**T.C.**

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

# AHŞAP YAPILARDA SANAL TASARIM SÜRECİNDE YAPI BİLGİ MODELLEMESİNİN UYGULANMASI

**Elif Bilge BULUT**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mimarlık Anabilim Dalı

Bilgisayar Ortamında Mimarlık Programı

Danışman

Doç. Dr. Togan TONG

Kasım, 2024

**T.C.**

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

# AHŞAP YAPILARDA SANAL TASARIM SÜRECİNDE YAPI BİLGİ MODELLEMESİNİN UYGULANMASI

Elif Bilge BULUT tarafından hazırlanan tez çalışması 22.11.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mimarlık Anabilim Dalı, Bilgisayar Ortamında Mimarlık Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Togan TONG
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

**Jüri Üyeleri**

Doç. Dr. Togan TONG, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Erkan AVLAR, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Can UZUN, Üye
Altınbaş Üniversitesi _____

Danışmanım Doç. Dr. Togan TONG sorumluluğunda tarafımca hazırlanan AHŞAP YAPILARDA SANAL TASARIM SÜRECİNDE YAPI BİLGİ MODELLEMESİNİN UYGULANMASI başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Elif Bilge BULUT

İmza



*Aileme*

# TEŞEKKÜR

Tezin hazırlanma sürecinde, her aşamada bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan, teşvik edici yaklaşımı ve değerli rehberliğiyle bu çalışmanın ortaya çıkmasını sağlayan kıymetli danışmanım Doç. Dr. Togan TONG'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tezimin gelişmesine ve zenginleşmesine katkı sağlayan, değerli görüş ve önerileriyle bana yol gösteren Prof. Dr. Erkan AVLAR ve Dr. Öğr. Üyesi Can UZUN'a teşekkür ederim.

Sürecin her anında maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, beni daima yüreklendiren sevgili aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Elif Bilge BULUT

# İÇİNDEKİLER

**KISALTMA LİSTESİ** vii
**ŞEKİL LİSTESİ** viii
**TABLO LİSTESİ** x
**ÖZET** xi
**ABSTRACT** xiii
**1 GİRİŞ** 1
1.1 Problemin Tanımı ..... 1
1.2 Çalışmanın Kapsamı ..... 2
1.3 Çalışmanın Amacı ..... 2
1.4 Çalışmanın Yöntemi ..... 3
**2 AHŞAP YAPI ÜRETİMİ** 4
2.1 Ahşap Yapıların Gelişimi, Önemi ve Uygulanması ..... 4
2.2 Üretim ve Montaj için Tasarım ..... 6
2.3 Endüstriyel Ahşap Ürünler ..... 8
2.4 Çapraz Tabakalı Ahşap ..... 11
2.4.1 Çapraz Tabakalı Ahşap Üretimi ..... 11
2.4.2 Çapraz Tabakalı Ahşap Ürünlerin Özellikleri ..... 12
2.5 Çapraz Tabakalı Ahşap Kullanılan Yapım Sistemleri ..... 19
**3 İNŞAAT SÜRECİNDE SANAL TASARIM VE YAPI BİLGİ MODELLEMESİ** 29
3.1 Sanal Tasarım ve İnşaat Süreci ..... 29
3.2 Yapı Bilgi Modellemesinin Rolü ..... 29
3.3 Ahşap Yapılarda Sanal Tasarım ve İnşaat Süreci ..... 33
3.3.1 Tasarım Kararları ve Optimizasyonu ..... 35
3.3.2 Tasarım Süreci ve Tasarım Model Koordinasyonu ..... 36
3.3.3 İnşaat Süreci ve Disiplinlerarası Model Koordinasyonu ..... 38
3.3.4 İnşa Edilebilirlik ve Analizler ..... 41
3.3.5 Üretim Süreci ve Üretim Modeli Koordinasyonu ..... 43
3.3.6 Üretim Çıktıları ..... 46

**4 AHŞAP YAPILARDA SANAL TASARIM VE YAPI BİLGİ MODELLEME UYGULAMASI** **47**

4.1 Projenin Sunumu....47

4.2 İş Akışı ve Kullanılan Programlar ....51

4.3 Parametreler ....53

4.4 Proje Çıktıları ve Tartışma....58

**5 SONUÇ** **61**

**KAYNAKÇA** **63**

**TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR** **71**

# KISALTMA LİSTESİ

| | |
|---|---|
| 1B | Bir Boyutlu |
| 2B | İki Boyutlu |
| 3B | Üç Boyutlu |
| AIA | The American Institute of Architects |
| BEP | BIM Execution Plan |
| BIM | Building Information Modeling |
| CAD | Computer-Aided Design |
| CAM | Computer-Aided Manufacturing |
| CD | Construction Development |
| CLT | Cross-Laminated Timber |
| CNC | Computer Numerical Control |
| DD | Design Development |
| DfMA | Design for Manufacturing and Assembly |
| DfMA+D | Design for Manufacturing and Assembly+Disassembly |
| DLT | Dowel-Laminated Timber |
| GLT | Glue-Laminated Timber |
| KoP | Kit of Parts |
| LOD | Level of Development |
| MEP | Mechanical Electrical Plumbing |
| NLT | Nail-Laminated Timber |
| PMU | Performance Mock-Up |
| SLTS | Solid Laminated Timber System |
| VDC | Virtual Design and Construction |
| VMU | Virtual Mock-Up |
| VR | Virtual Reality |
| YBM | Yapı Bilgi Modellemesi |

# ŞEKİL LİSTESİ


**Şekil 2.1** Eğri formlarda ahşabın kullanımı ..... 5
**Şekil 2.2** DfMA merkezli tasarım örneği ..... 7
**Şekil 2.3** DfMA ve KoP tekniği ..... 8
**Şekil 2.4** Fabrikada endüstriyel masif ahşap üretimi ..... 9
**Şekil 2.5** Endüstriyel masif ahşap ürünleri ..... 10
**Şekil 2.6** CLT yapı elemanı panelleri ..... 11
**Şekil 2.7** CLT paneller ve katmanları ..... 12
**Şekil 2.8** CLT panellerin CNC makinesi ile fabrikada kesilmesi ve hazırlanması ..... 14
**Şekil 2.9** CLT panellerin yangın testi sonrası görünümü ..... 15
**Şekil 2.10** CLT modüler bir yapıda sismik analiz ..... 15
**Şekil 2.11** CLT panellerin inşaat sırasında dış etkenlere karşı korunması ..... 17
**Şekil 2.12** CLT üretiminde kullanılan A- köknar, B- ladin ve C- Çam kerestesi ..... 18
**Şekil 2.13** CLT panellerin taşınması ..... 18
**Şekil 2.14** Çelik bağlantı elemanları ..... 20
**Şekil 2.15** CLT panellerin birbirine bağlanması ..... 20
**Şekil 2.16** Kajstaden Västerås binası inşaatı ..... 21
**Şekil 2.17** Kajstaden Västerås binası yapı detayı ..... 22
**Şekil 2.18** "Wood and Innovation Center" binası ..... 23
**Şekil 2.19** "Wood and Innovation Center" binası yapı detayı ..... 24
**Şekil 2.20** Woodie Hamburg Binası ..... 25
**Şekil 2.21** Woodie Hamburg binası modüler sistem diagramı ..... 25
**Şekil 2.22** Ascent Milwaukee aksonometrik proje diyagramları ..... 27
**Şekil 2.23** Brock Commons bina ve sistem görselleri ..... 28
**Şekil 3.1** YBM'nin proje sürecinde uygulanması ..... 31
**Şekil 3.2** Yapısal bir kolonun LOD seviyesine göre geometrik gösterimi ..... 32
**Şekil 3.3** Sanal tasarım ve inşaat sürecinde yapı bilgi modellemesinin uygulanması ve üretim ..... 33

**Şekil 3.4** DfMA merkezli tasarım modeli ve planlama.....36
**Şekil 3.5** CLT panellerin montaj simülasyonu örneği .....38
**Şekil 3.6** Brock Commons binası disiplinlerarası koordinasyon modeli MEP ve CLT panellerin koordinasyonu .....39
**Şekil 3.7** Brock Commons binası modeli.....40
**Şekil 3.8** Çakışma analizi.....40
**Şekil 3.9** Saha koordinasyonu ve zaman simülasyonu.....41
**Şekil 3.10** Brock Commons binası mock-up modeli ve inşaatı .....42
**Şekil 3.11** hsbCLT ve hsbTimber eklentileri ile üretim süreci .....44
**Şekil 3.12** Inventor ve Revit entegrasyonu ile üretim süreci .....45
**Şekil 3.13** 3D Experience platformlarının VDC sürecinde üretim ile ilişkili olarak kullanılması.....45
**Şekil 3.14** Vertex BD programı kullanılarak doğrudan üretim modeli oluşturulması.....46
**Şekil 4.1** 3x6 modül konaklama birimi plan .....47
**Şekil 4.2** Islak hacim pod çeşitlerine göre modül tipleri.....48
**Şekil 4.3** Cephe çeşitleri.....48
**Şekil 4.4** Belirlenen bileşenlere göre modül tipleri.....49
**Şekil 4.5** Tipik diyagramatik kat planı ve modül çeşitleri .....50
**Şekil 4.6** Belirlenen değişkenlere göre modül çeşitleri ve isimleri.....50
**Şekil 4.7** Modüllerin belirlenen bileşenlere göre numaralandırılma stratejisi ...51
**Şekil 4.8** REVIT'te oluşturulan kütüphanede CLT duvar ve döşeme panel türlerini kalınlık ve katman sayısına göre gösteren plan diagramı .....51
**Şekil 4.9** Ahşap modüler yapı için kurgulanan iş akışı.....52
**Şekil 4.10** Revit'te parametrelerin oluşturulması.....56
**Şekil 4.11** Inventor ortamında modüllerin fabrikasyon modelinin oluşturulması57
**Şekil 4.12** Inventor'da fabrikasyon modeli konfigürasyonlarının oluşturulması.58
**Şekil 4.13** Oluşturulan bazı fabrikasyon modül tipleri .....59
**Şekil 4.14** Oluşturulan fabrikasyon modülü ve elemanların parça seti.....60

# TABLO LİSTESİ

**Tablo 3.1** CLT panelde LOD seviyeleri ..... 34
**Tablo 4.1** Modülleri etkileyebilecek parametreler ..... 53
**Tablo 4.2** Modül parametre tablosu ..... 54
**Tablo 4.3** Pod parametre tablosu ..... 54
**Tablo 4.4** Duvar parametreleri- ölçüler ..... 55

# ÖZET

## AHŞAP YAPILARDA SANAL TASARIM SÜRECİNDE YAPI BİLGİ MODELLEMESİNİN UYGULANMASI

Elif Bilge BULUT

Mimarlık Anabilim Dalı
Bilgisayar Ortamında Mimarlık Programı
Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Togan TONG

Günümüzde karşılaşılan iklim krizi, kaynakların tükenmesi, atık üretimi gibi pek çok önemli problem inşaat sektörü ve işleyişi ile doğrudan ilişkilidir. Bu sorunlarla beraber sürdürülebilirliğin önem kazandığı dijitalleşen çağda pek çok sektörde olduğu gibi inşaat sektöründe de dönüşüm kaçınılmazdır. Bu dönüşüm, var olan problemlere karşı çözüm üreten, yeni malzemeler, teknikler, yaklaşımlar ve daha optimize bir proje süreci ile mümkün görülmektedir. Bu bağlamda hem geleneksel ve bilinen eski yapı malzemelerinden olan hem de ileri teknoloji ile iyi entegre olabilen ahşap dünyada önem kazanmaktadır. Endüstriyel tekniklerle özellikleri artırılan ve pek çok açıdan dayanıklı ve kullanışlı hale getirilen ahşap, saha dışı yapım ve optimizasyon teknikleri ile birlikte uygulanarak yüksek nitelikte projeler yapılabilmektedir. İleri endüstriyel tekniklerin kullanımı ile beraber zaman, maliyet, enerji ve iş gücü konusunda verimlilik sağlamakta; hata payı azaltılmaktadır. Malzeme olarak sürdürülebilir olmasının yanında, ahşap DfMA+D gibi tekniklerle bir araya getirilerek inşaat atıkları azaltılmakta ve yapı elemanlarının yeniden kullanımı sağlanabilmektedir. Endüstriyel ahşap yapı ürünlerinden olan CLT, pek çok farklı yapım tekniği kullanılarak inşa edilen ahşap

yapılarda yaygın olarak kullanılmakta olup, gelecek vadeden önemli bir ürün olarak görülmetedir. Kendine özgü standart ve üretim parametrelerini içeren CLT, bu yapım özelinde sorunların ve ihtiyaçların bilinmesini gerektirmektedir. Ahşap bir yapıda üretim süreci, projedeki diğer süreçler olan tasarım ve inşaat süreci ile beraber düşünülerek yürütülmelidir. Bu bağlamda dijitalleşme ve yapı bilgi modellemesi'nin bu yapım süreci özelinde uygulanması gerekli ve önemlidir. Proje sürecini sanal tasarım başlığı altında Yapı Bilgi Modellemesi'nin tasarım, inşaat ve üretim süreçlerinde nasıl uygulandığı, üretim sürecine odaklı şekilde araştırılmıştır. Bu kapsamda örnek bir proje ve iş akışı oluşturulmuş ve sonuçlar raporlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Çapraz tabakalı ahşap, yapı bilgi modellemesi, sanal tasarım ve inşaat, ön üretimli ahşap yapı, üretim ve montaj için tasarım

# ABSTRACT

## IMPLEMENTATION OF BUILDING INFORMATION MODELING IN VIRTUAL DESIGN PROCESS OF TIMBER STRUCTURES

Elif Bilge BULUT

Department of Architecture
Master of Science Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Togan TONG

In today's world, the construction sector is directly linked to several critical issues such as climate crisis, resource depletion, and waste production. Amidst these challenges, the era of digitalization emphasizes the importance of sustainability, making transformation inevitable in the construction industry as in many others. This transformation is achievable through new materials, techniques, approaches, and a more optimized project process that offers solutions to existing problems.

Timber, one of the oldest traditional building materials, is gaining importance globally due to its compatibility with advanced technology. Enhanced by industrial techniques, timber becomes more durable and functional in various aspects, allowing the creation of high-quality projects when combined with off-site construction and optimization techniques. Utilizing advanced industrial techniques improves efficiency in time, cost, energy, and labor, while reducing error margins.

Beyond being a sustainable material, timber can be integrated with techniques like DfMA+D to reduce waste. Cross-Laminated Timber (CLT), a promising and

widely used industrial timber construction technique, is gaining traction worldwide. CLT involves unique standards and production parameters, necessitating an understanding of its specific challenges and requirements. The production process must be considered alongside other project phases, such as design and construction.

In this context, the application of digitalization and Building Information Modeling (BIM) is crucial and necessary for this construction process. This thesis investigates how BIM is implemented in design, construction, and production processes under the umbrella of virtual construction. An exemplary project and workflow were developed, and the results were documented.

**Keywords:** Cross laminated timber, building information modeling, virtual design and construction, prefabricated timber structure, design for manufacturing and assembly

# 1
# GİRİŞ

## 1.1 Problemin Tanımı

Saha dışı inşaat teknikleri kullanılarak yapılan ahşap bir yapının proje süreci, geleneksel inşaat yöntemi ile yapılan bir yapının proje sürecine göre farklılık göstermektedir. Ahşap yapılarda, endüstriyel ahşap üretim sürecinin ve saha dışı yapım tekniklerinin uygulanıyor olması proje sürecini farklılaştırmakta ve proje süreci özelinde yaklaşımların geliştirilmesini gerektirmektedir. Endüstriyel ahşap ürünlerinden biri olan CLT, çeşitli yapım tekniklerine sahip ahşap yapılarda yaygın olarak kullanılmakta olup kendine özgü parametrelere sahiptir. Dünyada araştırma ve uygulama alanı gittikçe artan ve yaygınlaşan CLT'nin kullanıldığı ahşap yapıların, kendine özgü olan bu ihtiyaç ve parametrelerinin bilinmesi sürecin etkin şekilde yürütülmesi için gerekli görülmektedir. Ahşap bir yapıda; tasarım, inşaat ve üretim süreçlerini içeren proje süreci farklı iş akışları ve aktörlerin dahil olmasıyla karmaşık bir hale gelmektedir. Saha dışı inşaatın yapım sürecinde rol oynaması bu doğrultuda prensip ve uygulamaları gündeme getirmektedir. Bunun yanında CLT'nin üretim standartları ve üretim süreci, sahaya taşınması, uygulanması ve montajı gibi faaliyetlerin anlaşılması gerekmektedir. Yapının yaşam döngüsü boyunca proje sürecinin etkin bir şekilde yürütülmesini sağlayan YBM'nin de bu yapılar özelinde proje sürecinde nasıl uygulandığının araştırılması sürecin etkin bir şekilde gerçekleştirilmesi için önemli görülmektedir. YBM günümüzde geleneksel yöntemle inşa edilen yapılarda yaygın bir şekilde kullanılırken, ahşap yapılar gibi özelleşen proje süreçlerinde etkin bir şekilde uygulanabilmesi ancak bu alandaki ihtiyaçların anlaşılmasıyla mümkündür. Ayrıca özelleşmiş olan bu tasarım ve inşaat süreci için, literatürde yeterli bilgi ve araştırmanın olmaması ve ülkemizde dünyaya oranla bu yapı tipinde örneğin az bulunması sebebiyle böyle bir araştırmanın yapılması faydalı görülmüştür.

## 1.2 Çalışmanın Kapsamı

Çalışma kapsamında günümüzde modern ahşap yapılarda kullanılan yapım teknikleri ve endüstriyel ahşap ürünler incelenmiş ve CLT'nin kullanıldığı yapılar üzerine odaklanılmıştır. CLT, dünyada yaygın olarak kullanılmakta olup proje sürecinde zaman ve maliyet konusunda verimlilik sağlayan, ileri teknoloji ile kolayca entegre edilebilen ve sürdürülebilirlik konusunda oldukça avantajlı görülen önemli bir endüstriyel ahşap üründür. Bu sebeplerden ötürü proje araştırma kapsamında seçilmiştir. CLT'nin saha dışı inşaata dayalı projeler özelinde incelenmesi sebebiyle, saha dışı inşaat süreci, ilkeleri ve faydalarına değinilmiş ve bu yapı ürünü ile ilişkisi ve özellikleri araştırılmıştır. Çalışmanın kapsamı CLT'nin kullanıldığı çeşitli yapılara özgü özelliklerin, faydaların ve eksiklerin anlaşılabilmesi üzerine yoğunlaşmaktadır. Bu bağlamda yapılan araştırmalar sonrasında, sanal tasarım süreci içerisinde YBM'nin araştırılan özellik ve ihtiyaçlara dayanarak sürece nasıl entegre edileceği konusunda çalışma sürdürülmüştür. CLT'nin kullanıldığı bahsedilen niteliklerde bir yapıda YBM tabanlı bir proje koordinasyon süreci; tasarım, inşaat ve üretim süreçleri olarak ayrı ayrı ele alınmıştır. Son bölümde ise CLT yapı elemanlarını içeren modüler yapım tekniği kullanılarak bir örnek proje oluşturulmuş ve YBM'nin üretim sürecinde diğer süreçlerle ilişkili şekilde nasıl yürütüleceğine dair bir test gerçekleştirilmiştir. Projenin test süreci, üretim ile ilgili parametreleri ön planda tutacak bir kapsamda kurgulanmıştır. Bu kapsam bütün proje koordinasyon sürecini içine almamakla beraber tasarım ve inşaat ile ilgili aşamalara da değinilmektedir.

## 1.3 Çalışmanın Amacı

Yapılan çalışmada, CLT'nin üretimi ve özelliklerinin anlaşılması, sanal tasarım başlığı altında CLT'nin farklı ahşap yapım teknikleri ile çeşitli projelerde kullanılması ve projelerin tasarım aşamasından üretim ve inşaat aşamasına kadar olan yaşam döngüsünün incelenmesi amaçlanmış ve bu süreçte YBM'nin farklı seviyelerinin proje sürecine nasıl uygulandığı araştırılmıştır. Mevcutta bulunan bazı YBM platformlarının hangi aşamalarda ve hangi amaçlarla kullanıldığı da çeşitli örneklerle sunulmuştur. Endüstriyel ahşabın inşaat sektöründe kullanımının artmasıyla birlikte DfMA kavramının ve fabrikasyonun bu bağlamda YBM sürecine nasıl dahil edildiğinin incelenmesi de araştırma amacı dahilindedir.

Oluşturulan örnek projede, araştırma doğrultusunda oluşturulan iş akışı ile sürecin test edilmesi ve bulguların değerlendirilmesi sağlanmıştır. CLT'nin kullanıldığı ahşap yapılar için bu yapı tipi özelindeki girdi, çıktı ve parametrelerin anlaşılması projelendirme ve inşaat sürecinin sunulması üzerine çalışılmıştır. Bu süreçte, geleneksel yöntemlerden farklı olarak hangi ihtiyaçların ortaya çıktığı ve bu ihtiyaçların ne kadar karşılanabildiği belirlenerek, bu alanda çalışan mimar, mühendis, üretici ve araştırmacılar için faydalı bir kaynak oluşturulması hedeflenmektedir.

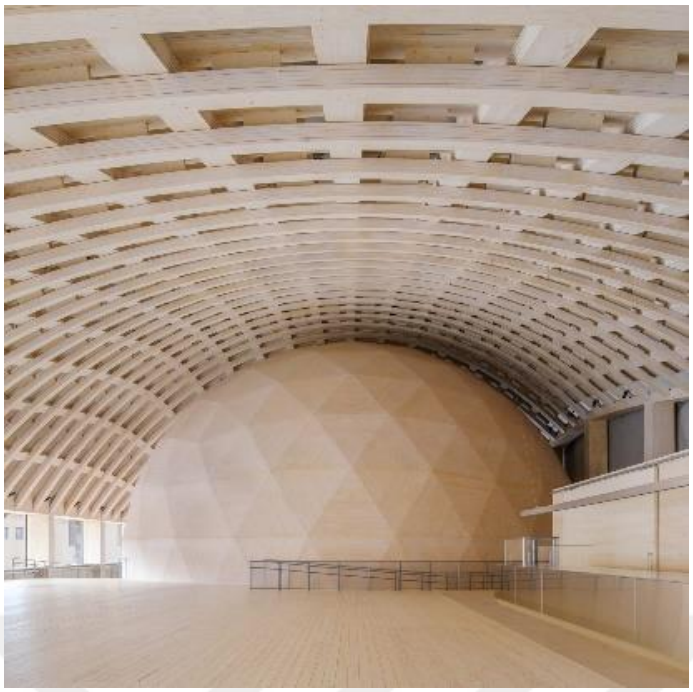
## 1.4 Çalışmanın Yöntemi

Araştırmanın bahsedilen kapsam ve amacı doğrultusunda, dünyada ve ülkemizde yapılan çalışmaların araştırılması, benzer çalışmaların tespit edilmesi, tanımlanan problemlerin ve ileriye yönelik belirtilen konuların anlaşılabilmesi için önemli görülmüştür. Literatür araştırması yapılırken anahtar kelimeler olarak "yapı bilgi modellemesi", "saha dışı inşaat ve yapı bilgi modellemesi", "sanal tasarım ve inşaat", "ahşap yapım teknikleri", "çapraz tabakalı ahşap", "endüstriyel ahşap ürünler", "ahşap yapılarda yapı bilgi modellemesi" kullanılmıştır. Tez kapsamının çapraz tabakalı ahşap yapılar üzerinden olması nedeniyle dünyada mevcutta bulunan CLT'nin kullanıldığı farklı yapım sistemlerinden örnek yapılar ve projelendirme süreçleri incelenmiştir. Sanal tasarım başlığı altında YBM'nin uygulanabilirliği araştırılmıştır. Yapıların araştırılmasının yanı sıra mevcutta kullanılmakta olan dijital YBM platformları, bu platformların girdi ve çıktıları, iş akışları da incelenmiştir. Örnek proje kapsamında oluşturulan CLT'nin kullanıldığı modüler ahşap bir yapının tasarımdan üretime kadar olan süreci test edilmiş ve raporlanmıştır. Çalışma yöntemi yapılan araştırmalar ve sonucunda oluşturulan örnek projenin testi üzerinden uygulamaya dayanmaktadır.

# 2
# AHŞAP YAPI ÜRETİMİ

## 2.1 Ahşap Yapıların Gelişimi, Önemi ve Uygulanması

Ahşap, geçmişten günümüze uzun zamandır kullanılmakta olan sürdürülebilir yapı malzemelerinden biridir. Teknolojinin gelişimi ile beraber ahşabın yeni yapım teknikleri ile kullanımı yaygınlaşmakta ve kullanım alanı genişlemektedir. Günümüzde ABD, Avustralya, Japonya, Almanya, İsviçre, İsveç, Norveç, Finlandiya, Yeni Zelanda, İtalya, Fransa ve Kanada'da sürdürülebilir orman politikaları ile endüstriyel ahşap sistemler kullanılmakta ve geliştirilmektedir (Lehmann & Kremer, 2023). Ayrıca ABD, Almanya, Kanada ve Avustralya'da bu konuda araştırma enstitüleri kurulmuştur (Lehmann & Kremer, 2023). Bununla beraber ahşap, son dönemde inşaat sektöründeki mimar, mühendis, üretici ve uygulayıcı gibi pek çok aktörün ilgisini çekmekte ve 21. yy.'ın önemli yapı malzemelerinden biri olarak görülmektedir (Brandner vd., 2016). Eski ve bilindik bir malzeme olmasının yanı sıra ahşabın pek çok avantajının bulunması bu yapı malzemesine olan talep ve ilginin dünya çapında gün geçtikçe artmasına sebep olmaktadır. Bunlardan en dikkat çekeni, günümüzdeki önemli sorunlarından olan çevre kirliliği, atık üretimi, kaynakların tükenmesi ve iklim krizine karşı sağladığı avantajlardır. Yapılan bazı araştırmalara göre inşa etme sürecinin; enerji tüketiminin %32sinden, karbon salınımının %30'undan sorumlu ve atık üretiminin ise %30-40'ından sorumlu olduğu ifade edilmiştir (Lang vd., 2019). Ahşap, alternatifi olan beton ve çeliğe göre daha hafif, düşük karbon salınımına yol açan, daha dayanıklı bir malzeme olarak görülmektedir (Richmond, 2020). Doğal ve sürdürülebilir bir yapı malzemesi olmasının yanı sıra, üretim ve inşaatı sırasında çok daha az enerji harcandığı ve inşaat atıklarının daha az meydana geldiği bilinmektedir (Richmond, 2020). Hesaplamalı tasarım, CAD, CAM teknolojileri ile uyumlu çalışabilen ahşap, karmaşık formlarda çeşitli yapılar yapılmasına da olanak sağlamaktadır (Hairstans vd., 2018). (Şekil 2.1)



**Şekil 2.1** Eğri formlarda ahşabın kullanımı (Peacock, 2024)

Aynı zamanda diğer yapı malzemeleri ile hibrit bir şekilde kolayca kullanılabilen ahşap, tasarımda ve inşaat süreçlerinde esneklik sağlamakta ve dış etkenlere karşı güçlü hale gelmektedir (Lehmann & Kremer, 2023). Teknolojinin entegrasyonu ve gelişmiş endüstriyel teknikler sayesinde pek çok farklı işlevde yapı, ahşap kullanılarak inşa edilebilmektedir.

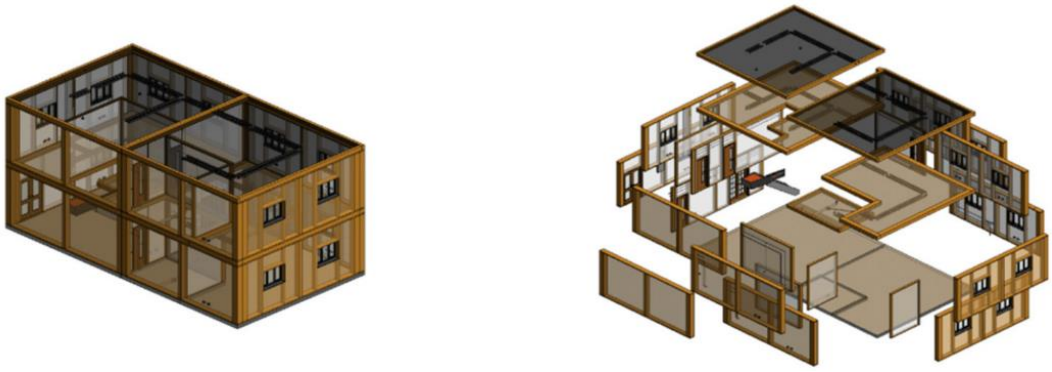
Sanayi devrimi ve endüstrileşme ile beraber geleneksel yöntemle inşaat sahasında yapıma dayanan faaliyet, fabrikalarda ön üretimin yapılması ve saha dışı inşaat kavramının ortaya çıkmasını sağlamıştır. Yapılan araştırmalara göre, saha dışı inşaat, geleneksel inşaata göre hız, zaman, maaliyet, iş gücü ve sürdürülebilirlik gibi konularda çok daha avantajlıdır (Arashpour vd., 2016; Ferdous vd., 2019). Bunun en önemli sepeplerinden biri geleneksel inşaat tekniğinin insan faaliyetine dayanıyor olmasının getirdiği verimsizliktir (Liew, 2018). Saha dışı inşaat bu bağlamda çözüm üreten ve gelecek vadeden önemli konulardan biri olarak görülmektedir (Generalova vd., 2016). Gün geçtikçe yaygınlaşan ve önem kazanan saha dışı inşaatın sağladığı çeşitli olanaklar sayesinde ön üretimli ahşap, yapılarda çeşitli şekillerde kullanılmaktadır. Ön üretimli ahşap elemanlar; kapı, pencere gibi elemanlar olabileceği gibi duvar, döşeme gibi endüstriyel ahşap paneller ya da kolon, kiriş gibi taşıyıcı elemanlar olabilmektedir. Ahşap yapılar için saha dışı inşaat, endüstriyel ahşap ürünlerin fabrikada üretilip işlenerek sahaya getirilip

montaj işleminin yapılması ile gerçekleştirilir. Bunun yanı sıra ön üretimli elemanlar fabrikada volümetrik birimler oluşturacak şekilde hazırlanıp sahaya hazır modüller şeklinde getirilebilir. Bu teknikte modüller farklı sistemler kullanılarak sahada birleştirilir. Bu elemanlar çelik ve beton ile hibrit bir şekilde çeşitli yapım sistemlerinde kullanılabilir. İnşaat faaliyeti, sahada ve saha dışı üretimin farklı oranlarda beraber gerçekleştirilmesi ile yapılabilmektedir. Ön yapım ile üretilen ahşap elemanlar kullanılan endüstriyel teknikler ve optimizasyon sayesinde uygulama kolaylığı ve verimlilik sağlamakta, uygulamada insan hatası azaltılmaktadır. Bu tekniklerin gelişmesi, çok katlı ve geniş açıklıklı ahşap yapıların yaygınlaşmasına olanak sağlamıştır. Endüstriyel ahşap yapı elemanları bu sayede, kolay, hızlı ve daha az inşaat atığı üretilerek yapım faaliyeti gerçekleştirilir. Bu teknikler Amerika, Japonya, Avustralya, Çin, Almanya, Hollanda gibi pek çok ülkede uzun zamandır kullanılmaktadır (Lang vd., 2019).

Saha dışı inşaatın benimsediği endüstriyel birtakım prensipler söz konusudur. Bunlar üretim ve montaj kolaylığı sağlama, hız ve zamanda verimlilik sağlama, maliyeti düşürme üzerine benimsenen prensip ve tekniklerdir. Üretim ve montaj için tasarım anlamına gelen DfMA bu bağlamda uygulanmakta olan önemli bir tekniktir (Arashpour vd., 2016).

## 2.2 Üretim ve Montaj için Tasarım

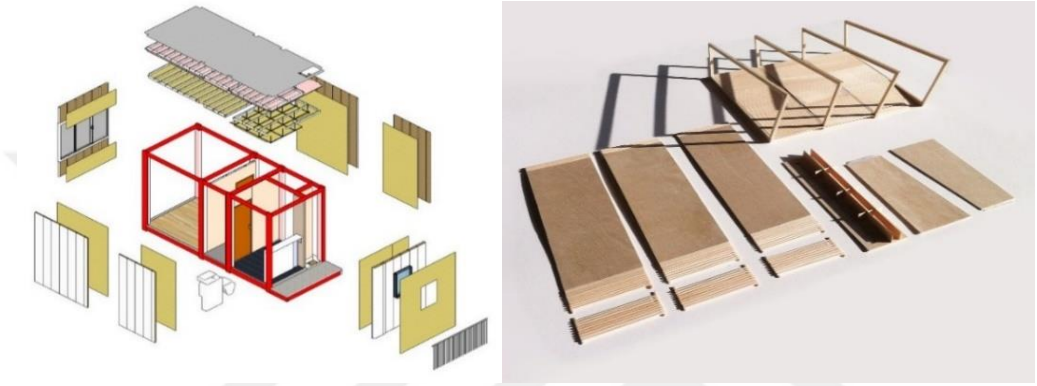
DfMA kavramı, temel amacı üretim ve uygulamada kolaylık ve verimlilik sağlamak olan endüstriyel bir prensiptir. Üretim için tasarım anlamına gelen DfM ve montaj için tasarım anlamına gelen DfA'nın birleşimi ile ortaya çıkmış bir kavramdır. Buna parçalarına ayırma anlamına gelen "disassembly" faaliyeti de eklendiğinde DfMA+D olarak da ifade edilmektedir (Hairstans vd., 2018). Bu teknik, maliyeti düşüren, parça tekrarı ve ortak kaynak kullanımını artıran, süreci hızlandıran birtakım prensipleri barındıran endüstriyel bir uygulamadır (Hairstans vd., 2018). Uygulanan bu prensipler sayesinde süreç ve parça optimizasyonu yapılabilmekte ve zamandan tasarruf sağlanmaktadır. DfMA+D ile, inşaat atıkları azaltılmakta ve yapının kullanımı bittiğinde yapı parçaları sökülerek geri dönüşümü sağlanmaktadır. Yeniden başka bir yerde montajı yapılarak farklı işlevlerde kullanılabilmesi de mümkün hale gelmektedir (Dangel, 2019). (Şekil 2.2)



**Şekil 2.2** DfMA merkezli tasarım örneği (Abrishami & Martín-Durán, 2021)

Yapılan bir çalışmaya göre bu prensiplerden ortak kaynak kullanımı ve parça tekrarına dayalı maliyeti düşürdüğü ve süreci hızlandırdığından bahsedilmektedir (Arashpour vd., 2016). DfMA ile endüstriyel tekniklerle üretilen ahşap yapı elemanları 1B, 2B ve 3B olarak ifade edilen farklı saha dışı üretim teknikleri ile üretilip sahaya getirilerek inşaat gerçekleştirilmektedir (Generalova vd., 2016). 1B inşaat için, yapı elemanlarının parçalarının tek tek fabrikada üretilmesi, 2B inşaat için döşeme, duvar gibi ahşap panellerin fabrikada üretilip sahada montajının gerçekleştirilmesi ile, 3B inşaat tekniğinde ise ahşap ve/veya ahşap hibrit yapı elemanlarının fabrikada üretilip montajının yapılması ile gerekli mekanik ekipmanların ve iç bitişlerin tamamlanmış volümetrik birimler oluşturulmakta ve bu birimler sahada birleştirilmektedir. DfMA ile ön yapımlı üretilen ahşap elemanlar, bir yapıda ne kadar çok tekrara dayalı kullanılırsa üretim hızı ve maliyet konusunda o kadar verimlilik sağlamaktadır. Aynı zamanda elemanlarda ortak kaynak ve parça kullanımının artırılması da verimlilik sağlamaktadır. Tasarımın ve montajın basitleştirilmesi de kurulumda kolaylık sağlamakta ve uygulamayı hızlandırmaktadır. Montaj elemanlarının modellenmesi ve montajın kolay bir şekilde kurgulanması, simüle edilmesi de inşaat gerçekleştirilmeden önce çıkabilecek sorunları görmede ve önlemede avantaj sağlamaktadır. Elemanların fabrikada üretilmesi ve birleştirilmesinin getirdiği avantaj sayesinde pek çok farklı test yapılabilmekte ve sahada yapıma göre çok daha güvenilir ve net sonuçlar elde edilebilmektedir. Ön üretimli elemanların her biri istenilen kriterleri sağlaması için test edilebilirken bilgisayar ortamında modellenen ve montajı simüle edilen yapılar DfMA'in getirdiği prensiplere uygunluğunun ne oranda olduğu da test edilebilmektedir. Bu analizler, yapısal dayanım analizleri, parçaların boyutları, hangi malzemenin ne oranda kullanıldığı, parçaların tekrarı, maliyet analizleri,

montajın kolaylığı ve ne kadar zamanda inşa edilebileceği gibi faaliyetler olabilmektedir (Yuan vd., 2018). Mühendis ve mimarların kullandığı çeşitli yazılımlar, detaylı fabrikasyon modellerinin oluşturulması, bilgisayar destekli fiziksel prototiplerin ve birebir ölçekte maketlerin (mock-up) yapılması ile bu tür testler gerçekleştirilmektedir. DfMA ile beraber parça seti (KoP) diye bahsedilen başka bir yöntem ile yapıyı oluşturan optimize edilmiş bu elemanların set halinde montaj için hazırlanması sağlanmaktadır. (Şekil 2.3) Bu sayede montaj kurgusu ve süreç daha hızlı ve anlaşılır bir biçimde ilerlemektedir.



**Şekil 2.3** DfMA ve KoP tekniği (TK Modular, t.y.; Arcilla, 2015)

Ön üretimli ahşap yapı elemanlarının bu prensiplere uygun bir şekilde üretimi ve yapıda kullanımı bahsedilen bağlamda sağladığı pek çok avantaj ile önemli görülmektedir. Bu prensiplerin bilinmesi yapım yöntemini doğrudan etkilediği için tasarımın ilk aşamalarından itibaren uygulanması önemli görülmektedir.

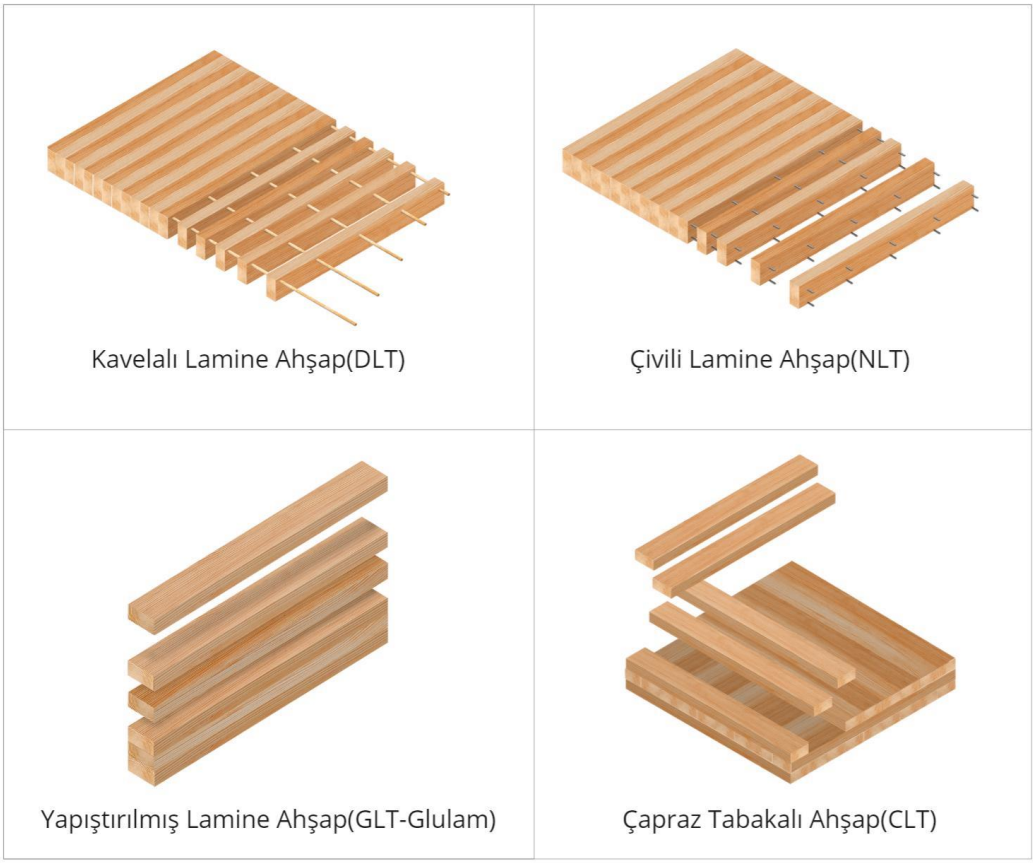
## 2.3 Endüstriyel Ahşap Ürünler

Endüstriyel işleme sahip, ileri teknoloji kullanılarak çeşitli özellikler kazandırılan büyük dolu ahşap panel sistemleri masif ahşap olarak bilinmektedir (Hairstans vd., 2020). Masif ahşap, Solid Laminate Timber (SLST) sistemlerinin bir türü olarak tanımlanmakta ve masif ahşap ürünlerinin çeşitli tekniklerle işlenmesi, laminasyon, kimyasal ve mekanik işlemlere tabi tutulması gibi adımlarla yapısal ahşap ürünler ortaya çıkmıştır (Hairstans vd., 2018). (Şekil 2.4) Bu sayede, ahşap yapısal paneller ve yapı elemanları taşıyıcı özellik kazanabilmekte, dış etkenler ve iklimsel faktörlere karşı dayanımı artmakta, geniş açıklık geçilebilmekte, yangın, rüzgar ve deprem gibi faktörlere dayanıklı hale gelmektedir.



**Şekil 2.4** Fabrikada endüstriyel masif ahşap üretimi (Vietnamwood, 2024; Naturallywood, t.y.)

Endüstriyel yapısal ahşap için ortaya çıkan çapraz tabakalı ahşap (CLT), kavelalı lamine ahşap (DLT), çivili lamine ahşap (NLT), Yapıştırılmış lamine ahşap (GLT-Glulam) bunlardan bazılarıdır. (Şekil 2.5) Yapıştırılmış lamine ahşap büyük boyutta panellerin laminasyon işlemi uygulanarak oluşturulur ve dayanıklılığının yapılan testler sonucunda çelikten daha iyi olduğu ifade edilmektedir (Richmond, 2020). Bu yüzden kirişler ve taşıyıcı yapı elemanları glulam kullanılarak yapılabilmektedir (Hairstans vd., 2018). Çivili lamine ahşap, ahşap kereste katmanlarının çivilerle birbirine tutturulması ile oluşturulan bir ürün olup, oluşturulmasının basit olduğu fakat çiviler kullanıldığı için CNC makinelerinin üretimde kullanılamadığı ifade edilmektedir (Şentürk, 2019). Kavelalı lamine ahşap, çivi yerine dübel kullanılarak benzer teknikle yapılmaktadır. Bu yüzden yine CNC makineleri ile çalışmak için doğrudan uygun değildir. Bunun aksine çapraz tabakalı ahşap zıt yönlü ahşap tabakaların birbirine birleştirilmesi ile oluşturulur. Farklı yönde koyulan tabakalar dayanımı artırır. Çivi ya da dübel kullanılmadığı için fabrikada doğrudan işlenebilir. CNC makineleri ile çalışması çok daha kolaydır (Şentürk, 2019).




**Şekil 2.5** Endüstriyel masif ahşap ürünleri (Thinkwood, t.y.)

Endüstriyel ahşap yapı ürünleri saha dışı üretime dayalı çeşitli yapım teknikleri ile kullanılabilmektedir. İleri fabrikasyon metotlarının gelişimiyle beraber endüstriyel ahşap, bu tekniklere kolayca entegre olup daha güçlü, dayanıklı ve işlevsel bir kullanıma dönüşmektedir. Bu tekniklerin uygulanmasında endüstriyel ahşap ürünler ön üretimli olarak fabrikalarda hazırlanır. Bu; hız, zaman, maliyet, sürdürülebilirlik ve esneklik gibi konularda önemli ölçüde verimlilik sağlayan bir teknik olarak görülmektedir (Richmond, 2020).

Araştırılan kaynaklar üzerinden ifade edildiği üzere, depreme dayanıklılık ve sağladığı diğer pek çok avantaj sayesinde endüstriyel ahşabın kullanıldığı çok katlı yapılara olan talep ve ilgi günümüzde gün geçtikçe artmaktadır. Günümüzde yaygın kullanılmakta olan endüstriyel ahşap yapı ürünlerinden biri de CLT'dir (Hairstans vd., 2018).

## 2.4 Çapraz Tabakalı Ahşap

### 2.4.1 Çapraz Tabakalı Ahşap Üretimi

Çapraz tabakalı ahşap, son zamanlarda dünyada özellikle çok katlı ahşap yapılar için gündemde olan, kullanımı gittikçe yaygınlaşan, endüstriyel masif ahşap ürünlerinden biridir (Brandner vd., 2016). CLT'nin ilk üretimi 1980'li yıllarda, Avusturya'da Ecole Poly-technique Fédérale de Lausanne'da Alman bir mühendis ve akademisyen olan Julius Naterrer tarafından yapılmıştır (Hairstans vd., 2018). 2000'li yıllarda yeşil bina konseptinin yaygınlaşması ile beraber CLT ve diğer endüstriyel ahşap tekniklerine olan ilginin arttığı ifade edilmektedir (Brandner vd., 2016). CLT çok katmanlı ahşap panellerin, birbirleri ile dayanımı, sağlamlığı ve fonksiyonelliğini artıracak şekilde işlem görerek birleştirilmesi ile geliştirilmiş olup, bilimsel ve teknik metodun birlikte çalışılması sonucu ortaya çıkmıştır (Hairstans vd., 2018). CLT günümüzde; yüksek katlı, endüstriyel, ticari, kamu yapıları ve konut yapılarında ve hatta köprülerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Brandner vd., 2016). CLT paneller duvar, döşeme, tavan, cephe panelleri olarak üretilebilmektedir. (Şekil 2.6)



**Şekil 2.6** CLT yapı elemanı panelleri (Ex Materials, t.y.; Katus, t.y.; Lever Architecture, t.y.)

Bu panellerin boyutları uzunluğu 18 metre, genişliği 5 metre ve kalınlığı yaklaşık 5 cm'e kadar üretilebilmektedir (Harte, 2017). CLT paneller için Eurocode 5 Avrupa Standartları kullanılmaktadır. Avrupa standartlarına göre panel katman kalınlıkları 20, 30, 40 mm standart kalınlıklarda üretilmektedir (Harte, 2017). CLT paneller, birbirine zıt yönde yerleştirilmiş panel katmanlarının fabrikada işlem görerek birleştirilmesi ile elde edilmektedir. Bu panel katmanları dayanım ve

stabilitesi daha yüksek olması açısından 3,5,7 katman şeklinde tek sayı olacak şekilde üretilmektedir (Brandner vd., 2016; Richmond, 2020). (Şekil 2.7)



**Şekil 2.7** CLT paneller ve katmanları (Yapı Dergisi, t.y.; Özen Makine, t.y.)

Prefabrikasyon ile entegrasyonu yüksek olan CLT panelleri üzerinde kapı, pencere ve tesisat için gerekli boşluklar CNC makineleri kullanılarak fabrikada açılmaktadır (Hairstans vd., 2018). Panel genişliği, panel kalınlığının minimum 4 katı olacak şekilde kullanılması tavsiye edilmektedir (Harte, 2017). Paneller stabilitesi ve yük taşıma kapasitesine göre taşıyıcı özellikte olabilmektedir. Bu durumda yapıda bir kolon kiriş sistemine ihtiyaç yoktur ve bu taşıyıcı maliyeti açısından verimlilik sağlayabilmektedir. CLT paneller, diğer endüstriyel masif ahşap sistemleri ile beraber de kullanılabilmektedir. CLT panellerin kompozit olarak diğer malzemeler ile de kullanımı oldukça yaygın ve tercih edilen bir kullanım şeklidir (Gasparri & Aitchison, 2019). Cephe panelleri için, iklimsel koşullar, su, nem ve rüzgar faktörleri önemli olduğu için aluminyum ve çeliğin çerçeve sistemi olarak CLT panelle kompozit kullanımı söz konusu olabilmektedir. Bu sistemin giydirme cam-aluminyum cephe ile benzerliği olduğu için uygulama ve montaj kolaylığı söz konusudur (Gasparri & Aitchison, 2019). Kompozit kullanımın tercih amacı diğer yapı malzemelerinin güçlü özellikleri ile beraber uygulanabildiği için, daha verimli ve fonksiyonel bir panel elde edilebilmesidir (Gasparri & Aitchison, 2019).

### 2.4.2 Çapraz Tabakalı Ahşap Ürünlerin Özellikleri

Çapraz tabakalı ahşabın kullanıldığı yapılarda sağladığı avantajlardan en önemlisi sürdürülebilirlik ve üretim sürecinde sağladığı enerji verimliliğidir (Richmond, 2020; Harte, 2017). Alternatifi olan beton ve çeliğe kıyasla CO2 emisyonu açısından çok daha avantajlı ve çevre dostu bir konumdadır (Richmond, 2020).

Yapılan bir araştırmada, karşılaştırma yapıldığında, 1-ton tuğla üretimi için gereken enerji tüketimi, 1-ton çam kerestesi üretimi için gerekenin dört katı, 1-ton beton üretimi için ise beş katı, çelik veya alüminyum yapı üretimi için sırasıyla 24 kat ve 126 kat daha yüksek olduğu ifade edilmiştir (Brandner vd., 2016). Endüstriyel ahşap; yapı malzemesi olarak doğal ve sürdürülebilir olmanın yanı sıra inşaat sürecinde üretim ve montaj için tasarım (DfMA+D) teknikleri kullanılması açısından da sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır. Çünkü bu teknikle beraber atıklar azaltılmakta ve yeniden kullanım, kurulum sağlanabilmektedir (Lehmann & Kremer, 2023).

CLT'nin diğer bir avantajı ise fabrikada ön üretimli olarak duvar, döşeme gibi yapı elemanlarının üretiminin sağlanmasıdır. Bu panellerin yapıda kullanımı tasarım aşamasında esneklik ve fonksiyonellik açısından pek çok avantaj sağlamaktadır. Panellerin büyük boyutlarda taşıyıcı özellikte üretilebilmesi, yapının strüktürel açıdan verimliliğini sağlamakta, geniş açıklık geçilebilmektedir (Brandner vd., 2016). Böylece tasarımlarda daha özgür ve taşıyıcıdan bağımsız bir esneklikte hareket imkanına sahip mekanlar oluşturulmaktadır. Taşıyıcı açısından sağladığı verimlilik, maliyet ve zamana da olumlu olarak yansımaktadır. Bir diğer yöntemde ise, volümetrik modüler yapım sistemi ile tasarlanan bir yapıda CLT paneller bu modüllerin oluşturulmasında kullanılmakta tüm bitişleri ile beraber mekanik ekipmanları da takılarak sahaya getirilmektedir. Volümetrik modüler bir yapı, tekrar eden bileşen sayısı fazla olduğunda tercih edilmekte ve tekrara dayalı maliyetin düşürülmesinde etkili olmaktadır. Panellerin üretilip sahada takılmasına kıyasla esneklik açısından daha az avantajlı görülmektedir. Projede istenilen amaç doğrultusunda farklı tekniklerin bir arada kullanılması mümkündür. Örneğin kullanılan kompozit CLT cephe panelleri, sahada montaj imkanının daha kolay olduğu için tercih edilmektedir. Aynı zamanda bu paneller, alüminyum ve çelik malzemeler ile hibrit bir şekilde üretilebilmektedir (Gasparri & Aitchison, 2019). DfMA teknikleri ve parça seti (kit of parts) yöntemlerinin kullanılıyor olması, tasarım sürecinde optimizasyonun yanı sıra sürecin kendisini ve geleneksel işleyişini değiştirdiği söylenebilir (Lehmann & Kremer, 2023). Parçadan bütüne giden ya da modüler parçaların belli kurallara göre bir araya geleceği tekniğin bilinmesi, tasarımın da bu parametrelerce şekillenmesine olanak sağlamaktadır. Bu parçaların boyutları, bağlantı elemanları ve bağlantı için kullanılan teknikler; hem

üreticiden gelen parametreler, hem taşımaya dair kısıtlar, hem de tasarımsal kararları doğrudan ilgilendirmektedir (Lehmann & Kremer, 2023). Endüstriyel ahşap yapım teknikleri ve CLT yapısı gereği CNC makinelerinin kullanılması, çeşitli şekillerde optimizasyon sağlamak için testlerin yapılması gibi faaliyetler gerektirdiği için, CAD ve CAM teknolojileri ve YBM ile doğrudan ilişkilidir. (Şekil 2.8)



**Şekil 2.8** CLT panellerin CNC makinesi ile fabrikada kesilmesi ve hazırlanması (Dovetail, 2017)

Saha dışı inşaatın getirdiği pek çok avantaj sayesinde teknoloji ve bilgisayar ile entegre bir süreç yönetimine yatkın olduğu ifade edilmektedir (Hairstans vd., 2018). Yapım tekniği, parçalar, bağlantı elemanları, montaj işlemi, bilgisayar ortamında modellenebilmekte ve simüle edilebilmektedir. Prefabrikasyon ve fabrikasyon süreci, bilgisayar teknolojileri sayesinde doğrudan kolay ve hızlı bir şekilde üretim yapılmasını sağlamaktadır. Bu da insan faktörünün etkisini azaltmakta, insan hatalarını en aza indirmektedir. Bu sayede geleneksel ilerleyen yapma biçimine göre çok daha hızlı ve etkili bir inşaat süreci gerçekleşmektedir.

CLT'nin çeşitli yapılarda kullanılması üzerine testler ve araştırmalar yapılmaktadır. Bu konular üzerine en belirgin olanlarından biri ise yangın dayanımı üzerine yapılan testler ve araştırmalardır. Yapılan bu test ve araştırmalara göre, CLT'nin gördüğü endüstriyel işlem ile beraber, yangın dayanımı kayda değer ölçüde artırılmakta bu da CLT'yi avantajlı ve verimli bir ürün haline getirmektedir. CLT yapılan analizler ve hesaplamalar doğrultusunda belli bir kalınlıkta kullanıldığında herhangi bir yanma durumunda kendi kendini sönümler özellikte dış katmanı yanar ve iç katmanı taşıyıcı özelliğini korur. (Şekil 2.9) Endüstriyel işlem gören ileri

teknoloji ile özellikleri artırılmış masif ahşap ürünler ve CLT yangın testleri ve dayanımı konusunda oldukça başarılı bulunmaktadır.



**Şekil 2.9** CLT panellerin yangın testi sonrası görünümü (Harte, 2017; Naturallywood, t.y.)

CLT'nin avantajlı görüldüğü ve üzerine pek çok çalışmanın yapıldığı diğer bir konu ise sismik dayanıklılıktır. Bu konuda yapılan pek çok test ve araştırmanın gösterdiği üzere sismik dayanıklılığının yüksek olması ve hafif bir malzeme olması sebebiyle deprem bölgelerinde ve yüksek yapılarda kullanımının uygun olduğuna dair çalışmalar mevcuttur. (Şekil 2.10)



**Şekil 2.10** CLT modüler bir yapıda sismik analiz (Lindt, t.y.)

CLT panellerden oluşan çeşitli yapı elemanları alternatifi olan çelik ve betonarmeye göre çok daha hafiftir. Hafif olmasının lojistik ve kurulum için avantajları olmasına karşın, rüzgar yükü gibi yanal yüklere karşı dezavantajlı hale gelmektedir. Bu

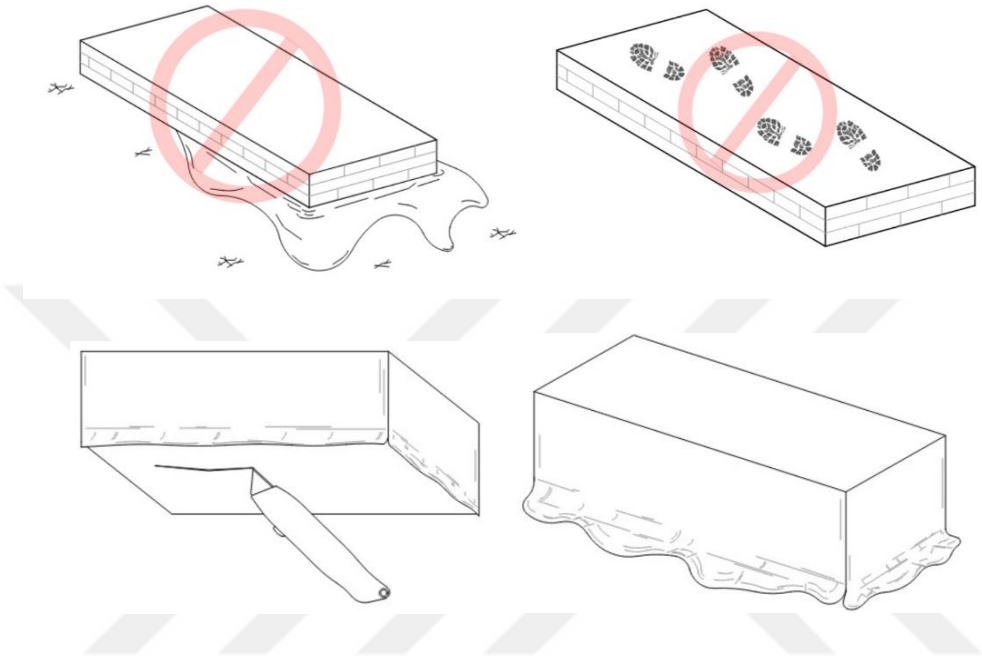
konuda yapının dayanıklılığının artırılabilmesi için hibrit ve kompozit uygulamalar yapılabilmektedir. Örneğin çelik gergi sistemleri, bağlantı elemanları ya da betonarme çekirdek uygulaması gibi uygulamalar ile rüzgar yüklerine karşı önlem alınabilmektedir (Harte, 2017).

Yapılan araştırmalara göre CLT'ye dair net bir standardın henüz olmaması, yapı ve proje süreci özelinde bu parametrelerin ve standartların üreticiden üreticiye değişmesi karşılaşılan zorluklardan biri olarak görülmektedir (Brandner vd., 2016; Richmond, 2020). Standartların üreticiden üreticiye değişiyor olması, her proje özelinde aktörlerin üretici ve standartlarını öğrenmeleri ve uygulamaları için ayrıca bir zaman gerektirmektedir. Bu da süreç, zaman ve maliyet verimliliği açısından negatif bir etkiye sahip olmaktadır. Üretici, tasarımcı ve uygulayıcı arasındaki koordinasyonun doğru kurulabilmesi inşaat verimliliğini doğrudan etkileyen en önemli faktörlerden biridir (Lehmann & Kremer, 2023). Yapılan bir araştırmada görüleceği üzere, çeşitli ülkelerden üreticilerin CLT panel üretim standartları panellerin maksimum genişliği, uzunluğu, kalınlığı ve ham madde değişmektedir (Brandner vd., 2016).

CLT'nin kullanıldığı yapılarda yönetmelik ve uygulamalar hala geliştirilmekte olup çeşitli eksiklikler bulunduğu belirtilmektedir. Dünyada artan talep ve uygulamalar ile beraber bu alanda da çeşitli çalışmalar yapılmaktadır.

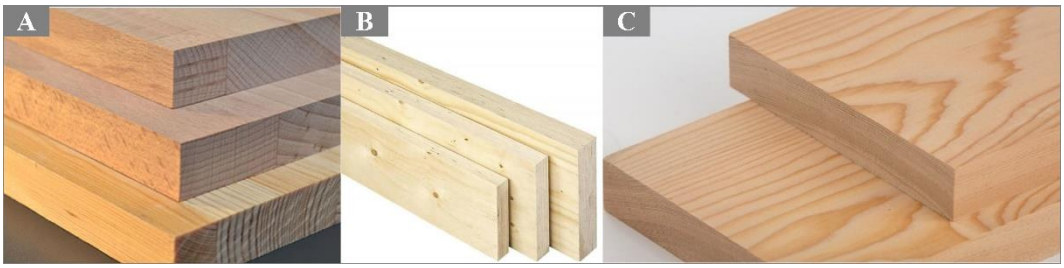
CLT panellerin ve masif ahşap sistemlerin kullanıldığı yapılar için, iklimsel koşullar ve dayanıklılık ayrıca önemli bir konu olarak görülmektedir. CLT'nin kullanıldığı volümetrik modüler üretilen bir yapıda iç ve dış elemanların tamamen bitmiş şekilde sahaya getirilmesi ile modüllerin kaplama ve detaylarının iklim koşullarına maruz kalması ve zarar görmesi olasıdır. Özellikle nem ve suya karşı ahşap yapıların yalıtım ve tesisatının projenin erken dönemlerinden itibaren düşünülmesi gerekmektedir. Bu da geleneksel yöntem ve malzemeden ayrı olarak elektrik, tesisat ve mekanik koordinasyonun (MEP) projenin erken döneminden itibaren eş zamanlı olarak yürütülmesi gerektiğini göstermektedir. Endüstriyel ahşap teknikleri ve CLT özelinde dayanıma dair testler ve araştırmalar hala sürmektedir. CLT yapı elemanı panelleri fabrikada üretilip sahaya getirildiğinde, montaj işleminin sahada gerçekleştirilmesi esnasında iklim koşullarına karşı gerekli önlemin alınması gerekmektedir. Ayrıca nitelikli işçilik yapı panellerine zarar vermemek açısından önemli görülen bir diğer konudur. CLT paneller, iklim

koşullarından diğer malzemelere göre daha fazla etkilenmektedir. Sıcaklık, nem ve kötü hava koşulları, panellerin nerede nasıl konumlandırılacağı, montaj işlemi yapılırken malzemenin zarar görmemesi dikkate alınması gereken konulardandır. (Şekil 2.11)



**Şekil 2.11** CLT panellerin inşaat sırasında dış etkenlere karşı korunması (SmartLam, 2020)

Kaynakların sürdürülebilirliği ve bu konuda üretilen politikalar endüstriyel ahşap ürünler ve CLT nin üretim ve kullanımında önemli görülmektedir (Lehmann & Kremer, 2023). ABD, Almanya, Avustralya, Kanada, Japonya gibi ülkeler sürdürülebilir orman politikaları ile öne çıkan bazı ülkelerdir (Lehmann & Kremer, 2023). Bu ülkelerde, CLT ve diğer ahşap endüstriyel ürünlerin kullanımında tedariği yerel kaynaklardan sağlanması ve bu konuda teşvik ve planların oluşturulması önemli görülmektedir. (Lehmann & Kremer, 2023; Hairstans vd., 2018) CLT panellerin üretiminde karaçam, ladin köknar ve çam ağaçları kullanılmaktadır (Şentürk, 2019). (Şekil 2.12) Kullanılan ağaç türü bölgeden bölgeye farklılık göstermektedir. Ormanların sürdürülebilirliği ve kaynakların planlı ve doğru kullanımı son derece önemlidir. Yerel kaynakların kullanımı, lojistik ile ilgili maliyetleri azaltabilmektedir.




**Şekil 2.12** CLT üretiminde kullanılan A- köknar, B- ladin ve C- Çam kerestesi (Özsoy Orman, t.y.; Plania, t.y.; Köse Kereste, t.y.)

Lojistik parametreler ve taşıma kapasitesi, boyut ve ağırlık, panel boyutlarını ve taşınacak panel sayısını belirleyen önemli bir faktördür (Richmond, 2020). Sahadaki koordinasyonun yapılması, gelen panellerin montajının paneller zarar görmeden ve iklim koşullarından olumsuz etkilenmeden inşa edilebilmeleri ve buna göre bir planlama yapılması önemlidir. Büyük panel boyutlarına sahip olması, diğer alternatif malzemelere göre daha az yapı elemanının tek seferde taşınabilmesine sebep olabilmektedir (Richmond, 2020). (Şekil 2.13) Eğer paneller sahada montaj işlemi ile bir araya getirilip inşaat gerçekleştirilecekse, sahaya getirilen panellerin yerleşimi ve sonraki montaj işlemi de aynı şekilde lojistik parametrelerce kurgulanmaktadır.




**Şekil 2.13** CLT panellerin taşınması (SmartLam, 2020)

Masif ahşap türleri ve CLT'de önemli görülen konulardan bir diğeri de bilgi ve eğitim eksikliği olarak farklı kaynaklarca ifade edilmektedir (Richmond, 2020; Lehmann & Kremer, 2023). Malzeme ve teknik hakkında mimar ve mühendislerin yeterli bilgi sahibi olmadığı ve bununla ilgili eğitim eksikliği kadar sahada montaj işlemi, sahanın koordinasyonu ve üretim süreci hakkında eğitim ve uygulama eksikliğinin olması, teknik nitelikli iş gücüne olan ihtiyaç bunlardan bazılarıdır. Yeterli eğitim ve bilgi eksikliğinin dijitalleşme ve dijital teknolojinin sürece

entegrasyonu hakkında da olabildiği ifade edilmektedir. CLT'nin kullanıldığı çeşitli yapılar özelinde tasarım, inşaat ve uygulama süreçlerinin eğitim ve bilgilendirmeye, potansiyellerin bilinmesine ve test edilmesine ihityaç vardır.

## 2.5 Çapraz Tabakalı Ahşap Kullanılan Yapım Sistemleri

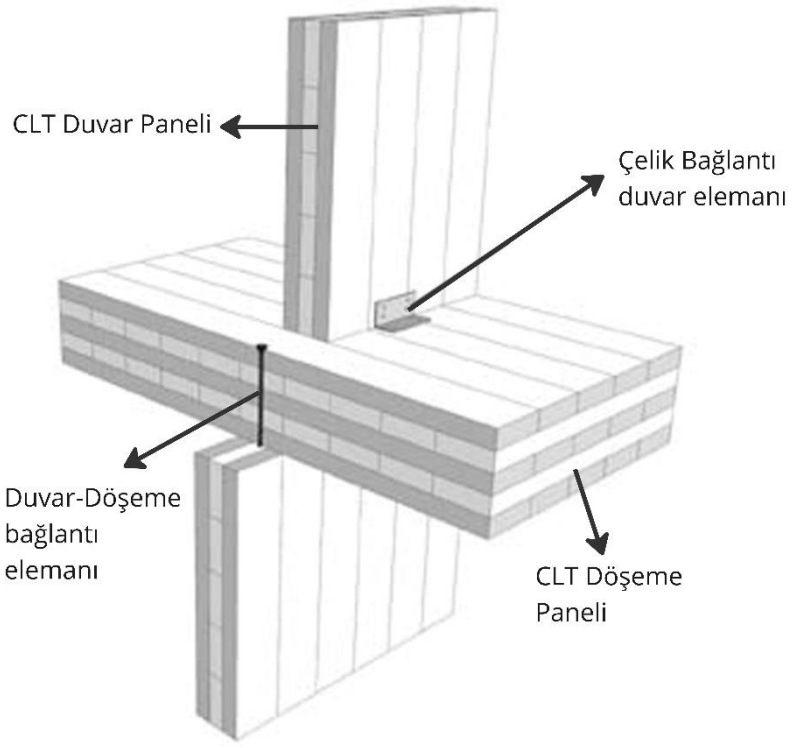
CLT paneller çeşitli yapım sistemlerinde farklı işlev ve özellikleri ile yapılarda kullanılmaktadır. Bu panellerin nasıl kullanılacağı ve hangi işlevi üstleneceği tasarım ve inşaat kararları, bina taşıyıcı sistemi, geçilecek açıklık, yangın ve diğer faktörlere karşı istenilen dayanım ile ilişkilidir. Panellerin kullanım şekli ve özellikleri, üretim süreci ve montajını etkileyebilmektedir.

CLT paneller dolu taşıyıcı özellikte kullanılabilir. Bu yapım sisteminde kolon kiriş çerçeve sistemine gerek olmayıp yapısal yükler paneller aracılığıyla aktarılmaktadır. Panellerin taşıyıcı nitelikte olması strüktürel sistemde optimizasyon sağlamakta ve verimliliği artırmaktadır. Paneller, duvar döşeme ve çatıda kullanılacağı gibi merdiven, korkuluk ve diğer mekansal donanımlarda da kullanılabilmektedir. Diğer endüstriyel yapı ürünleri ile beraber bu sistemde kullanılabilen CLT panellerin kalınlıkları ve boyutları üreticinin standartlarına göre değişebilmekte ama gerektiğinde de özel üretim yapılabilmektedir. Boyutlar tasarımcının kararları, geçilen açıklık ve yangın dayanımı ile ilişkili olarak değişebilmektedir. Ayrıca yapıdaki yükler ve statik hesaplamalar da boyutların belirlenmesinde etkili olmaktadır. CNC makineleri kullanıldığı için farklı boyutlarda çeşitli açıklık ve özelliklerde özel üretim yapılabilmesi, tasarımcıya tasarımı konusunda esnek davranmasına olanak sağlamaktadır. Ahşap paneller birbirine çeşitli çelik birleşim elemanları kullanılarak birleştirilebilir. (Şekil 2.14) Aynı zamanda bazı detay çözümlerinde ahşap panellerde girinti ve çıkıntı bitişler yapılarak birbirine geçmeli sistemler kullanılabilmektedir.



**Şekil 2.14** Çelik bağlantı elemanları (Strongtie, t.y.)

Bazı örneklerde yangına karşı kullanılan çelik bağlantı elemanları gizlenmekte ya da detay çözümü yangın dayanımı düşünülerek yapılmaktadır. Duvar-döşeme duvar-duvar gibi çeşitli birleşim yerleri için birbirinden farklı elemanlar kullanılabilmektedir. (Şekil 2.15) Üzerinde tesisat ve kapı pencere için boşluk açılabileceği gibi hafif çerçeve sistem uygulanarak tesisatın geçmesi de sağlanabilmektedir.




**Şekil 2.15** CLT panellerin birbirine bağlanması (SmartLam, t.y.)

Ahşap dolu duvar panellerine bitiş kaplamaları yapılabileceği gibi, doğrudan malzemenin kendisini gösterir şekilde kaplamasız da kullanılabilmektedir. Ahşap döşeme ve tavan panel elemanları asma tavan uygulaması ya da yükseltilmiş

döşeme kullanılarak tesisat sistemi saklanır ve gerekli boşluklar duvar panellerinde olduğu gibi açılır. 2019 yılında İskandinav mimarlık firması olan C.F Moller tarafından İsveç'te tasarlanan Kajstaden Västerås binası ahşap dolu taşıyıcı panel sistemi kullanılarak inşa edilmiştir. (Şekil 2.16) Duvar ve döşemeleri ahşap CLT panellerden oluşmaktadır.



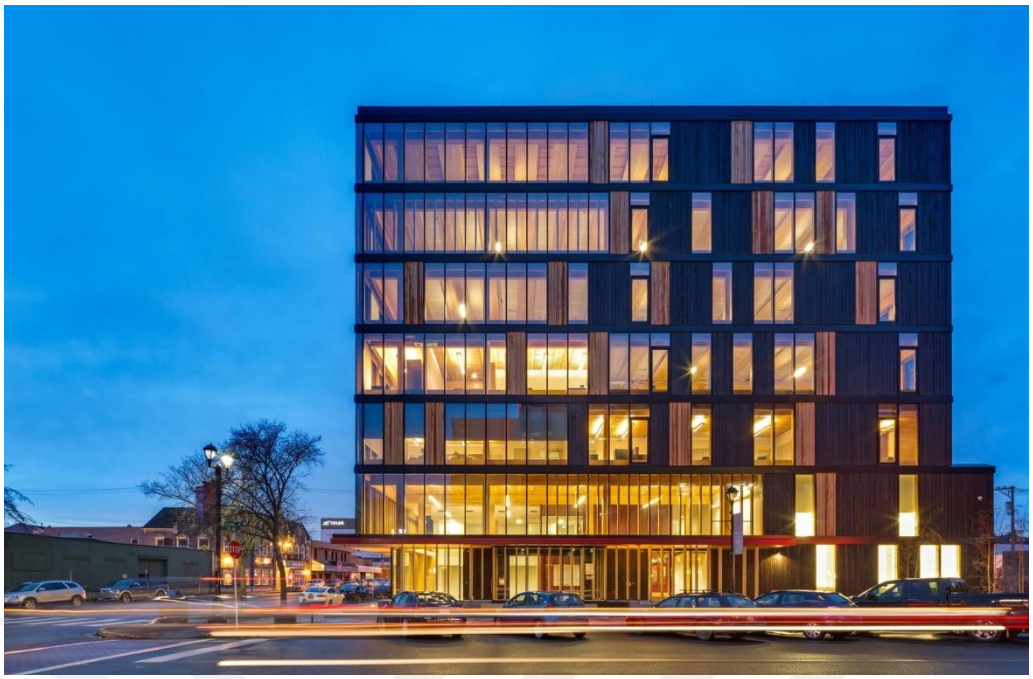
**Şekil 2.16** Kajstaden Västerås binası inşaatı (C.F. Møller, t.y.)

Tamamlandığında İsveç'in en yüksek ahşap binası ünvanına sahip olmuştur. Duvar ve döşeme elemanlarının endüstriyel ahşap olmasının yanı sıra, merdiven, asansör şaftı ve diğer birçok donatı elemanında endüstriyel ahşabın kullanıldığı ifade edilmektedir (Woodsolutions, t.y.). Panellerin prefabrika üretiminin hız ve zamanda verimlilik sağladığı belirtilmiştir. Panellerin birleşim elemanları tekrardan kolay bir şekilde sökülecek ve başka bir kurulum sağlanacak şekilde tasarlanmıştır. Cephe için yine CNC makinesi kullanılarak hazırlanan ahşap cephe elemanları ısı yalıtımı ile beraber uygulanmıştır. (Şekil 2.17)




**Şekil 2.17** Kajstaden Västerås binası yapı detayı (C.F. Møller, t.y.)

Ahşap dolu panellerin taşıyıcı özellikte farklı yapı elemanlarında kullanımının yanı sıra, farklı strüktürel sistemlerin bir arada karma olarak kullanımı da mümkündür. 2014'te Micheal Green Architecture'ın Kanada'da tasarladığı "Wood and Innovation Center" binası kolon kiriş çerçeve sistemi ve dolu ahşap panellerin bir arada kullanıldığı karma yapım sistemine örnek verilebilir. (Şekil 2.18) Ahşap CLT paneller, döşemelerde ve iç bazı duvarlarda kullanılmıştır. Bu proje, CLT'nin yaratıcı yöntemlerle kullanıldığı döneminin en yüksek ve önemli yapılarından biri olarak kabul edildiği belirtilmektedir.



**Şekil 2.18** "Wood and Innovation Center" binası (Peter, t.y.)

Uygulanan "kuru inşaat tekniği" ile sadece temelde betonun kullanılması üst katlarda tamamen endüstriyel ahşabın kullanımı binanın ilerleyen aşamalarda tekrar ayrıştırılabilmesi ve dönüştürülmesi için önemli görülmüştür (Thinkwood, t.y.). Endüstriyel ahşap ürünlerin yanı sıra geleneksel ahşap malzemelerin de kullanımına önem verilmiştir. Kolon ve kirişler glulamdan yapılmıştır. Yapı detayında görüleceği gibi döşeme üzerine yapılan kaplama ve bırakılan boşluklar ile tesisat gizlenmiştir. (Şekil 2.19)



**Şekil 2.19** "Wood and Innovation Center" binası yapı detayı (ArchDaily, 2021)

Karma konstrüksiyon kolon kiriş sistemi ve volümetrik modüler sistemlerin bir arada kullanılması olarak da gerçekleştirilebilmektedir. Karma kullanım sayesinde farklı sistemlerin avantajlarından yararlanılmakta ve yapı pek çok etkene karşı dayanıklı ve verimli hale gelmektedir.

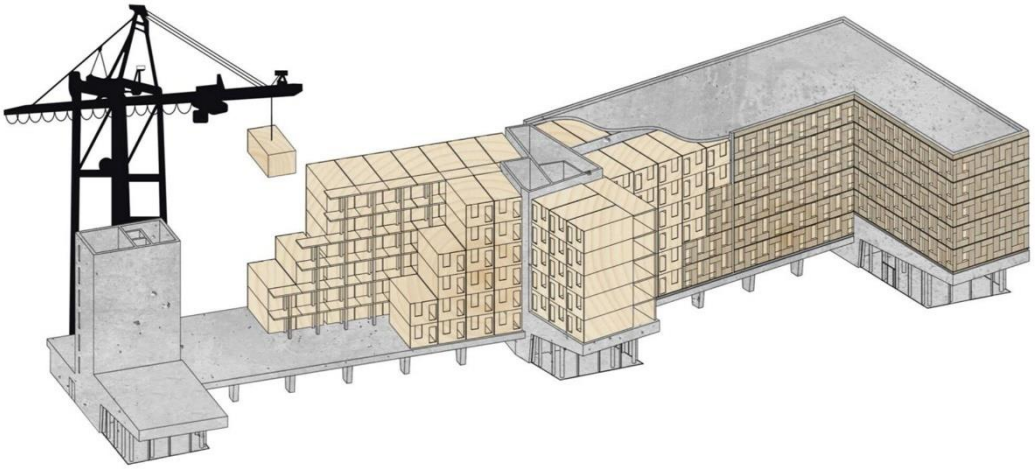
Başka bir yapım sistemi de ahşap modüler konstrüksiyondur. Endüstriyel tekniklerin ve saha dışı inşaatın ağırlıklı olarak kullanıldığı modüler konstrüksiyon, endüstriyel ahşap çeşitleri ile kullanılarak ahşap modüler konstrüksiyon yapılmaktadır. Bu yapım sistemi, modüllerin bitişleri ile beraber tamamen hazır şekilde fabrikada üretilerek ve montajı sağlanarak sahaya getirilmesi ve sahada modüllerin birleştirilmesi ile gerçekleştirilir. Ahşap modüler konstrüksiyon kullanılarak oluşturulan modüllerde, ahşap kolon-kiriş çerçeve sistemi ve CLT paneller beraber kullanılabileceği gibi, sadece CLT dolu ahşap paneller kullanılarak da volümetrik modüller elde edilebilir.

CLT dolu taşıyıcı panellerin volümetrik ahşap modüler sistemde kullanımına örnek olarak Woodie Hamburg binası verilebilir. 2017'de inşa edilen binanın mimarı Sauerbruch Hutton ve binanın işlevi öğrenci yurdudur. Modüller lego parçaları gibi düşünülerek yerleştirilmiş ve cephede böyle bir etki yaratılmıştır. (Şekil 2.20)



**Şekil 2.20** Woodie Hamburg Binası (Bitter, t.y.)

Bina betonarme-ahşap hibrit sistemdir. Sahaya getirilen volümetrik ahşap modüller vinç yardımı ile üst üste ve yan yana yerleştirilmiştir. (Şekil 2.21)



**Şekil 2.21** Woodie Hamburg binası modüler sistem diagramı (Archello, t.y.)

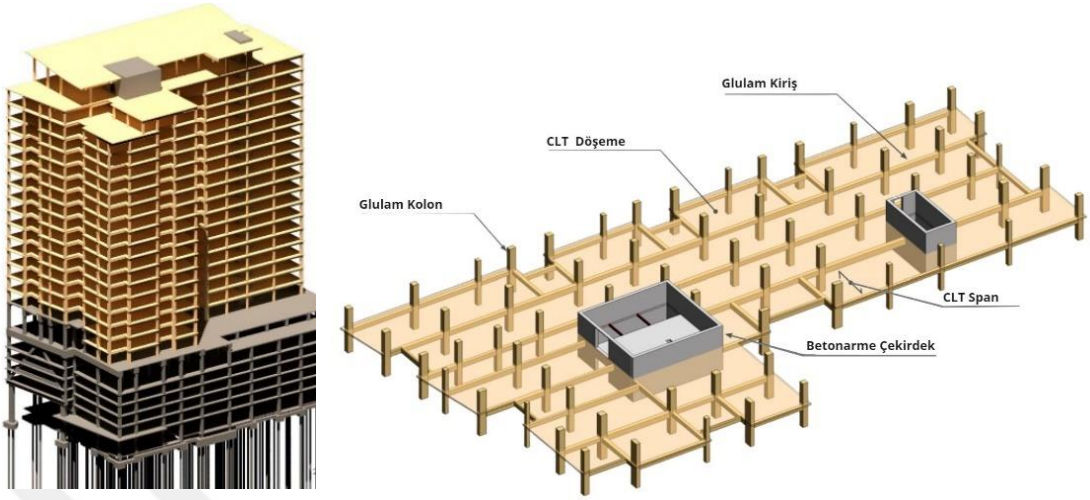
Modüler konstrüksiyon, DfMA kuralları gereği; parçaların tekrara dayalı olması, kolay takılma/sökülmeye olanak sağlaması, parça boyutlarının sahaya gelmeden optimize edilebilmesi, kolay sökülebilmesi açısından uygulanmakta ve bu yüzden zaman, hız, maliyet konusunda avantaj sağlamaktadır. Modüller kullanım sonrası sökülebilmekte ve başka bir kullanıma dönüştürülebilmektedir. Ahşap modüler

konstrüksiyonda lojistik parametreler önemlidir. Taşıyıcı kapasitesine göre boyutlar düşünülmektedir. Modüller saha dışında üretilip bitmiş şekilde sahaya getirildiği için, yüksek hassasiyette üretilmekte, sahada oluşacak insan hatasını düşürme konusunda avantaj sağlamaktadır (Prefabium, 2018).

Modüler konstrüksiyonda içerideki ıslak hacim, standart şekillerde üretilip modüle takılabilmektedir. CLT panellerin kullanıldığı ahşap modüllerde, panellerin mekanik, tesisat, elektrik elemanlarına göre kesilip, boşlukları açılmakta ve modüldeki panellerin montajı gerçekleştirilmektedir. Paneller, döşeme-duvar, duvar-duvar, köşe birleşimi gibi çeşitli yerlerde çelik bağlantı elemanları kullanılarak birleştirilmektedir. Modüler konstrüksiyon, dolu ahşap panel yapım sistemine göre esneklik sağlama konusunda daha dez avantajlı iken tekrara dayalı elemanların daha çok olması sebebiyle maliyet açısından ise daha avantajlı görülmektedir. Yapılan projede, gerçekleştirilmesi istenilen amaç doğrultusunda yapım sistemi seçilmektedir.

CLT ve diğer endüstriyel ahşap ürünler, kullanıldığı çeşitli yapım sistemlerinde beton ve çelik ile hibrit şekilde uygulanabilir. Hibrit kullanım, ahşabın dezavantajlı olduğu noktada, diğer malzemelerle güçlendirilmesini sağlamaktadır.

Beton-ahşap hibrit kullanım ve karma yapım sistemine örnek olarak 2022'de Amerika Birleşik Devletleri Wisconsin Eyaleti, Milwaukee şehrinde tamamlanan resmi adıyla Ascent Binası verilebilir. 86.6 metre yüksekliği ile döneminin en yüksek ahşap binası olan Norveçteki Mjøstårnet binası, kolonları glulam, döşemeleri ise CLT paneller kullanılarak inşa edilmiştir. Ascent Milkwaukee binası, ilk 7 katı, merdiven hacimleri ve bina çekirdekleri betonarmeden, sonraki 18 katı ise endüstriyel ahşaptan inşa edilmiş 25 kata sahiptir (Fernandez vd., 2020; Dreith, 2023). (Şekil 2.22) Ahşapın hafif bir malzeme olması sebebiyle, rüzgar ve yanal yüklere karşı binayı güçlendirmek, olası bir yangın durumunda ise kaçışı sağlayabilmek için betonarme ile hibrit kullanıldığı ifade edilmiştir (Dreith, 2023). Proje geliştiricilerinden Tim Gokhman'ın projeye dair yayınladığı bazı istatistiklere göre, Ascent gibi masif endüstriyel ahşabın ağırlıklı olarak kullanıldığı bir binanın geleneksel başka bir binaya göre %90 oranında sahadaki trafiği azalttığı, %75 oranında sahadaki iş gücünün düştüğü ve inşaat hızının %25 oranında arttığı ifade edilmiştir (Haack, 2022). Bir katın inşa edilmesi yaklaşık olarak 5-6 günde tamamlanmıştır (Haack, 2022).




**Şekil 2.22** Ascent Milwaukee aksonometrik proje diyagramları (Komp, 2024)

CNC makineleri kullanılarak kolon, kiriş ve CLT panellerin ön üretimi yapılabilmiş, üretim esnasında delikler açılmıştır. Sahada ise sadece bu parçaların birbiri ile birleştirilip inşa edilmesi sağlanmış böylece inşaat süresi ve inşaat hata payı optimize edilmiştir.

Kolon kiriş sistemi ve CLT dolu panellerin bir arada karma yapım sisteminde kullanıldığı ve betonarme-ahşap hibrit sisteme sahip bir başka yapıya örnek olarak 2017'de Kanada'da tamamlanan University of British Colombia 'nın binası olan "Brock Commons Tallwood Student Residence" gösterilebilir. Döneminin konut kategorisinde yer alan endüstriyel ahşabın kullanıldığı en yüksek binadır. 17 katlı binanın, ahşap strüktürel sisteminin, ön üretimli bina elemanları sahaya ulaştıktan sonra 70 günden az bir sürede monte edilip kurulduğu ifade edilmektedir (Think Wood, t.y.). Bu süreç sahada geleneksel inşaat ile kıyaslandığında 4 ay kadar daha erken bir sürede tamamlanması anlamına gelmektedir. Bina betonarme bir podyum üzerine kurulmuş, 2 betonarme merdiven çekirdeği olan, ahşap-çelik cephe sistemi, döşemeler CLT panellerden, kolonlar glulam ve PSL'den oluşmakta ve çatıda ön üretimli çelik kaplama ve kirişler kullanılmıştır (Think Wood, t.y.). (Şekil 2.23) Ön üretimli elemanların sahada kurulumuna dair yayınlanan bazı istatistiklere göre bir glulam kolonun 5-10, 1 CLT panelin 6-12 dakikada kurulabildiği ve 1 kat döşemesinin 2 hafta içerisinde kurulumunun tamamlandığı ifade edilmektedir (Brock Commons Tallwood House, 2016). Ayrıca yapının içerisine bazı sensörler

yerleştirilmiş ve uzun vadede performans testi yapılması planlanmıştır (Brock Commons Tallwood House, 2016).



**Şekil 2.23** Brock Commons bina ve sistem görselleri (KK Law, 2016; Acton Ostry Architects, t.y.)

Projenin ön üretim ve fabrikasyona dayalı olması ve ahşap ağırlıklı malzemenin kullanılmasının getirdiği avantajların başında üretimin hızlı olması, beton ve çeliğe kıyasla karbon ayak izinin daha küçük olması, sahadaki atığın azaltılması, tekrar kullanma ve geri dönüşüm potansiyeline sahip olması gelmektedir (Crockett, 2016). Ayrıca saha dışı üretimin ağırlıklı olduğu bu projede sahada ortaya çıkabilecek gürültü, kirlilik gibi problemlerin, ya da insan hatasından kaynaklı olabilecek faktörlerin önüne geçilebilmiştir (Hasan, 2017).

# 3
# İNŞAAT SÜRECİNDE SANAL TASARIM VE YAPI BİLGİ MODELLEMESİ

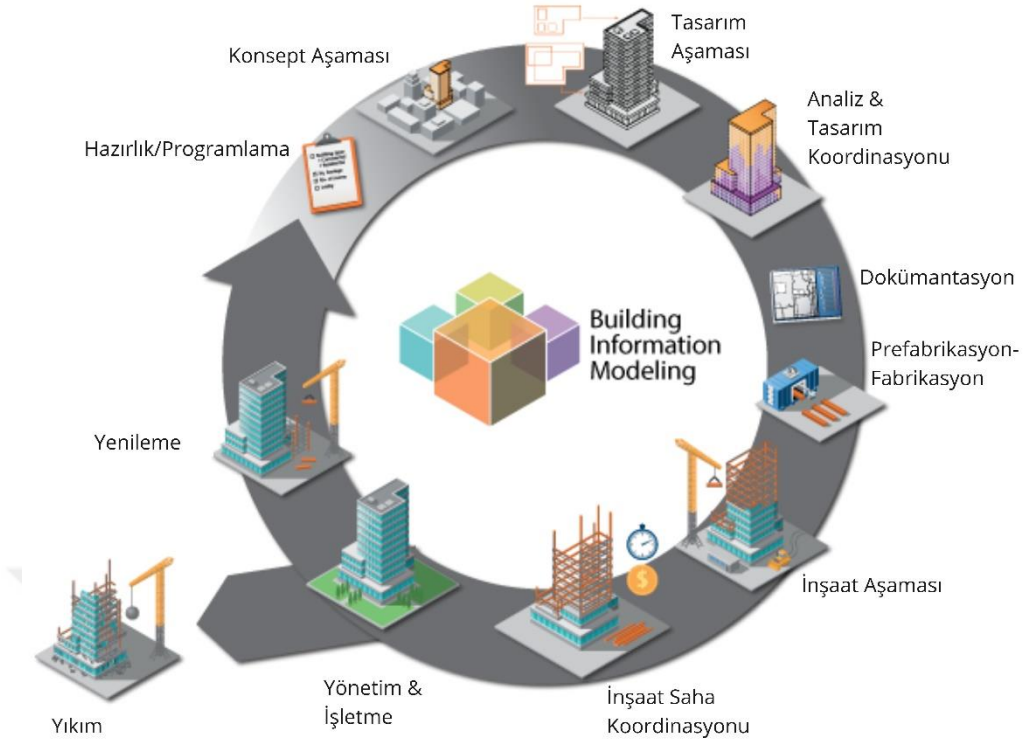
## 3.1 Sanal Tasarım ve İnşaat Süreci

4. Endüstriyel Devrim (Industry 4.0) ile, fiziksel ve dijital dünyanın etkileşimi daha fazla dikkat çeken bir konu haline gelmiştir. Bu devrimle beraber, tasarım ve inşaat alanlarında dijitalleşmeyi sağlayan ve proje sürecini bütüncül bir dijital çerçevede ele almamıza olanak tanıyan VDC kavramı önem kazanmaktadır. VDC kavramı, ilk olarak 2001 yılında kullanılmış olup, YBM merkezli uygulama ve optimizasyonları da içeren, ancak bunlardan çok daha kapsamlı bir yaklaşım sunan bir kavramdır (Kam vd., 2016). Sanal tasarım ve inşaat anlamına gelen VDC, proje sürecini, başlangıcından sonuna kadar tüm aktörler ve bileşenleriyle birlikte ele almaktadır. Sanal tasarım ve inşaat süreci, projenin yaşam döngüsü boyunca dikkate alınması gereken tüm faktörleri kapsamaktadır. VDC süreci, YBM'nin uygulanmasıyla birlikte, fiziksel bir yapının inşa edilmeden önce tüm süreç ve bileşenlerini dijital ortamda görmeyi, olası sorunları gerçek hayatta karşılaşmadan önce çözmeyi, simülasyon ve analizlerle süreci anlamayı ve yönetmeyi mümkün kılmaktadır. Bu süreç, tasarım aşamasında sanal tasarım modelinin ve uygulamasının, inşaat aşamasında ise sanal inşaat modelinin ve uygulamasının oluşturulması ile hayata geçirilmektedir.

## 3.2 Yapı Bilgi Modellemesinin Rolü

Yapı bilgi modellemesi, proje sürecindeki fiziksel bileşenlerin dijital ortamda akıllı bir şekilde ifade edilmesine olanak sağlayan, geometri ve çeşitli veri türlerini bünyesinde barındıran, inşaat sektöründe uzun zamandır kullanılmakta olan bir bilgi ve veri yönetim sistemidir (Gu & London, 2010). Çeşitli araçlar, yazılımlar ve aktörler YBM'nin süreçte uygulanmasına yardımcı olur, fakat bu kavram proje sürecinin doğrudan kendisi ile alakalıdır (Abanda vd., 2017). Günümüzde teknoloji

ve dijitalleşmenin gelişimi ile yapıların proje süreçleri karmaşık hale gelmekte ve sürece farklı disiplinlerin dahil olması, çeşitli verilerin aynı anda yönetilmesi, veri geçişinin doğru bir şekilde sağlanması, verinin dokümantasyonu gibi konular önem kazanmaktadır. Bu noktada sürece YBM'nin entegre edilmesi önemli ve kaçınılmazdır. Yapı bilgi modellemesi doğru şekilde uygulandığında, geleneksel inşaat ve saha dışı inşaatın her ikisi için de verimliliği artırdığı; hız, zaman ve maliyet konusunda fayda sağladığı görülmektedir (Abanda vd., 2017). Bunun yanı sıra saha dışı inşaat proje sürecinde, bazı yönleriyle YBM'nin uygulanması geleneksel inşaata göre çok daha verimli ve etkin görülmektedir. Bunun sebebi saha dışı inşaatın makine ve dijital teknoloji ile daha bütünleşmiş şekilde çalışması ve yaklaşımın endüstriyel prensipleri barındırmasından kaynaklanmaktadır. Bir proje sürecinin aşamaları genel olarak tasarım öncesi hazırlık aşaması, tasarım, inşaat, yönetim ve yıkım aşamaları olarak başlıklara ayrılmaktadır (Abrishami & Martín-Durán, 2021). Yapı bilgi modellemesinin uygulanması proje sürecinin her aşaması için farklı şekillerde gerçekleşmektedir. Projenin tasarım aşamasında YBM'nin uygulanması; tasarım kararları ve koordinasyonu ile ilişkilidir. Bu aşamada, 3B tasarım modeli ve koordinasyonu, disiplinlerarası proje koordinasyonu, hata tespiti ve çakışma analizleri, tasarımsal kararlar ve değişkenler, görselleştirme ve metraj önemlidir. Sanal tasarım süreci kapsamında çeşitli mimar ve mühendisler dışında diğer aktörler, yapı sahibi ve işletmeciler de proje süreci içinde koordinasyonun bir parçasıdır. Proje koordinasyon süreci özellikle YBM uygulanarak oluşturulan dijital bir süreç olduğunda tek yönlü doğrusal ilerleyen bir süreç değildir. Döngüsel ilerleyen daha esnek bir etkileşime olanak sağlayan YBM tabanlı bir koordinasyonda, süreçlerin arasındaki ilişki dinamik bir şekilde kurulabilmektedir. (Şekil 3.1)

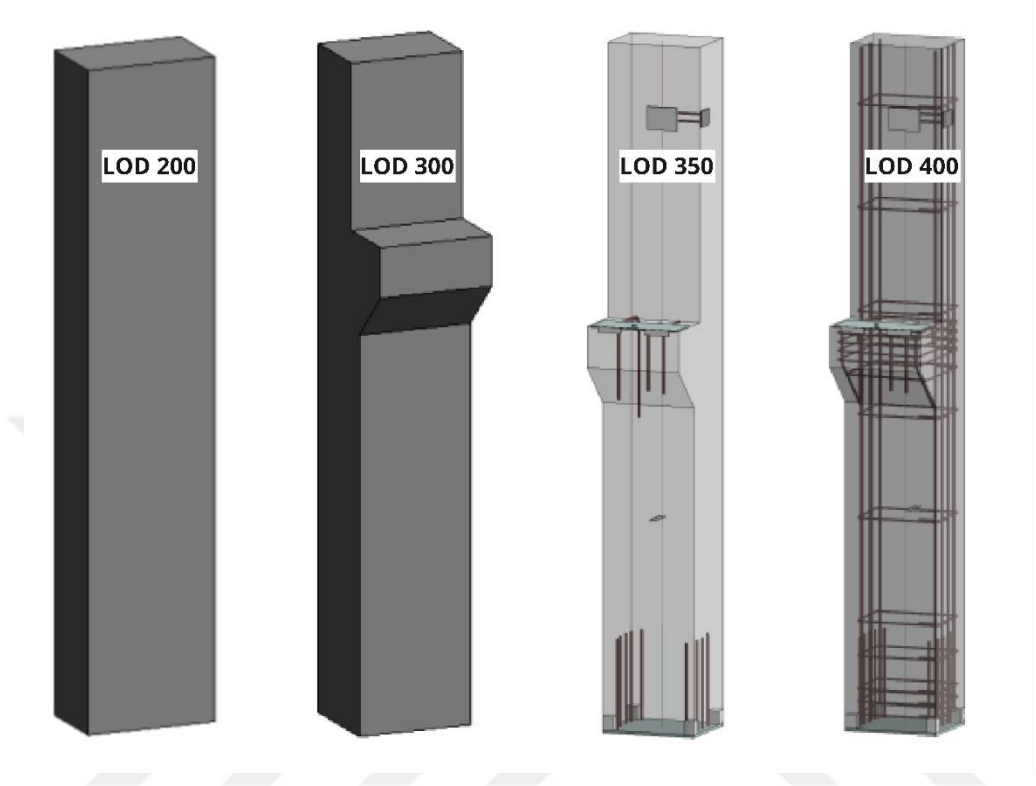



**Şekil 3.1** YBM'nin proje sürecinde uygulanması (BIM Corner, 2019)

İnşaat sürecinde ise sahaya özgü koordinasyon, simülasyon ve analizlerin yapılması sanal inşaat modeli kapsamında inşaata dair bütün süreç ve modelin dijitalde temsil edilmesi ve sürecin yönetilmesi sağlanmaktadır. Bu süreç, disiplinlerarası model koordinasyonu, çakışma analizi ve testleri, inşa edilebilirlik testleri, lojistik gibi alanları içermektedir. İnşaat koordinasyonu, eğer yapı ön üretime sahipse üretim aşamasına hazırlık olan prefabrikasyonu da içerir. YBM proje sürecinde prefabrikasyona dayalı bir projede, inşaat öncesi hazırlık süreci ve inşaat süreci, ön üretim ve üretim şeklinde başlıklar olarak eklenebilir.

Projenin her aşaması için modelin gelişim ve detay seviyesi farklılık göstermektedir. Yapı bilgi modelinde model ve veri gelişim seviyesini ifade eden LOD kavramı ilk olarak 2008 yılında Amerikan Mimarlar Enstitüsü (AIA) tarafından ortaya koyulmuş ve sonrasında BIMForum tarafından geliştirilmiştir (Alshorafa & Ergen, 2019). LOD, proje sürecinde farklı aşamalardaki model gelişim seviyesi gerekliliklerini göstermekte, YBM proje ve model koordinasyon sürecinde verinin gerekli ve doğru detay seviyesinde aktarılmasına yardımcı olmaktadır. BIMForum'un yayınladığı rapora göre her bir yapı elemanının

bulunduğu LOD seviyesinde içermesi gereken veri ve geometri seviyesi grafik olarak her bir eleman için ifade edilmiştir. (Şekil 3.2)



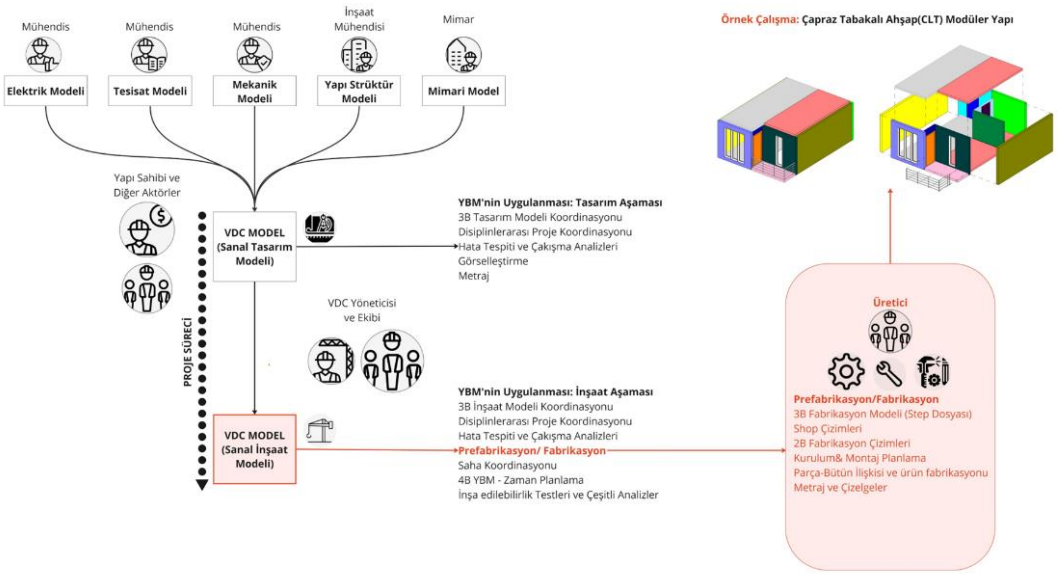

**Şekil 3.2** Yapısal bir kolonun LOD seviyesine göre geometrik gösterimi (BIMForum, 2024)

Tasarım aşaması; konsept, kütle çalışmaları ve temel tasarım kararları ile ilişkilidir. Bu aşama tasarım geliştirme (DD) aşaması olarak da geçmektedir. BIMForum'un düzenlediği her sene güncellenen, YBM detay gelişim seviyesini gösteren rapor dokümana göre, tasarım aşaması, LOD100, LOD200 evrelerini kapsayarak, LOD300 detay seviyesinde sona erer. LOD100 seviyesi, temsili bir seviye olup net bir geometri ya da veri belirtmez, gelişim seviyesinin ilk adımıdır. Kütlesel çalışma ve konsept çalışmaları bu detay seviyesinde kabul edilebilir. LOD200 seviyesi, LOD100 seviyesine göre bir üst detay ve gelişim bilgisine sahiptir. Geometri ve yapı elemanının türü gibi bilgiler kabaca ve kesin olmayan şekilde verilir. LOD300 seviyesinde, elemanların genel boyutları, elemanların ne olduğu, aralarındaki mesafe ve boyutsal ilişki net ve doğru bir şekilde tanımlanır, temsili bilgi yoktur (BIMForum, 2024). Tasarımdan sonraki aşama olan inşaat sürecinde gelişim seviyesi LOD350 ile başlamaktadır. LOD350, farklı sistem ve disiplinlerin

arasındaki ilişkiye odaklanan ve sistemler arası koordinasyonu sağlayan seviyedir. İnşaat sürecinin detaylı ve yapı özelinde değerlendirilmesi gereken üretim aşaması, inşaat aşaması içinde yer alan bir aşama olup, inşaat öncesi ve üretim öncesi ve inşaat ve üretim süreçlerini kapsayacak şekilde değerlendirilebilir. Ön üretim ve üretim aşaması LOD400 seviyesi model gelişim seviyesini sağlamak zorundadır. LOD400 detay ve gelişim seviyesi, fabrikaya üretim için gönderilmek üzere hazırlanan tüm gerekli 2B ve 3B veriyi içerir. Bu seviyede, modeller yüksek geometrik hassasiyet ve detay seviyesinde bütün bileşenleri ve montaj kurgusu ile modellenmektedir (BIMForum, 2024).

## 3.3 Ahşap Yapılarda Sanal Tasarım ve İnşaat Süreci

Ahşap yapılarda sanal tasarım ve inşaat süreci, diğer tipteki proje süreçlerinden özelleşmek durumundadır. Ön üretimli endüstriyel ahşap ürünlerin kullanımı, üretim ve üretim öncesi gereklilikler bu süreçte önemlidir. Geleneksel bir projede işleyen sanal tasarım ve inşaat sürecine kıyasla, üretim parametrelerinin ve gerekliliklerinin ön planda olmaktadır. (Şekil 3.3)

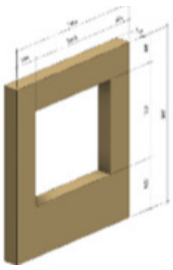
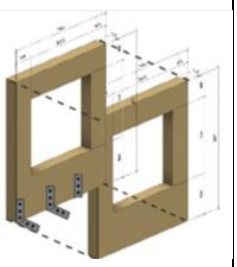



**Şekil 3.3** Sanal tasarım ve inşaat sürecinde yapı bilgi modellemesinin uygulanması ve üretim

Bu bölümde yapılan araştırmalar doğrultusunda, ön üretimli farklı yapım sistemlerine sahip, CLT'nin yapı elemanı olarak kullanıldığı ahşap yapıların proje süreçlerinde YBM'nin nasıl uygulandığı ve bu süreçler için olan katkı ve

öneminden bahsedilmiştir. CLT'nin özellikleri ve CLT'nin süreçte kullanımının getirdiği ihtiyaçlar göz önünde bulundurularak tasarım, inşaat ve üretim süreçlerinde olan uygulamalar araştırılmıştır. BIMForum'un yayınladığı rapor göz önüne alınarak CLT bir yapı panelinin LOD seviyeleri oluşturulmuştur. (Tablo 3.1)

**Tablo 3.1** CLT panelde LOD seviyeleri

| **Tasarım Geliştirme Aşaması** | | | **İnşaat Geliştirme Aşaması** | **Üretim Aşaması** |
|---|---|---|---|---|
| Konsept/fikir aşaması/kütle çalışması | | | İnşaat aşamasına dair kararlar | Montaj ve planlama |
| Temel tasarım kararları | | | Farklı sistem ve elemanlar arası ilişki | Üretici ve standartlar |
| Elemanların boyutları ve arasındaki ölçünün netliği | | | Disiplinlerarası model koordinasyonu | Üretim çıktıları |
| Tasarım koordinasyonu ve tasarım modeli | | | Inşaat koordinasyonu ve inşaat modeli | Üretim optimizasyonu ve analizler |
|  |  |  |  |  |
| LOD100 | LOD200 | LOD300 | LOD350 | LOD400 |

Proje sürecinde her aşaması için YBM verisinin hangi LOD düzeyinde aktarıacağının anlaşılması önemli görülmektedir.

### 3.3.1 Tasarım Kararları ve Optimizasyonu

Çeşitli yapım sistemlerine sahip CLT'nin kullanıldığı projelerde tasarım süreci, diğer projelerde olduğu gibi konsept ve fikir aşaması ile başlar ve tasarıma dair ön kararlar alınır. Bu aşamada, geleneksel yöntemle yürütülen proje sürecinden farklı olarak yapım tekniği ve malzeme, projenin erken süreçlerinden itibaren göz önünde bulundurulmalıdır. CLT'nin kullanıldığı ön üretimli yapılarda, tekrar eden yapı elemanlarının belirlenmesi, boyut ve birleşime dair parametrelerin bilinmesi tasarım aşamasında alınacak kararları doğrudan etkileyebilecek faktörlerdir. Yapım tekniğinden kaynaklı kısıtların teknik ve üretime dair detayların belirlenmesi tasarım kararları, yapının tipi ve işlevi ile doğrudan ilişkilidir. Bir yapının tekniğinin ve CLT'nin bu teknikle nasıl kullanılacağının bilgisi, tasarımcının üretici ve üretim süreci hakkında fikir sahibi olması tasarım sürecini daha net yürütebilmesine olanak sağlamaktadır. Bu konuda CLT panellerini üreten üreticinin standart panel boyutları, ne kadar açıklık geçileceği, hangi panelin nerede ve nasıl kullanılacağı gibi bilgilerin sürece dahil edilmesi gerekmektedir. Aynı zamanda DfMA prensiplerinin neler olduğu ve tasarım sürecinde nasıl uygulanması gerektiğine karar verilmesi ve sürecin bu prensipler doğrultusunda düşünülmesi gerekmektedir. YBM bu süreçte farklı şekillerde uygulanabilmektedir. Yapılan bazı araştırmalarda görüldüğü üzere, DfMA-YBM merkezli tasarım stratejisi yürütülmekte ve YBM yazılımları kullanılarak DfMA analizi yapılabilmektedir (Yuan vd., 2018). (Şekil 3.4) Bu aşamada tekrar eden yapı elemanlarının hangileri olacağı, standartlaşma tipi, esneklik, montaj ve uygulamaya dair stratejiler belirlenmekte ve optimizasyon yapılabilmektedir (Abrishami & Martín-Durán, 2021). YBM'nin DfMA analizi yapmak için kullanılmasının en önemli avantajı proje sürecinde maliyet ve zamanda verimlilik sağlamasıdır. Parça-bütün ilişkisinin kurulması ve montaj mantığının erken dönemden itibaren anlaşılıyor ve uygulanıyor olması, ileriki süreçlerde ortaya çıkabilecek proje revizyonlarını ve potansiyel hataları önlemektedir. Böylece, olası hataların ve verimsizliklerin önüne geçilmektedir. Aynı zamanda DfMA ve YBM'nin birlikte düşünülerek tasarımın gerçekleştirilmesinin standartlaşmayı sağladığı ve CNC makinelerine veri aktarımı

konusunda da kolaylık sağladığı ifade edilmekte bu da üretim ve tasarım süreci arasındaki ilişkiyi kolaylaştırmaktadır (Abolghasem vd., 2018).



**Şekil 3.4** DfMA merkezli tasarım modeli ve planlama (Stora Enso, t.y.)

Bir diğer önemli görülen nokta ise, YBM merkezli kütüphanelerin tasarım aşamasında oluşturulması gerekliliğidir (Abrishami & Martín-Durán, 2021). Yapı elemanlarının YBM merkezli kütüphanelerinin oluşturulması ve üreticiden gelecek verinin bu ürünlerde işlenmesi hem yapılan proje özelinde hem de benzer yapı tipinde sonraki süreçte yapılabilecek projeler için bir standart sağlamaktadır. Hazırlanan kütüphanedeki ürünlerin doğrudan kullanılması tek bir kaynak kütüphanenin olması, veri ve model tutarlılığı açısından fayda sağlamaktadır. Bu kütüphaneler, en yaygın kullanılan YBM programı olan Revit'te oluşturulabilmektedir. Bu kütüphaneler, yapılan DfMA analizlerinden sonra oluşturulabilir, bu da tasarım aşamasına daha somut ve net bir belgelendirme sağlamaktadır.

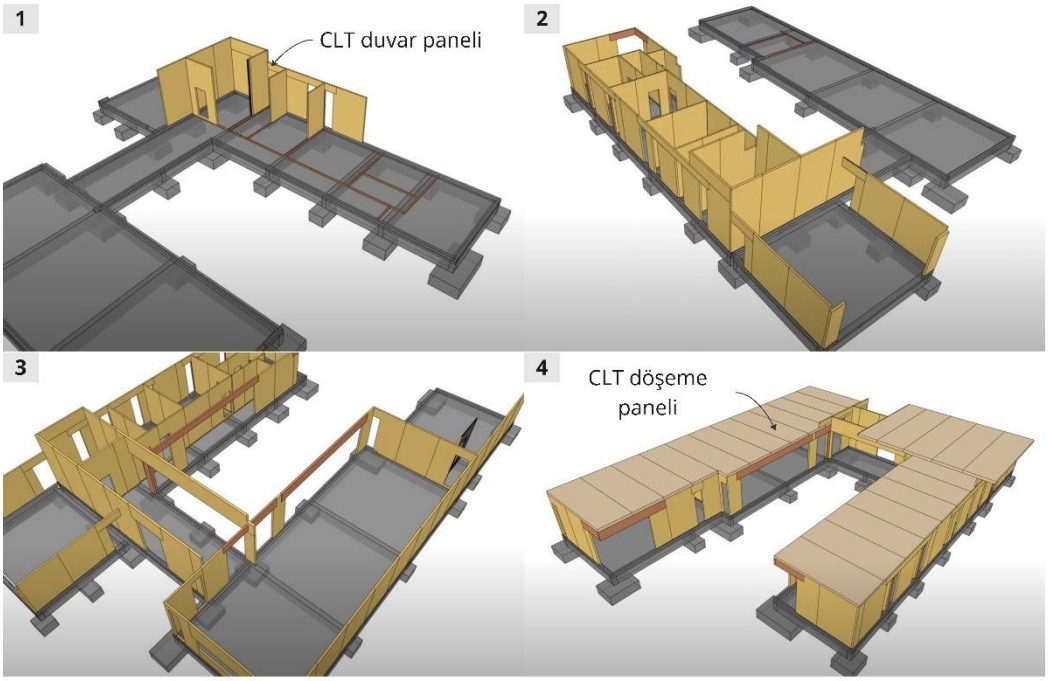
### 3.3.2 Tasarım Süreci ve Tasarım Model Koordinasyonu

YBM proje sürecinde tasarım modelinin tasarım aşaması gerekliliklerini sağlayacak düzeyde ve doğrulukta modelleniyor olması, doğru yazılımların seçilmesi, veri geçişinin planlanması ve YBM uygulama planı (BEP) oluşturulması CLT'nin kullanıldığı bir yapı için geleneksel bir yapıda olduğu kadar önemlidir. Tasarım modelinde, YBM LOD300 seviyesinde bir geometri ve veri seviyesinin olması beklenmektedir. Geleneksel bir yapıdan farklı olarak bu seviyedeki bir modelin bu yapı tipi için doğru şekilde oluşturuluyor olması, sonraki süreçlerde özellikle üretim modelinin gerekli detay seviyesi ve hassasiyette yapılmasına çok büyük katkı sağlamaktadır. Eğer doğru detay seviyesinde oluşturulmayan bir model

ile çalışılırsa, fabrikasyon sürecinde modellerin baştan sona bir kaç kere yapılması, tasarıma dair revizyonların olması, tasarım-üretim arasında çıkabilecek veri uyuşmazlıklarından kaynaklı zaman ve maliyet kayıpları yaşanabilmektedir (Abolghasem vd., 2018).

Yapılan araştırmalar doğrultusunda, tasarım aşamasından itibaren düşünülmesi gereken diğer bir konu ise, MEP koordinasyonunun bu aşamadan itibaren düşünülmesi ve planlanması gerekliliğidir (Richmond, 2020). Tasarım aşamasında tesisat mekanik ve elektrik ile ilgili sistemin parametrelerinin bilinmesi ve panel boyutları, yerleşimi, geçilen açıklık gibi tasarım kararları alınırken, MEP koordinasyonunun doğru şekilde dahil edilmesi gerekmektedir. YBM bu bağlamda, her iki disiplinin tasarım aşamasında oluşturulan modellerinin birlikte başka bir modelde birleşitirilmesine, modellerin kontrol ve test edilmesine olanak sağlamaktadır. Görselleştirme ve model koordinasyonu, çakışma testleri gibi testler yürütülerek disiplinlerarası birlikte çalışabilirlik ve proje koordinasyonu sağlanmaktadır. Panellerin boyut, doluluk, boşluk bilgisinin tasarım aşamasında doğru bir şekilde oluşturulması ileride üretim aşamasında panellerin üretilip CNC makineleri kullanılarak doğru şekilde üretilmesine olanak sağlamaktadır. Bu da sahada MEP koordinasyonuna bağlı ek müdehalelerin olmasının önüne geçmekte, zaman ve maliyette verimlilik sağlamaktadır (Richmond, 2020).

Tasarım aşamasında göz önünde bulundurulması gereken diğer bir önemli konu ise CLT'nin kullanıldığı yapılara dair, tasarımcıların yeterli bilgi sahibi olmaması ve standartların üreticiden üreticiye değişiyor olmasıdır. YBM'nin sürece VR ve AR gibi etkileşimi sağlayan teknolojileri ile entegre bir şekilde uygulanması, bu bağlamda tasarımcıların sistem hakkında fikir ve bilgi sahibi olmasını sağlayabilir (Hairstans vd., 2018). Bu teknolojiler sayesinde, model görselleştirme, montaj ve sistem simülasyonu etkileşimli bir ortamda hazırlanabilmektedir. (Şekil 3.5)

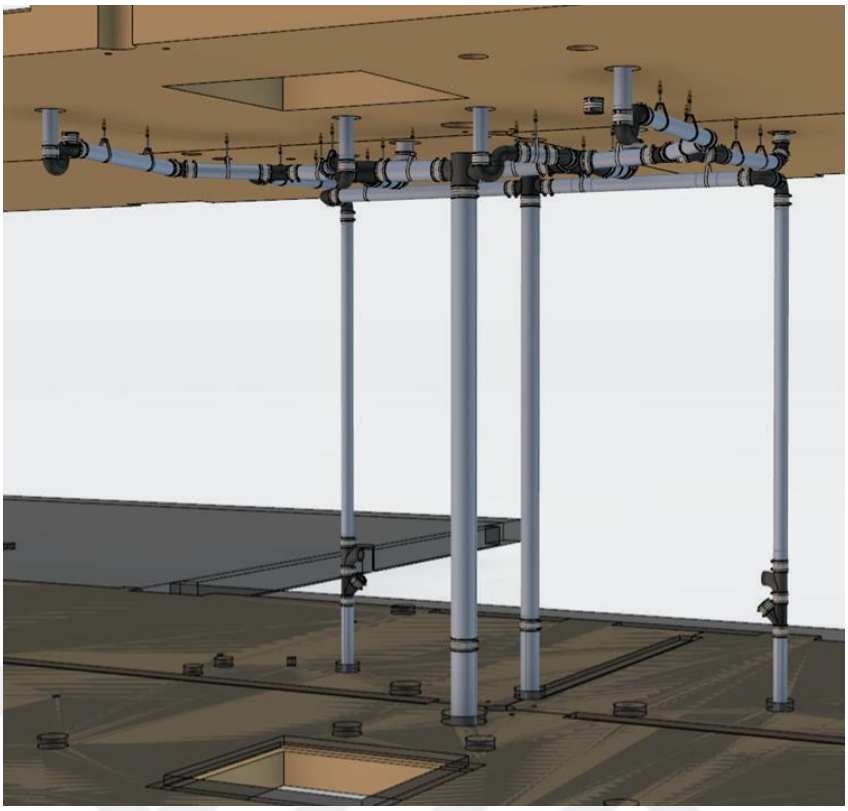



**Şekil 3.5** CLT panellerin montaj simülasyonu örneği (Costyedil, 2022)

Tasarımcılar ve diğer katılımcılar, öğrenciler, yatırımcı ve yapı sahipleri, üretim aktörleri bu etkileşimli ortama dahil olarak sürecin ve sistemin daha net anlaşılmasına olanak sağlayabilmektedir.

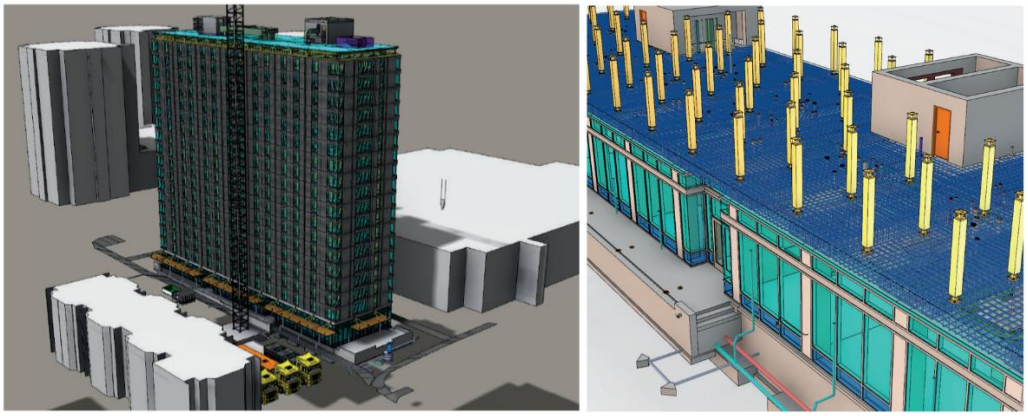
### 3.3.3 İnşaat Süreci ve Disiplinlerarası Model Koordinasyonu

İnşaat süreci, tasarım aşamasından sonra gelen ve tasarım aşamasındaki koordinasyona ek olarak inşaat sahası koordinasyon ve faaliyetlerini de içeren süreçtir. Bu süreç YBM LOD350 detay ve model seviyesi ile başlamaktadır (BIMForum, 2023). LOD300 seviyesinde modellerin oluşturulup tamamlandığı tasarım sürecinde her disiplin, modelini kendi süreci içinde oluşturur, inşaat aşamasında ise oluşturulan farklı disiplinlerdeki modeller bir araya getirilir ve arasındaki ilişki ön planda tutularak koordinasyon sağlanır. (Şekil 3.6) İnşaat süreci boyunca YBM pek çok farklı problemin çözülmesi ve proje koordinasyonunun etkin bir şekilde sağlanabilmesi için uygulanmaktadır.



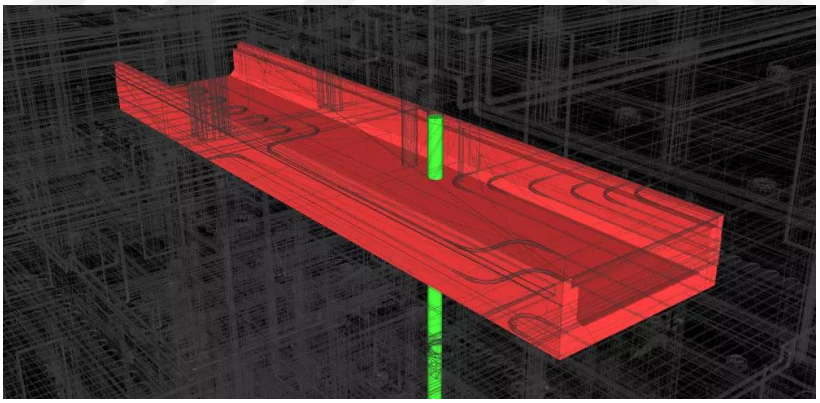
**Şekil 3.6** Brock Commons binası disiplinlerarası koordinasyon modeli MEP ve CLT panellerin koordinasyonu (CadMakers, t.y.)

Bu uygulamalardan en önemlisi inşaat modeli koordinasyonu ve disiplinler arası proje koordinasyonudur. Her disiplin oluşturulan tasarım modelinden sonra, detay ve veri seviyesinin artırıldığı inşaata özgü parametrelerin eklendiği inşaat modellerini çeşitli YBM yazılımları ve platformları kullanarak yapmaktadır. Bu inşaat modelleri, bütünleştirilmiş model (federated model) olarak bir araya getirilmekte ve sanal tasarım ve inşaat modeli oluşturulmaktadır. (Şekil 3.7)



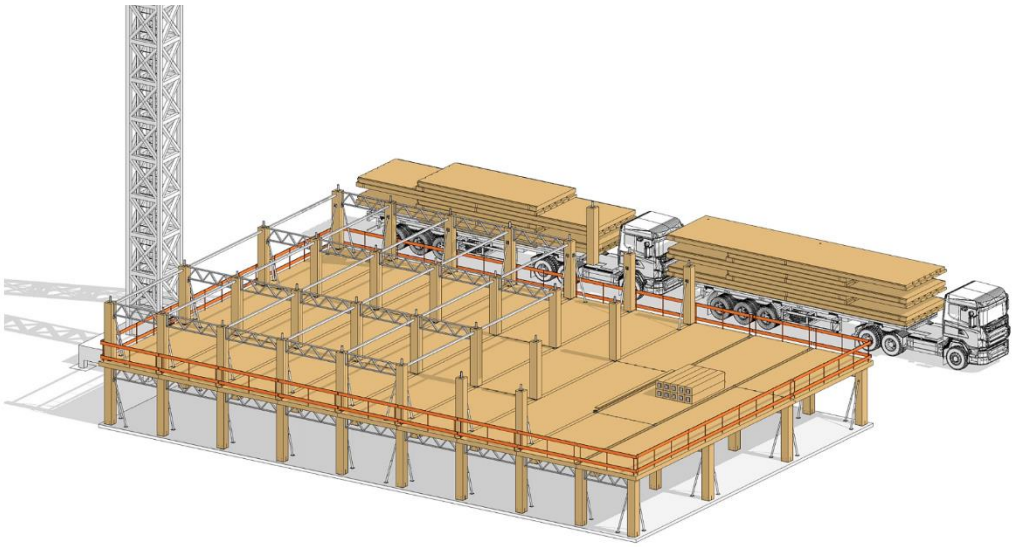
**Şekil 3.7** Brock Commons binası modeli (CadMakers, t.y.)

Modellerin bir araya getirilip incelenmesi arasındaki ilişkinin net olarak anlaşılması için önemlidir. Bir araya getirilen modeller Navisworks gibi çakışma analizi ve testleri yapmaya olanak sağlayan YBM platformlarınca test edilmektedir. (Şekil 3.8) Bu aşamada model koordinasyonu başlığı altında en önemli görülen şey programlar ve disiplinlerarası çalışabilirliğin iyi planlanmasıdır. Her disiplinin kendi iş akışı, girdi ve çıktılarının farklı olması verilerin ve programdan programa geçen model/verinin doğru bir uyumda çalışması önemlidir.



**Şekil 3.8** Çakışma analizi (Silicon Consultant, t.y.)

İnşaat sürecinde YBM, saha koordinasyonu ve sahaya özgü problemlerin çözülmesi, planlanması için kullanılmaktadır. (Şekil 3.9) CLT özelinde düşünüldüğünde, yapı elemanlarının sahaya nasıl taşınacağı, nasıl yerleştirileceği, lojistik ve vinç planlaması yapılırken YBM'nin uygulanması son derece önemlidir.



**Şekil 3.9** Saha koordinasyonu ve zaman simülasyonu (Wintour, 2022)

Sahaya getirilen CLT panellerinin montaj işleminin yapılması, zaman ve uygulamanın planlanması gerekmektedir. Zaman simulasyonu Navisworks gibi YBM yazılımları kullanılarak yapılabilmektedir.

### 3.3.4 İnşa Edilebilirlik ve Analizler

CLT panellerin kullanıldığı ahşap bir yapı, proje sürecinde pek çok farklı faktöre karşı test edilmek durumundadır. Yapılan araştırmalara göre önemli görülen testlerden bazıları yangın, deprem, rüzgar, inşa edilebilirlik ve dayanıklılık testleridir (Yuan vd., 2018). Bu bağlamda inşaat sürecinde yapının tamamı teste tabi tutulamayacağı için, yapının bir bölümünü temsilen 1:1 ölçekli prototip yapı örnekleri oluşturulmaktadır. Bu prototipler mock-up olarak adlandırılır ve yapılan testler sonucunda asıl binanın performansı hakkında fikir vermektedir. (Şekil 3.10)



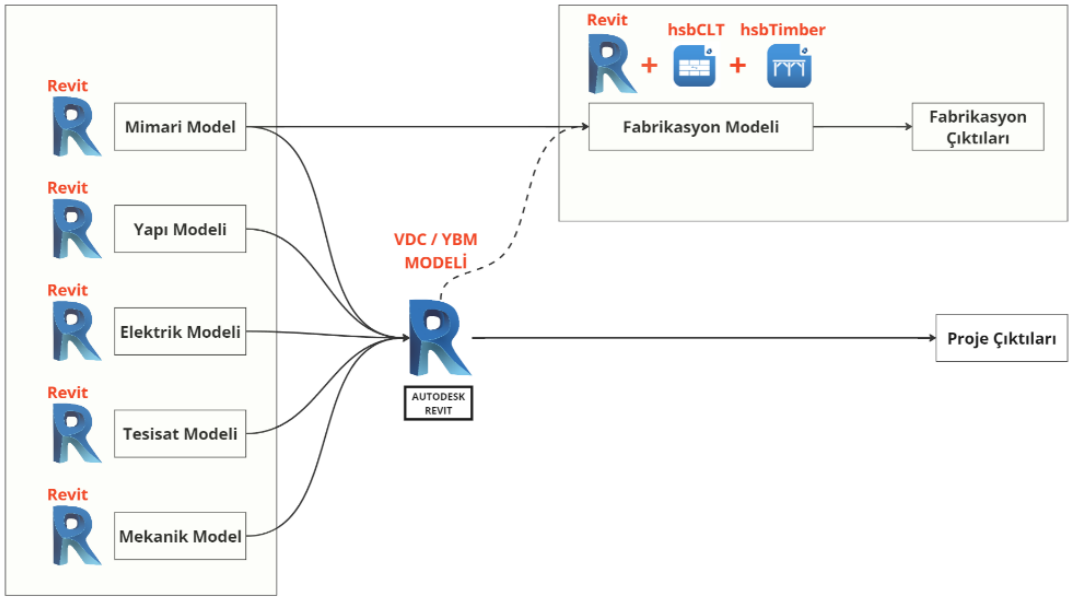
**Şekil 3.10** Brock Commons binası mock-up modeli ve inşaatı (CadMakers, t.y.; NaturallyWood, 2016)

Asıl yapıya dair problemlerin görülmesi, test edilmesi ve asıl yapıda ortaya çıkabilecek sorunların mock-up aşamasında çözülüyor olması önemlidir. Mock-up modelleri inşaat ve fabrikasyon sürecinin gerektirdiği model seviyelerinde yapılmaktadır. Montaja dair simülasyonlar ve uygulama detaylarının geliştirilmesi için kullanımı da söz konusudur. Tasarım sürecinde yapının işlevi, boyutu, formu ve bulunduğu yerden kaynaklanan bir takım tasarıma dair kararların alınması, üretim ve inşaat süreci ile de doğrudan veya dolaylı olarak bağlantılıdır. Örneğin bir yapının işlevinin ne olduğu; yangın dayanımını ne kadar sağlaması gerektiğini ilgili yönetmelik ve standartlarca belirlemektedir. Bulunduğu yer, zemin yapısı ve deprem gibi faktörler tasarım ile ilgili kararların yanı sıra, birleşim noktalarındaki montaj çeşidini, yapının taşıyıcısını, malzemeyi, panellerin özellik ve boyutlarını etkilemektedir. Tasarım kararlarının alınması ve YBM tasarım modelin oluşturulması ile beraber bu konularda çeşitli testler, kontroller yapılabilmektedir. Bu da yine çeşitli ybm platformları kullanılarak sürecin kontrol ve analizini sağlamaktadır. Yapılan analizler tasarım, üretim ve inşaat sürecinin getirdiği gereklilikleri göz önüne alarak, geri dönüşleri tasarımcı, mühendis ve uygulayıcıya iletilmekte ve koordinasyon doğru biçimde sağlanmaktadır. CLT panellerin kullanıldığı bir yapıda, bazı paneller taşıyıcı nitelikte olabilmektedir. Panellerin taşıyıcı nitelik kazanması, strüktürel analizin bu bağlamda yapılmasını gerektirmektedir. Taşıyıcıya dair bazı analizler Tekla Structure gibi çeşitli yazılımlar kullanılarak yapılabilmektedir. Bu bağlamda YBM'nin sürece entegrasyonu farklılık göstermekte ve özelleşmektedir.

### 3.3.5 Üretim Süreci ve Üretim Modeli Koordinasyonu

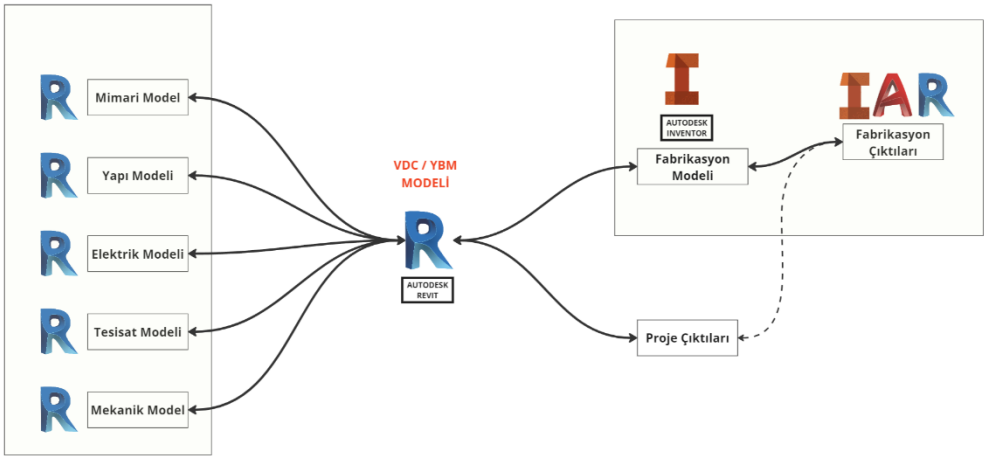
Projenin üretim aşamasına geçildiğinde, YBM seviyesinin LOD400 düzeyinde olması beklenmektedir. Bu model seviyesi, tüm yapı elemanı ve montaj bileşenlerinin, en detaylı şekliyle, yüksek geometrik hassasiyette modellenmesini gerektirmektedir (Abolghasem vd., 2018). Kuruluma dair tüm detaylar, açılacak vida ve montaj delikleri, üretime dair üreticiden gelen parametreler ve veriler oluşturulacak fabrikasyon modeline işlenmektedir. Bu model seviyesinin oluşturulması ve detaylandırılması üretim sürecini destekleyen YBM yazılımlarında ve platformlarında yapılabilmektedir. Bu noktada doğru yazılımın seçilmesi son derece önemlidir. Çünkü bu detay seviyesinde bir model, içerdiği veri ile beraber ağır bir dosya haline gelebilmektedir. Bu detay seviyesini ve üretim sürecini destekleyen çeşitli YBM yazılımları bulunmaktadır. Üretim sürecinde model gereksinimleri ve diğer çıktılar göz önünde bulundurularak kullanılacak platformun seçilmesi ve kurgunun hazırlanmasının yanı sıra, bu sürecin tasarım ve inşaat sürecinde kullanılan yazılımlarla olan ilişkisi ve proje kurgusunun da doğru yapılması önemlidir. YBM tabanlı oluşturulacak iş akışı, proje özelinde farklılaşabilmektedir. Programların birlikte nasıl çalıştığı ve YBM tabanlı bir proje koordinasyon sürecinde üretim modeli ve çıktıları ile nasıl bir ilişki kurduğu kullanılan yazılımlara göre farklılık göstermektedir. Ahşap yapılar için CLT yapı elemanları özelinde bütün süreçleri baştan sona kapsayan tek bir platform bulunmamaktadır. Bu durum tasarım'dan fabrikasyona olan süreçteki model koordinasyonunu zor ve karmaşık hale getirebilmektedir. Model ve proje koordinasyon sürecinde, günümüzde en yaygın kullanılan YBM yazılımlarından biri Autodesk Revit yazılımıdır. Proje sürecinde tasarım ve inşaat aşamasında LOD seviyesini karşılayabilecek modellerin oluşturulması ve modellerin birbirleri ile koordinasyonu, ekiplerarası koordinasyon Revit ve Autodesk'in diğer yazılımları beraber kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Autodesk Revit kendi başına LOD400 hassasiyetinde üretim modeli oluşturmak için yeterli değildir ve geometrik hassasiyeti desteklememektedir. Proje sürecinin yaygın olarak bu yazılım üzerinden yürütüldüğü göz önüne alınarak, üretim süreci için Revit ile entegre çalışabilecek çeşitli çözümler geliştirilmiştir. Bunlardan bir tanesi, Revite entegre çalışan eklentilerin geliştirilmesidir. Agacad ya da HSBCad gibi bazı firmaların geliştirdiği ahşap ve CLT yapılar özelindeki eklentiler sayesinde proje sürecinin

yürütüldüğü sanal tasarım ve inşaat modeli ya da doğrudan mimari modeli kullanarak, yeni bir sekmede LOD400 seviyesinde üretim modelleri oluşturulabilmektedir. (Şekil 3.11)



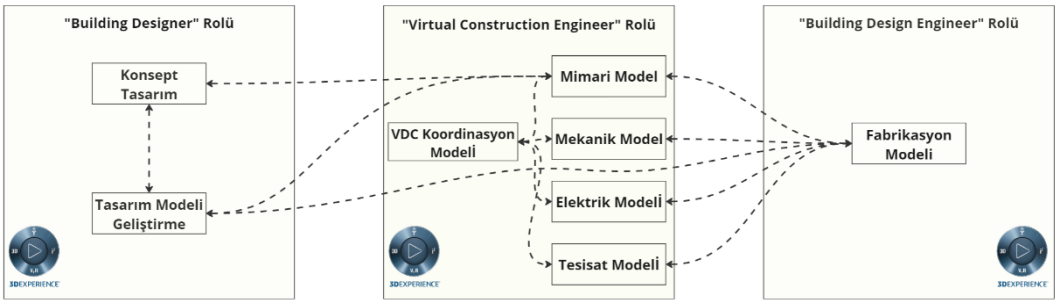

**Şekil 3.11** hsbCLT ve hsbTimber eklentileri ile üretim süreci

Bu modellere bağlantı elemanları eklenebilmekte, üretime dair standartlar ve üreticiden gelen veriler girilebilmekte, mekanik ekipmanların koordinasyonu ile CNC kullanılarak açılacak boşluklar eklenebilmektedir. Bu proje süreci, tasarım, inşaat ve üretim modellerinin tek bir platformda bulunması ve eklenti kullanıldığı için veri geçişinin tek bir yazılım içerisinde yapılmasını sağlamaktadır. (Şekil 3.12) Süreç koordinasyonu, aynı yazılım firmasına ait çeşitli yazılım ve platformların birbirleriyle veri geçişini sağlayacak şekilde kurgulanabilmektedir. Bu iş akışında, yazılımların birbirleriyle çalışabilirliği yüksektir ve kendi içerisinde bağlantı seçeneği ile eş zamanlı olarak güncelleme, takımların aynı anda beraber çalışabilmesi gibi faydalar sağlamaktadır. Autodesk'in kendi ürünleri arasında Revit, Inventor, Navisworks, Autocad gibi yazılımlar tasarım, inşaat ve üretim süreçlerinde beraber kullanılmaktadır. Bu kurguda Inventor programı, kural tabanlı üretim modeli ve çıktılarını oluşturmaya yarayan bir program olduğu için üretim sürecinde kullanım için uygun görülmektedir.




**Şekil 3.12** Inventor ve Revit entegrasyonu ile üretim süreci

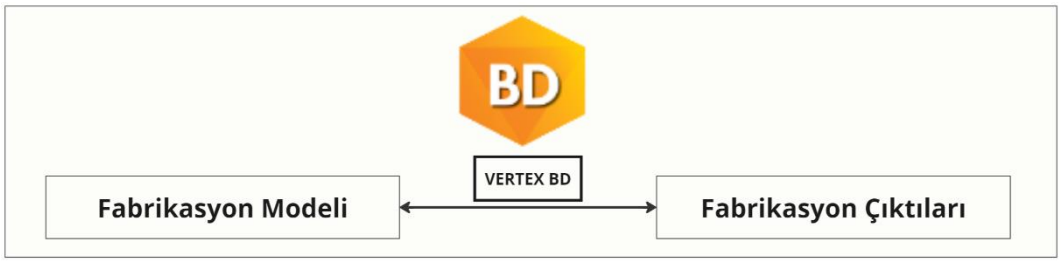
Benzer bir mantıkla daha detaylı ve disiplinlerarası çalışmayı sağlayan, bulut tabanlı bir platform olan 3DExperience platformu kendi içerisinde roller tanımlamakta ve her bir rolün içerisinde yapılabilen proje özelinde uygulamalar yapmaya imkan sağlamaktadır. Bu platform uçak ve otomotiv sanayisi için sıkça kullanılan ve bu sebeple üretim endüstrisinin gerektirdiği ilkeleri, model detay seviyesi ve gerekli koordinasyon sürecini desteklemektedir. Bu sebeple CLT modüler yapılar ve diğer ön üretime dayalı yapılar için de kullanılabilmektedir. Uygulamalar, modeller ve roller arası geçişin bütüncül ve kolay olduğu platformda, tasarımdan fabrikasyona tüm aşamalar arası geçiş esnek ve yatay bir ilişkiye sahiptir. (Şekil 3.13)




**Şekil 3.13** 3D Experience platformlarının VDC sürecinde üretim ile ilişkili olarak kullanılması

Sürecin yazılımlar için üretilen eklentiler ile sağlanabilmesi ya da farklı yazılımların birlikte kullanılarak bir süreç oluşturulması, sürecin bütüncül düşünüldüğü çözümlerdir. Bunun dışında CLT'nin kullanıldığı bir yapının, üretim modeli ve çıktılarını oluşturmak için tek başına kullanılan yazılımlar da mevcuttur. Burada üretim modeli, inşaat ve tasarım süreci veya modellerinden bağımsız olarak

modellenebilmektedir. Vertex BD yazılımı buna örnek verilebilir. Modelin en baştan tüm detaylarıyla yapılabilmesi, ahşap için özelleşmiş bir yazılım olması üretim çıktılarının optimizasyonu için olumlu bir avantaj sağlamaktadır. (Şekil 3.14)




**Şekil 3.14** Vertex BD programı kullanılarak doğrudan üretim modeli oluşturulması

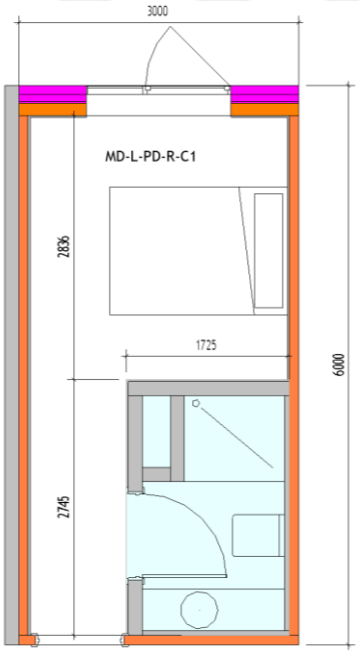
### 3.3.6 Üretim Çıktıları

Üretim süreci, tasarım ve inşaat kararları doğrultusunda, üreticinin verdiği parametreler de sürece eklenerek fabrikada ön üretimli yapı elemanlarının doğru ve optimize bir süreçte üretilmesi, sahaya getirilen bu parçaların planlanan kurguda montajının gerçekleştirilmesi faaliyetlerini içermektedir. Üretim süreci için hazırlık evresinde, model ve çizimlerin doğru olması, fabrikada bu veriler kullanılarak üretim yapılacağı için son derece önemlidir. Doğru bir iş akışı ile YBM'nin sürece uygulanması olası hataların önüne geçmekte bu da zaman ve maliyet kayıplarını engellemektedir. Süreç içerisinde, tasarımcı ve mühendis dışında üretici ve çeşitli teknik aktörler de sürece dahil olmaktadır. Fabrikasyon modelinin oluşturulma aşamasında, aktörler arası koordinasyonu ve sürecin nasıl yürütülmesi gerektiğinin planlaması YBM kullanılarak yapılabilmektedir. Bu süreçte özellikle proje ve tekniğin verdiği karmaşık ve spesifik verilerin, girdi ve çıktıların fazla ve detaylı olmasının verdiği karmaşık süreç YBM'nin kullanılmasını önemli ve gerekli kılmaktadır.

# 4
# AHŞAP YAPILARDA SANAL TASARIM VE YAPI BİLGİ MODELLEME UYGULAMASI

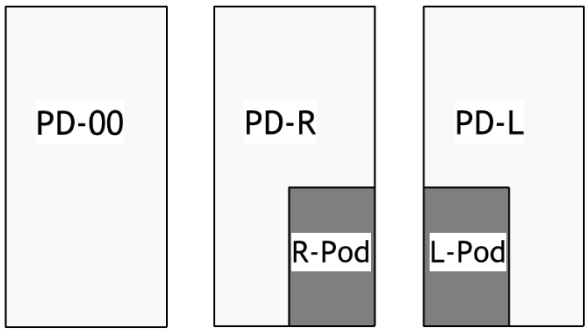
## 4.1 Projenin Sunumu

Araştırma kapsamında ahşap modüler sistem ile üretilen tekrar eden volümetrik ahşap modüllerden oluşan 6 katlı hibrit bir bina tasarlanmıştır. Bina kütlesi iki parçadan oluşup modüler kısma odaklanılmıştır. Tekrar eden fonksiyonlara uygun olacak şekilde modüller konaklama birimleri ve çalışma birimleri olarak işlevlendirilmiştir. (Şekil 4.1)



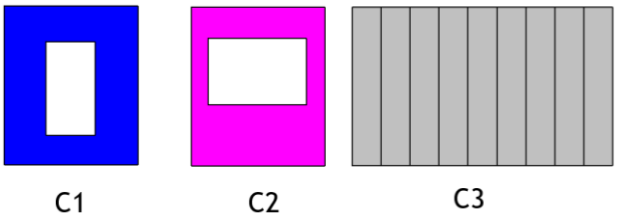

**Şekil 4.1** 3x6 modül konaklama birimi plan

Lojistik parametreler göz önüne alınarak 3x6 m boyutlarında tekrar eden volümetrik modüller, CLT döşeme ve duvar dolu panellerden oluşmaktadır. Herhangi bir kolon kiriş sistemi olmadan fabrikada hazırlanan bitmiş modüllerin sahaya getirilerek inşaat işleminin gerçekleştirileceği öngörülmüştür. Modül çeşitleri ıslak hacim(pod) türü ve konumu göz önüne alındığında 3 çeşit olarak kategorize edilmiştir. (Şekil 4.2)



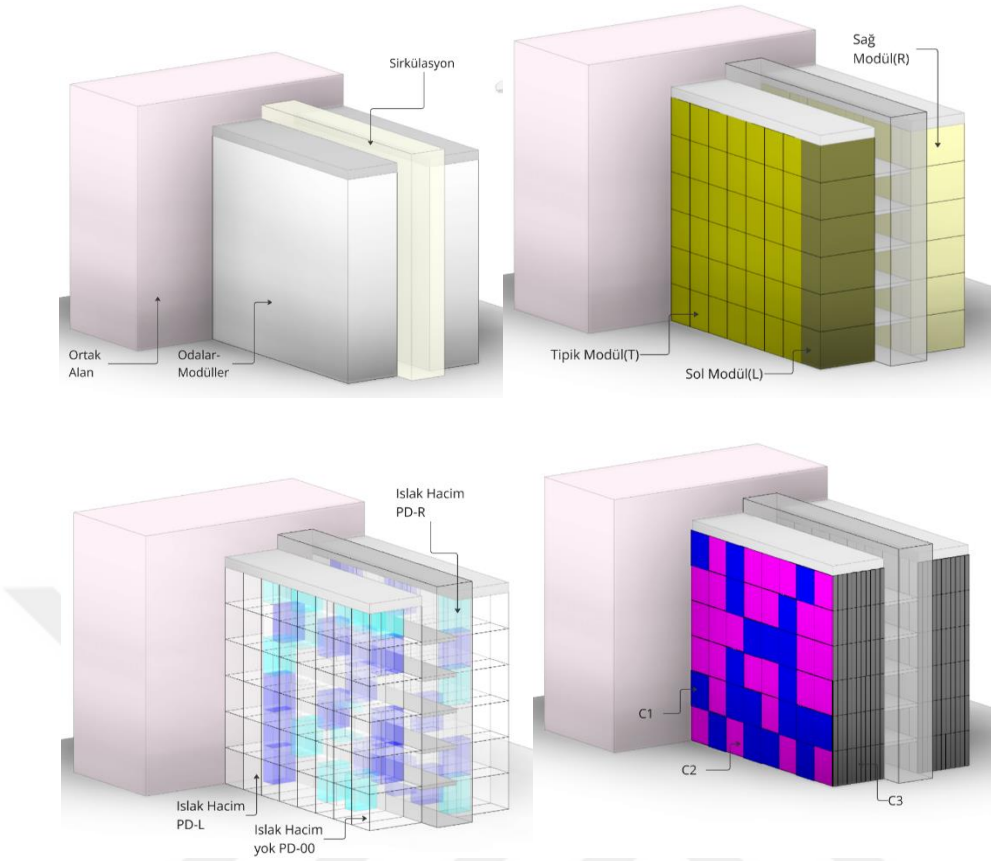

**Şekil 4.2** Islak hacim pod çeşitlerine göre modül tipleri

Bunlardan her ikisinde pod bulunmakta olup lokasyon olarak sağ veya solda olmasına göre türü değişmektedir. Diğer modül çeşidinde ise pod bulunmamaktadır. Modüllerin çeşitlenmesini sağlayan bir diğer kriter de cephe tipinin değişiyor olmasıdır. Pencerenin takıldığı C1 ve C2 cephe sistemleri ve pencerenin olmadığı C3 cephe sistemi kullanılarak modüller çeşitlenmektedir. (Şekil 4.3)



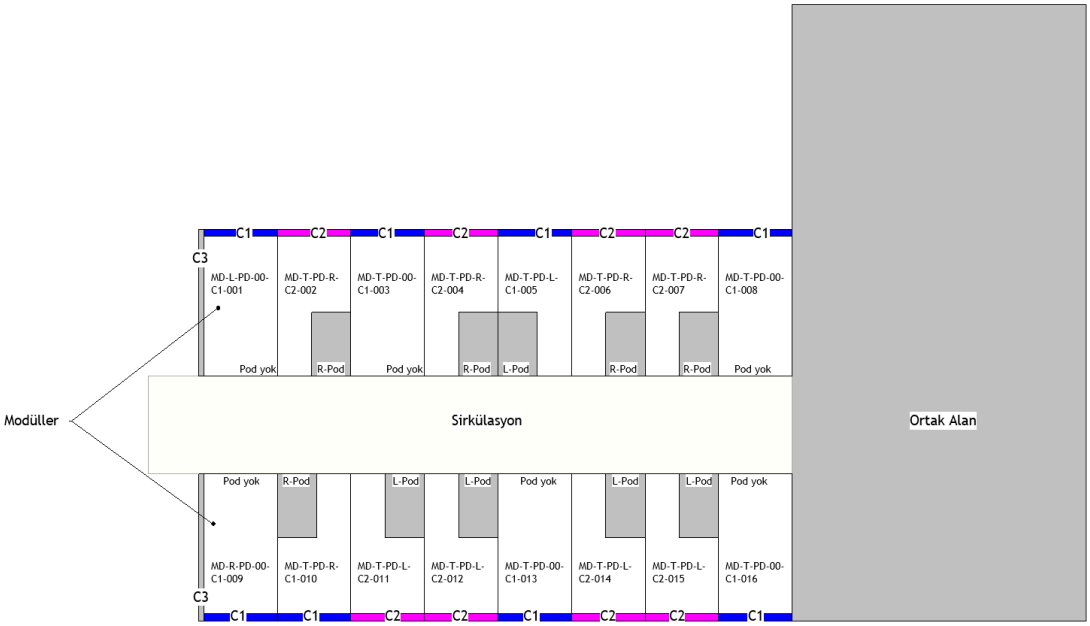

**Şekil 4.3** Cephe çeşitleri

Gösterilen cephe çeşitleri için, CLT kompozit ahşap panel sistemi seçilmiştir. Dış cephenin hibrit seçilmesinin sebebi araştırmalar doğrultusunda dış etkenlere karşı dayanımın daha iyi olması, sahada bağlantı noktalarına müdahale gerektirmemesidir. Her üç cephe türü için dış cephe kaplaması olarak ahşap panel sistemi seçilmiş olup panel genişlikleri birbirinden farklıdır. Cephe kaplaması, aluminyum çerçeve sistemi, ısı ve su yalıtımı ve CLT panel cepheyi oluşturan elemanlardır. Modüller, yapıda bulundukları lokasyona göre sağ, sol veya tipik modül olarak adlandırılmıştır. (Şekil 4.4)

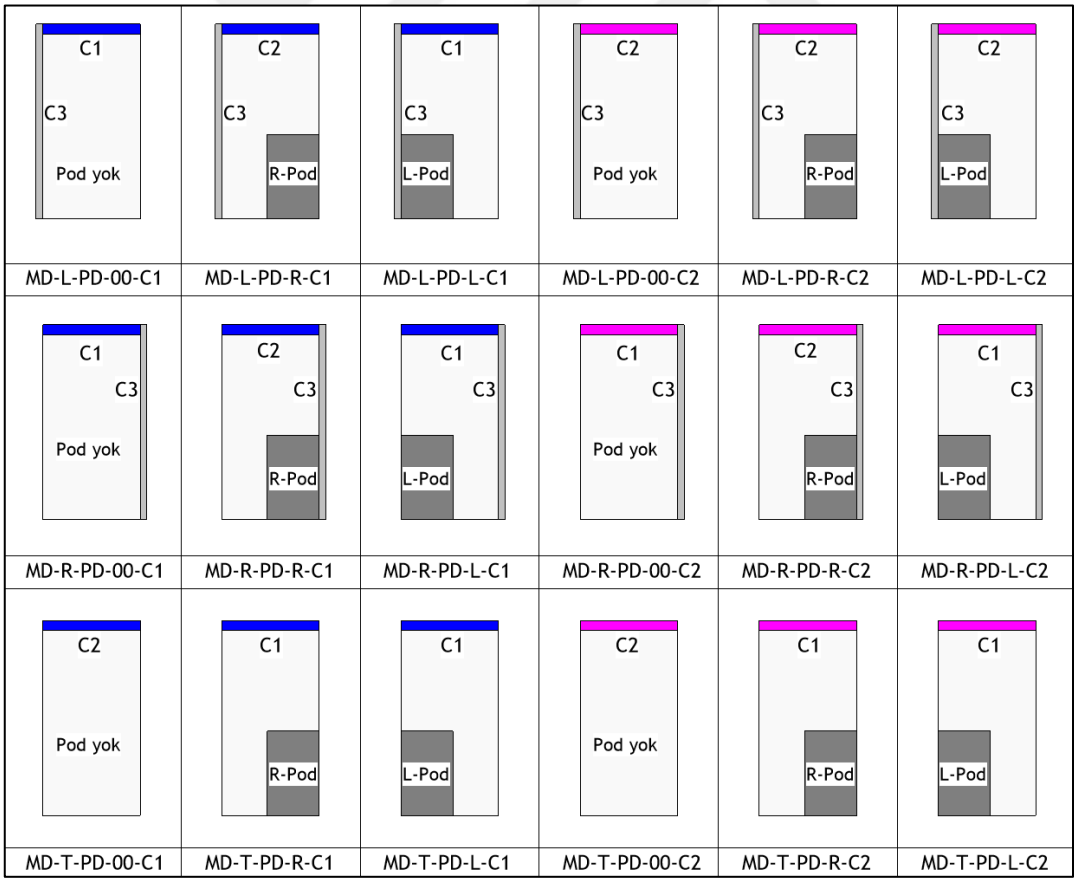



**Şekil 4.4** Belirlenen bileşenlere göre modül tipleri

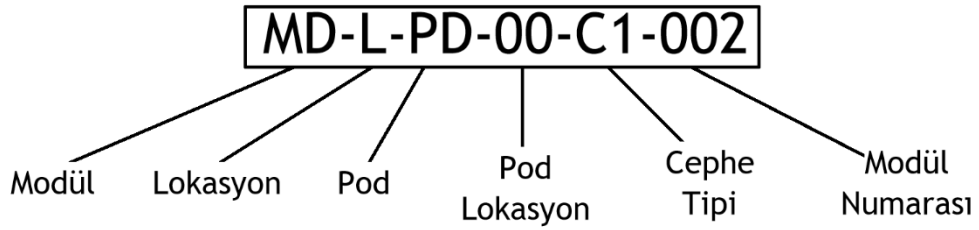
Modül çeşitlerini görebilmek için tipik bir kat planı diyagramı oluşturulmuştur. Bu diyagram, oluşturulan örnek yapıda modüler olan kısmı, ortak alanı, sirkülasyonu, modül çeşitleri ile beraber göstermektedir. (Şekil 4.5) Belirlenen değişkenlere göre oluşturulan modül çeşitleri ve isimlendirmeleri diyagramatik bir şekilde çalışılmıştır. (Şekil 4.6) Her bir modül belirlenen değişkenlere ve binadaki yerine göre verilen özgün numarasına göre isimlendirilmiştir. (Şekil 4.7) Bu isimlendirmenin her bir modül için yapılması, modüllerin konum bilgisi, modülün sahip olduğu yapı elemanları, cephe tipi, pod tipi ve konumu, modülün sonraki aşamada üretim süreci için gerekli olan sınıflandırma ve çizelgenin çıkarılması için verinin oluşturulması amaçlanarak yapılmıştır. Yaygın kullanılan YBM platformlarından olan REVIT'te yapılan ilk çalışmada, her bir modülün duvar tipi, cephe tipi, pod tipi ve konumuna göre sınıflandırılan veri, parametreler kullanılarak verilmiş ve sonraki aşama için çizelge oluşturulmasında kullanılmıştır.




**Şekil 4.5** Tipik diyagramatik kat planı ve modül çeşitleri

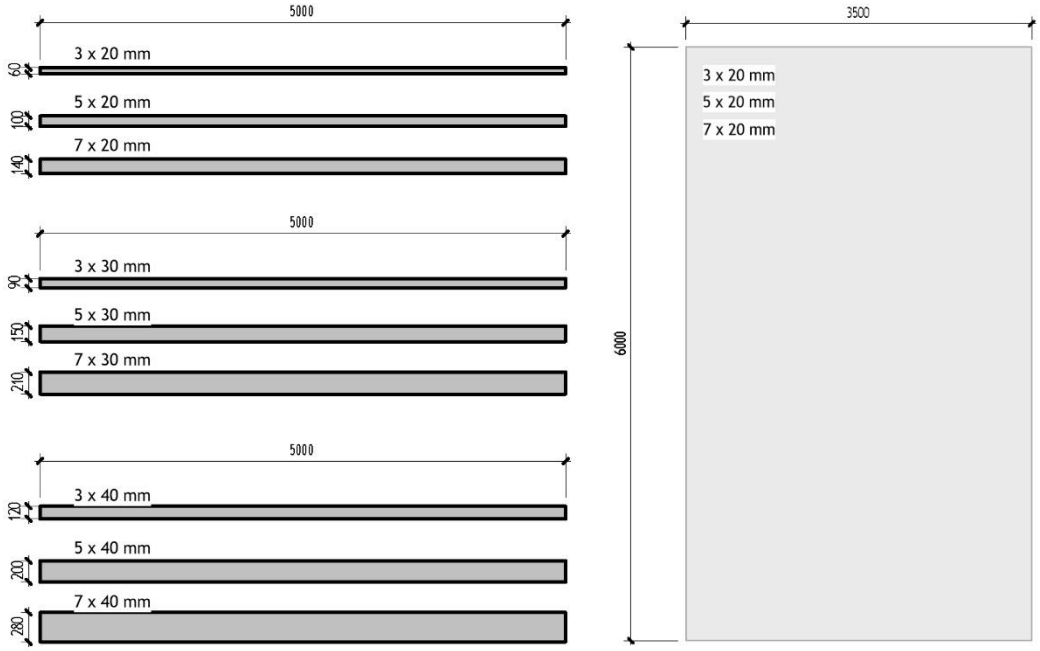



**Şekil 4.6** Belirlenen değişkenlere göre modül çeşitleri ve isimleri




**Şekil 4.7** Modüllerin belirlenen bileşenlere göre numaralandırılma stratejisi

Modülleri oluşturan CLT yapı elemanları duvar ve döşeme çeşitleri REVIT sistem aile elemanları (system wall family- system floor family) olarak oluşturulmuş ve kalınlık, katman sayısı, malzeme gibi bilgiler oluşturulan eleman kütüphanesine parametre ve tip olarak eklenmiştir. (Şekil 4.8) Oluşturulan bu tiplerden farklı kalınlık ve türlerdeki CLT duvar ve döşeme elemanları modüllerin oluşturulmasında kullanılmıştır.

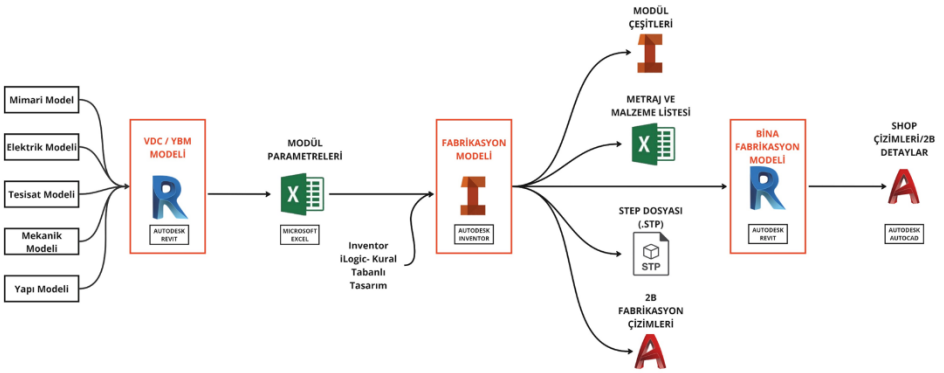



**Şekil 4.8** REVIT'te oluşturulan kütüphanede CLT duvar ve döşeme panel türlerini kalınlık ve katman sayısına göre gösteren plan diagramı

## 4.2 İş Akışı ve Kullanılan Programlar

Çalışılan projedeki iş akışı ağırlıklı olarak Autodesk ürünlerinden olan Revit, Inventor programlarında ve Microsoft Excel programı kullanılarak oluşturulmuştur. Bu programların seçilme sebebi, günümüzde en yaygın kullanılan YBM programlarından olması, veri geçişi ve birlikte çalışabilirlik özellikleri bakımından

uyumlu olmalarıdır. Projenin tasarım modeli ve bu aşamaya ait verinin Revit üstünden oluşturulması ve buradaki YBM verisi ve modüler projeye ait parametrelerin excel aracılığıyla Inventor ortamına aktarılması sağlanmıştır. Inventor'ın kural tabanlı ve parametrik modeller oluşturmaya olanak sağlayan ilogic özelliği kullanılmıştır. ilogic arayüzünde modüllerin bağlanan parametreleri ve Excel'den gelen veri ile fabrikasyon modellerinin Inventor ortamında oluşturulması ve çeşitlendirilmesi sağlanmıştır. Revit'ten alınan ve Inventor ortamında test edilen parametreler, ahşap modüllerin boyut parametreleri, CLT panellerin boyut, kalınlık ve açıklık ile ilgili parametreleri ile sınırlı tutulmuştur. CLT dolu panellerin duvar ve döşeme olarak kullanıldığı modüler ahşap yapıda, tasarım aşamasında Revit'te oluşturulan LOD300 veri ve geometri seviyesinin eş zamanlı olarak Inventor ortamında LOD450 seviyesinde parametrik olarak nasıl oluşturulabileceği test edilmiştir. Yapının genel kurgulanan tasarım ve üretim süreci arasındaki veri entegrasyonu şekilde gösterildiği gibidir. (Şekil 4.9)




**Şekil 4.9** Ahşap modüler yapı için kurgulanan iş akışı

Proje kapsamında ele alınan parametreler genel olarak boyutsal parametreler olarak çalışılmıştır. Parametrik olarak oluşturulan bu modüllere ait 3B ve 2B üretim çıktıları Inventor programı sayesinde elde edilebilmektedir. Bu çıktılar 3B fabrikasyon modelleri, metraj ve malzeme listeleri ve çizelgeleri, 2B fabrikasyon çizimleri, shop çizimleri, prototip fabrikasyon modelleri, kurulum ve analiz ile ilgili çıktılar olabilmektedir. Aynı zamanda oluşturulan fabrikasyon modelleri Revit ana çalışma dosyası(.rvt) veya Revit family dosyası(.rfa) olarak kaydedilebilir. Bu da

prototip ve binaya dair fabrikasyon modellerinin istenildiğinde Revit ortamına aktarılabilmesini sağlamaktadır. Buradan binaya ve prototip modele dair shop çizimleri elde edilebilmektedir.

## 4.3 Parametreler

Projelendirme süreci boyunca, farklı disiplinlerce oluşturulan modellerde her disiplinin, modüllerin tasarımına ve inşaatına dair kendi parametreleri ve süreçleri bulunmaktadır (Tablo 4.1). Boyut, malzeme, teknik özellikler, tasarımsal kararlar, yapı strüktürüne dair analizler ve kararlar bunlardan bazılarıdır. Projenin sürecinde, bu parametrelerin belirlenmesi, geliştirilmesi ve değiştirilmesi sürecin önemli bir parçasıdır. Yapılan araştırmalar doğrultusunda, örnek çalışma kapsamında bu süreç içerisinde modüllerin üretim aşamasını ve üretim çıktılarını etkileyebilecek bazı parametreler belirlenmiştir. Belirlenen bu parametreler, çapraz tabakalı modüler ahşap yapı panellerinin boyutu, konumu ve tipi ile doğrudan ilişkili olacak şekilde seçilmiş ve süreç bu çerçevede test edilmiştir.

**Tablo 4.1** Modülleri etkileyebilecek parametreler

| **Tasarım ve İnşaat Süreci Modeller** | **Üretim Sürecinde Modülleri Etkileyebilecek Parametreler** |
|---|---|
| Mimari Model | Mekansal boyut parametreleri, doluluk ve boşluk, yapı elemanları boyut ve malzeme parametreleri, tasarım kararları, fonksiyon |
| Yapı Modeli | CLT yapı elemanlarının yerleşimi, taşıyıcı özelliği, boyutu, CLT panel kalınlığı, katman sayısı, paneller arası bağlantı elemanları ve ilişkisi |
| Mekanik, Elektrik ve Tesisat Modelleri | Ekipmanların nereden ve nasıl geçtiği, açılacak boşluklar |

Mimari modelden ve mimari tasarım ve inşaat sürecinden gelebilecek parametreler, modüllere dair mekansal ve boyutsal parametreler, CLT panellere kapı ve pencere için boşluk açılması, tasarıma dair kararlar ve fonksiyonel parametrelerdir. Fonksiyonel parametrelerin CLT ahşap panellerin tipini, boyutunu ve malzemesini etkilyebileceği ön görülmüştür. Örneğin ıslak hacim olan modüllerde podlar hazır olarak gelmekte ve podun konumuna göre tesisat için duvar ve döşemelerde boşluklar açılması gerekebilmektedir. Çapraz tabakalı panellerin kalınlığı, katman sayısı taşıyıcı fonksiyonuna ve bulunduğu yere göre değişiklik gösterebilmektedir. Aynı zamanda, yapı elemanlarının birbirleriyle bağlantısını sağlayan çeşitli çelik bağlantı elemanlarının kullanılması da yapısal parametre olarak belirlenmiştir. Mekanik, elektrik ve tesisat ekipmanlarının yerleştirilebilmesi için çapraz tabakalı ahşap paneller üzerinde boşluklar açılması gerekmektedir. Modül, ve CLT duvar, döşeme yapı elemanlarına dair LOD300 seviyesinde oluşturulan parametreler tablolaştırılmış ve Inventor ortamına aktarılmıştır. (Tablo 4.2, 4.3, 4.4)

**Tablo 4. 2** Modül parametre tablosu

| **Modül Parametreleri** | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Konum | | | Modül Numarası | Modül Genel Ölçüleri | | | Cephe Tipi |
| | | | | Genişlik | Yüseklik | Uzunluk | |
| Sağ(R) | Sol(L) | Tipik(T) | MD-L-PD-00-C1-001 | W | H | L | C1-C2-C3 |

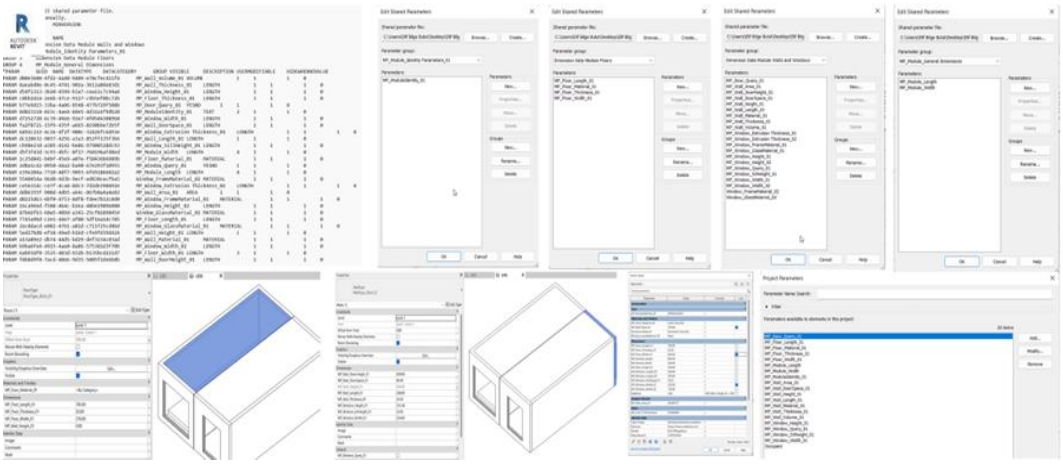
**Tablo 4. 3** Pod parametre tablosu

| **Pod Parametreleri** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Islak Hacim-Pod Konumu | | | Pod Ölçüleri | | |
| | | | Genişlik | Yükseklik | Uzunluk |
| Sağ(PD-R) | Sol(PD-L) | (PD-00) | PW | PH | PL |

**Tablo 4. 4** Duvar parametreleri- ölçüler

| **Duvar Parametreleri- Ölçüler** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Duvar Tipleri | Duvar Kalınlığı | Duvar Katman sayısı | Duvar Katman Kalınlığı | Duvar Yüksekligi | Duvar Uzunluğu |
| W1 | 6 CM | 3 | 2CM | H1 | L1 |
| W2 | 10 CM | 5 | 2CM | H2 | L2 |
| W3 | 12 CM | 5 | 2CM | H3 | L3 |
| W4 | 10 CM | 5 | 2CM | H4 | L4 |

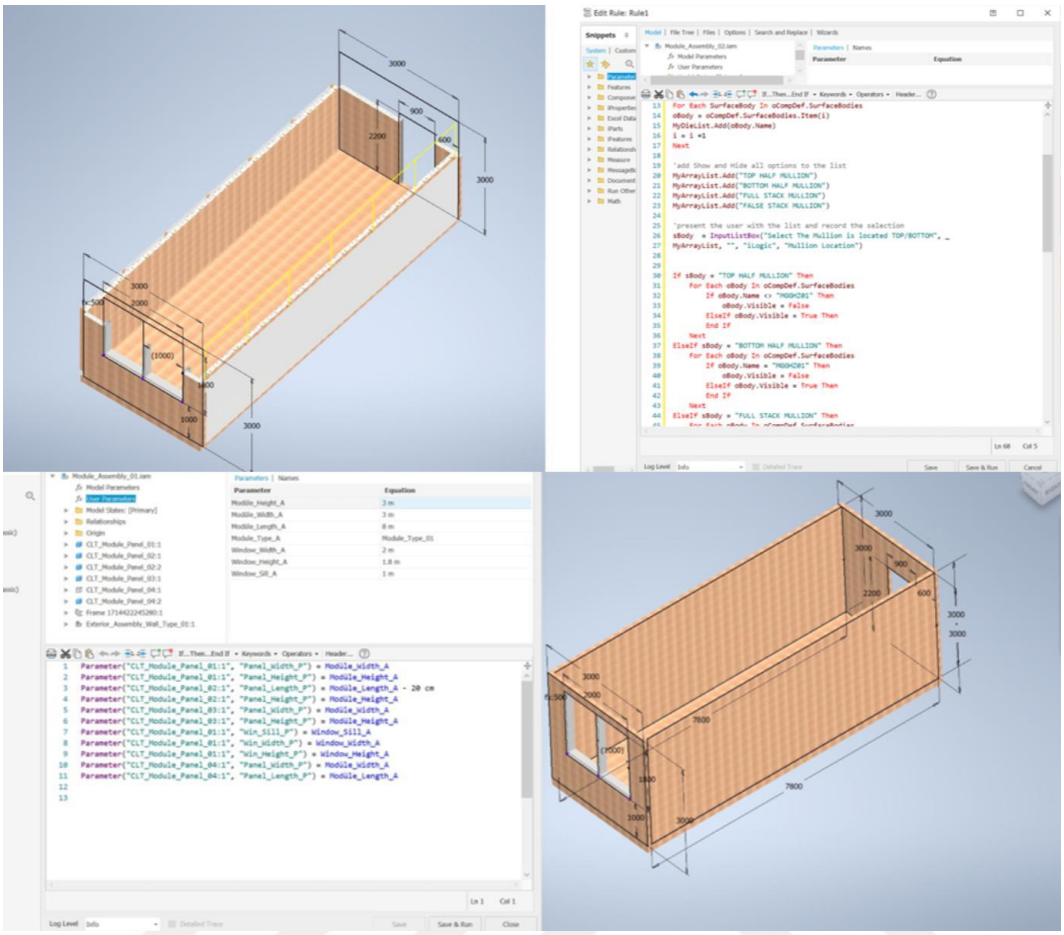
kategorilendirilmiş ve bu parametreler, YBM verisi olarak yapı elemanlarına atanmıştır. Bunun için Revit'te bulunan paylaşılan parametreler (Shared Parameters) özelliği kullanılmıştır. Bu parametre tipi, istenildiğinde dışa aktarılabilmekte ve başka programlar ya da başka Revit dosyaları için kullanılabilecek dış kaynak sağlamaktadır. Oluşturulan bu paylaşılan parametreler; yapı elemanlarının tipini, boyutunu, açıklığını, malzemesini ve konumunu belirtmektedir. Paylaşılan parametreler oluşturulduktan sonra bu parametreler her bir eleman kategorisinde proje içerisine alınmıştır. Bunun için proje parametreleri (Project parameters) özelliği kullanılmıştır. (Şekil 4.10)



**Şekil 4.10** Revit'te parametrelerin oluşturulması

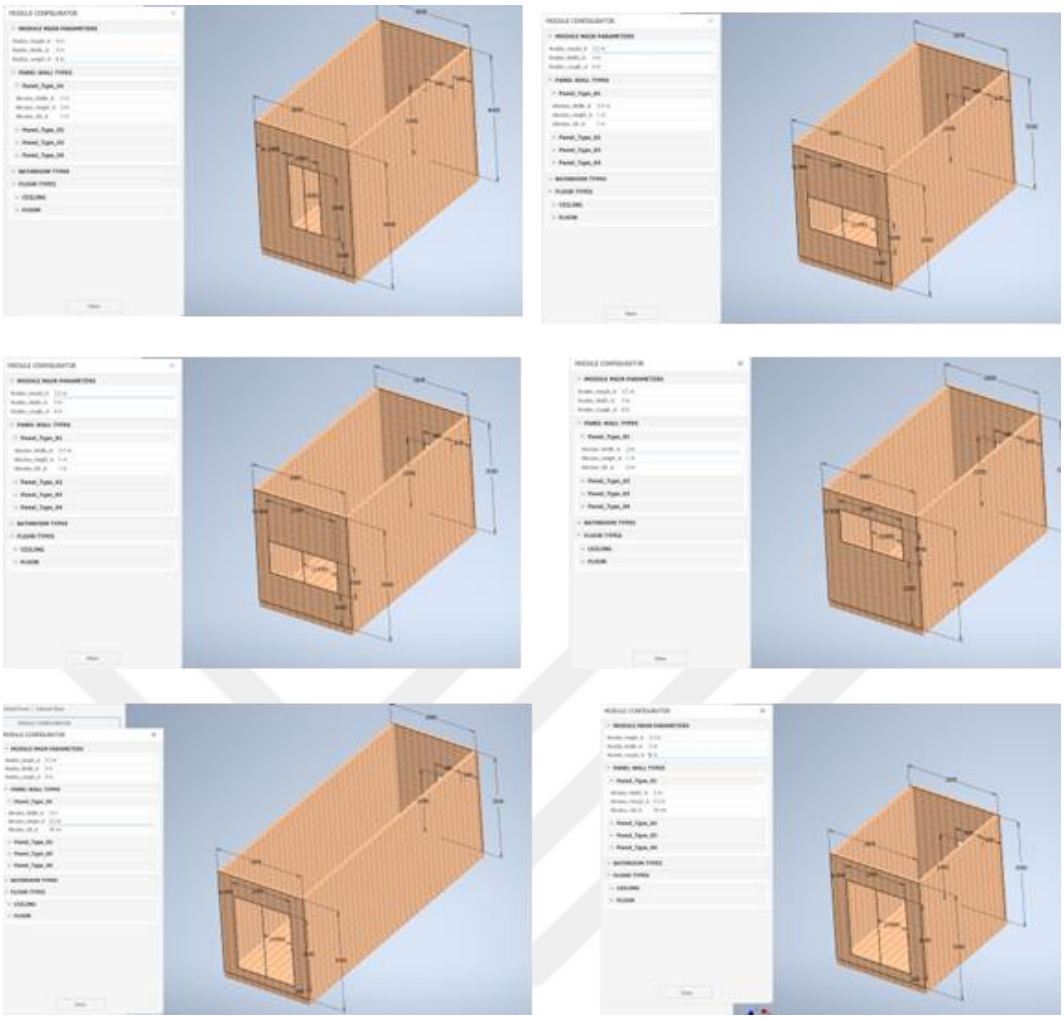
Her bir modül tipindeki yapı elemanlarına ait bu parametreleri ve parametre değerlerinin görülebileceği tablolar oluşturulmuştur. Ve bu tablolar her ahşap yapı paneli tipi için özelleştirilmiştir. Revit'te oluşturulan ve özelleştirilen bu tablolar Excel dosyası olarak dışa aktarılabilmektedir. Böylece belirlenen parametre tabloları ve içerisindeki verilerin Excel dosyası halinde oluşturulması sağlanmıştır.

Autodesk Inventor, bilgisayar destekli tasarım alanında 3B mekanik tasarım, simülasyon, görselleştirme ve belgelendirme için geliştirilmiş bir uygulama olup, parça-bütün montaj ilişkisine dayalı üretim modelleri ve çizimlerinin oluşturulmasına olanak sağlamaktadır. Yapılan test kapsamında, Inventor part(.ipt) ve Inventor Assembly(.iam) çalışma ortamlarında modüllerdeki yapı elemanları modellenmiş, Inventor ortamında takılmıştır. Her bir parça ve bütünün parametreleri vardır ve bu parametreler birbirine bağlanarak bir fabrikasyon modeli oluşturulmuştur. Parametrelerin bağlanma işlemi ilogic platformu kullanılarak yapılmıştır. Oluşturulan parametreler kullanılarak Inventor Forms özelliği sayesinde bir arayüz oluşturulmuştur. Bu arayüz ile de parametreler kontrol edilebilmektedir. Tasarım ve inşaat modellerinden dışa aktarılan veriler ile güncellenebilmekte ve fabrikasyon modülü parametrik bir şekilde oluşturulabilmektedir. Ilogic, parametreler arasındaki ilişkiyi yeniden yapılandırıp basit ve karmaşık kuralların tanımlanabilmesine olanak sağlamaktadır. (Şekil 4.11)



**Şekil 4.11** Inventor ortamında modüllerin fabrikasyon modelinin oluşturulması

Oluşturulan parametreler ile modüllerin fabrikasyon modellerinin hazırlanması sağlanmıştır. Girilen verilere göre otomatik olarak istenilen şekil, boyut ve parametrelerde modül modellerinin konfigürasyonları oluşturulmuştur. Yapılan testler hem arayüz üzerinden hem de Excel verisi üzerinden sağlanmıştır. Modüllerin boyutlarının ve buna bağlı olarak her bir çapraz tabakalı ahşap panelin fabrikasyon çizimi, modeli ve ayarının otomatik olarak değiştiği görülmektedir. (Şekil 4.12)



**Şekil 4.12** Inventor'da fabrikasyon modeli konfigürasyonlarının oluşturulması

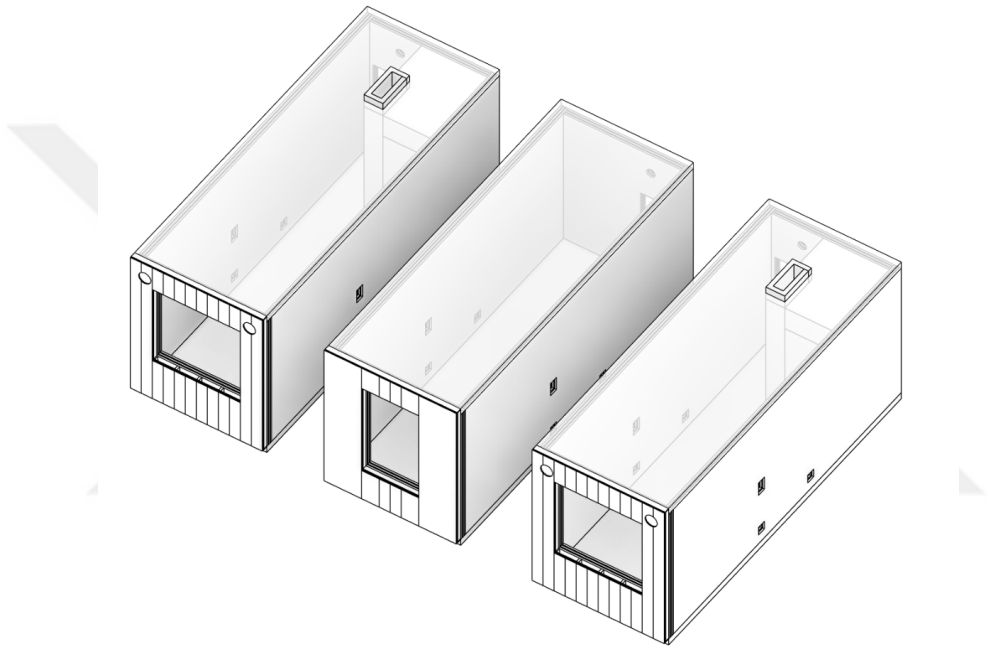
## 4.4 Proje Çıktıları ve Tartışma

Yapılan testte, hem tasarım hem de üretim süreci ayrı programlar kullanılarak eş zamanlı olarak gerçekleştirilmiş olup aradaki entegrasyonun üçüncü bir programla sağlanması verinin doğru ve verimli aktarılabilmesi konusunda sorun yaşanmasına sebep olmuştur. Tasarım ve inşaat model koordinasyonu için kullanılan Revit programı bu sürecin gerektirdiği YBM verisi ve LOD model gelişim seviyesini sağlamıştır. Bunun yanı sıra Inventor programı CLT panellerin belirlenen parametrelerce üretim modellerinin oluşturulmasında kullanılmıştır. Veri geçişi konusunda zaman zaman modelleme hataları yaşanmıştır.

Üretim ve tasarım süreçlerinin her ikisi için de kendi içinde bir ön parametrik hazırlık yapılması ve kütüphanenin oluşturulması, verinin standardize edilerek tekrar kullanımına imkan sağlamıştır. Standartların ve kütüphanelerin başta

oluşturuluyor olması her iki sürecin de paralel yürümesine olumlu etkide bulunmuştur.

Proje sürecinde tasarım çıktıları olan tasarım modeli, metraj listeleri, yapı elemanlarının tipi, boyutları ve açıklıklarına dair listeler elde edilmiştir. Üretim sürecine dair çıktılar olan LOD400 seviyesinde üretim modeli, montaj kurgusu, metraj ve üretime dair listeler elde edilmiştir. Bunun yanında modüllerin duvar ve döşeme yapı elemanları, parça seti (KoP) olarak ifade edilmiştir. Farklı çeşitlerdeki modüllerin detaylı üretim modelleri yapılmıştır. (Şekil 4.13)



**Şekil 4. 13** Oluşturulan bazı fabrikasyon modül tipleri

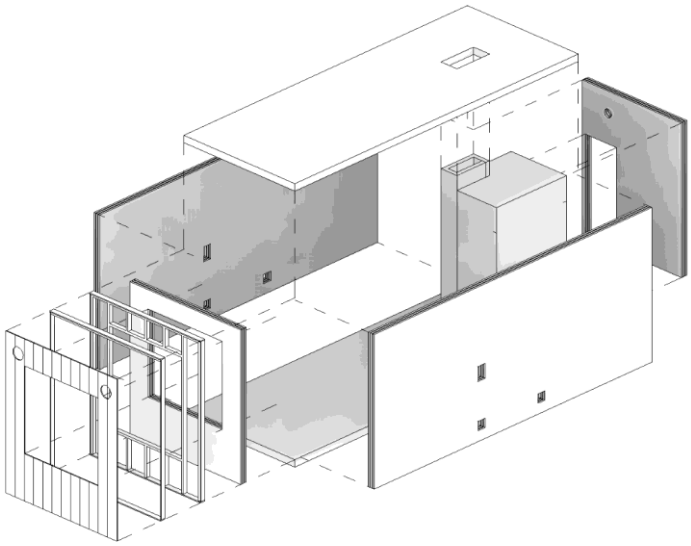
Inventor'da her bir yapı elemanı parça(part) ve bileşen(assembly) ilişkisinin belirlenen parametreler ile kurularak testi yapılmış, bu parametreler her bir eleman için ayrı ayrı girildiği ve modül bileşeninde bağlandığı için tek bir bileşen dosyasında(.iam) parametrik kontrol sağlanabilmiştir. Oluşturulan arayüz sayesinde, belirlenen parametreler kullanıcı tarafından kolayca değiştirilebilmiş bu da farklı tasarım modellerinin kolay bir şekilde oluşturulmasına olanak sağlamıştır.

Her bir parçanın KoP ve DfMA prensipleri göz önüne alınarak ön parametrik çalışmasının yapılması elemanların üretim sürecindeki montaj kurgusu ve şeklinin anlaşılabilmesine olanak sağlamıştır. DfMA odaklı tasarım yaklaşımından olan elemanların tekrara dayalı kullanımı, boyutların en başta araştırılan üretim

gerekliliklerine göre sınırlandırılması hem tasarım hem de üretim model sürecinin verimli yürümesini sağlamıştır.

Inventor programının ahşap ya da CLT özelinde olmamasından kaynaklı CLT'nin katmanlarının üretimi ve bu katmanların parametrik bir şekilde ifade edilmesi yapılamamıştır. Ahşap özelinde üreticiden gelebilecek bilginin panellerde tanımlanması söz konusu olmamış sadece belirlenen boyutsal parametrelerle sınırlı kalan bir test süreci yürütülmüştür.

Bu listeler, parametreler değiştikçe otomatik olarak güncellenebilmiştir. Her bir elemana ve modüle dair plan kesit görünüşler otomatik olarak hazırlanması sağlanmıştır. Hazırlanan bu çıktılar CAD dosyası olarak dışarı aktarılabilmektedir. Oluşturulan modeller fabrikasyon için gerekli olan step(.stp) dosyası olarak kaydedilebilmekte ya da Revit (.rvt ve .rfa) dosyaları olarak oluşturulabilmektedir. Bu da her bir modülün fabrikasyon modeli yapıldığında tasarım ve inşaat modelinden sonra Revit ortamında LOD400 seviyesinde fabrikasyon modelinin yapılabileceğini göstermektedir. Ayrıca Parça ve bütün arasındaki ilişki ve parçaların takılması ve montajının ilişkisi de program içerisinde planlanmış ve simüle edilebilmiştir. (Şekil 4.14)



**Şekil 4.14** Oluşturulan fabrikasyon modülü ve elemanların parça seti

# 5
# SONUÇ

Bu çalışmada, CLT'nin kullanıldığı ön üretimli ahşap yapılarda YBM'nin proje sürecinin farklı aşamalarında entegrasyonu incelenmiştir. Yapılan araştırmalar sonucunda, CLT'nin kendine özgü standart ve üretim parametrelerini içermesi sebebiyle tasarım ve üretim süreç koordinasyonunun proje sürecinin erken döneminden itibaren entegre edilmesinin süreç verimliliği açısından önem taşıdığı sonucuna varılmıştır. DfMA prensipleri doğrultusunda, üretim sürecinin tasarım aşamasıyla eş zamanlı olarak başlaması ve YBM'nin bu süreçte aktif olarak kullanılması, süreç koordinasyonu ve verimliliğini artırmaktadır. Yapılan çalışmada, Revit ve Inventor yazılımları CLT'nin kullanıldığı modüler bir yapıda tasarım ve üretim süreçlerinin paralel olarak yürütülmesini test etmek için kullanılmıştır. Yapılan test sonucunda seçilen programların YBM tabanlı olması tasarım ve üretim süreçlerindeki verilerin tanımlanması ve aktarımı konusunda kolaylık sağlamıştır. Ancak Excel gibi üçüncü bir araç üzerinden veri transferi yapılması, süreçleri karmaşıklaştırmış ve hata oranını artırmıştır. Bu nedenle, Revit ve Inventor'ın doğrudan canlı bağlantı yöntemiyle entegre edilmesi, verimliliği artırabilecek bir çözüm olarak önerilmektedir. Ayrıca, model detay seviyelerinin (LOD) her sürecin gereksinimlerine uygun olarak belirlenmesi ve kontrol edilmesi, hem tasarım hem de üretim süreçlerinin daha iyi yönetilmesini sağlamıştır. Tasarım ve inşaat sürecine dair parametrelerin belirlenmesi ve listelenmesini kolaylaştıran Revit yazılımı sayesinde yapı elemanlarının boyutları, tipi ve açıklıklara dair parametreler kolayca elde edilebilmiştir. Üretim süreci için kullanımı test edilen Inventor yazılımının parça-bütün ilişkilerini ifade eden modelleme yapısıyla üretim çıktılarında başarılı olduğu görülmüştür. Yapı elemanları arasındaki ilişkiyi parametrik bir şekilde kurmaya yarayan Inventor ilogic ile kural tabanlı parametrik modül sistemi oluşturulmuş ve bu sayede üretim modeli modül varyasyonları yaratabilecek şekilde kurgulanmıştır. Bununla birlikte, ilogic tabanlı modelleme sırasında dinamik ilişkilerin dikkatli kurulması gerektiği, aksi takdirde modelleme hatalarının oluşabileceği tespit edilmiştir. CLT yapı elemanlarına özgü kütüphanelerin oluşturulması ve parametrik verilerin optimize edilmesi, sistemin

daha akıllı hale getirilmesi için her iki programdaki süreçte önemli bir gereklilik olduğu sonucuna varılmıştır. Revit ve Inventor'ın birlikte kullanımıyla, hem tasarım hem de üretim süreçlerinin optimize edilebileceği görülmüştür. Çalışmada parametreler boyutsal olanlarla sınırlı tutulmuş ve CLT paneller özelinde gerçekleştirilmiş olup ileride diğer yapı elemanları ile beraber entegre edilebilir durumdadır. Test sürecinde, kullanılan programların seçiminin, programlararası veri geçişi için önemli olduğu ve süreci doğrudan etkilediği görülmüştür. Test sonucunda tasarım ve üretim süreçleri ayrı ayrı yürütülmüş, tasarım ve üretime dair çıktılar elde edilmiştir. Süreçlerin paralel bir şekilde yürütülüyor olması, tekrara düşmeden önceki süreçteki verilerin kullanılarak modellerin üretilmesini sağlamıştır. Modelleme ve veri kullanımında tekrarın azaltılması model koordinasyonunda verimlilik sağlamıştır. Yapılan araştırmalar ve test doğrultusunda, saha dışı inşaata dayalı olan CLT'nin kullanıldığı yapılarda YBM'nin uygulanabilmesi bu tür projeler için hız, zaman, maliyet ve sürdürülebilirlik açısından büyük bir katkı sağlamaktadır. Proje süreci, içinde birden fazla farklı aktörün ve farklı teknik iş akışlarının bulunduğu kendine özgü parametreleri ve çözülmesi gereken sorunları bulunan bir süreçtir. Bu süreçte ekipler ve kişiler arası koordinasyon, kullanılan programların birlikte çalışabilirliği, verilerin aktarılabilmesi ve model koordinasyonu için YBM'nin sanal tasarım süreci içinde uygulanmasının önemli ve gerekli olduğunu göstermektedir.

# KAYNAKÇA


Abanda, F. H., Tah, J. H. M., & Cheung, F. K. T. (2017). BIM in off-site manufacturing for buildings. *Journal of Building Engineering*, *14*, 89–102. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.10.002

Abrahamsen, R. (2017). Mjøstårnet Construction of an 81 m tall timber building. 23. Internationales Holzbau-Forum IHF. 27 Haziran 2024 tarihinde https://events.forum-holzbau.com/pdf/31_IHF2017_Abrahamsen.pdf adresinden erişildi.

Abrahamsen, R. (2018). Mjøstårnet 18 storey timber building completed. 24. Internationales Holzbau-Forum IHF. 27 Haziran 2024 tarihinde https://www.moelven.com/globalassets/moelven-limtre/mjostarnet/mjostarnet---18-storey-timber-building-completed.pdf adresinden erişildi.

Abrishami, S., & Martín-Durán, R. (2021). BIM and DfMA: A Paradigm of New Opportunities. *Sustainability, 13(17),* 9591. https://doi.org/10.3390/su13179591

Andersen, M. T., & Findsen, A.L. (2018). Exploring the benefits of structured information with the use of virtual design and construction principles in a BIM life-cycle approach. *Architectural Engineering and Design Management, 15(2),* 83–100. https://doi.org/10.1080/17452007.2018.1546165

Archello. (t.y.). Woodie Hamburg lobby/lounge by Primus developments. 5 Kasım 2024 tarihinde https://archello.com/project/woodie-hamburg-lobbylounge-primus-developments adresinden erişildi.

Arashpour, M., Wakefield, R., Abbasi, B., Lee, E. W. M., & Minas, J. (2016). Off-site construction optimization: Sequencing multiple job classes with time constraints. *Automation in Construction, 71,* 262–270. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.08.001

ArchDaily. (2020). Gallery of Universal Design Quarter in Hamburg / Sauerbruch Hutton. 27 Haziran 2024 tarihinde https://www.archdaily.com/944258/universal-design-quarter-in-hamburg-sauerbruch-hutton?ad_medium=gallery adresinden erişildi.

ArchDaily. (2020). Gallery of Wood Innovation. 27 Haziran 2024 tarihinde https://www.archdaily.com/630264/wood-innovation-design-centre-michael-green-architecture?ad_medium=gallery adresinden erişildi.

Arcilla, P. (2015, 18 Şubat). “A Kit of Parts”: Mobile Classrooms by Studio Jantzen. ArchDaily. 27 Haziran 2024 tarihinde

https://www.archdaily.com/599197/a-kit-of-parts-mobile-classrooms-by-studio-jantzen adresinden erişildi.

Blumer Lehmann. (t.y.). Modular timber construction. 27 Haziran 2024 tarihinde https://www.blumer-lehmann.com/en/implement-construction-projects/construction/modular-construction.html adresinden erişildi.

Borrmann, A., König, M., Koch, C., & Beetz, J. (2018). Building Information Modeling: Why? What? How? Building Information Modeling, 1–24. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92862-3_1

Brandner, R., Flatscher, G., Ringhofer, A., Schickhofer, G., & Thiel, A. (2016). Cross laminated timber (CLT): overview and development. *European Journal of Wood and Wood Products*, *74(3)*, 331–351. https://doi.org/10.1007/s00107-015-0999-5

Brock Commons Tallwood House Design Modeling. (2016). In naturally:wood. 27 Haziran 2024 tarihinde https://www.naturallywood.com/wp-content/uploads/brock-commons-design-modelling_case-study_naturallywood.pdf adresinden erişildi.

Brock Commons Tallwood House-The advent of tall wood structures in Canada. (2018). 27 Haziran 2024 tarihinde https://cwc.ca adresinden erişildi.

Brock Commons Tallwood House: Construction Overview Case Study | Case Studies Resources. (t.y.). Naturally:wood. 27 Haziran 2024 tarihinde www.naturallywood.com adresinden erişildi.

CE Center Multi-Story Wood Construction. (2024). Bnpmedia.com. 18 Kasım 2024 tarihinde https://continuingeducation.bnpmedia.com/courses/multi-aia/multistory-wood-construction/6/ adresinden erişildi.

Clt Cross Laminated Timber. (2015, 29 Haziran). CLT Safety. 27 Haziran 2024 tarihinde https://www.cltcrosslaminatedtimber.com.au/clt/safety adresinden erişildi.

CLT Hattı Çözümleri. (t.y.). Özen Makine Profile Finger Joint Technologies. 27 Haziran 2024 tarihinde https://www.ozenmakine.com.tr/cozumler/clt-hatti-cozumleri/ adresinden erişildi.

Crockett, L. (2016, 1 Eylül). "World's Tallest Timber Tower" Tops Out in Vancouver. ArchDaily. 27 Haziran 2024 tarihinde https://www.archdaily.com/794170/worlds-tallest-timber-tower-tops-out-in-vancouver adresinden erişildi.

Cross Laminated Timber (CLT). (t.y.). ExMaterials. 27 Haziran 2024 tarihinde https://exmaterials.com/en/materials/cross-laminated-timber-clt/ adresinden erişildi

Cross Laminated Timber Solutions - EN. (2023, 16 Haziran). Simpson Strong-Tie. 27 Haziran 2024 tarihinde https://www.strongtie.co.uk/en-UK/solutions/cross-laminated-timber-solutions-en adresinden erişildi.

Cross Laminated Timber Delivery Handling and Storage. (2020). In Smartlam North America. 27 Haziran 2024 tarihinde https://www.smartlam.com/resources/ adresinden erişildi.

Dangel, U. (2019). Timber 4.0: Open-Source Systems as a Democratic Tool for Designing and Building. 2019(1), 15. https://doi.org/10.7275/by2s-nm08

Design and Preconstruction Overview. (t.y.). In naturally:wood. 27 Haziran 2024 tarihinde https://www.naturallywood.com/resource/brock-commons-tallwood-house-design-pre-construction-case-study/ adresinden erişildi.

Dong, Y., Cui, X., Yin, X., Chen, Y., & Guo, H. (2019). Assessment of Energy Saving Potential by Replacing Conventional Materials by Cross Laminated Timber (CLT) A Case Study of Office Buildings in China. *Applied Sciences, 9(5)*, 858. https://doi.org/10.3390/app9050858

Dovetail. (2017, 5 Ekim). The Evolution of CLT Manufacturing in North America – Wood Design & Building. Wood Design Building. 27 Haziran 2024 tarihinde http://www.wooddesignandbuilding.com/the-evolution-of-clt-manufacturing-in-north-america/ adresinden erişildi.

Dreith, B. (2023, 3 Nisan). World's tallest timber tower replaced by forest growth "in less than 25 minutes." Dezeen. 27 Haziran 2024 tarihinde https://www.dezeen.com/2023/04/03/ascent-korb-associates-milwaukee-timber-revolution/ adresinden erişildi.

Ferdous, W., Bai, Y., Ngo, T. D., Manalo, A., & Mendis, P. (2019). New advancements, challenges and opportunities of multi-storey modular buildings – A state-of-the-art review. *Engineering Structures, 183(183)*, 883–893. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.01.061

Fernandez, A., Komp, J., & Peronto, J. (2020). Ascent - Challenges and Advances of Tall Mass Timber Construction. *International Journal of High-Rise Buildings, 9(3)*, 235–244. https://doi.org/10.21022/IJHRB.2020.9.3.235

Gasparri, E., & Aitchison, M. (2019). Unitised timber envelopes. A novel approach to the design of prefabricated mass timber envelopes for multi-storey buildings. *Journal of Building Engineering, 26*, 100898. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100898

Generalova, E. M., Generalov, V. P., & Kuznetsova, A. A. (2016). Modular Buildings in Modern Construction. *Procedia Engineering, 153(153)*, 167–172. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.098

Göknar Kereste – Özsoy Orman Ürünleri. (t.y.). Özsoy Orman Ürünleri. 27 Haziran 2024 tarihinde https://ozsoyorman.com/urun/goknar-kereste/ adresinden erişildi.

Haack, M. (2022, 15 Eylül). Mass Timber Construction | To the Top with Ascent: Milwaukee Wisconsin. 27 Haziran 2024 tarihinde https://www.cdsmith.com/mass-timber-construction-ascent-milwaukee-wisconsin adresinden erişildi.

Hairstans, R., Smith, R., & Wilson, P. (2018). The merits of varying forms of mass timber products for offsite and modular construction. Modular and Offsite Construction (MOC) Summit Proceedings. https://doi.org/10.29173/mocs38

Harte, A. M. (2017). Mass timber – the emergence of a modern construction material. *Journal of Structural Integrity and Maintenance, 2(3)*, 121–132. https://doi.org/10.1080/24705314.2017.1354156

Hasan, Z. G. (2017, 18 Eylül). Inside Vancouver's Brock Commons, the World's Tallest Mass Timber Building. ArchDaily. 27 Haziran 2024 tarihinde https://www.archdaily.com/879625/inside-vancouvers-brock-commons-the-worlds-tallest-timber-structured-building adresinden erişildi.

Hernández-Maetschl, S., Enso, S., Finland, R., & Jansson, E. (2023, 17 Ekim). Timber Transformation: Enhancing Sustainability and Efficiency with DfMA Principles. Puuinfo. 27 Haziran 2024 tarihinde https://puuinfo.fi/2023/10/17/timber-transformation-enhancing-sustainability-and-efficiency-with-dfma-principles/?lang=en adresinden erişildi.

Huang, L., Krigsvoll, G., Johansen, F., Liu, Y., & Zhang, X. (2018). Carbon emission of global construction sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 81(2),* 1906–1916. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.001

Kajstaden Tall Timber Building. (t.y.). C.F. Møller. 5 Kasım 2024 tarihinde https://www.cfmoller.com/p/Kajstaden-Tall-Timber-Building-i3592.html adresinden erişildi.

Kam, C., Song, M. H., & Senaratna, D. (2017). VDC Scorecard: Formulation, Application, and Validation. *Journal of Construction Engineering and Management, 143(3),* 04016100. https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0001233

Katus. (t.y.). The shocking truth about CLT. 9 Kasım 2024 tarihinde https://katus.eu/learn/courses/shocking-truth-about-clt adresinden erişilmiştir.

Kingspan (t.y.) Modular construction taking building services offsite. 26 Haziran 2024 tarihinde https://www.kingspan.com/gb/en/knowledge-articles/modular-construction-taking-building-services-offsite/ adresinden erişilmiştir.

Kose Kereste. (t.y.). Kereste. 27 Haziran 2024 tarihinde https://www.kosekereste.com.tr/kereste adresinden erişildi.

Ladin Ahşap Çıta. (2022, 10 Mart). 27 Haziran 2024 tarihinde https://plania.co/ladin-ahsap-cita-silinmis-kereste-ve-her-boyutta-tahta-cita/ adresinden erişildi.

Lang, O., Wilson, C., Blackman, C., Gillespie, R., Krieg, O. D., & Uddin, S. (2019). Development of a Design-Driven Parametric Mass Timber Construction System for Modular High-Rise Urban Housing. Modular and Offsite Construction (MOC) Summit Proceedings, 333–340. https://doi.org/10.29173/mocs111

Lehmann, S., & Kremer, P. D. (2023). Filling the Knowledge Gaps in Mass Timber Construction: Where are the Missing Pieces, What are the Research Needs? *Mass Timber Construction Journal, 6.* https://doi.org/10.55191/MTCJ.2023.1

LEVER Architecture. (t.y.). What is cross-laminated timber? 27 Haziran 2024 tarihinde https://leverarchitecture.com/innovation/what_is_crosslaminated_timber adresinden erişildi.

Lifelong Learning Institute. (t.y.). Built environment virtual showcase: Design. 27 Haziran 2024 tarihinde https://www.lli.sg/html/built-environment-virtual-showcase/design.html adresinden erişildi.

Liew, J. Y. R. (2018). Innovation in Modular Building Construction. https://doi.org/10.18057/icass2018.k.05

LLC, S. E. C. (t.y.). Significance Of 3D BIM Clash Detection In Construction Projects. Silicon Engineering Consultants LLC. 27 Haziran 2024 tarihinde https://www.siliconconsultant.com/blog/3d-bim-clash-detection-in-construction-projects.html adresinden erişildi.

Mass Timber Construction | Laminated Timber. (t.y.). Think Wood. 27 Haziran 2024 tarihinde https://www.thinkwood.com/mass-timber adresinden erişildi.

NAIOP. (2021, Summer). How Ascent is pushing mass timber to new heights. NAIOP. 27 Haziran 2024 tarihinde https://www.naiop.org/research-and-publications/magazine/2021/summer-2021/business-trends/how-ascent-is-pushing-mass-timber-to-new-heights/ adresinden erişildi.

Naturallywood. (t.y.). Whole building life cycle assessment professional (BCIT). 27 Haziran 2024 tarihinde https://www.naturallywood.com/events/whole-building-life-cycle-assessment-professional-bcit/ adresinden erişildi.

Naturallywood (t.y.). Brock Commons Tallwood House Construction Overview. 27 Haziran 2024 tarihinde www.naturallywood.com adresinden erişildi.

Naturallywood (2016). Brock Commons Tallwood House Design Modeling 27 Haziran 2024 tarihinde www.naturallywood.com adresinden erişildi.

Oliver David Krieg, & Lang, O. (2019). Adaptive Automation Strategies for Robotic Prefabrication of Parametrized Mass Timber Building Components. Proceedings of the ISARC. https://doi.org/10.22260/isarc2019/0070

Paskoff, C., Boton, C., & Blanchet, P. (2023). BIM-Based Checking Method for the Mass Timber Industry. *Buildings, 13(6),* 1474. https://doi.org/10.3390/buildings13061474

Peacock, A. (2023, 29 Mart). Top 10 tallest mass-timber buildings around the world. Dezeen. 27 Haziran 2024 tarihinde https://www.dezeen.com/2023/03/29/worlds-tallest-buildings-mass-timber-revolution/ adresinden erişildi.

Peacock, A. (2024, 2 Mayıs). Elding Oscarson creates CLT dome inside Swedish museum extension. Dezeen. 27 Haziran 2024 tarihinde https://www.dezeen.com/2024/05/02/wisdome-stockholm-elding-oscarson-clt-dome-museum-extension sweden/?li_source=LI&li_medium=bottom_block_1 adresinden erişildi.

Performance and Visual Mockup PMU/VMU - Skyklass. (2019, 31 Mayıs). Skyklass. 10 Kasım 2024 tarihinde https://skyklass.com/capabilities/performance-mock-up-pmu adresinden erişildi.

Pintos, P. (2020, 25 Şubat). Mjøstårnet The Tower of Lake Mjøsa / Voll Arkitekter. ArchDaily. 27 Haziran 2024 tarihinde

https://www.archdaily.com/934374/mjostarnet-the-tower-of-lake-mjosa-voll-arkitekter adresinden erişildi.

Prefabium. (2018, Aralık). “Woodie” student dormitory - Timber prefab modular building in Hamburg, Germany. 5 Kasım 2024 tarihinde https://blog.prefabium.com/2018/12/woodie-student-dormitory-timber-prefab.html adresinden erişildi.

Ravenscroft, T. (2023, 1 Mart). The Dezeen guide to mass timber in architecture. Dezeen. https://www.dezeen.com/2023/03/01/dezeen-guide-mass-timber-revolution/

Reinhardt, J. (2023, 29 Aralık). 2023 Level of Development (LOD) Specification. BIMForum. 27 Haziran 2024 tarihinde https://bimforum.org/2023-level-of-development-lod-specification/ adresinden erişildi.

Richmond, R. L. (2020). Highlighting the Unique Challenges and Differences of Building with Mass Timber. ResearchGate. 27 Haziran 2024 tarihinde https://www.researchgate.net/publication/342277279_Highlighting_the_Unique_Challenges_and_Differences_of_Building_with_Mass_Timber adresinden erişildi.

Salvadori, V. (2017). The Development of a Tall Wood Building. ResearchGate. 27 Haziran 2024 tarihinde https://www.researchgate.net/publication/329311346_The_Development_of_a_Tall_Wood_Building adresinden erişildi.

Şanlı, E., & Vural, N. (t.y.). Çapraz Lamine Ahşap (CLT) Yapı Malzemesinin Strüktürel Açıdan Değerlendirilmesi. Yapı Mimarlık Tasarım Kültür Sanat Dergisi. 27 Haziran 2024 tarihinde https://yapidergisi.com/capraz-lamine-ahsap-clt-yapi-malzemesinin-strukturel-acidan-degerlendirilmesi/ adresinden erişildi.

Şentürk, H. (2019). 21. yüzyılda üretilen çok katlı ahşap yapıların yapım sürecinin değerlendirilmesi [Yayımlanmış yüksek lisans tezi]. Yıldız Teknik Üniversitesi. Erişim adresi: https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/

Smith, R. E., Griffin, G., Rice, T., & Hagehofer-Daniell, B. (2017). Mass timber: evaluating construction performance. *Architectural Engineering and Design Management, 14(1-2),* 127–138. https://doi.org/10.1080/17452007.2016.1273089

Souza, E. (2021, 1 Nisan). BIM and Digital Design: A Closer Look at How Mass Timber goes from Factory to Building Site. ArchDaily. 27 Haziran 2024 tarihinde https://www.archdaily.com/956966/bim-and-digital-design-a-closer-look-at-how-mass-timber-goes-from-factory-to-building-site adresinden erişildi.

Staub-French, S., Poirier, E. A., Calderon, F., Imen Chikhi, Zadeh, P., Divyarajsinh Chudasma, & Huang, S. (2018). Building Information Modeling (BIM) and Design for Manufacturing and Assembly (DfMA) for Mass Timber Construction. ResearchGate. 27 Haziran 2024 tarihinde https://www.researchgate.net/publication/329337062_Building_Information_Modeling_BIM_and_Design_for_Manufacturing_and_Assembly_DfMA_for_Mass_Timber_Construction adresinden erişilmiştir.

Stora Enso. (t.y.). Find your concept. 27 Haziran 2024 tarihinde https://buildingconcepts.storaenso.com/en/find-your-concept adresinden erişilmiştir.

Thai, H.-T., Ngo, T., & Uy, B. (2020). A review on modular construction for high-rise buildings. *Structures*, *28*, 1265–1290. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.09.070

Think Wood. (t.y.). Brock Commons Tallwood House. Think Wood. 27 Haziran 2024 tarihinde https://www.thinkwood.com/construction-projects/brock-commons-tallwood-house adresinden erişilmiştir.

Think Wood. (t.y.). Building with Wood. 27 Haziran 2024 tarihinde https://www.thinkwood.com/ adresinden erişildi

The University of British Columbia (t.y.). Brock Commons Tallwood House. 27 Haziran 2024 tarihinde https://livinglabs.ubc.ca/projects/brock-commons-tallwood-house adresinden erişildi.

Tomasetti, T. (2024). Ascent tower: The evolution of mass timber construction. 5 Kasım 2024 tarihinde https://ccaps.umn.edu/search/results?query=ascent+tower adresinden erişildi.

Tucker, M. (2021, 3 Ağustos). Mass Timber Construction Study: Proving & Planning the Ascent Project. 27 Haziran 2024 tarihinde https://www.cdsmith.com/mass-timber-construction-study-proving-planning-the-ascent-building-project adresinden erişildi.

Tulonen, L., Karjalainen, M., & Ilgın, H. E. (2021). Tall Wooden Residential Buildings in Finland: What Are the Key Factors for Design and Implementation? In Engineered Wood Products for Construction. https://doi.org/10.5772/intechopen.98781

VietNam Wood. (2024, 11 Mart). Mercer Mass Timber Introduces Game-Changing Construction Services for Swift and Efficient Projects. 27 Haziran 2024 tarihinde https://vietnamwood.com.vn/mercer-mass-timber-new-divisions/ adresinden erişildi.

Wieruszewski, M., & Mazela, B. (2017). Cross Laminated Timber (CLT) as an Alternative Form of Construction Wood. *Drvna Industrija*, *68(4)*, 359–367. https://doi.org/10.5552/drind.2017.1728

Wintour, P. (2022, 14 Eylül). Mass timber: A case study in DfMA automation. Parametric Monkey. 27 Haziran 2024 tarihinde https://parametricmonkey.com/2022/09/14/mass-timber-a-case-study-in-dfma-automation/ adresinden erişildi.

Wood Central. (2023, 13 Haziran). Norwegian Mjøstårnet Tower Inspires Mass Timber Adoption. 27 Haziran 2024 tarihinde https://woodcentral.com.au/norwegian-mjostarnet-tower-inspires-mass-timber-adoption/ adresinde erişildi.

Wood Innovation and Design Centre. (t.y.). Think Wood. 5 Kasım 2024 tarihinde https://www.thinkwood.com/construction-projects/wood-innovation-and-design-centre adresinden erişildi.

Wood's Fire performance | Building & Construction | Naturallywood. (2024, 16 Eylül). Naturallywood. 5 Kasım 2024 tarihinde https://www.naturallywood.com/wood-performance/fire-performance/ adresinden erişildi.

WoodWorks "Ask an Expert" This Month: Two Q&As on Mass Timber Building Design. Civil Structural Engineer magazine. (2019, 1 Nisan). 24 Haziran 2024 tarihinde https://csengineermag.com/woodworks-ask-an-expert-this-month-two-qas-on-mass-timber-building-design/ adresinden erişildi.

WoodSolutions. (t.y.). Mjøstårnet mixed-use tower. 27 Haziran 2024 tarihinde https://www.woodsolutions.com.au/case-studies/mjostarnet-mixed-use-tower adresinden erişildi

WoodSolutions. (t.y.). *Wooden skyscraper in Västerås*. 27 Haziran tarihinde https://www.woodsolutions.com.au/case-studies/wooden-skyscraper-vasteras adresinden erişildi.

Yuan, Z., Sun, C., & Wang, Y. (2018). Design for Manufacture and Assembly-oriented parametric design of prefabricated buildings. *Automation in Construction*, (*Vol. 88*, pp. 13–22). https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.12.021

# TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

**Konferans Bildirileri**

**1**. Bulut, E. B., & Tong, T. (2024). Ahşap modüler yapıda sanal tasarım ve üretim süreci: Yapı bilgi modellemesinin uygulanması. Mimarlıkta Sayısal Tasarım 18. Ulusal Sempozyumu Tam Metin Bildiri Kitabı (ss. 81-97), 1-2 Temmuz 2024, Balıkesir, Türkiye.

**2**. Bulut, E. B., & Tong, T. (2024). Çapraz tabakalı ahşap modüler yapım tekniği: Sanal tasarım ve inşaat sürecinde yapı bilgi modellemesinin uygulanması. Uluslararası 3. Topkapı Kongresi Bildiriler Kitabı (ss. 404-405, ISBN: 978-625-367-718-3), 1-2 Mayıs 2024, Türkiye.