall buildings in a moderately cold and humid climate: Numerical analyses of mould growth risk, indoor climate and energy consumption”, **Energy and Buildings**, Cilt 41, No 1, 101-110, 2009.
 25. Koci, V., Madera, J. Cerny, Robert, C., “Exterior thermal insulation systems for AAC building envelopes: Computational analysis aimed at increasing service life”, **Energy and Buildings**, Cilt 47, No 1, 84-90, 2012.
 26. Torres, M.I.M, de Freitas, V.P, “Treatment of rising damp in historical buildings: wall base ventilation”, **Building and Environment**, Cilt 42, No 1, 424-435, 2007.
 27. Steeman, H.J., van Belleghem, M., Janssens, A., de Paepe, M., “Coupled simulation of heat and moisture transport in air and porous materials for the assessment of moisture related damage”, **Building and Environment**, Cilt 44, No 10, 2176-2184, 2009.
 28. Kalamees, T., Vinha, J., “Hygrothermal calculations and laboratory tests on timber-framed wall structures”, **Building and Environment**, Cilt 38, No 5, 689-697, 2003.
 29. Defraeye, T., Blocken, B., Carmeliet, J., “Influence on uncertainty in heat-moisture transport properties of convective drying of porous materials by numerical modelling”, **Chemical Engineering Research and Design**, Cilt 91, No 1, 36-42, 2013.
 30. Blocken, B., Carmeliet, J., “On the errors associated with the use of hourly data in wind-driven rain calculations on building facades”, **Atmospheric Environment**, Cilt 41, No 11, 2335-2343, 2007.