BIM Tabanlı Bina Enerji Simülasyon Yazılımlarının Analiz Sonuçları Üzerine Bir İnceleme

Betül Çelebi, [OrcID] ve Salih Ofluoğlu [0000-0002-3185-8275]

[1 2] Mimar Sinan Fine Arts University, 34380 Istanbul, Turkey
20182109021@ogr.msgsu.edu.tr, salih.ofluoglu@msgsu.edu.tr

Özet. Bu çalışma mevcut bina stoğunda yer alan yapıların iyileştirilmesi ve inşaat öncesi; erken tasarım aşamalarında enerji tasarruflu kararlar alabilmek için mimarlara yardımcı olabilecek bazı yazılım araçlarının incelenmesi ve karşılaştırılması yapılmıştır. Mimarlar tarafından tasarım aşamalarında kullanılan bu araçlar literatürde önceki çalışmalara dayanan bir dizi değerlendirme kriterleri: "Kullanılabilirlik", "Veri Birlikte Çalışabilirliği", "Destek Seçenekleri", "Bilgi Yönetimi", "Hesaplama Özellikleri" kapsamında değerlendirilmiştir. Yaygın olarak kullanılan bir BIM yazılımı olan Autodesk Revit ile bina enerji modeli BEM için farklı enerji motoru hesaplamalarına sahip Insight ve IDA ICE simülasyon araçlarının analiz sonuçları, mevcutta aktif olarak kullanıma sahip müstakil bir villa yapısı seçilerek yapının enerji tüketim verileri ile karşılaştırılmıştır. Insight BEM aracının doğrudan BIM yazılımı ortamına entegre olması, IDA ICE yazılım aracına BIM'den IFC modeli ile veri transferinin gerçekleşerek analizlerin oluşturulması, Insight simülasyon motorunun DOE-2.2 ve EnergyPlus hesaplamalarını içermesi, IDA ICE'nin bağımsız simülasyon motoru hesaplamalarına sahip olması araçların enerji analiz sonuçlarını karşılaştırırken farklı perspektiflerden bakılmasını sağlamıştır. Yapılan değerlendirmeler seçilen örnek yapıdaki gerçek enerji kullanım verileri ile karşılaştırılarak desteklenmiştir. Farklı yazılımlardan gelen enerji modeli sonuçları gerçek kullanım verileri arasındaki enerji farkı kabul edilebilir değer aralığında çıkmıştır. Bu karşılaştırma sonucu BIM tabanlı BEM sürecinin tasarım ve uygulamadaki yetkinliğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: BIM, Bina Enerji Modeli, Enerji Verimliliği, Autodesk Insight 360, IDA ICE

1 Giriş

Binalar, Amerika Birleşik Devletleri'nde ve Avrupa Birliği'nde birincil enerji kullanımının % 40'ından, sera gazı emisyonlarının % 36'sından ve dünya enerjisinin üçte birinden sorumludur (EIA, 2016).

Yapının yönlendirmesi, geometrisi, bina kabuk malzemeleri ve detayları gibi bina özelliklerini değiştirerek bina tasarımı daha fazla enerji tasarruflu hale getirilebilmektedir. Bina Enerji Modelleme (Building Energy Modelling / BEM) araçları, binanın enerji tüketimini azaltmada önemli bir etkiye sahiptir (Kamel ve Memari, 2019).

Bina Enerji Modelleme terimi, bir tesisin enerji tüketimini tahmin edebilen bir yazılımın kullanımını ifade eder. Bir binanın farklı bölümleri için farklı kriterlerin kombinasyonu, bu tür simülasyon yazılımı ile tanımlanabilmektedir. Bu tür yazılımların çalışması, enerji parametreleriyle etkileşimli olan bina modelleri gibi sanal görüntülere dayanmaktadır.

BIM teknolojisine dayanarak, son yıllarda Yapı Bilgi Modellemesi tabanlı Bina Enerji Modellemesi (BIM tabanlı BEM) adlı göreceli olarak yeni bir yaklaşım ortaya çıkmıştır. BIM tabanlı BEM, önceden oluşturulan bir BIM (mimari tasarım, mekanik yükler, malzemelerin özellikleri ve HVAC sistemi dahil) modelini kullanarak BEM araçları için girdi oluşturur ve BEM'i zaman kazandıran, düşük maliyetli, kullanımı kolay, daha pratik, tutarlı ve doğru bir süreç yapma fırsatı sunar (Gao ve ark., 2019).

Bina performans analiz araçlarının tasarım sürecine daha iyi bir entegrasyonunu sağlamak için: tasarım modeli ile iyi bir şekilde veri alışverişi yapma yeteneğine, verimli veri giriş ve çıkışını desteklemek için sezgisel kullanıcı arayüzlerine ve tek bir bina performans analizi modelinden farklı (enerji, günışığı, karbon, su ve maliyet) simülasyonlar yapma yeteneğine ihtiyaçları vardır (Jeong ve Kim, 2016).

Bina performans analizi araçları arasında bilgi aktarımı: her aracın diğer çıktıyı yorumlama, bu verileri kullanma ve bunu yorumlanabilir bir çıktı olarak kaydetme yeteneğine sahiptir. BIM ve BEM araçları arasında bilgi paylaşımı süreci açık kaynaklı değişim formatları aracılığıyla ortaya çıkmıştır (Laakso ve Kiviniemi, 2012).

Bununla birlikte, tüm potansiyel yazma ve okuma ortamlarına açık bir formatın bulunması göz önüne alındığında, bu tescilli araçların açık değişim formatında temsil edilmeyen belirli bir işlevselliğe sahip olması nedeniyle genellikle bazı işlevsellik kayıpları yaşanmaktadır (Şekil 1) (Gerrish, T. ve ark., 2017).

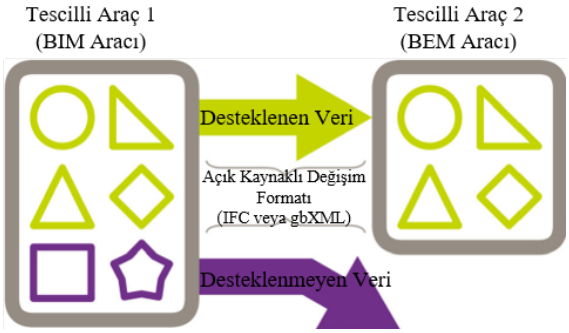

Fig. 1. Açık format değişimi aracılığıyla dışa aktarma yoluyla veri bütünlüğünün / doğruluğunun kaybı (Gerrish, T. ve ark., 2017)

Bu çerçevede BIM tabanlı BEM süreci üç aşamadan oluşmaktadır. Birlikte çalışabilirlik sorunları bu aşamaların herhangi birinden kaynaklanabilmektedir. Şekil 1'de veri değişim formatı transferi sürecinde araçlar arası bazı bilgi kayıplarının olduğu görülmektedir. BIM tabanlı BEM enerji analizi sürecinde bağımsız iki analiz ortamını birleştiren veri formatları mevcuttur: IFC ve gbXML gibi. Bu formatlardaki dosyaların BEM araçlarına transferi yapılırken bilgi aktarımında veri kaybı yaşanması bazı yapı

elemanlarının ilgili BEM aracı tarafından tanımı yapılamamasından kaynaklanabilmektedir.

Bu nedenle, bu çalışmada, BIM tabanlı BEM metodolojisi için seçilen araçların biri doğrudan BIM aracına entegre bir BEM analiz sürecinin incelenmesini ele almakta olup diğer seçilen BEM enerji analiz aracı IFC veri değişim formatı transferi ile enerji analiz sürecinin incelenmesini ele almıştır.

1.1 Motivasyon, Hipotez, Amaçlar ve Hedefler

Motivasyon.
Bu çalışmada mevcut bina stoğunda yer alan yapıların iyileştirilmesi ve henüz inşa edilmemiş erken tasarım aşamalarında enerji tasarruflu kararlar alabilmek için mimarlara yardımcı olabilecek sektörde önde gelen bazı araçların değerlendirilmesi, uygulaması ve karşılaştırılması yapılacaktır. Bu değerlendirme yapılırken mevcut bir yapı üzerinden araç performans simülasyon sonuçları gerçek enerji kullanım değerleri ile karşılaştırılarak seçilen araçların doğrulanmasını sağlayacaktır. Bu doğrulamanın amacı BIM tabanlı BEM sürecinin tasarım ve uygulamadaki önemi ve elde edilen sonuçların güvenilirliğine dikkat çekmektedir.

Hipotez.
BIM tabanlı BEM süreci, enerji verimli tasarım kararlarının alınabilmesi için yapı tasarım evrelerindeki etkinliği önemlidir. Bununla birlikte bu süreç kural çerçevesi tam olarak belirlenememiş bir metodoloji olup BIM tabanlı BEM sürecinde farklı platformlar arasında gerçekleştirilen veri transferi sürecinin iyi bir şekilde yönetilmesi gerekmektedir. BIM tabanlı BEM sürecine farklı perspektiflerden bakabilmek için farklı algoritma ve hesaplama yöntemine sahip araçların aynı model üzerinden analizlerinin karşılaştırılması gerekmektedir. BIM tabanlı BEM sürecine hakim olabilmek ve araçların sonuçlarının doğrulanabilmesi için mevcut enerji kullanım verileri ile simülasyon sonuçları kalibre edilmeli ve karşılaştırılmalıdır.

Amaçlar ve Hedefler.
Bu çalışma, BIM ve BEM araçları arasındaki birlikte çalışabilirlik konusu göz önünde bulundurularak sürdürülebilir ve entegre tasarımı kolaylaştırmak için yapı sektöründe hesaplamalı enerji analiz sürecine katkıda bulunmaktır. Bu amaç aşağıdaki hedeflere yol açacaktır:

- BIM tabanlı BEM sürecinin farklı hesaplama yöntemi ve farklı analiz sürecine sahip iki yazılımda entegre yapı enerji modeli analiz sürecini oluşturarak sonuçların farklı perspektiflerden ele alınması,
- BIM ortamına doğrudan entegre olarak çalışan EnergyPlus ve DOE-2.2 simülasyon motoruna sahip Insight enerji yazılım süreci ve BIM IFC transferi aracılığıyla bağımsız simülasyon motoruna sahip IDA ICE'de enerji yazılım süreçlerini gerçekleştirilerek birlikte çalışabilirlik konularının incelenmesi,

- Mevcut kullanıma sahip bir yapının detaylı yapı bilgi modelini geliştirilerek enerji analizini oluşturmak ve elde edilen sonuçları gerçek enerji kullanım verileri ile karşılaştırılması,
- Mevcut yapı modelinin erken tasarım evresinde enerji analiz modeli oluşturularak; gelişmiş evre detaylı tasarım modeli enerji model sonuçları ile kıyaslaması yapılarak, erken ve ileri evrelerdeki enerji analizi sonuçlarının kıyaslanması,
- Elde edilen sonuçlar çerçevesinde gelecek çalışmalar için BIM tabanlı enerji modelleme ve birlikte çalışabilirlik süreci için önerilerde bulunulması olacaktır.

1.2 Sınırlandırmalar

Bu bilgiler doğrultusunda bu çalışma kapsamında yapı bilgi sistemlerinin yalnızca performatif yapı tasarımı enerji analizi değerlendirmesi, belirlenen enerji analizi araçlarından elde edilen sonuçların gerçek vaka çalışması üzerinden yapılmıştır. BIM araçlarından yalnızca Autodesk Revit Architecture programı, BEM araçlarından EnergyPlus ve DOE-2.2 simülasyon motoru hesaplamalarına sahip bulut tabanlı Insight enerji analiz aracı ve bağımsız kendi hesaplama motoruna sahip IFC veri transferi ile BIM tabanlı BEM sürecinin gerçekleştiği IDA ICE aracı kullanılarak farklı algoritma hesaplama yapısına sahip iki aracın değerlendirilmesi ele alınmıştır. Örnek vaka çalışması olarak mevcutta kullanıma sahip müstakil bir konut yapısı seçilmiştir. Mevcut yapının gerçek verileri ile oluşturulan BIM modelinden BEM araçları ile oluşturulan enerji simülasyon sonuçları gerçek kullanım verileri ile kıyaslanmıştır. Erken tasarım aşamasında enerji etkin tasarım kararlarının alınmasına vurgu yapmak için yapının geometrik özellikleri kullanılarak oluşturulan kütle modeli enerji analizi sonuçları ile gelişmiş tasarım enerji modeli kıyaslaması yapılmıştır.

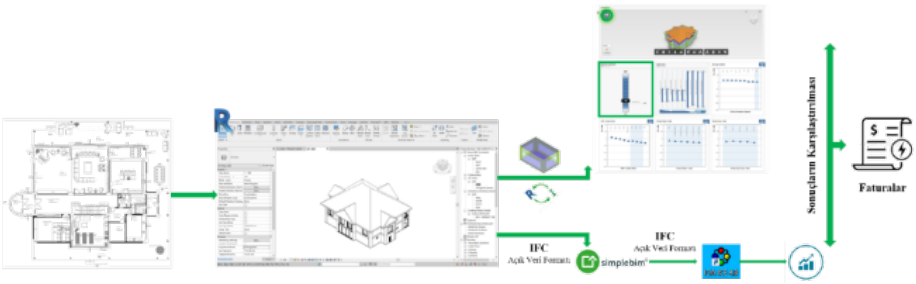

Fig. 2. Yapılan çalışmanın şematik anlatımı

1.3 Araştırma Yöntemi

Çalışma süresince izlenen araçlar arası iş akışları Şekil 3 ve Şekil 4'te gösterilmektedir. İlk olarak Revit'te BIM modeli oluşturulmuştur. Ardından 1. iş akışında gösterilen Revit plug-in olarak çalışan Insight'ta enerji modeli oluşturmak için Revit'in analiz sekmesi altında yer alan enerji oluşturma ve daha sonra optimizasyon tuşuna basarak enerji modeli hesaplanmak üzere bulut ortamına gönderilmiştir. 2. iş akışında IDA ICE için oluşturulan BIM modelinden IFC dosyası dışa aktarılmıştır. Daha sonra IFC

dosyası ara katman düzeltici Simplebim uygulamasında açılarak enerji yazılımı için hatalı olan veriler düzeltilmiştir ve son olarak IFC dosyası IDA ICE'ye transfer edilmiştir. Her iki araç yapısından elde edilen enerji simülasyonu sonuçları seçilen konut yapısının gerçek enerji kullanım miktarı ile karşılaştırılarak seçilen araçların doğrulanması sağlanmıştır.

Fig. 3. Revit ve Insight iş akışı

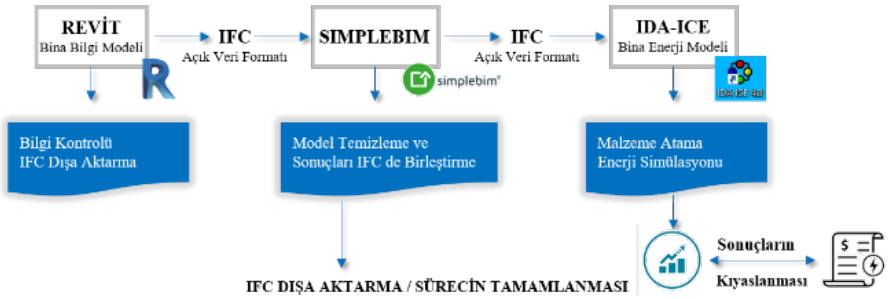

Fig. 4. Revit ve IDA ICE iş akışı

BIM - BEM entegrasyonu için çalışmada kullanılan enerji yazılım araçlarının sonuçları ve uygulama sürecindeki yetkinlikleri literatürde yer alan araç değerlendirme kriterleri kapsamında değerlendirilmiştir (Attia ve ark., 2012): "Kullanılabilirlik", "Veri birlikte çalışabilirliği", "Destek seçenekleri", "Bilgi yönetimi", "Hesaplama özellikleri".

2 BIM Tabanlı Bina Enerji Modellemesi (BEM)

BEM, enerji performansını simüle etmek, enerji ihtiyaçlarını değerlendirmek ve böylece binaların tasarımını optimize etmek için etkin bir şekilde kullanılabilir (Khodeir ve Nessim, 2018).

Ayrıntılı bir çalışmanın yürütülebilmesi ve daha hassas simülasyonların yapılmasını sağlamak için bina enerji modelleri yeterince geliştirilmelidir. "Enerji Modelleme" terimi, bunun için özel bir yazılım kullanılarak enerji tüketimi açısından modelin simülasyonunu ifade eder. BEM araçları genellikle şunları değerlendirmeye yardımcı olur: "Enerji talebi", "İç ortam kalitesi", "Karbondioksit emisyonu", "Enerji tasarrufu önlemlerinin geri ödeme süreleri".

BEM teknolojileri, bina tasarımı, optimizasyonu, inşaat, işletme ve araştırmaya yaygın olarak uygulanan onlarca yıldır geliştirilmiştir. Ticari BEM araçlarının çoğu

(örn. TRNSYS, EnergyPlus ve ESP-r) genellikle ölçüm verileri olmadan çok çeşitli çalışma koşullarında iyi tahmin doğruluğu sağlayan fiziksel modeller kullanır.

BEM araçları, bir Grafik Kullanıcı Arayüzü (GUI) ve bir simülasyon motoru dahil olmak üzere iki bileşenden oluşabilir. OpenStudio, BEopt, DesignBuilder ve eQuest gibi GUI'ler, kullanıcılar için grafik arayüz sağlayarak enerji modelleme sürecini kolaylaştırır. Ancak ikinci bileşen olan EnergyPlus ve DOE2 gibi enerji simülasyon motorları bu araçların arkasında çalışır.

DesignBuilder, OpenStudio, eQuest veya BEopt gibi ortamların arayüzleri simülasyonu doğrudan gerçekleştiremezler ve farklı sayısal araçlara ve ısı dinamiğine dayanarak analiz yapan EnergyPlus veya DOE-2.2 gibi enerji simülasyon motorları ile entegreli şekilde çalışmaya ihtiyaç vardır. Tablo 1'de enerji simülasyonu arayüzü veya simülasyon motoru altında ortak enerji simülasyon araçlarının nasıl toplandığını göstermektedir.

Table 1. Enerji simülasyon araçlarının kategorileri (Kamel ve Memari, 2019)

Enerji simülasyon ara yüzü	Enerji simülasyon motoru	Grafik ara yüzlü bağımsız enerji simülasyon motoru
OpenStudio DesignBuilder Hevacomp Simergy Beopt	⟷ EnergyPlus	Ecotect TRNSYS IDA ICE ApacheSim (IES VE'de Kullanılan EDSL Tas Modelica Dili (Dymola gibi grafiksel ara yüzlerle kullanılabilir)
GBS eQuest RIUSKA	⟷ DOE2	

BEM araçları tek başına kullanıldığında tasarım süreci ve dijital planlama ile senkronizasyonu ve entegrasyonu sağlanamamaktadır. BEM ile ilgili bilgilerin "BEM araçlarına" manuel olarak girilmesi hem çok zaman alır hem de maliyet ve iş yükü açısından yoğun bir süreci oluşturur. Bu nedenle BIM tabanlı BEM sürecinde iki modelin birleştirilmesi, model geometrisinin oluşturulmasında harcanan çaba ve zamanı azaltır ve BIM tabanlı BEM modelinde bina parametrelerinin otomatik olarak atanması veri alışverişi ve bilgi güvenirliği korunabilmektedir (Chen ve diğerleri, 2018). BIM sürecinin BEM sürecine katkısı Şekil 5'te gösterilmektedir.

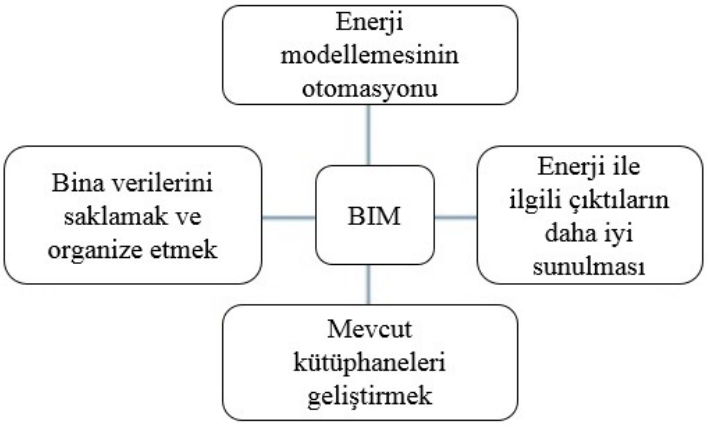

Fig. 5. Enerji yönetiminde BIM'in katkıları (Kamel ve Memari, 2019)

BIM'in, tek bir veri modelinden çok disiplinli bilgileri temsil etmesi, bina tasarımı ve bina performansı simülasyon modelleri arasında veri entegrasyonunu kolaylaştırır. Bugün, çoğu enerji modelleme süreci, bir binanın tasarım aşamasından bağımsız, tasarım modeli tamamlanma aşamasına yaklaştığında dahil edilir. Bununla birlikte, BEM aracı BIM uygulaması ve iş akışı içine entegre edilmişse, bu enerji analizi konsept aşamasında dahil edilirse daha bilinçli tasarım kararları alınmasını sağlar (Lack, 2019). BIM tabanlı BEM'in iş akışının ideal bir grafiği gösterilmektedir (Şekil 6) (Maile ve ark., 2007). İlk adım, bina konumunu tanımlamaktır (1), bu başlangıçta hava dosyasını simülasyona bağlamak için yapılır. Malzemelerin termal ve yapı özellikleri, alan tipleri ve geometrisi BIM modelinden ithal edilmelidir. Enerji simülasyon yazılımının geometri tanımına uymak için BIM'deki geometrinin basitleştirilmesinden termal bir görünüm elde edilmelidir. Ek olarak, boşlukların termal bölgelere bölünmesi ve alt bölümlere ayrılması, geometri tanımına dayalı kullanıcı arayüzünün özelliklerinden biri olmalıdır. Ardından, BIM ayrıca belirli uygun alan türlerine zaten atanmış olan alan yüklerini de içerir. Son aşamada, BIM ayrıca HVAC sisteminin bileşenleri ve bilgileri sağlar. Gösterilen iş akışının vurguladığı gibi, BIM tabanlı BEM prosedürleri sınıflandırması bina hakkındaki bilgilere göre altı adımda gerçekleştirilebilir.

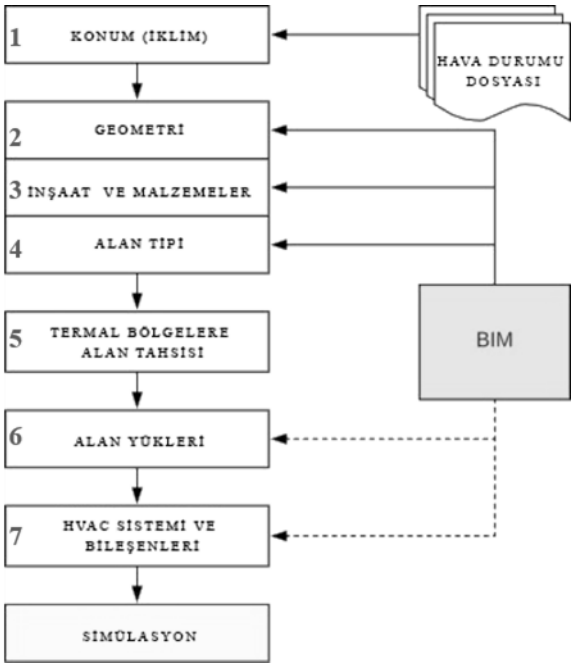

Fig. 6. BIM tabanlı BEM simülasyon süreci için ideal iş akışı (Maile,2007)

Kesin konumun ve hava durumu dosyasının belirlenmesi, bölgeye ait iklim koşullarını içermesinden dolayı doğru enerji simülasyonu için en önemli adımdır ve bu, enerji performansı simülasyonunun iş akışında ilk sırada gelmesinin nedenini açıklar.

Bina geometrisi ve formu (2), enerji performansı simülasyonunun iş akışına göre konum ve iklimden sonra çok önemli bir adımdır ve bu nedenle bina modelinin geometrik özelliklerinin aktarım sürecini değerlendirmek esastır.

Yapı malzemeleri, bina kabuğunun (3) enerji dengesinden ve genel enerji modellemesinden sorumlu ana faktördür. Buna göre, bina kabuğunu temsil eden duvarlar, pencereler ve kapılar, bina kabuğu katmanlarının sayısı, sırası ve termal özellik değerleri bu faktörleri içermektedir.

Termal bögeler (5), yapının ısıtma - soğutma yüklerini ve ısı enerji hesaplarını temsil etmektedir. Bu özelliğin atanması tanımlı alanlar için mekan özelinde atanan mekanik sayısal bilgilerin temsil edilmesini sağlar.

Alan yükleri (6) doluluk ve işletim programı yapı tipine bağlı olarak yapının kullanım tipini temsil etmektedir.

HVAC sistem (7) seçimi yapı için ısıtma – havalandırma – iklimlendirme özelliklerinin tanımlanmasını temsil etmektedir.

BIM ve BEM arasında uygun entegrasyon ancak verilerin yukarıda ifade edildiği gibi kesintisiz aktarımı sağlandığında elde edilebilir.

3 Araştırma Çerçevesi ve Vaka Çalışması

Bu çalışmada farklı enerji simülasyon hesaplama motoruna sahip BEM araçları seçilmiştir; Autodesk Insight 360 (EnergyPlus ve DOE-2.2) ve IDA ICE (bağımsız enerji simülasyon motoru). Seçilen araçlar üzerinden BIM tabanlı BEM sürecinde BIM modeli, varolan müstakil bir ev yapısının inşaat uygulama bilgileri kullanlarak oluşturulmuştur. Seçilen yapı modelinden inşaat uygulama verileri ile BIM modeli oluşturulacağı için malzeme termal bilgilerinin de dahil edilmesi ile model LOD 300 seviyesinde modellenmiştir. Bu model ile seçilen BEM araçlarında enerji simülasyon modelleri oluşturularak elde edilen sonuçlar gerçek enerji kullanım verileri ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır.

Çalışmada aşağıdaki adımlar takip edilmiştir.

1. Seçilen vaka çalışmasının BIM yazılımı Revit ortamında tüm geometrik, mekansal ve termal özellikleri de dahil olmak üzere modellemesinin yapılması,
2. Çalışmada BIM yazılımı için Autodesk Revit aracı, BEM analiz yazılımları için Autodesk Insight 360 ve IDA ICE araçları kullanılmıştır. BEM araçları farklı enerji simülasyon hesaplama motorlarına sahip olduğu için seçilmiştir.
3. Simülasyon çıktılarının alınması
4. Sonuçların değerlendirilmesi ve karşılaştırılması
5. BIM-BEM entegrasyonuna ilişkin önerilerin sunulması

3.1 Seçilen Yazılım Araçları

Gelişen ve her geçen gün sayısı artan Bina Performans Simülasyon araç havuzu arasında bu araçları kullanacak kullanıcı uygun bir araç seçme zorluğu ile karşı karşıyadır. Araç geliştiricileri araçların yeteneklerini ve sınılamalarını nadiren belirtmektedir (Reinhart, 2006). Bu nedenle, seçim sürecini kolaylaştırmak için farklı kullanıcıların araç yeteneklerine ve sınırlamalarına ilişkin ihtiyaçlarını açıkça tanımlamak gerekir. BPS araçları için temel kriterleri belirlemek, mimarları ve mühendisleri daha verimli ve uygun maliyetli sürdürülebilir binalar oluşturmanın yanı sıra gelecekteki yenilikleri ve AEC endüstrisinin ilerlemesini kolaylaştırabilir.

Literatürde BEM araç seçim kriterleri için en az beş ana konunun tartışıldığı tespit edilmiştir (Hong ve ark., 2000; Attia ve ark., 2011; Issa, M. ve ark. 2018). Bu kriterler kapsamında bu çalışmada ele alınan araçlar Tablo 2'de gösterilmiştir.

Table 2. Araç seçim kriterleri

Araçlar	Araç Seçim Kriterleri					Enerji Simülasyonu Araç Kategorisi
	UIM (Arayüzün Kullanılabilirlik ve Bilgi Yönetimi)	IIKB (Akıllı Tasarım BilgiTabanının Entegrasyonu)	Araçların doğruluğu ve ayrıntılı ve karmaşık bina bileşenlerini simüle etme yeteneği (AADCC)	Bina modellemesinin birlikte çalışabilirliği (IBM)	Araçların bina tasarım sürecine entegrasyonu (IBDP)	
Insight	✓	✓	Temel Seviye	BIM Modeli ile Bulut Üzerinden Entegre (Run-Time)	Erken Tasarım	EnergyPlus &DOE 2.2
IDA - ICE	✓	✓	İleri Seviye	Geliştirilmiş IFC içe ve dışa aktarma (File-Exchange)	Erken Tasarımdan Geç Tasarıma - Erken Tasarım Kullanıcı Arayüzüne de Sahiptir (ESBO)	Grafik Arayüzlü, Bağımsız Enerji Simülasyon Motoru (Kendi Motoru)

BEM araçlarının mimarlar için uygun olup olmadığını değerlendirmek için kriterler geliştirilmiştir (Weytjens ve ark., 2010). Değerlendirme kriterlerleri beş bakış açısından oluşturulmuştur; veri girişi, veri çıkışı, grafik kullanıcı arayüzü, kullanılabilirlik ve genel. İlk bölüm hızlı ve ileriye dönük veri girişi elde edilmesinin yanı sıra geometrinin grafik gösterimi üzerinde odaklanırken, ikinci bölüm çıktı sonuçlarının yorumlanması ve parametrik analiz yeteneklerine odaklanmıştır. Üçüncü bölüm, açık ve esnek yönlendirme ile grafik kullanıcı arayüzün önemini vurgulamıştır. Dördüncü bölüm, minimum ve hızlı geri bildirim için kullanılabilirliği ve genel kapsamı içermektedir. Tablo 3.2'de seçilen araç özellikleri bu kriterler bağlamında da analiz edilmiştir. Araç seçiminde bu değerlendirme özellikleri kısmi olarak dikkate alınarak seçimler yapılmıştır. Araç seçiminde ön plana çıkan özellikler; iki farklı simülasyon hesaplama motoruna sahip araçlar olması, bir aracın BIM ortamı ile doğrudan entegre olarak plug-in aracılığıyla enerji analizini gerçekleştirmesi; diğer aracın IFC dosya transferi ile enerji yazılımını gerçekleştirebilmesi ve bununla birlikte BIM tabanlı BEM sürecinde farklı iki yöntem aşamasının incelenebilecek olması etkili olmuştur.

Table 3. Seçilen araçların özellikleri

Araçlar	Simülasyona Genel Bakış				Hesaplama Kalitesi		Kullanılabilirlik	Geçerlilik
	Önkoşul	Girdiler	Çıktılar	Sunum	Güvenilirlik	Zorluk		
Insight	*3D çizimde temel beceri	*Coğrafi konum *Isıtma sistemi *Oryantasyon *Geometri *U-değeri *Hava akımı	*Enerji kullanım yoğunluğu *Enerji maliyeti *Enerji faktörü analizi *Yenilenebilir Enerji *Benchmark karşılaştırma (Net Sıfır Standart, Mimarlık 2030 Mücadelesi)	Grafik	Orta ila Düşük	Düşük	Erken Aşama	Tüm Dünya
IDA - ICE	*Bina enerji simülasyonu ile ilgili deneyimler	*Coğrafi konum *Isıtma sistemi *Oryantasyon *BIM / CAD'den Geometri *İçe Aktarma *U-değeri *Hava akımı	*Hava akımı *Toplam ısıtma ve soğutma *Gün ışığı *Teslim Edilen Enerji *Yenilenebilir *ASHRAE 90.1 uyumluluk uzantısı	Grafik ve Rapor	Orta ila Yüksek	Orta	Tüm Aşamalarda	Tüm Dünya

Seçilen araçların geliştirilen son versiyonları çalışmada kullanılmıştır: Revit→2022, IDA ICE→4.8 SP2, Insight→Revit 2022. Farklı simülasyon araç kategorileri IDA ICE→Kendi Motoru, Insight→EnergyPlus & DOE-2.2 seçilmiştir.

3.2 Vaka Çalışması

Bu araştırma için vaka çalışması olarak İstanbul, Şile'de yer alan müstakil bir villa yapısı seçilmiştir.

Fig. 7. Bina konumu hava fotoğrafı

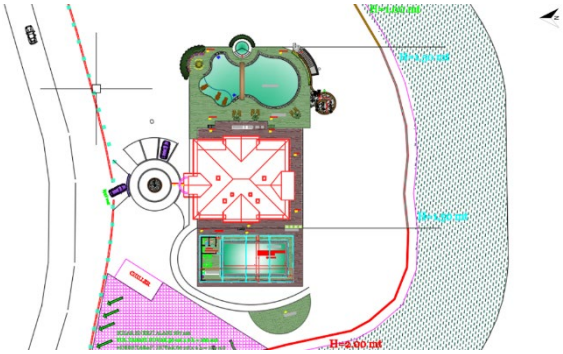

Fig. Yapı vaziyet plan görünümü

Mevcut durumda 4 kişilik çekirdek bir aile, bazı geniş aile üyeleri ve misafirleri olarak yapıyı kullanma durumları yoğun olduğu için misafir odaları dahil edilerek yapı tasarlanmıştır.

Yapı zemin kat, birinci kat ve çatı katı olmak üzere 3 katlıdır ve 640 m² kullanım alanına sahiptir. Binanın konumu Karadeniz iklim özelliklerini taşımaktadır. Yapı 2020 yılından beri kullanılmaktadır. Yapıda ısıtma ve soğutma sistemi olarak dört borulu fan coil sistemi kullanılmıştır. Bina programı bir salon, iki mutfak, dört misafir odası, iki çocuk odası, bir yatak odası, ıslak hacimler, bir çamaşır odası, bir rekreasyon amaçlı oda, bir sauna / hamam / buhar odasından oluşmaktadır.

Bu çalışmada inşa edilmiş bir yapının yapı bilgi modeli oluşturularak yapının sanal ortamda bilgilerinin depolanması ve bu depolanan bilgilerin enerji değerlendirmesi ve simülasyonları için seçilen BEM araç platformlarına aktarımının yapılarak elde edilen çıktıların gerçek kullanım verileri ile doğrulanması yaklaşımı uygulanmıştır. Bu yöntemde sanal model çıktıları ile gerçek enerji kullanımını gösteren elektrik fatura verileri kıyaslanmıştır.

3.3 Araştırma Sınırlandırması

1. Bu çalışmanın birincil odağı mevcut enerji kullanım değeri ile araçların enerji hesaplarının tutarlılığının karşılaştırması olmuştur. BIM tabanlı BEM sürecinde elde

edilen analiz sonuçlarının gerçek kullanım verileri ile tutarlı olması araçların kullanımına yönelik güveni artırmaktadır.
2. Bu araştırma sektörde yaygın olarak kullanılan BIM araçlarından sadece biri olan, Autodesk Revit üzerinde gerçekleştirilmiştir.
3. Bu çalışma, uluslararası tanınan BIM tabanlı BEM arası değişim formatlarından yalnızca birini içermektedir; IFC.
4. Bu araştırma araçların, Insight Revit 2022; IDA ICE 4.8 SP2 sürümleri ile test edilmiştir.
5. Çalışmada kullanılan veriler yıllık bütün bina enerji kullanımıyla karşılaştırmayı sınırlamıştır.

3.4 Autodesk Revit ile Modelleme Süreci

Revit aracı, bu çalışmada kendi içinde entegre BEM yazılımı Insight'ın olması ve Mimarlık - Mühendislik - İnşaat sektöründe yaygın olarak kullanılması nedeniyle bu çalışmada BIM aracı olarak tercih edilmiştir.

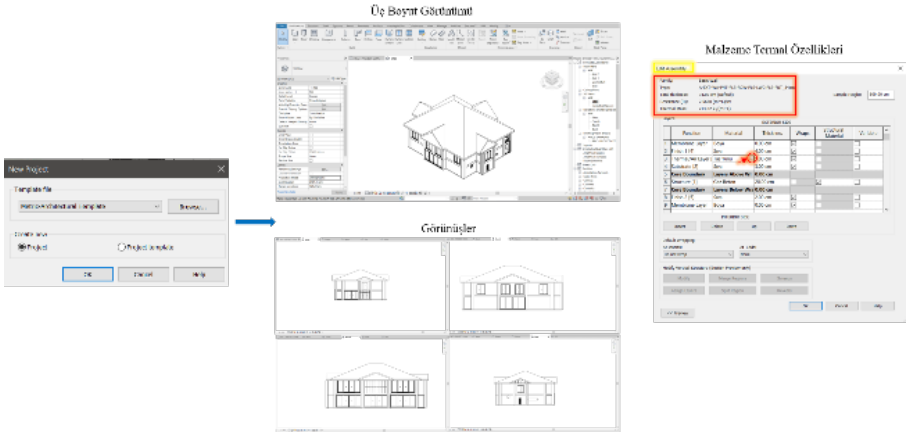

Fig. 8. Revit modelleme ortamı

Çalışmada iki boyutlu CAD çizimlerinden bina geometrisini modellemek ve toplanan tüm verileri modele entegre etmek için Autodesk Revit 2022 kulanılarak üç boyutlu BIM modeli oluşturulmuştur.

Mevcut CAD dosyasının Revit ortamına eklenmesi.
İlk olarak Autocad proje dosyası tüm katlar için Şekil 9'da gösterildiği gibi ayrı .DWG dosyası olacak şekilde farklı kaydedilmiştir.

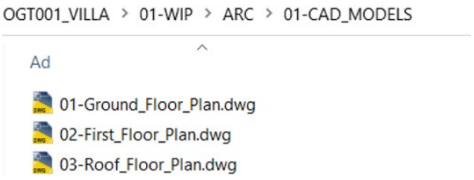

Fig. 9. Kat planlarının ayrı dosyalara aktarılması

Dosyalar Revit ortamına Şekil 3.10'da gösterildiği gibi link yöntemi ile bağlanmıştır.

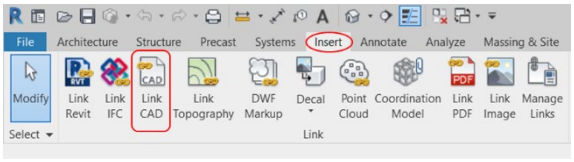

Fig. 10. CAD dosyalarının Revit ortamına aktarılması

Vaka Çalışması – Revit bina verisi.

Tüm bilgiler vaka çalışmasından referansla hazırlanmıştır.

Table 4. Revit model verisi

	Bina Verisi
Bina Tipi	Single Family House
Konum	Aydın Caddesi, No:33/1, Şile - İstanbul
Transfer Kategorisi	Alan (Spaces)
Yer Düzlemi	Zemin Kat
Analitik Alan Çözünürlüğü	15.24
Analitik Yüzey Çözünürlüğü	7.62
Bina Kullanım Çizelgesi	Varsayılan (Default)
HVAC Sistem	4-Pipe Fan Coil System, Chiller 5.96 COP, Boilers 84.5 eff
Dış Hava Bilgisi	Kişi başına düşen dış hava = 8 L/s

Dosya aktarımı gerçekleştirilen CAD dosyasının temizlenmesi.

CAD dosya aktarımı yapıldıktan sonra dosyada enerji modellemesi için önemi olmayan çizim elemanları Şekil 3.10'da görüldüğü gibi dosyadan temizlenmiştir. Dosya temizleme işlemi BEM aracı için gereksiz olan elemanların kaldırılarak model dosya boyutunun küçültülmesini ve enerji modeli için ihtiyaç duyulmayan elemanların gereksiz yere modellenerek süreç içerisinde meydana gelecek zaman kaybını ortadan kaldırmayı sağlamaktadır.

BIM modelinin oluşturulması.

Temizlenen CAD dosyası üzerinden yapı modeli oluşturulmuştur. Döşeme, duvar ve çatı elemanları modellendikten sonra kapı ve pencere elemanları yerleştirilmiştir.

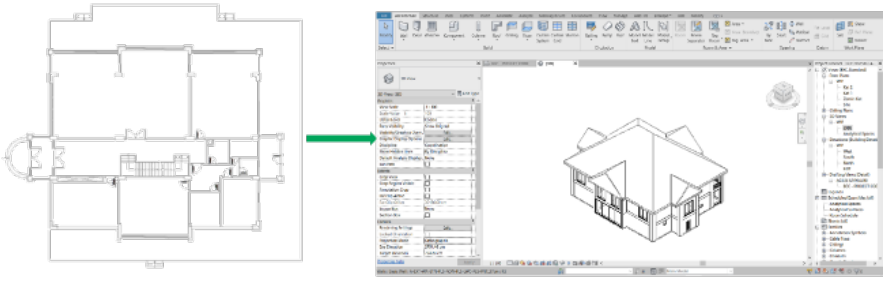

Fig. 11. BIM modeli

Çalışma malzeme termal bilgilerinin eklenmesi ile birlikte enerji analiz modeli için LOD 300 seviyesinde modellenmiştir. LOD 300 model gelişim seviyesi tanımı elemanların parametrik bilgilerinin dahil olduğu tanımlanmış bir konuma sahip belli bir sistemi temsil etmektedir (Gerrish, 2017; AIA, 2013).

Kütle (Mass) modelinin oluşturulması.

Erken tasarım aşaması için aynı yapının geometri özellikleri üzerinden kütle modeli enerji çalışması yapılarak mevcut yapı inşa edilmeden önce enerji analizi süreci ile birlikte tasarım kararları verilerek inşa edilmiş olsaydı sorusuna yönelik gelişmiş tasarım enerji modeli analiz sonuçları ile kütle modeli enerji analiz sonuçlarının karşılaştırmasını yapmak için kütle modeli oluşturulmuştur. Model erken tasarım aşamasını temsil eden LOD 200 gereksinimlerini karşılamaktadır.

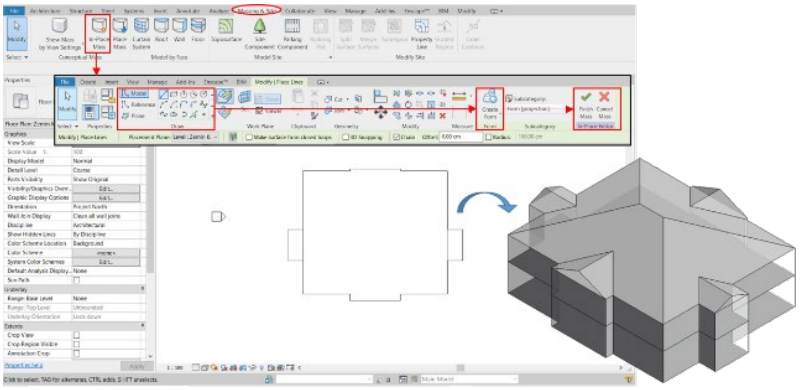

Fig. 12. Örnek vaka çalışması kütle modeli

Enerji analizi için Autodesk Revit IFC transferi konfigürasyonu.

IDA ICE enerji yazılımı aracında, enerji analizi için IFC dosya transferine ihtiyaç duyulduğundan dolayı bu bölümde enerji analizi için Revit 2022'den IFC transferi adımları ele alınmıştır. Enerji analizi için gerekli ayarlar IFC "Modify Setup" penceresinde düzenlenmiştir.

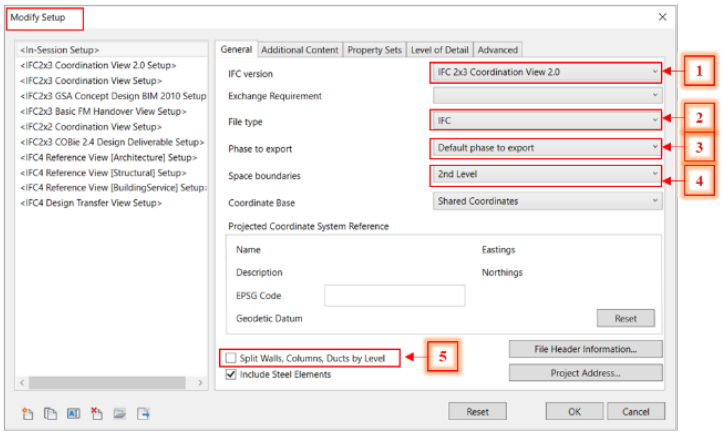

Fig. 13. IFC transferi genel ayarları

Enerji analizi için çok önemli olan bir ayar, alan (space) sınırlarıdır. "Enerji Analizi Yazılımı" ikinci seviye alan sınırı gerektirir. Bu nedenle, mekan sınırları Şekil 13'te gösterildiği gibi ikinci seviye olarak ayarlanmalıdır. Yapı elemanının malzemesi ve arkasındaki bitişik boşluklar, termal özellikler sağladıkları için 2. seviye boşluk sınırı olarak kabul edilir. Duvarları ve sütunları katlara göre ayır seçeneğinin işaretlenmemesi genellikle tavsiye edilir. Bu önerinin arkasındaki mantık, bu seçeneğin, birden fazla seviye yüksekliğine sahip duvarları ve sütunları kata göre parçalara ayırmasıdır.

3.5 Revit: Insight Enerji Modeli ile Çalışmak

Erken tasarım aşaması için oluşturulan yapının kütle modeli ve inşa edilen yapının gerçek verileri ile BIM modeli tamamlandıktan sonra enerji analiz modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan enerji modelinden elde edilen sonuçlar iki kategoride karşılaştırılmıştır:

1. İnşa edilmiş yapı verileri ile oluşturulan yapı modelinden elde edilen enerji kullanım sonuçları ile gerçek enerji kullanım verilerinin karşılaştırılması.
2. Erken tasarım evresini temsil eden kütle modelinden elde edilen enerji kullanımı sonuçları ile inşa edilen yapının modelinden oluşturulan enerji kullanım sonuçlarının karşılaştırılması.

Fig. 14. Insight yazılım model görüntüsü

Fig. 15. Revit ve Insight iş akışı

İnşa edilmiş yapı elemanları verisi ile enerji modelleme.
Detaylı yapı bilgi modeli oluşturulan vaka çalışmasının enerji modeline çevrilmesi için gereken adımlar izlenmiştir. Insight, Revit içinde doğrudan çalışan BIM tabanlı BEM entegrasyonunda tek bir yazılım içerisinde bulunan bir enerji yazılımı aracıdır. Enerji simülasyon motoru olarak, DOE-2.2 ve EnergyPlus yazılımlarını kullanır. Enerji analiz süreci aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır:

- Proje konumunun oluşturulması
- Temel enerji ayarlarının tanımlanması
- Gelişmiş enerji ayarlarının tanımlanması
- Enerji analitik modelinin oluşturulması
- Insight enerji analiz sonuçları

Kütle modeli ile enerji modelleme.
Bu bölümde "Kütle (Mass) modelinin oluşturulması" başlığı altında vaka çalışmasının erken tasarım aşama evresinde enerji analiz sürecini incelemek için kütle modeli oluşturulmuştur. Erken tasarım evresinde yapının nihai tasarımına karar vermeden sürdürülebilir ve enerji etkin bir tasarıma sahip yapı oluşturmak için Revit, kütle model oluşturma ve oluşturulan bu tasarımın hızlı bir şekilde enerji modelini oluşturmaya imkan tanımaktadır. Gerçek örnek vaka çalışmasının kütle modelinden, enerji modelini oluşturma amacı; eğer bu yapı inşa edilmeden önce tasarım evrelerinde bu kararlar baz alınarak tasarlanmış olsaydı enerji verimliliği açısından oluşacak farkları görebilmek için ele alınmıştır.

3.6 Revit: IFC Transferli IDA ICE Enerji Modeli

BIM ve BEM araçları arasında veri transferini garanti eden model formatı IFC şemasıdır. IFC yaygın olarak farklı uygulama alanları (daha kapsamlı bir veri türü) için kullanılır ve herhangi bir geometriyi okuyabilmektedir (Carvalho ve ark., 2021).

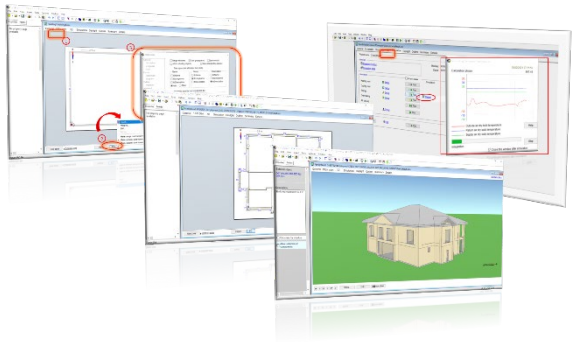

Fig. 16. IDA ICE yazılım ortamı

IFC formatını desteklediği ve model içe aktarma aşamasında veri kaybını azaltmaya izin verdiği için binanın enerji performans analizi için IDA ICE yazılımı seçilmiştir. IFC dosyasında enerji analizi için gerekli olmayan bilgilerin temizlenmesi ve IDA ICE tarafından bazı elemanların tanımlanabilmesi için gerekli olan ayarların yapılabilmesi için IDA ICE Simplebim eklentisi kullanılmıştır. Enerji modeli oluşturma sürecinde Şekil 16'da gösterilen adımların uygulaması yapılmıştır.

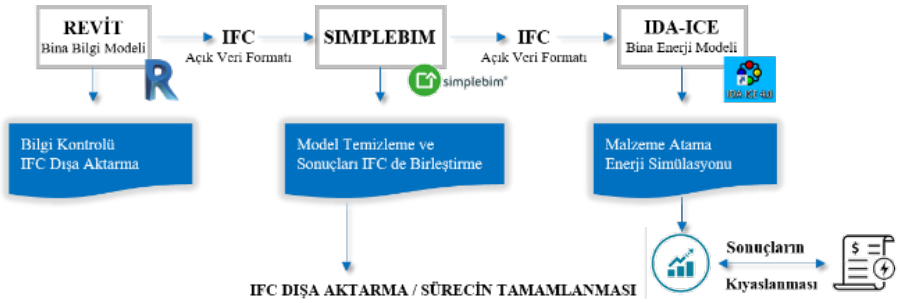

Fig. 17. Revit ve IDA ICE iş akışı

3.7 Enerji Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

Enerji simülasyon sonuçları iki kategoride ele alınmıştır. İlk olarak çalışmada kullanılan yapının gerçek tasarım parametrelerine göre oluşturulmuş gelişmiş BIM modeli ile elde edilen Insight ve IDA ICE enerji simülasyon sonuçlarının gerçek enerji kullanım verileri ile karşılaştırması yapılmıştır. İkinci olarak bu yapının erken tasarım

aşamasında mevcut geometrisi kullanılarak kütle modeli üzerinden Insight enerji analizi sonuçları, gelişmiş BIM modeli enerji analizi sonuçları ile karşılaştırması yapılmıştır.

Gerçek kullanım verileri ile gelişmiş tasarım modeli enerji sonuçlarının karşılaştırılması.
Gerçek kullanım verileri aktif olarak kullanıma sahip yapının bir yıllık elektrik faturalarında yer alan enerji tüketimlerinin toplamı baz alınarak hesaplanmıştır. Şekil 17'de görüldüğü üzere gerçek enerji kullanım verisi ile Insight %2,27, IDA ICE ile %3,86 oranında bir fark görülmektedir. Bu değer aralığı literatürde yer alan çalışmalarda kabul edilebilir bir sapma aralığında <10 - 20% yer almaktadır (Oleiwi ve ark., 2019).

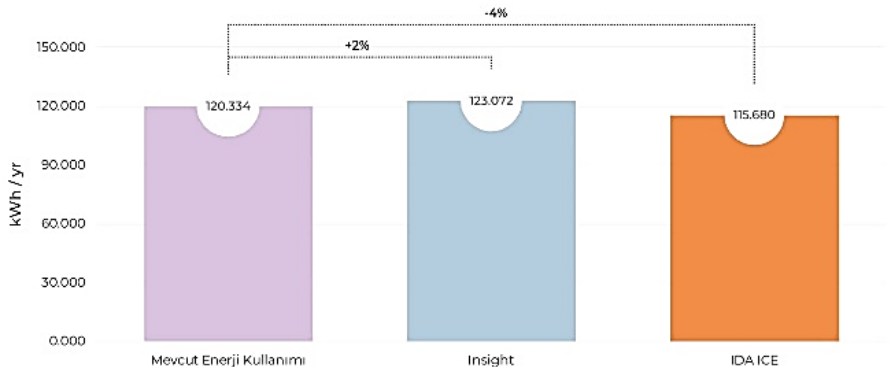

Fig. 18. Mevcut enerji kullanım verileri ile Insight ve IDA ICE enerji analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Kütle modeli ve gelişmiş tasarım modeli enerji sonuçlarının karşılaştırılması.
Erken tasarım evresinde tasarım seçeneklerinin, detaylı tasarım aşamasına geçmeden bina modeli ile bina enerji modelinin entegre bir şekilde süreçte ilerlemesi yapının enerji etkin tasarıma sahip olmasını sağlamaktadır. Erken tasarım aşamasında bu entegrasyonu sağlayabilmek tasarımcılar için süreçte hızlı sonuçlar alınabilmesi ve tasarım alternatiflerinin hızlı bir şekilde kıyaslanabilmesi de önemlidir. Insight enerji analizi bu beklentileri erken tasarım aşamasında karşılayabilmektedir.

Model Name	Scenario	EUI Mean (kWh / m² / yr)	Ashrae 90.1 (kWh / m² / yr)	Building Area (m²)
BEC-OGTSFH-ARC-MD3-ZZ-R22	Mass Model - Alternatif 1	116	171	729
BEC-OGTSFH-ARC-DD3-SZZ-R22	BIM Model	192	135	641

Fig. 19. Kütle modeli ve gelişmiş tasarım BIM modeli enerji sonuçlarının karşılaştırılması

Erken tasarım aşamasında, tasarımların basit geometriler ile kütle modelleri üzerinden enerji analizi tasarım alternatiflerini kullanarak tasarıma yön verilmesi; uygulaması yapılacak yapının enerji tüketim miktarlarında önemli ölçüde etkiye sahip olduğu görülmüştür (Şekil 18).

Bununla birlikte kütle modeli evresinde enerji verimliliği sonucunun güvenilirliği test etmek için gelişmiş model enerji parametreleri kütle modelinde de kullanılarak sonuçlar doğrulanmıştır (Şekil 19).

Fig. 20. Gelişmiş tasarım BIM modeli, kütle modeli ve gelişmiş tasarım kütle modeli senaryolarının karşılaştırılması

Mass-BIM enerji modeli senaryosu BIM model verileri ile oluşturulmuş erken tasarım aşamasında enerji analiz sonuçlarının güvenilirliğini test etmek için oluşturulmuştur. Mass Model- Alternatif 1 senaryosu kütle modeli enerji analizi sonuçlarına etki eden parametrelerin Insight ortamında değiştirilmesi ile mevcut enerji kullanımına sahip yapıdan daha az enerji kullanımına sahip bir tasarım modeli oluşturulmuştur. Parametrelerden bina yönelimi, pencere cam tipi, pencere duvar oranı, sızdırmazlık, aydınlatma verimliliği, fiş yükü verimliliği ve HVAC sistem modeli üzerinde değişiklikler yapılmıştır. Bina yönelimi BIM seviyesine getirilerek mevcut yapı yönelimini temsil etmekte olup verimlilik açısından en iyi aralıktadır. Pencere cam tipi çift cam (Double Clear) ve üçlü cam (Triple Low-E) aralığında değiştirilmiştir. Pencere duvar oranı %40 ve aşağısı aralığında ayarlanmıştır. Sızdırmazlık BIM ayarı seçilmiş olup 0.4 ACH (Birim Saat Başına Hava Değişimi) değerine eşittir. Aydınlatma verimliliği BIM - 3.23 W/m² aralığında değiştirilmiştir. Fiş yükü verimliliği 13.99 W/m² - 6.46 W/m² aralığında seçilmiştir. HVAC sistem modeli ASHRAE Heat Pump - ASHRAE Package Terminal Heat Pump aralığında seçilmiştir. Bu model, vaka çalışmasının gerçek enerji kullanımından daha az enerji tüketen bir yapı oluşturulabileceğini göstermiştir.

4 Sonuçlar ve Gelecek Çalışmalar

Bu çalışmada gelişmiş bina enerji modelleme araçlarını kullanmak isteyen kullanıcılara yönelik yaygın olarak kullanılan iki BEM aracının uygulaması ele alınarak değerlendirilmesi yapılmıştır. BIM yazılımı olan Revit ortamında araştırma konusu için

seçilen inşa edilmiş bir yapının gerçek bilgileri ile yapı bilgi modeli oluşturulmuştur. BIM tabanlı BEM sürecini incelemek ve araçların analiz sonuçlarının karşılaştırmasının yapılması için iki farklı BEM aracı seçilmiştir. İki ortam arasındaki farklar; Insight BEM aracının doğrudan BIM yazılımına dahil olması, IDA ICE'nin IFC modeli ile veri transferinin gerçekleşmesi, Insight simülasyon motorunun DOE-2.2 ve EnergyPlus hesaplamalarını içermesi, IDA ICE'nin bağımsız simülasyon motoru hesaplamalarına sahip olması araçların enerji sonuçlarını karşılaştırırken farklı perspektiflerden bakılması sağlanmıştır.
Bu araçlardan elde edilen analiz sonucu örnek yapıdaki gerçek enerji kullanım verileri ile karşılaştırılmıştır. Enerji modeli sonuçları gerçek kullanım verileri arasındaki enerji farkı kabul edilebilir değer aralığında çıkmıştır. Bu karşılaştırma sonucu ile BIM tabanlı BEM sürecinin tasarım ve uygulamadaki yetkinliği sınanmıştır. Bununla birlikte erken tasarım aşaması için aynı yapının geometri özellikleri üzerinden kütle modeli enerji çalışması yapılarak mevcut yapı inşa edilmeden önce enerji analizi süreci ile birlikte tasarım kararları verilerek inşa edilmiş olsaydı sorusuna yönelik gelişmiş tasarım enerji modeli analiz sonuçları ile kütle modeli enerji analiz sonuçlarının karşılaştırılması yapılmıştır. Kütle modelinden elde edilen sonuçlar erken tasarım aşamasında enerji etkin kararlar almanın yapının inşa aşamasından sonra aktif hale gelecek enerji kullanım miktarı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Mevcut enerji kullanım miktarı analiz modelinde 192 kWh/m²/yr iken kütle modeli tasarım alternatifi enerji analiz sonucu 116 kWh/m²/yr olarak hesaplanmış olup daha az enerji kullanımına sahip bir yapı tasarım modeli oluşturulmuştur. Bu sonuçlardan hareketle enerji yazılımı araçlarının yapı bilgi modelleme süreçlerine dahil edilerek bir iş akışının oluşturulması yeni inşa edilecek yapılarda meydana gelecek enerji tüketimi miktarlarının optimum seviyelerde tutulabileceği gibi mevcut yapı stoğu iyileştirmelerinde de yapının as-built modelinin oluşturularak yeni tasarım kararları ile enerji etkin tasarım kavramının gerçek hayata uygulanması gerekliliğini desteklemektedir.

4.1 Gelecekteki Olası Çalışma Alanları

Bu araştırmada yapı tipi özelliği olarak tek aileli bir villa yapısı üzerinde çalışılmıştır. Gelecek çalışmalarda farklı yapı tipleri üzerinden BIM – BEM süreci incelemesi ele alınabilir. Farklı yapı tipleri üzerinden bu sürecin incelenmesi kompleks yapı türlerinde bu sürecin işleyişindeki değişikliklerin gözlemlenebilmesini sağlayacaktır.

BIM yazılımı Autodesk Revit ortamına doğrudan entegre olan Autodesk Insight analiz aracı yeteneklerini test edilmiştir. BIM ortamına eklenti olarak doğrudan entegre edilmiş farklı eklenti yazılımları kullanılarak BIM – BEM süreci incelenebilir. Farklı bir yazılım üreticisinin BIM ortamında BEM araç eklentisinin dahil edilerek sürecin yürütülmesi aynı üretim ortamında farklı yazılımlarının test edilmesini sağlayacaktır.

BIM model veri aktarım formatı olarak IFC dosya transferi yoluyla enerji analiz incelemesi tek bir araç üzerinde incelenmiştir. Farklı BEM araçlarında IFC dosya transferi yoluyla BIM – BEM süreci entegrasyonu test edilebilir. Diğer BEM araçlarında IFC aktarımının incelenmesi farklı ortamlar için aynı dosya formatı üzerinden oluşabilecek entegrasyon eksikliklerinden kaynaklı ortaya çıkabilecek sonuçlardaki farklılıkların gözlemlenmesini sağlayacaktır.

BIM yazılımı olarak sektörde yaygın olarak kullanılan Autodek Revit kullanılmıştır. Gelecek çalışmalarda farklı BIM yazılım araçları kullanılarak BIM – BEM süreci için çerçeve oluşturulabilir. Farklı BIM yazılımlarının test edilmesi BEM sürecinde BIM araçlarının yetkinliklerini karşılaştıracaktır.

Kaynaklar

1. **Attia, S., Hensen, L., Beltrán, L. ve Herde, A.** (2012). "Selection Criteria for Building Performance Simulation Tools: Contrasting Architects' and Engineers' Needs." Journal of Building Performance Simulation, 1-15.
2. **Carvalho, J., Almeida, M., Bragança, L., ve Mateus, R.** (2021). BIM-Based Energy Analysis and Sustainability Assessment—Application to Portuguese Buildings. Buildings, 11(6), 246. https://doi.org/10.3390/buildings11060246
3. **Chen S., Jin R., and Alam, M.** (2018). "Investigation of Interoperability between Building Information Modelling (BIM) and Building Energy Simulation (BES)." International Review of Applied Sciences and Engineering. 9(2), 137-144. DOI: 10.1556/1848.2018.9.2.9.
4. **Gao, H., Koch, C., ve Wu, Y.** (2019). Building information modelling based building energy modelling: A review. Applied Energy, 238, 320–343. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.032
5. **Gerrish, T., Ruikar, K. ve Cook, M.** (2017). Using BIM Capabilities to İmproveexisting Building Energymodelling Practices. Engineering, Construction andArchitectural ManagementVol. 24 No. 2, 2017pp. 190-208
6. **Hong, T., Chou, S.K., Bong, T.Y.** (2000). "Building simulation: an overview of developments and information sources." Building and Environment, Volume 35, p. 347-361.
7. **Issa, M. (2018).** "Building Performance Simulation for Architects, Comparing Three Leading Simulation Tools". The University of Texas at San Antonio.
8. **Jeong, W., & Kim, K.** (2016). A Performance Evaluation of the BIM-Based Object-Oriented Physical Modeling Technique for Building Thermal Simulations: A Comparative Case Study. Sustainability, 8(7), 648. doi:10.3390/su8070648
9. **Kamel, E. ve Memari, A.** (2019). Review of BIM's Application in Energy Simulation: Tools, İssues, and Solutions.Automation in Construction. c: 97,164-180, doi: 10.1016 / j. autcon.2018.11.008.
10. **Khodeir, L. M., ve Nessim, A. A.** (2018). BIM2BEM integrated approach: Examining status of the adoption of building information modelling and building energy models in Egyptian architectural firms. Ain Shams Engineering Journal, 9(4), 1781–1790. https://doi.org/10.1016/j.asej.2017.01.004
11. **Lack, B.** (2019, 24 Nisan). How BIM is becoming the new model for energy-efficient buildings, https://blog.se.com/building management/2019/04/24/how-bim-is-becoming-the-new-model-for-energy-efficient-buildings/
12. **Laakso, M. and Kiviniemi, A.** (2012), "The IFC standard–a review of history, development, andstandardization", Journal of Information Technology in Construction, Vol. 17, pp. 134-161.
13. **Maile T., Fischer, M. ve Bazjanac, V. (**2007). Building Energy Performance Simulation Tools - a Life-Cycle and Interoperable Perspective. Stanford Unıversıty.

14. **Oleiwi, M. Q., Mohamed, M. F., Sulaiman, M. K. A. M., Che-Ani, A. I., and Raman, S. N.** (2019). Thermal environment accuracy investigation of integrated environmental solutions-virtual environment (IES-VE) software for double-story house simulation in malaysia. J. Eng. Appl. Sci. 14, 3659–3665. doi: 10.36478/jeasci.2019.3659.3665
15. **Weytjens, L., Attia, S., Verbeeck G., Herde A.D.** (2011). The "Architect-friendliness" Of Six Building Performance Simulation Tools: A comparative Study. International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development