

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**MİMARLIKTA DÖNGÜSEL TASARIM YAKLAŞIMI:
KARAR VERME MEKANİZMALARI İÇİN KAVRAMSAL BİR ÇERÇEVE**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ayşe Ceylin Ceyda HÜNDAL

Bilişim Anabilim Dalı

Mimari Tasarımda Bilişim Programı

EKİM 2024

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**MİMARLIKTA DÖNGÜSEL TASARIM YAKLAŞIMI:
KARAR VERME MEKANİZMALARI İÇİN KAVRAMSAL BİR ÇERÇEVE**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ayşe Ceylin Ceyda HÜNDAL
(523211005)**

Bilişim Anabilim Dalı

Mimari Tasarımda Bilişim Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Meryem Birgül ÇOLAKOĞLU

EKİM 2024

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

**ADVANCING CIRCULAR DESIGN IN ARCHITECTURE: A FRAMEWORK
FOR DECISION-MAKING MECHANISMS**



M.Sc. THESIS

Ayşe Ceylin Ceyda Hündal

Department of Informatics

Architectural Design Computing Programme

Thesis Advisor: Prof. Dr. Meryem Birgül ÇOLAKOĞLU

OCTOBER 2024

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 523211005 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Ayşe Ceylin Ceyda HÜNDAL, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “MİMARLIKTAKİ DÖNGÜSEL TASARIM YAKLAŞIMI: KARAR VERME MEKANİZMALARI İÇİN KAVRAMSAL BİR ÇERÇEVE” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. M. Birgül ÇOLAKOĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Orkan Zeynel GÜZELCİ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Can UZUN
Altınbaş Üniversitesi

Teslim Tarihi : 25 Eylül 2024
Savunma Tarihi : 15 Ekim 2024





Aileme,



ÖNSÖZ

Tez sürecindeki katkıları ve desteklerinden dolayı danışmanım Prof. Dr. Meryem Birgül Çolakoğlu'na, destekleri ve tezi geliştirmeme katkı sağlayan değerli yorumları nedeniyle Doç. Dr. Orkan Zeynel Güzelci ve Dr. Öğr. Üyesi Can Uzun'a teşekkür ederim.

Yüksek lisansa başladığım günden itibaren bana ilham veren ve bilgisini her daim paylaşan Sema Alaçam'a, Asena Kumsal Şen'e; yüksek lisans eğitmi ve tez sürecindeki desteklerinden ötürü Semir Erdem'e, tezi teslim etme sürecindeki anlayışı ve pozitif enerjisinden ötürü Fatih Uzun'a teşekkürü bir borç bilirim. Tez çalışmamda yer alan verilere erişimimi sağlayan Kübra Şeker'e ve Ömer Selçuk Baz'a çok teşekkür ederim.

Tüm hayatım boyunca desteğini ve özverisini esirgemeyen değerli babam Cengiz Hündal, annem Canan Hündal, erken yaşlardan itibaren rol modelim olan abim Ceyhun Hündal, ablam Merve Hündal, tez sürecindeki önemli motivasyon kaynaklarımdan biri olan Dağhan Hündal'a ve yüksek lisansa başlama kararı aldığım andan itibaren her aşamada desteğini hissettiğim İrfan Berkay Güler'e içten teşekkürlerimi sunuyorum.

Ekim 2024

Ayşe Ceylin Ceyda HÜNDAL
(Mimar)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Problemin Tanımı.....	2
1.2 Tezin Amaç ve Kapsamı	3
1.3 Tezin Yöntemi.....	5
2. DÖNGÜSEL TASARIM- DİJİTAL DÖNÜŞÜM	7
2.1 Döngüsel Ekonomi- Tasarım Prensipleri ve Hedefleri	8
2.2 Mimaride Döngüsel Tasarım ve Sistem Yaklaşımı.....	16
2.3 Döngüsel Tasarıma Geçiş Sürecinde Dijital Yaklaşımlar	17
3. MİMARLIKTAKİ VERİ ODAKLI TASARIM VE İNŞAAT SÜRECİ.....	19
3.1 Mimari Yapının Döngüsellik Değerlendirilmesi	19
3.2 Mimari Verinin Sistemli Okunması	23
3.3 Yapının Mimari Bileşenlerine Ayrılması	25
3.4 Veri Odaklı Karar Verme	29
3.5 Mimari Bileşenlerin Döngüsellik Değerlerinin Saptanması	31
4. VAKA ÇALIŞMASI: TROYA MÜZESİ.....	35
4.1 Yaşam Döngüsü Değerlendirmesinde Kullanılan Araçlar	36
4.1.1 Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi	37
4.1.2 Brand kesme katmanları.....	40
4.1.3 Alba concepts metodu	41
4.2 Troya Müzesi ve Cephe Panellerinin İncelenmesi	47
4.3 Karar Destek Mekanizmasının Oluşturulması	50
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	59
KAYNAKLAR	63
ÖZGEÇMİŞ.....	73



KISALTMALAR

AEC	: Mimarlık, Mühendislik& İnşaat
BCI	: Yapı Döngüsellik Göstergesi
DE	: Döngüsel Ekonomi
DfD	: Söküm için Tasarım
DT	: Döngüsel Tasarım
ECI	: Eleman Döngüsellik Göstergesi
LCA	: Life Cycle Assessment
PCI	: Ürün Döngüsellikk Göstergesi
YDD	: Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi



SEMBOLLER

C	: Bağlantı
CA	: Bağlantı erişilebilirliği
CT	: Bağlantı türü
DID	: Bağımsızlık potansiyeli
DPC	: Bağlantı sökülebilirlik potansiyeli
n	: Eleman/ bileşen
ID	: Bağımsızlık



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Amaç- Hedef.	4
Çizelge 2.1 : Döngüsel Tasarım 10R Stratejisi.....	5
Çizelge 4.1 : Bağlantı Türü ve Skorlanması.....	44
Çizelge 4.2 : Bağlantı Erişilebilirliği ve Skorlanması	45
Çizelge 4.3 : Bağımsızlık ve Skorlanması.....	46
Çizelge 4.4 : Karar Mekanizmasına Bağlı Hesaplanabilirlik Aşamaları	47



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Yöntem Diagramı.	6
Şekil 2.1 : Lineer Ekonomi Modeli.	8
Şekil 2.2 : Döngüsel Ekonomi Modeli, Kamer(2014)'den uyarlanmıştır.....	9
Şekil 2.3 : Akış Diagramı, Konietzko ve diğ.(2020)'den uyarlanmıştır.....	2
Şekil 3.1 : Brand Kesme Katmanları.	27
Şekil 4.1 : Vaka Çalışması Akış Diagramı	35
Şekil 4.2 : YDD Diagramı.	36
Şekil 4.3 : Yaşam Döngüsü Aşamaları	37
Şekil 4.4 : YDD Aşamaları.....	38
Şekil 4.5 : YDD Kavramsal Çerçeve.....	39
Şekil 4.6: Brand Kesme Katmanlarının Yaşam Süresi.....	41
Şekil 4.7 : Brand Kesme Katmanları Tablosunda Kullanılan Katman.....	41
Şekil 4.8 : Finans-Süreç-Teknik Diagramı ve Parametreleri.....	43
Şekil 4.9 : Troya Müzesi Korten Çelik Cephe Panelleri	49
Şekil 4.10 : Troya Müzesi Korten Çelik Cephe Panelleri	49
Şekil 4.11 : Troya Müzesi Sistem Kesiti	50
Şekil 4.12 : Karar Ağacına Bağlı Kullanım Senaryoları	52
Şekil 4.13 : Karar Destek Mekanizması	53
Şekil 4.14 : Karar Aşamalarının Skorlanması Diagramı	54
Şekil 4.15 : 80-100 yıl öncesi senaryosuna karar ağacının uygulanması	57
Şekil 4.16 : 80-100 yıl sonra senaryosuna karar ağacının uygulanması.....	58



MİMARLIKTA DÖNGÜSEL TASARIM YAKLAŞIMI: KARAR VERME MEKANİZMALARI İÇİN KAVRAMSAL BİR ÇERÇEVE

ÖZET

Yoğun şehirleşme ile birlikte kaynakların hızla tükenme riskinin ortaya çıkması ve iklim krizinin çevresel etkilerinin yoğun olarak hissedilmeye başlaması, tasarım ve inşaat faaliyetlerindeki mevcut anlayışın yeniden ele alınması gerekliliğini doğurmuştur. Mimari bileşenlerin kullanım ömrü ve kullanım senaryosu da tasarıma dahil edilerek, doğrusal kullan-at tüketim alışkanlığının döngüsel yaklaşıma evrilmesi mümkün olabilmektedir(Braungart ve McDonough,2002). Sistemsel bir anlayışı gerektiren döngüsel ekonomi-tasarım yaklaşımı kaynak kullanımına ilişkin daha optimize kararlar almamıza, atığı tasarım sürecinde yeniden tanımlamamıza, toplumsal anlamda refah ve çevresel sürdürülebilirliğe giden güvenli bir yol izlememize olanak tanır(van Vliet,2018). Bu bağlamda yaşam döngüsü değerlendirmesi(YDD) döngüsel tasarım anlayışında kullanılan önemli bir metodolojidir. Karbon emisyonunu ölçmek ve çevresel yıkıcı etkileri minimize etmek amacıyla da kullanılabilen bu değerlendirme yöntemi, hayat döngüsünde etki eden birçok faktörün ölçülmesini sağlayan temiz bir çerçeve (clear framework for measuring environmental impact) sunmaktadır. Yaşam döngüsü değerlendirmesi(YDD) sadece veri oluşturmakla kalmayıp karar almayı da kolaylaştırmaktadır(URL1). Tasarımcılara çevresel etkileri göz önünde bulundurarak tasarımın farklı süreçlerini değerlendirmeyi sağlayarak belirlenen hedef doğrultusunda karar almayı kolaylaştırmaktadır. Çeşitli etki mekanizmaları ve seçilmiş opsiyonlar arasından veri merkezli bir karar destek mekanizması sunmaktadır. Yaşam döngüsü değerlendirmesi(YDD) bilimsel bir ölçme aracı olarak değerlendirilmekten ziyade karar destek mekanizması olarak ele alınmaktadır(Hertwich ve Hammit,2001; Sandin ve diğ.,2015; Pryshlakivsky ve Searcy,2021). Bu sayede alınacak kararların rasyonel kıyaslamalarının yapılabilmesinin mümkün olacağı düşünülmektedir. Bugüne kadar, bir binanın doğrusal modelden döngüsel modele geçişini ölçmek için kabul edilmiş bir yöntem bulunmamasına karşın yapılan akademik çalışmalarla, yöntemlerin geliştirilebileceği dair görüşler mevcuttur(van Vliet,2018).

Bu araştırma, döngüsellik seviyesinin değerlendirilmesine katkı sağlamayı amaçlamaktadır. Bir yapının bileşenlerinin yıkım/söküm sürecinde döngüselliklerinin nasıl kıyaslanabilir şekilde ölçülebileceği ve buna dair kavramsal bir çerçevenin oluşturulması çalışmanın temel motivasyonunu oluşturmuştur. Bu çalışma kapsamında, mimari bileşenlerin yaşam ömrü ve yaşam ömrü değerlendirmesi akış diyagramları birbirine entegre edilerek kavramsal bir çerçeve oluşturulmuştur. Yıkım ve söküm aşamaları referans alınarak, döngüsellik Alba Concepts Yöntemi'nin parametrelerine göre karar ağacı modeline dönüştüren bir karar destek mekanizması geliştirilmiştir. Bu mekanizma, yapı bileşenlerini kapalı döngüde tutarak döngüselliklerinin kıyaslanabilir bir şekilde skorlanmasını sağlamayı hedeflemektedir. Alba Concepts Methodu, DGBC(Dutch Green Building Council) tarafından üretilen 'Döngüsel Binalar-Sökme Potansiyeli 2.0 için bir Ölçüm Yöntemi' yayınından

referans alınmıştır. Troya Müzesi cephe panelleri, vaka çalışması olarak seçilmiş ve bu panellerin döngüsellikleri, karar destek mekanizması aracılığıyla skorlanarak kapalı döngüde kalmalarını sağlamaya yönelik bir değerlendirme yapılmıştır. Karar destek mekanizması çalışma kapsamında dört temel aşama üzerinden oluşturulmuştur. Bu aşamalarındaki karar ağaçları Alba Concepts Methodu ve Elmadurmisevic(2006) çalışmasındaki parametreler üzerinden oluşturulmuştur. Döngüsellik kıyaslanabilir bir şekilde ölçülmesi için geliştirilen skorlama sistemi, Alba Concepts Yöntemi'ne dayanmaktadır. Bu sistem, karar aşamalarının etkisine bağlı olarak belirlenen ağırlıkları referans alacak şekilde geliştirilmiştir. Çalışma kapsamında güncel mimari örneklerden biri olan Ömer Selçuk Baz ve ekibi tarafından tasarlanıp, uygulaması yapılan Troya Müzesi seçilmiştir. Müzenin cephe kaplamasında seçilen korten malzemenin kullanım nedenlerinden biri de tasarım senaryosunda yapının ilerleyen yıllarında yapı ile birlikte yaşlanacağı düşünülmektedir. Bu yaklaşım, döngüsel tasarımın ana omurgasında yer alan tasarım senaryosu ile doğrudan ilişki kurmasa da, vaka çalışmasında mevcut tasarım anlayışına dayanan senaryo ile döngüsel tasarım prensipleri arasında bir kıyaslama yapılmasına olanak tanımıştır. Böylece, yaşam döngüsü senaryosunun farklı katmanlardan incelenmesi mümkün hale gelmiştir. Çalışma kapsamında örnek vaka çalışmasının kapsamının daraltılması amacıyla geliştirilmiş olan karar destek mekanizması, Troya Müzesi'nin cephe panellerinden seçilen örnek bir tip üzerinden uygulanarak skorlaması yapılmıştır. Vaka çalışması uygulaması sürecinde karar destek mekanizmasının veri erişiminin sınırlı olduğu aşamalar saptanmıştır. Bu aşamalar özellikle karbon ayak izinin hesaplanması, çevresel karbon salınımı gibi nümerik veriler ve formüller üzerinden hesaplanabilen parametrelerden oluşmaktadır. Türkiye'de inşaat faaliyetlerinde kullanılan veri bankalarına ve standardizasyon süreçlerine erişimdeki yetersizlikler nedeniyle, bu vaka çalışmasının karbon ayak izi ve çevresel etki hesaplamaları matematiksel olarak gerçekleştirilememiştir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde yapı kimliğinin tanımlandığı, malzeme bankasının oluşturulduğu ve karbon salınımı gibi çevresel etkilerin hesaplanmasına yardımcı olan veriyi yönetmenin, bu veriyi kullanım noktasında standardizasyonun sağlanması gibi gereklilikler olduğu kanıtına varılmıştır. Bu alanda Türkiye bölgesinde yapılacak çalışmaların gelecekte, döngüsel tasarıma entegrasyon sürecinde önemli bir rol oynayacağı sonucuna varılmıştır. Bu çalışma kapsamında, mimari bileşenlerin yaşam döngüsü değerlendirme (LCA) süreci EN 15804 ve ISO14040-44 standartlarının birbirine entegre edildiği kavramsal bir çerçeve üzerinden ilerlemiştir. Çalışmada, özellikle yıkım ve sökülme aşamaları üzerinde durulmuş ve bu süreçler, Alba Concepts Yöntemi'nin parametreleri referans alınarak analiz edilmiştir. Buradaki temel amaç, yapı bileşenlerinin kapalı döngüde kalmasının sağlanması ve döngüsellik seviyelerini kıyaslanabilir şekilde skorlamaya olanak sağlayan, bir karar destek mekanizması geliştirmektir. Bu mekanizma, yapı bileşenlerine yönelik alternatif kullanım senaryolarını değerlendirerek, mevcut duruma en uygun ve döngüsellik en yüksek yöntemin önerilmesini hedeflemekte ve karar alma süreçlerine katkı sağlamayı amaçlamaktadır. Bir diğer önemli nokta, yapıların inşaa süreçlerinden itibaren geçen süre yapım-söküm süreçlerinde karar alınmasında belirleyici önemli faktörlerden birini oluşturmasıdır. Troya Müzesi örneğinde de görüleceği üzere yapının ilk inşaa edildiğinden itibaren 80 yıla kadar ve 80 yıl sonrası iki senaryo üzerinden karar destek mekanizması uygulanmış ve böylece alınan kararlardaki farklılık gözlemlenebilmiştir. Sonuç olarak tasarım ve inşaat faaliyetlerindeki süreçlerin yönetimi çevresel etkinin azaltılmasında, malzeme kullanımının azaltılması ve kaynak yönetiminin optimum şekilde yapılması noktasında büyük önem arz etmektedir.

ADVANCING CIRCULAR DESIGN IN ARCHITECTURE: A FRAMEWORK FOR DECISION-MAKING MECHANISMS

SUMMARY

The emergence of the risk of rapid depletion of resources with intensive urbanization and the environmental impacts of the climate crisis have led to the need to reconsider the current understanding in design and construction activities. By including the lifetime and usage scenario of architectural components in the design, it is possible to evolve the linear disposable consumption habit to a circular approach (Braungart and McDonough, 2002). The circular economy-design approach, which requires a systemic understanding, allows us to decide more optimized decisions regarding resource use, redefine waste in the design process, and follow a safe path to social well-being and environmental sustainability (van Vliet, 2018). This comprehensive understanding entails an integrated perspective of the construction process, wherein each stage, from material extraction to end-of-life considerations, is analyzed for its environmental repercussions. In this context, life cycle assessment (LCA) is an important methodology used in circular design. The LCA methodology is relevant not just to new buildings but also to the rehabilitation and adaptive reuse of existing structures, hence prolonging the life cycle of materials. It provides a clear framework for measuring environmental impact, which can be used to measure carbon emissions and minimize environmental disruptive impacts. LCA not only generates data but also facilitates decision-making (URL1). The data generated by LCA can be integrated into broader sustainability frameworks, offering insights into energy consumption, water usage, and waste production. It enables designers to evaluate different processes of design taking into account environmental impacts and facilitates decision-making in line with the set objective. It offers a data-centered decision support mechanism among various impact mechanisms and selected options. In the context of reconciling various sustainability objectives, such as economic viability and the need to balance carbon emissions with resource scarcity, the implementation of this decision support system proves to be essential. This system facilitates informed decision-making by providing a comprehensive framework for evaluating the trade-offs between competing sustainability goals, thereby enhancing the capacity of stakeholders to achieve a more holistic approach to sustainability. LCA is considered as a decision support mechanism rather than a scientific measurement tool (Hertwich and Hammit, 2001; Sandin et al., 2015; Pryshlakivsky and Searcy, 2021). The function of LCA as a decision-making instrument enables it to inform policy formulation, directing rules that foster sustainable construction practices.. In this way, it is thought that it will be possible to make rational comparisons of the decisions to be taken. To date, there is no holistic accepted method to measure the transition of a building from a linear model to a circular model, but there are views that methods can be developed through academic studies (van Vliet, 2018). Academic research in this area is progressively concentrating on the creation of standardized indicators and metrics capable of precisely evaluating circularity in the built environment.

This research aims to contribute to the assessment of the level of circularity. The main motivation of the study is to establish a conceptual framework on how the circularity of the components of a building can be measured comparably during the demolition/dismantling process. A systematic method for assessing circularity in demolition is essential, as it quantifies the possibilities for material reuse and recycling, fundamental tenets of the circular economy.

Within the scope of this study, a conceptual framework was drawn by integrating the life cycle and life cycle assessment flow diagrams of architectural components, and by taking the demolition-dismantling process as one of the life cycle stages as a reference, a decision support mechanism was tried to be created that transforms the cyclicity into a decision tree according to the parameters of the Alba Concept Method and provides a comparable scoring of the cyclicity of the building components by keeping them in a closed loop. The decision tree structure allows for a systematic analysis of each building component, assessing its potential for reuse, recycling, or disposal at the end of its life. The Alba Concept Method is referenced from the publication 'Circular Buildings - A Measurement Method for Disassembly Potential 2.0' produced by DGBC (Dutch Green Building Council). This method has been instrumental in shaping the discourse around circularity in building design, offering a quantifiable approach to disassembly potential. The facade panels of the Troy Museum were selected as a case study and subjected to the decision support mechanism to score its circularity and to keep the facade panel closed. The selection of the Troy Museum as a case study was strategic, as its architectural significance and material choices provide a rich context for evaluating circular design principles. The decision support mechanism was created over four basic stages within the scope of the study. Each stage of the decision-making process was carefully designed to ensure that all relevant factors, such as material durability, adaptability, and environmental impact, were considered. The decision trees in these stages were created based on the parameters in Alba Concept Method and Elmadurmisevic (2006). By employing these well-established methodologies, the study ensures that the results are grounded in a solid theoretical framework. The scoring used for the comparative measurement of circularity is based on the Alba Concept Method and the weighting of the decision stages depending on their impact on the decision. Weighting these stages allows for a more nuanced assessment of circularity, recognizing that not all factors contribute equally to the overall sustainability of a building component.

Within the scope of the study, the Troy Museum, designed and implemented by Ömer Selçuk Baz and his team, was selected as one of the current architectural examples. This selection highlights the relevance of contemporary architecture in addressing sustainability challenges, as well as the role of design in shaping environmental outcomes. One of the reasons for the use of corten material selected for the facade cladding of the museum is that in the design scenario, it is thought that the building will age with the building in the coming years. Corten steel is known for its durability and weathering characteristics, which align with the principles of longevity and material resilience in circular design. Although this approach does not directly relate to the design scenario at the backbone of circular design, it has enabled the case study to be read from different layers in terms of comparing the life cycle scenario on the axis of the life cycle scenario and circular design principles. This multifaceted analysis allows for a deeper understanding of how architectural choices can influence both the short-term and long-term sustainability of a building.

Within the scope of the study, the decision support mechanism, which was developed to narrow the scope of the case study, was applied and scored on a sample type selected from the facade panels of the Troy Museum. The scoring process involved a detailed examination of the material's potential for reuse, recycling, and its overall environmental impact. During the case study application process, stages where the decision support mechanism had limited data access were identified. These stages consist of parameters that can be calculated through numerical data and formulas, such as the calculation of carbon footprint and environmental carbon emissions.. Due to the lack of implementation of access to the database and standardization of data used in construction activities in the Turkish region, the carbon footprint of the case study and environmental impact could not be mathematically calculated. When reviewing the literature, it was concluded that there are requirements for defining building identity, creating a material bank, and managing data to assist in the calculation of environmental impacts such as carbon emissions, as well as ensuring standardization in the use of this data. The development of a material bank, in particular, is seen as a crucial step toward enabling a more circular approach to construction, as it allows for the tracking and management of materials throughout their lifecycle. It has been concluded that studies in this area, to be conducted in the Turkey region in the future, will play an important role in the integration process of circular design. These studies will be essential in advancing both the theoretical and practical understanding of circularity in the built environment, providing valuable insights for policymakers and industry professionals alike. Since the purpose of this study is to contribute to the development of a framework and decision support mechanism that helps maintain the building in a closed loop and enhances the readability of the layers of circularity, it was possible to identify the general deficiencies in this axis. Identifying these deficiencies is a critical step toward addressing the barriers to the widespread adoption of circular design principles, both in Turkey and globally. Another important point is that the time elapsed since the construction of the buildings constitutes one of the critical factors in decision-making during construction-demolition processes. This factor is particularly relevant in the context of aging infrastructure, where decisions about whether to renovate, reuse, or dismantle buildings must be made with an eye toward both environmental and economic sustainability. As seen in the example of the Troy Museum, the decision support mechanism was applied based on two scenarios: up to 80 years after the building's initial construction and beyond 80 years, allowing the observation of differences in the decisions made. These scenarios provide valuable insights into how the lifecycle of a building evolves over time and how circular design principles can be applied at different stages of a building's existence. In conclusion, the management of processes in design and construction activities is of great importance in reducing environmental impact, minimizing material usage, and optimizing resource management. By adopting circular economy principles, the construction industry can play a leading role in addressing some of the most pressing environmental challenges of our time, while also promoting economic resilience and social well-being.



1. GİRİŞ

Şehirleşmenin beraberinde getirdiği yoğun inşaat faaliyetlerine karşın kaynakların sınırlı olması ve artan çevresel sorunlar nedeniyle malzemenin yeniden kullanımı, geri kazanılması ve geri dönüşümü döngüsel ekonomi kapsamında önemli bir yere sahiptir. Döngüsel ekonomi, doğadaki döngü ile analogi kurarak atık kavramını yeniden tanımlar ve mimari bileşenin-malzemenin yaşam döngüsünü gözeterek tasarıma dahil edilmesini sağlayan döngüsel tasarım yaklaşımının ana eksenini oluşturmaktadır. Yapı bir bütün olarak kullanım döngüsüne dahil edilmesinin haricinde yapı bileşenlerinin de kullanım senaryosu-ömrü tasarlanarak, doğrusal tasarım anlayışına yeni bir yaklaşım sunmaktadır. Bu bağlamda yapı tamamlanmış, statik bir öge olmak yerine yeni teknolojik gelişmelere ayak uydurabilen, değişen kullanıcı ihtiyaçlarına göre evrim geçirebilen dinamik bir öge olarak kabul edilir(Durmisevic, 2019). Bu yaklaşım sayesinde mimari yapı kullanım ömrünü tamamladıktan sonra da yeniden kullanım döngüsüne dahil edilebilen, bünyesinde barındırdığı alt bileşenleriyle birlikte, dönüşebilen bütüncül bir sistem olarak ele alınabilmektedir. Alt bileşenleri salt nesneler olarak ele almaktan ziyade alt bileşenler arasındaki ilişkileri okumak, statik-alt bileşenler yerine değişim kalıplarını görmeye yönelik bir çerçeveyi sistem yaklaşımıyla bütüncül olarak kurmak mümkün olabilmektedir(Senge, 1990). Böylece alınan tasarım kararları noktasal olarak değerlendirilmekten ziyade sistemin kendisi içerisinde yarattığı etki alanı ekseninde değerlendirilebileceği düşünülmektedir. Bu bütüncül yaklaşım döngüsel tasarımın, doğrusal tasarımdan farklı olarak tasarımın yaşam döngüsüne tasarım, üretim, inşaat, kullanım ve kullanım sonrası aşamalarında müdahale edilebilmesini olanaklı kılmaktadır. Müdahalelerin çevreci çözümler ekseninde, kapalı döngü sistemini destekleyecek optimum yöntemle yapılabilmesini sağlamak amacıyla bir karar destek mekanizması oluşturulmaya çalışılmıştır. Yaşam döngüsünün son aşaması olan yıkım/ söküm süreci için yaşam döngüsü değerlendirmesi tabanlı bir karar destek mekanizması geliştirilmesi, yapıların söküm, geri dönüşüm ve atık yönetimi süreçlerinde sürdürülebilirliğin artırılmasına yardımcı olabileceği düşünülmüştür.

1.1 Problemin Tanımı

İnşaat sektörü, iş hacminin büyüklüğü nedeniyle kaynak kullanımı noktasında dominant sektörlerden biridir. Küresel iklim krizinin artan çevresel etkileri gözönünde bulundurulduğunda, kullanılan kaynakların yönetiminin optimize edilmesi büyük önem taşımaktadır(van Vliet, 2018). Disiplinlerarası bir kavram olan döngüsel ekonomiye bağlı olarak geliştirilen döngüsel tasarım anlayışının mevcut tasarım-üretim anlayışına dijital tasarım araçları ile entegre olması, kaynak kullanımı açısından yeni bir yaklaşım sunarak önemli bir katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Yıkım süreçleri, yapı elemanlarının sökülmesi, yeniden kullanımı, geri dönüşümü ve atık yönetimini kapsayan çok aşamalı ve karmaşık süreçlerdir. Bu süreçlerin etkili bir şekilde yönetilmesi, çevresel sürdürülebilirliğin artırılması açısından büyük önem taşır. Ancak, mevcut yıkım projelerinde genellikle malzeme ayrıştırma, geri dönüşüm potansiyeli ve atık yönetimi kararları, sistematik bir yaklaşımla ele alınmamaktadır. Bu da çevresel etkilerin yeterince optimize edilmemesine neden olabilmektedir. Yıkım/ söküm sürecinde tasarımcılar veya yüklenici firmalar, hangi malzemelerin nasıl değerlendirileceği, enerji ve kaynak tasarrufu sağlanıp sağlanamayacağı gibi kritik konularda hızlı ve doğru kararlar alma zorunluluğundadır. Yapıların yıkım ve söküm süreçleri, genellikle yüksek miktarda enerji tüketen ve çevreye zarar veren atıklar üreten süreçlerdir. Bu süreçlerde döngüsel ekonomi ilkeleri yeterince uygulanmadığında, değerli yapı malzemeleri atık olarak değerlendirilmekte ve yeniden kullanım veya geri dönüşüm fırsatları kaçırılmaktadır. Mevcut yıkım projelerinde:

- Malzeme geri kazanımının düşük olması,
- Atık üretiminin yüksek olması,
- Karar verme süreçlerinin standart ve verimli olmaması gibi sorunlar yaşanmaktadır (Makower, 2013).

Bu sorunlar, karar vericilerin yıkım süreçlerinde hangi yapı elemanlarının nasıl söküleceği, geri dönüştürüleceği veya yeniden kullanılacağı konusunda doğru kararları almalarını zorlaştırmaktadır. Ayrıca, yıkım süreçlerinde Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD) temelli bir yaklaşım kullanılmadığından, çevresel etkiler

optimize edilememektedir (Circle Economy & IMSA, 2013). Mevcut karar verme süreçleri genellikle deneyime dayalı olup, yıkım projelerinde yaşam döngüsü temelli sürdürülebilirlik faktörlerini yeterince dikkate alamamaktadır. Ayrıca, her projenin kendine özgü malzeme yapısı ve yerel geri dönüşüm imkanları olması nedeniyle karar alma süreçleri zorlayıcı olabilmektedir. O nedenle kararların kıyaslanabilirliğini arttıran, rasyonel süreçleri destekleyen karar destek mekanizmalarının geliştirilmesinin önemli ve tasarımcılar için süreçleri kolaylaştırıcı bir araç olacağı düşünülmektedir.

1.2 Tezin Amaç ve Kapsamı

Bu çalışmanın temel amacı, yapıların/ yapı bileşenlerinin yıkım ve söküm süreçlerinde, çevresel etkisini minimize etmek ve döngüsel ekonomi ilkelerini maksimum düzeyde uygulayarak yapı bileşenlerini kapalı yaşam döngüsünde tutmak için bir karar destek mekanizması geliştirmektir. Bu mekanizma, yaşam döngüsü (LCA) verilerini kullanarak, yapı elemanlarının nasıl en verimli şekilde söküleceği, yeniden kullanılacağı veya geri dönüştürüleceği konusunda karar veren tasarımcılara/ mimarlara / yüklenicilere alternatif bir karar destek mekanizması sunarak karar alma süreçlerini kolaylaştırmayı ve daha sürdürülebilir, çevreci çözümler sunmayı amaçlar. Böylece genel kapsamda çizilen teorik çerçeve ekseninde hem enerji tasarrufu sağlanması hem de atık miktarı azaltılarak doğal kaynakların korunması hedeflenmektedir. Mevcut literatür araştırmaları sonucunda Söküm için Tasarım(Design for Disassembly) konusunu ve yaşam döngüsü değerlendirmesi konusunu, malzemenin yeniden kullanımı ve çevresel etkilerin değerlendirilebilmesi noktasında beraber ele alınmasının gerekliliğinden söz edilebilmektedir(Lukianova ve diğ., 2022).

Bu çalışmanın amacı, yıkım ve söküm süreçlerinde yapıların döngüsellliğini artırmaktır. Proje kapsamı aşağıdaki unsurları içermektedir:

- Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD): Bu yaklaşım, yapı malzemelerinin söküm, geri dönüşüm ve atık yönetimi süreçlerinin çevresel etkilerini analiz eden veri odaklı bir değerlendirme sistemidir.
- Karar Destek Mekanizması: YDD verilerini kullanarak geri dönüşüm, yeniden kullanım ve malzeme geri kazanımını maksimize etmek için tasarlanmış bir araçtır.

- Yıkım ve Söküm Süreçleri: Yapı elemanlarının söküm süreçleri, malzemelerin bağlantı türleri, söküm kolaylığı ve geri kazanım potansiyelleri gibi faktörler üzerinden değerlendirilecektir (Chini & Bruening, 2003).
- Döngüsel Ekonomi İlkeleri: Proje, kaynak tüketimini ve atık miktarını azaltma hedefi doğrultusunda döngüsel ekonomi yaklaşımına katkıda bulunmayı amaçlamaktadır.

Çizelge 1.1 : Amaç-Hedef

Amaç	Hedefler
Mimari yapı ve bileşenlerinin yaşam döngüsü aşamalarından yıkım/söküm sürecinin döngüsellliğini kıyaslanabilir şekilde ölçmek ve yaşam döngüsünü mümkün mertebede döngüsel kılmaya yönelik karar destek mekanizması oluşturulması.	i. Yaşam döngüsünü doğrusaldan döngüsel çevirmek için gereken teorik akış diagramının oluşturulması ii. Yaşam döngüsü ve yaşam döngüsü analizinin entegre edildiği bütüncül çerçevenin oluşturulması iii. Yapım/söküm aşamalarının döngüsellliğini değerlendirmek için gerek parametrelerin ve metodolojinin kurgulanması iv. Yapım/söküm aşamalarının döngüsellliğini değerlendirmek için oluşturulan karar destek mekanizmasının karar ağaçlarının oluşturulması ve örnek üzerinde uygulanması

Çalışma kapsamında Troya Müzesi'nin cephe panelleri referans alınarak karar destek mekanizması üzerinden incelenmiştir. Bu bileşenin yıkım- söküm aşamasında, yaşam döngüsünü kapalı döngüde tutmayı amaçlayarak bu ekseninde karar alınmasını ve alınan kararların skorlanabilir olması sağlanarak daha rasyonel, çevresel etkiyi minimize eden ve kaynak kullanımının azaltılmasına katkı sunan bir sistem önerilmiştir.

1.3 Tezin Yöntemi

Tez çalışması kapsamında döngüsel tasarım ve döngüsel ekonomi bağlamında literatür araştırması yapılmıştır. Bu kavramların mimari tasarımdaki karşılıkları, prensipleri ve değerlendirme parametreleri incelenmiş olup, akademik literatürde geliştirilen yan kavramları ve proje çalışmaları araştırılmıştır . Yaşam döngüsü ve yaşam döngüsü değerlendirmesi aşamaları EN 15978 ve EN 15804 standartları referans alınarak birbirine entegre olarak akış diagramına dönüştürülmüştür. Karar destek mekanizmasındaki karar ağaçları DGBC(Dutch Green Building Council) tarafından geliştirilen Alba Concepts Methodu üzerinden oluşturulmuştur. Alba Concepts Methodu yapı ve yapı bileşenlerinin sökülme potansiyellerini ölçmek için finans, teknik ve süreç olmak üzere üç aşamanın farklı alt başlıkları üzerinden geliştirilmiş ve geliştirilmeye devam eden bir metodoloji sunmaktadır. Skorumanın yapıldığı temel alt başlıklar Elma Durmisevic(2006)'in “Transformable Building Structures” çalışmasından referans alınarak geliştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında karar ağacı parametrelerinden bağlantı türlerinin tanımlanması(connection type), bağlantıya erişim(connection accessibility), bağımlı-bağımsız olma durumu(independency) Alba Concepts Methodolojisinden alınmıştır. Söküm kolaylığı, malzeme türü ve yeniden kullanım potansiyeli, geridönüşüm ve yeniden kullanım potansiyeli parametreleri literatür araştırması ve EN 15978 -EN 15804 standartlarının çalışmaya dahil edilmesi ile geliştirilerek karar destek mekanizmasına eklenmiştir. Hesaplama yöntemi Alba Concepts Methodunda referans verilen karar ağacı parametreleri kendi skorlarını ve formüllerini içermektedir o nedenle o aşamaların hesaplaması sayısal olarak metodolojiden referans alınmıştır, diğer karar parametreleri formüle olarak bırakılmıştır.



Şekil 1.1: Yöntem Diagramı

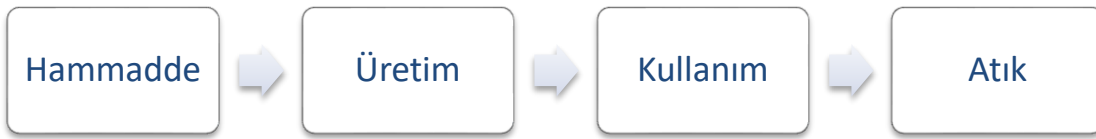


2. DÖNGÜSEL TASARIM- DİJİTAL DÖNÜŞÜM

Doğal kaynakların hızla azaldığı ve çevre sorunları etkilerinin büyük oranda arttığı bir dönemde; binaların, negatif çevresel etkiyi azaltabilme potansiyelinin anlaşılması büyük önem kazanmıştır(Durmisevic, 2019). Bu nedenle tasarım- inşaat süreçlerinde kaynak kullanımının azaltılması ve çevresel etkinin minimize edilmesi önemli bir gereklilik haline gelmiştir. Döngüsel ekonomi yaklaşımı bu anoktada çevreci çözümlerin uygulanabilmesini olanaklı kılan, sistem içerisinde döngü oluşturulması anlayışı ile önemli bir aktör olarak görülmektedir. Mevcut anlayışın döngüsel ekonomi yaklaşımına dönüşmesi noktasında süreçlerin yönetilebilmesi, beraberinde yoğun bir mimari veri akışı ve bu verinin yönetilebilmesini gerekli kılmaktadır. Bu da beraberinde kompleks veri sistemlerini getirmektedir. O nedenle döngüsel ekonominin, gerçekçi uygulamalara dönüşebilmesinde dijital dönüşüm önemli bir kırılma noktasıdır. Sınırlı sayıda çalışmanın, dijital araçların döngüsel ekonomiye geçişe uygunluğunu ele aldığı ya da bütünleştirici bir çerçeve sunmayı hedeflediği sonucuna varılmıştır(Çetin ve diğ., 2021). Döngüsel ekonomide dijital teknolojiler yaygın olarak malzemenin yaşam döngüsü stratejisine odaklanarak kullanılmıştır. Malzemenin yaşam döngüsü ve enerji kullanımı gibi başlıklar sayısal veri olarak analiz edilebilirliğinin yüksek olması nedeniyle öncelikli olarak çalışılmaya başlanmıştır. Bu alanda atılan adımlar teorik ve pratik uygulamalarla belirli bir seviyeye geldikten sonra tasarımın doğrudan sayısallaştırılamayan mekan kullanımı, yeniden işlevlendirme vb. başlıklar üzerinde çalışılmaya başlansa da sayıca daha sınırlı üretimlerle karşılaşılmaktadır. Bu nedenle yapı çevrede döngüsel tasarıma geçişi hızlandıracak dijital araçları, kapsamlı şekilde inceleyen çalışmalara literatürde pek sık rastlanmadığı vurgulanmıştır(Çetin ve diğ., 2021). Buna karşın yeni üretilen yapılarda çevresel etkileri gözetken, yapının kullanım ömrünü tasarlamaya ve kullanılan malzeme niteliği ve miktarındaki kayıpları minimuma indirme gayesi ön plana çıkmaktadır. Mekansal ihtiyacın değişmesi, mekan fonksiyonunun yıllar içerisinde farklılaşması gibi gereklilikler tasarımın erken aşamasında tasarım senaryosu içinde değerlendirilmektedir.

2.1 Döngüsel Ekonomi- Tasarım Hedefleri ve Prensipleri

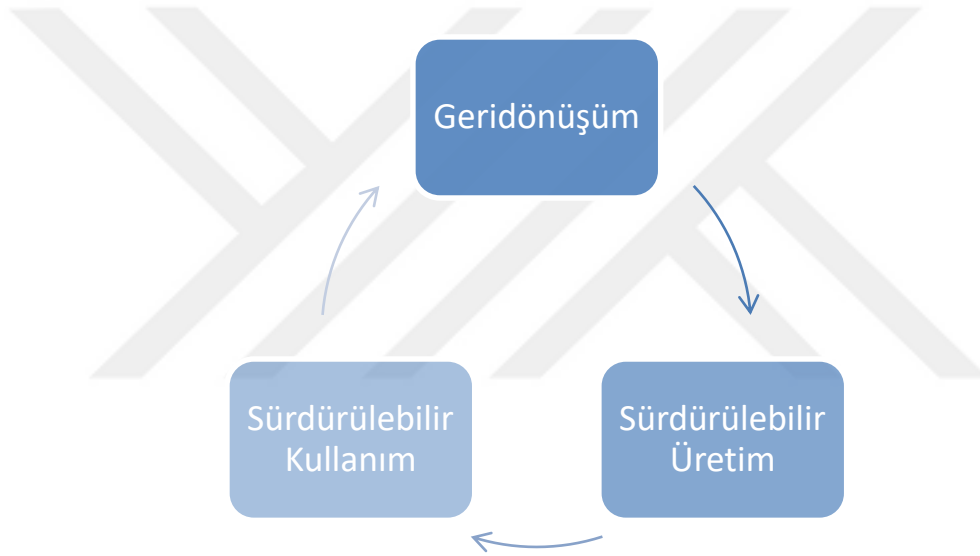
Sanayi Devrimi, seri üretime geçişte kullan-tüket-at mantığının yerleştiği bir tüketim refleksiyle, hammadde ve enerjiye dayalı doğrusal bir ekonomi modelini beraberinde getirmiştir. Bu ekonomik dönüşümle beraber sanayileşmiş ülkeler tüketimin yoğun olduğu toplumlara dönüşmüştür ve şehirlerdeki nüfusun artmasıyla birlikte mimari yapı yoğunluğu artmıştır(Ellen MacArthur Foundation,2012). Günümüzde hala artarak devam eden yapılaşma nedeniyle tasarım ve inşaat sürecinde alınan noktasal kararlar, zincirleme sonuçlara yol açmaktadır. Yapı strüktürü, cephe kaplaması, yapıda kullanılacak mekanik sistemin malzemesi-yeri vb. yapısal kararlar, birden çok yapı söz konusu olduğunda hammadde ve enerji kullanımı açısından büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle kaynakların daha verimli ve çevreye duyarlı kullanımının sağlanabilmesi noktasında tasarım ve inşaat süreçleri önemli bir yere sahiptir(Kayaçetin ve diğ.,2022; Avrupa Komisyonu, 2011). Doğrusal ekonomi modelinde, kullanılan hammadde ve enerjinin sınırlı bir kaynak olduğu gözardı edilmektedir(Ellen MacArthur Foundation,2012). Buna ek olarak hızlı tüketim ile beraber tüketim sonrası süreçlerin çevreci çözümler ekseninde yönetilememesi, çevresel sorunlara neden olmakta ve doğal çevrenin de kirlenmesine sebebiyet vermektedir.



Şekil 2.1 : . Lineer Ekonomi Modeli

Her yıl milyarlarca ton inşaat ve hafriyat atığı imha alanlarına atılarak, ciddi çevresel zararlara neden olmaktadır(Duan ve diğ.,2019). Avrupa Komisyonu 2050 yılına kadar doğal çevreyi korumak ve iklim nötrlüğüne ulaşmak için, kullan-tüket-at modeline dayanan doğrusal ekonomik modelden döngüsel ekonomi modeline geçmeyi hedeflemektedir(Avrupa Komisyonu,2023). Döngüsel ekonomi kaynakları ve malzemeyi kullanım ömürleri tamamlandıktan sonra mümkün mertebede ürün

döngüsü içerisinde tutarak “atık” anlayışını yeniden yorumlar ve böylece uzun süreli kullanıma olanak sağlar(URL11). Kullanım ömrünü tamamlayan malzeme yeni bir üretim bandının girdisi olabilmektedir. Döngüsel ekonomi kaynakların kullanım ömürleri boyunca, nitelik-değer kaybını en aza indirmeyi referans alarak, çevre kirliliğinin ve israfın önlenmesini, karbon emisyonunun azaltılmasını hedefler(Blomsma ve Brennan,2017; Geissdoerfer,2017; Konietzko ve diğ.,2020). Böylece hem finansal hem çevresel etkinin optimizasyonuna katkı sağlayan bütüncül bir yaklaşım olarak ele alınabilmektedir. Döngüsel Ekonomi, mevcut ürünlerin ve malzemelerin yeniden kullanılması, onarılması, yenilenmesi ve geri dönüştürülmesi süreçlerini kapsayan üretim ve tüketim modeli sunmaktadır. Böylece malzeme ve ürünlerin yaşam döngülerinin uzatılması amaçlanır(Avrupa Komisyonu,2023).



Şekil 2.2 : Döngüsel Ekonomi Modeli,Kamer(2014)’ten uyarlanmıştır.

Döngüsel ekonomi kavramı günümüzde oldukça yaygın bir kullanıma sahip olsa da, kapsam ve hedef olarak 1970’lere uzanan bir geçmişe dayanmaktadır. Döngüsel ekonomi; kaynakların bilinçli kullanılmasını teşvik etmek, kullanım sonucu ortaya çıkan atığın yeniden tanımlanarak döngüye dahil edilmesini sağlamak, ekolojik döngü ile analoji kurulması gibi temelde benzer amaçları barındırmaktadır(Brennan ve diğ.,2015; Geissdoerfer ve diğ. ,2017). Brennan(2015) çalışmasında, döngüsel çalışmaların teorik altyapısında özellik beş düşünürün katkılarından dolayı önemini vurgulamaktadır; sistem düşünürü ve evrimsel ekonomist Kenneth Boulding ; fizikçi Robert Ayres ve ekonomist Allen Kneese ; ve mühendisler Robert Frosch ve Nicholas Gallopoulos . Kapalı uzay gemisi ekonomisi(*Closed spaceship economy*) kavramı ile

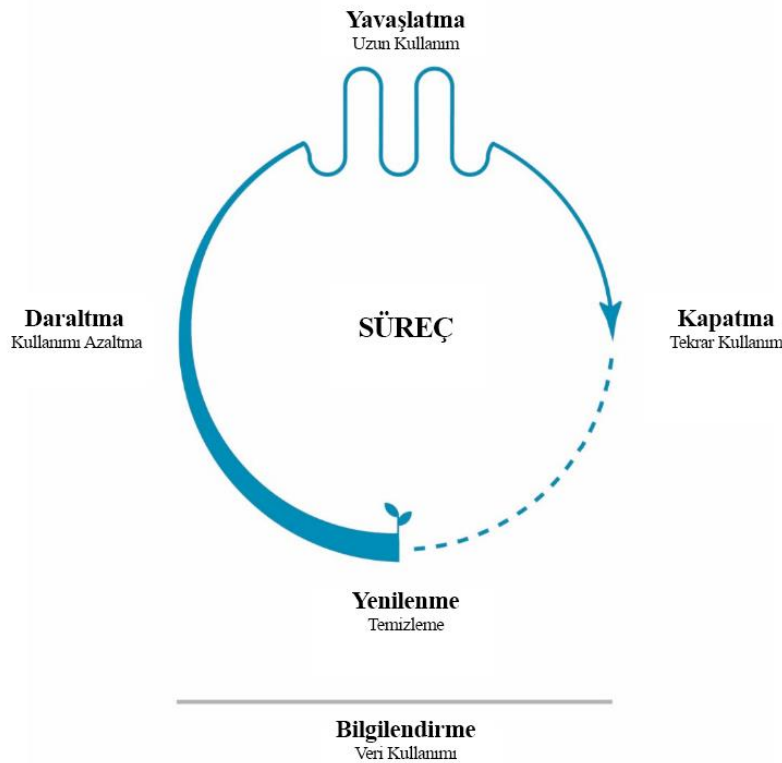
birlikte Boulding(1966) dünyayı sınırlı asimilasyon (*assimilative*) kapasitesine sahip kapalı ve döngüsel bir sistem olarak tanımlayıp, ekonomi ile doğal çevrenin birlikte var olabilmesi gerektiği sonucuna varmıştır. Bu kavram, dünyayı uzayda yüzen bir gemiye benzetir; bu gemide yaşayanlar için dışarıdan yeni kaynaklar gelmez ve atıkların nereye atılacağı gibi bir seçenek yoktur. Dolayısıyla, kaynakların dikkatli kullanımı, atıkların minimize edilmesi ve geri dönüştürülmesi gerekir(Boulding, 1966). Buna ek olarak Boulding(1966), dayanıklılığı(*durability*) öne çıkararak tüketim ürünlerinin kalitesi ve kullanımına bağlı olarak planlı eskimesi gibi konulara değinmiştir. Bir diğer önemli çalışma Ayres ve Kneese(1969) tarafından geliştirilen, biyolojik metabolizma gibi doğal bir döngü ile analogi kuran “endüstriyel metabolizma” kavramıdır. Bu kavramın geliştirilmesi ve detaylandırılması ile literatüre katkı sağlanmış, kavrama teorik bir çerçeve oluşturulmuştur ve buna ek olarak endüstri, ekonomi, işletme modelleri benzer analogi ile incelenilmektedir(Lifset ve Graedel,2002). Brennan(2015)’ın çalışmasında son olarak vurguladığı önemli iki düşünür, Frosch ve Gallapoulos(1989) *Üretim Stratejileri(Strategies for Manufacturing)* makalesinde atık tüketimini minimize etmeyi ön plana çıkararak, üretilen atığın başka bir üretim için hammadde girdisi olabileceğini öne sürmüşlerdir. Bu yaklaşım atık tanımının değişmesine dair ilk adımlar olarak değerlendirilebilir. Böylece atığın üretimle ilişkisinin kopmasından ziyade bir malzeme olarak ele alınıp döngüde kalması sağlanabilmektedir. Brennan’ın önemini vurguladığı düşünürlere ek olarak daha geniş ölçekli etki alanlarını gözterek, Stahel ve Reday(1976) atıkların önlenmesi, bölgesel istihdam yaratılması ve kaynak verimliliği gibi endüstriyel stratejileri kapalı döngü üzerinden kavramsallaştırıp döngüsel ekonominin temel özelliklerini tanımlamıştır(Geissdoerfer ve diğ.,2017). Döngüsel ekonominin kapsamı göz önünde bulundurulduğunda, farklı disiplinlerle iş birliği içinde çalışılması gerektiği sonucu çıkmaktadır buna karşın döngüsel ekonomiyi sistematik olarak inceleyen, tanımlayan bütüncül bir çalışmaya literatürde rastlanmadığını belirtilmiştir(Kirchherr ve diğ.,2017). Döngüsel ekonominin üzerinde mutabakat sağlanan genelleşmiş bir tanımının da olmadığı(Yuan ve diğ.,2008), literatürde farklı disiplinlerden farklı tanımlamaların yapıldığı ve ana eksenin döngüsel ekonominin hedefleri olduğu saptanmıştır(Kirchherr ve diğ.,2017). Ellen Macarthur Kuruluşu döngüsel ekonomiyi, toplumsal ve çevresel refahın sağlanması için geliştirilmiş sistemsal bir yaklaşım olarak ele almaktadır(URL 9), bu sistem yaklaşımını şöyle tanımlamaktadır ”Döngüsel ekonomi amacı ve kapsamı itibariyle

onarıcı ve yenileyici olan endüstriyel bir sistem. ‘Yaşam Sonu’ kavramını onarım yaklaşımı ile yeniden tanımlıyor, yenilebilir enerji kullanımına yöneliyor, yeniden kullanıma zarar veren toksik kimyasalların kullanımını ortadan kaldırıyor ve üstün malzeme-ürün-sistem tasarımıyla atıkların ortadan kaldırılmasını hedefleyen iş modellerini kapsıyor.”(Ellen McArthur Kuruluşu,2012). Sistem yaklaşımı, onarıcı(*restorative*) ve yenileyici(*regenerative*) ilkelerine vurgu yapılarak döngüsel ekonomi tanımı ve anlayışında önemli bir yere sahiptir(Charonis ve diğ.,2012; Kirchherr ve diğ.,2017), literatürde mikro-mezo-makro sistem olmak üzere üç farklı ölçek üzerinden incelenmektedir. Mikro sistem yaklaşımı (*micro-systems perspective*), üretim-tüketim ağını merkezine alarak döngüsellğin artırılarak tüketimin azaltılmasını hedeflemektedir. Bu yaklaşım ürün, işletme ve son kullanıcı gibi küçük ölçekli ilişkileri kapsamaktadır(Kirchherr ve diğ.,2017). Mezo sistem yaklaşımı(*meso-systems perspective*) genellikle eko-endüstriyel parklar üzerinde yoğunlaşarak, bu eko-endüstriyel parkların birbirleriyle olan ilişkilerine odaklanır(Heeres ve diğ.,2004; Shi ve diğ.,2010; Kirchherr ve diğ.,2017). Eko-endüstriyel park terimi, simbiyotik ilişkiler kurarak ortak bir alanda çevresel, ekonomik ve sosyal faydaların artırılmasına yönelik hedefleri olan şirketler topluluğunu tanımlamaktadır(URL 3). Makro sistem yaklaşımı(*macro-systems perspective*) kapsam bakımından en büyük ölçeğe karşılık gelmektedir, ekonominin yapısal bileşenlerini ve ekonomik yapının ihtiyaçlarına yönelik düzeltmeleri kapsamaktadır(Kirchherr ve diğ.,2017).

- Daraltma(*Narrowing loop*): tasarım ve üretim süreçlerinde kaynakların etkin kullanımını sağlayarak, kullanılan malzeme-enerji ihtiyacını azaltmayı hedeflemektedir(Çetin ve diğ.,2021; Konietzko ve diğ.,2020).
- Yavaşlatma(*Slowing the loop*): mevutta üretilmiş ürünlerin kullanım ömrünü arttırarak, tüketim alışkanlığını azaltmayı hedefleyen bir stratejidir(Çetin ve diğ.,2021; Konietzko ve diğ.,2020).
- Kapatma(*Closing the loop*): malzemenin tekrar kullanımını destekleyerek, tüketim sonrası tekrar kullanımı sağlamak temel motivasyonlardan biridir(Çetin ve diğ.,2021).
- Yenilenme(*Regenerating the loop*): toplumu ve çevreyi daha iyi bir hale getirmeyi hedeflemektedir. Biyoçeşitliliğe(*biodiversity*) zarar vermeden, biyoçeşitliliğe katkı sağlamayı amaçlar. Bu bağlamda toksik olmayan

malzeme ve yenilebilir enerji kullanımını destekler(Çetin ve diğ.,2021; Konietzko ve diğ.,2020).

- Bilgilendirme(*Inform*): bu strateji mevcuttaki dört stratejiye ek olarak Konietzko(2020) çalışmasında yer alan, döngüsellğin takibini sağlayabilmek ve geliştirmek amacıyla bilgi teknolojilerinin kullanımını kapsamaktadır. Malzeme ve enerji kullanımının system içerisinde akışının takip edilebilmesinin önemine ithafen bu strateji eklenmiştir(Konietzko ve diğ.,2020; Hens ve diğ.,2018).



Şekil 2.3 : Akış Diagramı,Konietzko (2020)’den uyarlanmıştır.

Mevcut anlayışta geri dönüşüm(*recycling*), bir üründe kullanılan malzemenin başka bir ürüne dönüştürülmesi ile tekrar kullanım döngüsüne girebileceğini önermesine karşın malzemenin niteliğinde bozulmaları da beraberinde getirmektedir(*downcycling*). Döngüsel ekonomi ve döngüsel tasarım anlayışında bu nitelik kayıpları imkanlar dahilinde sıfıra ya da minimuma indirilmek istenmektedir. Tasarımı bir sistem olarak değerlendirildiği takdirde geridönüşüm sürecini, tasarımın erken aşamalarında planlayarak malzemede nitelik kaybının yaşanmasının engellenebileceği veya minimuma indirilebileceği düşünülmektedir(McDonough ve

Braungart,2002). Tasarımın sonuç ürünü kullanım ömrünü tamamladıktan sonra yeniden kullanım döngüsüne dahil edilebilmesi için çözüm arayışlarına yönelmek yerine, tasarım kurgusunun bir parçası olarak yeniden kullanım senaryosu da tasarıma entegre edilmesini önermektedir.

Amerikalı mimar McDonough ve Alman Kimyager Braungart(2002) döngüsel ekonomi kapsamında döngüsel tasarıma referans olarak beşikten-beşiğe tasarım anlayışını kavramsallaştırmışlardır, doğrusal tasarımı beşikten-mezara olarak ifade etmişlerdir. Beşikten-mezara yaklaşımı kullanım ömrünü tamamlayan malzemenin kullanım döngüsünden çıkmasını tanımlamaktadır. Beşikten-beşiğe tasarım anlayışı ise malzemeyi biyolojik ve teknik döngü olarak iki döngü içerisinde inceleyerek kullanım ömrünü uzatmayı amaçlamaktadır. Ellen MacArthur Foundation, Kelebek Diyagramı ile döngüsel ekonomiye geçiş ve devamlılığın sağlanması sürecinde döngüsel tasarımı teknik ve biyolojik döngüleri görselleştirmiştir. Bu sistem diyagramı malzemenin ve ürünlerin döngü içerisindeki akışının devamlılığını göstermektedir. Teknik döngü tekrar kullanım(*reuse*), onarım(*repair*), yeniden üretim(*remanufacturing*) ve geridönüşüm(*recycling*) aşamaları ile ürün veya malzemenin kesintisiz olarak akışını tariflemektedir. Döngüsel tasarımın mimarlık,mühendislik&inşaat(AEC) kapsamında çeşitli R stratejileri bulunmaktadır. Farklı disiplinlerin gerektirdiği farklı işbirliklerinden dolayı R stratejilerinin çeşitliliği değişmektedir. Bu değişimi sadece gereksinimler ve işbirlikleriyle sınırlamaktan ziyade akademik literatürde de mutabakatın sağlanmaması ve yeni ihtiyaçların gözetilmesi gibi faktörlere dayandırmak mümkündür Vermeulen ve diğ.(2018) çalışmalarında 10R stratejisini ele almışlardır(Vermeulen ve diğ., 2018). Bu stratejiler, yukarıdan aşağıya doğru döngüsellüğün azaldığı stratejiler olarak, hiyerarşik bir biçimde sıralanmıştır(Potting ve diğ., 2017).

Çizelge 2.1 : Döngüsel Tasarımda 10R Stratejisi, Potting (2017)'den uyarlanmıştır.

Akıllıca Ürün Kullanımı ve Üretimi	R0 Reddetme	İşlevinden vazgeçerek veya aynı işlevi kökten farklı bir ürünle sunarak ürünü gereksiz hale getirmek
	R2 Azaltma	Daha az doğal kaynak ve malzeme tüketerek, daha verimli şekilde üretme
Ürün ve Ürün Bileşenlerinin Kullanım Ömrünü Arttırma	R3 Yeniden Kullanım	Halen iyi durumda olan ve orijinal işlevini yerine getiren atılmış ürünün başka bir tüketici tarafından yeniden kullanılması
	R4 Onarım	Arızalı ürünün orijinal fonksiyonuyla kullanılabilmesi için tamir ve bakımının yapılması
	R5 Yenilemek	Eski bir ürünü güncel hale getirerek, restore etmek
	R6 Yeniden Üretme	Atılan ürünün parçalarını aynı işleve sahip yeni bir üründe kullanmak
	R7 Yeniden İşlevlendirme	Atılan ürünü veya parçalarını farklı işlevlere sahip yeni bir üründe kullanmak
Malzemelerin Faydalı Uygulaması	R8 Geridönüşüm	Aynı veya daha düşük kaliteyi elde etmek için malzemeleri işlemek
	R9 Geri Kazanma	İşlevinden vazgeçerek veya aynı işlevi kökten farklı bir ürünle sunarak ürünü gereksiz hale getirmek

Döğüsel ekonomi, kaynakların verimli kullanılması, azaltılması ve geridönüşümün maksimumda tutulması gibi yaklaşımları ile döğüsel bir tedarik zinciri sunarak kapalı sistem ekonomisidir(Pearce ve Turner,1990; Farr ve Piroozfar,2022).Döğüsel tasarım, döğüsel ekonomi kavramını merkezine alarak tasarım süreçlerini kapalı bir döğüye adapte ederek tasarımı bir sistem olarak ele almaktadır. Döğüsel tasarımın temelde üç amacı bulunmaktadır. Tasarım aracılığıyla atığın ve kirliliğin ileri dönüşüm(*upcycle*) ile ortadan kaldırılması(*eliminate*), ürünlerin ve malzemenin mevcut özelliklerini mümkün olduğunca koruyarak döğüsel(*circulate*) tutulması ve yenilenme(*regenerate*) ile biyolojik çeşitliliğin ve doğal kaynakların kalitesini iyileştirecek şekilde tasarlamayı referans alan üç temel hedefi içermektedir(Url5). Bu hedefler, kapalı yaşam döğüsünün tasarıma entegre edilerek, mevcut tasarım anlayışımızın döğüsel tasarım yaklaşımına dönüşmesini olanaklı hale getirir.

2.2 Mimaride Döğüsel Tasarım ve Sistem Yaklaşımı

Döğüsel tasarım, geleneksel tasarım anlayışının aksine tasarımın her aşamasında bütüncül bir sistem yaklaşımı ile döğüsel ekonomi prensiplerinin benimsenmesini kapsamaktadır. Tasarımın kendi içerisinde ve bağlamla kurduğu bütünlüklü ilişkiyi, döğüsel tasarım yaklaşımı malzeme ömrünün tamamlandığı noktada uygulanacak olan kullanım senaryosu dahil olmak üzere yapı bileşenlerinin ve yapı süreçlerinin her birini kapsayacak şekilde tasarlanmasını içermektedir. Mevcut durumda tasarım disiplinin karşılaştığı zorlukları doğru tanımlayıp, analiz edebilmek için döğüsel tasarımda sistem düşüncesi benimsemektedir(URL 5). Elma Durmisevic(2019) yapı kullanım ömrünü tamamladığında yıkılmasının doğrusal bir yaklaşımı beraberinde getirdiğini fakat döğüsel tasarım odaklı çözümlerin uzun vadeli tasarım senaryoları gerektirdiğini belirtmektedir. Bu yaklaşım, binaların yeniden kullanımının önemini vurgulamaktadır. Dönüştürülebilir(*Reversible*) tasarım yaklaşımı ile montaj, dönüşüm ve yeniden kullanımı; kaynak sistemlerinde ve malzemelerinde sürekli kullanım döğülerine yaklaştırarak sistemsel olarak ele alınır. Böylece binaların ve malzemelerin sürekli yeniden kullanım döğülerinde olduğu bir tasarım senaryosunda, dönüştürülebilir tasarım ile döğüsel ekonominin temelini oluşturan çoklu değer önerileri temsil edilmiş olur(Durmisevic, 2019). Ayrıca döğüsel tasarım süreçlerinde, Bina Bilgi Modellemesi (BIM) uygulamaları mimari yapıyı bir sistem olarak ele aldığı için veri takibinin yapılabilmesi noktasında önemli avantajlar sunmaktadır. BIM, yapı

malzemeleri ve bileşenlerinin yaşam döngüsü boyunca etkin bir şekilde yönetilmesi ve takibinin kolaylaştırılmasına imkan tanımaktadır. BIM'in döngüsel tasarım ilkeleriyle entegrasyonu sayesinde, yapı elemanlarının söküm ve yeniden kullanımına yönelik planların yapılması mümkün hale gelmekte, bu da kaynak verimliliğinin artırılmasına ve atıkların azaltılmasına katkı sağlamaktadır. (Bilal ve diğ., 2016). Döngüsel tasarım ve sistem anlayışının bir diğer önemli yönü, yapı performansının zaman içerisinde gözlemlenebilmesi ve iyileştirilmesi yönünde akıllı teknolojilere entegrasyonunun yapılabilmesidir. Akıllı sensörler ve Nesnelerin İnterneti (IoT) cihazları, enerji kullanımı, malzeme korozyonu ve yıpranması hakkında eş zamanlı veriler sağlayabilmektedir. Bu veriler, bakım stratejilerini ve kullanım ömrü sonu kararlarını bilgilendirerek, yapıların yaşam döngüsü boyunca verimli ve sürdürülebilir bir şekilde çalışmasına olanak sağlamaktadır (Kibert, 2016). Döngüsel tasarımın mimarlıkta uygulanabilmesi, doğrusal bir zihniyetten döngüsel bir yaklaşıma geçişi gerektirir ve inşaat değer zincirindeki paydaşların işbirliğini içerir. Buna ek olarak, tasarım süreci farklı aktörlerle iş birliğini gerektirmektedir, bu nedenle disiplinler arası bir çalışmayı zorunlu kılarak, doğrusal ekonomiden döngüsel ekonomiye geçişte, döngüsel tasarım yaklaşımının benimsenmesi gerçekçi uygulamaların yapılabilmesinde büyük önem arz etmektedir (Aguiar ve diğ., 2019). Mimarlar, mühendisler, yükleniciler ve malzeme tedarikçileri arasında işbirliği, döngüsel ekonomi ilkelerine uygun yenilikçi çözümler geliştirmek için kritik öneme sahiptir. Örneğin, modüler inşaat teknikleri, yapı bileşenlerinin kolayca sökülmesini ve yeniden yapılandırılmasını sağlayarak yeniden kullanımını teşvik eder ve inşaat atıklarını azaltır (Adams ve diğ., 2017). Sonuç olarak, döngüsel tasarım, inşaat sektörünün çevresel ve kaynak kullanımı sorunlarını ele alan sürdürülebilir ve ileriye dönük bir mimarlık anlayışını temsil eder. Döngüsel ekonomi ilkelerini tasarım sürecine edilmesiyle birlikte kaynak verimliliği, atıkların azaltılması ve uzun vadeli çevresel korumayı önceliklendiren vb. hedeflerin daha sürdürülebilir bir ekseninde gerçekleştirilmesi mümkün olabileceği düşünülmektedir.

2.3 Döngüsel Tasarıma Geçiş Sürecinde Dijital Yaklaşımlar

Döngüsel tasarım, tasarım sürecinin bütün aşamalarının bütüncül bir yaklaşımla ele alınmasını gerektirdiği için farklı sektörlerle iş birliklerinin önemini arttırmaktadır. Disiplinler arası çalışmaların güçlenebilmesi için kullanılan tasarım araçlarının birlikte

çalışmaya imkan sağlayan dijital ekosistemlere dönüşmesi büyük bir önem arz etmektedir(Çetin ve diğ.,2021). Farr ve Piroozfar(2022) küresel ekonomi(*spherical economy*) kavramının sistemsel(*systemic*) dönüşüm için inşaat sektöründe döngüsellğin sağlanabilmesine katkı sağlayacak, gerekli bir kavram olduğu düşüncesini öne sürmüşlerdir. Küresel ölçekte inşaat sektörünün bir sistem olarak ele alınmasının önemine vurgu yapılarak, alt sistemlerin birbirleri ile kurduğu etkileşimin gerekliliği bu kavram çerçevesinde belirtilmiştir. İnşaat sektörünü doğası gereği farklı süreçlerin birleşiminden oluşan, temel bir bütünlük arz eden süreci barındırmaktadır. Sistemsel dönüşümde dijital teknoloji destekli bir yaklaşımın benimsenmesi parçalı süreçleri barındıran bütüncül bir sürecin yönetilmesinde ve döngüsellğin sağlanmasında önemli bir yere sahiptir(Farr ve Piroozfar,2022). Küresel ölçekte inşaat ekonomisinin(*spherical construction economy*) kaynakların ve süreçlerin ideal yönetimini sağlayarak çevreye duyarlı sistemlere dönüşebilmesi noktasında iki boyutlu, statik ve pasif etkileşim kuran mekanizmalardansa üç boyutlu dinamik, eş zamanlı çalışan modellerle desteklenmesi mevcut paradigmanın değişiminde büyük önem arz etmektedir. Bu sayede küresel ölçek kapsamı aktif-değişebilen bilgi destekli mekanizmalarda döngüsellğin çeşitli boyutlarını ve farklı eksenlerini kapsayarak şekillenebilmektedir(Farr ve diğ.,2022). Verilerin yönetimi, depolanması ve toplanması noktasında dijital teknolojileri bünyesinde barındıran, teorik ve uygulamaya yönelik çalışmalar, döngüsel yaklaşımda veri eksikliğinin giderilmesinde önemli bir yere sahiptir(Çetin ve diğ.,2023). Literatürdeki çalışmaların çeşitliliğinin artması, farklı dijital araçların birarada kullanılabileceği mevcut anlayıştan farklı yeni yöntemleri de beraberinde getirebilmektedir. Bu sayede literatürün zenginleşerek, yenilikçi uygulamaların gerçekleşmesi için kavramsal altyapısının gelişebileceği düşünülmektedir. Gordon ve diğ.(2023) yeniden inşaa(*reconstruction*) ve kurtama(*recovery*) amacıyla yıkım bölgesini lidar tarayıcı teknolojisinden faydalanarak eş zamanlı fotogrametri yöntemi ile BIM programına entegre ederek, kurtarılabilecek elementlerin fizibilitesini puanlayan dijital sistem önermişlerdir. Honic ve Kovacic(2020) multidisipliner araştırma projeleri SCI_BIM ile mevcut binalardan lazer taramak yaparak elde ettikleri nokta bulutu(*Cloud Point*) ile üç boyutlu BIM modelini oluşturmuşlardır. Bu sayede yapının enerjini analizleri yapabilmektedirler ve mevcut yapı binaların malzeme pasaportunu oluşturabilmektedirler. Raghu ve diğ.(2022) mevcut yapıların cephe kaplama malzemesini ayırt edebilen görsel very ile çalışan bir makine öğrenmesi

geliştirmişlerdir. Kapı, pencere vb. yeniden kullanılabilen(*reuse*) yapı bileşenleri üzerinden veri toplanmasını sağlayarak yapılı çevreye dair verilerin sınırlı olduğu bölgelerde, yeniden kullanım döngüsüne dahil edilebilecek mimari bileşen verilerinin okunabilmesini sağlamaktadır. Çetin ve diğ.(2022) geliştirdikleri yapay zeka uygulaması sayesinde mimari yapı cepheleri üzerindeki bozulmaları uydu görseli, sokak görselleri gibi farklı araçlarla elde edilen görsel verilen üzerinden saptayabilmektedirler. Geliştirilen dijital araçların sayısının artması, döngüsel tasarım yaklaşımının gerçekçi uygulamalara dönüşebilme potansiyelini arttırmaktadır. Mimari yapıyı analiz edilebilir, yaşam döngüsü aşamalarına ayırabilir ve bu değerlendirmeler sonucunda tasarım kararlarının alınmasına katkı sağlanabileceği öngörülmektedir.



3. MİMARLIKTAKİ VERİ ODAKLI TASARIM VE İNŞAAT SÜRECİ

Döngüsel tasarımın mimarlık alanına entegrasyonu sürecinde, tasarım ve inşaat aşamalarının sistematik bir şekilde yürütülüp analiz edilebilir hale getirilmesi büyük önem taşır. Bu süreçlerde, yapıların çevresel etkilerinin azaltılması ve kaynakların verimli kullanımı için yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) gibi analiz yöntemleri kritik bir rol oynar(Cabeza ve diğ., 2014). Döngüsel tasarım kapsamında döngüsel ekonomi prensiplerinin uygulanması için çeşitli analiz yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemler, yapıların yaşam döngüsünü belirli aşamalara göre inceleyerek daha bilinçli ve nitelikli karar alma süreçlerini desteklemektedir. Analiz süreçlerinin doğru yapılabilmesi için belirlenecek parametreler, analizin yapılacağı verilerin doğruluğu ve erişilebilirliği, seçilen parametrelerin analizin amacına uygunluğu gibi noktalar önemli bir yere sahiptir(Häkkinen ve Belloni, 2011). Bu kapsamda mimari verilerin doğrultusunda karar almak mümkün olup, tasarım kararlarını veriler doğrultusunda analiz edilerek analiz sonuçları doğrultusunda kararlar alınıp bu kararların çevresel etkilerinin değerlendirilebilmesi olanaklı hale gelmektedir(Dixit ve diğ., 2012).

3.1 Mimari Yapının Döngüsellüğünün Değerlendirilmesi

Mimari yapıların döngüsellüğü, sürdürülebilirlik odaklı çağdaş tasarım anlayışının temel bir bileşenini oluşturmaktadır. Bu anlayış ekseninde yapıların kapalı döngüde kalması hedeflenerek, döngüsel ekonomi prensiplerine uygun olarak tasarlanması, kullanım ömrü ve yapı kullanım süresini tamamladıktan sonraki dönüşüm sürecinin yönetilebilmesi büyük önem arz etmektedir. Dolayısıyla tasarım-inşaat-yıkım süreçleri sistematik bir bütün oluşturmaktadır. Bu sistematik yaklaşımın doğru yönetilebilmesi noktasında yapının döngüsellüğünün değerlendirilmesi, çevresel etkilerin azaltılması, kaynakların verimli kullanılması ve enerji tüketiminin optimize edilmesi gibi konularda tasarımcılara yardımcı bir kılavuz niteliğindedir. Bununla birlikte, yapılarda döngüsellüğün değerlendirilmesi için kullanılacak değerlendirme kriterlerinin bütüncül bir teorik çerçevesinin oluşturulamaması, genel bir mutabakatın sağlandığı parametrelerin eksikliği, şeffaf ve anlaşılır bir tanımlanmasının yapılamaması nedeniyle çeşitli zorlukları barındırmaktadır. Net bir şekilde kapsam-sınırları tanımlanmış ve kolayca anlaşılabilir kriterlerin eksikliği, yapı sektöründe sürdürülebilir ve çevreci yaklaşımların kullanım yaygınlığını azaltmaktadır. (Güngör

ve diğ., 2024; Khadim ve diğ., 2023). Mevcut literatür çalışmaları, döngüsellik göstergelerinin tasarım araçları olarak nasıl kullanılabileceğinin önemini vurgulamasına karşın uygun ve tutarlı parametrelerin eksikliğini eleştirerek, döngüsel tasarım prensiplerinin sağlayacağı katkıyı ölçmenin ve paydaşlara aktarmanın zorlaştığını vurgulamaktadır(Incilli ve diğ.,2023; Benachio ve diğ.,2020). Bunun bir sonucu olarak araştırmacılar, döngüsellği ölçmek için yeni teorik çerçeveler önermenin mimarlık ve inşaat sektöründe olumlu anlamda katkı sunacağını belirterek, bu alanda teorik çalışmalarla literatüre katkı sağlamanın önemini vurgulamaktadırlar(Incilli ve diğ.,2023; Zhang ve diğ.,2021; Kayaçetin ve Tanyer,2016). Akademik literatür araştırmaları ekseninde, döngüsellğin ölçülebilmesi için öncelikle döngüsellik göstergelerinin tanımlandığı, göstergelerin çeşitli alt başlıklara ayrılarak kavramsallaştırıldığı gözlemlenmiştir. Böylece tasniflemenin ve tanımlamanın en doğru ifadelerle yapılmasının amaçlandığı düşünülmektedir. Döngüsellik seviyesini ölçmek için belirli kapsamları barındıran çeşitli döngüsellik göstergeleri bulunmaktadır(Cottafava ve Ritzen,2020; van Vliet,2018). Bu döngüsellik göstergelerini yapı döngüsellik göstergesi(BCI), malzeme döngüsellik göstergesi(MCI) ve ürün döngüsellik göstergesi(PCI) olarak üç başlık altında değerlendirmek mümkündür fakat bu üç kavrama ek olarak yaşam döngüsü değerlendirmesi kapsamı itibariyle yapıların döngüsellüğünün değerlendirilmesinde büyük önem arz etmektedir. Mevcut literatürde en yaygın kabul görmüş göstergelerden biri olan, Ellen MacArthur Vakfı(EMF) ve Granta Design tarafından geliştirilmiş olan malzeme döngüsellik göstergesi(MCI) malzemenin sistem içerisinde takibini referans alan dört temel ilkeye dayanarak yapmaktadır. Bunlar yeniden kullanılan veya geridönüştürülmüş kaynaklardan hammaddelerin kullanılması, ürün kullanım ömrünü tamamladıktan sonra bileşenlerin yeniden kullanımı veya malzemelerin geri dönüştürülmesi, ürünlerin daha uzun süre kullanılmasını sağlamak ve ürünlerin daha yoğun kullanımının sağlanmasıdır. Bu gösterge malzeme döngüsellik seviyesinin belirlenmesi için geliştirilerek, doğrusal kullanım akışının ne kadar azaltıldığı, onarıma yönelik akışın hangi oranda maksimum seviyeye çıkarıldığını, kullanım ömrünün benzer ürünlere kıyasla ne kadar arttırıldığı ve kullanım yoğunluğunu ölçmeyi hedeflemektedir(Gonzalez ve diğ.,2020). Teorik çerçevenin oluşturulup, genişletilmeye başlamasıyla birlikte bu alanda uygulamaya yönelik akademik çalışmaların sayısı artma eğilimi gösterdiği saptanmıştır. İlk olarak Verberne(2016) tarafından malzeme döngüsellik göstergesinin(MCI) daha da

geliştirilerek uygulanması sonucu ortaya koyulmuş önemli çalışmalardan biri yapı döngüsellik göstergesidir(Building Circularity Indicator, BCI)(Gonzalez ve diğ.,2020; Heisel ve Rau-Oberhuber,2020;Verberne,2016). Yapı döngüsellik göstergesinin temel çalışma prensibi, bir yapı içerisinde yer alan doğramalar, döşemeler, mobilyalar gibi yapıya dair her bir bileşen için ayrı olarak malzeme döngüsellik göstergesi hesabına dayanmaktadır. Buna karşın yapı döngüsellik göstergesi, her bileşenin çevresel etkisinin değerlendirme üzerindeki ağırlığını da hesaba katacak bir yöntemle ifade etmek için, tasarımsal kararların etkilediği faktörleri de referans alacak şekilde geliştirilmiştir. Böylece her bileşenin yapı ve doğal çevreye etkisi, tasarım kararı ve kullanım ömrü gibi unsurlar göz önüne alınarak ağırlıklı olarak hesaplanır(Cottafava ve Ritzen,2021).Yapı döngüsellik değerlendirme modeli, malzeme döngüsellik göstergesi(MCI), ürün döngüsellik göstergesi(PCI) ve yapı döngüsellik göstergesi(BCI) bileşenlerini kapsamaktadır. Malzeme döngüsellik göstergesi(MCI), malzemenin sistem içerisinde takibinin yapılabilirdiği, bu sayede malzeme girdisi-çıktısı ve kullanımı izlenebilen, teorik bir ürün döngüsellik göstergesi olarak tanımlanabilir. Bu değerlendirme modelindeki basamaklardan ikincisi, malzemelerin ve ürünlerin bağlantıları ve arakesitleri de kapsayacak şekilde ürün döngüsellik göstergesini(PCI) geliştirmektir. Arakesitler ve bağlantılar, kuru bağlantı veya kimyasal birleşimler şeklinde uygulandığında ürünlerin döngüsellliği her zaman yeniden kullanım için uygun olamayabilir. Bu nedenle ürün döngüsellik göstergesi bir sistem içerisindeki ürünlerin döngüsellliğini bir bütün olarak değerlendirmektedir. Bu bağlamda ürün döngüsellik göstergesi(PCI) fonksiyona dayalı, teknik ve dekonstrüksiyonel gereksinimleri gözeterek Sökme için Tasarım(DfD) ilkelerine dayalı ek parametreleri de içermektedir. Malzeme döngüsellik göstergesinin(MCI) teorik döngüsellik değerinin aksine, ürün döngüsellik göstergesi(PCI) pratik bir döngüsellik değeri oluşturmaktadır(Verberne,2016). Döngüsellik göstergerleri ekseninde üretilen kavramlara ek olarak hem teorik hem de pratik uygulamaya yönelik, bir değerlendirme yöntemi de yaşam döngüsü değerlendirmesidir(YDD). Sürdürülebilir bir tasarım anlayışı, yalnızca mevcut çevresel etkileri değil, gelecekteki olası çevresel etkileri de gözetken kapsamlı bir anlayışı içerisinde barındırmaktadır. Bu yaklaşıma uygun olarak geliştirilen tasarım stratejilerinin, kantitatif bir yaklaşımla, değerlendirilmesini yaşam döngüsü değerlendirmesi(YDD) ile yapılabilmek mümkündür(Vandenbroucke ve diğ.,2015). Bu bağlamda geliştirilen uluslararası standartlar, bu yöntemin uygulanma süreçlerini ayrıntılı bir şekilde tariflemektedir.

YDD, ham madde girdisi, üretim, kullanım ve kullanım sonrası bertarafı ya da geridönüştürülmesine kadar olan tüm süreçle ilgili çevresel etkileri değerlendirme amacıyla kullanılan kapsamlı ve mimarlık başta olmak üzere çeşitli disiplinlerde uygulanabilen önemli bir metodolojidir(Krezlik ve Güzelci,2021; Kayaçetin ve Tanyer,2020; ISO,2006). Bu metodolojideki amaç, süreçlerin veya ürünlerin kaynak, enerji kullanımları gibi sürdürülebilirliği artırma potansiyeli olan parametreler ekseninde çevresel ayak izini değerlendirerek, üretim ve tasarım süreçlerindeki stratejileri değerlendirmeyi olanaklı hale getirmektir. Bu yaklaşım, kullanılacak bir ürünün yaşam döngüsü boyunca hem olumsuz çevresel etkilerini hem de potansiyel katkılarını bütüncül bir bakış açısı ile değerlendirmeye olanak sağlar(Li ve diğ.,2016). Bu yaklaşım beşikten mezara (cradle-to-grave) ilkesi içerisinde barındırır ve kullanılacak bir ürünün yaşam döngüsü boyunca hem olumsuz çevresel etkilerini hem de potansiyel katkılarını bütüncül bir bakış açısı ile değerlendirmeye olanak sağlar. EN 15804 ve ISO 14040/44 standartları, YDD süreçlerini ve bu süreçlerin raporlanmasını yönlendirme amacıyla kullanılan önemli iki kılavuz niteliğindedir. YDDnin, genel metodolojik çerçevesi uluslararası ISO 14040 ve ISO 14044 standartları referans alınarak oluşturulmuştur. EN 15804, Avrupa Birliği'nde geçerli olan ve özellikle yapı malzemeleri ile inşaat ürünlerine ilişkin Çevresel Ürün Beyanlarını(ÇÜB) regüle etmek için kullanılan bir standarttır. Bu standart, yapı ürünlerinin çevresel performansını değerlendirmek amacıyla ÇÜB için temel kuralları ve metodolojik çerçeveyi sunmaktadır. EN 15804, inşaat sektörüne ve yapı malzemelerine özgü çevresel etki değerlendirmelerine rehberlik eder, bu bağlamda yapı ürünlerinin tüm yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerinin sistematik bir biçimde analiz edilmesine olanak sağlar. Bu standart, inşaat sektörünün sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda çevresel performansını, şeffaf ve karşılaştırılabilir şekilde değerlendirilmesine olanak sağlar(Url12). Van Vliet(2018) çalışması kapsamında Yapı Söküm Değerlendirme Yöntemi(Building Disassembly Assessment Method) geliştirerek mevcut metodolojiyi yeniden ele almıştır. Çalışmanın esas amacı, yapıların sökölme potansiyelini ve yapı elemanlarının geridönüşümü, malzeme kazanımı ve yeniden kullanıma uygunluğu değerlendiren bir metodoloji geliştirilmesidir. Bu çalışma Alba Concepts bünyesinde Hollanda Yeşil Bina Konseyi(Dutch Green Building Council) iş birliğiyle, yapıların sökülebilirlik potansiyelini değerlendiren bir metodoloji olarak yeniden ele alınmış ve Alba Concepts metodu olarak geliştirilmiştir(van Vliet ve diğ.,2021).

3.2 Mimari Verinin Sistematik Okunması

Döngüsel tasarım anlayışı ile birlikte mimari yapı ve bileşenlerin yaşam döngüsü tasarım sürecinin bir parçası olarak görülmektedir(URL 2). Bu yaklaşım beraberinde yapı ve bileşenlere ait yaşam döngüsünü verilerinin, bütünlüklük bir veri yönetim merkezi ihtiyacını ortaya çıkarmıştır(Çetin ve diğ.,2023). Bu bağlamda, mevcut yapı stoğunun, yeni yapıların inşası veya renovasyon süreçlerinde malzeme olarak kullanılabileceği görüşü tartışılmaya başlanmış ve bu doğrultuda döngüsel tasarım stratejileri değerlendirilmektedir(Benachio ve diğ., 2020; Heisel ve Rau-Oberhuber, 2020). Bu kapsamda yapı bütün bir sistem olarak ele alınıp, yapı bileşenleri bu sistemin alt sistemleri olarak değerlendirilmektedir. Yapılı çevredeki mimari bileşenlerin; malzeme özellikleri, malzeme kalitesi ve yapıda yer aldığı konumuna dair yetersiz dökümantasyon; inşaa sürecinde yeniden kullanımının veya geri dönüşümünün sağlanması noktasında zorlu bir süreci barındırmaktadır(Çetin ve diğ., 2023;Honic ve diğ., 2019a; Iacovidou ve diğ., 2018; Koutamanis ve diğ., 2018). Yapının barındırdığı yapısal bileşen verilerini standardize etmek amacıyla malzeme pasaportu kavramı kullanılmaya başlanmıştır. Malzeme pasaportu, mimari sistemdeki elemanların malzeme ve bileşen olarak ayrılmış özelliklerini tanımlayan ve onların mevcut kullanım, geri dönüşüm ve yeniden kullanım açısından değerlendirilmesini sağlayan dijital veri kümeleridir(Mulhall ve diğ., 2022). Bina Bilgi Modeli, proje ve yapıya dair verilerin toplanarak, depolandığı yerel bölgede merkezi bir veri sisteminin dijital aracı olarak düşünülmektedir. Malzemelerin pasaportları sayesinde ‘kimlik’ kazandığı bu öneride, bina malzeme bankaları binaya ve malzemeye dair verileri merkezi bir sistem içerisinde yönetimini sağlayarak kapalı bir döngü ekonomisi sunmaktadır(Farr ve Piroozfar,2022). Bu yaklaşım yapıya dair verilerin de döngü içerisinde kullanılabilmesini, verinin okunabilmesini kolaylaştırmaktadır. Bina bankaları farklı bölgeleri içeren bilgi havuzlarını birleşik-entegre bir sistem üzerinden Bina Hesabı Yönlendirme Numarası(*n-BARN*) aracılığıyla senkronize şekilde yönlendirebilmektedir(Farr ve diğ.,2022). Malzeme pasaportu sağlayacağı veriler sayesinde doğrusal tasarım sürecinden, döngüsel tasarıma geçişte önemli bir dönüm noktası olmasına karşın mevcut yapı çevrenin standardizasyonunu mümkün kılan bir çerçeve sunmamaktadır(Çetin ve diğ. 2023). Bu nedenle malzeme pasaportu çalışmaları yapı çevreden veri toplayarak, veriyi işleme ve inşasına yeni başlanacak

yapıların malzeme pasaportlarının yönetilmesi gibi iki ana başlık altında çeşitlilik göstermektedir.

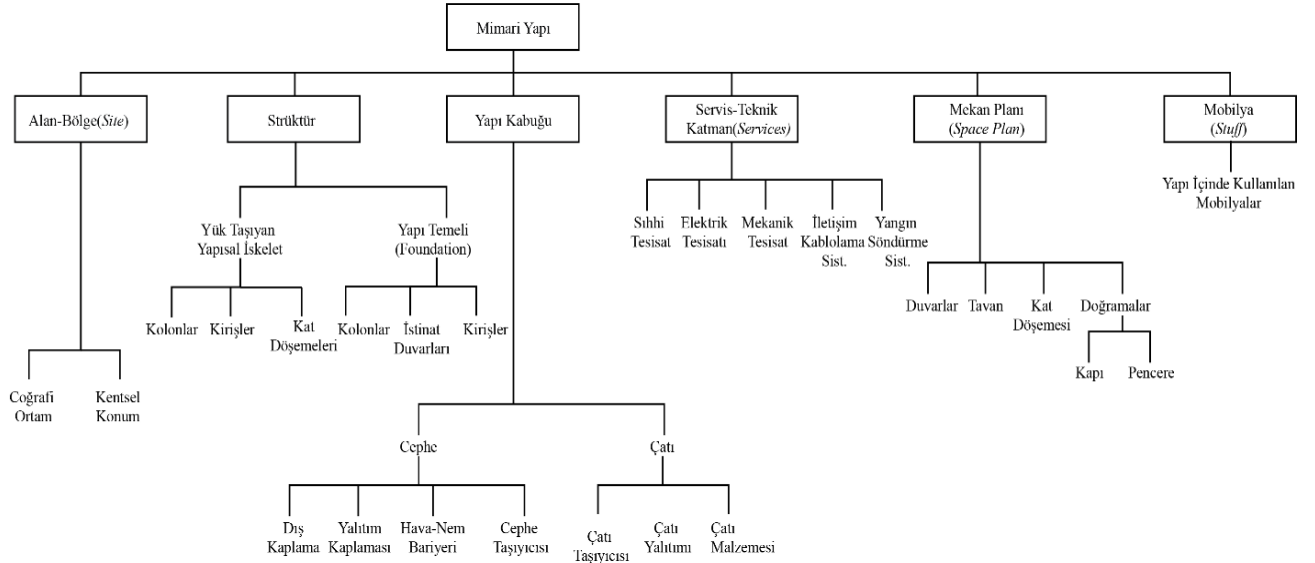
Yeni inşaat süreçlerinde malzeme pasaportu kullanılarak yapı bileşenlerinin tasniflenmesi, mimari verilerin sistematik hale getirilmesi sağlanabilir fakat mevcut yapı stoğunun sistematik bir veri setine dönüşebilmesi için kavramsal çerçevenin yeniden ele alınması ve dijital tasarım araçlarından faydalanılması gerekmektedir(Heisel ve Rau-Oberhuber, 2020). Döngüsel tasarıma geçişte dijital yaklaşımlar başlığı altında yer verilen örnek akademik çalışmalar, yapılı çevre üzerinden dijital araçlarla verinin toplanması ve malzeme pasaportu kavramının temel amacına hizmet eden veri tasniflenmesi-yönetilmesi noktasında yenilikçi çözümler sunmaktadır. Bu bağlamda Avrupa Komisyonu dijital ürün pasaportu kavramını sunarak; bir ürünün orijinal hali, dayanıklılığı, bileşimi, yeniden kullanımı, onarımı ve sökülme olanağı verilerini kullanarak kullanım ömrünü ve yaşam döngüsü hakkında bilgi sağlayacak blok zincir tabanlı bir yaklaşım önermiştir(European Comission, 2022). Dijital ürün pasaportu üretici, düzenleyici ve son kullanıcı da dahil olmak üzere tasarım-üretim-inşaa süreçlerindeki çeşitli aktörlerin gereksinim duyduğu veriyi takip edilebilir, şeffaf ve döngüsellliği değerlendirilebilir şekilde tasarlanmış, merkezi bir veri depolama sistemidir(Psarommatis, 2024). Dijital ürün pasaportu; malzeme pasaportunun aksine yapılı çevreyi dışlamayan, sektörler arası bir kavramdır(Çetin ve diğ., 2023). Malzeme pasaportu kavramı ekseninde akademik ortamda üretilen dijital veri çalışmaları, dijital ürün pasaportu ilkelerinde yer alarak, tanımı ve kapsamı itibarıyla yapılı çevreyi de bünyesine dahil edebilmektedir. Böylece yeni yapılacak yapılar ve mevcut yapılı çevrenin bünyesinde barındırdığı malzemenin bilgisi takip edilebileceği ve merkezi şekilde depolanabileceği öngörülmektedir. Sürdürülebilir Ürünler için Eko Tasarım Yönetmeliği kapsamında dijital ürün pasaportunun, ürün-yaşam döngüsü boyunca veri üzerinden bilinçli karar alma mekanizmasını kurarak döngüsel ekonomiye katkı sağlaması hedeflenmiştir(Jensen ve diğ., 2023). Fakat mevcut çalışmalar kavramsal çerçeve çizerek, uygulamaya yönelik gerçekçi önerileri henüz kapsamamaktadır. Dijital ürün pasaportunun kavramsal kurgusu, veri standardizasyonu eksikliği içermektedir(Jansen ve diğ., 2022), buna ek olarak veri hassasiyeti ve uygulanabilirliği konusunda belirsizlikler barındırmaktadır(Jansen ve diğ., 2023). Kavrsamsal çerçevenin gerçekçi uygulamalara dönük detaylandırılmasının yapılmaması nedeniyle veri hassasiyeti ve uygulama

noktasındaki belirsizlikler giderilmemesine karşın, yapılan akademik çalışmaların artmasıyla bu belirsizliklerin giderilebileceği düşünülmektedir. Güncel çalışmalar döngüsel tasarıma geçiş sürecinde ve sonrasında veri toplanması-verinin yönetilmesi süreçlerine vurgu yapmaktadır. Mimari verinin sistematik hale getirilmesi için kullanılan dijital tasarım araçlarının tek tip olmaması nedeniyle standardizasyonun tek tip olması mevcut durumda mümkün görünmemektedir. Bu detaylı sınıflandırmanın geliştirilmesi sayesinde ticari yönetmelikler düzenlenmiş ve sonrasında bilgisayar bilgisayar destekli çizim araçlarında çizim katmanlarının tanımlanmasında kullanılmaya başlanmıştır. Bu sayede çizim dosyalarında belirli bir standart yakalanarak, mimari teknik çizimlerin ortak dili güçlendirilmiştir(URL 8). Buna karşın mimari bileşenin yapısal özelliklerinin ifadesini güçlendiren bir sistematik üzerinde henüz mutabakat sağlanamamıştır. Farklı disiplinlerden iş birliklerine imkan sağlayan; Malzeme pasaportu, dijital ürün pasaportu gibi yaklaşımların geliştirilmesi, mimari verinin sistematik ifadesinin arandığı noktada önemli bir örnek olarak ele alınmaktadır. Yeni yapılacak yapılarda tasarım sürecinden başlayarak bu sistemlerin uygulanması düşünülmektedir, bu yönde uygulanabilir çözüm arayışları mevcuttur.

3.3 Yapının Mimari Bileşenlerine Ayrılması

Mimarlık disiplini, sürekli değişen çevresel koşullar ve kullanıcı ihtiyaçları doğrultusunda evrim geçirmektedir. Bu bağlamda, döngüsel tasarım, yapıların zaman içerisinde değişen gereksinimlerine karşılık verebilen dinamik ve sürdürülebilir bir yaklaşımı bünyesinde barındırmaktadır. Döngüsel tasarım, önceki bölümlerde detaylı olarak açıklandığı üzere yapıların yalnızca ilk aşamada değil, kullanım ömürleri boyunca etkili ve çevreci çözümler ekseninde kullanılabilmesi ve dönüştürülebilmesi için gerekli stratejileri içerisinde barındırmaktadır. Böylece bu yaklaşım hem teknik gereksinim açısından hem de işlevsel yönlerden yapının daimi olarak gelişmesini ve adaptasyon geçirmesini olanaklı kılar. Yapının eskimesi, yapıda bozulmaların meydana gelmesi, kullanıcı ihtiyaçlarının ve alışkanlıklarının değişmesi zaman içerisinde karşılaşılan durumlardır; fakat her yapı bileşeni aynı özelliklere, strüktürel davranışlara ve kullanım ömrüne sahip değildir. Bir yapı, “farklı kullanım ömürlerine sahip bileşenlerin, birkaç katmanının bir kombinasyonu” olarak kabul edilir (Duffy, F.,1990; Roders ve diğ.,2005). Döngüsel tasarım anlayışının teorik arka planını uygulanabilir yaklaşımlara entegre etme sürecinde, mimari yapıyı yapı katmanları

üzerinden okumak, mimari bileşenlerin döngüsel anlayışa göre tasniflenmesinde önemli bir yere sahiptir(van Vliet,2018). Bu aşamada mimar Richard Brand'ın "Katmanları Kesme" (Shearing Layers)(1994) modeli yapı bileşenleri ve demonte edilebilirlik parametrelerine dair temiz bir çerçeve sunarak sağlıklı bir kategorizasyon yapılmasını mümkün kılmaktadır(Kayaçetin ve diğ., 2023). Brand'ın 1994 yılında literatüre kattığı, "How Buildings Learn: What Happens After They're Built" adlı çalışmasında tanımladığı bu model, çeşitli yapı bileşenlerinin zaman içerisinde farklı hızlarda değişim geçirebileceği ilkesini ortaya koyar. Bu çalışma sayesinde yapı bileşenleri dahil edildikleri kategori içerisinde değerlendirilmiş olup, her bir kategorinin kendine özgü yaşam süresinden bahsedilebilmek mümkün olmuştur. "Katmanları Kesme" (Shearing Layers)(1994) modeli ilk olarak İngiliz mimar Frank Duffy tarafından "dört S(Four S)" olarak, dört yapı katmanını temsil eden, kabuk (Shell), servisler(Services), sahne(Scene) ve set(Set) ortaya konulmuştur. Bu dört katmandan kabuk(Shell) yapısal çerçeveyi, servisler(Services) yapı için gerekli olan tüm teknik tesisat birimlerini, sahne(Scene) plan düzlemindeki mekânsal bölümlenmeyi üçüncü boyutta yansıtan iç duvarları ve set(Set) olarak tanımlanan katman ise kullanılan mobilyaları temsil etmektedir. Duffy tarafından ortaya atılan bu "Dört S(Four S)" kavramı, daha sonra Steward Brand(1994) tarafından "Altı S(Six S)" kavramı olarak geliştirilerek, genişletilmiştir. Brand, Duffy'nin terminolojisinde yer alan kabuk(Shell) kavramını, mimari yapıdaki dış yüzeyleri temsil eden yapı kabuğu(Skin) ve yapı temelindeki mimari bileşenler ile mimari taşıyıcı elemanları yapı çerçevesi (Structure) olarak tanımlayarak, öne sürülen mevcut kavramları alt başlıklara ayırmıştır. Buna ek olarak önceki terminolojide yer alan sahne(Scenery) kavramını, mimari mekânsal plan(Space plan) ve set(Set) kavramını mobilyalar ve eşyalar(stuff) olarak değiştirmiş, Duffy'nin ürettiği kavramlardan yalnızca servisler (services) kavramını olduğu gibi korumuştur. İki S kavramı olarak mevcut kavramlara eklenen S'lerden yalnızca alan-bölge(site), "Değişimin katmanları kesme "nin bir parçası olarak yer almakta olup, coğrafi çevre, kentsel yerleşimler ve yasal parseller gibi terimlerin yapı bileşenlerinin katmanlarına eklenmesi amacıyla dahil edilmiştir. İnsan ruhunu temsil eden ruh(Soul) kavramı ise, katman hiyerarşisinin muhtemel yedinci ve son "S"si olarak yalnızca bir olasılık olarak belirtilmiştir(Pereira ve diğ., 2005). "Katmanları kesme" teorisinin barındırdığı katmanlar ve katmanların kapsamı şekil 3.1'de görüldüğü üzere şu şekildedir;



Şekil 3.1: Brand Kesme Katmanları, Brand (1994)’ten uyarlanmıştır.

Alan-Bölge (Site): Bu katman, yapının yerleşim yeri ile ilgili tüm fiziksel, coğrafi ve yasal düzenlemeleri kapsar. Konum, yapı tasarımının en kalıcı unsurlarından biridir ve genellikle değişmez. Bu kapsamda, mülkiyet hakkı, zemin koşulları, altyapı bağlantıları ve yerel düzenlemeler gibi faktörleri Alan-Bölge katmanı ekseninde incelemek mümkündür. Konumun kalıcılığı, bir yapının tasarımında uzun vadeli stratejiler geliştirilmesine olanak tanır, çünkü bu katman bünyesinde yapılması planlanan değişiklikler hem maliyeti hem de yapının bütünlüğünü etkileyebilmektedir (Brand, 1994; Durmisevic, 2006).

Strüktür (Structure): Yapı strüktürü, yapının temel taşıyıcı elemanlarını içerir ve bu katman, genellikle yapının kullanım ömrü boyunca en az değişen bileşendir. Yapı strüktürü, yapı temeli, taşıyıcı duvarlar, kolonlar ve kirişler gibi ana taşıyıcı destek elemanlarını içerir. Bu katmanın uzun ömürlü olması, yapının genel stabilitesi ve güvenliği için kritik öneme sahiptir. Yapı strüktürü, genellikle kapsamlı yenileme, kentsel dönüşüm projeleri sırasında veya önemli yapısal güçlendirmeler gerektiğinde değiştirilir (Brand, 1994; Durmisevic, 2006).

Yapı Kabuğu (Skin): Yapı kabuğu, yapının dış yüzeyini oluşturan kaplama malzemelerini, cephe taşıyıcılarını, birleşim elemanlarını ve dış izolasyonları içerir. Zaman içerisinde bu katman, estetik ve enerji verimliliği gibi işlevsel gereksinimlere göre düzenli olarak yenilenir. Yapı kabuğu malzemeleri hava koşullarına bağlı olarak

zamanla aşınabilmektedir, bu nedenle bu katman genellikle orta vadeli bir kullanım ömrüne sahiptir ve tasarımı sırasında hem görsel hem de teknik unsurlar göz önünde bulundurulmaktadır (Brand, 1994; Durmisevic, 2006).

Servisler (Services): Servisler katmanı, yapı içindeki tüm teknik sistemleri kapsar, bunlar arasında elektrik, su, ısıtma, soğutma ve havalandırma gibi tesisat sistemleri bulunmaktadır. Tesisat sistemleri, teknolojik gelişmelere ve kullanıcı ihtiyaçlarına bağlı olarak sık sık güncellenebilmektedir. Bu nedenle, servisler katmanı en kısa kullanım ömrüne sahip olan katmanlardan biridir ve bu katmanın sağlıklı şekilde yönetilebilmesi, düzenli bakım ve yenileme gerektirmektedir (Brand, 1994).

Mimari Mekânsal Plan (Space Plan): Mimari Mekânsal plan katmanı, yapının mekansal düzenini ve kullanım alanlarını belirler. Bu katman, yapının iç mekan düzenlemesi, odaların yerleşimi ve kullanım amaçları gibi unsurları bünyesinde barındırarak, bölücü duvarlar, tavan, kat döşemesi ve doğramaları içerir. Kullanıcı ihtiyaçlarına ve fonksiyonel gereksinimlere bağlı olarak bu katmanın içerdiği bileşenler değişebilir, bu nedenle orta vadeli bir kullanım ömrüne sahiptir ve tasarımda kullanım ömrüne dayalı bir esneklik sağlayabilmektedir (Brand, 1994; Durmisevic, 2006).

Mobilyalar ve Eşyalar (Stuff): Mobilyalar ve eşyalar, yapının içindeki sabit ya da yeri değiştirilebilen mobilyaları ve eşyaları ifade eder. Bu katman, en kısa kullanım ömrüne sahip olan bileşendir ve kullanıcıların ihtiyaçlarına göre ya da estetik kaygılar nedeniyle periyodik olarak değiştirilebilir. Bu katmanın doğru yönetimi, tasarımcıların mekânın kullanımını optimize etmelerine olanak tanır ve sıklıkla yenilenebilir (Brand, 1994; Durmisevic, 2006).

Literatürde, "Katmanları Kesme" (Shearing Layers) teorisinin içerisinde yer alan kullanım ömrüne bağlı esneklik ve adaptasyon imkânları, yapıların yaşam döngüsü yönetiminde önemli avantajlar sağladığı belirtilmektedir. Özellikle, yapı bileşenlerinin ömrü ve yenilenme hızlarının kategorizasyonunun yapılması, yapı tasarımında döngüsel ekonomi prensiplerinin entegrasyonunu destekler. Bu yaklaşım, yapıların kaynak verimliliğini artırmaya olanak sağlayarak ve çevresel etkilerini azaltarak uzun vadeli sürdürülebilirliği destekler (Kibert, 2016; Durmisevic, 2006).

Brand'ın teorisi, döngüsel tasarımın temel ilkeleriyle uyumlu olarak, yapıların kullanıcı ihtiyacına bağlı olarak esnekliğini ve yeniden kullanım potansiyelini artırır.

Yapı bileşenlerinin kullanım ömürlerine bağlı katmanlar olarak ayrılması, yapıların yenilenebilirlik ve sürdürülebilirlik açısından daha etkin bir şekilde yönetilmesine olanak sağlar. Bu bağlamda, Brand'in teorisinin, yapı tasarımı ve yönetiminde kullanıma bağlı olarak esneklik, adaptasyon ve yenilenebilirlik konularında önemli bir referans noktası oluşturduğu ve bu kavramların uygulamaya geçirilmesi açısından değerli bir kılavuz niteliğinde olduğu düşünülmektedir (Brand, 1994; Kibert, 2016). Böylece döngüsel tasarım ekseninde yapılan çalışmalarda yapıların bileşenlerine ayrılması noktasında teknik ve rasyonel yaklaşımı nedeniyle “Kesme katmanları” teorisi önemli bir yere sahiptir ve akademik literatürde üretilen çalışmalarda sık sık kullanıldığı gözlemlenmiştir (Kayaçetin ve diğ., 2023).

3.4 Veri Odaklı Karar Verme

Karar alma süreçlerinde, birden fazla kriterin bulunduğu durumlarda kararın amacına ve kullanımına yönelik doğru yapılandırılmış bir mantıksal yapının bulunması avantaj sağlamaktadır (Rajagopalan ve diğ., 2021). Bu bağlamda çoklu kriter üzerinden karar alma yöntemi, Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) teorik olarak ilk defa Myers ve Alpet tarafından 1968 yılında ortaya konulmuş çoklu kriter üzerinden karar alma mekanizmalarının temelini oluşturmaktadır (Huang ve diğ., 2011). 1977 yılında Thomas Saaty, Myers ve Alpet tarafından geliştirilen teoriyi ikili karşılaştırmalar yoluyla matematiksel olarak geliştirerek karar alma mekanizmalarında uygulanabilir bir yöntem haline getirmiştir (URL 10). AHS yönteminde, veri hiyerarşisindeki her basamak matematiksel hesaplamalar üzerinden detaylandırılarak, tek bir doğru sonuçtan ziyade problem-amaç doğrultusunda en uygun çözüme ulaşılması sağlanmaktadır. Problemin iyi tanımlanmış olması, karar alma sürecindeki alt değerlendirme mekanizmalarının daha spesifik sorulara odaklanarak daha doğru yanıtlar elde etmesine katkı sağlamaktadır (Rajagopalan ve diğ., 2021; Saaty, 1994). Analitik Ağ Süreci (AAS), Thomas Saaty tarafından geliştirilen karar verme yönteminin AHS ile birlikte çalışan diğer önemli kavramıdır ve temelde AHS yönteminin genişletilmiş bir versiyonudur. AAS, hiyerarşik olmayan ilişkileri ve geri bildirimleri içeren karmaşık ağ yapılarını ele alması noktasında AHS yönteminden ayrılır. AAS, karmaşık ağ ilişkilerinin-etkileşimlerinin anlaşılması ve etkileşimlerin tanımlanması için ağırlıklı ilişkiler matrisleri kullanılarak matematiksel çözümlere olanak sağlar (Saaty, 2004). AHS/AAS yöntemlerini referans alarak geliştirilen,

Superdecision, Maut, Promethee gibi karar alma süreçlerini veri bazlı yöneten bilgisayar yazılımları mevcuttur. Amaç, kapsam ve veri tanımlarının net olarak sınırlarının belirlenebildiği noktalarda bu yazılımların kullanımı kolaylaşmaktadır. Buna karşın, mimari tasarım gibi sınırları ve kapsamı kesin olarak belirlenemeyen alanlarda, mevcut veri odaklı çoklu karar alma mekanizmalarının üzerinde çalışılarak geliştirilmesi hedeflenmektedir. Bu bağlamda, Döngüsel tasarım anlayışının mimari yapılara entegrasyonu sürecinde, tasarımcıların veri odaklı karar almalarını kolaylaştırmak için çeşitli karar destek yöntemleri ve araçları geliştirilmiştir. Bununla birlikte, çevresel etkileri göz önünde bulundurarak, karar alma süreçleri genellikle son derece karmaşık olup, doğa bilimleri, fiziksel bilimler, sosyal bilimler, politika ve etik gibi farklı disiplinlerden elde edilen çok boyutlu bilgi temellerine dayanmaktadır. Disiplinler arası iş birliğinin ve bilgi akışının sağlanması, yeni yöntemlerin ve araçların geliştirilebilmesi noktasında oldukça önemlidir. Buna karşın, bu araçların uygulanabilmesi giderek zorlaşmaktadır ve bunun iki temel nedeni vardır. İlk olarak iklim değişikliği, küresel ısınma vb. bilgi eksikliği bunan yeni kavramlar ortaya çıkmaktadır ve bu eksende alınacak kararlar veri eksikliği nedeniyle bazı belirsizlikleri içerebilmektedir. İkinci neden olarak, ölçme yöntemlerinin farklı kavramlar için de aynı yolu izlemesi ve analiz edilen kavramın farklı alternatif bir yöntem gerektirdiğinin gözardı edilmesidir(Huang ve diğ., 2011). O nedenle analiz yöntemlerinin geliştirilmesi ve kapsamının detaylı tanımlanması ve mimari analiz edilebilir verinin oluşturulması büyük önem taşımaktadır. Çevreye etkisi yüksek olabilecek tasarım kararlarının öngörülebilmesi amacıyla bazı ilgili araçlar geliştirilmiş olsa da, mevcut durumda tasarımcıların aldıkları tasarım kararlarını operasyonel düzeyde yönlendirilmeye katkı sağlayabilecek yardımcı bir aracın olmadığı saptanmıştır. Mevcut geliştirilmiş araçlar genellikle belirli bir zaman dilimini kapsayacak şekilde ve parametre sayısını sınırlı tutarak değerlendirme yapmaktadır. Bu nedenle de analiz sonuçları tek yönlü olabilmektedir(Greer ve diğ., 2022; Kalbar ve diğ., 2016; Kalbar ve diğ., 2012). Yapıların çevresel etkilerini ve döngüsellik potansiyellerini farklı parametreler üzerinden değerlendirerek, analiz eden karar destek araçlarından biri One Click LCA'dır. One Click LCA, YDD'ni kullanarak yapıda kullanılan malzemelerin çevresel etki değerlerini analiz eder ve bu analiz sonucuna göre etkilerin minimum düzeye indirilmesi için çeşitli sayısal veriler sunmaktadır(Url 17, Url 18). Böylece alınacak kararların malzeme ölçeğinde çevresel etkisini nicel bir şekilde ölçmek mümkün olmaktadır. YDD yöntemi, veri odaklı karar

alma araçlarının geliştirilmesi ve teorik çerçevesinin oluşturulmasında yaygın bir kullanıma sahiptir. Benzer bir yaklaşımla, Teknik Komite 350 (CEN/TC 350) ve iiSBE Portekiz'de yürütülen sürdürülebilirlik değerlendirme sistemi (SBToolPT) geliştirme çalışmaları çerçevesinde, yapının YDD'si ve bu çalışma kapsamında oluşturulan bir veritabanı doğrultusunda çevresel etkisi düşük malzeme ve yapı elemanlarının seçimini destekleyen bir karar alma aracı geliştirilmiştir(Bragança ve Mateus, 2012). Literatürdeki araştırmalar incelendiğinde, döngüsellik göstergeleri ve YDD gibi yaklaşımları kullanarak karar destek mekanizmalarının oluşturulması, karar verme araçlarının üretilmesi, veri tabanlarının iyileştirilmesine ve mevcut metodolojinin geliştirilmesine yönelik çalışmalara rastlanmıştır(Kayaçetin ve Tanyer,2020). BBRI-VCB ekibi geliştirdikleri “Circular Built” aracı ile geridönüşüm ve yeniden kullanım potansiyelini değerlendirmeyi amaçlamışlardır. Döngüsel tasarım ekseninde inşaat faaliyetlerinin yürütülmesi için bir kılavuz ve ölçüm sistemi olan bu araç, mimarlar ve paydaşlar tarafından alınacak kararların mümkün mertebede döngüsel olmasını nicel veri üzerinden destekleyecek şekilde tasarlanmıştır(Kayaçetin ve diğ.,2023).

Sonuç olarak, mimari tasarım süreçlerinde alınan kararların analitik bir şekilde değerlendirilmesi ve daha rasyonel hale getirilmesi için veri analizi temelli bir geri bildirim mekanizmasının oluşturulması, sosyal, ekonomik ve çevresel sürdürülebilirliği artırma potansiyeline sahip önemli bir araç olarak değerlendirilmektedir. Bu alandaki araştırmaların daha da derinleştirilmesi ve disiplinler arası yöntemlerin benimsenmesi, mimarlık disiplininde yenilikçi yaklaşımların ve döngüsel tasarım perspektifinin entegrasyonuna katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

3.5 Mimari Bileşenlerin Döngüsellik Değerinin Saptanması

Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi(YDD), tasarım ve inşaat sektöründe malzeme kullanımı ve projelendirme süreçlerinde çevresel etkileri değerlendirmek için kullanılan önemli bir araçtır. Buna karşın geleneksel YDD yöntemleri statik anlayışa sahip olmaları, tek bir yaşam döngüsüne odaklanmaları ve DE uygulamalarını, özellikle malzeme yeniden kullanımı, yeniden imalat ve geri dönüşüm gibi süreçler noktasında yeterli entegrasyonu sağlayamamaları nedeniyle, alternatif tasarım ve inşaat stratejilerinin sağlayabileceği potansiyel katkılardan tam olarak faydalanamamaktadır(Khasreen ve diğ., 2009). Buna ek olarak geleneksel YDD

yöntemleri, piyasa koşullarında meydana gelen değişimlere uyum sağlayabilme ve teknoloji alanındaki gelişmelere göre değişim gösterebilen mimarlık-inşaat sektörünün dinamik doğasına adapte olma noktasında yetersiz kalmaktadır(Blengini ve Di Carlo, 2010). YDD, çevresel etkilerin değerlendirilmesi için literatürde kabul görmüş önemli bir araç olmasına karşın sahip olduğu bazı sınırlamalar mevcuttur. Statik Yapı: Geleneksel YDD genellikle süreçleri ve ürünleri belirli bir zaman dilimini referans alacak şekilde analiz etmektedir. Bu nedenle dinamik yapıdaki çevresel, ekonomik, teknolojik vb. parametreleri hesaplayarak analiz etme noktasında yetersiz kalabilmektedir. Karar Verme Desteğinin Sınırlı Olması: YDD sonuçları, birden fazla hedef veya alternatif çözümün gerekli olduğu durumlarda karar vermeyi zorlaştırabilmektedir. Tek Yaşam Döngüsüne Odaklanma: Geleneksel YDD yöntemleri doğrusal bir yaşam ömrünü referans alarak, tek bir yaşam döngüsüne odaklanır ve yeniden kullanım, geri dönüşüm gibi alternatif yaşam döngülerini değerlendirme dışında tutabilmektedir. Bu noktada Alba Concepts tarafından geliştirilen ve Hollanda Yeşil Bina Konseyi tarafından desteklenen, Alba Concepts metodu döngüsel tasarım hedeflerine uygun karar alma stratejilerini destekleyen bir metodoloji sunmaktadır(van Vliet ve diğ.,2021). Alba Concepts Hollanda merkezli, mimarlık-inşaat sektöründe döngüsel ekonomi-tasarım ekseninde çevresel etki değerlendirmesi ve karar destek mekanizmalarının geliştirilmesi çalışmalarının odak noktasını oluşturan bir danışmanlık ve araştırma şirkettir. Özellikle YDD ve DE gibi yaklaşımlar üzerine yoğunlaşarak, tasarım, inşa, kullanım ve yıkım süreçlerinde çevresel etkileri minimum düzeye indirmeyi hedefleyen çeşitli araçlar ve metodolojiler geliştirmektedir(van Vliet ve diğ., 2021). Alba Concepts'e göre döngüsellik en temelde malzemelerin kullanım biçimleri ve malzemenin kökeni olmak üzere iki ana bileşene dayanmaktadır. Malzeme indeksi, malzeme kökeni, bertaraf senaryosu ve teknik kullanım ömrü parametrelerini kullanırken, Sökülebilirlik indeksi, bağlantı erişilebilirliği, bağlantı erişim zorluğu ve bağlantı türü parametrelerini referans alarak bu bileşenlerin değerlendirmesi ve ölçümünü yapmaktadır(Gulck ve diğ., 2021, Url 13). Bu yöntem mimarlık ve inşaat sektöründeki karar merciiilerinin, kullanılan ya da kullanılması planlanan malzemelerin birden çok yaşam döngüsü boyunca kullanım potansiyellerini ve malzeme performanslarını değerlendirmelerine olanak sağlamaktadır. Mimari yapıların tek bir kullanım senaryosundan ziyade gelecekteki sökülebilmek potansiyelini ve malzemelerin geri kazanımını gözeterek bu yaklaşımın, DE ve DT'ye geçişi destekleyici olduğu düşünülmektedir(Pomponi ve Moncaster, 2017).

Sökülebilme potansiyeli ve malzeme geri kazanımının sistematik bir çerçeveye oturtularak, tasarımcılara tasarım süreçlerinde rehber olabilmesi bu noktada büyük önem arz etmektedir. Bu bağlamda Söküm Belirleyici Faktörlerin(Durmisevic, 2006) tanımlandığı Söküm için Tasarım(DfD) yaklaşımı, yapıların gelecekteki potansiyel değişikliklerine adaptasyonu kolaylaştıracak ve bileşenlerin, yapı elemanlarının ve malzemenin geri kazanımı için kısmen ya da tamamen sökülmesine olanak sağlayan önemli bir tasarım ilkesidir(Ciamrimboli ve Guy, 2005). Söküm için Tasarım anlayışında Söküm Belirleyici Faktörler(Durmisevic, 2006) işlevsel, teknik ve fiziksel durumu kapsarak sökülme potansiyelinin belirlenmesinde parametre olarak yer almaktadır. Bu anlayışın benimsendiği bir tasarım süreci uygulandığında, karar alma döngüsü tekrarlandıkça tasarımın düzenli olarak iyileştirilmesinin mümkün olduğu düşünülmektedir(Durmisevic, 2006). Mevcut literatür çalışmaları, Söküm için Tasarım(DfD) yaklaşımı noktasında yeniden kullanım potansiyelinin, çevresel etkinin ve YDD'nin araştırma alanının birbirleri ile bağlantılı kavramlar olabileceğine dair eğilimleri göstermektedir(Lukianova ve diğ., 2022). O nedenle güncel bir YDD, Söküm için Tasarım(DfD) prensiplerini kapsayarak daha doğru karar alma süreçleri ve döngüsellik değerlendirmesinin yapılabileceği düşünülmektedir. Alba Concepts Metodu, Söküm için Tasarım(DfD) yaklaşımını da ilkesel olarak benimseyerek, döngüsellikğin saptanması ve değerlendirilmesi noktasında Söküm Belirleyici Faktörleri parametre olarak kapsamında barındırmaktadır(van Vliet ve diğ., 2021). Böylece tasarım anlayışına çok yönlü bir yaklaşım geliştirebilmektedir. ALBA Concepts yöntemi, DE ve DT ilkelerini yaşam döngüsü değerlendirmelerine entegre ederek dinamik modelleri ve birden çok yaşam senaryosu içeren analizlerin yapılmasına imkan sağlayarak, alternatif tasarım yaklaşımlarını olanaklı kılabilir(Ghisellini ve diğ., 2016; Chau ve diğ., 2015). Bu yöntem, tasarımcıların daha sürdürülebilir, döngüsel yapılar tasarlamalarına, çevresel etkileri nicel olarak belirleyip farklı alternatifler arasında karşılaştırmalar yapmalarına olanak tanır(Cabeza ve diğ., 2014). Alba Concepts, yapıyı yapı elemanlarının hiyerarşik bir eleman kümesi, yapı bileşenlerini ise hiyerarşik bileşen kümesi olarak değerlendirmektedir.

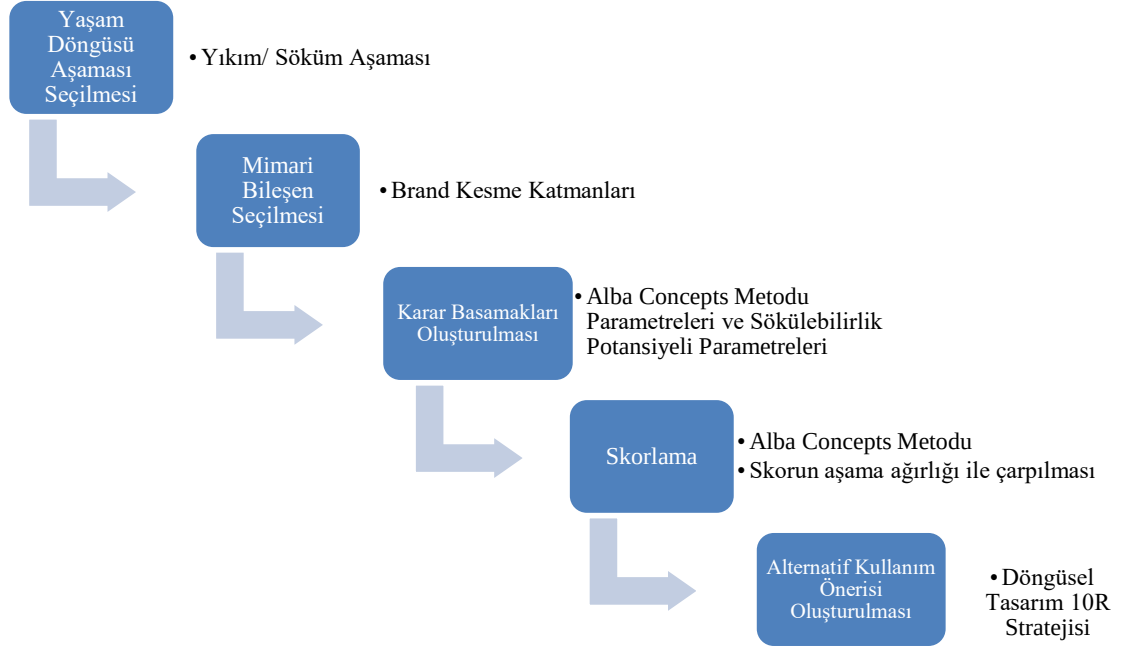
Bu bağlamda, Ürün Döngüsellik Göstergesini(PCI) bileşenlerin hiyerarşik kümesi üzerinden değerlendirip, Eleman Döngüsellik Göstergesini(ECI) elemanların hiyerarşik kümesi üzerinden ele almaktadır. Yapı Döngüsellik Göstergesini(BCI),

değerlenirebilmek için Eleman Döngüsellik Göstergesinin(ECI) ve Ürün Döngüsellik Göstergesinin(PCI) belirlenerek bu iki referans üzerinden hesaplanması gerekmektedir(Gluck ve diğ., 2021). Bu değerlendirmelerin teorik çerçeveden ayrılarak pratik uygulamaya yönelik adımlarının atılması noktasında değerlendirecek yapı envanterinin, yapıya dair verilerin ve değerlendirme parametrelerin doğru saptanması hem alınacak kararların döngüsellığının doğru değerlendirilmesine hem de çıkan sonuçların doğruluğuna katkı sağlayacaktır.



4. VAKA ÇALIŞMASI: TROYA MÜZESİ CEPHE PANELLERİ

Çalışma kapsamında mimarlık ve inşaat sektörü bazında, Döngüsel Tasarım stratejileri ayrıntılı olarak incelenmiş, bu stratejilere dayalı metodolojiler araştırılmıştır. Özellikle yapı ve yapı bileşenlerinin yaşam döngüsüne odaklanan mevcut metodolojiler ve bunların geliştirilmiş versiyonları analiz edilmiştir. Döngüsel ekonomi prensiplerine dayanan bu metodolojiler, yapıların yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerini en aza indirmek, sökülebilirlik, geri dönüşüm ve yeniden kullanım olanaklarını arttırmayı hedeflemektedir. Bu bağlamda, tasarımcılara alternatif çözümler sunabilecek bir karar destek mekanizmasının geliştirilmesi amaçlanmıştır. Karar destek mekanizmasında, yaşam döngüsü değerlendirmesi(YDD), mimari bileşen kararlarının rasyonelleştirilmesinde kullanılan brand kesme katmanları yaklaşımı ve yapının döngüsellik potansiyelini ölçmeye yönelik olarak Alba Concepts metodu vaka çalışması kapsamında araç olarak kullanılmıştır. Bu mekanizma, döngüsel tasarımın 10R stratejisi üzerinden tasarım kararlarını yönlendirmekte, döngüsellığı en yüksek stratejiden başlayarak yapı bileşenlerinin kullanımı için alternatif senaryolar önermektedir. Böylece, döngüsel tasarım kararları alınmasına olanak tanıyan, yapıların sökülebilirliği ve malzemelerin yeniden kullanılabilirliği gibi döngüsel ekonomi ilkelerine dayanan bir yaklaşım ortaya konmaktadır.



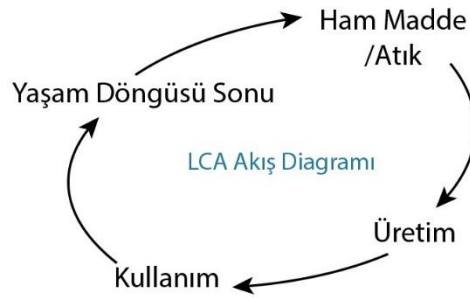
Şekil 4.1 : Vaka çalışması akış diagramı

4.1 Yaşam Döngüsü Değerlendirmesinde Kullanılan Araçlar

Tez çalışması kapsamında mimari yapının döngüsellliğini değerlendirerek, sonraki kullanım ömrü senaryolarında tasarımcılara tasarım süreçlerinde yardımcı olması hedeflenen karar destek mekanizması geliştirilmeye çalışılmıştır. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesinin ve karar destek mekanizmasının oluşturulması için teorik ve uygulamaya yönelik belirli araçlar kullanılmış olup, araştırmanın vaka çalışması bölümünde bu araçlar önemli bir yere sahiptir. Araştırma kapsamında kullanılan araçlar Yaşam Döngüsü değerlendirme, Brand Kesme Katmanları ve Alba Concept Metodudur.

4.1.1 Yaşam döngüsü değerlendirme

Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi, teorik ve pratik çalışmalar ekseninde adım adım gelişmekte olan önemli bir metodolojidir. Ham madde girdisi, üretim bandı, kullanım ve yaşam döngüsü sonu olmak üzere dört aşamadan oluşan yaşam döngüsü, döngüsel tasarım anlayışı ile birlikte lineer bir süreç yerine atığın da ham madde girdisi olarak değerlendirilmesiyle bir kapalı döngü oluşturmaktadır.



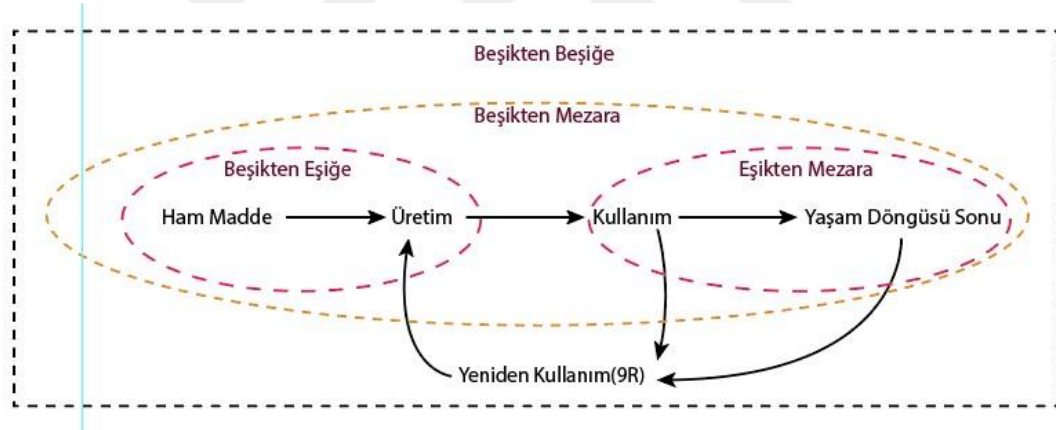
Şekil 4.2 : YDD diagramı

Bu metodoloji, EN 15804 ve ISO 14040-44 olmak üzere iki temel standart üzerinden gelişmiş olup, akademik literatürde yaygın bir kullanıma sahiptir. ISO 14040-44 standardına göre YDD, amaç ve kapsamın tanımlanması, envanter analizi, yaşam döngüsü değerlendirme ve sonuçların yorumlanması olmak üzere dört aşamaya ayrılmaktadır(Cabeza ve diğ., 2014).

- Amaç ve kapsamın tanımlanması, değerlendirme sisteminin sınırlarını ve ana işlevini net olarak belirlenmesini temsil etmektedir.

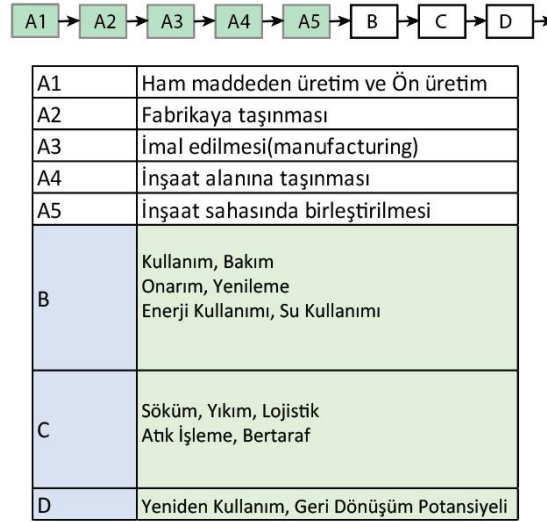
- Yaşam döngüsü envanteri, analizi yapılacak olan yapı, bileşen veya malzemenin yaşam döngüsü boyunca girdi ve çıktılarını kapsayan ilgili verilerin toplanmasını ifade etmektedir.
- Yaşam döngüsü etki değerlendirmesi, bir önceki aşamada yer alan yaşam döngüsü envanteri verilerine dayalı potansiyel çevresel etkilerin, hesaplanabilir nicel ölçümlerini kapsamaktadır.
- Yorumlama, nicel ölçümler sonucunda elde edilen verilerin değerlendirilmesi ve karar süreçlerine yönelik yorumların sunulduğu aşamadır(ISO, 2006).

ISO 14040-44 standardı genel bir metodolojik çerçeve sunarak, inşaat sektörü için özelleşmiş bir kapsam yerine farklı sektörlerde de kullanıma olanak sağlamaktadır. Bu nedenle farklı disiplinlerle iş birliğini gerektiren döngüsel tasarım yaklaşımında kullanımı, tasarım anlayışının kapsamını genişletebilmektedir. Böylece mevcut doğrusal döngü yerine alternatif kapalı yaşam döngüsü senaryosunun geliştirilebilmesi de mümkün olabilmektedir.



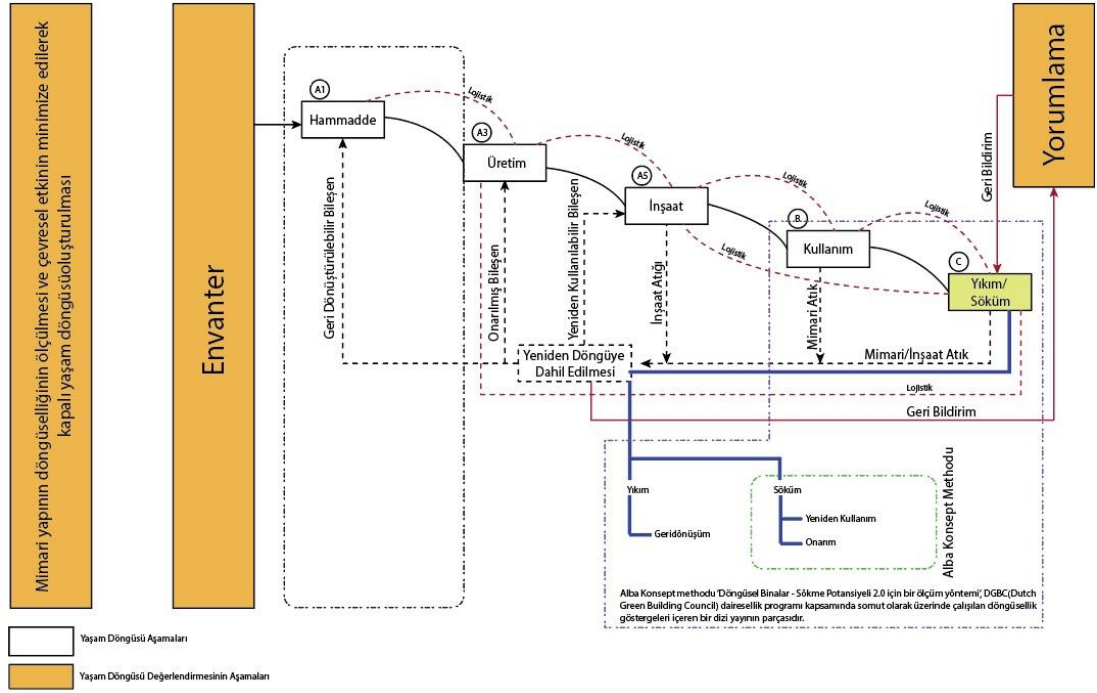
Şekil 4.3 : Yaşam döngüsü aşamaları, Brangaça (2012)’den uyarlanmıştır.

Buna karşın EN 15804 standardı döngüsellüğün değerlendirilmesi noktasında, inşaat sektörünün kullanımına özel bir standart olduğu için YDD sırasında yapı bileşenleri ve malzemelerinin kullanım ömrüne dair ek bilgileri gerektirmektedir. EN 15804 standardı, modüler bir yaşam döngüsüne(A1-D aşamaları) olanak sağlaması nedeniyle tasarımın farklı yaşam evrelerinde analizi olanaklı kılmaktadır. Böylece farklı kullanım senaryoları ve yaşam döngülerini değerlendirmeyi mümkün hale getirmektedir.



Şekil 4.4 : YDD aşamaları, Krezlik (2021)'den uyarlanmıştır.

Yapılan literatür araştırmaları sonucunda YDD'yi geleneksel YDD ve güncel çalışmalar ekseninde gelişen YDD olarak iki başlıkta okumanın mümkün olduğu sonucuna varılmıştır. Güncel yaklaşımlar YDD'nde eksik olduğu düşünülen, değerlendirme parametrelerinin ve aşamalarının geliştirilmesi üzerine odaklanmaktadır. Buna karşın YDD'de bütüncül ve kapsayıcı bir anlayışın gerekliliği üzerinde yoğunlaşan çalışmalar mevcuttur(Lam ve diğ., 2022; Kayaçetin ve diğ., 2023). Bu nedenle döngüsellik değerlendirme parametrelerinin ve normların kapsayıcı bir teorik çerçevesinin oluşturulmasının, önemli bir katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Bu bağlamda YDD ekseninde geliştirilen metodolojileri, geleneksel YDD yaklaşımında yer alan ve katkı sağlayacağı öngörülen parametrelerle birlikte geliştirmenin akademik literatürü olumlu yönde ilerleteceği öngörülmektedir. Benzer bir yaklaşım ile, Lam ve ekibi(2022), YDD'sini EN 15804'e dayanan standartlar ekseninde döngüsel ekonomi stratejilerini uygulayarak vaka bazlı çalışmalara ihtiyaç duymadan tek bir skorlama yöntemi ile birleştirmiş olup, bu çalışmada yapı döngüsellik göstergesi ve YDD arasındaki kopukluğa dikkat çekerek, bu iki kavramı birleştiren tek bir skorlama yöntemi önermiştir.(Lam ve diğ., 2022). Tez çalışması kapsamında, bu çalışmada yer alan entegrasyon amacıyla, YDD aşamasında EN 15804 normları, ISO 14040-44 normları ve döngüsel ekonominin yıkım- söküm süreçlerini referans alan stratejileri seçilerek bu üç bileşenin entegre edildiği tek bir skorlamaya olanak sağlayan, kavramsal bir çerçeve oluşturulmaya çalışılmıştır.



Şekil 4.5 : YDD kavramsal çerçeve

Oluşturulmuş olan bu teorik çerçevede yer alan turuncu arka plana sahip parametreler ISO 14040-44 standardının içerdiği basamakları temsil etmektedir ve bu basamaklar tez çalışmasının temel amacı ve kapsamını yansıtacak şekilde düzenlenmiştir. ISO 14040-44 standardının, basamak sıralama olarak korunmuş olup, Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesi aşamasındaki parametreler EN 15804 standardında yer alan yaşam döngüsü aşamalarını kapsayacak şekilde oluşturulmuştur. Ham madde girdisinden başlayarak sırası ile üretim, inşaat, kullanım ve yıkım/söküm süreçlerini bütüncül bir teorik çerçeveye dönüştürerek, bu aşamaların, YDD'sini daha kapsamlı ve okunaklı hale getirmek amaçlanmıştır. Oluşturulan bu teorik çerçeveye, döngüsel tasarım stratejileri kapsamında geri dönüşüm, onarım ve yeniden kullanım senaryoları dahil edilmiş olup; yorumlama basamağında, analizlere dayalı karar alma sürecini kapalı döngü anlayışına uygun olarak yönlendirmek amaçlanmıştır. Bu bağlamda, çalışma kapsamı yıkım/ söküm aşamasını referans alacak şekilde sınırlandırılarak, vaka çalışması bu ekseninde yürütülmüştür. Söküm aşaması yeniden kullanım ve onarım senaryolarını göre, yıkım aşaması geridönüşüm senaryosunu referans alacak şekilde ilerlemektedir. Teorik çerçevenin birincil hedefi mümkün ise söküm aşamasını teşvik etmek ve beraberindeki yaşam senaryolarının gerçekleştirilebilmesini teşvik etmektir. Söküm aşamasının mümkün olmadığı durumlarda teorik çerçevenin ikincil hedefi,

yıkım aşamasını geri dönüşüm senaryosu ekseninde gerçekleştirilmesini destekleyici bir yaklaşım sunmaktır. Bu sayede yaşam döngüsünü kapalı bir döngü içerisinde tutarak, yapıda döngüsellğin teşvik edilmesi amaçlanmaktadır.

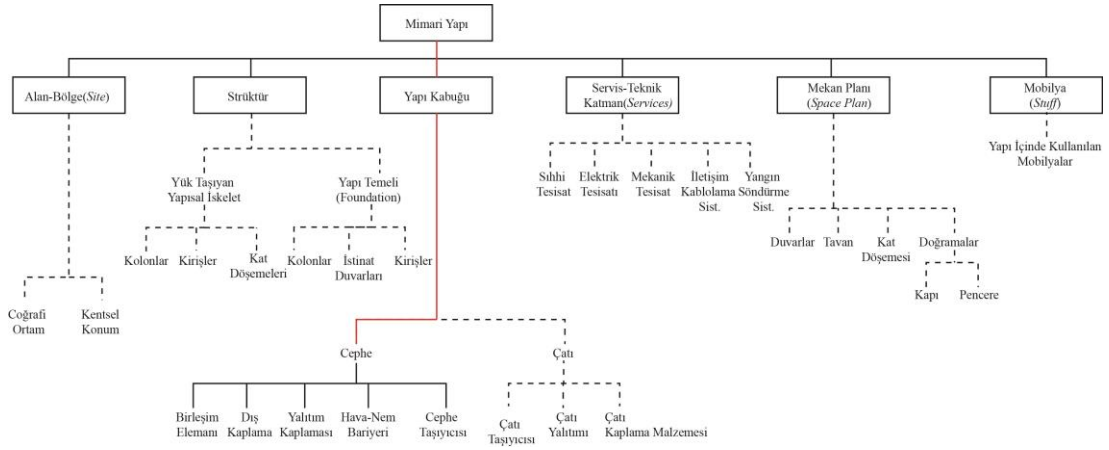
4.1.2 Brand kesme katmanları

Döngüsellğin analiz edilmesi sürecinde, analiz edilecek bileşenlerin analize uygun şekilde tasniflendirilmesi sonuç çıktıları doğrudan etkileyen önemli bir basamaktır. Bu noktada Brand kesme katmanları, YDD ve Söküm için Tasarım(DfD) yaklaşımlarında yapı bileşenlerinin kategorizasyonu için yaygın olarak kullanılan önemli bir sınıflandırma aracıdır. Brand Kesme Katmanları, döngüsellğin değerlendirilmesi noktasında Alan-Bölge, Strüktür, Yapı Kabuğu, Servisler, Mimari Mekansal Plan ve Mobilyalar olmak üzere farklı kullanım ömürlerine sahip altı alt kategoriden oluşmaktadır ve böylece yapı bileşenlerinin ayrı ayrı analiz edilmesine olanak sağlayan, modülerliği ve sökülebilirliği destekleyen bir yaklaşım sunmaktadır(van Vliet, 2018; Durmisevic, 2006).



Şekil 4.6 : Brand kesme katmanlarının yaşam süresi, van Vliet (2021)'den ve Durmisevic, (2006)'dan uyarlanmıştır.

Vaka çalışmasının kapsamının sınırlandırılması, tasarımcının müzeyi ön üretimli bir yöntemin hakim olduğu şekilde tasarlaması, korten malzemenin zaman içerisinde yapı ile birlikte görsel olarak eskimesi, çağdaş mimarlık alanında yaygın bir kullanıma sahip olması, nedeniyle yapı kabuğu- cephe başlıkları seçilmiştir.



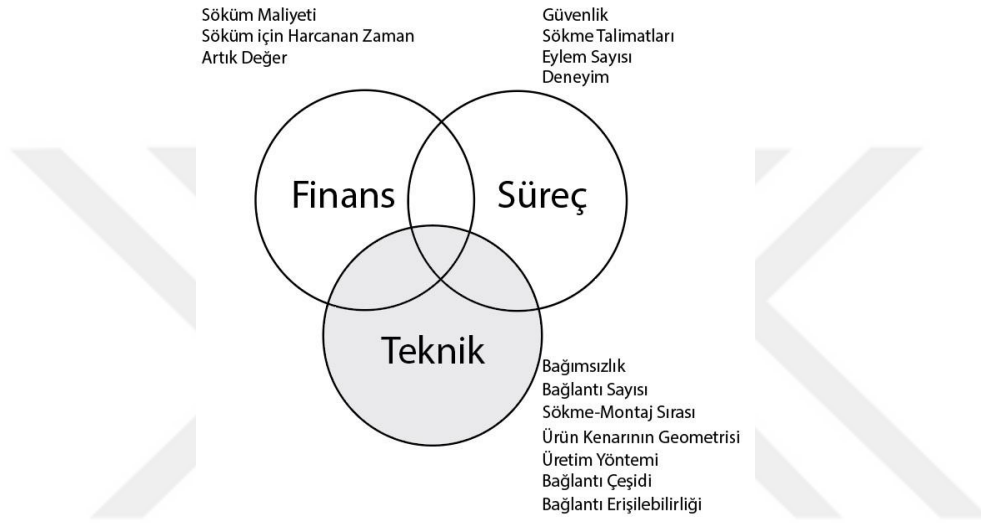
Şekil 4.7 : Brand kesme katmanları tablosunda kullanılan katman

Brand kesme katmanları çalışmasında, yapı bileşenlerinin yaşam süresi daha detaylı bir şekilde incelenmiş ve bu doğrultuda, malzeme seçimlerinin yapının ömrü üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Örneğin, korten çeliği gibi belirli kullanım ömrü eşiği olan malzemelerin, belirli süreler sonunda yapısal performanslarını yitirebildiği tespit edilmiştir. Bu durum, yapı üretiminden itibaren geçen zamanın, tasarım ve malzeme kararlarının yeniden değerlendirilmesini gerektirdiğini ortaya koymaktadır. Buna göre, yapı bileşenlerinin yaşı dikkate alınarak verilecek kararlar, yapının döngüsel tasarım stratejilerine uygun şekilde optimize edilmesini ve malzemelerin yaşam döngüsünün daha etkin bir biçimde yönetilmesini mümkün kılacağı düşünülmektedir. Bu yaklaşım, malzemelerin zaman içinde gösterdiği performansı göz önünde bulundurarak, yapı yaşam döngüsü boyunca döngüsellik hedeflerine ulaşılmasını desteklemektedir.

4.1.3 Alba concepts metodu

Sökülebilirlik potansiyeli ve YDD'sini odak noktasına alarak geliştirilen Alba Concepts Metodu, adapte edilebilirlik, artı değer yaratılması, kaynak kullanımının azaltılması gibi kavramlarla birlikte döngüsel yapı tasarımına dair alternatif bir değerlendirme sistemi sunmaktadır. Bu doğrultuda sökülebilirlik potansiyeli yaşam döngüsü senaryolarında izlenecek yöntem referans veren önemli bir parameter haline gelmektedir. Yapı ölçeğinde bileşenlerin sökülmesinin mümkün olmadığı noktada, yıkım kararı tek seçenek olabilmektedir. Buna karşın sökülebilirlik potansiyelinin yüksek olması, bileşenlerinin ve malzemenin geri kazanım oranını arttırarak döngüsel yapı ekonomisini mümkün kılmanın temelini oluşturmaktadır. Bu nedenle, tez çalışması kapsamında geliştirilmesi hedeflenen karar destek mekanizması için oldukça

önemli bir kılavuz niteliğinde olan bu metodoloji, alınacak kararların döngüsellik ilkelerine uygun, rasyonel ve döngüsellliği yüksek seviyede olacak şekilde alınmasına olanak sağlamaktadır. Bu metodoloji kapsamında teorik olarak, teknik, finans ve süreç başlıkları altında toplamda on dört parametre tanımlanmış ve bu parametrelerin bir yapı bileşeninin hangi oranda sökülebileceğini etkilediği belirtilmiştir. Bu parametrelerin yedi tanesi bağımsızlık, bağlantı sayısı, sökme- montaj sırası, ürün kenarının geometrisi, üretim yöntemi, bağlantı çeşidi, bağlantı erişilebilirliği olmak üzere “teknik” başlığı altında toplanmıştır(van Vliet ve diğ., 2021; van Vliet, 2018).



Şekil 4.8 : Finan-süreç-teknik diagramı ve parametreleri, van Vliet (2021)’den uyarlanmıştır.

Bu bağlamda sökülebilirliğin hesaplanabilmesi için Alba Concepts metodu bağlantı erişilebilirliği, bağlantı türü ve bağımsızlığı skorlayan bir standart oluşturmuştur. Vaka çalışmasında da karar destek mekanizmasının skorlanabilen aşaması bu skor parametrelerinden oluşmaktadır. Değerlendirmede kullanılan bağlantı türü ve bağımsızlık parametreleri Durmisevic’in(2006) çalışmasından referans olarak alınmış ve geliştirilmiştir(Durmisevic, 2006). Bağlantı parametresi, mimari teknik bağlantıları ve buna bağlantılara dair skorları içermektedir.

Çizelge 4.1 : Bağlantı türü ve skorlanması, Van Vliet (2021)'den uyarlanmıştır.

Bağlantı Türü		Skor
Kuru Bağlantı	Gevşek bağlantı(Bağlantı elemanı kullanılmadan)	1.00
	Manyetik bağlantı	
	Cırt bağlantı	
Ek Elemanlarla Bağlantı	Cıvata ve somun bağlantısı	0.80
	Yay bağlantısı	
	Köşe bağlantıları	
	Vida bağlantısı	
	Ek bağlantı elemanlı bağlantılar	
Doğrudan Bağlantı	Pim bağlantısı	0.60
	Çivi bağlantısı	
Yumuşak Kimyasal Bağlantı	Macun bağlantısı	0.20
	Köpük bağlantısı	
Sert Kimyasal Bağlantı	Yapıştırıcı bağlantı	0.10
	Dökme bağlantı	
	Kaynak bağlantısı	
	Çimento esaslı bağlantı	
	Kimyasal dübelller	
	Sert kimyasal bağlantı	

Bağlantı erişilebilirliği, en temelde bağlantı elemanına fiziksel erişilebilirlik ve bu erişim esnasında bağlantı elemanına olası verilebilecek hasarı gözetten bir parametredir.

Çizelge 4.2 : Bağlantı erişilebilirliği ve skorlanması, van Vliet (2021)'den uyarlanmıştır.

Bağlantı Erişilebilirliği	Skor
Doğrudan Erişilebilir	1.00
Dolaylı Erişim(Hasarsız)	0.80
Dolaylı Erişim(Düzeltilbilir Hasarlı)	0.60
Dolaylı Erişim(Kısmi Düzeltilbilir Hasarlı)	0.40
Erişilemez	0.10

Bağımsızlık, farklı kullanım ömürlerine sahip yapı elemanlarının bir arada olma halini referans olarak sökülebیلme potansiyelini değeriendirildiren bir parametredir. Brand Kesme Katmanları referans alınarak kullanım ömrüne bağılı, bağımsızlık katmanları değeriendirilmektedir. Bu nedenle en optimum durumun farklı kullanım ömürlerine sahip katmanların birbirinden ayrı bulunmasıdır. Fakat yapının, mimari bileşenlerden oluşan bir sistem olduğu düşünöldüğünde değeriendirmede kullanılan kıyaslama yöntemi, farklı kullanım ömürlerine sahip bileşenlerin fiziksel olarak birbirlerine entegrasyonunu referans almaktadır(van Vliet, 2021). Mimari mekânsal plan gibi daha hızlı bir kullanım döngüsüne sahip katmanlar, ströktür ve alan-bölge gibi daha yavaş kullanım döngüsüne sahip katmanlar ile çatışma içindedir, farklı zaman döngüleri arasında kalıcı fiziksel bir entegrasyon bulunmaktadır. Kalıcı entegrasyon, yapı bileşenlerinin fiziksel olarak bir araya getirilmesiyle oluşmaktadır; farklı yaşam ömürleri olmasına rağmen, bileşenler birbirine bağımlı hale gelebilmektedir. Dolayısıyla, bir yapı elemanın değeriştirilmesinin gerekli olduğu durumlarda diğeri yapı elemanlarının da fiziksel olarak etkilenmesi kaçınılmaz hale gelmektedir. Bu nedenle, benzer yaşam ömrüne sahip bileşenlerin bir arada olması gerektiğı savunulmaktadır(Kilbert, 2000; Durmisevic, 2006). Bu yaklaşım Brand Kesme Katmanlarındaki, yapı bileşenlerinin kullanım ömrüne dayalı kategorizasyonu destekleyerek, teorik çerçevesine dahil etmektedir(Durmisevic, 2006).

Çizelge 4.3 : Bağımsızlık ve skorlanması, van Vliet (2021)’den uyarlanmıştır.

Bağımsızlık	Skor
Farklı katmanlardan elemanların bağımsızlığı	1.00
Farklı katmanlardan elemanların kısmi bağımsızlığı	0.40
Farklı katmanlardan elemanların birbirine bağımlılığı	0.10

Bağımsızlık skorlaması, yapı bileşeninin seçildiğı fakat karar mekanizmasının henüz başlatılmadığı aşamada hesaplanmaktadır. Seçilen yapı bileşeninin farklı yapı katmanlarına bağımlılığı değeriendirildikten sonra formöl uygulanarak skorlanmaktadır.

Çizelge 4.4 : Karar mekanizmasına bağlı hesaplanabilirlik aşamaları

Aşama ve Ağırlık Değeri	Karar Mekanizması Aşama Kapsamı	Karar Mekanizması Basamakları	Alba Concepts Metoda Göre Skor Değeri	Skor Değerleri	Hesaplanabilir Aşamalar
1, W1	Bağlantı	Bağlantı sayısı	Mevcut değil	-	+
		Bağlantı türü	Mevcut	Çizelge 4.1	+
		Bağlantı erişilebilirliği	Mevcut	Çizelge 4.2	+
		Bağımsızlık	Mevcut	Çizelge 4.3	+
2, W2	Söküm	Söküm süresi	Mevcut değil	-	-
		Söküm hasarı	Mevcut değil	-	-
3, W3	Malzeme	Malzeme sayısı	Mevcut değil	-	-
		Malzemenin yeniden kullanımı	Mevcut değil	-	-
4, W4	Geri Dönüşüm ve Çevresel Ayak İzi		Mevcut değil	-	-

Sökülebilirlik potansiyeli parametrelerine göre yapı bileşenlerinin sökülebilirlik skorlandırması Alba Concepts metodu kapsamında 4.1’de belirtildiği şekilde hesaplanabilmektedir.

$$DPC_n = \frac{2}{\frac{1}{CT_n} + \frac{1}{CA_n}} \quad (4.1)$$

Bu Formulde sonuç kısmında yer alan DPC_n değişkeni, bileşenin bağlantısının sökülebilirlik potansiyelini temsil etmektedir. CT_n değişkeni, bileşenin bağlantı türünü ve CA_n , değişkeni bileşenin bağlantı erişilebilirliğini ifade etmektedir. Bu formülizasyon iki temel parametre üzerinden hesaplandığı için en üst kısımda parametre çeşidi sayısını belirten iki rakamı yer almaktadır. Formül içerisinde yer alan C harfi bağlantıyı(connection), T harfi türü(Type), A harfi erişilebilirliği(Accessibility) ve n harfi değerlendirmek için kullanılan yapı elemanını veya bileşenini ifade etmektedir fakat farklı parametreler değerlendirildiğinde değişkenlerin isimleri farklılaşarak, hesaplaması yapılabilmektedir. Her bir parametre ekseninde sökülebilirlik potansiyeli hesaplandıktan sonra, aynı formülizasyon kullanılarak yapı bileşeninin sökülebilirlik potansiyeli hesaplanmaktadır. (van Vliet, 2021). Böyle sökülebilirlik potansiyeli, önce yapı elemanı üzerinden sonra yapı bileşeni üzerinden sırası ile hesaplanarak oluşturulabilmektedir. Yapının sökülebilirlik potansiyeli, türev hesaplamalarını gerektiren daha karmaşık bir hesaplama yöntemini içermektedir ve vaka çalışması kapsamında kullanılmadığı için hesaplama formülü bu kısımda açıklanmamıştır.

4.2 Troya Müzesi ve Cephe Panellerinin İncelenmesi

Troya Müzesi, 2011 yılında serbest katılımlı ulusal mimari bir yarışma doğrultusunda Ömer Selçuk Baz ve ekibi tarafından tasarlanarak, 2018 yılında Yalın Mimarlık Ofisi tarafından inşaat süreci tamamlanmış bir projedir(Url 15). Yapının bulunduğu coğrafyayla bir bütünlük oluşturması amacıyla, yapıda genel olarak korten çelik, masif ahşap, brüt beton, masif taş vb. doğal malzemelerin işlenmemiş halleriyle kullanımı tercih edilmiştir(Yüzer, 2022; Kuyrukçu, 2021). Bu nedenle, döngüsel tasarım anlayışının birden fazla kullanım ömrünü teşvik eden yaklaşımı doğrultusunda, alternatif kullanım senaryolarına entegre edilme potansiyelinin yüksek olduğu

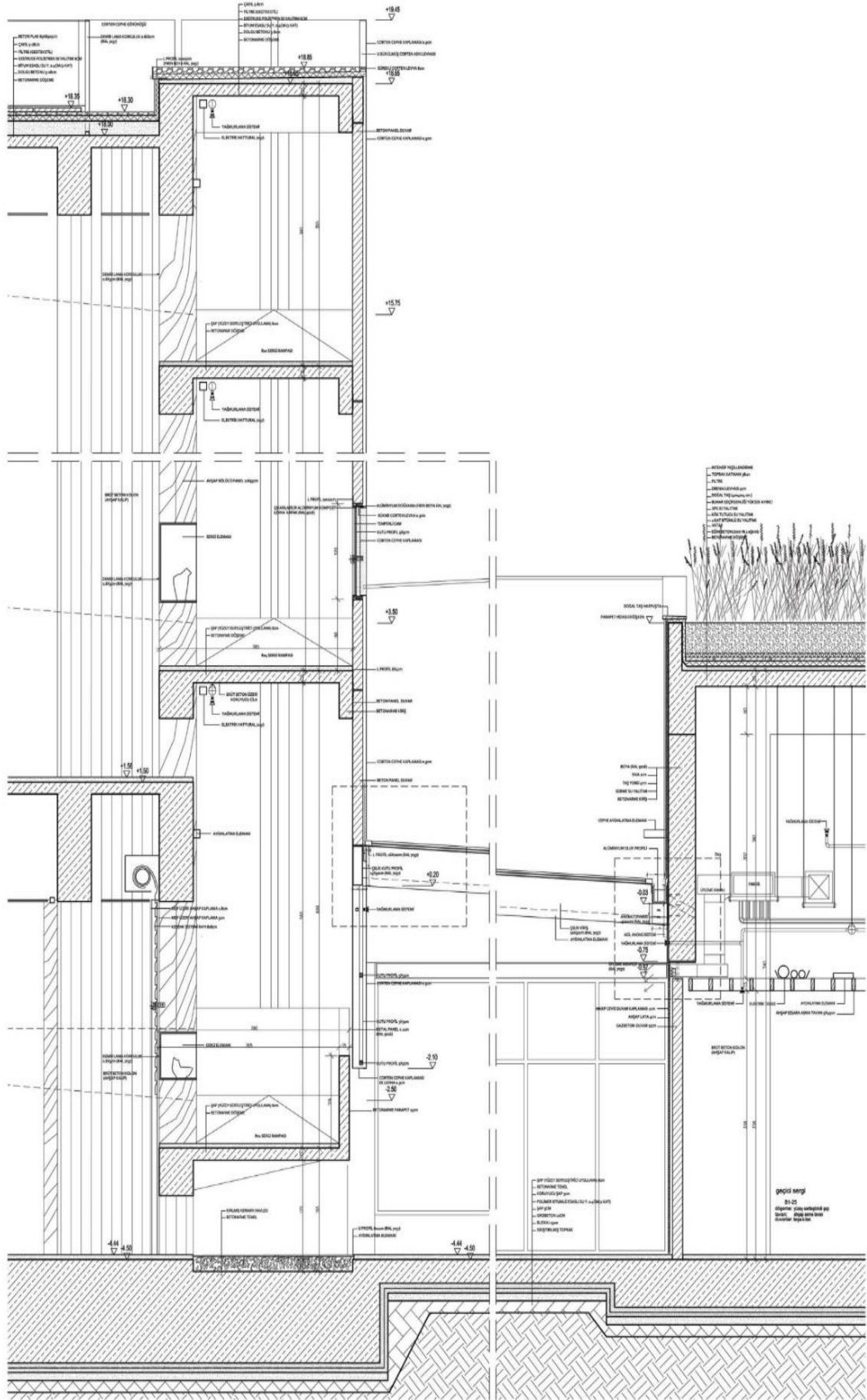
belirlenmiştir. Vaka çalışması kapsamında Troya Müzesi'nin cephe panelleri karar destek mekanizmasında uygulanmak üzere seçilmiştir. Bu bağlamda Troya Müzesi'nin korten çelik cephe panelleri incelenmiştir. Cephe panelleri 18 cm aralıklarla cepheye uygulanmış olup, 150 cm genişliğe sahiptir(Yüzer, 2022; Kuyrukçu, 2021). Doğal ışığın iç mekanlara ve teknik bağlantılar için fiziksel erişilebilirliği mümkün kılan bir bağlantı aralığı tercih edilmiştir. Korten çelik, ek bir kimyasal işlem gerektirmeden, zamanla yüzeyinde oluşan pas patinası sayesinde kendini koruyabilirken, sürekli korozyon etkisinden kaçınmak için kıyı bölgelerinden belirli bir mesafede kullanılması önerilmektedir(Yüzer, 2022). Müzenin coğrafi konumu itibarıyla denize olması sayesinde daimi ek bir korozyondan korunmuştur(Yashwansingh ve Surnam, 2015). Böylece, karar destek mekanizmasının doğruluğunu artırmak amacıyla potansiyel dış müdahalelerden etkilenmeden değerlendirme yapılması olanaklı hale gelmektedir. Buna ek olarak cephe panelleri, korten çeliğin altında su ve ısı yalıtımını sağlayan prekast bir panel sistemi ile kuru bağlantı yapılarak birleştirilmiştir(Url 19). Çalışma kapsamında Yalın Mimarlık ofisi ile görüşmeler yapılarak, cephe panellerinin bağlantı türü ve bağlantı erişilebilirliğine dair veriler doğrulanmıştır. Yapı bileşeninin yalıtım katmanı ile ilişkisi incelendiğinde, cephe katmanının farklı katmanlarla kısmi bir bağımlılık gösterdiği sonucuna varılmıştır. Cephe panelleri, bağlantı türü olarak doğrudan bağlantının uygulandığı ve bağlantı erişilebilirliği açısından doğrudan erişimi olanaklı kılmaktadır. Yalın Mimarlık Ofisi ile yapılan görüşmeler sonucunda, bağlantı sayısının dört olduğu tespit edilmiş ve vaka çalışmasında bu veri üzerinden ileriye taşınmıştır. İlerideki çalışmalarda ,yapıya dair verilerin dijital olarak tutulduğu ve okunabildiği sistemlerin kurgulandığı durumlarda, yapı bileşenlerine dair verilerin güncel tutulmasının veri destekli karar alma sürecini olumlu yönde etkileyeceği düşünülmektedir. Sonuç olarak, vaka çalışmasında Troya Müzesi'nin sadece korten çelik cephe panelleri karar destek mekanizmasında uygulanmıştır.



Şekil 4.9: Troya Müzesi Korten Çelik Cephe Panelleri, Kuyrukçu(2021)



Şekil 4.10: Troya Müzesi Korten Çelik Cephe Panelleri, Kuyrukçu(2021)

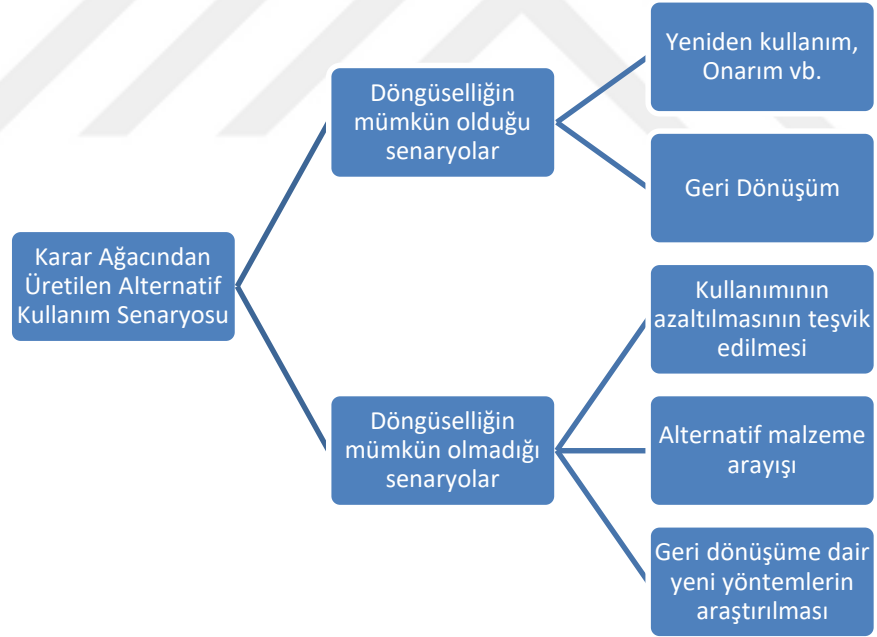


Şekil 4.11: Troya Müzesi Sistem Kesiti, Yalın Mimarlık Ofisi

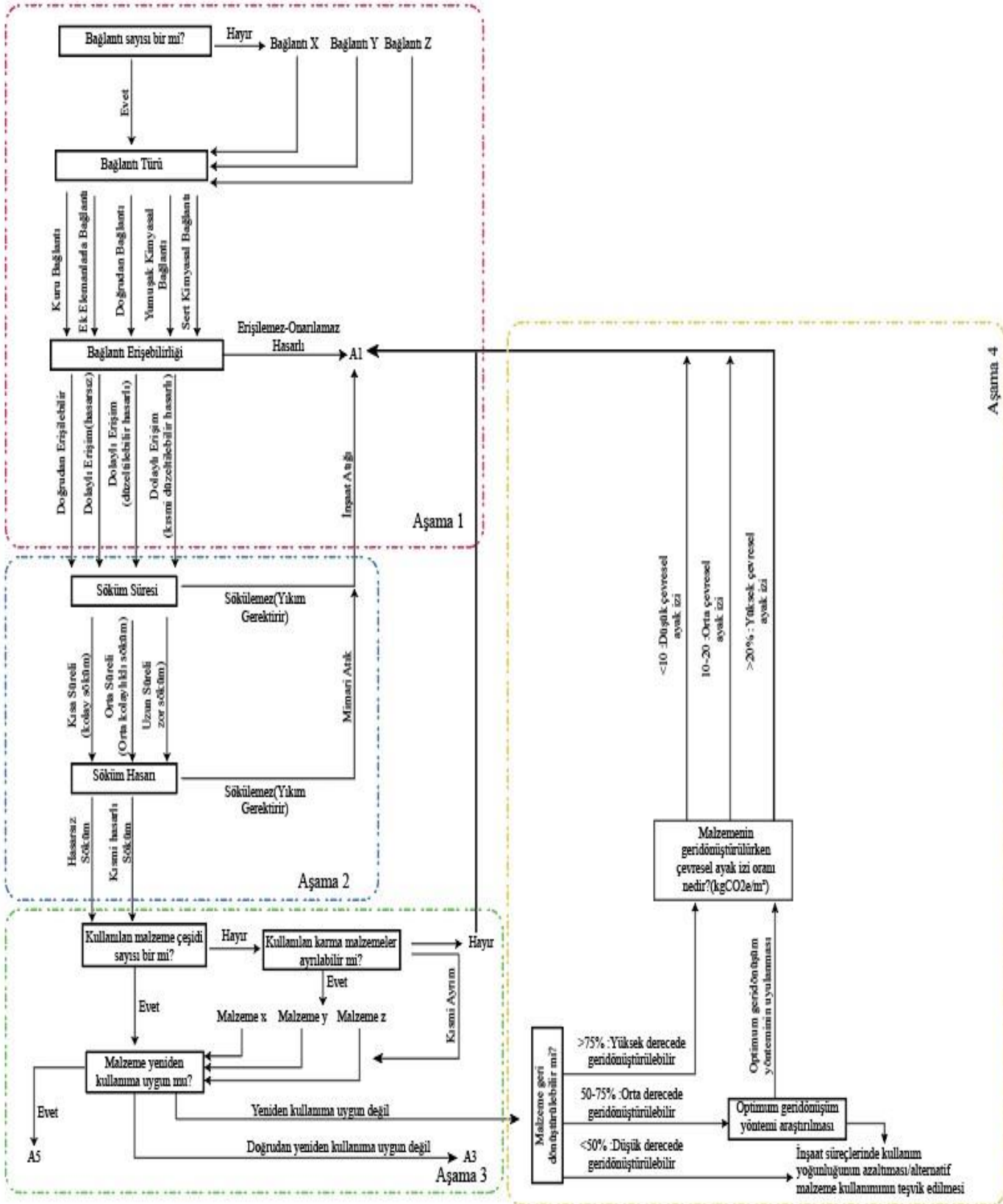
4.3 Karar Destek Mekanizmasının Oluşturulması

Alba Concepts metodu ve YDD ekseninde karar alma süreçlerini kolaylaştırma amacıyla geliştirilen karar destek mekanizması, dört aşamadan oluşmaktadır. Bu aşamalar YDD kapsamında, EN 15804 standardında yer alan yıkım/ söküm basamağı üzerinden kurgulanmıştır. Yapı elemanının yıkım/ söküm süreci sonrasında doğrudan atığa dönüşmesi yerine mümkün mertebede geri kazanımına odaklanılması, analizinin yapılması ve alternatif kullanım senaryolarının oluşturulması hedeflenmiştir. Karar destek mekanizmasında kullanılan aşamalar döngüsel tasarım prensiplerinde yer alan, döngüsellik seviyesinin üst basamaklarından alt basamaklara doğru döngüsellik azaldığı kullanım stratejilerine göre hiyerarşik olarak sıralanmıştır. O nedenle sırası ile yeniden kullanım, onarım ve geri dönüşüm stratejileri teşvik edilmiştir. Bu üç stratejinin uygulanmadığı veya kısmi uygulandığı bazı durumlarda ise kullanılan yapı elemanı ya da bileşenin geri dönüşümüne dair çalışmaların artırılması veya inşaat sektöründe kullanımının azaltılması önerilmiştir. Geliştirilen karar destek mekanizmasının dört aşamasının, birincisi Aşama 1, yapı elemanının bağlantısına odaklanmaktadır. Bu aşama, Alba Concepts metodunun söküm potansiyelini hesabının yapılabilmesi için belirlediği parametreleri içermektedir. O nedenle skorlamanın yapılabildiği aşama bu evrede yalnızca aşama 1'dir. Aşama 2 ,söküm sürecine dair söküm süresi ve söküm hasarı olmak üzere iki parametreyi içermektedir. Söküm süresine bağlı karar basamağında, yapı elemanının sökülemediği durumda belirtilen yıkım kararı sonucu, elemanın diğer yapı elemanlarına fiziksel entegrasyonu nedeniyle inşaat atığı olarak değerlendirilmiştir ve ham madde girdisi aşamasına yönlendirilmiştir. Buna karşın söküm hasarına bağlı yıkım kararı sonucu, yapı elemanın fiziksel olarak diğer yapı elemanlarından ayrılabilmesi fakat yapı elemanının fiziksel bütünlüğünü kaybetmesi nedeniyle mimari atık olarak değerlendirilmiştir. Üçüncü aşama, malzeme döngüselliklerinin analiz edildiği aşamayı temsil etmektedir. Yapı elemanının sökümü tamamlandıktan sonra malzemenin , yeniden kullanıma uygun olup olmadığını ve çoklu malzeme kullanımının olup olmadığını analiz ederek, yeniden kullanım, onarım veya geri dönüşüm stratejileri üzerinden kullanım senaryosunun oluşturulmasına olanak sağlamaktadır. Bu nedenle aşama 3, döngüsellik yüksek kullanım senaryosunun önerilebileceği önemli bir aşamadır. Dördüncü aşama, geri dönüşüm potansiyelinin ve geri dönüşüm sürecindeki çevresel etkilerin değerlendirilmeye çalışıldığı bir karar ağacı dizisini içermektedir. Geri

dönüşümün mümkün olduğu durumlarda, geri dönüşüm sürecinde çevresel etkinin değerlendirilmesine olanak sağlamak için karbon ayak izi oranına göre karar ağacı yönlendirmesi oluşturulmuştur. Buradaki amaç, geri dönüşümün tek başına yeterli bir çevreci çözüm olmadığını, geri dönüşüm sürecindeki çevreye etki eden faktörlerinde değerlendirilmesi gerektiğinin vurgulanmasıdır. Bu kısım daha karmaşık hesaplama ve analiz yöntemlerini gerektirdiği için bu çalışma kapsamında, teorik bir karar basamağı olarak kullanılmıştır. Orta düzeyde geri dönüşümün olanaklı olduğu durumlarda, en optimum geri dönüşüm yöntemin araştırılması karar basamağı oluşturulmuştur. Bu karar basamağına göre geri dönüşüm stratejisi, malzeme kullanımının azaltılmasından daha makul bir yöntem ise malzemenin geri dönüştürülmesi aksi halde inşaat sektöründe kullanımının azaltılması veya alternatif malzeme kullanımının teşvik edilmesi önerilmiştir. Geri dönüşümün mümkün olmadığı noktada, kullanılan malzemenin inşaat sektöründe kullanım yoğunluğunun azaltılması veya bu malzemeye alternatif malzeme kullanımlarının teşvik edilmesi önerilmiştir.

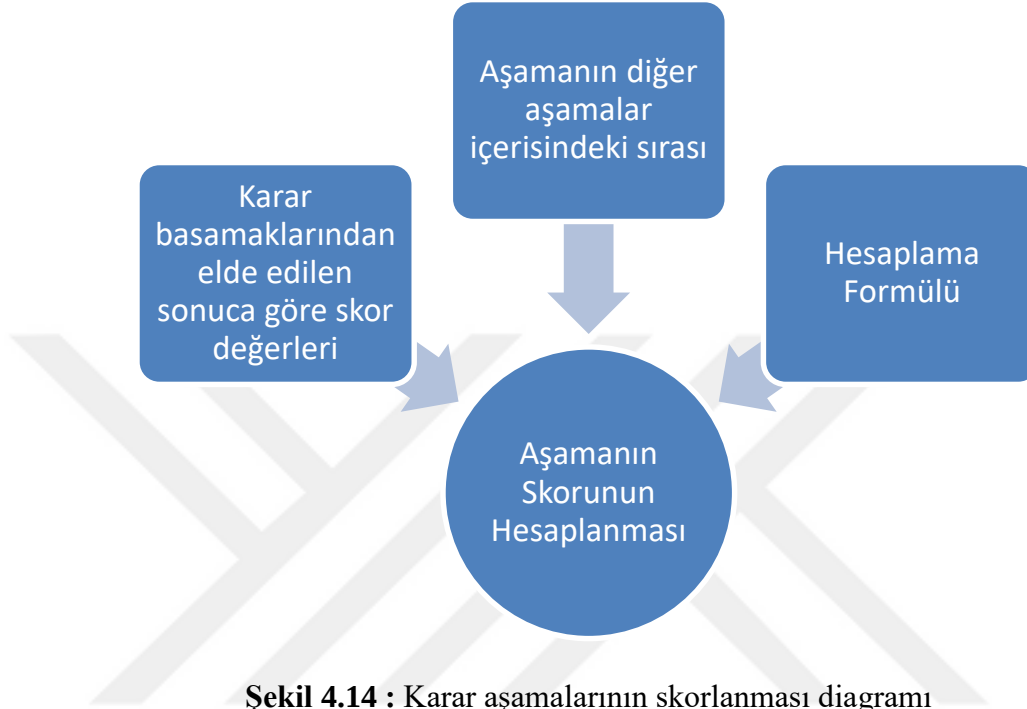


Şekil 4.12 : Karar ağacına bağlı kullanım senaryoları



Şekil 4. 13 : Karar destek mekanizması

Sökülebilme potansiyelinin hesaplama formülüne bu dört aşamanın farklı etki ağırlıklarının çarpımının eklenmesi önerilmiştir. Böylece her bir basamağın kendi etki mekanizması oluşturulması olanaklı hale gelmektedir. Bu sayede alınacak kararlar üzerinde aşamalara dayalı, hiyerarşik bir etki alanının nicel olarak sağlanabileceği düşünülmüştür.



Şekil 4.14 : Karar aşamalarının skorlanması diagramı

Bu kapsamda aşama 1'in ağırlığı W1, aşama 2'nin ağırlığı W2, aşama 3'ün ağırlığı W3 ve son olarak aşama 4'ün ağırlığı W4 olarak tanımlanmıştır. Bu ağırlıkların matematiksel hesabı farklı disiplinlerle iş birliğini gerektirdiği için bu çalışma kapsamında formül kısmına değişken olarak eklenmiştir.

$$DPC_n = \frac{2}{\frac{1}{CT_n} + \frac{1}{CA_n}} \times W1 \quad (4.2)$$

Vaka çalışması kapsamında karar destek mekanizması, Troya Müzesi'nin cephe panellerine uygulanmıştır. Bu bağlamda yapının inşaat sürecinden itibaren 80 ile 100 yıl arası bir zaman dilimi referans alınarak, bu referansın öncesi ve sonrası için kullanım senaryoları önermek üzere karar ağacı uygulanmıştır. Panel kaplamalarının korten malzemeden üretilmesi nedeniyle vaka çalışmasındaki kurgusal zaman aralığı 80-100 yıl arası olarak önerilmiştir. Böylece zamansal değişimin, karar destek mekanizması üzerindeki etkisi gözlemlenebilmiştir. Karar destek mekanizmasının

kapsamını sınırlı tutmak amacıyla zamansal değişim bir karar basamağı olarak eklenmemiştir. Bağımsızlığın değerlendirilmesi, farklı katmanların birbirine bağımlı olma durumunu içermesi nedeniyle, karar destek mekanizmasına başlamadan önce bileşen seçiminde saptanıp-skorlanmıştır. Vaka çalışması kapsamında, korten cephe panelleri ve panellerin altında yer alan su ve ısı yalıtımı prekast panelleri aynı cephe katmanında olmasına karşın farklı kullanım süreleri ve söküme müsait bağlantısı olması nedenleriyle, kısmi bağımsız olarak nitelendirilmiş ve hesaplanmıştır. CIDn farklı katmanlardan elemanların kısmi bağımsızlığı 0.40 olarak skorlanmıştır ve buna göre denklem 4.3 sonucu elde edilmiştir.

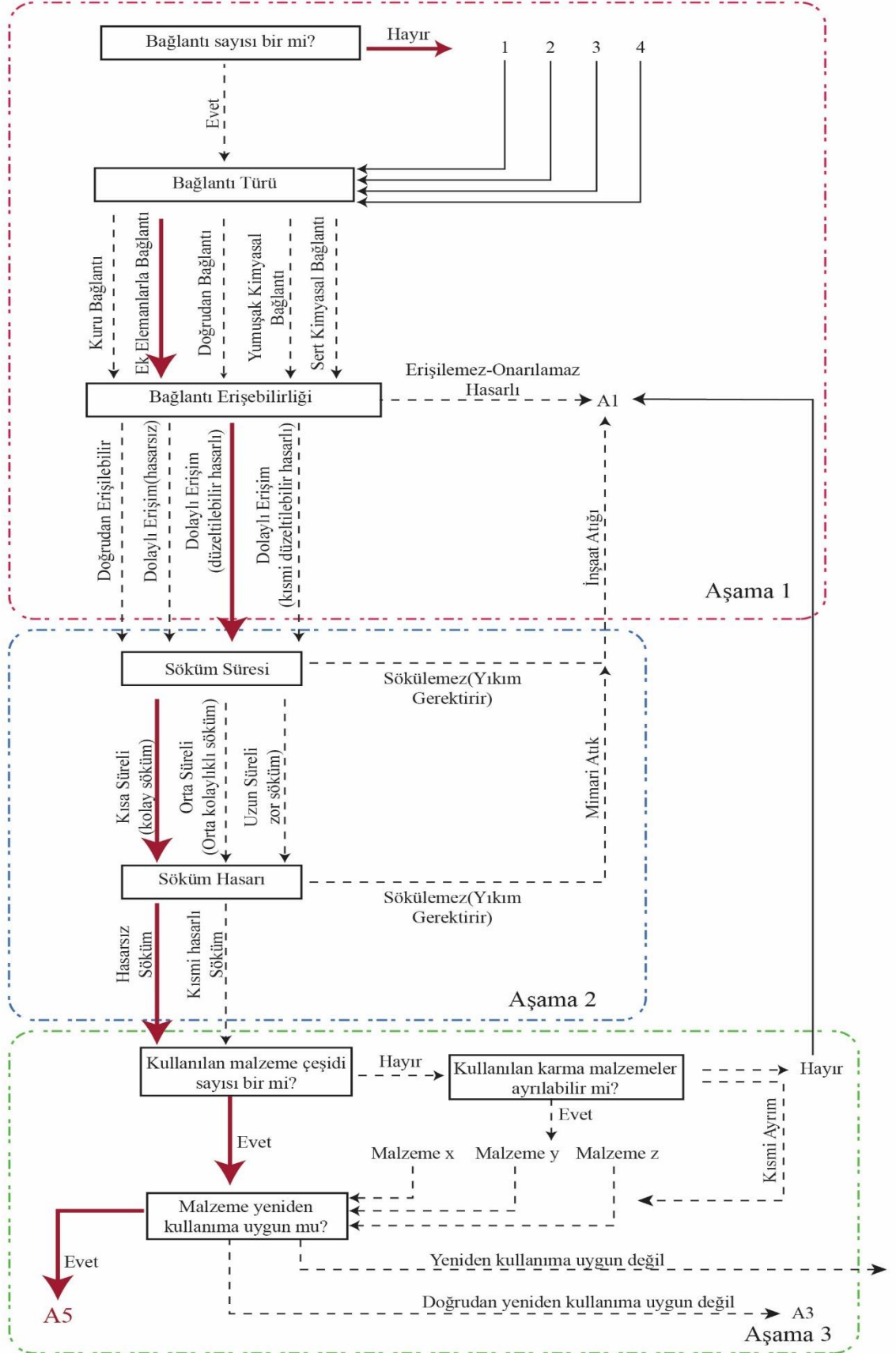
$$DID_n = \frac{1}{\frac{1}{0.4}} = 0.4 \quad (4.3)$$

Karar mekanizmasının ilk aşaması uygulanmadan önce seçilen Aşama 1’de bağlantı türü ve bağlantı erişilebilirliği üzerinden panel elemanının sökülebilirlik potansiyeli formülü şu şekildedir.

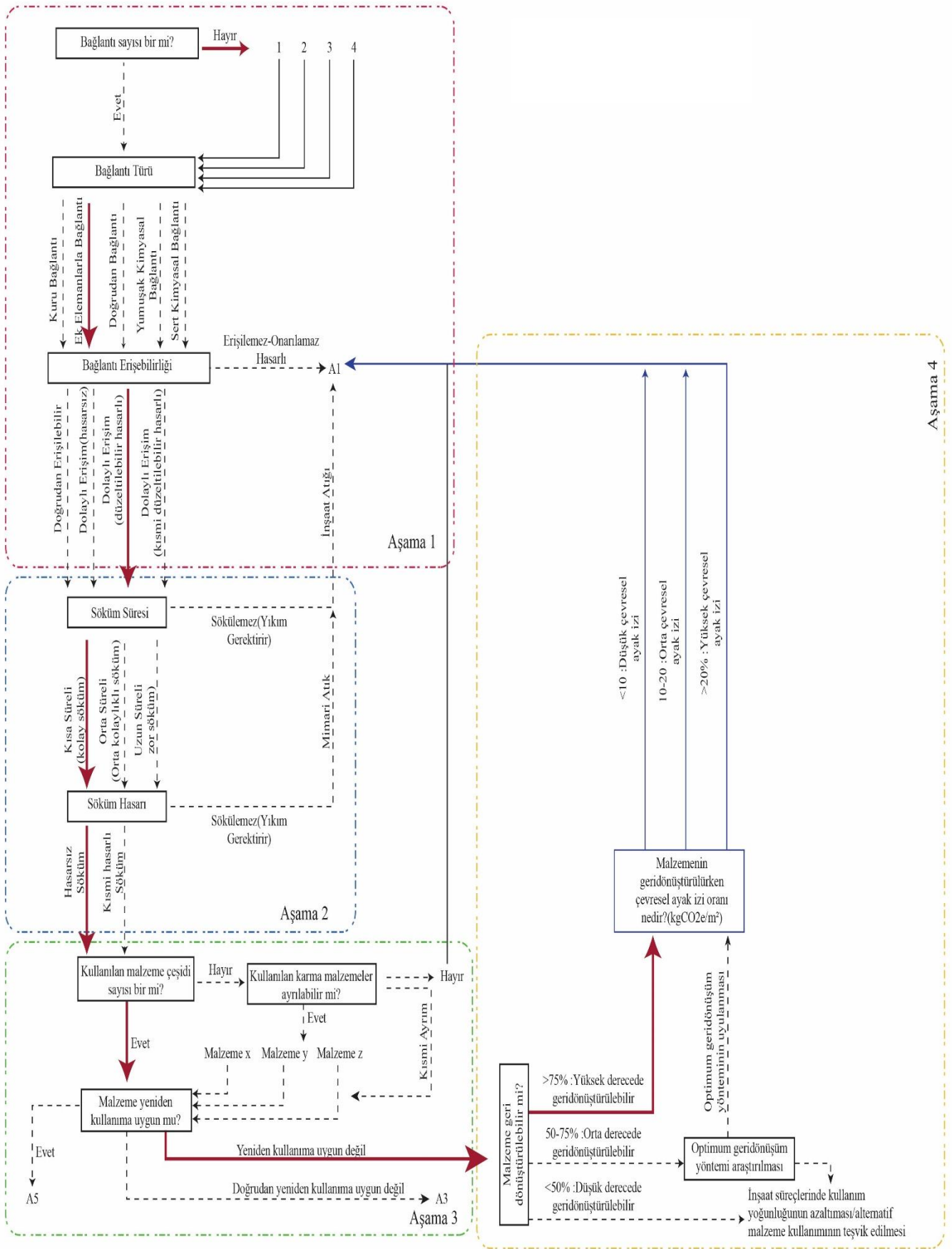
$$DPC_n = \frac{2}{\frac{1}{CT_n} + \frac{1}{CA_n}} \times W1 \quad (4.4)$$

$$DPC_n = \frac{2}{\frac{1}{0.80} + \frac{1}{0.60}} \times W1$$

Formülde iki değişkenin kullanılması nedeniyle kesir çizgisinin üzerine iki yazılmıştır. Sonuç skor yapılan hesaplar sonucunda 0.68 W1 olarak hesaplanmıştır. Vaka çalışmasındaki kurgusal iki senaryoda da aşama 1’den elde edilen karar basamaklarının sonucu sabit kaldığı kabulü üzerinden ilerlenmiştir. Bunun nedeni ekstrem durumlarla(yapı tasarım kararlarına aykırı müdahale, yapısal güçlendirme vb.) karşılaşılmadıkça bağlantı türü ve bağlantı erişilebilirliğinin yapı elemanı ölçeğinde değişmemesidir. Vaka çalışmasının anlaşılabilirliğini ve çerçevesini okunur kılmak amacıyla, dışarıdan ek bir müdahalenin olmadığı, zamana bağlı olarak gelişen bozulma ve yıpranmaları referans alarak, vaka çalışmasına karar ağacı uygulanmıştır.



Şekil 4. 15 : 80-100 yıl öncesi senaryosunda karar ağacının uygulanması



Şekil 4. 16 : 80-100 yıl sonrası senaryosunda karar ağacının uygulanması

Vaka çalışmasında 80-100 yıl öncesi kısmı kapsayan birinci senaryoya göre, karar ağacındaki karar basamakları uygulanmıştır. Bu değerlendirmenin sonucunda, incelenen cephe paneli elemanının hasarsız bir şekilde sökülebileceği saptanmış olup, malzemenin vaka senaryosunda belirtilen zaman dilimi içerisinde yeniden kullanıma uygun olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle inşaat aşamasında tekrar kullanılabilen bir panel olarak, A5 aşamasından ilerlemesi uygun bulunmuştur. Bu kullanım senaryosuna göre yapı elemanı yeniden kullanım yaşam döngüsüne dahil edilmiştir.

Vaka çalışmasındaki ikinci senaryoya göre, cephe paneli aşama 1, aşama 2 ve aşama 3 olmak üzere üç aşamayı “malzemenin yeniden kullanıma uygun olmaması” kararı ile tamamlayarak aşama 4’e geçmiştir. Cephe panelinde kullanılan korten malzeme, zaman içerisinde oksitlenerek üzerinde oluşturduğu pas patinası ile korunduğu için herhangi bir kimyasal işleme tabii tutulmaksızın kullanılabilir. Bu nedenle geri dönüşümü oldukça yüksek malzemelerden biri olarak değerlendirilmektedir(Url 14). O nedenle cephe panelin, ham madde girdisi olarak kullanılabilen A1 aşamasından ilerlemesi uygun bulunmuştur. Böylece cephe panelinin 80-100 yıl sonrasındaki kullanım senaryosu geri dönüşüm stratejisi üzerinden şekillenmiş olup, yaşam döngüsü kapalı bir döngü içerisinde tutulmaya çalışılmıştır.



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, yapıların döngüsellüğünün kapsamlı bir biçimde değerlendirilmesi, yaşam döngüsünün kapalı bir döngü içerisinde sürdürülebilir şekilde yönetilmesi ve Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD) tabanlı bir karar destek mekanizması geliştirilerek, tasarım kararlarının rasyonelliğinin artırılması hedeflenmiştir. Kullanım ömrünü tamamlayan yapı bileşeni veya elemanının alternatif bir yaşam döngüsü oluşturulması sürecinde alınacak kararların, çevresel etkinin azaltılmasına ve döngüsellüğün kapalı döngü içinde maksimum düzeyde sürdürülebilir stratejilerle devamlılığının sağlanmasına katkı sunması amaçlanmıştır. Döngüsel tasarım ekseninde, YDD’nde kullanılan teorik çerçevenin bütünlük, anlaşılır ve kapsamlı bir alternatifi üretilmeye çalışılmıştır.

YDD teorik çerçevesi, veri girdisi, yorumlama parametreleri, yaşam döngüsü aşamaları ve analiz kısımlarında bütünlük bir çerçeve oluşturmasına olanak sağlamıştır. Analiz edilecek bileşenin analiz hedeflerinden itibaren analiz sonuçlarının yönlendirdiği alternatif yaşam döngüsü senaryosunun takibi bu teorik çerçeve üzerinden teorik olarak yapılabilir. Mevcut YDD teorik çerçevesinde, EN 15804 ve ISO 14040-44 standartları ayrı ayrı ele alınırken, bu çalışma kapsamında bu iki standardın bir arada değerlendirildiği bir yaklaşım sunulmuştur. Buna ek olarak, yaşam döngüsüne yıkım/söküm aşaması da dahil edilmiş; yapı elemanlarının veya bileşenlerinin sökülebilirliğini önceliklendiren ve yeniden kullanım döngüsüne dahil edilmesini sağlayan yeniden kullanım, onarım ve geri dönüşüm stratejileri eklenmiştir. Böylece, YDD teorik çerçevesi, yıkım/söküm aşamasında uygulamaya yönelik döngüsellik stratejileriyle birlikte değerlendirilebilir hale getirilmiş olup, kapalı döngüde ilerleyecek şekilde yapılandırılmıştır. Bir yapının, yapı bileşenin veya elemanının yaşam döngüsü mimarlık ve tasarım disiplinine ek olarak, farklı disiplinlerden bakış açısını gerektirdiği saptanmıştır. Buna nedenle, teorik çerçevenin hem uygulamaya yönelik hem de teorik olarak geliştirilmesi noktasında doğa bilimleri ve mühendislik alanlarından iş birliklerine ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle hesaplanabilir kıyaslamaların yapılması noktasında, hesaplama parametrelerinin formülize edilmesi daha incelikli matematiksel yaklaşımları gerektirdiği sonucuna varılmıştır. Buna ek olarak, YDD’nin nicel değerlendirmeleri birden çok yaşam aşamalarının gözetilmesi, bu aşamaların etki ağırlıklarının da bütünsel bir analiz sonucuna etki etmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Geliştirilen karar destek mekanizmasında birden çok kritere ve karara dayalı bir karar ağacı oluşturulmuştur. Bu bağlamda, YDD aşamaları ve Alba Concepts yöntemine ek olarak Aşama 2, Aşama 3 ve Aşama 4 bu çalışmaya dahil edilmiştir. Van Vliet'in (2018) çalışmasında açıkladığı Aşama 2'nin teorik arka planına ek olarak, bu çalışma kapsamında karar ağacının ilerleyeceği karar seçenekleri oluşturulmuş ve Aşama 2'deki nihai karara göre alternatif bir yaşam döngüsü senaryosu önerilmiştir. Böylece, yalnızca tek bir duruma yönelik yönlendirme yapılmasının önüne geçilerek, birden fazla malzemenin bir arada bulunduğu durumların da karar destek mekanizmasına entegre edilmesi mümkün kılınmıştır. Aşama 4, Aşama 3 doğrultusunda gelen geri dönüşüm senaryosunun uygulanması durumunu değerlendirerek, bu senaryonun çevresel etki noktasında en optimum karar olup olmadığının değerlendirilmesine olanak sağlanmıştır. Böylece bu aşama, geleneksel sürdürülebilirlik anlayışından ayrılarak, çevresel çözümler olarak sunulan yöntemlerin uygulanması sırasında ortaya çıkan karbon ayak izi oranının karar verme sürecinde etkileyici bir parametre olarak değerlendirildiği bir aşama haline gelmiştir. Bir malzemenin geri dönüştürülebilirlik potansiyelinin olması, o malzemeyi geri dönüştürmenin her zaman çevreci bir çözüm sunmadığı kanaatine varılmış olup, karar destek mekanizmasının bu durumu gözetenek karar önerisi sunması sağlanmıştır. Geri dönüşümün makul olmadığı durumlarda, geri dönüşüm yerine sektör bazında malzemenin kullanımının azaltılması ya da alternatif bir malzeme kullanımının teşvik edilmesi önerilerek, bilgilendirici bir yolun izlenmesi mümkün kılınmıştır. Buna ek olarak, geri dönüşüm oranının orta düzeyde kaldığı durumların incelenmesi ve bu bağlamda yöntemlerin geliştirilmesine yönelik araştırmaların teşvik edilmesi, bu aşamanın gelecekteki potansiyel araştırmaları destekleyici bir yol izlemesine katkı sağlamıştır. Bu araştırmaların sayısının artması ve kümülatif olarak ilerlemesinin, döngüsel tasarım yaklaşımını ve bu yaklaşıma uygun YDD ve karar destek mekanizmalarının hem teorik arka planını hem de uygulamaya yönelik araçların geliştirilmesine katkı sunacağı kanaitine varılmıştır. Buna karşın bu aşamada nicel analizlerin yapılabilmesi aşağıda belirtilen nedenlerden dolayı mümkün olmamıştır.

- Veriye erişimin sınırlı olması,
- Verinin güvenilir olmaması,
- Analizi yapan hesaplama araçlarının hesaplama yöntemlerinde mutabakatın sağlanamaması,

- Etki parametrelerinin kesin sınırlarının belirtilmemesi,

Bu nedenle vaka çalışmasında nicel olarak aşama 1 hesaplanmış olup, bu aşamanın zamana bağlı senaryoları sonucunda değişmediği saptanmıştır. Zamana bağlı katmandaki değişimin, karar destek mekanizmasındaki etkisi doğrudan sonuç olarak gözlemlenmiştir. Böylece kullanım süresine bağlı olarak kullanım süresi arttıkça döngüsellüğün daha az olduğu stratejilerin alternatif kullanım senaryosu olarak önerildiği tespit edilmiştir. Vaka çalışmasının iki farklı zamansal senaryoyu kapsaması bu tespitin yapılabilmesine olanak sağlamış olup, kıyaslamanın yapılabildiği durumlarda çıkarım yapmanın ve sonuca yönelik karar almanın daha olanaklı hale geldiği düşüncesine varılmıştır. Bu nedenle çalışma kapsamında önerilen karar destek mekanizmasının karar vericilere alternatif bir karar önerisi sunarak, kıyaslamanın yapılabileceği ve buna göre en optimum kararın alınmasının sağlanabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Bu çalışmanın kapsamı nedeniyle, cephe katmanı üzerinden cephe panelleri incelenmiştir. Fakat yapı katmanları da bu karar destek mekanizmasının uygulanmasıyla incelenebilmektedir. Gelecekteki çalışmalar, karar destek mekanizmasındaki karar ağaçlarını detaylandırarak, yeni değerlendirme parametreleri ve aşamaları ekleyerek mevcut çalışmayı geliştirebileceği düşünülmektedir. Böylece daha detaylı değerlendirmeler üzerinden karar alternatiflerinin üretilmesi sağlanıp, alınacak kararların doğruluğunun ve denetlenebilirliğinin artabileceği düşünülmüştür. Buna ek olarak, hesaplama formüllerinin her aşama için ağırlık değerleri özelinde hesaplama sistematığının geliştirilmesi ve böylece her basamağın etki değerinin nicel olarak saptanabilmesi karar destek mekanizmasının nicel analiz kanadını güçlendirerek, literatüre önemli bir katkı sağlayacağı düşünülmüştür. Yapının mimari verisinin katmanlar aracılığıyla okunmasına ek olarak, mimari verinin isimlendirilmesi ve sistematik bir biçimde analiz edilmesi üzerine gerçekleştirilecek çalışmaların, genel kabulün sağlanması açısından önemli bir adım teşkil edeceği düşünülmektedir. Bu sayede karar destek mekanizmasının dijital araçlara aktarılması olanaklı hale gelip, bu dijital araçların sayısının artacağı öngörülmektedir.



KAYNAKLAR

- Adams, K. T., Osmani, M., Thorpe, T., Thornback, J.** (2017) Circular economy in construction: current awareness, challenges, and enablers. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Waste and Resource Management*, 170(1), 15-24. <https://doi.org/10.1680/jwarm.16.00011>
- Aguiar, A., Vonk, R., Kamp, F.** (2019) BIM and Circular Design. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 225(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/225/1/012068>
- Ayres, R.U., Kneese, A.V.** (1969) Production, Consumption & Externalities. *American Economic Review*, 59, 282-296
- Basbagill, J., Flager, F., Lepech, M., Fischer, M.** (2013) Application of Life-Cycle Assessment to Early Stage Building Design for Reduced Embodied environmental impacts. *Building and Environment*, 60, 81–92. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.11.009>
- Benachio, G. L. F., Freitas, M. do C. D., Tavares, S. F.** (2020) Circular economy in the construction industry: A systematic literature review. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 260). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121046>
- Blengini, G. A., di Carlo, T.** (2010) The Changing Role of Life Cycle Phases, Subsystems and Materials in the LCA of Low Energy Buildings. *Energy and Buildings*, 42(6), 869–880. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.12.009>
- Bilal, M., Oyedele, L. O., Qadir, J., Munir, K., Ajayi, S. O., Akinade, O. O., Pasha, M.** (2016) Big Data in the construction industry: A review of present status, opportunities, and future trends. *Advanced Engineering Informatics*, 30(3), 500-521. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2016.07.001>
- Blomsma, F.; Brennan, G.** (2017) The Emergence of Circular Economy: A New Framing Around Prolonging Resource Productivity. *J. Ind. Ecol.*, 21, 603–614.
- Boulding, K.** (1966) The Economics of the Coming Spaceship Earth. In: Jarrett, H., Ed., *Environmental Quality in a Growing Economy*, Resources for the Future/Johns Hopkins University Press, Baltimore, 3-14.
- Bragança, L., Mateus, R.** (2012) Life-Cycle Analysis of Buildings- Environmental Impact of Building Elements. *iiSBE Portugal*, 1. Baskı, 978-989-96543-3-4, Portekiz
- Brennan, G., Tennant, M., Blomsma, F.** (2015) Business and production solutions: closing the loop in. In: Kopnina, H., Shoreman-Ouimet, E. (Eds.), *Sustainability: Key Issues*. EarthScan. Routledge, pp. 219e239.

- Buchanan, R.** (2019) Systems Thinking and Design Thinking: The Search for Principles in the World We Are Making. *She Ji*, 5(2), 85–104. <https://doi.org/10.1016/j.sheji.2019.04.001>
- Byers, B. S., Raghu, D., Olumo, A., de Wolf, C., Haas, C.** (2024) From research to practice: A review on technologies for addressing the information gap for building material reuse in circular construction. In *Sustainable Production and Consumption* (Vol. 45, pp. 177–191). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.12.017>
- Cabeza, L. F., Rincón, L., Vilariño, V., Pérez, G., Castell, A.** (2014) Life Cycle Assessment (LCA) and Life Cycle Energy Analysis (LCEA) of Buildings and the Building Sector: A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 29, pp. 394–416). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.037>
- Charonis, G.K.** (2012) Degrowth, steady state economics and the circular economy: three distinct yet increasingly converging alternative discourses to economic growth for achieving environmental sustainability and social equity. World Economics Association (WEA) Conferences. <https://sustainabilityconference2012.weaconferences.net/papers/degrowth-steady-state-economics-and-the-circular-economy-three-distinct-yet-increasingly-converging-alternative-discourses-to-economic-growth-for-achieving-environmental-sustainability-and-social-eq/>
- Chau, C. K., Leung, T. M., & Ng, W. Y.** (2015) A Review on Life Cycle Assessment, Life Cycle Energy Assessment and Life Cycle Carbon Emissions Assessment on Buildings. In *Applied Energy* (Vol. 143, Issue 1, s. 395–413). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.023>
- Ciarimboli, N., Guy, B.** (2005) DfD: Design for Disassembly in the Built Environment: a Guide to Closed-Loop Design and Building. Hamer Center, University Park, Penn. 277226962
- Cottafava, D., Ritzen, M.** (2021) Circularity Indicator for Residential Buildings: Addressing the Gap Between Embodied Impacts and Design Aspects. *Resources, Conservation and Recycling*, 164. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105120>
- Çetin, S., de Wolf, C., Bocken, N.** (2021) Circular digital built environment: An emerging framework. *Sustainability (Switzerland)*, 13(11). <https://doi.org/10.3390/su13116348>
- Çetin, S., Raghu, D., Honic, M., Straub, A., Gruis, V.** (2023) Data requirements and availabilities for material passports: A digitally enabled framework for improving the circularity of existing buildings. *Sustainable Production and Consumption*, 40, 422–437. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.07.011>
- de Wolf, C., Hoxha, E., Fivet, C.** (2020) Comparison of environmental assessment methods when reusing building components: A case study. *Sustainable Cities and Society*, 61. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102322>
- Dixit, M. K., Fernández-Solís, J. L., Lavy, S., Culp, C. H.** (2012) Need for an embodied energy measurement protocol for buildings: A review paper.

In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 16, Issue 6, pp. 3730–3743). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.021>

- Duan, H., Miller, T. R., Liu, G., Tam, V. W. Y.** (2019) Construction debris becomes growing concerns of growing cities. *Waste Management*, 83, 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.10.044>
- Duffy, F.** (1990) Measuring Building Performance. *Facilities*, 8, 17-20. <https://doi.org/10.1108/EUM0000000002112>
- Duffy, F., Worthington, J.** (1977) Organizational design. *Journal of Architectural Research*, 6(1), 4–9. <http://www.jstor.org/stable/43475216>
- Durmisevic, A.** (2006) Transformable Building Structures Design for Disassembly as a Way to Introduce Sustainable Engineering to Building Design & Construction. Cedris M&CC Leeghwaterstraat 422628 CA Delft. 90-9020341-9
- Durmisevic, E., Jorissen, A., Nijssen, R., Broek, K., Jacobs, J., Stoutjesdijk, P., Ribberink, M., Nederand, P.** (2019) Circular Economy in Construction Design Strategies for Reversible Buildings.
- European Commission** (2011) COM/2011/0571 Roadmap to Resource Efficient Europe. Brussels, Belgium. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52011DC0571>
- European Commission.** (2022) Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL establishing a framework for setting ecodesign requirements for sustainable products and repealing Directive 2009/125/EC.
- European Commission.** (2023) A Europe fit for the digital age: Empowering people with a new generation of technologies. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/europe-fit-digital-age_en
- Farr, E., Piroozfar, P.** (2022) Enabling Circular Economy in the AEC Industry Through Digitalization. In *The Routledge Companion to Ecological Design Thinking* (s. 339–350). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003183181-31>
- Frosch, R.A., Gallopoulos, N.E.** (1989) Strategies for Manufacturing. *Scientific American*, 261, 144-152. <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0989-144>
- Geissdoerfer, M.; Savaget, P.; Bocken, N.M.P.; Hultink, E.J.** (2017) The Circular Economy A new sustainability paradigm? *J. Clean. Prod.*, 143, 757–768.
- Ghisellini, P., Cialani, C., Ulgiati, S.** (2016) A Review on Circular Economy: The Expected Transition to a Balanced Interplay of Environmental and Economic Systems. *Journal of Cleaner Production*, 114, 11–32. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>
- Gonzalez, A., Verdaguer, S., Fuste, S., Samperio, A., Hernandez, G., Diez, G., Alfaro, L., Louiws, R., Oberhuber, S.** (2020) D2.5: First Approach of the BCM Methodology and Implementation in Theoretical Scenarios. WP2, T2.4 <https://houseful.eu/wp-content/uploads/2022/10/First->

- Gordon, M., Batallé, A., de Wolf, C., Sollazzo, A., Dubor, A., Wang, T.** (2023) Automating building element detection for deconstruction planning and material reuse: A case study. *Automation in Construction*, 146. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104697>
- Gulck, L. van, Leenknecht, E., Debusseré, E., Steenkiste, J. van, Steeman, M., Bossche, N. van den.** (2021) Development of a circularity assessment method for facade systems. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 855(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/855/1/012008>
- Güngör, B., Askar, R., Agibayeva, A., Karaca, F., Bragança, L.** (2024) Development of Circularity Assessment Indices for Construction Sector: A Critical Review *Lecture Notes in Civil Engineering CESARE'24 Coordinating Engineering for Sustainability and Resilience*, s. 381-391. https://doi.org/10.1007/978-3-031-57800-7_35
- Häkkinen, T., Belloni, K.** (2011) Barriers and drivers for sustainable building. *Building Research & Information*, 39(3), 239–255. <https://doi.org/10.1080/09613218.2011.561948>
- Heeres, R.R., Vermeulen, W.J.V., de Walle, F.B.** (2004) Eco-industrial park initiatives in the USA and the Netherlands: first lessons. *Journal of Cleaner Production* 12, 985–995
- Heisel, F., Rau-Oberhuber, S.** (2020) Calculation and evaluation of circularity indicators for the built environment using the case studies of UMAR and Madaster. *Journal of Cleaner Production*, 243. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118482>
- Hens, L.; Block, C.; Cabello-Eras, J.J.; Sagastume-Gutierrez, A.; Garcia-Lorenzo, D.; Chamorro, C.; Herrera Mendoza, K.; Haeseldonckx, D.; Vandecasteele, C.** (2018) On the evolution of “Cleaner Production” as a concept and a practice. *J. Clean. Prod.*, 172, 3323–3333.
- Honic, M., Kovacic, I.** (2020). Model and data management issues in the integrated assessment of existing building stocks. *Organization, Technology and Management in Construction*, 12(1), 2148–2157. <https://doi.org/10.2478/otmcj-2020-0011>
- Honic, M., Kovacic, I., Rechberger, H.** (2019). Improving the recycling potential of buildings through Material Passports (MP): An Austrian case study. *Journal of Cleaner Production*, 217, 787–797. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.212>
- Iacovidou, E., Purnell, P., Lim, M. K.** (2018). The use of smart technologies in enabling construction components reuse: A viable method or a problem creating solution? *Journal of Environmental Management*, 216, 214–223. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.04.093>
- Iacovidou, E., Purnell, P.** (2016) Mining the physical infrastructure: Opportunities, barriers and interventions in promoting structural components reuse. In

Science of the Total Environment (Vols. 557–558, pp. 791–807). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.098>

- Incelli, F., Cardellicchio, L., Rossetti, M.** (2023). Circularity Indicators as a Design Tool for Design and Construction Strategies in Architecture. *Buildings*, 13(7). <https://doi.org/10.3390/buildings13071706>
- Jansen, M., Meisen, T., Plociennik, C., Berg, H., Pomp, A., Windholz, W.** (2023). Stop Guessing in the Dark: Identified Requirements for Digital Product Passport Systems. *Systems*, 11(3). <https://doi.org/10.3390/systems11030123>
- Jensen, S. F., Kristensen, J. H., Adamsen, S., Christensen, A., Waehrens, B. V.** (2023). Digital product passports for a circular economy: Data needs for product life cycle decision-making. *Sustainable Production and Consumption*, 37, 242–255. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.02.021>
- Kalbar, P. P., Karmakar, S., Asolekar, S. R.** (2016). Life cycle-based decision support tool for selection of wastewater treatment alternatives. *Journal of Cleaner Production*, 117, 64–72. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.036>
- Kalbar, P. P., Karmakar S., Asolekar, S. R.** (2012) Selection of an appropriate wastewater treatment technology: a scenario-based multiple-attribute decision-making approach. *J Environ Manage* 113:158–169
- Kamer, T.** (2014) *Invulling programma Van Afval Naar Grondstof*; Brief van de staatssecretaris van Infrastructuur en Milieu aan de Tweede kamer 2013–2014, 33043, nr. 28; The Hague, Hollanda.
- Kayaçetin, N. C., Verdoodt, S., Lefevre, L., Versele, A.** (2023). Integrated decision support for embodied impact assessment of circular and bio-based building components. *Journal of Building Engineering*, 63. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105427>
- Kayaçetin, N. C., Verdoodt, S., Lefevre, L., Versele, A.** (2021) Evaluation of Circular Construction Works During Design Phase: An Overview of Valuation Tools. *Smart Innovation, Systems and Technologies 263 Sustainability in Energy and Buildings 2021*. S 89-100. https://doi.org/10.1007/978-981-16-6269-0_8
- Kayaçetin, N. C., Tanyer, A. M.** (2020). Embodied carbon assessment of residential housing at urban scale. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 117. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109470>
- Kayaçetin, N. C., TANYER, A. M.** (2016) "Türkiye de Ada Ölçeğinde Toplu Konut Projelerinin Yaşam Döngüsü Açısından İncelenmesi," 4. Proje ve Yapım Yönetimi Kongresi , Eskişehir, Turkey, s.1146-1155.
- Khadim, N., Agliata R., Thaheem, M. J., Mollo, L.** (2023) Whole building circularity indicator: a circular economy assessment framework for promoting circularity and sustainability in buildings and construction. *Build Environ* 241:110498
- Khasreen, M. M., Banfill, P. F. G., Menzies, G. F.** (2009). Life-Cycle Assessment and the Environmental Impact of Buildings: A Review. *Sustainability*, 1(3), 674–701. <https://doi.org/10.3390/su1030674>

- Kibert, C. J.** (2016). *Sustainable Construction: Green Building Design and Delivery*. John Wiley & Sons. 978-1-119-70645-8.
- Kibert, C. J., Sendzimir, J., Guy, B.** (2000). Construction ecology and metabolism: natural system analogues for a sustainable built environment. *Construction Management and Economics*, 18(8), 903–916. <https://doi.org/10.1080/014461900446867>
- Kirchherr, J., Piscicelli, L.** (2019). Towards an Education for the Circular Economy (ECE): Five Teaching Principles and a Case Study. *Resources, Conservation and Recycling*, 150. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104406>
- Kirchherr, J., Reike, D., Hekkert, M.** (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. In *Resources, Conservation and Recycling* (Vol. 127, pp. 221–232). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
- Konietzko, J., Bocken, N., Hultink, E. J.** (2020). A tool to analyze, ideate and develop circular innovation ecosystems. *Sustainability (Switzerland)*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/SU12010417>
- Koutamanis, A., van Reijn, B., van Bueren, E.** (2018). Urban mining and buildings: A review of possibilities and limitations. *Resources, Conservation and Recycling*, 138, 32–39. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.06.024>
- Kręzlik, A., Güzelci, O. Z., Sousa, J. P.** (2021). Rob-LCA An assessment method to support environmental sensitive material selection in robotic fabrication. *Proceedings of the International Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe*, 1, 455–464. <https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2021.1.455>
- Kuyrukçu, E. Y.** (2021). Bir "Yapı" Değil "His" Yaratmak: Troya Müzesi Örneği. *Online Journal Of Art And Design*, 53-70.
- Lam, W. C., Claes, S., Ritzen, M.** (2022). Exploring the Missing Link between Life Cycle Assessment and Circularity Assessment in the Built Environment. *Buildings*, 12(12). <https://doi.org/10.3390/buildings12122152>
- Li, H., Saboori, A., Cao, X.** (2016). Information synthesis and preliminary case study for life cycle assessment of reflective coatings for cool pavements. In *International Journal of Transportation Science and Technology* (Vol. 5, Issue 1, pp. 38–46). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2016.06.005>
- Lifset, R., Graedel, T.E.** (2002). *A handbook of industrial ecology*. Edward Elgar Pub. 10.4337/9781843765479.00009
- Littlewood, J. R., Howlett, R. J., Jain, L. C.** (2021). Smart Innovation, Systems and Technologies 263 Sustainability in Energy and Buildings 2021. <http://www.springer.com/series/8767>

- Lukianova, T., Kayaçetin, C., Lefevre, L., Versele, A., Klein, R.** (2022) *BIM-based circular building assessment and design for demountability*. 291 <https://doi.org/10.34641/clima>
- Makower, J.**(2013) *State of GreenBusiness*, GreenBiz Group.
- McDonough, W., Braungart, M.** (2002) *Cradle to cradle: Remaking the way we make things*. North Point Press: New York
- Moreno, M., de los Rios, C., Rowe, Z., Charnley, F.** (2016). A conceptual framework for circular design. *Sustainability (Switzerland)*, 8(9). <https://doi.org/10.3390/su8090937>
- Mulhall, D., Ayed, A. C., Schroeder, J., Hansen, K., Wautelet, T.** (2022). The Product Circularity Data Sheet—A Standardized Digital Fingerprint for Circular Economy Data about Products. *Energies*, 15(9). <https://doi.org/10.3390/en15093397>
- Pagoropoulos, A., Pigosso, D. C. A., McAloone, T. C.** (2017). The Emergent Role of Digital Technologies in the Circular Economy: A Review. *Procedia CIRP*, 64, 19–24. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.02.047>
- Pearce, D., Turner, R. K.** (1990). *Economics of natural resources and the environment*. Baltimore: Johns Hopkins University Press.
- Pereira, A. R., Post, J., Erkelens, P.** (2005) *Innovating Built Heritage: Adapt Past to Future. The 2005 World Sustainable Building Conference*, Tokyo, 27-29 Eylül 2005 (SB05Tokyo).
- Pomponi, F., Moncaster, A.** (2017). Circular Economy for the Built Environment: A Research Framework. *Journal of Cleaner Production*, 143, 710–718. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.055>
- Potting, J., Hekkert, M.P., Worrell, E., Hanemaaijer, A.** (2017) *Circular Economy: Measuring innovation in the product chain*, PBL Netherlands Assessment Agency, PBL Publisher
- Psarommatis, F., May, G.** (2024). Digital Product Passport: A Pathway to Circularity and Sustainability in Modern Manufacturing. *Sustainability (Switzerland)*, 16(1). <https://doi.org/10.3390/su16010396>
- Pryshlakivsky, J., Searcy, C.** (2021). Life Cycle Assessment as a Decision-Making Tool: Practitioner and Managerial Considerations. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 309). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127344>
- Raghu, D., Markopoulou, A., Marengo, M., Neri, I., Chronis, A., de Wolf, C.** (2022). Enabling Component Reuse from Existing Buildings through Machine Learning, Using Google Street View to Enhance Building Databases. *Proceedings of the 27th Conference on Computer Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA) [Volume 2]*, 2, 577–586. <https://doi.org/10.52842/conf.caadria.2022.2.577>
- Rajagopalan, N., Brancart, S., de Regel, S., Paduart, A., de Temmerman, N., Debacker, W.** (2021). Multi-criteria Decision Analysis Using Life Cycle Assessment and Life Cycle Costing in Circular Building Design: A Case Study for Wall Partitioning Systems in the Circular Retrofit

- Rigamonti, L., Mancini, E.** (2021). Life Cycle Assessment and Circularity Indicators. In *International Journal of Life Cycle Assessment* (Vol. 26, Issue 10, pp. 1937–1942). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s11367-021-01966-2>
- Saaty, T. L.** (2004). Decision Making-The Analytic Hierarchy and Network Process(AHP/ANP) Vol. 13, Issue 1. <https://doi.org/10.1007/s11518-006-0151-5>
- Saaty, T. L.** (1994) Fundamentals of decision making and priority theory with the analytic hierarchy process. Pittsburg: RWS
- Saaty, T. L.** (1980). The Analytic Hierarchy Process. Pittsburg USA: RWS Publications, New Edition 1990.
- Saaty, T.L.** (1977) A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 15, 234-281. [http://dx.doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](http://dx.doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5)
- Sherman, R.** (2014). Business Intelligence Guidebook: From Data Integration to Analytics. Morgan Kaufmann. 9780124115286
- Shi, H., Chertow, M., Song, Y.** (2010). Developing country experience with eco-industrial parks: a case study of the Tianjin Economic-Technological Development Area in China. *Journal of Cleaner Production*, 18(3), 191–199. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.10.002>
- Vandenbroucke, M., Galle, W., de Temmerman, N., Debacker, W., Paduart, A.** (2015). Using life cycle assessment to inform decision-making for sustainable buildings. *Buildings*, 5(2), 536–559. <https://doi.org/10.3390/buildings5020536>
- van der Zwaag, M.** (2022). *Data-Driven Decision-Making for Circular Building Design Development of an automated decision-support framework for an improved circular design workflow*. <http://repository.tudelft.nl/>.
- van Vliet, M. M., van Grinsven, J., Teunizen, J.** (2021)Circular Buildings: Disassembly Potential Measurement Method, Version 2.0. Alba Concepts. <https://circulairebouweconomie.nl/nieuws/circular-buildings-een-meetmethodiek-voor-losmaakbaarheid-v2-0-nu-online/>
- van Vliet, M. M.** (2018)Disassembling the steps towards Building Circularity Redeveloping the Building Disassembly assessment method in the Building Circularity Indicator. TU/e Eindhoven University of Technology, Faculty of the Built Environment, Construction Management & Engineering Department, Hollanda.
- Verberne, J.J.** (2016) Building Circularity Indicators: an Approach for Measuring Circularity of a Building. Technische Universiteit Eindhoven. <https://research.tue.nl/en/studentTheses/building-circularity-indicators>
- Yashwansingh, B., Surnam, R.** (2015). Use Of Weathering Steel As A Sustainable Material In Mauritius. Mauritius: University Of Mauritius.

Yuan, Z., Bi, J., Moriguchi, Y. (2008). The circular economy: A new development strategy in China. In *Journal of Industrial Ecology* (Vol. 10, Issues 1–2, pp. 4–8). <https://doi.org/10.1162/108819806775545321>

Yüzer, M. (2022) *Mimari Sürdürülebilirlik Kavramı Açısından Yapılarda Corten Çelik Kullanımı: Troya Müzesi Örneği*. Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Yapı Bilgisi Anabilim Dalı. Yüksek Lisans Tezi.

Zhang, N., Han, Q., de Vries, B. (2021) Building Circularity Assessment in the Architecture, Engineering, and Construction Industry: A New Framework. *Sustainability* 2021, 13, 12466. <https://doi.org/10.3390/su132212466>

Zhang, X., Yang, S., Zhang, W., Guo, H., He, X. (2014). Influence Of Outer Rust Layers On Corrosion Of Carbon Steel And Weathering Steel During Wet-Dry Cycles. *Corrosion Science* 82, 165-172. [10.1016/j.corsci.2014.01.016](https://doi.org/10.1016/j.corsci.2014.01.016)

Url-1

<<https://www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20151201STO05603/circular-economy-definition-importance-and-benefits>>, erişim tarihi 08.12.2023.

Url-2

<<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/what-is-the-linear-economy>>, erişim tarihi 17.11.2023.

Url-3

<<https://www.unido.org/our-focus-safeguarding-environment-resource-efficient-and-low-carbon-industrial-production/eco-industrial-parks>>, erişim tarihi 18.10.2023..

Url-4

<https://www.arup.com/services/climate-and-sustainability-services/circular-economy/services?utm_medium=cpc&utm_source=google&utm_campaign=Climate_ClimateAlwaysOnSearch_Global_&gad_source=1&gclid=Cj0KCQjwq86wBhDiARIsAJhuphkQCpn5XuU6k4yMWdDqRgTl4u4wnx2Q9V9YX453WwORkEZTSSYQ5mkaAp6ZEALw_wcB>, erişim tarihi 23.01.2024.

Url-5

<<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/articles/design-and-the-circular-economy>>, erişim tarihi 17.11.2023.

Url-6

<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/introduction-to-circular-design/we-need-to-radically-rethink-how-we-design?_gl=1*10izl9t*_up*MQ..*_ga*MTAxNjY3ODkwNS4xNzEyNTczNDIw*_ga_V32N675KJX*MTcxMjU3MzQxOS4xLjAuMTcxMjU3MzQxOS4wLjAuMA..>, erişim tarihi 15.11.2023.

Url-7

<<https://www.pbl.nl/en/publications/circular-economy-measuring-innovation-in-product-chains>>, erişim tarihi 13.02.2024.

Url-8

<<https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/CI/SfB>>, erişim tarihi 18.03.2024.

Url-9

<<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/the-circular-economy-in-detail-deep-dive>>, erişim tarihi 28.01.2024.

Url-10

<https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/105296/mod_resource/c

ontent/0/11.%C3%87ok%20%C3%96l%C3%A7%C3%BCtl%C3%BC
%20Karar%20Verme%20Y%C3%B6ntemleri-III.pdf>, erişim tarihi
25.02.2024.

Url-11 < https://donguseleekonomiplatformu.com/knowledge-hub/article_1-what-is-the-definition-of-a-circular-economy_11.html?page=3>, erişim tarihi
26.04.2024.

Url-12 <<https://www.environdec.com/all-about-epds>>, erişim tarihi 29.06.2012.

Url-13 Alba Concepts 2015 Building Circularity Index: <
<https://albaconcepts.nl/building-circularity-index-nieuwsbericht/>>, erişim tarihi 14.07.2024.

Url-14 <<https://geroba.be/en/whatis cortensteel/#:~:text=Corten%20steel%20is%20also%20used,it%20easy%20to%20recycle%20again.>>, erişim tarihi 12.08.2024.

Url-15 <<https://www.arkitera.com/proje/1-odul-troya-muzesi-serbest-katilimli-tek-asamali-ulusal-mimari-proje-yarismasi/>>, erişim tarihi 26.07.2024.

Url-16 <<https://www.arkitera.com/wp-content/uploads/2019/02/Troya-M%C3%BCzesi-26.jpg>>, erişim tarihi 26.07.2024.

Url-17 <<https://designbuilder.co.uk/software/one-click-lca-building-life-cycle-assessment>>, erişim tarihi 12.07.2024.

Url-18 <<https://oneclicklca.com/software/design-construction>>, erişim tarihi 12.07.2024.

Url-19 < https://www.cativecephce.com/yayin/878/troya-muzesi_25301.html>, erişim tarihi 28.07.2024.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad

:Ayşe Ceylin Ceyda Hündal

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2020, MSGSÜ, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü

YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR:

- **Hündal, A. C. C., Çolakoğlu, M. B.** (2024) Advancing Circular Design in Architecture: a Framework for Decision- Making Mechanisms. 13th International Congress on Engineering, Architecture and Design. Haziran 27, 2024, Türkiye. 978-625-6471-32-0

