

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**AR-GE PROJELERİNİN KARMAŞIKLIĞININ DEĞERLENDİRİLMESİ:
BAYES İNANÇ AĞI YAKLAŞIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Zülfiye DERİN USLU

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Mühendislik Yönetimi Programı

HAZİRAN 2024

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**AR-GE PROJELERİNİN KARMAŞIKLIĞININ DEĞERLENDİRİLMESİ:
BAYES İNANÇ AĞI YAKLAŞIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Zülfiye DERİN USLU
(507201222)**

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Mühendislik Yönetimi Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ayberk SOYER

HAZİRAN 2024

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

**ASSESSING R&D PROJECT COMPLEXITY: A BAYESIAN BELIEF
NETWORK APPROACH**

M.Sc. THESIS

**Zülfiye DERİN USLU
(507201222)**

Department of Industrial Engineering

Engineering Management Programme

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Ayberk SOYER

JUNE 2024

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 507201222 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Zülfiye DERİN USLU, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “AR-GE PROJELERİNİN KARMAŞIKLIĞININ DEĞERLENDİRİLMESİ: BAYES İNANÇ AĞI YAKLAŞIMI” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Ayberk SOYER**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Çiğdem KADAİFÇİ YANMAZ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Güneş KÜÇÜKYAZICI
İstanbul Topkapı Üniversitesi

Teslim Tarihi : 22 Mayıs 2024
Savunma Tarihi : 10 Haziran 2024





Sevgili Aileme,



ÖNSÖZ

Çalışmalarım boyunca desteğini hiçbir zaman esirgemeyen değerli danışman hocam Doç. Dr. Ayberk SOYER'e şükranlarımı sunarım. Araştırma sürecinde göstermiş olduğu rehberlik, emek, sabır ve bu çalışmaya olan inancı için minnettarım.

Sonsuz destekleri ve cesaretlendirmeleri için sevgili aileme teşekkürlerimi sunarım. Onların sevgisi ve varlığı hayatım boyunca tüm çalışmalarına esin kaynağı oldu. Bu akademik yolculukta bana olan inancı ve destekleri ile bu başarıya ulaşmamda ilham kaynağım olan sevgili eşim Muhammed Emin USLU'ya teşekkür ederim.

Ayrıca bu çalışmanın gerçekleşmesi için görüşleri ve geri bildirimleri ile katkılar sunarak çalışmayı şekillendiren değerli uzmanlara, meslektaşlarıma ve arkadaşlarıma şükranlarımı sunarım.

Haziran 2024

Zülfıye DERİN USLU
Endüstri Mühendisi



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Proje Karmaşıklığı ve Karmaşıklık Yönetimi	1
1.2 AR-GE Projelerin Önemi ve Karmaşıklık Düzeyi	2
1.3 Tezin Amacı	3
2. LİTERATÜR TARAMASI	7
2.1 Proje Yönetiminin Tarihsel Gelişimi	7
2.1.1 1930-1950'ler: İkinci Dünya Savaşı	7
2.1.2 1960'lar: Proje yönetimi tekniklerinin gelişimi.....	8
2.1.3 1970'ler: Petrol krizi ve mega projeler, organizasyonel yapılanma	8
2.1.4 1980'ler: Proje yönetiminde stratejik gelişmeler ve proje başarısı.....	10
2.1.5 1990'lar: Bilgi teknolojilerindeki gelişmeler, yeni yöntemler.....	11
2.1.6 2000 - Günümüz: Teknolojik gelişmeler, çeviklik, belirsizlik	12
2.2 Proje Karmaşıklığının Tanımı	14
2.3 Proje Karmaşıklığının Ölçümlemesi	19
2.3.1 Analitik hiyerarşi süreci.....	20
2.3.2 Bulanık analitik hiyerarşi süreci	21
2.3.3 Bulanık analitik ağ süreci	22
2.3.4 Hesaplamalı proje organizasyonu ve süreci ile simülasyon	24
2.3.5 Yapısal eşitlik modellemesi	24
2.3.6 Yapısal eşitlik modellemesi - bulanık bilişsel haritalama	25
2.3.7 Bayes inanç ağı	25
2.3.8 Dinamik bayes ağı	28
3. METODOLOJİ.....	31
3.1 Teorik Altyapı	32
3.1.1. Bayes teoremi	32
3.1.2 Bayes inanç ağı (BBN)	33
3.2 Araştırma Çerçevesi	35
3.2.1 AR-GE projelerinin karmaşıklık faktörlerinin belirlenmesi	36
3.2.2 Proje karmaşıklığı modelinin tasarımı (BBN yapısı)	37
3.2.3 Model geçerliliği.....	40
3.2.4 Model analizleri	41
4. UYGULAMA.....	43
4.1 AR-GE Projelerinin Karmaşıklık Faktörlerinin Belirlenmesi.....	44

4.1.1	Karmaşıklık faktörlerinin belirlenmesi	44
4.1.2	Veri Toplama ve Dönüştürme.....	49
4.2	BBN Modeli Tasarımı ve Koşullu Olasılıkların Hesaplanması	51
4.2.1	Uzman görüşleri ile nedensellik ilişkilerinin belirlenmesi	52
4.2.2	BBN ağ yapısının oluşturulması (yapısal öğrenme)	54
4.2.3	Koşullu olasılıkların belirlenmesi (parametre öğrenmesi).....	57
4.3	Model Validasyonu	61
4.4	Model Analizleri.....	63
4.4.1	Duyarlılık analizi	63
4.4.2	Etki zinciri analizi	66
4.4.3	Senaryo analizleri.....	68
5.	SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME	73
	KAYNAKLAR.....	75
	EKLER.....	81
	ÖZGEÇMİŞ	119



KISALTMALAR

4D	: 4-Dimensional (Dört Boyutlu)
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
AHP	: Analytic Hierarchy Process (Analitik Hiyerarşi Süreci)
AR-GE	: Araştırma ve Geliştirme
BBN	: Bayesian Belief Network (Bayes İnanç Ağı)
CAD	: Computer Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)
CCPM	: Critical Chain Project Management (Kritik Zincir Proje Yönetimi)
CPM	: Critical Path Method (Kritik Yol Yöntemi)
DBN	: Dynamic Bayesian Network (Dinamik Bayes Ağı)
ERP	: Enterprise Resource Planning (Kurumsal Kaynak Planlama)
FAHP	: Fuzzy Analytic Hierarchy Process (Bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci)
FANP	: Fuzzy Analytic Network Process (Bulanık Analitik Ağ Süreci)
FCM	: Fuzzy Cognitive Map (Bulanık Bilişsel Harita)
MS Project	: Microsoft Project
NASA	: National Aeronautics and Space Administration (Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi)
PERT	: Project Evaluation and Review Technique (Program Değerlendirme ve Gözden Geçirme Tekniği)
PESTLE	: Political, Economic, Social, Technological, Legal, Environmental (Politik, Ekonomik, Sosyal, Teknolojik, Yasal, Çevresel)
PMI	: Project Management Institute (Proje Yönetimi Enstitüsü)
SaaS	: Service as a Software (Hizmet Olarak Yazılım)
SEM	: Structural Equation Modelling (Yapısal Eşitlik Modellemesi)
TAPS	: The Trans Alaska Pipeline System (Trans Alaska Boru Hattı Sistemi)
UN	: United Nations
WBS	: Work Breakdown Structure (İş Dağılımı Yapısı)



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1: Proje karmaşıklığı üzerine yapılan çalışmalar.....	16
Çizelge 4.1: AR-GE projelerinin karmaşıklık faktörleri.	47
Çizelge 4.2: Karmaşıklık faktörleri ve proje karmaşıklığının olasılık tablosu.	51
Çizelge 4.3: Uzmanlar tarafından belirlenen faktörler arası nedensellik ilişkileri. ...	53
Çizelge 4.4: Senaryo analizlerinin proje karmaşıklığı üzerine etkisi.	70
Çizelge A.1: Literatürdeki karmaşıklık faktörlerinin sınıflandırılması.	82
Çizelge C.1: Etki zinciri analizinin sayısal sonuçları.	104



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Proje karmaşıklığının ölçülenmesinde kullanılan yöntemler.	19
Şekil 2.2: BBN yaklaşımı ile oluşturulan Proje Karmaşıklık Ölçümleme Modeli (Luo, Zhang, & Wu, 2020).	27
Şekil 2.3: DBN yaklaşımı ile geliştirilen dinamik proje karmaşıklık ölçümleme modeli (Luo vd., 2022).	29
Şekil 3.1: Araştırmanın genel çerçevesi.	31
Şekil 3.2: Bayes ağı örnek gösterimi.	34
Şekil 3.3: BBN ağ yapısı ile koşullu olasılıklar.	37
Şekil 4.1: Proje ekosisteminde yer alan karmaşıklık faktörleri.	44
Şekil 4.2: Anket katılımcılarının cinsiyet, yaş ve eğitim düzeyi verisi.	50
Şekil 4.3: Anket katılımcılarının sektör, unvan ve toplam iş deneyimi verisi.	50
Şekil 4.4: Anket katılımcılarının proje yönetimi iş deneyimi, proje bütçesi ve süresi verisi.	50
Şekil 4.5: GeNle veri girişi.	54
Şekil 4.6: GeNle’de yapısal öğrenmenin başlatılması.	55
Şekil 4.7: Uzman görüşünün GeNle programına girişi.	55
Şekil 4.8: Yapısal öğrenme ile ilk oluşan Bayes ağı yapısı.	56
Şekil 4.9: Parametre öğrenmesi, parametre başlatma alternatifleri.	57
Şekil 4.10: Parametre öğrenmesi sonucunda hesaplanan log (p) değeri.	58
Şekil 4.11: P5: Kapsam ve faaliyetlerdeki belirsizlik faktörünün (P5) koşullu olasılık tablosu.	58
Şekil 4.12: Proje karmaşıklığı faktörünün koşullu olasılık tablosu (kısmi veri).	59
Şekil 4.13: BBN modeli koşullu olasılık tabloları sonucunda elde edilen olasılık dağılımları.	60
Şekil 4.14: Model validasyonunun gerçekleştirilmesi.	62
Şekil 4.15: BBN modelinin doğruluk sonuçları.	62
Şekil 4.16: BBN modelinin karışıklık matrisi.	62
Şekil 4.17: Duyarlılık analizi sonucu.	64
Şekil 4.18: Etki zinciri analizi grafik gösterimi.	69
Şekil D.1: Makro çevrenin "yüksek" karmaşık olarak varsayılması sonucu proje karmaşıklığı (Senaryo1).	106
Şekil D.2: Görev çevresinin "yüksek" karmaşık olarak varsayılması sonucu proje karmaşıklığı (Senaryo2).	107
Şekil D.3: Organizasyonel faktörlerin "yüksek" karmaşık olarak varsayılması sonucu proje karmaşıklığı (Senaryo3).	108
Şekil D.4: Proje karakteristiği faktörlerinin "yüksek" karmaşık olarak varsayılması sonucu proje karmaşıklığı (Senaryo4).	109
Şekil D.5: Projenin stratejik önemi (P13) faktörünün senaryo analizi (Senaryo5).	110
Şekil D.6: Müşteri talep ve beklentilerindeki belirsizlik (GC3) faktörünün senaryo analizi (Senaryo6).	111

Şekil D.7: Teknolojik ortamdaki zorluklar (MC4) faktörünün senaryo analizi (Senaryo7).....	112
Şekil D.8: Amaç ve hedeflerin belirsizliği (P1) faktörünün senaryo analizi (Senaryo8).....	113
Şekil D.9: Proje yönetimi metot ve araçlarının yapısı ve entegrasyonu (P11) faktörünün senaryo analizi (Senaryo9).....	114
Şekil D.10: Politik ve yasal zorluklar (MC3) faktörünün senaryo analizi (Senaryo10).....	115
Şekil D.11: PC'nin yüksek duyarlı olduğu (P13, GC3, MC4, P1, P11, MC3) faktörlerin senaryo analizi (Senaryo11).....	116
Şekil D.12: Proje karakteristiği faktörleri (P1, P2, P8, P9) ile senaryo analizi (Senaryo12).....	117
Şekil D.13: İkinci nedensel zincirdeki faktörlerin (MC2, GC5, O3, P3, P7) senaryo analizi (Senaryo13).....	118



AR-GE PROJELERİNİN KARMAŞIKLIĞININ DEĞERLENDİRİLMESİ: BAYES İNANÇ AĞI YAKLAŞIMI

ÖZET

Son yıllarda gelişen teknoloji ve artan rekabet ortamı ile şirketlerin yenilikçi projeler üretmesi ve bu projeleri başarılı bir şekilde tamamlaması kritik öneme sahip olmuştur. Projenin başarısını etkileyen kritik faktörlerden biri ise belirsizliktir. Belirsizlik, çoğunlukla proje bütçesinde ve zaman planında sapmalara sebep olarak teknik ve yönetsel zorluklar yaratmaktadır. Bu koşullar altında, proje yönetiminin, karmaşıklık yönetimi ile ilişkili olduğu vurgulanmaktadır. Bu karmaşıklığın yönetilmesi için ise karmaşıklığa sebep olan faktörlerin net bir şekilde tanımlanması ve faktörler arasındaki ilişkilerin sayısal olarak hesaplanması gerekmektedir. Proje karmaşıklığı, tanımlanması ve sayısal olarak ölçülmesi zor bir kavram olarak belirtilmektedir. İncelenen akademik çalışmalarda proje karmaşıklığının birbiri ile ilişkili olan çeşitli birçok faktörden kaynaklandığı ifade edilmektedir. Daha geniş anlamda, birden fazla hedef ve çok sayıda paydaş olmak üzere birçok unsurdan oluşan ve bu unsurların bağımlı olmasından kaynaklanan yapısal belirsizlik olarak ifade edilmektedir. Literatürde, proje karmaşıklığının nitel ve nicel yöntemlerle ölçümlendiği farklı çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalarda, karmaşıklık faktörlerinin nedensel ilişkilerine odaklanmanın ve belirsizliği dikkate almanın gerekliliğinin altını çizilmektedir.

Bu çalışmanın amacı, nedensel ilişkiler üzerine kurulu pratik bir olasılıksal modelleme tekniği sunan Bayes İnanç Ağı (BBN: Bayesian Belief Network) yaklaşımını kullanarak AR-GE projelerinin karmaşıklığını değerlendirmek amacıyla yeni bir ölçüm modeli geliştirmektedir. Şirketlerin rekabet gücünün artırılmasında büyük önem taşıyan AR-GE projelerinin, küresel rekabette de belirleyici bir rol üstlenmesi sebebiyle çalışmanın kapsamını AR-GE projeleri oluşturmaktadır. AR-GE projeleri karakteristiği gereği, birçok belirsizlik içeren, teknolojik bağımlılığı yüksek olan, multidisipliner ekipler gerektiren ve uzun vadeli projelerdir. Dolayısıyla AR-GE projeleri, diğer proje türlerine göre daha karmaşık kabul edilmektedir ve esnek bir yönetim gerektirmektedir. AR-GE projelerinin karmaşıklık yönetiminde teorik ve pratik uygulamalara katkı sunmayı amaçlayan bu çalışmanın uygulaması dört bölümden oluşmaktadır: (i) karmaşıklık faktörlerinin belirlenmesi, (ii) Bayes ağı modelinin oluşturulması ve koşullu olasılık tablolarının elde edilmesi, (iii) model validasyonu, (iv) model analizleri ve çıkarımlar.

Çalışma kapsamında öncelikle, literatür araştırması ve uzman bilgisine dayanarak 28 karmaşıklık faktörü belirlenmiş ve belirlenen faktörler makro çevre, görev çevresi, organizasyon ve proje karakteristiği olmak üzere dört grup altında kategorize edilmiştir. Karmaşıklık faktörlerinin olasılıklarının belirlenmesi için 5’li Likert ölçeğinde (1: çok az; 5: çok fazla) çevrim içi anket ile veri toplanmıştır ve veri modelde kullanılmak üzere 3’lü Likert ölçeğine (1: düşük; 2: orta; 3: yüksek) dönüştürülmüştür. İkinci aşamada toplanan veri ve uzman görüşleri ile GeNIe programında BBN yapısı

oluşturulmuştur. İlk kurulan ağ yapısı, modelin ürettiği anlamsız bağlantıları çıkarmak için uzman grubu ile tekrar değerlendirilerek nihai yapı oluşturulmuştur. Sonrasında, nihai ağ yapısı üzerinden parametre öğrenmesi ile her bir faktör için koşullu olasılık tabloları elde edilmiştir. Koşullu olasılık tablolarının elde edilmesinin sebebi analiz sürecine temel oluşturmasıdır. Üçüncü aşamada, K-Katmanlı Çapraz Doğrulama yöntemi kullanılarak modelin validasyonu gerçekleştirilmiştir ve modelin doğruluğu %80 üzerinde çıkmıştır. Son olarak duyarlılık analizi, etki zinciri analizi ve senaryo analizleri gerçekleştirilmiştir.

Duyarlılık analizi sonuçlarına göre AR-GE projelerinin karmaşıklığı makro çevrede teknolojik konjonktürün belirsizlikleri, değişkenlikleri ve bağımlılıklar faktörüne; görev çevresinde müşteri talep ve beklentilerindeki belirsizlik ve değişkenlik faktörüne; proje karakteristiği kategorisinde projenin amaç ve hedeflerindeki belirsizlik faktörüne ve projenin stratejik önemi faktörüne yüksek duyarlı çıkmıştır. Koşullu olasılıklar arasındaki bağımlılık derecesini tanımlayan etki zinciri analizi sonuçlarına göre proje karmaşıklığını en çok etkileyen nedensel zincir, “Projenin amaç ve hedeflerindeki belirsizlik ve bağımlılık” → “Projenin amaç ve hedeflerinin çeşitliliği ve sayısı” → “Projenin insan kaynağı yapısı” → “Proje ekip üyeleri arasındaki etkileşim ve iş birliği” → “Proje karmaşıklığı”dır. Senaryo analizinde ise makro çevre, görev çevresi, organizasyon ve proje karakteristiği kategorisindeki faktörlerinin durumu sırasıyla “Yüksek” karmaşık olarak tanımlanmış ve sonuç olarak proje karmaşıklığı sırasıyla %52, %56, %51 ve %97 ile “Yüksek” karmaşıklık olasılığına sahip çıkmıştır.

ASSESSING R&D PROJECT COMPLEXITY: A BAYESIAN BELIEF NETWORK APPROACH

SUMMARY

In recent years, with the development of technology and an increasing competitive environment, it has become critical for companies to produce innovative projects and successfully complete these projects. A project is a structured set of outputs consisting of interrelated activities carried out within a specific time frame and budget to achieve a particular goal. Project management techniques are applied to ensure that projects are conducted within a specific systematic framework. Project management is an integrated process consisting of planning, execution, monitoring, and control phases from the initiation to the closure of the projects, following a particular methodology. The primary objective of project management is the successful completion of the project. One of the critical factors affecting the success of the project is uncertainty. Uncertainty often leads to deviations in the project budget and timeline, creating technical and managerial challenges. Therefore, uncertainty increases the complexity level of a project and significantly impacts project success. In project organizations, it is emphasized that project management is related to complexity management. To manage this complexity, it is necessary to clearly define the factors causing the complexity and quantitatively calculate the relationships between these factors.

Project complexity is indicated as a concept that is difficult to define and measure quantitatively. In the academic studies reviewed, it is stated that project complexity is caused by several interrelated factors. More broadly, it is defined as structural uncertainty arising from the interdependence and interconnectedness of many elements, including multiple objectives, multiple stakeholders, and so on. In the literature, there are different studies that measure project complexity by applying qualitative and quantitative methods. In these reviewed studies, methods such as Analytic Hierarchy Process (AHP), Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP), Fuzzy Analytic Network Process (FANP), Bayesian Belief Network (BBN), and Dynamic Bayesian Network (DBN) stand out. Fuzzy logic has been incorporated into the models developed in some of these studies to create a more realistic measurement framework. On the other hand, the BBN method is also preferred as it is a probabilistic model that allows measuring the degree of complexity under different scenarios in the presence of uncertainty. The DBN, an extended version of BBN, stands out as a model that provides time-dependent dynamics. The current literature underlines the need to focus on the causal relationships of complexity factors and to take the uncertainty into account.

This study aims to develop a new measurement model to evaluate the complexity of R&D projects using the Bayesian Belief Network (BBN) approach, which offers a practical probabilistic modeling based on causal relationships. The scope of the study is determined to consider R&D projects due to their crucial role in achieving competitive advantage and improving performance. R&D projects are generally

characterized by many uncertainties, high technological dependencies, multidisciplinary teams, and their long-term nature. Therefore, R&D projects are considered more complex than other project types and require flexible management. This study, which aims to contribute to theoretical and practical applications in the complexity management of R&D projects, consists of four stages: (i) identification of complexity factors, (ii) construction of the Bayesian network model, (iii) model validation, and (iv) model analyses and conclusions.

First, based on the literature research and expert knowledge, 28 complexity factors were identified and categorized into the macro environment, task environment, organizational, and project characteristics groups.

- Complexity factors from the macro environment were determined using PESTLE analysis including political, economic, technological, legal, and environmental factors.
- Complexity factors from the task environment were defined as relationships among external stakeholders, the number and diversity of external stakeholders, customers, suppliers, and the competitive environment.
- Organizational complexity factors were defined as relationships and collaboration environment within the organization, cultural structure, financial & operational risks, and organizational structure.
- Factors in the project characteristics category included 13 factors such as uncertainties in project objectives and goals, scope and activities uncertainty, dependencies, output structure, project duration, project budget, strategic importance of the project, availability of planned resources, and human resources structure.

After defining the complexity factors, data were collected from participants with experience in R&D project management through an online survey. Participants were asked to rate (on a 5-point Likert scale, with 1 being very low level and 5 being very high level) the extent to which the 28 factors that cause project complexity apply to the most recent R&D project they were involved in/managed. Participants were also asked to evaluate the overall complexity of the most recent R&D project they considered. A total of 157 responses were received and 136 were decided to be used in the model because inconsistent responses and responses excluding R&D projects were excluded. Due to the complexity of the conditional probability table in a 28-factor network structure, which increases the complexity of the network structure and makes the model solution difficult, the questionnaire responses obtained using a 5-point Likert scale, factors with a score of 1 and 2 were classified as “low”, factors with a score of 3 were classified as “moderate”, and factors with a score of 4 and 5 were classified as “high”. The survey results showed that the complexity level of the most recent R&D project participated in or managed by the participants was evaluated as 5% low complexity, 34% moderate complexity, and 61% high complexity. This result emphasizes the importance of this study on the complexity of R&D projects.

The Bayesian network methodology includes factors used as variables (nodes) and arrows (arcs) showing the relationships between these factors. The probability table obtained by multiplying the conditional probabilities formed according to the relationships of the variables in the network structure constitutes the quantitative feature of the network. In this stage, the 28 identified complexity factors and the project complexity factor defined as the target factor were used as variables (nodes).

Using the survey data and the opinions of four experts, the Bayesian network structure was established in the GeNIe program. Here, the most important advantage of incorporating expert opinion into the model is the creation of a model based on a causal basis that is consistent with real life. The initial network structure was evaluated with the expert group to remove the meaningless connections produced by the model, and the final structure was established. Subsequently, based on the final network structure, conditional probability tables for each factor were obtained through parameter learning. The purpose of obtaining these conditional probability tables is to provide a basis for the analyses. Following the model generation, the three-level probability distribution of all factors in the network was obtained. The probability of the project complexity target factor was found as 11% low, 36% moderate, and 53% high. The supposed high complexity level of R&D projects was proven by the results obtained in the parameter learning step.

In the third stage, the validation of the Bayesian network structure was performed using the K-Fold Cross Validation method, and it was checked whether the established model reflected real data and the accuracy rate was above 80%. In the literature, models above 80% accuracy levels are considered effective. Following the model validation, sensitivity analysis, influence chain analysis, and scenario analyses were conducted as the final stage.

According to the sensitivity analysis results, the complexity of R&D projects is highly sensitive to the technological uncertainties, variabilities, and dependencies in the macro environment; the uncertainty and variability of the customer demands and expectations in the task environment; and the uncertainty in project objectives and goals and the strategic importance of the projects. Therefore, changes in the complexity levels of these factors significantly affect the probability of project complexity. According to the influence chain analysis results, which define the degree of dependence between conditional probabilities, the two most influencing causal chains on project complexity are obtained. The first one is “Uncertainty and dependencies in project objectives and goals” → “Variety and number of project objectives and goals” → “Human resource structure of the project” → “Interaction and collaboration among project team members” → “Project complexity.” The second causal chain is “Financial risks of the organization” → “Structure of the planned project budget” → “Availability and management of planned project resources” → “Project complexity.” In the scenario analysis, the factors in the macro environment, task environment, organization, and project characteristics categories were defined as “High”, respectively, and as a result, the project complexity was found to have a “High” complexity probability with 52%, 56%, 51%, and 97%, respectively. This result shows that when the factors in the project characteristics category are high, the project complexity is 97% likely to be high. Subsequently, additional scenario analyses were conducted on the factors under the project characteristics category to obtain detailed results.



1. GİRİŞ

Günümüzde, kamu veya özel sektör fark etmeksizin birçok organizasyonun temelini projeler oluşturmaktadır (Geraldı vd., 2011). Projeler, bir kuruluşun stratejik hedeflerine ulaşması için yapılmaktadır. Operasyon boyutunda elde edilemeyecek yeni bir ürün veya hizmet ile benzersiz çıktılar üretmek üzere tasarlanmaktadır. Proje yönetimi metodolojisinde, operasyonlardan farklı olarak süre ve tekrarlı süreçler kısıtlıdır. Aynı zamanda proje sonunda özgün bir çıktı üretmek hedefi, yüksek risk ve belirsizlik içermektedir. Dolayısıyla projelerin yönetimi, operasyonel faaliyetlerin yönetiminden daha farklı bir metodoloji gerektirmektedir. Genel olarak proje yönetimi, bazı teknik ve araçlar kullanılarak belirli bir süre ve bütçe ile proje gereksinimlerini karşılamak için hedeflenen faaliyetlerin planlanması, yönetilmesi, izlenmesi ve kontrol edilmesi olarak tariflenebilir. Proje yönetiminde geleneksel, çevik, hibrit gibi farklı yöntemler kullanmakta olsa da tüm yöntemlerin temel amacı, projenin başarılı bir şekilde tamamlanmasıdır. Proje başarısına etki eden birçok unsur bulunmakla birlikte projenin başarısını etkileyen en önemli kriterlerden biri karmaşıklık yönetimi olarak tanımlanmaktadır (Luo vd., 2017). Baccarini (1996), yaptığı çalışmada, proje bazlı yönetimlerin genellikle karmaşıklık yönetimi ile ilişkili olduğunu vurgulamıştır.

1.1 Proje Karmaşıklığı ve Karmaşıklık Yönetimi

Proje karmaşıklığı, tanımlaması ve ölçmesi zor bir kavram olarak ifade edilmektedir (Luo vd., 2017). Baccarini (1996), birbiriyle ilişkili çok çeşitli parçaları karmaşıklığın bir boyutu olarak tanımlamıştır. Proje karmaşıklığı, proje sistemi hakkında yeterince bilgi sahibi olunduğunda dahi bir projenin genel davranışını anlamayı, öngörmeyi ve kontrol altında tutmayı zorlaştıran bir proje özelliği olarak belirtilmektedir (Vidal & Marle, 2008). Proje karmaşıklığının projenin doğasında olan bir özellik olduğu vurgulanmaktadır (PMI, 2021). Doğrusal olmayan ve dinamik değişkenlikler ortaya çıkaran (Geraldı vd., 2011) bu karmaşıklık, proje hedeflerine ulaşmada ek yönetimsel zorluklar getirmektedir. Sonuç olarak, karmaşıklığın geniş bir anlam içermesi ve

sezgisel olarak yönetimi, bu konunun çalışılmasının önünde bir güçlük yaratmaktadır (Dao vd., 2022). Ancak proje yönetimi sürecinde, proje karmaşıklığına gereken önemin verilmemesi proje başarısızlıklarının bir sebebi olarak gösterilmektedir (Luo vd., 2017). Dolayısıyla proje karmaşıklığını anlamak, karmaşıklığa sebep olan faktörleri tanımlamak ve bu karmaşıklığı verimli bir şekilde yönetmek, hem araştırmacılar hem de sektör uzmanları için kritik bir konu haline gelmiştir (Bakhshi vd., 2016). Özellikle, son yıllarda gelişen teknoloji ve artan rekabetçilik ile oluşan değişken ortamda, projelerden elde edilen değerin en yüksek seviyelerde tutulması bir zorunluluk haline gelmiştir ve başarının önünde bir engel olan karmaşıklığın, anlaşılması ve yönetimi kaçınılmaz bir ihtiyaç olmuştur.

1.2 AR-GE Projelerin Önemi ve Karmaşıklık Düzeyi

Smith'e göre yüksek rekabet, kuruluşları daha üretken olmaya zorlamaktadır ve bu durum rakipler arasındaki rekabetçilik farkını azaltmaya yardımcı olabilecek inovasyon için önemli bir itici güçtür (OECD, 2023'te atıfta bulunulduğu gibi). Yenilikçi projelerin temelinde yer alan AR-GE faaliyetleri (Namazi vd., 2023) ise bu ortamda önemli bir rol oynamaktadır. AR-GE yeni ürün, süreç veya hizmetlerin geliştirilmesi veya mevcut ürün, süreç veya hizmetlerin önemli ölçüde iyileştirilmesi için yeni bilgi ve becerilerin keşfedilmesini amaçlayan sistematik bir araştırma olarak tanımlanmaktadır (KPMG, 2021). AR-GE projeleri, beklenen sonuçlara ulaşmak için planlanan maliyet veya zamanın yanı sıra hedeflerine herhangi bir ölçüde ulaşıp ulaşamayacağı konusunda da belirsizlik içeren projelerdir (OECD Frascati Manual, 2015). Bu nedenle, AR-GE projelerini başlatma ve başarıyla tamamlama becerisi, bu son derece rekabetçi ve hızla gelişen teknolojik ortamda, kuruluşlar için kritik bir farklılaştırıcı güç haline gelmiştir.

McKinsey tarafından yayımlanan çalışmada, AR-GE yatırımlarının şirketlerin yeni ürün, hizmet veya iş modelleri geliştirmelerine yardımcı olduğu ve pazara farklılaştırılmış çıktılar sunarak rakiplerinin önüne geçmelerine imkân sağladığı ifade edilmiştir (Brennan vd., 2020). Sadece şirketler için değil, ülkelerin ekonomik ve sürdürülebilir büyümeleri için de AR-GE faaliyetleri stratejik öneme sahiptir. Üretkenliği artırmanın temel bir aracı olan inovasyon, AR-GE harcamalarıyla güçlendirilmektedir. Güney Kore, Japonya, ABD, Almanya ve İskandinav ülkeleri gibi gelişmiş ekonomilerin AR-GE'ye yatırımlarında lider olmaları da bunun bir sonucudur

(Deloitte, 2022). Birleşmiş Milletler'in Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri arasında yer alan Hedef 9.5'te, ülkeler yenilikçiliğe teşvik edilmekte ve kamu ve özel sektörde AR-GE harcamalarının artırılması yönünde bir çağrı yer almaktadır. Bu hedefin göstergelerinden biri ise AR-GE harcamalarının gayri safi yurt içi hâsıla içindeki oranı olarak verilmiştir (United Nations, 2016). Amerika Kongre Araştırma Merkezi'nin 2022 yılında yayınladığı raporda, küresel AR-GE harcamalarının 2000 yılında 2020 yılına üç katına çıkarak 675 milyon dolardan 2,4 trilyon dolara ulaştığı belirtilmiştir (Congressional Research Services, 2022). Şirketler de AR-GE yatırımları konusunda iyimser bir tutum izlemektedir. Deloitte tarafından yapılan bir araştırma anketinde (2022), şirketlerin %39'unun önümüzdeki 3-5 yıl içerisinde önceki yıllara kıyasla daha fazla AR-GE yatırımı yapmayı planladığı sonucu ortaya çıkmıştır.

Başarılı bir şekilde inovasyon yapanlarla yapmayanlar arasındaki performans farkının giderek büyüdüğü bir ortamda, AR-GE yatırımlarından en iyi sonucu elde etmek bir sorun olarak ortaya çıkmaktadır. Bunun sebebi AR-GE projelerinden elde edilecek olan gelirin kesin olmamasıdır. AR-GE projeleri, proje karakteristiği gereği belirsizliği yüksek, süreçlerin birbirine bağımlı olduğu, araştırma ortamındaki değişikliklere duyarlı ve uzmanlık gerektiren projelerdir (Nath & Mrinalini, 2000). McKinsey araştırmasında, şirketlerinin çoğunun mevcut pazarlarını koruyan ve müşteri taleplerinden doğan kısa vadeli, daha güvenli projeleri yapma eğiliminde olduğu ortaya çıkmıştır (Brennan vd., 2020). Bunun sebeplerinden biri, AR-GE projelerin uzun vadeli ve karmaşık olması ile yapılan faaliyetlerin şirket içerisinde tam anlamıyla anlaşılması olarak belirtilmiştir. AR-GE projeleri hem şirketler hem ülkeler için stratejik öneme sahip olmasına rağmen, hedeflerin net olmaması, uzmanlaşmış multidisipliner ekipler gerektirmesi, proje süresinin uzun olması gibi sebeplerden dolayı yönetimi zor olan projelerdir. Bu nedenle, AR-GE projeleri bu özelliklerinden dolayı karmaşık projeler olarak kabul edilmektedir (Molepo vd., 2019).

1.3 Tezin Amacı

Bu tezin amacı, ulusal kalkınmada kritik bir rol oynayan AR-GE projelerinin karmaşıklığını değerlendirmek için, karmaşıklığın önemli etkenlerinden biri olan belirsizliği yönetme noktasında pratik bir olasılıksal modelleme tekniği sunan Bayes İnanç Ağı (BBN) yöntemini kullanarak bir model geliştirmektir. Bu kapsamda yapılan model geliştirme çalışmaları, dört temel adımda gerçekleştirilmiştir: (i) karmaşıklık

faktörlerinin belirlenmesi ve veri toplama, (ii) Bayes ağı modelinin oluşturulması, (iii) model validasyonu, (iv) model analizleri ve çıkarımlar. İlk olarak, literatür taraması ve uzman bilgisine dayanarak makro çevre, görev çevresi, organizasyonel faktörler ve proje karakteristiği olmak üzere dört kategori altında toplam 28 karmaşıklık faktörü belirlenmiştir. Sonrasında, faktörlerin karmaşıklık düzeylerine ilişkin veri toplamak amacıyla 5’li Likert ölçeğinde (1: çok düşük; 5: çok yüksek) tasarlanan çevrim içi anket ile 157 katılımcıdan veri toplanmıştır. Tutarlı 137 veri modelde kullanılmak üzere 5’li Likert ölçeğinden, modelin çözümünü kolaylaştırmak amacıyla 3’lü Likert ölçeğine (düşük, orta, yüksek) dönüştürülmüştür. İkinci aşamada, uzman görüşü ve toplanan veri kullanılarak GeNIe Akademik programında yapısal öğrenme gerçekleştirilmiştir ve Bayes ağı yapısı oluşturulmuştur. Oluşturulan modelde mantıksız nedenselliklerden kaçınmak için on yıldan fazla deneyime sahip dört uzman ile elde edilen ağ yapısı değerlendirilmiştir. Ardından, faktörler arası ilişkileri hesaplamak için parametre öğrenmesi ile her bir faktörün koşullu olasılık tablosu elde edilmiştir. Üçüncü aşamada, model validasyonunun kontrolü için K-Katmanlı Çapraz Doğrulama yapılmıştır. Modelin doğruluğu %80’in üzerinde çıkmıştır ve bu sonuç kurulan ağ yapısının karmaşıklığın modellenmesinde etkili bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir. Dördüncü aşamada, geliştirilen model üzerinde, duyarlılık analizi, etki zinciri analizi ve senaryo analizleri yapılmıştır. Bu araştırma sonucunda, AR-GE projelerinin karmaşıklığının, teknolojinin yeniliği, projenin stratejik önemi, müşteri taleplerindeki değişkenlik ve belirsizlikler ile proje hedeflerindeki belirsizliğe karşı oldukça duyarlı olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla, bu faktörlerin karmaşıklık düzeylerindeki değişiklikler, genel proje karmaşıklığını önemli ölçüde etkilemektedir. Ayrıca, modelde faktörler arası en yüksek nedensel ilişkilerden birinin “proje organizasyonundaki bireyler ve departmanlar arasındaki işbirliği” ile “proje ekibi yapısı” faktörleri arasında olması, proje başarısı açısından organizasyonel iklimin önemini vurgulamaktadır. Makro çevre, görev çevresi, organizasyon ve proje karakteristiği kategorisindeki faktörlerin senaryo analizi ile durumu sırasıyla “Yüksek” olarak belirtildiğinde ise proje karmaşıklığı olasılığının %97 ile “Yüksek” karmaşıklığa sahip olmasına sebep olan kategorinin proje karakteristiği olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmanın literatüre en temel katkısı, AR-GE projelerinin karmaşıklığını, faktörler arası karşılıklı ilişkileri de içerecek şekilde ölçmek için BBN yaklaşımının uygulanmasıdır. Çalışmanın bir diğer katkısı ise proje

yönetimi profesyonellerine projelerin karmaşıklığını yönetme ve proje başarısını artırma konusunda olan yol gösterme potansiyelidir.

Tezin geri kalanı dört bölüm şekilde düzenlenmiştir: Literatür Taraması bölümünde (Bölüm 2) proje karmaşıklığının tanımlanması, karmaşıklık faktörlerinin belirlenmesi ve proje karmaşıklığının ölçülenmesine yönelik yapılan çalışmalar özetlenmektedir. Metodoloji bölümünde (Bölüm 3) çalışmada kullanılan BBN yöntemi açıklanmakta ve Uygulama bölümünde (Bölüm 4) AR-GE projelerinin karmaşıklığının değerlendirilmesi için geliştirilen Bayes Ağı modelinin uygulaması ve gerçekleştirilen analizler (duyarlılık analizi, etki zinciri analizi, senaryo analizleri) detaylı olarak açıklanmaktadır. Son olarak, Sonuçlar ve Değerlendirme bölümünde (Bölüm 5) ise sonuç ve önerilerin yanı sıra gelecek çalışmalar için tavsiyeler verilmekte ve sonuçların pratik ve teorik katkıları tartışılmaktadır.



2. LİTERATÜR TARAMASI

AR-GE projelerinin karmaşıklığının ölçümlemesine yönelik yapılan bu çalışmanın literatür bölümünde, proje yönetimini ve projelerin etkilendiği ortamı ve proje karakteristiklerini tarihsel bir perspektif ile açıklamak amacıyla öncelikle proje yönetiminin 1930'lerden günümüze kadar olan gelişimi aktarılmış, daha sonra proje karmaşıklığının anlaşılması ve tanımlanması üzerine yapılan çalışmalar özetlenmiştir. Son olarak proje karmaşıklığının ölçümlemesine yönelik farklı yöntemler kullanılarak bir model geliştirme sürecini içeren ve karmaşıklığın sayısal olarak ölçümlemesine olanak tanıyan çalışmalar açıklanmıştır.

2.1 Proje Yönetiminin Tarihsel Gelişimi

2.1.1 1930-1950'ler: İkinci Dünya Savaşı

Modern proje yönetiminin temeli 1930 ve 1950'li yıllar arasında atılmıştır. İkinci Dünya Savaşı döneminde, ilk atom bombasının geliştirilmesi projesi olan Manhattan Projesi, dönemin en büyük AR-GE projelerinden biri olarak 600.000 çalışanı ve 2 milyar doların üzerinde bütçesi ile büyük riskler içeren ve çok karmaşık bir proje olarak kabul edilmektedir (Morris, 1994, s. 14). Bu projede çizelgeleme, iş ayrışım yapısı (WBS: Work Breakdown Structure) gibi sistematik yaklaşımlar kullanılmamış olsa da, planlama, organizasyon, yönlendirme gibi modern proje yönetimi prensipleri uygulanmıştır (Morris, 1994). Proje ve program yönetiminin en belirgin gelişimi ise 1950'lerin başında ABD Hava Kuvvetleri'nin daha özellikli çok sayıda uçağın geliştirip üretilmesi ve uzun menzilli roket geliştirme ihtiyaçları ile yaşanmıştır (Morris, 1994, s. 19). Bu gelişim sürecinde, savunma ve havacılık projelerinin yanı sıra, İkinci Dünya Savaşı sonrası oluşan yıkımın yeniden inşası amacıyla yapılan inşaat projeleri de etkili olmuştur. Bu dönem, projeleri başarılı bir şekilde tamamlamak amacıyla geliştirilen proje yönetim tekniklerinin ve sistemlerin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Daha çok savunma ve havacılık sektöründe yapılan AR-GE projelerinde kullanılan PERT (Program Evaluation and Review Technique) yöntemi

ve inşaat projelerinde kullanılan ve aktivite odaklı olan CPM (Critical Path Method) yöntemi gibi ağ temelli yöntemler bu dönemde geliştirilmiştir (Morris, 1994, s.33).

2.1.2 1960'lar: Proje yönetimi tekniklerinin gelişimi

1960'lara gelindiğinde, Polaris projesi sürecinde, PERT'in zaman ve bütçe kontrolünde yetersiz kalması sebebiyle WBS tekniği geliştirilmiştir (Morris, 1994, s. 44). Bu dönemde NASA tarafından başlatılan insanlı Ay yolculuğu programı olan Apollo da modern proje yönetimi tekniklerinin yaygınlaşmasında önemli bir program olarak gösterilmektedir. NASA tarafından programın yürütülmesi için yayımlanan Apollo Programı Geliştirme Planı'nda, bu programın nasıl yürütüleceği, değişiklik yönetiminin nasıl yapılacağı gibi detaylı bilgiler yer almaktaydı. Planlama, veri yönetimi, konfigürasyon yönetimi, satın alma, lojistik faaliyetler, tesisler, fonlamalar, iş gücü, sistem mühendisliği gibi alanlarda ilgili prosedürler belirlenmekteydi. Teknik belirsizliklerin kritik derecede yüksek olduğu Apollo Programı, yaklaşık 25,4 milyar dolarlık bir harcama ile büyük bir başarı elde etmiş bir proje olarak tanımlanmaktadır; ancak planlanan bitiş tarihini ve bütçesini fazlasıyla aşmış bir program olarak proje başarısı noktasında bazı soru işaretlerine sebep olmuştur. Sonraki dönemlerde kalite gereksinimlerini karşılayacak şekilde proje zamanı ve maliyetlere uyumun büyük önem arz etmesi bekleniyordu (Morris, 1994, s. 57-58). 1969 yılında Martin Barnes zaman, maliyet ve kalite boyutlarından oluşan Demir Üçgen (Iron Triangle) yaklaşımını tanıtarak zaman ve maliyetinin yanı sıra proje yönetiminde kalite gereksinimlerinin de önemini vurgulamıştır (Vahidi & Greenwood, 2009'da atıfta bulunduğu gibi). Ayrıca, 1969 yılında, bir grup Amerikalı proje yöneticisi, bir araya gelerek modern proje yönetimini geliştirmek ve yaygınlaştırmak amacıyla Proje Yönetimi Enstitüsü'nü (PMI: Project Management Institute) kurmuştur (Morris, 1994, s. 82).

2.1.3 1970'ler: Petrol krizi ve mega projeler, organizasyonel yapılanma

1970'li yıllar, 1960'li yıllarda misyon odaklı birkaç mega projenin yapıldığı veya daha önceki dönemlerde proje yönetimi anlamında yaşanan gelişmelerden çok farklı geçmiştir. Mega projelerin yapılmaya devam ettiği bu yıllarda, proje yönetimi daha yaygın bir yönetim uygulaması haline gelmiştir. Özellikle inşaat sektöründeki proje bazlı organizasyonlarda proje yöneticileri çalıştırılmış ve proje yönetimi tekniklerinin kullanımı artmıştır. Bu gelişmenin yaşanmasının en önemli sebeplerinden biri 1973

yılında yaşanan petrol krizi olarak belirtilmektedir. Petrol fiyatlarındaki büyük artış, petrol, gaz ve petrokimya sektöründe üretim ve rafinaj faaliyetlerini artırmış ve yeni tesislere ihtiyaç duyulmuştur. Bunun yanında, enerji ekonomisindeki bu krizle yeni nesil enerji santralleri inşa edilmeye başlanmıştır (Morris, 1994, s. 89). Trans Alaska Boru Hattı Sistemi Projesi (TAPS: The Trans Alaska Pipeline System), bu dönemin en önemli projelerinden biri olarak gösterilmektedir. ABD’de Prudhoe Körfezi ile Valdez Limanı’nı bağlayan petrol taşıma hattı kurulması amacıyla başlatılan bu proje, çevresel ve regülatif sorunların yanı sıra organizasyonel yönetimde de yeni ihtiyaçlar doğurmuştur (Morris, 1994, s. 98). TAPS Projesi, bu ihtiyaca karşılık organizasyonlarda karmaşık çok katmanlı hibrit matris yapının benimsenmesi açısından bir ilk olmuş ve proje yönetiminde organizasyonel yapılanmanın önemini ortaya koymuştur (Morris, 1994, s. 104). Bu dönemde yapılan projeler incelendiğinde, proje yönetimi performansını düşüren bazı faktörler şu şekilde belirtilmiştir (Morris, 1994, s. 89-141):

- Teknik karmaşıklık (teknolojinin yetersizliği, uygulama zorluğu, vb.)
- İnsan kaynağı faktörü (Kültürel ve yetkinlik anlamında karmaşıklık),
- AR-GE projelerinin ticarileştirme zorluğu,
- Üretim, geliştirme ve test süreçlerinde çakışmalar (eşzamanlı yönetim),
- Finansal güçlükler,
- Uzun proje süreleri/Proje zaman planlarındaki sapmalar
- Organizasyonel yönetim,
- Proje yönetimi araç ve tekniklerinin profesyonel kullanımı,
- Ekonomik zorluklar,
- Çevresel faktörler,
- Politik kararlar

Bu dönemde yapılan akademik çalışmalar arasında Winston W. Royce (1970) tarafından büyük yazılım sistemlerinin geliştirme sürecinin yönetimine dair bir makale yayımlanmıştır. Bu makalede Şelale (Waterfall) yöntemi bir terim olarak yer almasa da bu yöntemin temellerini açıklayan geliştirme sürecinin fazları vurgulanmıştır. Şelale yönteminde, proje aşamalarının bir şelale gibi aşağı doğru ilerlediği, her aşamanın ancak bir önceki aşama tamamlandıktan sonra başladığı, geliştirme sürecine doğrusal ve sistematik bir yaklaşım vurgulanmaktadır. Şelale yöntemi konsept olarak

ilk kez 1976 yılında Bell ve Thayer tarafından yapılan bir çalışmada kullanılmıştır (Casteren, 2017'de atıfta bulunulduğu gibi).

2.1.4 1980'ler: Proje yönetiminde stratejik gelişmeler ve proje başarısı

1980'li yıllarda, profesyonel sertifikasyon ve ABD'de başlayan lisans programları ile proje yönetimi, gelişmiş bir yönetim disiplini haline gelmeye başlamıştır. Savunma sanayi, nükleer enerji, bilgi teknolojileri ve AR-GE projeleri gibi birçok zor projenin teknik karmaşıklığının yönetimine ek olarak dış faktörlerin yönetimi noktasında da gelişmeler önem kazanmıştır (Morris, 1994, s.150). Bu dönemde, kalite güvencenin projelere entegre edilmesi, konfigürasyon yönetimi, değer mühendisliği gibi mühendislik yönetimi disiplinlerine de katkı sağlamıştır. Japonya'da ortaya çıkıp Batı'ya yayılacak olan Toplam Kalite Yönetimi'nin de gelişimini sağlamıştır. Ekonomik zorlukların devam ettiği bu dönemde, az gelişmiş ülkelerin borçlanmaları yüksek seviyelere ulaşmış, faiz oranları ve dolar artmıştır. Bu yıllarda, inşaat projelerinin hacmi ve dolayısıyla uluslararası iş hacminde ciddi bir düşüş yaşanmıştır. Bu olumsuzluklar altyapı ve enerji sektöründe yapılan projelerin yönetim sistematığında yap-sahip ol-işlet-devret modelinin ortaya çıkışını sağlamıştır. Bu model ilk kez Türkiye'de dönemin Başbakanı olan Turgut Özal tarafından Akkuyu Nükleer Enerji Santrali Projesi ile kullanılmaya başlamıştır. Bu yöntem ile projelere yabancı yatırımcı bulunabilecek ve özel sektörün dahiliyeti ile de verimliliğin artırılacağı düşünülmüştür. Ancak bu yöntem beklenen başarıyı elde edememiştir. Bunun en büyük sebepleri; kamu-özel sektör arasındaki ilişkilerin net olarak tariflenmesi ihtiyacı, uluslararası projelerde politik ve kur farkı gibi ekonomik riskler, yüklenici tarafından hazırlanacak olan dokümantasyonun karmaşıklığı ve bürokrasiden dolayı artan proje başlatma süreleri olarak belirtilmiştir. Bu modelin istenilen etkiyi yaratmamış olmasına rağmen, ilerleyen dönemlerde özel sektör finansmanı ve ön yüklenici katılımının getireceği faydalara olan ilgiyi artırmıştır. (Morris, 1994, s. 177).

1980'lerin ikinci yarısına gelindiğinde proje başarısı konusuna büyük bir önem verilmeye başlanmıştır. Planlanan proje süresine ve bütçesine uyum bir başarı kriteri olarak görülürken bu dönemde daha stratejik düzeyde, projenin ticari değeri de proje başarısına dahil edilmeye başlanmıştır. Bununla birlikte, bir projenin başarı kriterlerinin doğru bir şekilde belirlenmesi ve bu başarının organizasyonel

performansa etkisi ilgi alanı olmaya başlamıştır. Bu durum, kritik başarı faktörlerinin yönetim ve bilgi sistemlerinin geliştirilmesinde bir araç olarak kullanılmasını sağlamıştır (Morris, 1994, s. 182). Ek olarak 1983 yılında PMI tarafından ilk Proje Yönetimi Bilgi Birikimi Kılavuzu (PMBOK: Project Management Body of Knowledge) yayımlanmıştır ve altı bilgi alanı tanımlanmıştır: (1) kapsam, (2) zaman, (3) maliyet, (4) kalite, (5) insan kaynağı, (6) iletişim yönetimi. 1987'deki güncellemelerle kılavuza (7) risk ve (8) sözleşme/tedarik yönetimi alanları eklenmiştir (Morris, 2011'de atıfta bulunulduğu gibi).

Sonuç olarak bu dönemde proje yönetiminde, teknolojinin nasıl daha iyi yönetileceğinin öğrenilmesi, yalın üretim ve Toplam Kalite Yönetimi yaklaşımlarının ortaya çıkışı, ortaklık ve ekip çalışmasının öneminin artması, risk yönetiminin ayrı bir proje yönetimi disiplini haline gelmesi, bilgisayar tabanlı proje yönetimi tekniklerinin çoğunun etkin bir şekilde kullanılmasını, proje başarısının ölçümlemesine yönelik artan ilgi, PMI gibi proje yönetimi topluluklarının gelişimi, lisans programlarının başlatılması gibi önemli gelişmeler yaşanmıştır (Morris, 1994, s. 215).

2.1.5 1990'lar: Bilgi teknolojilerindeki gelişmeler, yeni yöntemler

Bilgi ve İletişim Teknolojileri projeleri, 1990'lı yıllardan itibaren proje yönetiminin yaygınlaştırılmasında ciddi bir etki yaratmıştır. Özellikle kişisel bilgisayarlar ve internetin yaygınlaşması ile Microsoft'un MS Project proje yönetimi uygulamasını piyasaya sürmesi proje yönetimine ciddi bir katkı sunmuştur. Aynı zamanda MS Excel, CAD ve 4D simülasyon sistemlerinin geliştirilmesi, proje verimliliğine önemli ölçüde katkı sunmuştur (Morris, 2011). Ek olarak, PMI tarafından yayımlanan PMBOK'ın 1996 versiyonuna, entegrasyon yönetimi dokuzuncu bilgi alanı olarak eklenmiştir (PMI, 1996). Bu dönemde birçok akademik çalışma da yapılmıştır. 1997 yılında, Eliyahu M. Goldratt tarafından yayımlanan Kritik Zincir kitabında, Kritik Zincir Proje Yönetimi (CCPM: Critical Chain Project Management) yaklaşımı tanıtılmıştır (Thakkar, 2022'de atıfta bulunulduğu gibi). Bu yöntem yine Eliyahu M. Goldratt tarafından 1984 yılında ortaya çıkarılan Kısıtlar Teorisine dayanmaktadır (Morris, 2011; Thakkar, 2022'de atıfta bulunulduğu gibi). Kritik Zincir Yöntemi, kaynakların (insan, ekipman, vb.) eş zamanlı olarak kullanıldığı bir projede veya çoklu projeler için uygulanmaktadır. Temel amaç, proje zaman planını geliştirerek projenin

tamamlanma süresini düşürmek ve kaynakları verimli bir şekilde kullanmak olarak özetlenebilir (Thakkar, 2022).

1990’larda dikkat çeken bir konu ise önceki dönemde proje yönetiminde yaşanan gelişmelere rağmen, bu dönemlerde farklı sektörlerde yapılan mega projelerin yüksek başarısızlık oranları olmuştur (Morris, 1994, s. 215). Proje başarısı çok geniş bir kavram olarak tanımlanmaktadır (Luo vd., 2017). Dolayısıyla, projenin başarılı bir şekilde tamamlanması için öncelikle projenin doğru tanımlanması, sonrasında hedeflerin, gereksinimlerin, teknolojik ihtiyacın ve stratejik planlamaların doğru bir şekilde yapılmasının gerekli olduğu belirtilmiştir (Morris, 1994, s. 218). Bu noktada, projenin başarı kriterlerinin belirlenmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bu kriterlerin belirlenmesi için de proje başarısızlığına sebep olan faktörler yol gösterici olabilmektedir. Proje yönetiminin tarihsel gelişiminde incelenen büyük mühendislik projelerine bakıldığında, teknik karmaşıklık, ekonomik ortamının karmaşıklığı, organizasyonel yapılanmadan doğan karmaşıklık gibi faktörlerin projenin zaman ve maliyet planında ciddi sapmalar yarattığı belirtilmiştir. Dolayısıyla karmaşıklığın, özellikle büyük mühendislik projelerinin başarısını etkilediği görülmektedir. Baccarini (1996) yaptığı çalışmada, proje bazlı organizasyonların, karmaşıklık yönetimi ile ilişkili olduğunu vurgulamıştır.

2.1.6 2000 - Günümüz: Teknolojik gelişmeler, çeviklik, belirsizlik

Proje yönetimi yazılımlarının gelişimi teknolojik gelişmelerin hızlanması ile 2000’li yılların başında büyük bir ivme kazanmıştır. Kurumsal Kaynak Planlama (ERP: Enterprise Resource Planning) yazılımlarında proje yönetimi modülleri geliştirilmiştir. Hizmet olarak yazılım (SaaS: Service as a Software) konsepti ile web tabanlı proje yönetimi araçlarına yönelme olmuştur (Morris, 2011). Çevik proje yönetimi yaklaşımı da 2000’li yılların başında 17 yazılımcının Çevik Manifesto dokümanını yayımlaması ile yazılım projeleri için proje yönetimi literatürüne girmeye başlamıştır. Geleneksel şelale yöntemindeki katı ve uzun süreli planlama süreçlerini içeren yönetim modeli, çevik yaklaşımda değişen müşteri ihtiyaçlarına ve teknolojik ortama daha hızlı cevap verebilmek adına daha esnek bir yapı haline getirilmesi zorunluluğu vurgulanmıştır. Müşteri geri bildirimlerine ve katılımına göre sürekli geliştirme ve iyileştirmeler ile müşteri memnuniyetinin artırılması amaçlanmıştır. Bu manifestoda, insan faktörü ve çalışan motivasyonunun önemine de değinilmiştir (Fowler & Highsmith, 2001).

1970’li yıllarda ortaya çıkan Demir Üçgen yaklaşımı da kırılmaya başlamıştır (Morris, 2011). 2010’lu yıllarda ise çevik ve şelale yaklaşımının birleşimi ile oluşan hibrit yaklaşım tartışılmaya başlamıştır. 2017 yılında yayımlanan PMBOK’ın altıncı versiyonunda da çevik yaklaşım ilk kez içerikte yer almıştır (PMI, 2021). 2020 - 2022 yılları arasında küresel bir salgın olarak tüm iş yaşamını etkileyen Covid-19 ile uzaktan çalışmada önemli bir artışın olması sebebiyle proje yönetiminde de dijital araç ve tekniklerin benimsenmesi hızlanmıştır.

Bu dönemde projelerin karakteristiklerine göre sınıflandırılması tartışma konusu haline gelmiştir. Proje yönetiminin, proje türlerine veya büyüklüklerine göre organizasyonların farklı düzeylerinde farklı yürütüldüğüne dair farkındalık artmıştır. Projelerin çıktılarla, programların ise sonuçlarla ilgilendiği yaklaşımı benimsenmeye başlamıştır. Ayrıca portföy yönetimi ile projelerin stratejik hedeflerle olan ilişkisi ve stratejik önemi de vurgulanmıştır (PMI, 2021). Yapay zeka ve makine öğrenmesindeki gelişmeler, analizler, kaynak optimizasyonu, zaman planlamaları, risk değerlendirmesi gibi faaliyetlerin yazılımlara entegre edilmesine ve karar destek sistemlerinin gelişimine katkı sunmuştur. Organizasyondaki yönetim mekanizmaları üzerine bu dönemde çokça çalışma yapılmıştır. Proje yönetimi olgunluğu modellerine ilgi artmıştır. Carnegie-Mellon'un Yazılım Mühendisliği Enstitüsü'nün Yetenek Olgunluk Modeli olan ilk ürünü OPM3, proje yönetimi topluluklarının yönetim kabiliyetleri üzerine çalışmalarını şekillendirmiştir (Morris, 2011). Bu dönemde yapılan çalışmaların sonucunda aşağıdaki temaların önemi vurgulanmıştır (Morris, 2011):

- Projelerin ve proje yönetiminin karmaşıklığı,
- Çalışanlar arasındaki sosyal etkileşim,
- Değer yaratma,
- Projelerin multidisipliner, birden fazla amacı olan girişimler olması,
- Teori, tecrübe ve sezgisel yaklaşımları pratikte uygulayarak karmaşık proje ortamlarına uyum sağlayabilecek uygulayıcıların geliştirilmesi.

PMBOK’ın yedinci versiyonunda da (2021) bir önceki versiyonlardan farklı olarak değer yaratma teması öne çıkmaktadır. Bu versiyonda, doğaları gereği kuralcı olan süreç tabanlı yönelimden, proje değerini ortaya çıkaran, çıktıdan ziyade amaçlanan sonuçlara odaklanan ilkelere dayalı bir yaklaşım sunulmuştur. 1987 yılından beri süre gelen bilgi alanları teması, güncel versiyonda sekiz proje performansı alanı olarak

değiştirilmiştir: (i) paydaşlar, (ii) takım, (iii) geliştirme yaklaşımı ve yaşam döngüsü, (iv) planlama, (v) proje çalışması, (vi) teslim, (vii) ölçümleme, (viii) belirsizlik.

PMBOK7’de de bir performans alanı olarak tanımlanan belirsizlik, bir projenin doğasında olan ve öngörüleemeyen sonuçlara sahip dinamik sistemlerle ilişkili karmaşıklık olarak tariflenmektedir (PMI, 2021). Karmaşıklığın yönetilmesi ise PMBOK7’de yer alan Proje Yönetimi İlkeleri’nden biridir. Yaşam döngüsü boyunca projelerin başarılı bir şekilde yürütmesi için sürekli olarak proje karmaşıklığının değerlendirilmesi ve yönetilmesi gerektiği belirtilmektedir.

2.2 Proje Karmaşıklığının Tanımı

Proje yönetiminin tarihsel gelişimine bakıldığında, büyük ölçekli birçok projenin farklı belirsizlik ve değişkenlik gösteren ortamlarda yapıldığı ve bu belirsizliği yönetmenin proje başarısı için ne kadar önemli olduğu görülmektedir. Günümüzdeki VUCA [Değişkenlik (Volatility), Belirsizlik (Uncertainty), Complexity (Karmaşıklık) ve Muğlaklık (Ambiguity)] ortamında ise bu konunun kritikliği yadsınamayacak derece önemli hale gelmiştir. Teknolojik gelişmelerin arttığı, ekonomik ve sosyal bağımlılıklarla küreselleşmenin hızlandığı, politik ve ekonomik istikrarsızlıkların yaşandığı ve rekabetçiliğin arttığı bu dönemde, projelerin yönetimi ve başarılı bir şekilde tamamlanması zorlaşmıştır. Bu noktada, proje başarısızlıklarına sebep olan faktörlerin tespit edilmesi ve ilgili önlemlerin alınması bir gereklilik haline gelmiştir. Luo vd. tarafından yapılan bir çalışmada (2017), proje karmaşıklığının göz ardı edilmesi, proje başarısızlığının bir nedeni olarak gösterilmiştir. Proje karmaşıklığının yönetilmesi, modern proje yönetiminde bir başarı faktörü olarak gösterilmektedir (Jaber vd., 2021). Dolayısıyla proje karmaşıklığı, proje yönetimi literatüründe giderek artan bir ilgi alanı haline gelmiştir.

Karmaşıklık, proje sistemi içinde belirli düzeyde bir bilgi olsa dahi, genel davranışı anlamayı ve kontrol etmeyi zorlaştıran bir özellik olarak tanımlanmaktadır (Vidal & Marle, 2008) ve ek yönetimsel zorluklar çıkarmaktadır (Dao vd., 2022). Bu nedenle proje karmaşıklığı; proje organizasyon yapısının seçimini, proje girdilerinin seçimini ve zaman, maliyet ve kalite hedeflerini etkilemektedir (Jaber vd., 2021). Ancak, proje uzmanları veya ekipleri, proje karmaşıklığına dair sezgisel bir algıya sahiptir ve bu karmaşıklık, proje ekibinin deneyimleri, kaynak mevcudiyeti, paydaşlar gibi birçok

faktöre bağı olabilmektedir (Dao vd., 2022). Dolayısıyla proje karmaşıklığının anlaşılması ve tanımlanması, bu karmaşıklığın yönetilebilmesi için kritik bir husustur.

Karmaşıklık projenin doğasında olan bir özellik olarak belirtilmektedir (Baccarini, 1996; Mamédio & Meyer, 2020; PMI, 2021). Ancak bu karmaşıklığı tanımlamak zordur (Luo vd., 2017). Baccarini (1996) proje karmaşıklığını, birbiriyle ilişkili (bağımlılık) çeşitli birçok parçadan oluşan (farklılaşma) bir karakteristik olarak tanımlamıştır ve bu karmaşıklığın organizasyonel ve teknolojik faktörlerden kaynaklandığını belirtmiştir. Williams'ın (1999) yaptığı çalışmada karmaşıklığın birbirine bağımlı bileşenlerin sayısından (yapısal karmaşıklık) ve hedef ve araçlardaki belirsizlikten (belirsizlik) kaynaklandığı vurgulanmıştır. Ribbers ve Schoo (2002) tarafından yapılan çalışmada ise, çeşitlilik, entegrasyon ve değişkenlik (dinamiklik) yazılım projelerinin karmaşıklığının ölçütü olarak kullanılmıştır. Williams tarafından yapılan bir diğer çalışmada (2005), yapısal karmaşıklığa ve belirsizliğe ek olarak zaman kısıdından kaynaklanan hız, karmaşıklık faktörleri arasında yer almıştır. Geraldi vd. (2011) yaptığı çalışmada, yapısal karmaşıklık, belirsizlik, dinamiklik ve hız faktörlerinin yanında, sosyo-politik karmaşıklığa da yer vermiştir. Bosch-Rekvelt vd. (2011) ise proje karmaşıklığı için teknolojik, organizasyonel ve çevresel (TOE: Technological, Organizational, Environmental) faktörlerden oluşan yeni bir çerçeve geliştirmiştir. İnşaat projelerinin karmaşıklığı üzerine birçok çalışma yapmış olan Luo vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada, TOE'ye ek olarak amaç, görev ve bilgi karmaşıklığı faktörlerini de kullanarak bir karmaşıklık tanımı oluşturmuştur.

İncelenen literatürde; proje karmaşıklığının belirsizlik, değişkenlik, çeşitlilik ve büyüklük çerçevesinde; organizasyonel yapılanma, teknolojinin olgunluğu, projede insan kaynağı yapısı, çevresel faktörler, paydaşlar, proje kapsamı, amacı ve hedefleri, proje karakteristiği gibi alanlarda ortaya çıktığı görülmektedir. Dolayısıyla, karmaşıklığa sebep olan faktörler; politik, ekonomik, teknolojik gibi faktörlerden oluşan makro çevreden; paydaşlar, müşteriler, tedarikçiler, rekabet ortamı gibi faktörlerden oluşan görev çevresinden; organizasyonel bazı faktörlerden ve proje dinamiklerinden oluşmaktadır (G. Gönen & Soyer, 2020).

Yapılan literatür taramasında, karmaşıklığa sebep olan faktörleri tanımlayan 32 akademik çalışma Çizelge 2.1'de özetlenmiştir.

Çizelge 2.1: Proje karmaşıklığı üzerine yapılan çalışmalar.

Kaynak	Proje Türü	Karmaşıklık Tanımı	Karmaşıklık Türü/Kategorisi
Baccarini (1996)	Genel	Projedeki birbiriyle ilişkili çeşitli birçok parçadan (bağımlılık ve farklılaşmadan) kaynaklanan proje özelliği	Organizasyonel Karmaşıklık, Teknolojik Karmaşıklık
Williams (1999)	Genel	Projedeki bileşenlerin sayısı ve bağımlılığı ile hedef ve araçlardaki belirsizlikten kaynaklanan proje özelliği	Yapısal Karmaşıklık, Belirsizlik
Ribbers & Schoo (2002)	Yazılım Projeleri	Projedeki bileşenlerin sayısı ve birbiriyle ilişkisi, çeşitliliği ve dinamikliğinden kaynaklanan proje özelliği	Çeşitlilik, Değişkenlik, Entegrasyon
Williams (2005)	Genel	Projedeki bileşenlerin sayısı veya büyüklüğü ve bağımlılıkları, belirsizlik ve zaman baskısından kaynaklanan proje özelliği	Yapısal Karmaşıklık, Belirsizlik, Hız
Vidal vd. (2011); Vidal & Marle (2008)	Proje Sistemi	Genel davranışı anlamayı, öngörmeyi ve kontrol altında tutmayı zorlaştıran bir proje özelliği	Kapsam Bağımlılığı, Proje Sistemi Büyüklüğü, Proje Sistemi Çeşitliliği, Proje Sistemi İçindeki Bağımlılık
Maylor vd. (2008).	Genel	Projedeki yapısal ve dinamik bileşenlerin etkileşimi, yapısal elementlerin dinamikliğinden kaynaklanan proje özelliği	Proje Ekibi, Misyona, Organizasyon, Paydaşlar, Teslim
Yang & Ji (2010)	AR-GE Projeleri	Projedeki çeşitli bileşenlerin sayısı ve niteliğinden ve bunların karşılıklı bağımlılığından kaynaklanan proje özelliği	Teknolojik Karmaşıklık, Çevresel Karmaşıklık, İlişkisel Karmaşıklık, Yapısal Karmaşıklık, Kapsam Karmaşıklığı
Geraldi vd. (2011)	Genel	Projedeki doğrusal olmama ve dinamiklik durumu	Yapısal Karmaşıklık, Belirsizlik, Dinamiklik, Hız, Sosyo-Politik Karmaşıklık
Bosch-Rekvelde vd. (2011, 2018)	Farklı Endüstrilerdeki Büyük Teknik Projeler	Projedeki yapısal ve dinamik bileşenler ile bu bileşenlerin etkileşiminden doğan proje özelliği	Teknolojik Karmaşıklık, Organizasyonel Karmaşıklık, Çevresel Karmaşıklık
Chronéer & Bergquist (2012)	AR-GE Projeleri	Projede ürün geliştirme ve süreç geliştirmenin birbirine bağlı olmasından kaynaklanan bir özellik	Müşteriler, Tedarikçiler, Üretim, Ürün
Senescu vd. (2013)	Mimarlık, Mühendislik ve İnşaat Projeleri	Çeşitlilik, nedensel ilişki, bağımlılık, açıklık, sinerji ve doğrusal olmamadan kaynaklanan proje özelliği	Organizasyonel Karmaşıklık, Süreç Karmaşıklığı, Ürün Karmaşıklığı

Çizelge 2.1 (devam): Proje karmaşıklığı üzerine yapılan çalışmalar.

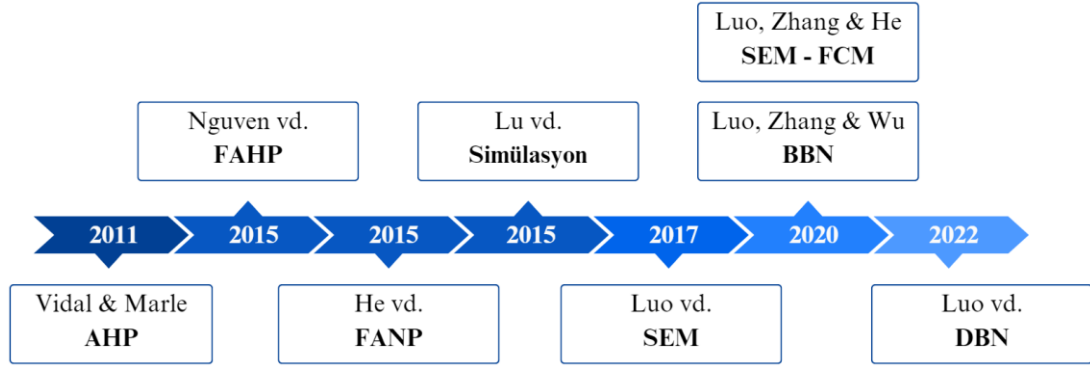
Kaynak	Proje Türü	Karmaşıklık Tanımı	Karmaşıklık Türü/Kategorisi
PMI, (2014)	Genel	İstikrarsızlık ve belirsizlikten kaynaklanan proje özelliği	Anlam Karmaşası/Muğlaklığı, İnsan Davranışı, Sistem Davranışı
Lu vd. (2015)	İnşaat Projeleri	Birbiriyle ilişkili çeşitli birçok parçadan kaynaklanan ve doğrusal olmama, yüksek dinamiklik ve aniden gelişme niteliklerine sahip bir proje karakteristiği	Görev Karmaşıklığı, Organizasyonel Karmaşıklık
He vd. (2015)	İnşaat Projeleri	Proje ortamını tanımlayan birbiriyle bağlantılı birçok parçanın bir araya gelmesinden oluşan proje özelliği	Amaç Karmaşıklığı, Bilgi Karmaşıklığı, Çevresel Karmaşıklık, Kültürel Karmaşıklık, Organizasyonel Karmaşıklık, Teknolojik Karmaşıklık
Nguyen vd. (2015)	Ulaştırma Projeleri	Projedeki birbiriyle etkileşim halinde bulunan ve hiyerarşik bir yapısı olan birçok bileşenden kaynaklanan proje özelliği	Sosyo-Politik Karmaşıklık, Çevresel Karmaşıklık, Organizasyonel Karmaşıklık, Altyapısal Karmaşıklık, Teknolojik Karmaşıklık, Kapsam Karmaşıklığı
Bakhshi vd. (2016)	Mühendislik Projeleri, IT, Endüstriyel Projeler	Belirsizlik, karşılıklı bağımlılık, doğrusal olmama, benzersiz yerel koşullar, özerklik, aniden ortaya çıkan davranışlar ve sabit olmayan sınırlardan oluşma özelliği	Bağılantılılık, Aidiyet, Proje Büyüklüğü, Çeşitlilik, Aniden Oluşma (Belirsizlik), Proje Kapsamı, Özerklik
Dao vd. (2017, 2022)	Genel	Etkili bir şekilde yönetilmediğinde proje çıktılarında negatif bir etki yaratan faktörlerden kaynaklanan proje özelliği	Paydaş Yönetimi, Yönetişim, Mali Planlama, Kalite Yönetimi; Yasal Yükümlülükler, Arayüzler; Uygulama Hedefleri, Tasarım ve Teknoloji, Konum, Kapsam Tanımı, Proje Kaynakları
Luo vd. (2017, 2022); Luo, Zhang, & He (2020); Luo, Zhang, & Wu (2020).	İnşaat Projeleri	Yapısal, dinamik ve belirsizlik özelliklerine sahip ve birbiriyle etkileşim halinde olan çok sayıda parçadan kaynaklanan proje özelliği	Amaç Karmaşıklığı, Bilgi Karmaşıklığı, Çevresel Karmaşıklık, Görev Karmaşıklığı, Organizasyonel Karmaşıklık, Teknolojik Karmaşıklık,
Jarkas (2017)	İnşaat Projeleri	Projede bileşenleri arasında yüksek derecede karşılıklı bağımlılık	Organizasyonel Karmaşıklık, Belirsizlik, İçsel Karmaşıklık, Çakışan Faaliyetler, İşlem Sayısı, Katı Sıralama

Çizelge 2.1 (devam): Proje karmaşıklığı üzerine yapılan çalışmalar.

Kaynak	Proje Türü	Karmaşıklık Tanımı	Karmaşıklık Türü/Kategorisi
Ahn vd. (2017)	Büyük Ölçekli Mühendislik Projeleri	Birbiriyle ilişkili parçaların, süreçlerin, sistemlerin, teknolojilerin tarafların çokluğu	Organizasyonel Karmaşıklık, Teknik Karmaşıklık, Zaman ve Bütçenin Katılığı
Poveda-Bautista vd. (2018)	IT Projeleri	Birbiriyle ilişkili bileşenlerin sayısı ve birbirine bağımlılığı ile hedef ve yöntemlerdeki belirsizlik.	Amaçlar, Gereksinimler ve Beklentiler; İlgili Taraflar, Entegrasyon; Kültürel ve Sosyal Kapsam; İnovasyon Derecesi; Proje Yapısı (Koordinasyon Talebi); Proje Organizasyonu; Liderlik, Takım Çalışması, Kararlar; Kaynaklar (Mali vb.); Riskler ve Fırsatlar; Proje Yönetimi Metot, Araç ve Teknikleri; Teknoloji
Molepo vd. (2019)	AR-GE Projeleri	Birbiriyle etkileşim içinde ve bağlantılı çeşitli bileşenlerin sayısı (multidisiplinerlik)	Teknolojik Karmaşıklık, Pazarlama Karmaşıklığı, Organizasyonel Yapı ve Çevresel Karmaşıklık, Organizasyon İçi Karmaşıklık, Teknik Karmaşıklık, Geliştirme Karmaşıklığı, Belirsizlik, Dinamik Karmaşıklık, Zamansal Karmaşıklık
Kermanshachi vd. (2020)	Ağır Endüstriyel Projeler	Proje bileşenleri ve ara yüzlerinin sayısının bir ölçümü	Paydaş Yönetimi, Yönetişim; Mali Planlama, Kalite Yönetimi, Yasal Yükümlülükler, Arayüzler Uygulama Hedefleri, Tasarım ve Teknoloji, Konum, Kapsam Tanımı, Proje Kaynakları
G. Gönen & Soyer (2020)	Genel (Dijital Bankacılık Projelerinde Uygulama)	Birbirleriyle ilişki düzeyi yüksek olan çok sayıda bileşenden kaynaklanan proje özelliği	Çevresel Karmaşıklık, Operasyonel Karmaşıklık, Organizasyonel Karmaşıklık, Yönetimsel Karmaşıklık
Jaber vd. (2021)	Genel	Doğrusal olmayan etkileşimlerle birbirine bağlı çok sayıda çeşitli bileşenden kaynaklanan proje özelliği	Çevresel Faktörler, Paydaşlar, Proje Ekibi, Proje Karakteristiği, Proje Kaynakları, Proje Yönetişimi, Ürün
Qazi (2022)	Genel (İnşaat Projelerinde Uygulama)	Proje performansını etkileyen proje riskinin itici gücü	Teknolojik Karmaşıklık, Organizasyonel Karmaşıklık, Çevresel Karmaşıklık, Zaman, Maliyet, Kalite, Organizasyonel Faydalar, Paydaşların Faydaları

2.3 Proje Karmaşıklığının Ölçülmesi

Günümüzde projelerin karmaşıklığı giderek artmaktadır (Jaber vd., 2021). Bu karmaşıklık etkin bir şekilde yönetilmediğinde diğer faktörlerle birleşerek proje sonuçları üzerinde olumsuz etkilere sebep olabilmektedir (Dao vd., 2022). Karmaşıklığın yönetilmesi için ise bu karmaşıklığa sebep olan faktörlerin tanımlanması gerekmektedir. Ancak tanımlanan her faktör proje başarısı üzerinde aynı etkiye sahip değildir (Luo vd., 2017). Bu sebeple, karmaşıklık faktörlerinin proje karmaşıklığı üzerinde ne derece etkili olduğunun ölçülmesi, karmaşıklığın yönetiminde proje yöneticilerinin karar verme sürecine destek olmaktadır. Dolayısıyla, bu alanda yapılan çalışmalar bulunmaktadır. Proje karmaşıklığının ölçülmesinde kullanılan farklı yöntemler Şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1: Proje karmaşıklığının ölçülmesinde kullanılan yöntemler.

Bu yöntemlere bakıldığında, Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) ile proje karmaşıklığı faktörlerinin önem derecesinin belirlenerek karar verme sürecinin basitleştirildiği ve öznel değerlendirmelerin sayısal değerlere dönüştürüldüğü görülmektedir (Vidal & Marle, 2008). Bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci (FAHP) ile AHP’nin matematiksel yapısının kullanıldığı ve bulanık mantığın yöntemde dahil edilmesi ile de belirsizliğin daha iyi yönetildiği esnek bir model oluşturulabilmektedir (Nguyen vd., 2015). Ancak FAHP’de AHP’ye göre daha fazla uzman görüşü gerekmektedir.

Bulanık Analitik Ağ Süreci (FANP) modeli ile proje karmaşıklığı faktörlerinin arasındaki ilişkilerin modele eklenmesi ile belirsizliğin yönetilmesine olanak sağlanmaktadır (He vd., 2015). FANP’nin FAHP’ye göre veri toplama ve analiz sürecinin daha uzun olduğu ve daha karmaşık bir model olduğu belirtilmektedir.

Yapısal Eşitlik Modellemesi (SEM) yöntemi ile proje karmaşıklığı ile proje başarısı arasındaki ilişki değerlendirilebilmektedir. Bu yöntem ile modeldeki bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiler modellenmektedir (Luo vd., 2017). Ancak SEM, nedensel ilişkileri doğrulama ve doğrulayıcı faktör analizine ihtiyaç duyulan durumlarda kullanılmaktadır. Ancak proje karmaşıklığındaki değişimin proje başarısı üzerindeki etkilerini dinamik olarak analiz edememektedir ve proje karmaşıklığı dinamik özelliklere sahiptir. Bu ihtiyaca yönelik olarak SEM ile Bulanık Bilişsel Haritalama (FCM) yöntemi birlikte kullanıldığı çalışmalar bulunmaktadır. FCM, karmaşık sistemlerin modellenmesi ve nedensel ilişkilerin çıkarılması için kullanılmakta ve senaryolar üzerinden analizlerin yapılmasına olanak sağlamaktadır. Ancak modelde kullanılan faktörlerin ağırlıklandırma sürecinin uzun sürmesi ve faktör doğrulamasının olmaması sebebiyle sistemin özelliklerini yansıtamama durumu söz konusu olabilmektedir. Dolayısıyla, SEM ve FCM'nin güçlü yönleri birleştirilerek hibrit bir modeller oluşturulabilmektedir (Luo, Zhang, & He, 2020).

Bayes İnanç Ağı (BBN) yöntemi ise karmaşıklık faktörleri arasındaki nedensellik ilişkilerinin modellenmesinde kullanılabilen, belirsizliğin esnek bir şekilde yönetilmesine olanak tanıyan grafiksel bir olasılık modelidir. BBN'in FANP'den en önemli farkı, belirsizlik altında farklı senaryolar için karmaşıklık derecesinin ölçümlemesine olanak sağlamasıdır (Luo, Zhang, & Wu, 2020). Koşullu olasılık temelli bu modelde, değişkenler arasında koşullu bağımsızlık varsayımı yapılmaktadır. Ek olarak faktörler arasındaki ilişkilerin yönlendirilmiş döngüsel olmayan bir ağ yapısı vardır. Dolayısıyla geri bildirim sistemi bulunmamaktadır. Aynı zamanda BBN statik bir modeldir, ancak proje karmaşıklığı, proje süreci boyunca değişiklik gösterebilen dinamik bir yapıya sahiptir. Bu ihtiyaca yönelik olarak geliştirilen Dinamik Bayes Ağı (DBN) yönteminde, zaman serileri kullanılarak dinamik sistemler modellenebilmektedir (Luo vd., 2022). Bu yöntemde modelin tasarımı ve hesaplamaları daha karmaşık olmaktadır ve bilgi gereksinimi yüksektir.

Bu yöntemlerin kullanıldığı akademik çalışmalar ile bir simülasyon çalışması aşağıda detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

2.3.1 Analitik hiyerarşi süreci

Vidal vd. tarafından (2011) yapılan çalışmada, Delphi yöntemi kullanarak sistem bakış açısı ile kapsam bağımlılığı, proje büyüklüğü, proje çeşitliliği, proje sistemi içindeki

bağımlılık olmak üzere dört kategori altında toplam 17 karmaşıklık faktörü belirlenmiştir. Sonrasında, çok kriterli karar verme tekniği olan Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) metodu kullanılarak proje karmaşıklığı faktörlerinin önem değerleri belirlenmiştir. AHP’de birinci seviye kriterler, dört karmaşıklık kategorisi olarak seçilmiştir. İkinci seviyede ise belirlenen 17 karmaşıklık faktörü yer almıştır. Kurulan model, müzik sektöründe faaliyet gösteren yeni bir firmanın yedi proje üzerisi üzerinden vaka çalışması olarak test edilmiştir. Vaka çalışması sonucunda, kurulan modelde bağımlılık kategorisi altında yer alan “gereksinim bağımlılıkları” faktörü en yüksek ağırlığı almıştır. İkinci sırada ise proje büyüklüğü kategorisinde yer alan “paydaşların sayısı” faktörü en önemli karmaşıklık faktörlerinden biri olarak çıkmıştır. Vaka çalışmasının yapıldığı firmanın yeni bir firma olması ve sektörü gereğiyle proje yönetim olgunluğu düşük bir firma olması sebebiyle bazı ikili karşılaştırmalar yapılırken zorluklar yaşandığı belirtilmiştir. Bunun sonucunda teorik olarak bulanık mantığın modele dahil edilebileceği ve modelin proje yönetimi alanında daha fazla deneyime sahip olan başka bir firmada/sektörde yapılmasının daha uygun olabileceği tespit edilmiştir. Ek olarak, proje karmaşıklığı faktörleri arasındaki ilişkilerin modele dahil edilerek Analitik Ağ Süreci (ANP) metodunun kullanılması ile modelin geliştirilebileceği ifade edilmiştir. Bunun sebebi, faktörler arası etkileşimlerin modele dahil edilmesi ile oluşturulan ANP modelinin AHP’ye göre daha gerçekçi ve güvenilir sonuçlar üretmesi olarak belirtilmiştir.

2.3.2 Bulanık analitik hiyerarşi süreci

Nguyen vd. tarafından (2015) yapılan çalışmada, ulaştırma projelerinin karmaşıklığının ölçülmesinde, yine çok kriterli karar verme metodu olan Bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci (FAHP) kullanılmıştır. AHP’deki ikili karşılaştırmaların hatalı olma durumu ve çalışmaya katılanların kararlarındaki belirsizliği gidermek için bulanık mantığın modele dahil edildiği belirtilmiştir. Bu çalışma;

- Özellikle ulaştırma projeleri özelinde literatür analizi ve uzman görüşleri ile proje karmaşıklığı faktörlerinin belirlenmesi,
- Anket ve Spearman Korelasyonu ile proje karmaşıklığı faktörlerinin sıralaması,
- Proje karmaşıklığı bileşen ve parametreleri ile faktör analizinin yapılması,

- Bulanık AHP yapısının anket ve görüşmelerle oluşturulması ile bileşen ve parametrelerin ağırlıklandırılması
- Vaka çalışması ile proje karmaşıklığının ölçümlenmesi olmak üzere beş adımda gerçekleştirilmiştir.

Öncelikle literatür analizi ile belirlenen 50 karmaşıklık faktörü, uzman görüşleri ile 33 faktöre indirilmiş ve modele ek olarak üç yeni faktör eklenmiştir. Belirlenen 36 karmaşıklık faktörü üzerinden hazırlanan 5’li Likert ölçeğinin kullanıldığı anket, bu faktörlerin önem derecesinin belirlenmesi için uzmanlara gönderilmiş ve veri toplanmıştır. Veriye göre “arazi istimlak bedelleri ve tasfiyesi” ile “yüklenicinin beklenen nitelikleri” karmaşıklık faktörleri sırasıyla birinci ve ikinci önem derecesine sahip faktörler olarak çıkmıştır. Modelde ortalama karmaşıklık derecesi 5 üzerinden 3,5 ve üzeri olan 26 karmaşıklık faktörü seçilerek faktör analizi yapılmıştır. Faktör analizi sonucunda faktörler; sosyo-politik karmaşıklık, çevresel karmaşıklık, organizasyonel karmaşıklık, altyapısal karmaşıklık, teknolojik karmaşıklık ve kapsam karmaşıklığı olmak üzere altı kategoride toplanmıştır. Sonrasında yeni bir anket ile belirlenen karmaşıklık faktörlerinin ağırlıklandırılması için veri toplanmıştır. Ağırlıklandırmanın ardından bulanık AHP metodu kullanılarak ölçüm modeli geliştirilmiştir. Modelin geliştirilmesinin ardından, Vietnam’daki bir inşaat firmasında yapılan üç ulaştırma projesi üzerinden vaka çalışması ile model test edilmiştir. Bunun sonucunda, geliştirilen FAHP modelinin, proje yöneticilerinin planlama ve uygulama süreçlerinde kullanabileceği faydalı bir sayısal ölçümleme sağlayan bir araç olarak kullanılabileceği belirtilmiştir. Bu çalışmanın Vietnam’da yapılmasının ise modelin bir kısıtı olduğu belirtilmiştir.

2.3.3 Bulanık analitik ağ süreci

He vd. tarafından (2015) tarafından yapılan çalışmada ise AHP ve FAHP’den farklı olarak faktörler arası etkileşimlerin modele dahil edildiği ve daha gerçekçi sonuçların elde edildiği belirtilen Bulanık Analitik Ağ Süreci (FANP) yöntemi kullanılmıştır. Çin’deki inşaat projelerinin karmaşıklığının ölçümlenmesi için literatür analizi sonucunda; teknolojik, organizasyonel, amaç, çevresel, kültürel ve bilgi karmaşıklığı olmak üzere altı karmaşıklık kategorisi altında toplam 28 karmaşıklık faktörü belirlenmiştir. Bu kategoriler aşağıdaki şekilde açıklanmıştır:

- **Teknolojik Karmaşıklık:** Teknolojideki çeşitlilik, projelerin teknolojik süreçlere bağımlı olması, teknolojik sistemler ve çevresel faktörlerin etkileşimi, projelerde kullanılan yüksek teknolojinin riski artırması gibi hususları ifade eden dört faktör belirlenmiştir.
- **Organizasyonel Karmaşıklık:** Organizasyon yapısının, departmanlar arasındaki ve proje ekibi içerisindeki etkileşimin karmaşıklığı/iş süreçlerini etkilemesi gibi hususları ifade eden dört faktör belirlenmiştir.
- **Amaç Karmaşıklığı:** Projelerin birden fazla amaç ve hedefinin olması, proje ekibi içerisinde proje hedeflerinin farklı anlaşılması gibi hususları ifade eden altı faktör belirlenmiştir.
- **Çevresel Karmaşıklık:** Proje paydaşlarındaki çeşitlilik, her bir paydaşın tabi olduğu çevresel gereksinimlerin olması, projelerin doğa, politika, mevzuatlar gibi dış etkenlerden etkilenmesi gibi hususları ifade eden beş faktör belirlenmiştir.
- **Kültürel Karmaşıklık:** Proje büyüklüğü ve karmaşıklığının artması ile proje paydaşlarının farklı kültürel özelliklere sahip olabileceği gibi hususları ifade eden dört faktör belirlenmiştir.
- **Bilgi Karmaşıklığı:** Bilginin elde edilmesi, işlenmesi ve yayılmasındaki güçlüğü ve proje paydaşları arasındaki bilgi bağımlılıklarının proje karmaşıklığını etkilemesi gibi hususları ifade eden beş faktör belirlenmiştir.

28 karmaşıklık faktörünün belirlenmesinin ardından üçgensel bulanık sayılardan oluşan FANP modeli kurulmuştur. Kurulan modeli doğrulamak amacıyla “2010 Shangai World Expo Altyapı Projesi” üzerinden bir uygulama yapılmıştır. Uygulama kapsamında, belirlenen 28 faktörün karmaşıklığı, alanında uzman 20 yöneticinin katıldığı anket ile 5’li Likert ölçeği kullanılarak değerlendirilmiştir. Sonrasında her bir faktörün ortalaması hesaplanarak sonuçlar normalize edilmiştir. İkinci anket ile normalize değeri 0,3’ten yüksek olan 12 faktör seçilmiştir. Sonrasında, FANP’nin ağırlıkları üçgensel bulanık sayılar kullanılarak hesaplanmıştır. Her bir faktörün hesaplanan ortalama değeri ve ağırlıkları ile çarpılarak skorlar hesaplanmıştır. Sonrasında her bir karmaşıklık kategorisine ait olan faktörlerin değerleri toplanarak karmaşıklık derecesi hesaplanmıştır. Bu vaka çalışmasının sonucunda, seçilen mega altyapı projesinde farklı kültürel geçmişe sahip paydaşların fazlaca yer alması sebebi ile kültürel karmaşıklık derecesinin 3,6 ile en yüksek karmaşıklık derecesine sahip olan

kategori olduğu sonucuna varılmıştır. Kültürel karmaşıklıkla sırasıyla 3,5 ile organizasyonel ve 3,45 ile teknolojik karmaşıklık takip etmiştir. Çalışma sonunda, seçilen projenin çok karmaşık (4,0) bir proje olduğu sonucuna varılmıştır ve belirlenen her bir karmaşıklık faktörü için alınması gereken öneri aksiyonlar belirtilmiştir.

2.3.4 Hesaplamalı proje organizasyonu ve süreci ile simülasyon

Lu vd. tarafından (2015) yapılan çalışmada, görev ve organizasyonel karmaşıklıkla çerçevesinde, büyük ölçekli mühendislik projelerinin karmaşıklıkla ProjectSim simülasyon programla yardımıyla ölçümleyen bir model  nerisi sunulmuştur. Bu modelde, karmaşıklıkla etkileyen iki kategori (görev karmaşıklıkla, organizasyonel karmaşıklıkla) altında, dört alt kategori (görevin karmaşıklıkla ve sayısı, görevler arasındaki bağımlılığın karmaşıklıkla, organizasyonel üyelerin karmaşıklıkla ve sayısı, organizasyonel yapının karmaşıklıkla) belirlenmiştir. Bu dört kategorinin altında da toplam 20 karmaşıklıkla faktörü belirlenmiştir. Faktörler, Hesaplamalı Proje Organizasyonu ve Süreci (CPOP: Computational Project Organization and Process) modeli kullanılarak ProjectSim yazılımında simüle edilmiştir. Bu simülasyon modelinde gizli iş yükleri sürelerinin daha iyi tahmin edildiğil belirtilmiştir. Faktörler arası karşılıklı bağımlılıkların da dahil edildiğil bu modelde 12 hipotez oluşturulmuştur ve gerçek bir projenin verileri kullanılarak parametreler belirlenmiştir. Sonrasında programda karmaşıklıkla yapısı kurulmuş ve hipotezler üzerinden simülasyonlar yapılmıştır.  rneğil hipotezlerden biri, görevler arasındaki iletişim ilişkisi arttıkça, gizli iş yükü miktarının da artacağıdır. Simülasyon sonucunda, iletişim ilişkisinin gücündeki artışla birlikte, tüm projenin gizli iş yükünde de bir artış g zlemlendiğil sonucuna ulaşılmıştır. Bu  alışma proje karmaşıklıkla sadece görev ve organizasyonel faktörler üzerinden değlerlendirmektedir. Dış faktörlerin de modele dahil edilmesi ile modelin geliştirilebileceğil belirtilmiştir.

2.3.5 Yapısal eşitlik modellemesi

Luo vd. tarafından (2017) yapılan çalışmada, Yapısal Eşitlik Modellemesi (SEM: Structural Equation Modeling) yöntemi kullanılarak inşaat projelerinin karmaşıklıkla ile proje başarısı arasındaki ilişkiyi ölçen bir model geliştirilmiştir. SEM tekniğil, istatistiksel bir analiz yöntemidir ve birçok bağımlı ve bağımsız değilşkenler arasındaki ilişkinin analiz edilmesinde kullanılmaktadır. Bu çalışmanın  nemi, SEM ile karmaşıklıkla faktörlerinden hangisinin ne derecede proje başarısını etkilediğilil sayısal

olarak göstermesidir. Öncelikle proje karmaşıklığının proje başarısı ile negatif ilişkisi olduğu hipotezi oluşturulmuştur. Bu hipoteze yönelik, literatür taraması ve uzman görüşmeleri ile bir anket hazırlanmış ve veri toplanmıştır. Proje karmaşıklığı; amaç karmaşıklığı, bilgi karmaşıklığı, çevresel karmaşıklık, görev karmaşıklığı, organizasyonel karmaşıklık ve teknolojik karmaşıklık olmak üzere altı kategori altında toplam 41 değişken kullanılarak tanımlanmıştır. Korelasyon ve faktör analizi sonucunda bu altı kategori altında 27 karmaşıklık faktörü belirlenmiştir. Proje başarısı ise sekiz değişken kullanılarak ölçülmüştür. Son olarak, hipotezi test etmek için SEM kullanılarak karmaşıklık faktörlerinin proje başarısı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışma sonucu, inşaat projelerinin karmaşıklığının proje başarısı üzerinde negatif etkisi olduğu hipotezi desteklemiştir. Ayrıca, bilgi karmaşıklığı ve amaç karmaşıklığı faktörlerinin proje başarısı üzerinde güçlü negatif etkisi de sonuçların önemli bulgularından biri olarak belirtilmiştir. Bosch-Rekvelt vd. (2011) tarafından yapılan çalışmada da proje karmaşıklığının proje performansını olumsuz etkilediği yönündeki tespiti, bu çalışma ile desteklenmiştir.

2.3.6 Yapısal eşitlik modellemesi - bulanık bilişsel haritalama

Luo, Zhang, & He (2020) tarafından yapılan çalışmada ise proje karmaşıklığının proje başarısına etkisinin değerlendirilmesi için SEM ve Bulanık Bilişsel Haritalama (FCM: Fuzzy Cognitive Mapping) yöntemleri bir arada kullanılarak hibrit bir model önerilmiştir. Bu çalışmada, proje karmaşıklığı faktörlerinin proje başarısı üzerindeki nedensel ilişkilerin ölçülmesi için SEM kullanılmıştır. Model analizi sürecinde ise, proje karmaşıklığının proje başarısı üzerindeki etkilerinin simüle edilmesi amacıyla FCM kullanılmıştır. Dolayısıyla, SEM'in çıktısı FCM'nin bir girdisi olmuştur. Çalışmanın sonucunda, oluşturulan SEM-FCM modelinin proje karmaşıklığının proje başarısı üzerindeki dinamik etkileşimlerini modelleyebildiği belirtilmiştir. Ayrıca bilgi, amaç ve çevresel karmaşıklığın proje başarısı üzerinde negatif bir etkiye sahip olduğu; teknolojik, görev ve organizasyonel karmaşıklığın ise proje başarısı ile pozitif ilişkili olduğu sonucunda ulaşılmıştır.

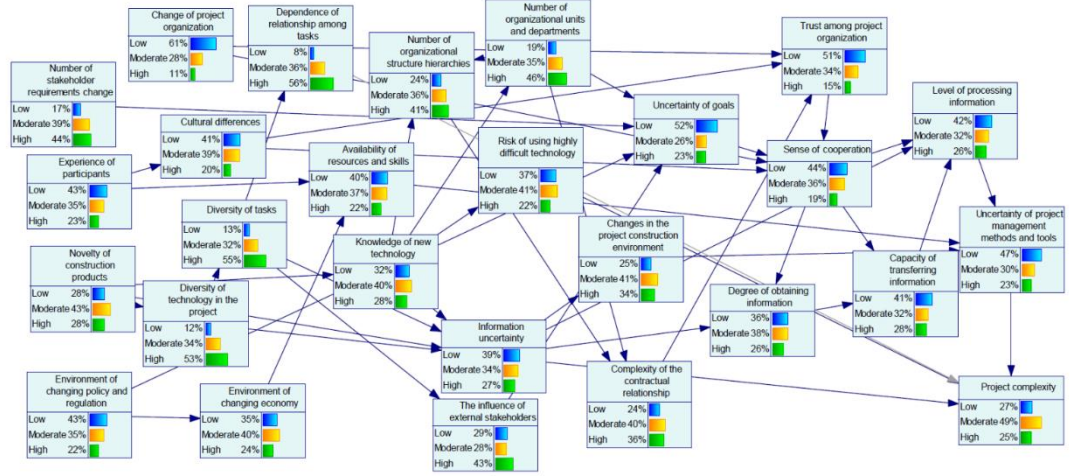
2.3.7 Bayes inanç ağı

Luo, Zhang, & Wu (2020) tarafından inşaat projeleri özelinde yapılan çalışmada, BBN yöntemi kullanılarak Proje Karmaşıklığı Ölçümleme Modeli (PCMM: Project

Complexity Measurement Model) oluşturulmuştur. Araştırma metodolojisi ve çıktıları aşağıda detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

- i. **Proje Karmaşıklık Faktörlerinin Belirlenmesi:** Bu çalışmada öncelikle, literatür araştırması ile proje karmaşıklık faktörleri belirlenmiştir ve Luo vd. (2017) tarafından belirlenen altı kategoride (amaç, bilgi, teknolojik, organizasyonel, görev, çevresel karmaşıklık) toplam 26 karmaşıklık faktörü tanımlanmıştır. Sonrasında anket yöntemi ile 5’li Likert ölçeği kullanılarak veri toplanmıştır, 5 düzeyli bir BBN yapısının çok kompleks bir model olması ve çözümü zorlaştırması sebebiyle toplanan veri modelde kullanılmak üzere 3’lü Likert ölçeğine dönüştürülmüştür.
- ii. **Karmaşıklık Modelinin Tasarımı:** Veri toplama sürecinden sonra, yapısal öğrenme ile uzman görüşü ve veri kullanılarak GeNIe yazılımında bir BBN yapısı oluşturulmuştur. BBN, olasılıksal ilişkileri grafiksel bir şekilde modellemek için kullanılan bir yöntemdir. Ağ yapısı, değişkenleri içeren düğümlerden (node) ve bu değişkenler arası ilişkileri gösteren oklardan (arc) oluşmaktadır. Bu çalışmada 26 karmaşıklık faktörü ve proje karmaşıklık değişkeni (hedef değişken), düğüm olarak belirlenmiştir. Faktörler arasındaki ilişkilerin çıkarılması için ise uzman görüşleri ve veri kullanılmıştır. Sadece veriden çıkarılan ilişkilerde, anlamsız (gerçek hayatı yansıtmayan) ilişkiler çıkabileceği için ilişkilerin belirlenmesi sürecine uzmanlar da dahil edilerek hibrit bir yöntem tercih edilmiştir. Yapısal öğrenme ile BBN yapısı oluşturulmuştur. Oluşturulan ilk model uzmanlar tarafından değerlendirilerek optimize edilmiştir ve bazı ilişkiler modelden çıkarılmıştır. İlişkilerin belirlenmesinin ardından parametrik öğrenme ile her bir faktörün koşullu olasılık tablosu elde edilmiştir. Koşullu olasılık tablosu, Bayes ağlarında kullanılan ve bir faktörün bir başka faktör üzerinde gerçekleşmesi koşuluna bağlı oluşan olasılıkları olarak tanımlanmaktadır. Oluşturulan BBN yapısı Şekil 2.2’de gösterilmiştir.
- iii. **Model Doğrulaması:** Model tasarımının ardından çapraz doğrulama ile model doğrulaması yapılmıştır. Bunun için veri seti, eğitim seti (225 veri) ve test seti (20 veri) olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Belirli faktörlere karmaşıklık düzeyi atanarak olasılıklar hesaplanmıştır. Çıkan sonuçlar gerçek karmaşıklık düzeyleri ile karşılaştırılmıştır ve doğrulama sonuçları elde edilmiştir.

Geçerliliğin %80 ve üzeri olduğu modeller etkili bir model olarak kabul edilmektedir. Bu çalışma sonucunda, 20 test verisinden 16'sı doğru tahminlenmiştir ve modelin geçerliliği %80 çıkmıştır. Bu sonuç, oluşturulan modelin analiz sürecinde kullanılabileceğini göstermiştir.



Şekil 2.2: BBN yaklaşımı ile oluşturulan Proje Karmaşıklığı Ölçümleme Modeli (Luo, Zhang, & Wu, 2020).

- Analiz:** Kurulan ve doğrulanan model üzerinde, kestirimsel analiz, diagnostik analiz, duyarlılık analizi ve etki zinciri analizi yapılmıştır. Kestirimsel analiz ile farklı senaryolar altında gelecek çıktılar tahmin edilmiştir. Öncelikle altı faktörün her biri tek tek karmaşıklık derecesi yüksek olarak tanımlandığında, teknolojik karmaşıklık faktörünün proje karmaşıklığı üzerinde %38 ile en yüksek karmaşıklık derecesine, bilgi karmaşıklığı faktörünün %33 ile ikinci en yüksek karmaşıklık derecesine sahip olduğu görülmüş ve karmaşıklık yönetiminde en çok odaklanması gereken iki faktör olarak belirlenmiştir. Diagnostik analiz sürecinde, hedef düğüm olan proje karmaşıklığının en yüksek karmaşıklık derecesi olarak tanımlandığı senaryo analizinde karmaşıklık faktörlerinin proje karmaşıklığını ne oranda etkilediği ölçülmüştür. Bu analiz sonucunda, proje karmaşıklığının artmasının sekiz faktörden kaynaklandığı tespit edilmiştir. Bu sekiz faktör farklı senaryolar altında diagnostik analize tabi tutulmuştur. Bu analizden yapılan çıkarım; proje yönetimi sürecinde dikkat edilmesi gereken karmaşıklık faktörlerinin farklı senaryolar altında değişebileceği olmuştur. Duyarlılık analizinde, proje karmaşıklığının değişimine en duyarlı olan faktörler tespit edilmiştir. Yapılan çalışmada, “çok zor teknoloji kullanmanın riski” (teknolojik karmaşıklık

kategorisi altında) en yüksek duyarlılığa sahip faktör çıkmıştır. Genel olarak teknolojik karmaşıklık, bilgi karmaşıklığı ve görev karmaşıklığı en duyarlı faktörler olarak tespit edilmiştir. Etki zinciri (influence chain) analizinde ise faktörlerin birbirini etkileme dereceleri tespit edilmiştir. Örneğin, paydaşların deneyimi, kültürel farklılıklara; kültürel farklılıklar, proje organizasyonu arasındaki güvene; güven, iş birliği duygusuna, iş birliği duygusu, bilginin elde edilmesine ve bunun da proje karmaşıklığına etkisinden oluşan etki zincirinde nedensellik ilişkisinin yüksek olduğu tespit edilmiştir.

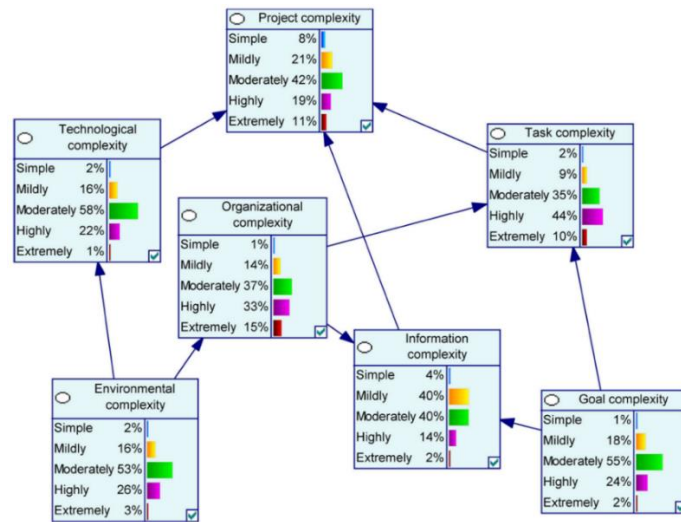
- **Uygulama:** Oluşturulan model EXPO 2010 Shanghai China proje özelinde uygulanmıştır. Uygulama sonunda, projenin karmaşıklığı yüksek çıkmıştır. Bu çalışma sonucunda, He vd. (2015) tarafından gerçekleştirilen çalışma ile tutarlı sonuçlar elde edilmiştir.
- **Sonuç:** Bu çalışma ile inşaat projelerinin karmaşıklığını, neden-sonuç ilişkilerini dikkate alarak ölçebilen bir model geliştirilmiştir. Ancak bu model inşaat projeleri özelinde toplanan bir veri ile geliştirildiği için bu modelin farklı proje türlerine uygulanması durumunda farklı analiz sonuçlarının çıkabileceği, çalışmanın kısıtı olarak belirtilmiştir.

2.3.8 Dinamik bayes ağı

Luo vd. (2022) tarafından yapılan çalışmada ise BBN modelinin geliştirilmiş bir versiyonu olarak proje karmaşıklığının zaman içerisindeki dinamikliğini ölçen bir model geliştirilmiştir. Bu çalışmada inşaat projelerinin karmaşıklığının belirsizlik altında zamansal değişimlerini ölçen bir Dinamik Bayes Ağı (DBN: Dynamic Bayesian Network) modeli geliştirilmiştir. Bayes Ağı modelleri statik modellerdir ve projenin belirli bir zamandaki karmaşıklığın ölçülmesinde bir araç olarak kullanılmaktadır. Ancak proje karmaşıklığı dinamik bir yapıya sahiptir ve genel proje karmaşıklığı veya faktörlerin karmaşıklık düzeyleri proje yaşam döngüsü boyunca değişebilmektedir. Bu gerçekten yola çıkılarak yapılan bu çalışmada, statik bir Bayes ağı üzerinden farklı senaryolar altında karmaşıklık faktörleri arasındaki zamanla değişen etkileşimleri ölçen dinamik bir modelleme yapılmıştır. Bu araştırma, yapısal öğrenme, parametrik öğrenme, model doğrulaması ve geçiş ağı tasarımı içeren model geliştirme aşaması ve kestirimsel, duyarlılık ve diagnostik analizleri içeren analiz aşamasından oluşmaktadır. Çalışma kapsamında, Luo, Zhang, & Wu (2020)

çalışmasındaki BBN modelinde yer alan altı karmaşıklık kategorisi (amaç, bilgi, teknolojik, organizasyonel, görev, çevresel karmaşıklık) altında yer alan 26 karmaşıklık faktörü kullanılmıştır. Altı karmaşıklık kategorisi ve genel proje karmaşıklığı DBN modelinde “düğüm” olarak tanımlanmıştır. Sonrasında, faktörlerin karmaşıklığı 5’li Likert ölçeği kullanılarak 255 kişi tarafından anket yöntemiyle değerlendirilmiştir (245 eğitim seti; 10 test seti). Öncelikle veri seti ve uzman görüşü ile BBN modeli kurulmuştur ve koşullu olasılık tabloları elde edilmiştir. Sonrasında 10 test veri seti kullanılarak model doğrulaması yapılmıştır. Gerçek verideki karmaşıklık ve model sonucu karşılaştırıldığında modelin doğruluğunun %80’in üzerinde olması sebebiyle model geçerliliği sağlanmıştır.

DBN modelinde proje karmaşıklığının sonsal olasılığının, zamanla tahminlenmesi beklenmektedir. Bu amaçla BBN modeli üzerine dinamik bir model kurmak için geçiş ağına (transition network) ihtiyaç duyulmaktadır (Luo vd., 2022). Bu çalışmada, t-1 anındaki proje karmaşıklığından t anındaki proje karmaşıklığına geçişin olasılık tablosu (TPT: Transition Probability Table), alanında uzman üç proje yöneticisinin görüşleri ile oluşturulmuştur. Örneğin; t-1 anındaki proje karmaşıklığı “1: Basit” ise, t anındaki proje karmaşıklığının “1: Basit” olma olasılığı %70, “2: Az Derece Karmaşık” olma olasılığı %25, “3: Orta Derece Karmaşık” olma olasılığı %3, “4: Yüksek Derece Karmaşık” olma olasılığı %1 ve “5: Son Derece Karmaşık” olma olasılığı %1 olarak belirlenmiştir. Aynı şekilde altı karmaşıklık kategorisi için bu değerlendirme yapılmış ve TPT elde edilerek DBN modeli kurulmuştur. Kurulan model Şekil 2.3’te verilmiştir.



Şekil 2.3: DBN yaklaşımı ile geliştirilen dinamik proje karmaşıklığı ölçümleme modeli (Luo vd., 2022).

Model geliştirme aşamasından sonra, kestirimsel analizler, duyarlılık analizi ve diagnostik analizler yapılmıştır. Yapılan kestirimsel analizde her bir karmaşıklık kategorisi sırasıyla t anında son derece karmaşık olarak tanımlanmıştır ve proje karmaşıklığının zamanla nasıl değiştiği gözlemlenmiştir. Bu analiz sonucunda görev karmaşıklığı ve teknolojik karmaşıklığın proje karmaşıklığı üzerinde en çok etkiye sahip oldukları tespit edilmiştir. Duyarlılık analizinde de altı karmaşıklık kategorisinin karmaşıklık derecesi sırasıyla son derece yüksek olarak tanımlanmıştır ve farklı senaryolar altında faktörlerin duyarlılığı hesaplanmıştır. Bu analiz sonucunda proje karmaşıklığının son derece yüksek (5), yüksek (4) ve orta derece yüksek (3) olması durumunda faktörlerin duyarlılıklarının değiştiği tespit edilmiştir. Tüm senaryolar genel olarak değerlendirildiğinde, görev karmaşıklığı ve teknolojik karmaşıklık faktörlerinin daha duyarlı olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan diagnostik analizde geriye doğru doğrulama (backward reasoning) tekniği ile proje karmaşıklığında büyük etkiye sahip en olası faktörler tespit edilmiştir. Örneğin proje karmaşıklığının yüksek olma olasılığı 1 olduğunda, sırasıyla görev karmaşıklığı, organizasyonel karmaşıklık, teknolojik karmaşıklığın sonsal olasılığının daha yüksek çıktığı görülmüştür. Analizin geneline bakıldığında yine bu üç faktörün proje karmaşıklığı üzerinde en büyük etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Kurulan model, EXPO 2010 projesi üzerinde uygulanarak modelin değerlendirilmesi yapılmıştır. Sonuçta EXPO 2010 projesinin karmaşıklık derecesi “4: Yüksek Derece Karmaşık” olarak çıkmıştır.

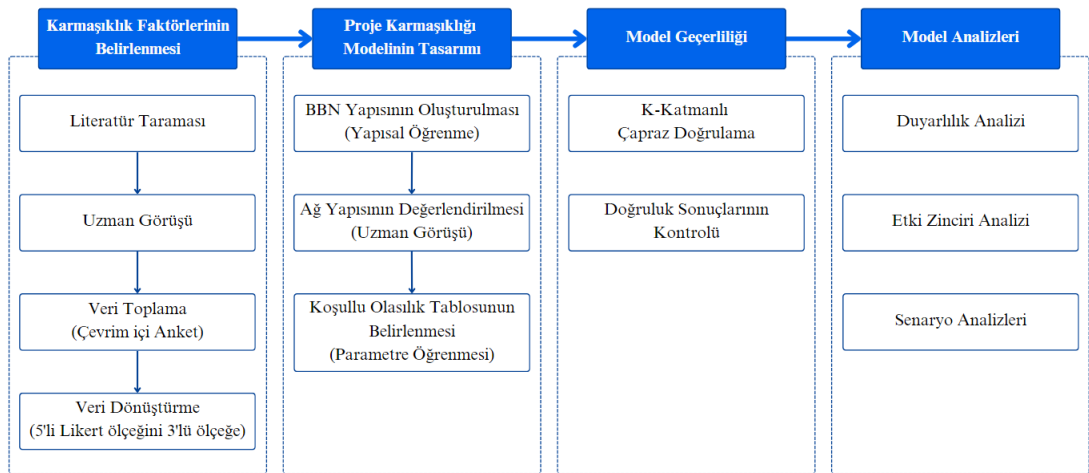
Çalışmada, DBN modelinde bilginin kümülatif ilerlemesi sebebiyle DBN'nin proje karmaşıklığını BBN'den daha iyi tahminlediği sonucuna varılmıştır. DBN modelinin AHP, FANP gibi metotlardan farklı olarak proje yönetimi yaşam döngüsü boyunca gerçek zamanlı olarak proje karmaşıklığını ölçtüğü gözlemlenmiştir. Modelin tek kısıtı; proje yaşam döngüsü boyunca başlatma, planlama, uygulama gibi proje yönetimi süreçlerinin modelde farklılaştırılmamış olmasıdır (Luo vd., 2022). Gelecek çalışmalarda, farklı süreçlerin karakteristiklerinin modele dâhil edilebileceği belirtilmiştir.

3. METODOLOJİ

Bu çalışmanın amacı, karmaşıklığın önemli etkenlerinden biri olan belirsizliği azaltmak için etkili bir olasılıksal modelleme yaklaşımı sunan BBN yöntemi kullanarak AR-GE projelerinin karmaşıklığının değerlendirilmesine yönelik yeni bir ölçüm modeli geliştirmektir. Bu araştırma ile aşağıdaki sorulara cevap aranmıştır:

- AR-GE projelerinin karmaşıklığına sebep olan faktörler nelerdir?
- Bu faktörler birbiri ile nasıl bir etkileşim halindedir?
- Proje karmaşıklığı nasıl ölçümlenebilir, hangi faktörlere duyarlıdır?
- Farklı senaryolar altında proje karmaşıklığı nasıl değişmektedir?

Bu amaçla yapılan tez çalışmasında dört aşamadan oluşan bir metodoloji izlenmiştir: (i) karmaşıklık faktörlerinin belirlenmesi, (ii) Bayes ağı modelinin oluşturulması, (iii) model validasyonu, (iv) model analizleri ve çıkarımlar (Bkz. Şekil 3.1). Öncelikle AR-GE projelerinin karmaşıklık faktörleri belirlenmiştir. İkinci aşamada, GeNIe Bayes Ağı Modelleme Programı'nın akademik versiyonu kullanılarak BBN yapısı oluşturulmuştur. Üçüncü aşamada, k-katmanlı çapraz doğrulama yöntemi kullanılarak oluşturulan modelin geçerliliği kontrol edilmiştir. Son olarak kestirimsel analiz, duyarlılık analizi ve etki zinciri analizleri yapılmıştır.



Şekil 3.1: Araştırmanın genel çerçevesi.

Bu bölümde, araştırma metodolojisinin teorik altyapısını aktarmak amacıyla BBN yönteminin detayları ve Şekil 3.1’de verilen araştırmanın genel çerçevesinin adımları açıklanacaktır.

3.1 Teorik Altyapı

3.1.1. Bayes teoremi

İstatistik biliminde Frekansist ve Bayesçi olmak üzere iki temel yaklaşım bulunmaktadır. Bu iki ekol arasındaki en önemli fark, olasılık ve belirsizliği yorumlama biçimleridir. Frekansist yaklaşımda hipotez yerine verilere olasılık atanır ve bir olayın olasılığı, sonsuz deneme yapıldığında bu olayın gerçekleşme sıklığı ile aynı kabul edilir (Fornacon-Wood vd., 2022). Örneğin bir para atıldığında, yazı gelme olasılığı %50’dir ve bu olay birçok kez tekrarlandığında, yani uzun vadede, aynı şekilde yazı gelme olasılığı %50 kabul edilir. Ancak bu olay üç kez tekrar edildiğinde hepsinde de yazı gelebilir. Bu durum Frekansist yaklaşımda, belirsizliğin örneklem hatasından kaynaklanması olarak yorumlanmaktadır. Bu ekolde, toplanan veriden farklı bir veri elde etme olasılığı p değeri olarak bilinmektedir, yani hatalı karar olasılığını göstermektedir ve p değerinin 0,05’ten düşük olması beklenmektedir. Yalnızca p değerine göre sonuçların yorumlanması yerine, güven aralıklarının da dahil edilmesi yorumları iyileştirmektedir. Güven aralığı, bir istatistiki analizin güven düzeyi olarak tanımlanmaktadır ve bir deney tekrar tekrar yapıldığında bu güven aralığı içerisinde gerçek değerlerin elde edileceğini belirtmektedir (Fornacon-Wood vd., 2022).

Bayesçi yaklaşım ise binom dağılımının parametresinin dağılımının nasıl hesaplanacağı üzerine çalışmalar yapan Reverend Thomas Bayes’den adını alan bir ekoldür (Grover, 2013). Bayes modellerinde hipotezlere olasılık atanmaktadır ve veri sayısı arttıkça olasılıklar mevcut veri ve önceki bilgilere göre güncellenmektedir. Frekansist yaklaşımdan farklı olarak bu yaklaşımda, parametreler ve hipotezler bir olasılık dağılımı olarak görülmekte ve veri sabit kabul edilmektedir. Bayesçi teorem Denklem 3.1.’de gösterilen denklemdeki gibidir. $P(X)$, X olayının gerçekleşme olasılığıdır ve önsel (prior) olasılık olarak ifade edilmektedir. Y ’nin bilindiği bir durumda X ’in gerçekleşme olasılığı terminolojik olarak koşullu (conditional) olasılık veya sonsal (posterior) olasılık olarak tanımlanmakta ve $P(X|Y)$ şeklinde

gösterilmektedir. Denklem 3.2’de ise X olayının olması durumunda, Y olayının gerçekleşme olasılığının denklemi verilmiştir.

$$P(X | Y) = \frac{P(Y | X) \cdot P(X)}{P(Y)} \quad (3.1)$$

$$P(Y | X) = \frac{P(X \cap Y)}{P(X)} \quad (3.2)$$

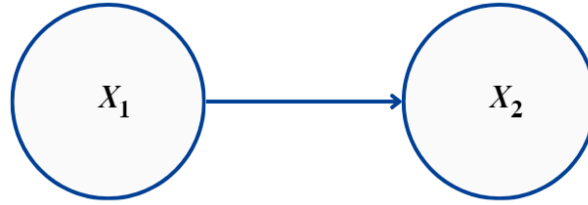
Bayesçi yaklaşımın en önemli özelliği önsel bilgilerin dahil edilmesi ve hipotez olasılıklarının hesaplanması yeteneğidir. Frekansist yaklaşıma göre daha sezgiseldir ve bu özelliği ile günlük hayatta yapılan çıkarımlara daha yakın kabul edilmektedir (Fornacon-Wood vd., 2022).

1.2.2 Bayes inanç ağı (BBN)

Bayes yaklaşımı, belirsizliğin yönetilmesi sürecinde en güvenilir teoremlerden biri olarak kabul edilmektedir. Bayes Hiyerarşik Modeller, Bayes Karar Ağaçları gibi Bayes yaklaşımı ile geliştirilen birçok yöntem bulunmaktadır. BBN veya Bayes Ağı ise bir alandaki veya sistem içindeki değişkenler arası bağımlılıkların olasılıklar ile modellemesine olanak tanıyarak gelecek ile ilgili çıkarımlar yapmayı sağlayan ağ yapısıdır (Akçaoğlu, 2012; Ekici & Ekici, 2016). BBN, belirsizliğin modellenmesi için kullanılan en yaygın olasılıksal modellerden biri olarak kabul edilmektedir (Ekici & Ekici, 2016). Bu yaklaşımda, değişkenler arasındaki ilişkileri analiz eden grafik teorisi ile Bayes teorisi birleştirilmiştir. Dolayısıyla, sistemdeki değişikliklerin senaryo analizleri ile izlenmesine olanak tanımaktadır. Sezgisel bulguları sadece grafiksel olarak açıklamakla kalmamakla birlikte gözlemlere dayalı esnek çıkarımlar yapmayı mümkün kılan analizlerle karar vericilere destek olan bir model sunmaktadır (Ekici & Ekici, 2016).

BBN, değişkenlerin koşullu olasılıklarla birbirine bağlandığı ve Bayes Teoremi kullanılarak hesaplanan çeşitli durumların olasılıklarının döngüsel olmayan yönlendirilmiş grafiklerle (Directed Acyclic Graphs) gösterildiği bir yöntemdir (Marcot & Penman, 2019). BBN’de, düğümler (node) değişkenleri, döngüsel olmayan yönlendirilmiş oklar (arc) ise değişkenler arası ilişkileri tanımlamaktadır. Her bir değişken ise ayırık olaylara sahiptir. Yani her değişkenin bir olasılık tablosu vardır. Örneğin proje karmaşıklığı faktörlerinden biri olarak tanımlanan “Teknolojinin

Yeniliği (TY)” faktörünün (Geraldı vd., 2011; Luo vd., 2017) karmaşıklığa ne düzeyde katkı sunduğu, çok az, az, orta, yüksek ve çok yüksek olmak üzere 5 duruma sahip olabilir. Bu durumların olasılıklarının $[P(TY = \text{çok az}), P(TY = \text{az}), P(TY = \text{orta}), P(TY = \text{yüksek}) \text{ ve } P(TY = \text{çok yüksek})]$ toplamı 1 olmaktadır. BBN’de değişkenler birbiri ile ilişkilidir ve bu nedenle bu değişkenlerin birleşik olasılık dağılımlarına ihtiyaç duyulmaktadır (Ekici & Ekici, 2016). Örneğin Şekil 3.2’deki gösterimde X_1 ve X_2 değişkenleri modeldeki iki düğümdür ve X_1 ’den X_2 ’ye yönlü bir ok bulunmaktadır.



Şekil 3.2: Bayes ağı örnek gösterimi.

Bu durumda X_1 , X_2 ’nin ebeveyni (parent), X_2 de X_1 ’in çocuğu (child) olarak tanımlanmaktadır. Aynı zamanda bu ilişki, X_2 ’nin değerinin X_1 ’den etkilendiği anlamına gelmektedir. BBN’in en önemli özelliklerinden biri olan döngüsel olmayan yönlendirilmiş oklar, tüm değişkenlerin, ebeveyni olan değişkenlerinden koşullu olarak bağımsız olduğu anlamına geldiğini ifade etmektedir (Ekici & Önsel Ekici, 2021). Dolayısıyla BBN modelinde X_2 ’nin olasılığı, ebeveyni olan X_1 değişkenine koşullu olarak bağımsızdır. Değişkenlerin koşullu olasılık dağılımlarının çarpımı ile de birleşik olasılık dağılımı oluşmaktadır. Bu kural, BBN’in en temel prensibi olan zincir kuralıdır. n değişkenli bir modelin birleşik olasılık dağılımı Denklem 3.3’te verilmiştir (Çinicioğlu vd., 2015; Ekici & Önsel Ekici, 2021).

$$P(X_1, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n P(X_i | Ebeveyn(X_i)) \quad (3.3)$$

Bayes ağındaki çocuk değişkenlerin, tüm ebeveynleri ile arasındaki ilişki, koşullu olasılık tablosu olarak tanımlanmaktadır. Eğer bir değişkenin ebeveyni yoksa, bu değişkenin marjinal olasılığı modelde kullanılmaktadır (Pollino & Henderson, 2010). Değişkenlerin marjinal olasılıklarının hesaplanabilmesi için veriye ihtiyaç duyulmaktadır. Bir değişkenin verisi, kategorik (yüksek, ortalama, düşük), kesikli (1, 2, 3) veya sürekli olabilir. BBN’de ise verinin kesikli olması gerekmektedir. Sürekli verinin kesikli hale dönüştürülmesinde bilgi kaybı olabilmektedir ve bu durum

BBN'nin bir dezavantajı olarak belirtilmektedir. Bilgi kaybının engellenmesi için modellerin sürekli veri yerine kesikli veri ile oluşturulması önerilmektedir (Lee vd., 2009).

BBN nitel ve nicel olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır. Bunlardan ilki olan nitel bölümde, değişkenler arasındaki ilişkilerin grafiksel gösteriminin oluşturulduğu Yapısal Öğrenme yapılmaktadır. Nicel olan ikincisi bölüm ise birbiri ile ilişkili değişkenlerin koşullu olasılıklarının hesaplanması için yapılan Parametre Öğrenmesidir (Lee vd., 2009).

BBN'in modellenmesi zor bir süreçtir. Modeldeki değişken sayısı arttıkça koşullu olasılık tablosunun karmaşıklığı artmaktadır ve matematiksel hesaplamalar yapmak güç ve zaman alıcı hale gelmektedir. Dolayısıyla bu alanda kullanılabilecek birçok program geliştirilmiştir. Bu programlar arasında en yaygın kullanılanlar Analytica, Netica, Hugin ve GeNIe programlarıdır.

3.2 Araştırma Çerçevesi

BBN bir önceki bölümde de aktarıldığı gibi değişkenleri temsil eden düğümler ve bu değişkenler arası bağlantıları gösteren döngüsel olmayan yönlendirilmiş oklardan oluşan bir yapıya sahiptir. Bir BBN modelinin oluşturulması için;

- **Adım 1:** Öncelikle bir problem alanının tespit edilmesi ve ilgili probleme ilişkin değişkenlerin (faktörlerin) belirlenmesi gerekmektedir. Belirlenen faktörlerinin model oluşturma aşamasında kullanılabilmesi için olasılıklarına ihtiyaç duyulmaktadır. Dolayısıyla bu olasılıkların hesaplanabilmesi için bir veri toplama süreci gerekmektedir.
- **Adım 2:** Değişkenler arasındaki ilişkilerin belirlenmesi için bir ağ yapısının kurulması gerekmektedir (Yapısal Öğrenme). Bunun ardından, faktörler arasındaki ilişkinin sayısallaştırılması için her bir faktörün koşullu olasılık tablosunun elde edilmesi gerekmektedir (Parametre Öğrenmesi).
- **Adım 3:** Oluşturulan modelin gerçeği yansıtır yansıtmadığını ölçmek için model geçerliliğinin kontrol edilmesi gerekmektedir.

- **Adım 4:** Duyarlılık veya senaryo analizleri gibi analizlerle tespit edilen problem alanına özgü çıkarımlar yapılabilmektedir (Ekici & Önsel Ekici, 2021; Luo, Zhang, & Wu, 2020).

Bu doğrultuda, tez çalışması dört bölümden oluşan bir metodoloji ile gerçekleştirilmiştir.

3.2.1 AR-GE projelerinin karmaşıklık faktörlerinin belirlenmesi

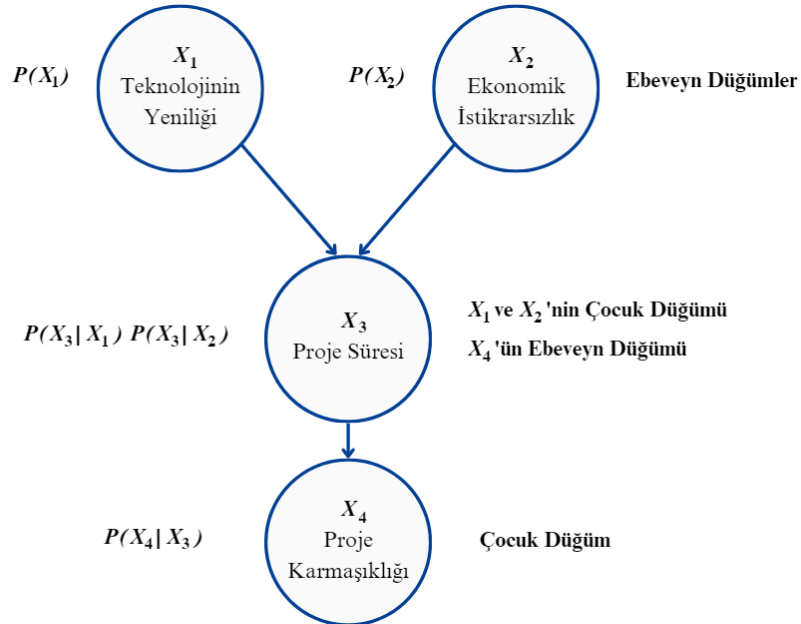
Bayes ağı yapısının oluşturulması için öncelikle bir problem alanı tespit edilmelidir. Bu problem büyük mühendislik projelerinin risk yönetimi (Lee vd., 2009), proje karmaşıklığının yönetimi (Luo, Zhang, & Wu, 2020) veya üretimdeki darboğazların senaryo analizleri ile değerlendirilmesi (Akçaoğlu, 2012) vb. konular olabilmektedir. Örneğin, proje karmaşıklığı bir problem alanı olarak tespit edildiğinde, öncelikle proje karmaşıklığına sebep olan faktörlerin (değişkenlerin) tanımlanması gerekmektedir. Bu tanımlama problemin odak alanı içerisindeki sektör uzmanları veya literatür analizleri ile elde edilebilmektedir (Luo vd., 2022; Luo, Zhang, & Wu, 2020). Değişkenler belirlendikten sonra bu değişkenlerin olasılıklarının hesaplanabilmesi için değişkenlerin durumlarına karar verilmesi, yani veri toplanması gerekmektedir. Proje karmaşıklığı örneğinde, teknolojinin yeniliğinin proje karmaşıklığına ne derece katkı sunduğu verisi 5’li Likert ölçeği kullanılarak (1: çok az ve 5: çok yüksek katkı sunar şeklinde) toplanabilir. Bu durumda, teknolojinin yeniliği değişkenin olasılık dağılımı; $P(TY = \text{çok az}) = 0,05$; $P(TY = \text{az}) = 0,05$; $P(TY = \text{orta}) = 0,05$; $P(TY = \text{yüksek}) = 0,35$; $P(TY = \text{çok yüksek}) = 0,50$ şeklinde olabilir. Aynı şekilde modelde kullanılacak olan tüm değişkenlerin olasılık dağılımlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Dolayısıyla uzman görüşmeleri, odak grupları veya anketlerle veri toplanmalıdır.

Bu çalışmanın ilk aşamasında, AR-GE projelerine ilişkin karmaşıklık faktörlerinin belirlenmesi amacıyla literatür taraması yapılmıştır. Yapılan literatür taraması ile proje karmaşıklığı faktörleri ve kategorileri elde edilmiştir. Literatür sonucunda bir kapsam analizi yapılarak G. Gönen ve Soyer'in, (2020) çalışmasında kullandığı bakış açısıyla faktörler; makro çevre, mikro çevre, organizasyonel faktörler ve proje karakteristiği olmak üzere sınıflandırılmıştır. Bunun sonucunda elde edilen faktörler AR-GE projelerinin karmaşıklığı özelinde değerlendirilerek uzman görüşleri ile nihai haline getirilmiş ve dört grup altında toplam 28 karmaşıklık faktörü belirlenmiştir. Nguyen vd. (2015) tarafından yapılan çalışmada da faktörlerin belirlenmesine sürecine dahil

edilen uzman görüşünün model sonuçları üzerindeki önemi vurgulanmıştır. Karmaşıklık faktörlerinin belirlenmesinin ardından, her bir faktörün proje karmaşıklığına katkısını bulmak amacıyla çevrim içi bir anket hazırlanarak AR-GE proje deneyimi olan proje yöneticileri, ekip üyeleri ve/veya sektör uzmanlarından 5’li Likert ölçeğinde (1: çok az ve 5: çok fazla olmak üzere) Eylül 2023 – Nisan 2024 ayları arasında veri toplanmıştır. 5’li Likert ölçeğinde toplanan veri BBN modelinin oluşturulması sürecinde kullanılması için 3’lü ölçeğe dönüştürülmüştür (1: düşük; 2: orta; 3: yüksek). Bunun için 5’li Likert ölçeğindeki 1 ve 2 değerleri düşük, 3 değeri orta, 4 ve 5 değerleri ise yüksek olarak değerlendirilmiştir. Luo, Zhang, ve Wu (2020) tarafından yapılan çalışmada da benzer bir metodoloji izlenmiştir. Bunun sebebi, çok faktörlü bir modelde, ağır karmaşıklık arttıkça model oluşturma sürecinin zorlu ve zaman alıcı bir hale geliyor olmasıdır (Ekici & Ekici, 2016).

3.2.2 Proje karmaşıklığı modelinin tasarımı (BBN yapısı)

İkinci aşamada, değişkenler arası ilişkilerin belirlenmesi için bir ağ yapısı oluşturulması gerekmektedir. Örneğin Şekil 3.3’te verilen ağ yapısı, X_1 , X_2 , X_3 ve X_4 olmak üzere dört değişkenden oluşmaktadır. Bu yapıda X_3 değişkeni X_1 ve X_2 ’nin çocuk düğümü iken, X_4 ’ün ebeveyn düğümüdür. X_1 ve X_2 ’nin marjinal olasılıkları, X_3 ve X_4 ’ün ise koşullu olasılığı modele dahil edilmiştir.



Şekil 3.3: BBN ağ yapısı ile koşullu olasılıklar.

Ağ yapısının yapısal öğrenme ile oluşturulmasında veriden öğrenen Objektif Bayes Ağı ile uzman görüşüne dayalı Nedensel Bayes Ağı olmak üzere iki temel yöntem kullanılmaktadır (Çinicioğlu vd., 2015). Veriden öğrenen Bayes ağı direkt olarak veri seti üzerinden bir yapısal öğrenme ile ağ yapısını oluşturmaktadır ve bu özelliği ile daha objektif olarak kabul edilmektedir. Oluşan bu ağ yapısında nedensel ilişkiler yer almamaktadır; ancak tahminleme gücünün Nedensel Bayes Ağlarına göre daha iyi olması beklenmektedir. Nedensellik ilişkisi eğer bir problemde önemli değilse bu yöntem kullanılmaktadır. Aynı zamanda, modelde kullanılan değişken sayısı arttıkça, koşullu olasılık tablolarının büyüklüğü artacak ve ağ yapısının oluşturulması güç hale gelecektir. Bu tür durumlarda da uzman görüşüne dayalı Nedensel Bayes Ağı yaklaşımı tercih edilmektedir. Nedensellik içeren problemlerde değişkenler arası ebeveyn - çocuk ilişkileri uzman görüşleri ile belirlenmektedir (Çinicioğlu vd., 2015). Örneğin proje karmaşıklığının değerlendirilmesinde karmaşıklık kavramı proje türüne göre değişkenlik gösterebilmektedir (Luo, Zhang, & Wu, 2020) ve bu yöntem tercih edilebilmektedir. Bu tür modellere, sadece verinin sağladığı olasılıklar değil, aynı zamanda uzman değerlendirmeleri de modele dahil edilmektedir. Her iki tür yöntemin de avantaj ve dezavantajları bulunmakla birlikte, bu iki yöntemin birlikte uygulandığı hibrit modeller de kullanılmaktadır. Çinicioğlu vd. (2015) tarafından yapılan Nedensel Bayes Ağı ile Bayes Ağının karşılaştırmalı analizinde, Nedensel Bayes Ağında oluşan ilişkilerin sayısı Bayes Ağına göre oldukça yüksek çıkmıştır, ancak Bayes Ağının tahminleme gücü daha iyi sonuçlar vermiştir. Bayes İnanç Ağının kurulmasında Cooper ve Herskovits tarafından 1992’de bulunan ve en sık kullanılan yöntemlerden biri olan K2 algoritması kullanılmaktadır (Luo, Zhang, & Wu, 2020’de atıfta bulunulduğu gibi). Bu algoritmada, verilere ve uzman bilgisine dayanarak skor araması (scoring search), bir puanlama işlevi kullanarak Bayes ağ yapılarının kalitesini değerlendirmek ve en iyi puana sahip olanı seçmek için kullanılmaktadır. Skorlama fonksiyonunda Minimum Açıklama Uzunluğu (MDL: Minimum Descriptive Length) dikkate alınmaktadır (Luo vd., 2022).

Kurulan ilk ağ yapısında, faktörler arası anlamsız ilişkiler çıkabilmektedir. Bu sebeple, bir sonraki adıma geçmeden önce ağ yapısının uzman görüşleriyle değerlendirilmesi ve nihai hale getirilmesi önerilmektedir (Luo, Zhang, & Wu, 2020). Yapısal öğrenme ve uzman görüşleri ile değerlendirmelerin ardından nihai hale getirilen ağ yapısında, değişkenlerin koşullu olasılıklarının belirlenmesi için parametre öğrenmesi

yapılmaktadır. Bu aşamanın yapılmasının sebebi, model kurulumu sonrasında duyarlılık analizi, vb. analizlerin yapılabilmesidir (Luo, Zhang, & Wu, 2020). Parametre öğrenmesi sürecinde Bayes Tahminleme (BE: Bayesian Estimation) ve Maksimum Olabilirlik Tahmini (MLE: Maximum Likelihood Estimation) olmak üzere iki yöntem kullanılmaktadır. MLE'nin daha yüksek hesaplama verimliliğine sahip olması sebebiyle (Luo, Zhang, & Wu, 2020) daha çok tercih edilen bir yöntem olduğu belirtilmektedir. Parametre öğrenmesi ile olasılık dağılımlarının belirlenmesinde, eksik değerler içeren veriden parametreleri öğrenmeye olanak tanıyan Beklenti-Maksimizasyonu (EM: Expectation-Maximization) algoritması kullanılmaktadır. EM algoritması, MLE'nin farklı bir versiyonudur. Beklenti tarafında, gizli değişkenlerin sonsal olasılığı, son iterasyonun veya modelin parametresinin başlangıç değerine göre hesaplanmaktadır. Maksimizasyon kısmında ise yeni parametreler üretmek için olabilirlik fonksiyonu maksimize edilmektedir. Dolayısıyla, EM algoritması, gözlemlenen verilerin log olasılığını maksimize eden parametreleri bulmaya çalışmaktadır. Veri setinde eksik veri yoksa amaç fonksiyonun tek global optimumu vardır (Do & Batzoglou, 2008). Parametre öğrenmenin başlangıç aşamasında, “tekdüzeleştirmek (uniformize)”, “rastgele başlatma (randomize)” ve “özgün halini koruyan (keep original) olmak üzere üç farklı başlangıç noktası seçilerek öğrenme başlatılmaktadır. Tekdüzeleştirmede, parametrelerin tekdüze (uniform) dağılımların alınmasıyla süreç başlamaktadır ve güven aralığı otomatik olarak 1 alınmaktadır. Rastgele başlatmada ise parametreler için rastgele değerler seçilerek süreç başlamakta ve özellikle gizli değişkenlerle (latent variables) parametrik öğrenme için daha tercih edilen bir yöntem olarak kabul edilmektedir. Parametrelerin özgün değerlerini koruyarak başlatılan öğrenme ise sadece mevcut bir ağ yapısı üzerinde yeni bir veri seti ile öğrenme yapılacaksa kullanılmaktadır (GeNIe User's Manual, 2024).

Bu çalışmanın ikinci aşamasında, karmaşıklık modelinin BBN yaklaşımı ile kurulması amacıyla 10 yıl ve üzeri proje yönetimi deneyimi olan dört uzman ile faktörler arası ilişkiler belirlenmiştir. Uzman görüşü ve verinin entegrasyonu ile oluşan hibrit bir yaklaşımla “GeNIe Academic” programında yapısal öğrenme gerçekleştirilmiştir ve Bayes ağı yapısı oluşturulmuştur. Uzman görüşünün bu sürece dahil edilmesiyle nedensellik ilişkileri dikkate alınmıştır. Yapısal öğrenme sonucunda oluşan yapı uzman grubu tarafından tekrar değerlendirilmiş ve anlamsız ilişkiler kontrol edilerek model nihai hale getirilmiştir. Bu sayede, gerçek hayatı daha iyi yansıtabilen bir model

elde edilmesi amaçlanmıştır. Ağ yapısının oluşturulmasının ardından, aynı programda parametre öğrenmesi yapılarak her bir faktör için koşullu olasılık tabloları elde edilmiştir. Parametre öğrenmesinin başlangıç noktası için sık kullanılan yöntemlerden biri olan “rastgele başlatma” yöntemi kullanılmıştır. Bu işlemin ardından koşullu olasılık tabloları elde edilmiştir.

3.2.3 Model geçerliliği

BBN yapısının kurulmasından ve koşullu olasılıkların belirlenmesinin ardından, modelin geçerliliğinin kontrol edilmesi gerekmektedir. Modelin geçerliliği, modelin tahminleme gücü ile gerçek değerlerin karşılaştırılması ile elde edilmektedir. Bu amaçla kullanılan farklı algoritmalar bulunmaktadır. Bunlar arasında, en güçlü yöntemlerden biri K-katmanlı Çapraz Doğrulama (K-fold Cross-Validation) yöntemidir (GeNIe User’s Manual, 2024). K-katmanlı çapraz doğrulamada veri seti k eşit parçaya bölünmekte ve model $k-1$ parça üzerinden eğitilmekte ve k ’nın içindeki son veri kümesi ile test edilmektedir. Bunun sonucunda, her bir k veri seti için doğrulama verisi üretilmektedir ve süreç k kez tekrar edilmektedir. k sayısı genellikle 5 ile 10 arasında seçilmektedir. Her tekrarlamaadaki doğruluk değerinin ortalaması alınarak nihai doğruluk değeri elde edilmektedir. Doğruluk değerinin %80 ve üzeri olduğu modeller etkili modeller olarak tariflenmektedir (Cooper & Herskovits, 1992).

i veri; R_i , i verisinin gerçek değeri; S_i , i verisinin doğrulama ile elde edilen en yüksek olasılık dağılımı; l test verisinin sayısı ve V_i doğru sonuç sayısı ($R_i=S_i$) olmak üzere, modelin doğruluk değeri Denklem 3.4’teki gibi hesaplanır (Luo vd., 2022):

$$P = \frac{\sum_{i=1}^l V_i}{l} \quad (3.4)$$

Bu çalışmanın üçüncü aşaması olarak k-katmanlı çapraz doğrulama yöntemi kullanılarak model geçerliliği kontrol edilmiştir. Bu amaçla, modelde kullanılan tüm faktörler ve olasılıkları validasyon sürecinde dahil edilmiştir. Proje karmaşıklığının doğruluk yüzdesinin kontrol edilmesi amacıyla “proje karmaşıklığı” faktörü “sınıf düğümü (class node)” olarak tanımlanmıştır. Genellikle küçük veri setlerinde k , 5 ile 10 arasında bir değer almaktadır. Bu çalışmada k değeri 5 olarak tanımlanmıştır. Doğrulama sonucunda, modelin doğruluğu %80’in üzerinde çıkmıştır. Bu sonuç, tasarlanan BBN yapısının, analiz sürecinde kullanılmak üzere etkili bir model olduğunu göstermektedir.

3.2.4 Model analizleri

BBN'deki model analizleri, olasılıkların hesaplanması sürecine dayalıdır. BBN'de en yaygın olarak kullanılan üç tür analiz türü bulunmaktadır (Luo, Zhang, & Wu, 2020):

- i. İleriye Doğru Doğrulama (Forward Reasoning) – Kestirimsel (Senaryo) Analiz (Predictive Analysis)
- ii. Geriye Doğru Doğrulama (Backward Reasoning) – Diagnostik/Tanısal Analiz (Diagnostic Analysis)
- iii. Açıklayıcı Doğrulama (Explanation Reasoning) – Duyarlılık Analizi (Sensitivity Analysis) ve Etki Zinciri Analizi (Influence Chain Analysis)

İleriye doğru doğrulama analizi olan kestirimsel analiz, bir değişkenin durumu varsayımsal olarak değiştirildiğinde gelecekteki değerinin tahminlenmesine dayalı bir analizdir. BBN modelinde bir değişkenin durumu varsayımsal olarak değiştirildiğinde, modeldeki olasılıklar tekrar hesaplanmaktadır (Luo, Zhang, & Wu, 2020) ve geleceğe yönelik çıkarımlar sunmaktadır. Örneğin, proje karmaşıklık faktörlerinden biri olan teknolojinin yeniliği değişkeninin düzeyi yüksek olarak ayarlandığında, proje karmaşıklığının düzeyi değişmektedir. Dolayısıyla kestirimsel analiz ile farklı senaryolar altında proje karmaşıklık düzeylerine yönelik çıkarımlar yapılabilmektedir.

Geriye doğru doğrulama analizi olan tanısal analizde, modelde seçilen hedef düğümün durumu üzerinde varsayımsal bir değişiklik yapıldığında geriye doğru bu değişkenin etkilendiği değişkenlerin olasılıkları tekrar hesaplanmaktadır (Luo, Zhang, & Wu, 2020). Dolayısıyla hedef düğümün sonsal olasılıkları değiştirilerek geriye doğru bir teşhis konulmaktadır. Örneğin proje karmaşıklığının düzeyi çok yüksek olarak değiştirildiğinde, proje karmaşıklığının etkilendiği faktörler belirlenmektedir. Sonrasında bu faktörlerin düzeyleri, farklı senaryolar ile kademeli olarak çok yüksek tanımlanmakta ve sonuçlar elde edilmektedir.

Açıklayıcı analizlerden biri olan duyarlılık analizinde ise bir değişkenin hangi değişkenlere ne derece duyarlı olduğu analiz edilmektedir (Luo, Zhang, & Wu, 2020). Duyarlılığının izlenmesi için modelde bir hedef düğüm seçilmelidir. Duyarlılık analizi hedef düğümün olasılığında önemli bir değişikliğe neden olabilecek değişkenlerin belirlenmesini sağlamaktadır. Örneğin, proje karmaşıklık hedef düğüm olarak tanımlandığında, eğer teknolojinin yeniliği faktörüne yüksek duyarlılığı varsa proje karmaşıklığının bu değişkendeki olası değişikliklerden yüksek derecede etkilendiği

sonucu çıkmaktadır. Bu noktada duyarlılık analizi, karar verme sürecine oldukça destek olan bir analizdir.

Açıklayıcı analizlerden bir diğeri ise etki zinciri analizidir. Bu analizde değişkenler arasındaki karşılıklı etkinin düzeyi gösterilmektedir, yani değişkenler arasındaki koşullu olasılıkların bağımlılık seviyesi ölçülmektedir (Luo, Zhang, & Wu, 2020).

Bu çalışmada geliştirilen BBN modelinin analizi için duyarlılık analizi, etki zinciri analizi ve senaryo analizleri gerçekleştirilmiştir.



4. UYGULAMA

Bu tez çalışmasında BBN yöntemi kullanılarak AR-GE projelerinin karmaşıklığının değerlendirilmesi ve bu alana teorik ve pratik katkılar sunularak, proje yönetimi süreçlerinde bir yol haritası olarak kullanılması amacıyla bir uygulama gerçekleştirilmiştir.

Metodoloji bölümünde belirtildiği üzere, bu uygulamanın ilk adımı olarak öncelikle bir problem alanının ve modelde kullanılacak olan faktörlerin belirlenmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda, proje başarısı üzerinde kritik bir etkiye sahip olan karmaşıklığın itici güçlerinden biri olan belirsizliğin yönetilmesine destek olması amacıyla proje karmaşıklığı problem alanı olarak belirlenmiş ve AR-GE projelerinin karakteristiği gereği yüksek karmaşıklık içermesi sebebiyle de çalışmanın kapsamını, AR-GE projelerinin karmaşıklığının oluşturmaya karar verilmiştir.

Problem alanının ve kapsamının belirlenmesinin ardından, proje karmaşıklığına sebep olabilecek karmaşıklık faktörleri belirlenmiş ve bu faktörlerin proje karmaşıklığını ne ölçüde etkilediğini belirlemek amacıyla çevrim içi bir anketle veri toplanmıştır (Adım 1). Sonrasında, Bayes ağı yapısının kurulması amacıyla faktörler arasındaki nedensellik ilişkileri uzman görüşleri ile tanımlanmıştır. Anketle toplanan veriler ve uzman görüşlerinden elde edilen sonuçlar GeNIe programı aracılığıyla ağ yapısının oluşturulmasında kullanılmıştır. Oluşan ağ yapısının uzmanlar tarafından tekrar değerlendirilmesinin ardından model nihai hale getirilmiştir (Yapısal Öğrenme). Faktörler arasındaki nedensellik ilişkilerinin sayısallaştırılması için ise her bir faktörün koşullu olasılık tabloları elde edilmiştir (Parametre Öğrenmesi) (Adım 2). Daha sonra k-katmanlı çapraz doğrulama yöntemi ile geliştirilen BBN'in doğruluğu değerlendirilmiş ve %80'in üzerinde bir doğrulukla modelin etkin bir şekilde proje karmaşıklığının modellenmesinde ve analizinde kullanılabileceği kanıtlanmıştır (Adım 3). Son olarak model analizleri gerçekleştirilerek proje karmaşıklığına yönelik çıkarımlar ve değerlendirmeler yapılmıştır (Adım 4). Yukarıda kısaca bahsedilen uygulama adımları bu bölümde detaylı bir şekilde açıklanacaktır.

4.1 AR-GE Projelerinin Karmaşıklık Faktörlerinin Belirlenmesi

4.1.1 Karmaşıklık faktörlerinin belirlenmesi

Karmaşıklık faktörlerinin belirlenmesi amacıyla öncelikle bu alanda yapılan çalışmalar incelenmiş ve bu çalışmalarda kullanılan faktörler analiz edilmiştir. Yapılan çalışmalarda, teknoloji boyutu, organizasyonel faktörler, belirsizlik, paydaşların çokluğu, tedarikçilere olan bağımlılıklar gibi birçok faktörün karmaşıklığa sebep olduğu belirtilmiştir. Genel çerçevede proje ekosistemi,

- (i) PESTLE analizi kullanılarak belirlenebilecek ve politik, ekonomik, teknolojik, yasal ve çevresel faktörleri içeren makro çevreye ilişkin karmaşıklık faktörleri;
- (ii) dış paydaşlar arasındaki ilişkiler, dış paydaşların sayısı ve çeşitliliği, müşteriler, tedarikçiler ve rekabet ortamı olarak tanımlanabilecek görev çevresine ilişkin karmaşıklık faktörleri;
- (iii) organizasyon içindeki ilişkiler ve işbirliği ortamı, kültürel yapı, finansal ve operasyonel riskler ve organizasyon yapısı olarak tanımlanabilecek organizasyonel karmaşıklık faktörleri ve
- (iv) proje amaç ve hedeflerindeki belirsizlikler, kapsam ve faaliyet belirsizliği, bağımlılıklar, çıktı yapısı, proje süresi, proje bütçesi, projenin stratejik önemi, planlanan kaynakların mevcudiyeti ve insan kaynakları yapısı olarak tanımlanabilecek proje dinamiklerine yönelik karmaşıklık faktörleri

olarak kategorize edilebilecek karmaşıklık faktörlerinden etkilenmektedir (G. Gönen & Soyer, 2020) (Bkz. Şekil 4.1).



Şekil 4.1: Proje ekosisteminde yer alan karmaşıklık faktörleri.

Bu doğrultuda, incelenen 21 çalışmadaki karmaşıklık kategorileri ve bu kategorilerin altında yer alan faktörler ilk aşamada makro çevre, görev çevresi, organizasyonel faktörler ve proje karakteristiği olmak üzere dört kategoride gruplandırılmıştır. Bu ilk sınıflandırmanın ardından, kategorilerin altında yer alan her bir faktör belirsizlik, bağımlılık, büyüklük, çeşitlilik, vb. özellikler göz önünde bulundurularak kendi içinde ayrıca sınıflandırılmıştır. İncelenen çalışmalarda, bu çalışmalarda yer alan karmaşıklık faktörleri ve gruplandırmaları ve söz konusu karmaşıklık faktörlerinin bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen sınıflandırılmasına ilişkin detaylar EK A’da verilmiştir.

Yapılan bu sınıflandırmanın ardından, AR-GE projelerinin karmaşıklığına sebep olan faktörler değerlendirilerek modelde kullanılabilecek karmaşıklık faktörleri listelenmiştir. Listelenen faktörler, AR-GE proje yöneticisi olarak 3-5 yıl arasında görev yapmış olan altı uzman ve 15 yıl ve üzeri görev yapmış olan dört uzmandan oluşan bir uzmanlar grubu tarafından değerlendirilmiş ve faktörlerle ilgili gerekli ekleme, çıkartma ve düzeltmeler yapılmıştır. Örneğin ilk belirlenen listede, iki ayrı faktör olarak belirtilen proje kapsamının genişliği ve proje faaliyetlerindeki belirsizlik faktörleri, uzmanlar tarafından yapılan değerlendirme sonucunda birleştirilerek tek bir faktör haline getirilmiştir. Bir başka örnek olarak, proje süresinden ve zaman baskısından kaynaklanan yeni bir karmaşıklık faktörü eklenmesi yönünde bir değerlendirme yapılmıştır ve bu faktör modele eklenmiştir. Yapılan bu değerlendirmelerin ardından, AR-GE projeleri için dört kategori altında toplam 28 karmaşıklık faktörünün modele dahil edilmesine karar verilmiştir.

- **Makro çevrede (MC)**, çevresel, ekonomik, politik/yasal, teknolojik ve toplumsal olmak üzere toplam beş faktör belirlenmiştir. Bu faktörler, müdahale edilemeyen genel çevreden kaynaklanan faktörleri ifade etmektedir.
- **Görev çevresinde (GC)**, proje ortakları olarak tanımlanan dış paydaşlarla ilişkiler, etkileşim ve bağımlılık; dış paydaşların çokluğu ve çeşitliliği; müşteri talep ve beklentilerindeki değişkenlik ve belirsizlik; tedarikçilerle ilişkiler ve bağımlılıklar; rekabet ortamı ve rakipler olmak üzere toplam beş faktör belirlenmiştir.
- **Organizasyonel faktörler (O)**, örgütsel iklim (bireyler ve bölümler arasındaki iş birliği ve etkileşim); organizasyondaki kültürel yapı ve çeşitlilik; organizasyondaki finansal riskler; organizasyondaki operasyonel riskler ve organizasyonel yapı olmak üzere toplam beş faktörden oluşmaktadır.

- **Proje karakteristiği (P)** kategorisi ise proje dinamiklerinden kaynaklanan karmaşıklık faktörlerini ifade etmektedir. Bu kategoride, amaç ve hedeflerdeki belirsizlik; amaç ve hedeflerin sayısı, çeşitliliği ve bağımlılığı; bütçe; proje çıktısının yapısı; kapsam ve faaliyetlerin belirsizliği; kapsam genişliği ve faaliyetlerin sayısı, çeşitliliği ve bağımlılığı; kaynakların kullanılabilirliği; insan kaynağının yetkinliği ve yeterliliği; proje ekip üyeleri arasındaki iletişim; proje yöneticisinin yetkinliği; proje yönetimi metot ve araçları; proje süresi ve projenin stratejik önemi olmak üzere toplam 13 faktör belirlenmiştir.

Belirlenen faktörler ile bu faktörlerin açıklamaları ve kategorileri Çizelge 4.1’de detaylı bir şekilde verilmiştir.



Çizelge 4.1: AR-GE projelerinin karmaşıklık faktörleri.

Kategori	Karmaşıklık Faktörü	Karmaşıklık Faktörü Açıklaması
Makro Çevre (5)	Çevresel Faktörler (MC1)	Çevresel ortamla ilgili (hava koşulları, coğrafik konum, altyapı eksiklikleri, vb.) değişkenlik, belirsizlik, bağımlılık ve risklerden kaynaklanan zorlayıcı koşullar
	Ekonomik Faktörler (MC2)	Ekonomik koşullardaki (döviz kuru, faiz oranları, enflasyon, vergiler, teşvikler vb.) değişkenlik, belirsizlik ve risklerden kaynaklanan zorlayıcı durumlar
	Politik/Yasal Faktörler (MC3)	Politik ve yasal koşullardaki (politik etkiler, yasa ve yönetmelikler, norm ve standartlar, yasal izinler, uluslararası ilişkiler, vb.) değişkenlik ve belirsizlikten kaynaklanan zorlayıcı durumlar
	Teknolojik Faktörler (MC4)	Teknolojik ortamla ilgili (teknolojik yenilik, teknoloji olgunluğu, teknolojik altyapı, fikri mülkiyet hakları, vb.) değişkenlik, belirsizlik ve bağımlılıktan kaynaklanan zorlayıcı koşullar
	Toplumsal Faktörler (MC5)	Toplumsal ortamla ilgili (kamu gündemi, toplumsal bilinç ve baskılar, medya, vb.) risk ve zorluklardan kaynaklanan zorlayıcı koşullar
Görev Çevresi (5)	Dış Paydaşlara Bağımlılık ve Etkileşim (GC1)	Dış paydaşlarla (proje ortaklarıyla) ilişkiler, paydaşlar arası etkileşim ve bağımlılıklardan kaynaklanan zorlayıcı koşullar (Ortaklık yapısı, güven duygusu, çıkar çatışmaları, sözleşme koşulları, vb.)
	Dış Paydaşların Sayısı ve Çeşitliliği (GC2)	Dış paydaşların (proje ortaklarının) çokluğu ve çeşitliliğinden kaynaklanan zorlayıcı koşullar (Paydaş sayısı, kültürel çeşitlilik, lokasyon çeşitliliği, ilgi alanlarının çeşitliliği, bakış açılarının çeşitliliği, vb.)
	Müşteri Talep ve Beklentilerindeki Belirsizlik ve Değişkenlik (GC3)	Müşterilerin talep ve beklentileri ile ilgili değişkenlik ve belirsizliklerden kaynaklanan zorlayıcı koşullar (Özelleşmiş çıktılar, kalite gereksinimleri, eksik tanımlanmış standartlar, gerçekçi olmayan beklentiler, vb.)
	Tedarikçilere Bağımlılık ve Etkileşim (GC4)	Tedarikçilerle ilişkiler, etkileşim ve bağımlılıklardan kaynaklanan zorlayıcı koşullar (Tedarikçilerin sayısı, tedarikçilerin pazarlık gücü ve yetkinliği, güven ilişkisi, çatışma ve anlaşmazlıklar, vb.)
	Rekabet Ortamı ve Rakipler (GC5)	Rekabet ortamı ve rekabet seviyesinden kaynaklanan zorlayıcı koşullar (Rakip sayısı, sektör dinamikleri, mevcut ve potansiyel rekabet düzeyi, vb.)
Organizasyonel (5)	Örgütsel İklim/Etkileşim ve İş Birliği (O1)	Proje organizasyonundaki bireyler ve bölümler arasındaki iş birliği ve ilişki ortamından kaynaklanan zorlayıcı koşullar (Açıklık, güven, destek, baskı, vb.)
	Kültürel Yapı ve Çeşitlilik (O2)	Proje organizasyonundaki kültürel yapı ve çeşitlilikten kaynaklanan zorlayıcı koşullar (Kültürel farklılıklar, farklı uzmanlıklar, algısal farklılıklar, vb.)
	Finansal Riskler (O3)	Proje organizasyonu ile ilgili finansal risklerden kaynaklanan zorlayıcı koşullar (Zayıf mali yapı, tahsil edilemeyen alacaklar, ödeme zorlukları, vb.)
	Operasyonel Riskler (O4)	Proje organizasyonu ile ilgili operasyonel risklerden kaynaklanan zorlayıcı koşullar (Bürokrasi seviyesi, deneyim seviyesi, bilgi akışları, vb.)
	Organizasyonel Yapı (O5)	Proje organizasyonunun organizasyonel yapısından kaynaklanan zorlayıcı koşullar (Merkezileşme derecesi, hiyerarşik düzey sayısı, matris/fonksiyonel yapı, birimler arası bağımlılıklar, vb.)

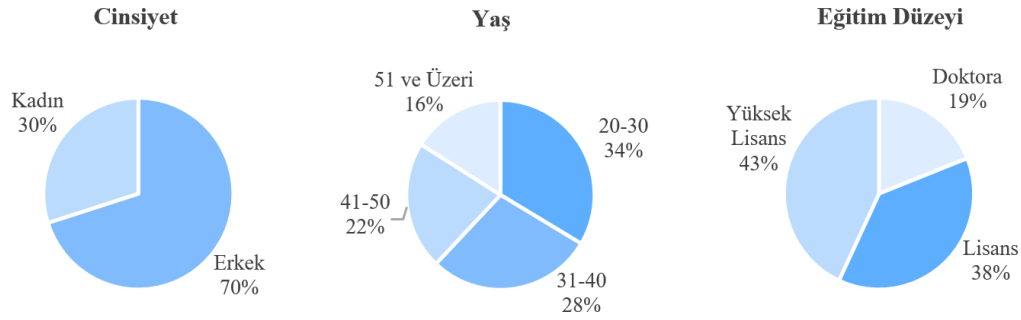
Çizelge 4.1 (devam): AR-GE projelerinin karmaşıklık faktörleri.

Kategori	Karmaşıklık Faktörü	Karmaşıklık Faktörü Açıklaması
Proje (13)	Amaç/Hedeflerdeki Belirsizlik (P1)	Projenin amaç ve hedeflerine ilişkin belirsizliklerin oluşturduğu zorlayıcı koşullar
	Amaç/Hedeflerin Sayısı, Çeşitliliği ve Bağımlılığı (P2)	Projenin amaç ve hedeflerinin sayısı, çeşitliliği ve bunların birbirlerine bağımlılık ve uyumluluk durumlarıyla ilgili zorlayıcı koşullar
	Bütçe Kısıtları (P3)	Planlanan proje bütçesinin yapısı (finansal kaynakların sayısı, çeşitliliği, esnekliği, yatırım harcamalarının büyüklüğü, bütçe/maliyet kısıtları, vb.) ve yönetilebilirliği ile ilgili zorlayıcı koşullar
	Çıktı Yapısındaki Belirsizlik ve Çeşitlilik (P4)	Hedeflenen proje çıktılarının yapısı (çıkıtı sayısı, çeşitliliği, bağımlılıkları, özelleştirme derecesi, tasarımın teknik zorluğu, vb.) ve yönetilebilirliği ile ilgili zorlayıcı koşullar
	Kapsam/Faaliyetlerdeki Belirsizlik (P5)	Proje kapsam ve faaliyetlerine/iş paketlerine ilişkin değişkenlik ve belirsizliklerin oluşturduğu zorlayıcı koşullar
	Kapsam Genişliği/Faaliyetlerin Sayısı ve Çeşitliliği (P6)	Proje faaliyetlerinin sayısı (kapsam genişliği), çeşitliliği ve faaliyetler arası bağımlılıklardan kaynaklanan zorlayıcı koşullar
	Kaynakların Kullanılabilirliği (P7)	Planlanan proje kaynaklarının (teknoloji, sistem, araç, donanım, makine, vb.) ulaşılabilirliği ve yönetilebilirliği ile ilgili zorlayıcı koşullar
	İnsan Kaynağının Yetkinlik ve Yeterliliği (P8)	Planlanan proje insan kaynağı yapısı (sayısal yeterlilik, yetkinlik, uzmanlık alanı çeşitliliği, kültürel çeşitlilik, vb.) ve yönetilebilirliği ile ilgili zorlayıcı koşullar
	İnsan Kaynağındaki Etkileşim ve İş Birliği (P9)	Proje ekip üyeleri arasındaki ilişkiler ile aralarındaki etkileşim ve bağımlılıklardan kaynaklanan zorlayıcı koşullar (İletişim, koordinasyon, katılım düzeyi, güven duygusu, çatışmalar, vb.)
	İnsan Kaynağında Yönetmelik Yetkinlik (P10)	Proje yöneticisinin yönetmelik yetkinliğinden kaynaklanan zorlayıcı koşullar (Bilgi düzeyi, deneyim, liderlik, vb.)
	Proje Yönetimi Metot ve Araçları (P11)	Proje yönetimi metot ve araçlarının yapısı (sayısı, çeşitliliği, değişkenliği, yenilik düzeyi, geliştirme kapsamı) ve bunların koordineli bir şekilde kullanımı ile ilgili zorlayıcı koşullar
	Proje Süresi (P12)	Proje süresi ile ilgili zorlayıcı koşullar (zaman baskısı, çoklu zaman dilimleri, vb.)
	Projenin Stratejik Önemi (P13)	Projenin stratejik öneminden ve kritiklik seviyesinden kaynaklanan zorlayıcı koşullar

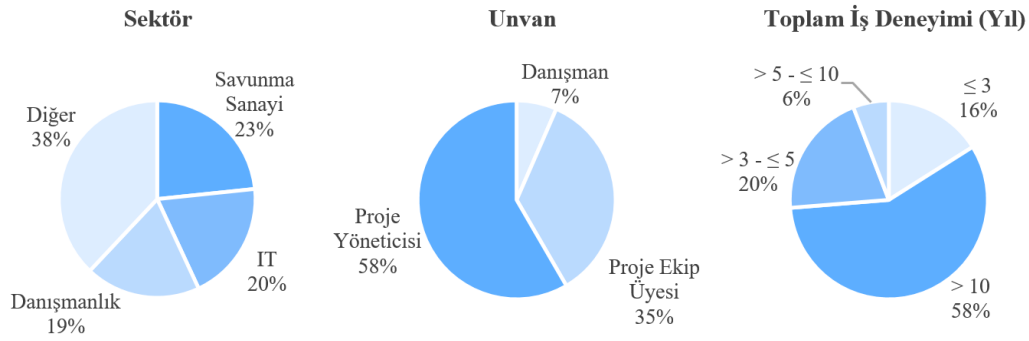
4.1.2 Veri Toplama ve Dönüştürme

AR-GE projelerinin karmaşıklık faktörlerinin literatür taraması ve uzman görüşleri ile belirlenmesinin ardından, her bir karmaşıklık faktörünün, proje karmaşıklığına ne düzeyde katkı sunduğunu bulmak amacıyla çevrim içi bir anket tasarımı yapılmıştır. Katılımcılardan, cinsiyet, yaş, sektör, iş deneyimi, proje yönetimi deneyimi, en son görev aldıkları projenin büyüklüğü gibi 11 demografik bilgi ve proje bilgisi talep edilmiştir. Bu bilgilerin ardından, proje karmaşıklığına sebep olan 28 faktörün en son görev aldıkları/yönettikleri AR-GE projesi için ne düzeyde geçerli olduğunu değerlendirmeleri (5’li Likert ölçeğinde, 1: çok az; 5: çok fazla olmak üzere) istenmiştir. Bu sayede, her bir faktörün önsel olasılıklarının hesaplanması amaçlanmıştır. Aynı zamanda en son görev aldıkları/yönettikleri AR-GE projesinin genel olarak ne kadar karmaşık olduğunu aynı şekilde 5’li Likert ölçeğinde belirtmeleri istenmiştir. Toplam 40 sorudan oluşan anket, gerekli dokümanlar hazırlanarak İstanbul Teknik Üniversitesi Etik Kurulu onayına sunulmuştur ve izin alınmasıyla birlikte anket duyurusu yapılmıştır. Çalışmada kullanılan anket EK B’de verilmiştir.

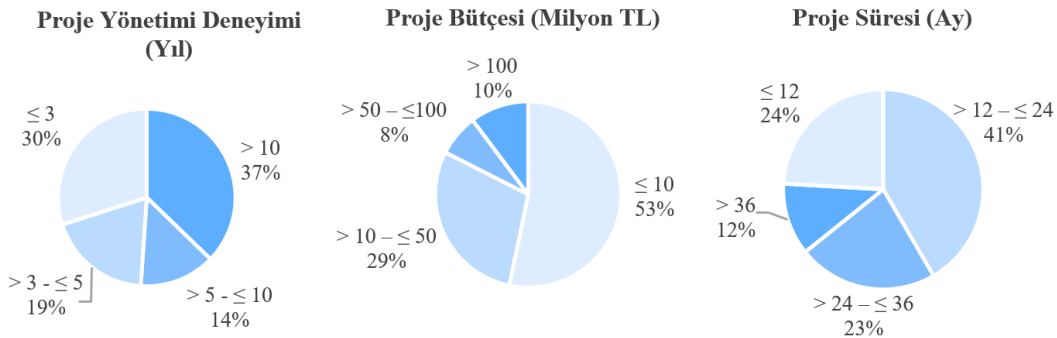
Eylül 2023 – Nisan 2024 dönemi arasında toplam 157 yanıt toplanmıştır. AR-GE projeleri dışında kalan yanıtlar ile tutarsız cevaplanan yanıtlar çıkarılarak toplam 137 veri model tasarımı sürecinde kullanılmak üzere elde edilmiştir. Anket katılımcılarının %70’ini erkek katılımcılar, %34’ünü 20-30 yaş aralığındaki katılımcılar ve %43’ünü yüksek lisans mezunları oluşturmaktadır (Bkz. Şekil 4.2). Katılımların %23’ü savunma sanayinde çalışmakta, %58’lik bir bölümü proje yöneticisi olarak çalışmaktadır (Bkz. Şekil 4.3). Katılımcıların %50’sinin toplam iş deneyim süresi 10 yıl üzeri olup (Bkz. Şekil 4.3), %37’lik bir bölümünün 10 yıl üzeri proje yönetimi deneyimi bulunmaktadır (Bkz. Şekil 4.4). Katılımcıların % 58’inin en son görev aldıkları/yönettikleri AR-GE projesinin bütçesi 10 milyon TL ve altında olup, %41’inin en son görev aldıkları/yönettikleri AR-GE projesinin süresi 12-24 ay arasındadır.



Şekil 4.2: Anket katılımcılarının cinsiyet, yaş ve eğitim düzeyi verisi.



Şekil 4.3: Anket katılımcılarının sektör, unvan ve toplam iş deneyimi verisi.



Şekil 4.4: Anket katılımcılarının proje yönetimi iş deneyimi, proje bütçesi ve süresi verisi.

Karmaşıklık faktörlerinin olasılıklarının belirlenmesi için katılımcılardan 5’li Likert ölçeğinde toplanan veriler modelde kullanılmak üzere 3’lü Likert ölçeğine (1: düşük; 2: orta; 3: yüksek) dönüştürülmüştür. Bunun için 5’li Likert ölçeğindeki 1 ve 2 değerleri düşük, 3 değeri orta, 4 ve 5 değerleri ise yüksek olarak değerlendirilmiştir. Bunun sebebi 5 düzeyli ve çok faktörlü bir modelin koşullu olasılık tablolarının kompleks bir hale gelmesi ve model çözümünün zaman almasıdır. Benzer bir yaklaşım Luo, Zhang, & Wu (2020) tarafından yapılan çalışmada da uygulanmıştır. 3’lü Likert ölçeğine dönüştürülen veriden elde edilen karmaşıklık faktörlerinin ve proje karmaşıklığının olasılık dağılımı Çizelge 4.2’de verilmiştir. Katılımcıların %62’si en son yönettikleri/ yürüttükleri veya ekip üyesi olarak görev yaptıkları AR-GE projesinin karmaşıklığını (PC) yüksek karmaşık olarak belirtmiştir. Bu sonuç,

çalışmanın kapsamını içeren AR-GE projelerinin karmaşıklığının bir problem alanı olarak belirlenmesini desteklemektedir. Ayrıca ekonomik faktörler (MC2), politik/yasal faktörler (MC3), dış paydaşlarla etkileşim ve bağımlılık (GC1), müşteri talep ve beklentilerindeki belirsizlik ve değişkenlik (GC3), insan kaynağının yetkinlik ve yeterliliği (P8), proje süresi (P12) ve projenin stratejik önemi (P13) faktörlerinin düzeyleri de %50 ve üzeri olarak belirtilmiştir.

Çizelge 4.2: Karmaşıklık faktörleri ve proje karmaşıklığının olasılık tablosu.

Karmaşıklık Faktörleri		Düşük Karmaşıklık	Orta Düzey Karmaşıklık	Yüksek Karmaşıklık
MC1	Çevresel Faktörler	%53	%23	%23
MC2	Ekonomik Faktörler	%16	%17	%67
MC3	Politik/Yasal Faktörler	%29	%17	%54
MC4	Teknolojik Faktörler	%34	%23	%43
MC5	Toplumsal Faktörler	%50	%24	%26
GC1	Dış Paydaşlara Bağımlılık ve Etkileşim	%23	%23	%54
GC2	Dış Paydaşların Sayısı ve Çeşitliliği	%33	%26	%41
GC3	Müşteri Talep ve Beklentilerindeki Belirsizlik ve Değişkenlik	%23	%22	%55
GC4	Tedarikçilere Bağımlılık ve Etkileşim	%25	%26	%49
GC5	Rekabet Ortamı ve Rakipler	%50	%20	%30
O1	Örgütsel İklim/Etkileşim ve İş Birliği	%24	%32	%44
O2	Kültürel Yapı ve Çeşitlilik	%48	%29	%23
O3	Finansal Riskler	%35	%23	%42
O4	Operasyonel Riskler	%26	%38	%36
O5	Organizasyonel Yapı	%41	%26	%34
P1	Amaç/Hedeflerdeki Belirsizlik	%47	%21	%32
P2	Amaç/Hedeflerin Sayısı, Çeşitliliği ve Bağımlılığı	%47	%23	%29
P3	Bütçe Kısıtları	%28	%27	%45
P4	Çıktı Yapısındaki Belirsizlik ve Çeşitlilik	%23	%28	%49
P5	Kapsam/Faaliyetlerdeki Belirsizlik	%31	%29	%40
P6	Kapsam Genişliği/ Faaliyetlerin Sayısı ve Çeşitliliği	%31	%27	%42
P7	Kaynakların Kullanılabilirliği	%36	%34	%29
P8	İnsan Kaynağının Yetkinlik ve Yeterliliği (İnsan Kaynağı Yapısı)	%19	%25	%56
P9	İnsan Kaynağındaki Etkileşim ve İş Birliği	%29	%32	%39
P10	İnsan Kaynağında Yönetmelik Yetkinlik	%47	%24	%29
P11	Proje Yönetimi Metot ve Araçları	%42	%34	%24
P12	Proje Süresi	%16	%20	%64
P13	Projenin Stratejik Önemi	%25	%25	%50
PC	Proje Karmaşıklığı	%5	%33	%62

4.2 BBN Modeli Tasarımı ve Koşullu Olasılıkların Hesaplanması

Proje karmaşıklığı faktörlerinin ve olasılıklarının belirlenmesi ile Bayes ağının model tasarımı aşamasına geçilmiştir. Bayes ağ yapısının kurulması için öncelikle bir ağ yapısının tasarlanarak faktörler arasındaki nedensellik ilişkilerin çıkarılması (yapısal öğrenme), sonrasında ise nedensellik ilişkisinin sayısallaştırılması için her bir faktörün

koşullu olasılık tablosunun elde edilmesi gerekmektedir (parametre öğrenmesi). Bayes ağı yapısının oluşturulmasında iki farklı yöntem kullanılmaktadır: veriden öğrenen ağ yapısı ve uzman görüşü ile oluşturulan ağ yapısı. Bu çalışmada nedensellik ilişkisinin de çalışmaya dahil edilmek istenmesi ve bu sayede gerçek hayatı daha iyi temsil eden bir modelin kurulması amacıyla uzman görüşü ve veri birlikte kullanılarak bir ağ yapısı oluşturulmuştur. Bu işlemlerin yapılması için GeNIe Bayes Ağı Modelleme programının akademik versiyonu kullanılmıştır. Bu bölümde, uzman görüşleri ile elde edilen nedensellik ilişkileri, yapısal öğrenme ve parametre öğrenmesine ilişkin yapılan çalışmalar detaylı bir şekilde aktarılmıştır.

4.2.1 Uzman görüşleri ile nedensellik ilişkilerinin belirlenmesi

BBN yapısının oluşturulması için gerekli olan faktörler arasındaki ilişkilerin belirlenmesi sürecinde, bir Öğretim Üyesi ve bir Araştırma Enstitüsünde görev yapan iki Başuzman Araştırmacı ve bir Uzman Araştırmacı (PMP) olmak üzere toplam dört uzmandan destek alınmıştır. Uzmanların 10 yıl ve üzeri proje yönetimi deneyimi bulunmaktadır. Bu süreçte uzmanlardan, 29x29'luk bir matriste yer alan faktörlerinin birbiriyle arasındaki nedensellik ilişkilerini (ebeveyn ve çocuk ilişkileri) belirtmeleri talep edilmiştir. Bu değerlendirmeler öncesinde öncelikle uzmanlara Bayes ağlarının yönlendirilmiş döngüsel olmayan bir ilişki yapısına sahip olması gerekliliği belirtilmiş ve ayrıca bir faktörün en fazla sekiz ebeveyni olmasına dikkat etmeleri istenmiştir. Belirtilen maksimum ebeveyn sayı artırılabilmeyle birlikte, bu sınırlamanın yapılmasının sebebi ebeveyn sayısı ne kadar yüksek olursa nedensel ilişki sayısının artmasına bağlı olarak koşullu olasılık tablosunun çok kompleks bir yapı haline gelmesidir. Ek olarak proje karmaşıklığı faktörünün hedef değişken olduğu ve dolayısıyla proje karmaşıklığının herhangi bir faktörün ebeveyni olamayacağı da uzmanlara ifade edilmiştir. Dört uzmandan gelen sonuçlar neticesinde Bayes ağının kurulumu aşamasında 48 nedensel ilişki elde edilmiştir. Bu ilişkiler Çizelge 4.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.3: Uzmanlar tarafından belirlenen faktörler arası nedensellik ilişkileri.

	MC1	MC2	MC3	MC4	MC5	GC1	GC2	GC3	GC4	GC5	O1	O2	O3	O4	O5	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	PC
MC1										X																			
MC2										X			X																
MC3		X											X														X		
MC4								X																			X		
MC5			X																										
GC1							X																						
GC2													X																
GC3															X		X												X
GC4																	X												
GC5													X																
O1							X																		X				
O2											X													X					
O3														X									X						
O4															X														
O5																							X	X					
P1																	X	X	X	X							X		
P2																					X								
P3																							X						
P4																						X		X					
P5																						X							
P6																							X						
P7																					X								X
P8																							X	X					X
P9																										X			
P10																										X			
P11																											X		
P12																												X	
P13																													X
PC																													X

Çizelge 4.3'te verilen ilişkiler matrisi dikkate alındığında, örneğin makro çevredeki teknolojik ortamla ilgili değişkenlik, belirsizlik ve bağımlılıktan kaynaklanan zorlayıcı koşulların (MC4), müşteri talep ve beklentilerindeki belirsizlik ve değişkenliklere (GC3) sebep olabileceğine dair bir ilişki kurulduğu görülmektedir. Bu ilişkide MC4 ebeveyn, GC3 ise çocuk değişkenidir. İlaveten ekonomik koşullardaki (döviz kuru, faiz oranları, enflasyon, vergiler, teşvikler vb.) değişkenlik, belirsizlik ve risklerden kaynaklanan zorlayıcı durumların (MC2) organizasyonun finansal risklerini (O3); etkilediği, ayrıca, proje organizasyonu ile ilgili finansal risklerden kaynaklanan zorlayıcı koşulların da (zayıf mali yapı, tahsil edilemeyen alacaklar, ödeme zorlukları, vb.) proje bütçesindeki kısıtları (P3) etkilediği görülmektedir.

Diğer bir örnek olarak proje organizasyonundaki bireyler ve bölümler arasındaki iş birliği ve ilişki ortamından kaynaklanan zorlayıcı koşulların (Açıklık, güven, destek, baskı, vb.) (O1), proje ekip üyeleri arasındaki iş birliği ve etkileşimi (P9); proje ekip üyeleri arasındaki ilişkiler ile aralarındaki etkileşim ve bağımlılıklardan kaynaklanan zorlayıcı koşulların (iletişim, koordinasyon, katılım düzeyi, güven duygusu, çatışmalar, vb.) (P9) proje süresini (P12); proje süresi ile ilgili zorlayıcı koşulların da

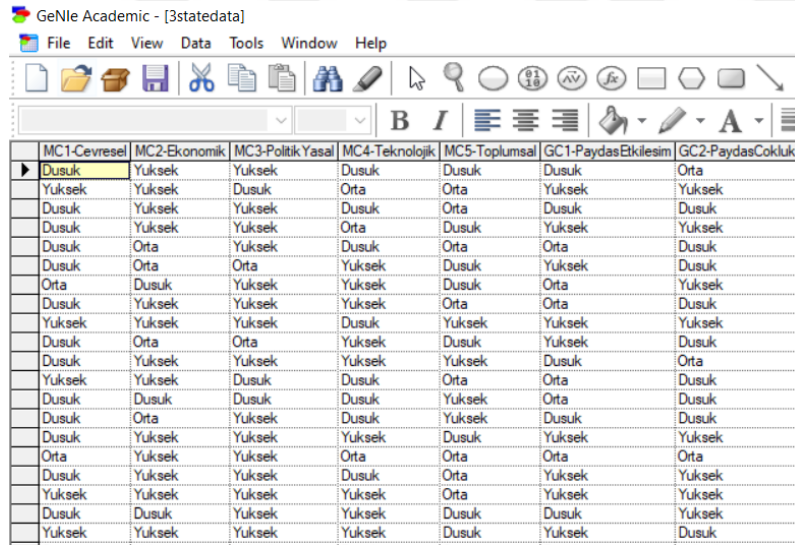
(zaman baskısı, çoklu zaman dilimleri, vb.) (P12) direkt olarak proje karmaşıklığını (PC) etkilediği görülmektedir.

En çok çocuk değişkene sahip olan faktör amaç ve hedeflerdeki belirsizlik (P1) faktörü; P2, P3, P4, P5 ve P12 olmak üzere beş faktörün ebeveyni olmuştur. En çok ebeveyne sahip faktör ise proje karmaşıklığı (PC) faktörü olmuştur.

4.2.2 BBN ağ yapısının oluşturulması (yapısal öğrenme)

Anketle toplanan veri ve faktörler arasındaki nedensellik ilişkilerinin uzman görüşleri ile belirlenmesinin ardından, GeNIe programının akademik versiyonu kullanılarak yapısal öğrenme gerçekleştirilmiştir ve ağ yapısı elde edilmiştir. Ağ yapısının kurulmasında, 28 karmaşıklık faktörü ile proje karmaşıklığı “düğüm” olarak tanımlanmıştır. Uzman görüşleri ile elde edilen nedensellik ilişkileri ise “ok”larla gösterilmiştir. Bu işlemlerin yapılabilmesi için;

- i. Öncelikle programa 3'lü Likert ölçeğindeki veri girişi yapılmıştır. Örnek olarak verinin bir kısmı Şekil 4.5'te gösterilmiştir.

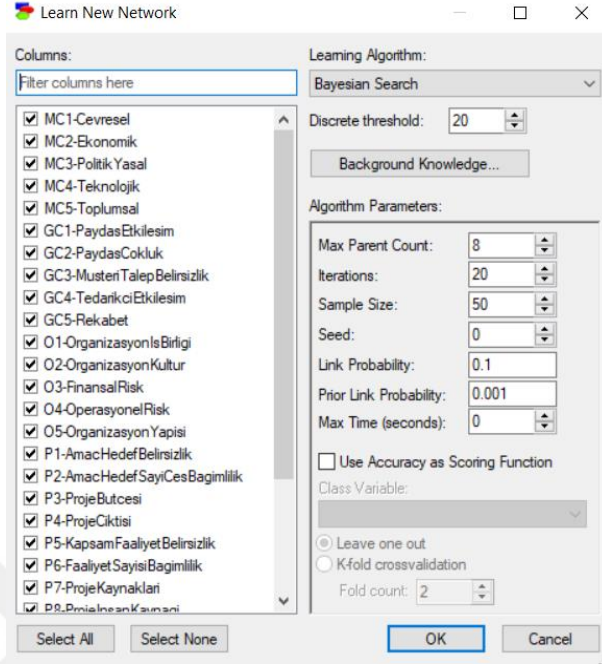


	MC1-Cevresel	MC2-Ekonomik	MC3-Politik Yasal	MC4-Teknolojik	MC5-Toplumsal	GC1-PaydasEtkilesim	GC2-PaydasCokluk
►	Dusuk	Yuksek	Yuksek	Dusuk	Dusuk	Dusuk	Orta
	Yuksek	Yuksek	Dusuk	Orta	Orta	Yuksek	Yuksek
	Dusuk	Yuksek	Yuksek	Dusuk	Orta	Dusuk	Dusuk
	Dusuk	Yuksek	Yuksek	Orta	Dusuk	Yuksek	Yuksek
	Dusuk	Orta	Yuksek	Dusuk	Orta	Orta	Dusuk
	Dusuk	Orta	Orta	Yuksek	Dusuk	Yuksek	Dusuk
	Orta	Dusuk	Yuksek	Yuksek	Dusuk	Orta	Yuksek
	Dusuk	Yuksek	Yuksek	Yuksek	Orta	Orta	Dusuk
	Yuksek	Yuksek	Yuksek	Dusuk	Yuksek	Yuksek	Yuksek
	Dusuk	Orta	Yuksek	Yuksek	Dusuk	Yuksek	Dusuk
	Dusuk	Yuksek	Yuksek	Yuksek	Yuksek	Dusuk	Orta
	Yuksek	Yuksek	Dusuk	Dusuk	Orta	Orta	Dusuk
	Dusuk	Dusuk	Dusuk	Dusuk	Yuksek	Orta	Dusuk
	Dusuk	Orta	Yuksek	Dusuk	Yuksek	Dusuk	Dusuk
	Dusuk	Yuksek	Yuksek	Yuksek	Dusuk	Yuksek	Yuksek
	Orta	Yuksek	Yuksek	Orta	Orta	Orta	Orta
	Dusuk	Yuksek	Yuksek	Dusuk	Orta	Yuksek	Yuksek
	Yuksek	Yuksek	Yuksek	Yuksek	Orta	Yuksek	Yuksek
	Dusuk	Dusuk	Yuksek	Yuksek	Dusuk	Dusuk	Yuksek
	Yuksek	Yuksek	Yuksek	Yuksek	Dusuk	Yuksek	Dusuk

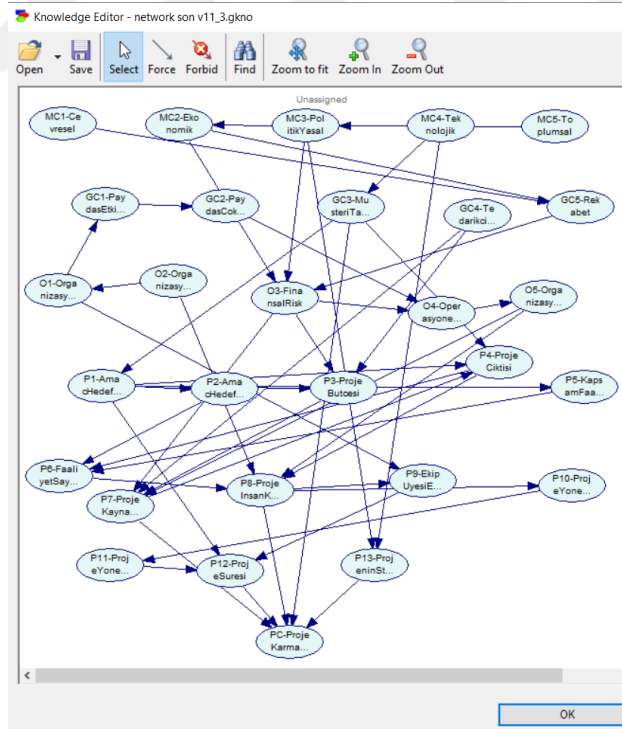
Şekil 4.5: GeNIe veri girişi.

- ii. Veri girişinin ardından, “Data” sekmesinden “Learn new network” bölümü seçilmiştir ve açılan pencerede tüm faktörler modelde kullanılmak üzere seçilmiştir. Algoritma olarak “Bayesian Search” algoritması seçilmiştir ve algoritma parametreleri bölümü programdaki varsayılan değerler kullanılmıştır. Sonrasında uzman görüşleri ile elde edilen ilişkilerin girişinin yapılacağı “Background knowledge” sekmesine tıklanmıştır (Şekil 4.6).

- iii. Açılan pencerede uzman görüşleri ile belirlenen 48 nedensellik ilişkisi tanımlanmıştır (Şekil 4.7).

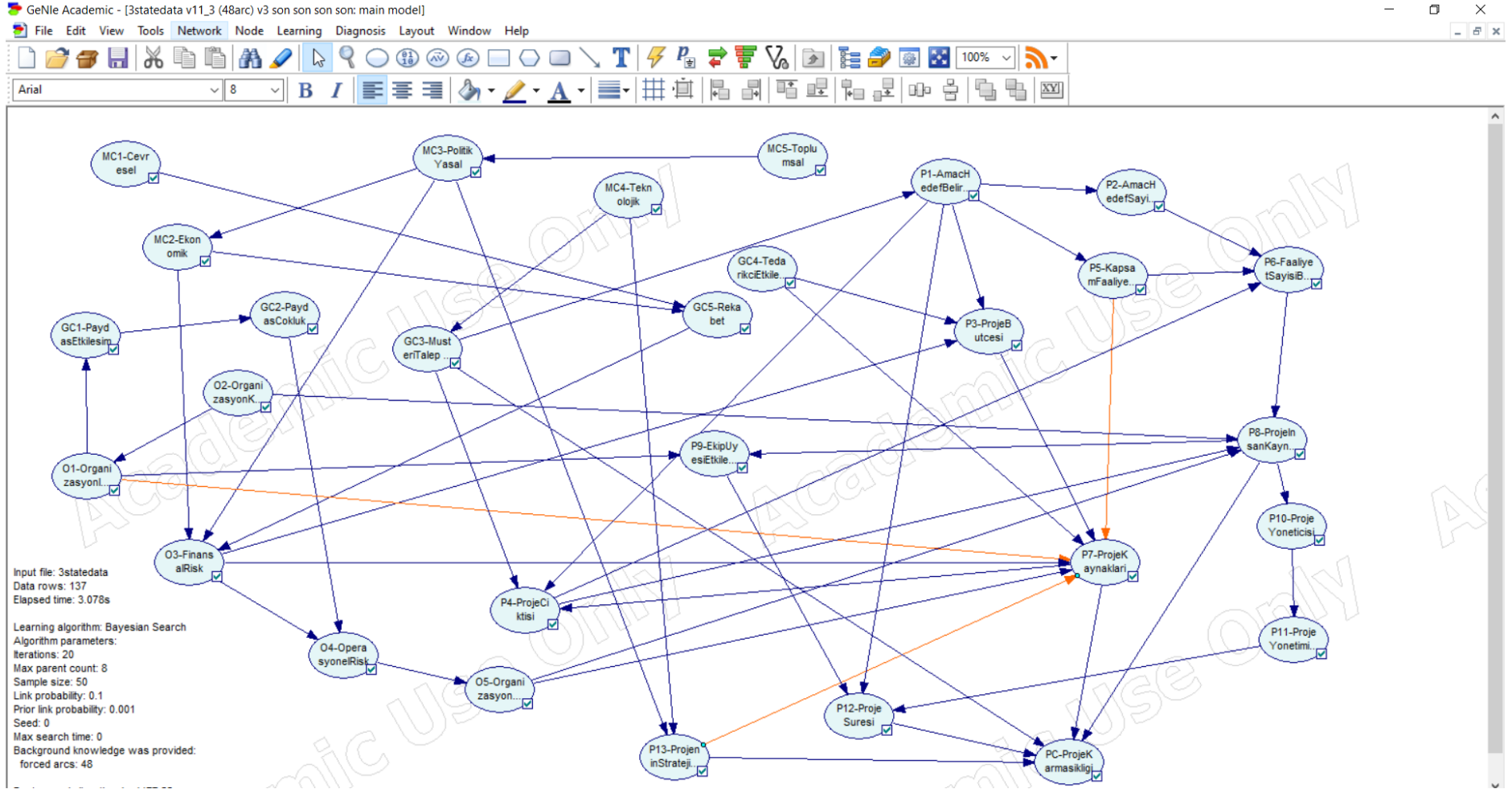


Şekil 4.6: GeNIe’de yapısal öğrenmenin başlatılması.



Şekil 4.7: Uzman görüşünün GeNIe programına girişi.

- iv. Uzman görüşlerinin programa girilmesi ile birlikte yapısal öğrenme süreci tamamlanmıştır ve ilk ağ yapısı elde edilmiştir (Şekil 4.8).

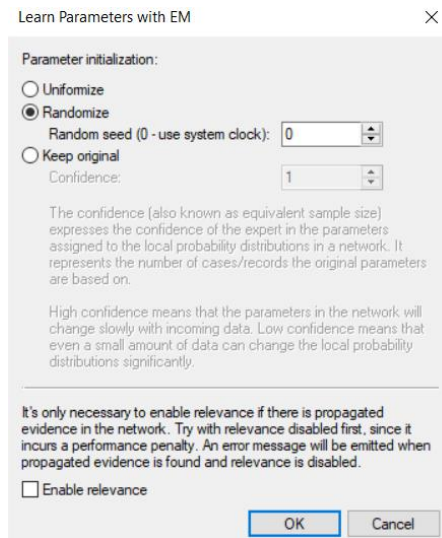


Şekil 4.8: Yapısal öğrenme ile ilk oluşan Bayes ağı yapısı.

- v. Uzman görüşü ve veri ile elde edilen bu ilk ağ yapısında, uzman görüşünden farklı olarak algoritmanın ürettiği ilişkiler incelenmiştir. Yapısal öğrenme sonucunda, proje organizasyonundaki bireyler ve bölümler arasındaki iş birliği ve ilişki ortamından kaynaklanan zorlayıcı koşullardan (Açıklık, güven, destek, baskı, vb.) (O1); proje kapsam ve faaliyetlerine/iş paketlerine ilişkin değişkenlik ve belirsizliklerin oluşturduğu zorlayıcı koşullardan (P5) ve projenin stratejik öneminden ve kritiklik seviyesinden kaynaklanan zorlayıcı koşullardan (P13), planlanan proje kaynaklarının ulaşılabilirliği ve yönetilebilirliği (P7) faktörüne yönlü üç yeni ilişki çıkmıştır. Bu yeni ilişkiler Şekil 4.8’te turuncu renkli olarak gösterilmiştir. Algoritmanın ürettiği bu üç ilişki, anlamlı olup olmadıklarının belirlenmesi amacıyla uzmanlar tarafından değerlendirilmiştir. Değerlendirme sonucunda bu ilişkilerin modelde kalması gerektiği ve sonuç olarak oluşturulan nihai ağ yapısının parametre öğrenmesi için kullanılabileceği belirtilmiştir.

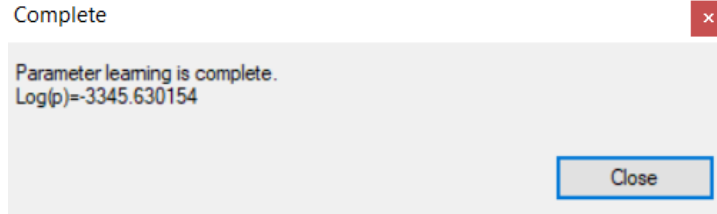
4.2.3 Koşullu olasılıkların belirlenmesi (parametre öğrenmesi)

Yapısal öğrenme ile faktörler arasındaki ilişkilerin belirlenmesinin ardından, bu ilişkilerin sayısallaştırılması, yani olasılık dağılımlarının elde edilmesi için parametre öğrenmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla, GeNIe programının “Learning” sekmesinden “Learn Parameter” bölümü seçilmiştir ve parametre öğrenmesine tüm faktörler ve olasılık düzeyleri eklenmek üzere seçilmiştir. Bu çalışmada yapılan parametre öğrenmesinde daha iyi tahminleme yapması sebebiyle (GeNIe User Manual, 2024) rastgele başlatma (randomize) yöntemi seçilmiştir (Bkz. Şekil 4.9).



Şekil 4.9: Parametre öğrenmesi, parametre başlatma alternatifleri.

Parametre öğrenmesi için ise EM algoritması kullanılmıştır, yani gözlemlenen verilerin iteratif olarak log olasılığını maksimize eden parametreleri bulması beklenmiştir. Log olasılığı tahmin edilen parametrelerin gözlemlenen verileri ne derece iyi açıkladığını ifade etmektedir. Log (p) değeri ise $-\infty$ ve sıfır (0) aralığında değişmektedir ve modelin verilere uyumunu açıklayan bir göstergedir. Yapılan parametre öğrenmesi sonucunda log (p) değeri -3345.630 çıkmıştır (Bkz. Şekil 4.10).



Şekil 4.10: Parametre öğrenmesi sonucunda hesaplanan log (p) değeri.

Parametre öğrenmesi yapılması ile faktörlerin koşullu olasılık tabloları elde edilmiştir. Bayes ağ yapısında tek ebeveyni amaç ve hedeflerdeki belirsizlik (P1) faktörü olan kapsam ve faaliyetlerdeki belirsizlik (P5) faktörünün koşullu olasılık tablosu Şekil 4.11’de örnek olarak verilmiştir. Koşullu olasılık tablosu incelendiğinde, P1 faktörünün “düşük” düzeye sahip olması durumunda, P5 faktörünün “düşük” düzeyde olma olasılığı 0,47 olarak hesaplanmıştır. P1 faktörünün “yüksek” düzeyde olması durumunda ise P5 faktörü 0,73 olasılıkla “yüksek” düzeyde olmaktadır.

Node properties: P5-KapsamFaaliyetBelirsizlik

P1-AmacHedef...	Dusuk	Orta	Yuksek
Dusuk	0.46816917	0.13793103	0.18181818
Orta	0.32497984	0.51724138	0.090909091
Yuksek	0.20685099	0.34482759	0.72727273

Şekil 4.11: P5: Kapsam ve faaliyetlerdeki belirsizlik faktörünün (P5) koşullu olasılık tablosu.

Proje karmaşıklığının koşullu olasılık tablosunun bir bölümü ise Şekil 4.12’de gösterilmiştir. Ağ yapısında, proje karmaşıklığı faktörünün GC3, P7, P8, P12 ve P13 olmak üzere beş ebeveyni bulunmaktadır. Bu ebeveyn faktörlerin “düşük” düzeyde olması durumunda, proje karmaşıklığı (PC) faktörünün “düşük” olma olasılığı 0,49

olarak belirlenmiştir. GC3, P7, P8, P12 faktörünün “düşük” düzeyde ve P13 faktörünün “yüksek” düzeyde olması durumunda ise PC faktörü 0,83 olasılıkla “yüksek” karmaşık olmaktadır.

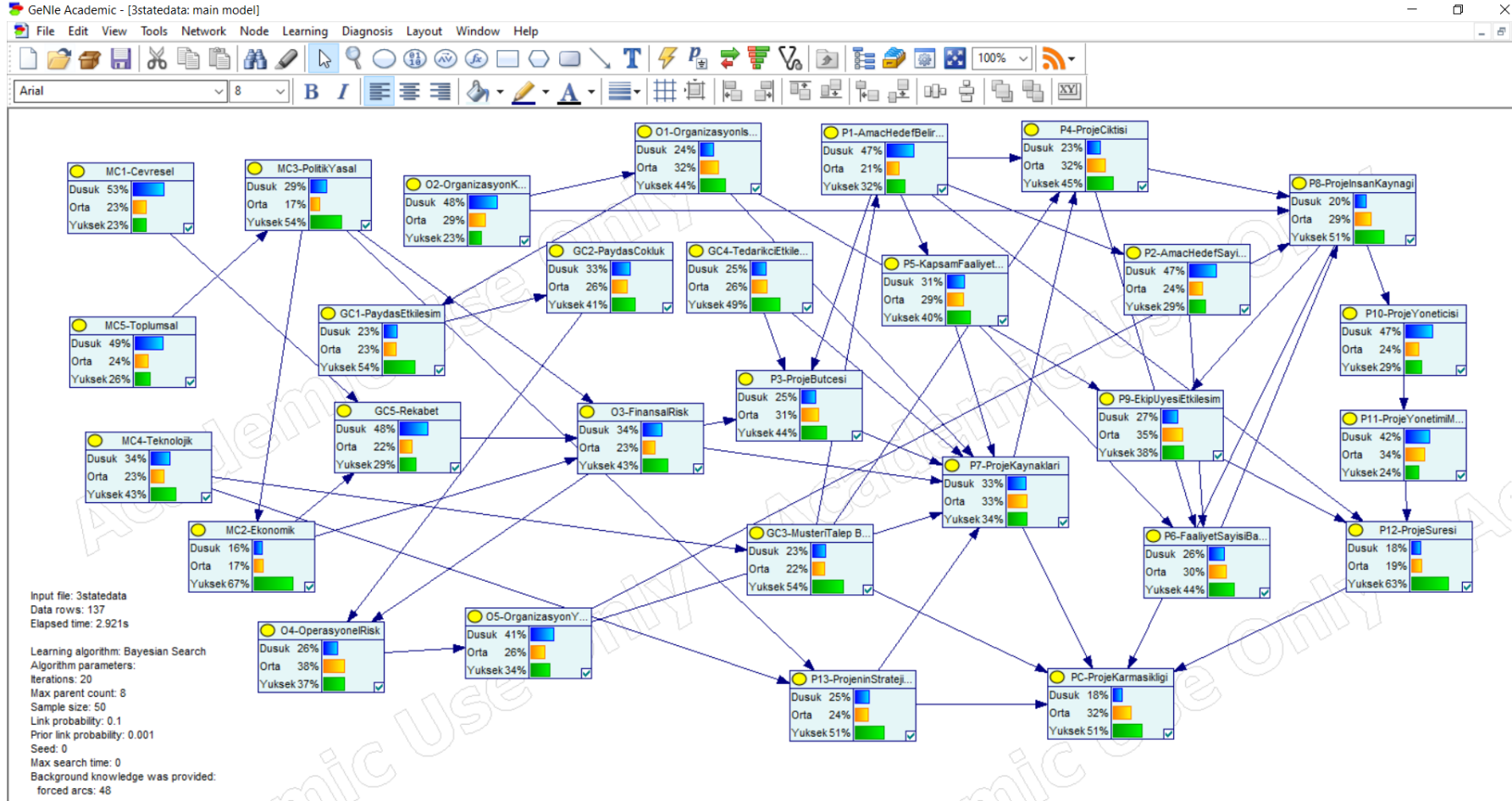
Node properties: PC-ProjeKarmasikligi

Node properties: PC-ProjeKarmasikligi			
General Definition Format User properties Value			
GC3-Musteri Talep Belirsizlik			
P7-ProjeKaynaklari			
P8-ProjeInsanKaynagi			
P12-ProjeSuresi	Dusuk		
P13-ProjeninStratejikOnemi	Dusuk	Orta	Yuksek
Dusuk	0.48983842	0.48148148	0.083333333
Orta	0.28724097	0.48148148	0.083333333
Yuksek	0.22292062	0.037037037	0.833333333

Şekil 4.12: Proje karmaşıklığı faktörünün koşullu olasılık tablosu (kısmi veri).

Yukarıda bahsedildiği üzere model kullanılan 28 karmaşıklık faktörü ile proje karmaşıklığı faktörünün koşullu olasılık tabloları elde edilmiştir. GeNIe programında “Node” sekmesi üzerinden “View as” seçeneği “Bar chart” olarak seçilmiştir ve koşullu olasılık tabloları sonucunda her bir faktör için elde edilen karmaşıklık olasılıkları tek bir grafiksel gösterimle Şekil 4.13’te verilmiştir. Grafikte gösterildiği üzere proje karmaşıklığı (PC) faktörünün düşük olma olasılığı %18, orta olma olasılığı %32 ve yüksek olma olasılığı ise %52 ile en yüksek olasılığa sahip olarak çıkmıştır. Bu sonuç, proje karmaşıklığının önsel olasılık dağılımlarında elde edilen sonuçlarla da benzerlik göstermektedir.

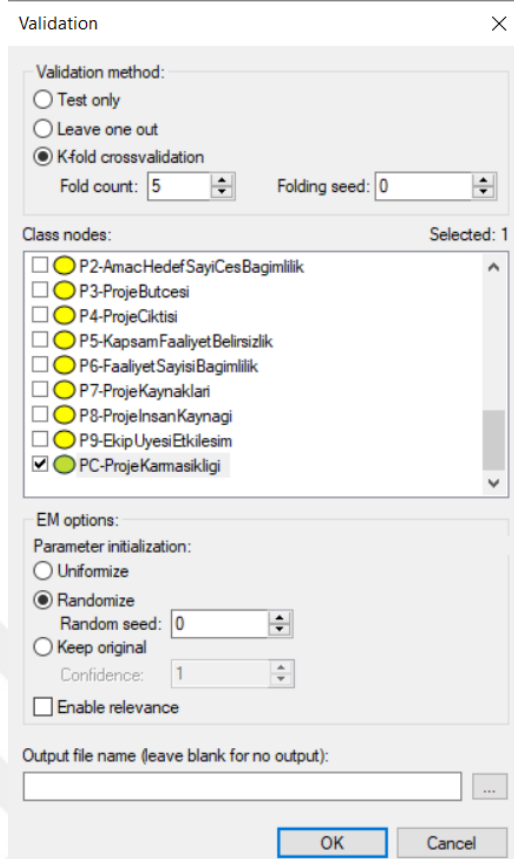
Bu olasılıkların belirlenmesi ise model analizleri için bir altyapı oluşturulmuştur. Ancak analiz aşamasına geçmeden önce model geçerliliğinin test edilmesi ve modelin gerçek veriyi ne kadar doğrulukla açıkladığının tespit edilmesi gerekmektedir. Bir sonraki bölümde model validasyonu adımı açıklanmıştır.



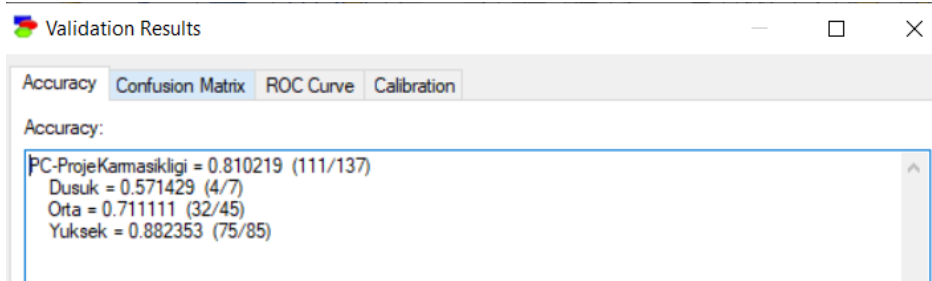
4.3 Model Validasyonu

Bu çalışmada, tasarlanan modelin gerçek hayatı ne derece yansıttığını tespit etmek amacıyla K-katmanlı çapraz doğrulama yöntemi kullanılarak bir validasyon gerçekleştirilmiştir. Model doğruluğunun %80 ve üzeri olduğu modeller etkili modeller olarak kabul edilmektedir (Cooper & Herskovits, 1992). Bu doğrultuda, GeNIe programının “Learning” sekmesinden “Validate” bölümü seçilerek validasyon süreci başlatılmıştır. Öncelikle modelde kullanılan tüm faktörlerin verisi validasyon sürecine dahil edilmiştir. Sonrasında, validasyonda kullanılacak olan doğrulama yöntemi seçilmiştir. Bu çalışmada aynı veri seti üzerinden bir test yapılması amacıyla K-katmanlı çapraz doğrulama yöntemi seçilmiştir. Bu doğrulamanın yapılabilmesi için ise k değerinin belirtilmesi gerekmektedir. k değeri genellikle 5 ile 10 arasında bir değer almaktadır. Veri setinin boyutu göz önünde bulundurulduğu k değeri bu çalışma için “5” olarak belirlenmiştir. Yani, veri seti 5 eşit parçaya bölünerek 4 (5-1) parça üzerinden eğitmekte ve k 'nın içindeki son veri seti üzerinden test gerçekleştirilmektedir. Bunun sonucunda, 5 veri seti için doğrulama verisi üretilmiştir ve süreç 5 kez tekrar edilmiştir. k değerinin belirlenmesine ek olarak parametre başlatma yönteminin de belirlenmesi gerekmektedir. Validasyon sürecinde, parametre öğrenmesinde olduğu gibi rastgele başlatma (randomize) yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca, validasyon sürecinde test edilmesi gereken değişkenin de (faktörün) seçilmesi gerekmektedir. Bu çalışmanın temel amacı proje karmaşıklığının değerlendirilmesi olduğu için proje karmaşıklığı faktörü (PC) sınıf düğüm (class node) olarak seçilmiştir. Bu adımların tamamı Şekil 4.14'te gösterilmektedir.

Gerekli bilgilerin tanımlanması ile birlikte validasyonu süreci başlatılmıştır ve model doğruluğu elde edilmiştir. Modelin 137 verinin 111'ini doğru tahmin ettiği ve %81 doğrulukla (accuracy) çalıştığı sonucuna varılmıştır (Bkz. Şekil 4.15). Karışıklık matrisi (confusion matrix) incelendiğinde (Bkz. Şekil 4.16), proje karmaşıklığının gerçekte 7 olan “düşük” karmaşıklık veri sayısından, 4'ü model tarafından tahmin edilebilmiştir. 45 tane olan “orta” karmaşıklık verisinin, 32'si; toplam 85 “yüksek” karmaşıklık verisinin ise 75'i model tarafından doğru tahminlenmiştir.



Şekil 4.14: Model validasyonunun gerçekleştirilmesi.



Şekil 4.15: BBN modelinin doğruluk sonuçları.

		Predicted		
		Dusuk	Orta	Yuksek
Actual	Dusuk	4	1	2
	Orta	3	32	10
	Yuksek	2	8	75

Şekil 4.16: BBN modelinin karışıklık matrisi.

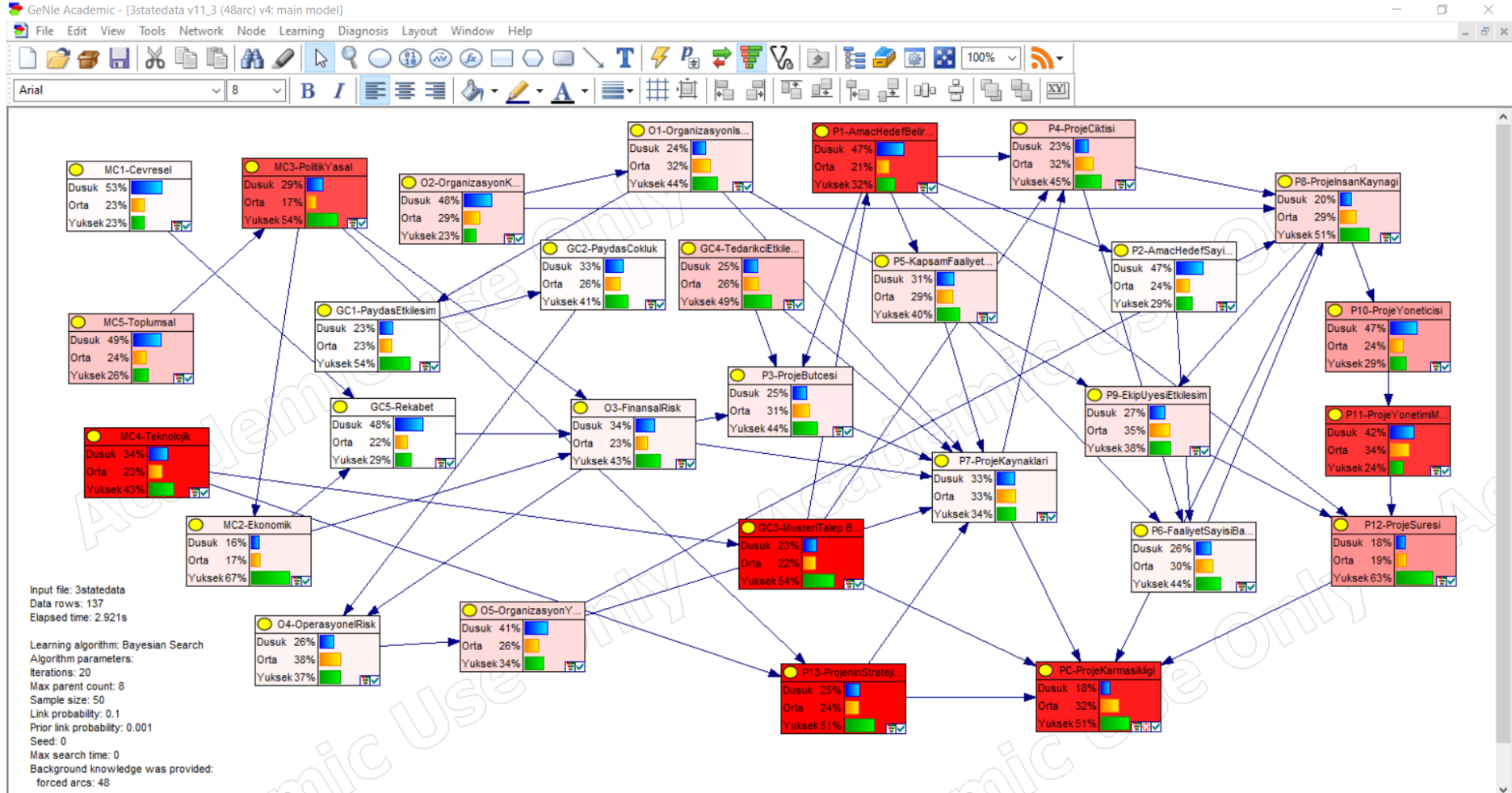
4.4 Model Analizleri

Model doğruluğunun %81 çıkması ile modelin AR-GE projelerinin karmaşıklığını etkin bir şekilde değerlendirebilecek bir model olduğu tespit edilmiştir. Bunun sonucunda, model analizleri aşamasına geçilmiştir. Bu çalışma kapsamında duyarlılık analizi, etki zinciri analizi ve senaryo analizleri gerçekleştirilmiştir.

4.4.1 Duyarlılık analizi

Duyarlılık analizi, proje karmaşıklığının en duyarlı olduğu, yani hangi faktördeki değişikliklerden yüksek derecede etkilendiği ve olasılığının nasıl değiştiğini tespit etmek amacıyla yapılmıştır. Bu doğrultuda, öncelikle GeNIe programında proje karmaşıklığı (PC) faktörü hedef düğüm (target node) olarak tanımlanmıştır ve programın üst sekmesinde yer alan “Sensitivity Analysis” seçilerek duyarlılık analizi sonuçları elde edilmiştir (Bkz. Şekil 4.17). Duyarlılık analizinde, proje karmaşıklığının duyarlı olduğu faktörler kırmızı renk ile gösterilmektedir. Kırmızı renginin tonunun açılarak gitmesi duyarlılık düzeyinin azaldığı anlamına gelmektedir. Dolayısıyla, AR-GE projelerinin en çok duyarlı olduğu faktörler sırasıyla aşağıdaki gibidir:

- **P13:** Projenin stratejik öneminden ve kritiklik seviyesinden kaynaklanan zorlayıcı koşullar
- **GC3:** Müşteri talep ve beklentilerindeki ile ilgili değişkenlik ve belirsizliklerden kaynaklanan zorlayıcı koşullar
- **MC4:** Teknolojik ortam ile ilgili değişkenlik, belirsizlik ve bağımlılıktan kaynaklanan zorlayıcı koşullar
- **P1:** Projenin amaç ve hedeflerine ilişkin belirsizliklerin oluşturduğu zorlayıcı koşullar
- **P11:** Proje yönetimi metot ve araçlarının yapısı ve bunların koordineli bir şekilde kullanımı ile ilgili zorlayıcı koşullar
- **MC3:** Politik ve yasal koşullardaki değişkenlik ve belirsizlikten kaynaklanan zorlayıcı durumlar



Şekil 4.17: Duyarlılık analizi sonucu.

AR-GE projelerinin en duyarlı olduğu faktör projenin stratejik önemi (P13) faktörü çıkmıştır. Yenilikçi ürünler, hizmetler veya süreçler geliştirmeyi amaçlayan AR-GE projeleri, ulusal ve uluslararası rekabet gücünün arttırılmasında kritik bir öneme sahiptir. Aynı zamanda teknolojik inovasyonun temeli olan bu projeler, Birleşmiş Milletlerin Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri arasında da yer almaktadır. Ayrıca, AR-GE harcamaları ülkelerin gelişmişlik seviyeleri ile ilişkilendirilmektedir. Dolayısıyla, AR-GE projelerinin stratejik önemi ve kritikliğinin proje karmaşıklığı üzerinde en duyarlı faktör olarak çıkmış olması bu projelerin önemini destekler niteliktedir.

AR-GE projelerinin en duyarlı olduğu ikinci faktör ise müşteri talep ve beklentilerindeki belirsizlik ve değişkenlik (GC3) faktörüdür. Müşteri taleplerindeki belirsizlik ve değişiklikler, projenin amaç ve hedeflerinde belirsizliğe yol açarak gereksinimlerin tanımlanmasında belirsizlik oluşturabilmektedir. Aynı zamanda, esnek yönetim gerekliliği, doğru bilgi akışının sağlanması, kaynakların yönetimi birçok yönetsel zorluklara sebep olabilmektedir. Ek olarak tasarım veya geliştirme süreçlerinde sürekli değişikliklere sebep olarak tasarım süresinin uzaması, ek kaynak ihtiyacı, planlanan bütçeden ve proje süresinden sapma gibi birçok soruna sebep olabilmektedir. Dolayısıyla proje karmaşıklığının bu faktöre duyarlı olması beklenen bir sonuç olarak değerlendirilmektedir.

Makro çevredeki teknolojik belirsizlikler, değişimler ve bağımlılıklar faktörü (MC4) de proje karmaşıklığının en duyarlı olduğu faktörler arasındadır. AR-GE projeleri yenilikçi çıktılar üretmek üzerine yapılan projeler olması sebebiyle teknolojinin kullanım oranının en yüksek olduğu proje türlerinden biridir. Örneğin projede kullanılması planlanan teknolojinin, ülkede veya ilgili şirkette yeterli olgunluk düzeyinde olmaması, AR-GE süreci için büyük bir risk barındırmaktadır. Aynı zamanda yeterli olgunluğa sahip teknolojilerin sürekli değişmesi de geliştirilen tasarımda veya prototiplerde sık sık test ihtiyacı doğurabilmektedir ve bu durumda değişikliklere uyum sağlama noktasında zorluklar yaşanabilmektedir. Dolayısıyla MC4 faktörünün, özellikle AR-GE projelerinin karmaşıklık düzeyinde dikkate değer bir fark yaratacak bir faktör olarak çıkması, bu çalışmanın geçerliliğini destekler niteliktedir.

P13, GC3 ve MC4 faktörlerine göre proje karmaşıklığının daha az duyarlı olduğu faktörler ise amaç ve hedeflerdeki belirsizlik (P1), proje yönetimi metot ve araçlarının yapısı ve entegre bir şekilde çalışması (P11) ve politik ve yasal koşullardaki

değişkenlik ve belirsizlik (MC3) faktörleri olarak çıkmıştır. Bir projede amaçların ve hedeflerin belirsiz olması (P1), projenin planlanması, uygulanması ve izlenmesi süreçlerini oldukça zorlayan ve bazı durumlarda kapsamın genişletilmesi, gereksinimlerin değişmesi, kaynaklarının kullanılabilirliği, yanlış kaynak atamalarının yapılması, projedeki risklerin artması, iletişim ve iş birliğindeki zorluklar ile ekip içindeki motivasyonun azalmasına kadar birçok olumsuz etkiye sahip olabilmektedir. Dolayısıyla proje başarısını da önemli oranda etkileyebilmektedir.

Karmaşık projelerinin yönetilmesi daha esnek ve değişikliklere hızlı yanıt verebilen bir yönetim metodolojisi gerektirmektedir. Bu metodolojiye uygun olarak da gerekli araçların planlanması ve proje sürecinde faaliyetleri ve ekipler arası etkileşimi ve iletişimi aksatmayarak entegre bir şekilde kullanılması gerekmektedir. Yapılan bu çalışmanın sonuçlarına göre de proje yönetiminde kullanılan metot ve araçların yapısı ve entegre bir şekilde çalıştırılması (P11), proje karmaşıklığının duyarlı olduğu bir faktör olarak çıkmıştır.

Politik ve yasal koşullardan kaynaklanan zorluklar (MC3), proje karmaşıklığının duyarlı olduğu faktörlerden biri olarak çıkmıştır. AR-GE projeleri regülatif kalite gereksinimlerinin yoğun olduğu, dolayısıyla standartlara uyumun önemli olduğu projelerdir. Örneğin ilaç, savunma sanayi, otomotiv sektörü gibi birçok sektörde uyulması gereken katı standartlar ve yasal düzenlemeler bulunmaktadır. Bu düzenlemeler, projelerde kapsam genişliği oluşturabilmekte ve proje süresini uzatabilmektedir. Politik ortam ise ekonomik istikrarsızlık, tedarik bağımlılıklardan kaynaklanan zorluklar gibi sorunlara yol açabilmektedir. Örneğin ülkeler arasındaki ambargolar, projede kullanılacak olan ve yurt dışından tedarik edilen çok kritik bir komponentin tedarikini olumsuz etkileyebilmekte, operasyonel kesintilere yol açabilmekte veya maliyetleri çok artırabilmektedir. Aynı zamanda yatırım belirsizliklerine de sebep olabilmektedir. Dolayısıyla politik ve yasal zorluklarının, proje karmaşıklığının duyarlı olduğu bir faktör olarak çıkması beklenen bir sonuç olarak değerlendirilmektedir.

4.4.2 Etki zinciri analizi

Bir Bayes ağında düğümler arasındaki bağımlılıkların oklarla gösterildiği daha önceki bölümlerde açıklanmıştır. Bu koşullu olasılıklar arasındaki bağımlılık derecesini ise etki zinciri analizi göstermektedir (Luo, Zhang, & Wu, 2020). Şekil 4.18’de bu çalışma

için yapılan etki analizinin grafiksel gösterimi verilmiştir. Bu grafikte faktörler arasındaki okların kalınlıklarının farklılık gösterdiği görülmektedir. Okların kalınlıkları, faktörler arası etkinin yoğunluğunu ifade etmektedir. Bu yoğunluk Öklid uzaklığının ortalama değerine (düşük, orta, yüksek karmaşıklık durumu) göre hesaplanmıştır. Etki zinciri analizinin sonuçlarına bakıldığında, en yoğun bağımlılığın amaç ve hedeflerdeki karmaşıklık faktörü (P1) ile amaç ve hedeflerin sayısı, çeşitliliği ve bağımlılıkları faktörü (P2) arasında çıktığı görülmektedir. Projede amaç ve hedeflerin belirsiz olması, amaç ve hedeflerin net olmaması anlamına gelmektedir. Net olmayan hedefler, daha çeşitli ve sayıca fazla hedeflerin oluşmasına sebep olabilmektedir. Bu çalışmada da bu iki faktör arasındaki etki yoğunluğunun yüksek çıkmış olması bu ilişkiyi desteklemektedir. Amaç ve hedeflerin belirsiz olması, amaç ve hedeflerin sayısı ve çeşitliliğini yüksek derecede etkilediği gibi, bu çeşitlilik ve sayıca fazla hedefler, proje yönetimi sürecinde planlama dahil olmak üzere birçok zorluğa sebep olabilmektedir. Bu noktada, detaylı planlamalarla mümkün olduğunca amaç ve hedeflerin netleştirilmesi ve bu belirsizliğin azaltılması için stratejiler geliştirilmesi önerilmektedir.

Organizasyonun finansal riskleri faktörü (O3) ile proje bütçesi kısıtları faktörü (P3) ise P1 ve P2 arasındaki etki derecesinden sonraki aralarında en yoğun etkiye sahip olan faktörlerdir. Bu durum, organizasyonun finansal gücünün, ilgili organizasyonda yapılan projelerin mali yönetimi üzerinde etkili olduğunu göstermektedir. Finansal riskler, projeler üzerinde mali belirsizliklere sebep olabilmektedir. Dolayısıyla, projenin bütçe yönetiminde, organizasyonun finansal risklerinin de göz önünde bulundurulması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Bağımlılıkların en yoğun olduğu ebeveyn düğümlerden başlamak üzere iki nedensel zincir elde edilmiştir. Bu zincirlerden ilki, “Projenin amaç ve hedeflerindeki belirsizlik (P1)” → “Projenin amaç ve hedeflerinin sayısı, çeşitliliği ve bağımlılıklar (P2)” → “Projenin insan kaynağı yapısı (P8)” → “Proje ekip üyeleri arasındaki etkileşim ve iş birliği (P9)” → “Proje karmaşıklığı (PC)”dır. Projenin amaç ve hedeflerindeki belirsizlik, daha önce de bahsedildiği üzere amaç ve hedeflerin çeşitlenmesine ve sayısı artmasına neden olmaktadır. Çeşitli hedefler için ise farklı yetkinlikte insan kaynağına ihtiyaç duyulabilmektedir. Proje ekip üyelerinin çeşitliliğine bağlı olarak da etkileşim ve iş birliği yönetmesi zor bir hale gelebilir. Bu durum da proje karmaşıklığına sebep olmaktadır. Görüldüğü üzere bu zincirin tamamı “proje

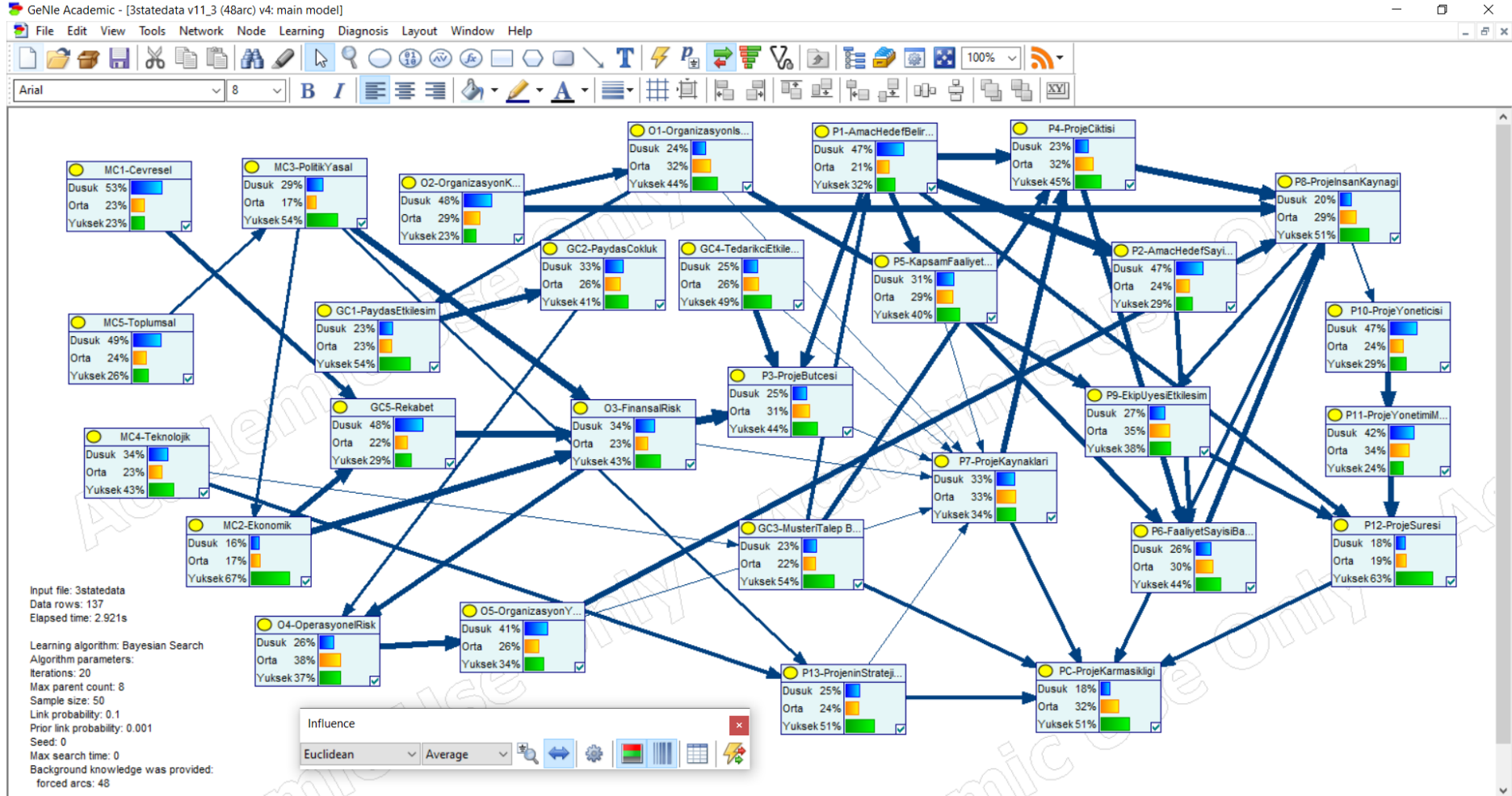
karakteristiği” faktörlerine aittir. Zincirdeki faktörler senaryo analizinde de kullanılmıştır.

İkinci nedensel zincir ise “Ekonomik ortamdaki zorluklar (MC2) → Rekabet ortamından kaynaklanan zorluklar (GC5)” → “Organizasyonun finansal riskleri (O3)” → “Planlanan proje bütçesi yapısı (P3)” → “Planlanan proje kaynaklarının kullanılabilirliği ve yönetimi (P7)” → “Proje karmaşıklığı (PC)” şeklindedir. Makro çevrede ekonomik zorluklar veya istikrarsızlıklar, rekabet ortamını etkilemektedir. Rekabet ortamı ise organizasyonda finansal risklere sebep olabilmekte ve dolayısıyla proje bütçesi üzerinde kısıt oluşturabilmektedir. Bu durumda, planlanan proje kaynaklarına erişim noktasında zorluklar yaşanabilmekte ve sonuç olarak proje karmaşıklığı oluşturmaktadır. Bu nedensel zincirde, makro çevrenin görev çevresi üzerinde, görev çevresinin organizasyonel faktörler üzerinde ve organizasyonel faktörlerin proje karakteristiği üzerinde bir etki oluşturması ile nedensel bir zincir oluşturduğu görülmektedir. Bu zincirdeki faktörler de senaryo analizinde kullanılmıştır.

Etki zinciri analizinde elde edilen faktörler arası etki yoğunluğunun sayısal değerleri EK C’de (Bkz. Çizelge C.1) verilmiştir.

4.4.3 Senaryo analizleri

İleriye Doğru Doğrulama analizlerinden biri olan senaryo analizinde, farklı senaryolar altında gelecek çıktıların tahminlenmesi yapılmaktadır. Bu amaçla öncelikle makro çevre, görev çevresi, organizasyon ve proje karakteristiği altındaki faktörler grup olarak GeNle programında “yüksek” düzeyde tanımlanmıştır ve dört ayrı senaryo için proje karmaşıklık düzeylerinin olasılıkları elde edilmiştir. Aynı zamanda proje karmaşıklığının en çok duyarlı olduğu faktörler için de hem ayrı ayrı hem de tamamı için senaryo analizleri yapılmıştır. Ek olarak etki zinciri analizinde çıkan iki nedensel zincir üzerindeki faktörler için de senaryo analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar Çizelge 4.4’te paylaşılmıştır. Yapılan senaryo analizlerinin GeNle programındaki grafiksel ve olasılıksal gösterimleri EK D’de verilmiştir.



Şekil 4.18: Etki zinciri analizi grafik gösterimi.

Çizelge 4.4: Senaryo analizlerinin proje karmaşıklığı üzerine etkisi.

Senaryo	Karmaşıklık Kategorisi/ Faktörü	Karmaşıklık Durumu	Proje Karmaşıklığı		
			Düşük	Orta	Yüksek
1	Makro Çevre (5)	Yüksek	%17	%31	%52
2	Görev Çevresi (5)	Yüksek	%14	%30	%56
3	Organizasyon (5)	Yüksek	%16	%33	%51
4	Proje Karakteristiği (13)	Yüksek	%1,5	%1,5	%97
5	P13	Yüksek	%13	%25	%62
6	GC3	Yüksek	%13	%31	%56
7	MC4	Yüksek	%16	%30	%54
8	P1	Yüksek	%14	%30	%56
9	P11	Yüksek	%14	%31	%55
10	MC3	Yüksek	%16	%32	%52
11	P13	Yüksek	%5	%18	%77
	GC3	Yüksek			
	MC4	Yüksek			
	P1	Yüksek			
	P11	Yüksek			
	MC3	Yüksek			
12	P1	Yüksek	%12	%33	%55
	P2	Yüksek			
	P8	Yüksek			
	P9	Yüksek			
13	MC2	Yüksek	%16	%26	%58
	GC5	Yüksek			
	O3	Yüksek			
	P3	Yüksek			
	P7	Yüksek			

Senaryo analizlerine öncelikle proje karmaşıklığı kategorileri ile başlanmıştır. Bu amaçla, sırasıyla makro çevre faktörleri (Şekil D.1), görev çevresi faktörleri (Şekil D.2), organizasyonel faktörler (Şekil D.3) ve proje karakteristiği faktörlerinin (Şekil D.4) olasılıkları “yüksek” olarak tanımlanmıştır ve proje karmaşıklığının olasılığı gözlemlenmiştir (Senaryo1-4). Diğer üç kategorinin karmaşıklığının yüksek olması proje karmaşıklığını %50 üzerinde yüksek karmaşık yaparken, proje karakteristiği kategorisindeki 13 faktörün yüksek karmaşık olması, proje karmaşıklığını %97 oranında yüksek karmaşık yapmaktadır. Bu sonuç, dört kategori içerisindeki en kritik karmaşıklık grubunun proje dinamikleri olduğunu göstermektedir.

Bir sonraki senaryo analizlerinde (Senaryo5-10), proje karmaşıklığının en duyarlı olduğu altı faktörün proje karmaşıklığı ayrı ayrı yüksek olarak tanımlanmıştır ve proje karmaşıklığı üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir. Bu senaryo analizlerinde, proje

karmaşıklığının en duyarlı olduğu (P13) faktörden daha az duyarlı olduğu (MC3) faktöre doğru proje karmaşıklık olasılıklarında bir azalma olduğu görülmektedir. Örneğin, en duyarlı olunan faktör olan projenin stratejik önemi (P13) faktörünün düzeyi yüksek olarak tanımlandığında, proje karmaşıklığı %62 ile yüksek çıkmaktadır. Öte yandan, politik ve yasal zorluklar (MC3) yüksek olarak tanımlandığında, proje karmaşıklığı %52 oranında yüksek olmaktadır. Dolayısıyla duyarlı olunan faktörler arasında olasılıksal farklılıklar olsa da bu faktörlerin yüksek düzeyde olması durumunda proje karmaşıklığı %50'den fazla bir oranla yüksek çıkmaktadır (Bkz. Şekil D.5, Şekil D.6, Şekil D.7, Şekil D.8, Şekil D.9, Şekil D.10).

Bir diğer senaryo analizinde ise (Senaryo11), proje karmaşıklığının en duyarlı olduğu altı faktör aynı anda yüksek düzeyde tanımlanmıştır ve bunun sonucunda, proje karmaşıklığı %77 oranında yüksek çıkmaktadır (Bkz. Şekil D.11).

Son iki senaryo analizinde ise, etki zinciri analizindeki iki nedensel zincir üzerindeki karmaşıklık faktörleri analiz edilmiştir. Öncelikle, en yoğun nedensel zincire sahip olan P1, P2, P8 ve P9 faktörlerinin tamamı yüksek düzeyde tanımlandığında, proje karmaşıklığının %55 oranında yüksek çıktığı gözlemlenmiştir (Bkz. Şekil D.12). Bu faktörlerin tamamı aynı zamanda proje karakteristiği faktörleridir.

Son olarak diğer nedensel zincir üzerinde olan MC2, GC5, O3, P3 ve P7 faktörlerinin tamamı yüksek düzeyde tanımlanmış ve sonuç olarak proje karmaşıklığı %58 oranında yüksek düzeyde çıkmıştır. Görüldüğü üzere, bu senaryo analizine, makro çevre, görev çevresi, organizasyon ve proje karakteristiği kategorilerinin tamamından en az bir faktör dahil edilmiştir (Şekil D.13).

Yapılan senaryo analizleri ile proje karmaşıklığını etkileyen faktörlerin etkileri olasılıksal olarak analiz edilmiştir. Bunun sonucunda, proje karakteristiği faktörlerinin proje karmaşıklığı üzerinde en yüksek etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte yapılan 13 senaryo analizinin tamamında proje karmaşıklığının %50'nin üzerinde yüksek çıktığı gözlemlenmiştir. Bu bulgular, proje yönetiminde karmaşıklığı azaltmak için belirli faktörlerin sürekli izlenmesi gerekliliğini belirtmektedir. Aynı zamanda stratejik planlamalarla bu faktörlere odaklanılması önerilmektedir.



5. SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME

Proje başarısı üzerinde kritik bir rol oynayan karmaşıklığın, anlaşılması ve nicel olarak değerlendirilmesini sağlamak amacıyla BBN yöntemi kullanılarak AR-GE projeleri kapsamında bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma ile AR-GE projelerinde karmaşıklık yaratan 28 faktör belirlenmiştir. Bu faktörler arasındaki ilişkilerin belirlenmesinde, daha gerçekçi bir temel oluşturmak amacıyla uzman görüşleri de sürece dahil edilmiştir. Anket yöntemiyle toplanan veri ve uzman görüşleri ile bir yapısal öğrenme yapılmış ve Bayes ağı yapısı kurulmuş ve parametre öğrenmesi ile faktörlerin koşullu olasılık tabloları elde edilmiştir. Kurulan modelin gerçek veriyi %81 doğrulukla tahminlemesi sonucunda, analiz ve çıkarımlar yapılarak bu çalışmanın teorik ve pratik katkısının sunulması hedeflenmiştir.

Bu çalışmada BBN yönteminin seçilmesinin sebebi, proje karmaşıklığının nicel olarak değerlendirilmesine ve belirsizlik içeren farklı senaryolar altında analiz edilmesine olanak sağlamasıdır. BBN, kompleks sistemlerdeki belirsizliği anlamak ve yönetmek için kullanılan pratik bir yöntem olarak bilinmektedir. Proje karmaşıklığının yönetilmesinde ise karmaşıklığa neden olan faktörlerin tanımlanması ve bu faktörler arasındaki ilişkilerin modellenmesi ile sistemdeki belirsizliğin yönetilmesi noktasında karar vericilere güçlü çıkarımlar sunabilmektedir.

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesi için gerekli olan, karmaşıklık faktörlerinin belirlenmesi, faktörler arasındaki nedensellik ilişkilerinin tanımlanması, yapısal öğrenme sonucunda çıkabilecek anlamsız ilişkilerin değerlendirilmesi ile modelin iyileştirilmesi gibi birçok konuda uzman görüşlerine başvurulmuştur. Bunun amacı, daha çok sezgisel olarak yönetilmesi tercih edilen proje karmaşıklığının, daha gerçekçi bir modelleme ile değerlendirilmek istenmesidir. Bu çalışmada, model doğruluğunun %81 olarak çıkmış olması, bunun bir sonucu olarak nitelendirilmektedir.

AR-GE projelerine özgü nedensel temellere dayalı olarak kurulan ve doğruluğu kanıtlanan bu modelde duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir ve AR-GE projelerinin karmaşıklığın en duyarlı olduğu altı faktör tespit edilmiştir. Aynı faktörler ile senaryo analizleri yapılmış ve proje karmaşıklığının bu faktörlerden ne derece etkilendiği

gözlenerak ileriye yönelik çıkarımlar yapılmıştır. Proje yönetimi profesyonellerinin belirlenen altı faktörün etkilerini göz önünde bulundurarak belirlenecek etkili stratejilerle karmaşıklığı yönetmesi önerilmektedir.

Proje ekosisteminde yer alan makro çevre, görev çevresi, organizasyon ve proje karakteristiğı faktörleri olmak üzere toplam dört ayrı senaryo analizi yapılmıştır. Sonuçlara bakıldığında, her kategorinin proje karmaşıklığını önemli bir oranda etkilediğı, ancak proje karakteristiğı kategorisinin %97 ile ciddi bir etkisinin olduğı tespit edilmiştir. Dolayısıyla bu sonuç, literatüre ve pratik uygulamalara kritik bir katkı olarak değerlendirilmektedir. Projenin planlama ve uygulama aşamalarında, bu kategorinin altında yer alan 13 karmaşıklık faktörü için yadsınamayacak derecede bir izleme ve kontrol gerekliliğı ortaya çıkmaktadır.

Yapılan değerlendirmeler sonucunda geliştirilen modelde, bir sonraki çalışmalarda uygulanabilecek bazı geliştirme alanları tespit edilmiştir. Öncelikle modelde kullanılan veri seti artırılabilir ve bu sayede modelin doğruluğı artırılabilir. Ek olarak AR-GE projeleri zamanda değışebilen dinamik süreçler içermektedir. Dolayısıyla, geliştirilen bu statik Bayes modelinde bu sebeple güncelleme ihtiyacı doğabilir ve bu ihtiyaca karşılık olarak Dinamik Bayes Ağı modeli kurulabilir. AR-GE projelerinin dinamik yapısı gibi, proje yönetiminin de dinamik ve esnek bir yapısı vardır. Projenin başlatma aşaması ile planlama aşaması veya uygulama süreci, aynı karmaşıklık düzeylerini içermeyebilir. Bu çalışma, proje yönetiminin farklı süreçlerini temsil edecek birden fazla çalışma şekilde yapılabilir. Belirtilen geliştirme alanları ile karmaşık yönetiminin daha etkili bir şekilde yapılması sağlanabilir.

Bu araştırma ile AR-GE projelerinin karmaşıklığının modellenmesi ve nicel olarak değerlendirilmesine olanak sağlayan bulgular elde edilmiştir. BBN yönteminin AR-GE projelerine uygulanması ve elde edilen bulguların özgünlüğü ile karmaşıklık çalışmalarına ve pratik uygulamalara bir yol haritası sunması amaçlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- Ahn, S., Shokri, S., Lee, S., Haas, C. T., & Haas, R. C. G.** (2017). Exploratory Study on the Effectiveness of Interface-Management Practices in Dealing with Project Complexity in Large-Scale Engineering and Construction Projects. *Journal of Management in Engineering*, 33(2). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)me.1943-5479.0000488](https://doi.org/10.1061/(asce)me.1943-5479.0000488)
- Akçaoğlu, Ö.** (2012). Değer Akış Haritalarında Belirlenen Darboğazların Çözümü İçin Bayes Ağları İle Senaryo Üretimi: Çamaşır Makinası Fabrikasında Bir Uygulama. *İstanbul Teknik Üniversitesi , Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, 66.
- Baccarini, D.** (1996). The concept of project complexity - A review. *International Journal of Project Management*, 14(4). [https://doi.org/10.1016/0263-7863\(95\)00093-3](https://doi.org/10.1016/0263-7863(95)00093-3)
- Bakhshi, J., Ireland, V., & Gorod, A.** (2016). Clarifying the project complexity construct: Past, present and future. *International Journal of Project Management*, 34(7). <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2016.06.002>
- Bosch-Rekveltdt, M., Bakker, H., & Hertogh, M.** (2018). Comparing project complexity across different industry sectors. *Complexity*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/3246508>
- Bosch-Rekveltdt, M., Jongkind, Y., Mooi, H., Bakker, H., & Verbraeck, A.** (2011). Grasping project complexity in large engineering projects: The TOE (Technical, Organizational and Environmental) framework. *International Journal of Project Management*, 29(6). <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2010.07.008>
- Brennan, T., Ernst, P., Katz, J., & Roth, E.** (2020). Building an R&D strategy for modern times. *McKinsey Insights*, November, 1–15. <https://www.mckinsey.com/business-functions/strategy-and-corporate-finance/our-insights/building-an-r-and-d-strategy-for-modern-times>
- Casteren, W. Van.** (2017). The Waterfall Model And The Agile Methodologies : A Comparison By Project Characteristics-Short The Waterfall Model and Agile Methodologies. *Academic Competences in the Bachelor*, February.
- Chronéer, D., & Bergquist, B.** (2012). Managerial complexity in process industrial R & D projects: A Swedish study. *İçinde Project Management Journal* (C. 43, Sayı 2). <https://doi.org/10.1002/pmj.21257>
- Çinicioğlu, Esma Nur; Öncel Ekici, Şule; Ülengin, F.** (2015). Bayes Ağ Yapısının Oluşturulmasında Farklı Yaklaşımlar: Nedensel Bayes Ağları Ve Veriden Ağ Öğrenme. *November*, 265–284.
- Congressional Research Services.** (2022). Global Research and Development Expenditures: Fact Sheet. *Congressional Research Services*, 1–5. <https://crsreports.congress.gov>

- Cooper, G. F., & Herskovits, E.** (1992). A Bayesian method for the induction of probabilistic networks from data. *Machine Learning*, 9(4). <https://doi.org/10.1007/bf00994110>
- Dao, B., Kermanshachi, S., Shane, J., Anderson, S., & Damnjanovic, I.** (2022). Developing a logistic regression model to measure project complexity. *Architectural Engineering and Design Management*, 18(3). <https://doi.org/10.1080/17452007.2020.1851166>
- Dao, B., Kermanshachi, S., Shane, J., Anderson, S., & Hare, E.** (2017). Exploring and Assessing Project Complexity. *Journal of Construction Engineering and Management*, 143(5). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0001275](https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0001275)
- Deloitte.** (2022). *Central European Corporate R & D Report 2022*.
- Do, C. B., & Batzoglou, S.** (2008). What is the expectation maximization algorithm? *Nature Biotechnology*, 26(8). <https://doi.org/10.1038/nbt1406>
- Ekici, A., & Önsel Ekici, Ş.** (2016). A Bayesian Network Analysis of Ethical Behavior. *Journal of Macromarketing*, 36(1). <https://doi.org/10.1177/0276146715607620>
- Ekici, A., & Önsel Ekici, Ş.** (2021). Understanding and managing complexity through Bayesian network approach: The case of bribery in business transactions. *Journal of Business Research*, 129. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.10.024>
- Fornacon-Wood, I., Mistry, H., Johnson-Hart, C., Faivre-Finn, C., O'Connor, J. P. B., & Price, G. J.** (2022). Understanding the Differences Between Bayesian and Frequentist Statistics. İçinde *International Journal of Radiation Oncology Biology Physics* (C. 112, Sayı 5). <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2021.12.011>
- Fowler, M., & Highsmith, J.** (2001). The Agile Manifesto. *SpringerBriefs in Computer Science*, 0(9783319101569), 9–14. https://doi.org/10.1007/978-3-319-10157-6_3
- G. Gönen, E., & Soyer, A.** (2020). Proje Karmaşıklığının Ölçümlenmesine Yönelik Bir Model Önerisi. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 32(4). <https://doi.org/10.7240/jeps.690962>
- GeNIe User's Manual.** (2024). *GeNIe Modeler User Manual*.
- Geraldi, J., Maylor, H., & Williams, T.** (2011). Now, let's make it really complex (complicated): A systematic review of the complexities of projects. İçinde *International Journal of Operations and Production Management* <https://doi.org/10.1108/01443571111165848>
- Grover, J.** (2013). *Strategic Economic Decision-Making Using Bayesian Belief Networks to Solve Complex Problems*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6040-4>
- He, Q., Luo, L., Hu, Y., & Chan, A. P. C.** (2015). Measuring the complexity of mega construction projects in China-A fuzzy analytic network process analysis. *International Journal of Project Management*, 33(3). <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2014.07.009>
- Jaber, H., Marle, F., Vidal, L. A., Sarigol, I., & Didiez, L.** (2021). A framework to evaluate project complexity using the fuzzy topsis method. *Sustainability (Switzerland)*, 13(6). <https://doi.org/10.3390/su13063020>

- Jarkas, A. M.** (2017). Contractors' Perspective of Construction Project Complexity: Definitions, Principles, and Relevant Contributors. *Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice*, 143(4). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EI.1943-5541.0000337](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EI.1943-5541.0000337)
- Kermanshachi, S., Dao, B., Rouhanizadeh, B., Shane, J., & Anderson, S.** (2020). Development of the Project Complexity Assessment and Management Framework for Heavy Industrial Projects. *International Journal of Construction Education and Research*, 16(1). <https://doi.org/10.1080/15578771.2018.1499568>
- KPMG.** (2021). *Global R&D Incentives Guide Report*.
- Lee, E., Park, Y., & Shin, J. G.** (2009). Large engineering project risk management using a Bayesian belief network. *Expert Systems with Applications*, 36(3 PART 2). <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2008.07.057>
- Lu, Y., Luo, L., Wang, H., Le, Y., & Shi, Q.** (2015). Measurement model of project complexity for large-scale projects from task and organization perspective. *International Journal of Project Management*, 33(3). <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2014.12.005>
- Luo, L., He, Q., Xie, J., Yang, D., & Wu, G.** (2017). Investigating the Relationship between Project Complexity and Success in Complex Construction Projects. *Journal of Management in Engineering*, 33(2). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)me.1943-5479.0000471](https://doi.org/10.1061/(asce)me.1943-5479.0000471)
- Luo, L., Zhang, L., & He, Q.** (2020). Linking project complexity to project success: a hybrid SEM–FCM method. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 27(9). <https://doi.org/10.1108/ECAM-05-2019-0241>
- Luo, L., Zhang, L., & Wu, G.** (2020). Bayesian belief network-based project complexity measurement considering causal relationships. *Journal of Civil Engineering and Management*, 26(2). <https://doi.org/10.3846/jcem.2020.11930>
- Luo, L., Zhang, L., Yang, D., & He, Q.** (2022). A probabilistic approach to assessing project complexity dynamics under uncertainty. *Soft Computing*, 26(8). <https://doi.org/10.1007/s00500-021-06491-w>
- Mamédio, D. F., & Meyer, V.** (2020). Managing project complexity: how to cope with multiple dimensions of complex systems. *International Journal of Managing Projects in Business*, 13(4). <https://doi.org/10.1108/IJMPB-06-2019-0147>
- Marcot, B. G., & Penman, T. D.** (2019). Advances in Bayesian network modelling: Integration of modelling technologies. *Çinde Environmental Modelling and Software* (C. 111). <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.09.016>
- Maylor, H., & Turner, N.** (2017). Understand, reduce, respond: project complexity management theory and practice. *International Journal of Operations and Production Management*, 37(8). <https://doi.org/10.1108/IJOPM-05-2016-0263>
- Maylor, H., Vidgen, R., & Carver, S.** (2008). Managerial Complexity in Project-Based Operations: A Grounded Model and Its Implications for Practice. *Project Management Journal*, 39(1_suppl). <https://doi.org/10.1002/pmj.20057>
- Molepo, P. M., Marnewick, A., & Joseph, N.** (2019). Complexity factors affecting research and development projects duration. *2019 IEEE Technology and Engineering Management Conference, TEMSCON 2019*.

<https://doi.org/10.1109/TEMSCON.2019.8813667>

- Morris, P. W. G.** (1994). 4 . *The Management of Projects*. Thomas Telford, 1994.
- Morris, P. W. G.** (2011). A Brief History of Project Management. İçinde *The Oxford Handbook of Project Management*.
<https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780199563142.003.0002>
- Namazi, M., Tavana, M., Mohammadi, E., & Bonyadi Naeini, A.** (2023). A new strategic approach for R&D project portfolio selection using efficiency-uncertainty maps. *Benchmarking*, 30(10). <https://doi.org/10.1108/BIJ-02-2022-0129>
- Nath, P., & Mrinalini, N.** (2000). Benchmarking the best practices of non-corporate R&D organizations. *Benchmarking: An International Journal*, 7(2).
<https://doi.org/10.1108/14635770010322315>
- Nguyen, A. T., Nguyen, L. D., Le-Hoai, L., & Dang, C. N.** (2015). Quantifying the complexity of transportation projects using the fuzzy analytic hierarchy process. *International Journal of Project Management*, 33(6).
<https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2015.02.007>
- OECD.** (2015). Frascati Manual 2015 | OECD READ edition. İçinde *Frascati Manual 2015: Guidelines for Collecting and Reporting Data on Research and Experimental Development, The Measurement of Scientific, Technological and Innovation Activities*.
- OECD.** (2023). Competition and Innovation a Theoretical Perspective. *Organisation for Economic Co-operation and Development*, 18(5).
- PMI.** (1996). A Guide to the project management body of knowledge. *Choice Reviews Online*, 34(03). <https://doi.org/10.5860/choice.34-1636>
- PMI.** (2014). *Navigating Complexity: A practice guide*. ISBN: 978-1-62825-036-7
- PMI.** (2021). *Project Management Body of Knowledge (PMBOK®) 7th Edition* (Sayı July).
- Pollino, C. A., & Henderson, C.** (2010). Bayesian networks: A guide for their application in natural resource management and policy. *A Technical Report No. 14. Integrated Catchment Assessment and Management Centre, Fenner School of Environment and Society, Australian National University, Canberra, 14*.
- Poveda-Bautista, R., Diego-Mas, J. A., & Leon-Medina, D.** (2018). Measuring the Project Management Complexity: The Case of Information Technology Projects. *Complexity*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/6058480>
- Qazi, A.** (2022). Data-driven impact assessment of multidimensional project complexity on project performance. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 71(1). <https://doi.org/10.1108/IJPPM-06-2020-0281>
- Ribbers, P. M. A., & Schoo, K. C.** (2002). Program management and complexity of erp implementations. *EMJ - Engineering Management Journal*, 14(2).
<https://doi.org/10.1080/10429247.2002.11415162>
- Royce, W. W.** (1970). Managing The Development Of Large Software Systems. *Ieee Wescon*, August.
- Senescu, R. R., Aranda-Mena, G., & Haymaker, J. R.** (2013). Relationships

- between Project Complexity and Communication. *Journal of Management in Engineering*, 29(2). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)me.1943-5479.0000121](https://doi.org/10.1061/(asce)me.1943-5479.0000121)
- Thakkar, J. J.** (2022). Management and Industrial Engineering Project Management Strategic and Operational Planning. İçinde *Springer*. <https://link.springer.com/bookseries/11690>
- United Nations.** (2016). The Sustainable Development Goals Report 2016. *United Nations publication issued by the Department of Economic and Social Affairs*, 64. <https://unstats.un.org/sdgs/report/2021/#>
- Vahidi, R., & Greenwood, D.** (2009). Triangles, Tradeoffs And Success: A Critical Examination Of Some Traditional Project Management Paradigms. *CIB Joint International Symposium 2009 -Construction Facing Worldwide Challenge*.
- Vidal, L. A., & Marle, F.** (2008). Understanding project complexity: Implications on project management. *Kybernetes*, 37(8). <https://doi.org/10.1108/03684920810884928>
- Vidal, L. A., Marle, F., & Bocquet, J. C.** (2011). Measuring project complexity using the Analytic Hierarchy Process. *International Journal of Project Management*, 29(6). <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2010.07.005>
- Williams, T.** (2005). Assessing and moving on from the dominant project management discourse in the light of project overruns. İçinde *IEEE Transactions on Engineering Management* (C. 52, Sayı 4). <https://doi.org/10.1109/TEM.2005.856572>
- Williams, T. M.** (1999). The need for new paradigms for complex projects. *International Journal of Project Management*, 17(5). [https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(98\)00047-7](https://doi.org/10.1016/S0263-7863(98)00047-7)
- Yang, N. D., & Ji, Y.** (2010). Study of R&D project complexity's influencing mechanism on organization structure. *2010 International Conference on Future Information Technology and Management Engineering, FITME 2010*, 2. <https://doi.org/10.1109/FITME.2010.5654815>



EKLER

EK A: Literatürdeki karmaşıklık faktörlerinin sınıflandırılması

EK B: Çalışmada kullanılan anket formu

EK C: Etki zinciri analizi sonuçları

EK D: Senaryo analizi grafiksel gösterimleri



EK A

Çizelge A.1: Literatürdeki karmaşıklık faktörlerinin sınıflandırılması.

Kaynak	Karmaşıklık Kategorisi	Karmaşıklık Faktörü	Sınıflandırma - 1	Sınıflandırma - 2	Sınıflandırma - 3
G. Gönen & Soyer (2020)	Çevresel (6)	Çevresel çeşitlilik ve büyüklük	Makro Çevre	Çevresel Çeşitlilik/Büyükölük	Çeşitlilik/Büyükölük
	Çevresel (6)	Çevresel değışkenlik ve belirsizlik	Makro Çevre	Çevresel Değişkenlik/Belirsizlik	Belirsizlik
	Çevresel (6)	Çevresel ilişkiler ve etkileşim	Görev Çevresi	Dış Paydaşlarla İşbirliği/İlişkiler	Belirsizlik/Bağımlılık
	Çevresel (6)	Çevresel risk	Makro Çevre	Çevresel Riskler	Belirsizlik
	Çevresel (6)	Çevresel zorluk	Makro Çevre	Çevresel Zorluk	Büyükölük
	Çevresel (6)	Rekabet	Görev Çevresi	Rekabet Koşulları	Belirsizlik
	Operasyonel (5)	Operasyonel çeşitlilik ve büyüklük	Proje	Faaliyet Sayısı	Çeşitlilik/Büyükölük
	Operasyonel (5)	Operasyonel ilişkiler ve etkileşim	Proje	Proje Takım-İşbirliği/İletişim	Belirsizlik/Bağımlılık
	Operasyonel (5)	Operasyonel risk	Proje	Operasyonel Zorluk/Riskler	Belirsizlik
	Operasyonel (5)	Operasyonel yenilik, değışkenlik ve belirsizlik	Proje	Proje-Yenilik	Belirsizlik
	Operasyonel (5)	Operasyonel zorluk	Proje	Operasyonel Zorluk/Riskler	Büyükölük
	Organizasyonel (4)	Organizasyonel çeşitlilik ve büyüklük	Organizasyon	Organizasyonel Yapı	Çeşitlilik/Büyükölük
	Organizasyonel (4)	Organizasyonel ilişkiler ve etkileşim	Organizasyon	İç Paydaşlarla İşbirliği/İlişkiler	Çeşitlilik
	Organizasyonel (4)	Organizasyonel risk	Organizasyon	İç Paydaşlarla İşbirliği/İlişkiler	Belirsizlik
	Organizasyonel (4)	Organizasyonel yenilik, değışkenlik ve belirsizlik	Organizasyon	Organizasyonel Yapı	Belirsizlik
	Yönetsel (5)	Yönetsel açıdan değışkenlik ve belirsizlik	Proje	Yönetsel-Belirsizlik	Belirsizlik
	Yönetsel (5)	Yönetsel çeşitlilik ve büyüklük	Proje	Yönetsel-Çeşitlilik	Çeşitlilik/Büyükölük
	Yönetsel (5)	Yönetsel ilişkiler ve etkileşim	Organizasyon	İç Paydaşlarla İşbirliği/İlişkiler	Belirsizlik/Bağımlılık
	Yönetsel (5)	Yönetsel risk	Proje	Yönetsel-Riskler	Belirsizlik
	Yönetsel (5)	Yönetsel zorluk	Proje	Yönetsel-Zorluk	Büyükölük
Baccarini (1996)	Bağımlılık (2)	Organizasyonel	Organizasyon	Organizasyonel Yapı	Bağımlılık
	Bağımlılık (2)	Teknolojik	Makro Çevre	Teknolojik Bağımlılık	Bağımlılık
	Farklılaşma (2)	Organizasyonel	Organizasyon	Organizasyonel Yapı	Çeşitlilik
	Farklılaşma (2)	Teknolojik	Makro Çevre	Teknolojik Belirsizlik	Çeşitlilik

Çizelge A.1 (devam): Literatürdeki karmaşıklık faktörlerinin sınıflandırılması.

Kaynak	Karmaşıklık Kategorisi	Karmaşıklık Faktörü	Sınıflandırma - 1	Sınıflandırma - 2	Sınıflandırma - 3
Bosch-Rekveltd vd. (2018)	Çevresel (13)	Dış paydaşların bakış açılarının çeşitliliği	Görev Çevresi	Dış Paydaş-Çeşitlilik	Çeşitlilik
	Çevresel (13)	Dış paydaşların sayısı	Görev Çevresi	Dış Paydaş Sayısı	Büyüklik
	Çevresel (13)	Dış riskler	Makro Çevre	Çevresel Riskler	Belirsizlik
	Çevresel (13)	Dışa paydaşlara bağımlılık	Görev Çevresi	Dış Paydaş-Bağımlılık	Bağımlılık
	Çevresel (13)	Gerekli yerel kapsam/içerik	Makro Çevre	Çevresel Bağımlılık	Bağımlılık
	Çevresel (13)	Konumun uzaklığı	Proje	Yönetmel-Zorluk	Büyüklik/Belirsizlik
	Çevresel (13)	Mevcut şantiye ile çatışma (interference with existing site)	Organizasyon	İç Paydaşlarla İşbirliği/İlişkiler	Bağımlılık
	Çevresel (13)	Politik etki	Makro Çevre	Politik/Yasal Koşullar	Bağımlılık
	Çevresel (13)	Proje ortamının istikrarsızlığı	Makro Çevre	Çevresel Belirsizlik	Belirsizlik
	Çevresel (13)	Rekabet seviyesi	Görev Çevresi	Rekabet Koşulları	Büyüklik
	Çevresel (13)	Şirket içi destek eksikliği	Organizasyon	Örgütsel İklim	Belirsizlik
	Çevresel (13)	Şirket içi stratejik baskı	Organizasyon	Örgütsel İklim	Büyüklik/Bağımlılık
	Çevresel (13)	Ülkedeki deneyim eksikliği	Makro Çevre	Çevresel Zorluk	Belirsizlik
	Organizasyonel (17)	Farklı dillerin sayısı	Proje	Proje Takım-Çeşitlilik	Büyüklik
	Organizasyonel (17)	Farklı disiplinler arasındaki arayüzler	Organizasyon	Organizasyonel Yapı	Büyüklik
	Organizasyonel (17)	Farklı milletlerin sayısı	Proje	Proje Takım-Çeşitlilik	Büyüklik
	Organizasyonel (17)	Farklı proje yönetim metod/araçları arasındaki uyumsuzluk	Proje	Yöntemsel-Karmaşıklık	Belirsizlik/Çeşitlilik
	Organizasyonel (17)	Farklı zaman dilimlerinin dahil edilmesi	Proje	Yönetmel-Zorluk	Bağımlılık
	Organizasyonel (17)	Finansal kaynakların sayısı	Proje	Finansal Kaynak-Çeşitlilik	Büyüklik
	Organizasyonel (17)	İlgili taraflarla deneyim eksikliği	Proje	Proje Takım-Kapasite	Belirsizlik
	Organizasyonel (17)	Kaynak eksikliği ve beceri kullanılabilirliği	Proje	Proje Takım-Kapasite	Bağımlılık
	Organizasyonel (17)	Kurumsal riskler	Organizasyon	İç Paydaşlarla İşbirliği/İlişkiler	Belirsizlik
	Organizasyonel (17)	Ortak girişim partnerinin varlığı	Organizasyon	Organizasyonel Yapı	Büyüklik/Bağımlılık
	Organizasyonel (17)	Proje ekibindeki güven eksikliği	Proje	Proje Takım-İşbirliği/İletişim	Belirsizlik/Bağımlılık
	Organizasyonel (17)	Proje ekibinin büyüklüğü	Proje	Proje Takım-Büyüklik	Büyüklik

Çizelge A.1 (devam): Literatürdeki karmaşıklık faktörlerinin sınıflandırılması.

Kaynak	Karmaşıklık Kategorisi	Karmaşıklık Faktörü	Sınıflandırma - 1	Sınıflandırma - 2	Sınıflandırma - 3
Bosch-Rekveltd vd. (2018)	Organizasyonel (17)	Proje takvimi üzerinde yüksek baskı	Proje	Faaliyet-Bağımlılık	Büyüklik
	Organizasyonel (17)	Sağlık, Emniyet, Güvenlik ve Çevre (İş sağlığı ve güvenliği) farkındalığı eksikliği	Organizasyon	Örgütsel İklim	Bağımlılık
	Organizasyonel (17)	Sözleşme sayısı	Görev Çevresi	Sözleşme Koşulları	Büyüklik
	Organizasyonel (17)	Sözleşme türü	Görev Çevresi	Sözleşme Koşulları	Bağımlılık
	Organizasyonel (17)	Yükleniciye olan güven eksikliği	Görev Çevresi	Tedarikçilerle İşbirliği/İlişkiler	Belirsizlik/Bağımlılık
	Teknolojik (17)	Çelişkili normlar ve standartlar	Makro Çevre	Politik/Yasal Koşullar	Bağımlılık
	Teknolojik (17)	Farklı teknik disiplinlerin katılımı	Proje	Proje Takım-Çeşitlilik	Büyüklik
	Teknolojik (17)	Görev sayısının çok olması	Proje	Faaliyet Sayısı	Büyüklik
	Teknolojik (17)	Görevler arasındaki bağımlılık	Proje	Faaliyet-Bağımlılık	Bağımlılık
	Teknolojik (17)	Görevlerin çok çeşitli olması	Proje	Faaliyet-Çeşitlilik	Çeşitlilik
	Teknolojik (17)	Kapsamdaki belirsizlikler	Proje	Kapsam-Belirsizlik	Belirsizlik
	Teknolojik (17)	Katı kalite gereksinimleri	Görev Çevresi	Müşteri Talep ve Beklentileri	Büyüklik
	Teknolojik (17)	Konumların sayısı	Proje	Yönetsel-Zorluk	Büyüklik
	Teknolojik (17)	Proje hedeflerinin belirsizliği	Proje	Amaç/Hedef-Belirsizlik	Belirsizlik
	Teknolojik (17)	Proje hedeflerinin uyumsuzluğu	Proje	Amaç/Hedef-Uyumluluk	Çeşitlilik/Belirsizlik
	Teknolojik (17)	Proje süresi	Proje	Proje Süresinin Uzunluğu	Büyüklik
	Teknolojik (17)	Teknik riskler	Proje	Operasyonel Zorluk/Riskler	Belirsizlik
	Teknolojik (17)	Teknoloji ile deneyim eksikliği	Proje	Proje Takım-Kapasite	Belirsizlik
	Teknolojik (17)	Teknolojinin yeniliği (dünya çapında)	Makro Çevre	Teknolojik Belirsizlik	Belirsizlik
	Teknolojik (17)	Yatırım harcamalarının büyüklüğü (capex)	Proje	Bütçe Büyüklüğü	Büyüklik
	Teknolojik (17)	Yüksek sayıda proje hedefi	Proje	Amaç/Hedef Sayısı	Büyüklik
	Teknolojik (17)	Yöntemlerdeki belirsizlik	Proje	Yöntemsel-Belirsizlik	Belirsizlik

Çizelge A.1 (devam): Literatürdeki karmaşıklık faktörlerinin sınıflandırılması.

Kaynak	Karmaşıklık Kategorisi	Karmaşıklık Faktörü	Sınıflandırma - 1	Sınıflandırma - 2	Sınıflandırma - 3
He vd. (2015)	Amaç (6)	Amaçların belirsizliği	Proje	Amaç/Hedef-Belirsizlik	Belirsizlik
	Amaç (6)	Görev faaliyetlerinin dinamikleri	Proje	Faaliyet-Dinamiklik	Belirsizlik
	Amaç (6)	Görevler arasındaki ilişkinin bağımlılığı	Proje	Faaliyet-Bağımlılık	Bağımlılık
	Amaç (6)	Görevlerin çeşitliliği	Proje	Faaliyet-Çeşitlilik	Çeşitlilik
	Amaç (6)	Kaynakların ve yeteneklerin kullanılabilirliği	Proje	Kaynak Kısıtları	Belirsizlik/Büyüklik/ Bağımlılık
	Amaç (6)	Proje yönetimi metotlarının ve araçlarının belirsizliği	Proje	Faaliyet-Belirsizlik/Yenilik	Belirsizlik
	Bilgi (5)	Bilgi belirsizliği	Proje	Bilgi-Belirsizlik	Belirsizlik
	Bilgi (5)	Bilgiyi elde etme derecesi	Proje	Proje Takım-Kapasite	Bağımlılık
	Bilgi (5)	Birden fazla sistem veya platformun entegrasyonu	Proje	Kaynak-Çeşitlilik	Bağımlılık
	Bilgi (5)	İşlenen bilgi düzeyi	Proje	Proje Takım-Kapasite	Büyüklik
	Bilgi (5)	Transfer edilen bilgi kapasitesi	Proje	Proje Takım-Kapasite	Büyüklik
	Çevresel (5)	Birden çok paydaş	Görev Çevresi	Dış Paydaş Sayısı	Çeşitlilik/Büyüklik
	Çevresel (5)	Değişen doğa ortamı	Makro Çevre	Çevresel Değişkenlik	Belirsizlik
	Çevresel (5)	Değişen ekonomi ortamı,	Makro Çevre	Ekonomik Koşullar	Belirsizlik
	Çevresel (5)	Değişen politika ve regülasyon ortamı,	Makro Çevre	Politik/Yasal Değişkenlik	Belirsizlik
	Çevresel (5)	Değişen teknoloji ortamı,	Makro Çevre	Teknolojik Değişkenlik	Belirsizlik
	Kültürel (4)	Birden çok katılımcı ülke	Görev Çevresi	Dış Paydaş-Çeşitlilik	Çeşitlilik
	Kültürel (4)	İş birliği duygusu	Proje	Proje Takım-İşbirliği/İletişim	Belirsizlik/Bağımlılık
	Kültürel (4)	Kültürel farklılıklar	Proje	Proje Takım-Çeşitlilik	Belirsizlik/Bağımlılık
	Kültürel (4)	Proje takımının güveni	Proje	Proje Takım-İşbirliği/İletişim	Belirsizlik/Bağımlılık
	Organizasyonel (4)	Organizasyon içindeki kişilerin deneyimi ve sosyal geçmişleri	Organizasyon	Örgütsel İklim	Belirsizlik/Çeşitlilik
	Organizasyonel (4)	Organizasyon yapısı hiyerarşi sayısı	Organizasyon	Organizasyonel Yapı	Büyüklik
	Organizasyonel (4)	Organizasyonel birim ve departmanların sayısı	Organizasyon	Organizasyonel Yapı	Büyüklik
	Organizasyonel (4)	Organizasyonlar arası karşılıklı bağımlılık	Görev Çevresi	Dış Paydaş-Bağımlılık	Bağımlılık
	Teknolojik (4)	Çokça zor/yüksek teknoloji kullanımının riski	Proje	Operasyonel Zorluk/Riskler	Belirsizlik
	Teknolojik (4)	Teknolojik çeşitlilik	Proje	Kaynak-Çeşitlilik	Çeşitlilik
	Teknolojik (4)	Teknolojik sistem ile dış çevre arasındaki etkileşim	Makro Çevre	Teknolojik Bağımlılık	Bağımlılık
	Teknolojik (4)	Teknolojik süreçlerin bağımlılığı	Proje	Faaliyet-Bağımlılık	Bağımlılık

Çizelge A.1 (devam): Literatürdeki karmaşıklık faktörlerinin sınıflandırılması.

Kaynak	Karmaşıklık Kategorisi	Karmaşıklık Faktörü	Sınıflandırma - 1	Sınıflandırma - 2	Sınıflandırma - 3
Bakhshi vd. (2016)	Bağlantılılık (7)	Bilgi aktarma kapasitesi	Proje	Proje Takım-Kapasite	Büyüklik
	Bağlantılılık (7)	Bilgi işleme düzeyi	Proje	Proje Takım-Kapasite	Büyüklik
	Bağlantılılık (7)	Daimi kuruluşlarla ilişkiler	Makro Çevre	Politik/Yasal Koşullar	Bağımlılık
	Bağlantılılık (7)	Görev/iş paketi ve proje ağlarındaki bağlantı ve geri bildirim	Proje	Faaliyet-Bağımlılık	Bağımlılık
	Bağlantılılık (7)	Hedeflerin/çıkarların uyumu	Görev Çevresi	Dış Paydaşlarla İşbirliği/İlişkiler	Belirsizlik
	Bağlantılılık (7)	Proje ekip üyeleri arasındaki yüz yüze ilişki	Proje	Proje Takım-İşbirliği/İletişim	Belirsizlik/Bağımlılık
	Bağlantılılık (7)	Proje organizasyonundaki arayüz sayısı	Organizasyon	Organizasyonel Yapı	Büyüklik
	Aidiyet (16)	Bilinmeyen/eksik tanımlanmış gereksinimler	Görev Çevresi	Müşteri Talep ve Beklentileri	Belirsizlik
	Aidiyet (16)	Çokça zor/yüksek teknoloji kullanımının riski	Proje	Operasyonel Zorluk/Riskler	Belirsizlik
	Aidiyet (16)	Ekibin teknik yeterliliği	Proje	Proje Takım-Kapasite	Belirsizlik/Bağımlılık
	Aidiyet (16)	Ekip şeffaflığı, empati (iş birliğini geliştiren kişisel ve manevi hususlar)	Proje	Proje Takım-İşbirliği/İletişim	Belirsizlik/Bağımlılık
	Aidiyet (16)	Kabiliyet (bilgi, deneyim, eğitim, öğretim vb.)	Proje	Proje Takım-Kapasite	Belirsizlik/Bağımlılık
	Aidiyet (16)	Kalite gereksinimleri	Görev Çevresi	Müşteri Talep ve Beklentileri	Büyüklik
	Aidiyet (16)	Kullanıcı gereksinimleri (requirements capture)	Görev Çevresi	Müşteri Talep ve Beklentileri	Büyüklik
	Aidiyet (16)	Maliyet kısıtları	Proje	Bütçe Kısıtları	Bağımlılık
	Aidiyet (16)	Özel gereksinimler/standartlar	Görev Çevresi	Müşteri Talep ve Beklentileri	Büyüklik
	Aidiyet (16)	Paydaşlara güven	Görev Çevresi	Dış Paydaşlarla İşbirliği/İlişkiler	Belirsizlik
	Aidiyet (16)	Proje yöneticisi yetkinlikleri	Proje	Yönetsel-Kapasite	Bağımlılık
	Aidiyet (16)	Projenin teknolojik yeniliği	Proje	Proje-Yenilik	Belirsizlik
	Aidiyet (16)	Sipariş üzerine (ısmarlama) yazılım veya donanım	Proje	Müşteri Talep ve Beklentileri	Büyüklik
	Aidiyet (16)	Son derece özelleştirilmiş ürünler	Görev Çevresi	Müşteri Talep ve Beklentileri	Büyüklik
	Aidiyet (16)	Sorumluluk ve hesap verilebilirlik	Organizasyon	Organizasyonel Yapı	Belirsizlik/Bağımlılık
	Aidiyet (16)	Teknolojik yenilik derecesi	Proje	Proje-Yenilik	Belirsizlik

Çizelge A.1 (devam): Literatürdeki karmaşıklık faktörlerinin sınıflandırılması.

Kaynak	Karmaşıklık Kategorisi	Karmaşıklık Faktörü	Sınıflandırma - 1	Sınıflandırma - 2	Sınıflandırma - 3
Bakhshi vd. (2016)	Büyüklik (20)	Alınması gereken karar sayısı	Proje	Karar Sayısı	Büyüklik
	Büyüklik (20)	Bilgi sistemlerinin sayısı	Proje	Kaynak Kullanılabilirliği	Büyüklik
	Büyüklik (20)	Çalışan sayısı	Proje	Proje Takım-Büyüklik	Büyüklik
	Büyüklik (20)	Faaliyet sayısı	Proje	Faaliyet Sayısı	Büyüklik
	Büyüklik (20)	Farklı mesleki uzmanlık sayısı	Proje	Proje Takım-Çeşitlilik	Büyüklik
	Büyüklik (20)	Girdi ve/veya çıktı sayısı	Proje	Çıktı Sayısı	Büyüklik
	Büyüklik (20)	Hedef sayısı	Proje	Amaç/Hedef Sayısı	Büyüklik
	Büyüklik (20)	Hiyerarşik düzey sayısı	Organizasyon	Organizasyonel Yapı	Büyüklik
	Büyüklik (20)	İlgili resmi birim ve departmanların sayısı	Proje	Proje Takım-Çeşitlilik	Büyüklik
	Büyüklik (20)	Kapsam büyüklüğü (bileşen sayısı vb.)	Proje	Kapsam-Genişlik	Büyüklik
	Büyüklik (20)	Kaynak sayısı ve miktarı	Proje	Kaynak-Büyüklik	Büyüklik
	Büyüklik (20)	Kaynaklarını paylaştan şirketlerin/projelerin sayısı	Proje	Kaynak Kullanılabilirliği	Büyüklik
	Büyüklik (20)	Koordine edilecek olan yapıların/grupların/ekiplerin sayısı	Proje	Proje Takım-Büyüklik	Büyüklik
	Büyüklik (20)	Paydaş sayısı	Görev Çevresi	Dış Paydaş Sayısı	Büyüklik
	Büyüklik (20)	Proje çıktı sayısı	Proje	Çıktı Sayısı	Büyüklik
	Büyüklik (20)	Proje süresi	Proje	Proje Süresinin Uzunluğu	Büyüklik
	Büyüklik (20)	Sermaye yatırımının büyüklüğü	Proje	Bütçe Büyüklüğü	Büyüklik
	Büyüklik (20)	Uygulanan proje yönetimi metot ve araçlarının sayısı	Proje	Yöntemsel-Büyüklik	Büyüklik
	Büyüklik (20)	Yatırım harcamalarının büyüklüğü (sermaye harcamaları)	Proje	Bütçe Büyüklüğü	Büyüklik
	Büyüklik (20)	Yatırımcı sayısı	Görev Çevresi	Dış Paydaş Sayısı	Büyüklik
	Çeşitlilik (23)	Birden fazla katılımı ülke/lokasyon	Görev Çevresi	Dış Paydaş-Çeşitlilik	Çeşitlilik
	Çeşitlilik (23)	Birden fazla tedarikçi, yüklenici, bayi vb.	Görev Çevresi	Dış Paydaş Sayısı	Çeşitlilik
	Çeşitlilik (23)	Çalışan çeşitliliği (deneyim, sosyal geçmiş vb.)	Proje	Proje Takım-Çeşitlilik	Çeşitlilik
	Çeşitlilik (23)	Çoklu zaman dilimleri	Proje	Yönetmel-Zorluk	Çeşitlilik
	Çeşitlilik (23)	Entegre edilecek bilgi sistemlerinin çeşitliliği	Proje	Kaynak-Çeşitlilik	Çeşitlilik
	Çeşitlilik (23)	Farklı dil sayısı	Görev Çevresi	Dış Paydaş-Çeşitlilik	Çeşitlilik
	Çeşitlilik (23)	Finansal kaynakların çeşitliliği	Proje	Finansal Kaynak-Çeşitlilik	Çeşitlilik
	Çeşitlilik (23)	Girdi ve/veya çıktı çeşitliliği	Proje	Çıktı Çeşitlilik	Çeşitlilik
	Çeşitlilik (23)	Görev çeşitliliği	Proje	Faaliyet-Çeşitlilik	Çeşitlilik

Çizelge A.1 (devam): Literatürdeki karmaşıklık faktörlerinin sınıflandırılması.

Kaynak	Karmaşıklık Kategorisi	Karmaşıklık Faktörü	Sınıflandırma - 1	Sınıflandırma - 2	Sınıflandırma - 3
Bakhshi vd. (2016)	Çeşitlilik (23)	İhtiyaç duyulan organizasyon becerilerinin çeşitliliği	Proje	Proje Takım-Çeşitlilik	Çeşitlilik
	Çeşitlilik (23)	İhtiyaç duyulan teknolojik becerilerin çeşitliliği	Proje	Proje Takım-Çeşitlilik	Çeşitlilik
	Çeşitlilik (23)	Kültürel çeşitlilik	Organizasyon	Kültürel Çeşitlilik	Çeşitlilik
	Çeşitlilik (23)	Manipüle edilecek kaynakların çeşitliliği	Proje	Kaynak-Çeşitlilik	Çeşitlilik
	Çeşitlilik (23)	Müşteri şeffaflığı, empati (iş birliğini geliştiren kişisel ve manevi hususlar)	Görev Çevresi	Müşteri Talep ve Beklentileri	Belirsizlik/Bağımlılık
	Çeşitlilik (23)	Organizasyon içindeki hiyerarşik düzeyin çeşitliliği	Organizasyon	Organizasyonel Yapı	Çeşitlilik
	Çeşitlilik (23)	Organizasyonel bağımlılıkların çeşitliliği	Organizasyon	Organizasyonel Yapı	Çeşitlilik/Bağımlılık
	Çeşitlilik (23)	Paydaş statüsünün çeşitliliği	Görev Çevresi	Dış Paydaş-Çeşitlilik	Çeşitlilik
	Çeşitlilik (23)	Paydaşların coğrafi konumu	Görev Çevresi	Dış Paydaşlarla İşbirliği/İlişkiler	Çeşitlilik
	Çeşitlilik (23)	Paydaşların ilgi alanları çeşitliliği	Görev Çevresi	Dış Paydaş-Çeşitlilik	Çeşitlilik
	Çeşitlilik (23)	Proje süresince kullanılan teknolojilerin çeşitliliği	Proje	Kaynak-Çeşitlilik	Çeşitlilik
	Çeşitlilik (23)	Teknolojik bağımlılıkların çeşitliliği	Proje	Kaynak-Çeşitlilik	Çeşitlilik/Bağımlılık
	Çeşitlilik (23)	Uygulanan proje yönetimi metot ve araçlarının çeşitliliği	Proje	Yöntemsel-Çeşitlilik	Çeşitlilik
	Çeşitlilik (23)	Ürün bileşenlerinin çeşitliliği	Proje	Çıktı-Çeşitlilik	Çeşitlilik
	Çeşitlilik (23)	İhtiyaç duyulan organizasyon becerilerinin çeşitliliği	Proje	Proje Takım-Çeşitlilik	Çeşitlilik
	Belirsizlik (7)	Bilgi belirsizliği	Proje	Bilgi-Belirsizlik	Belirsizlik
	Belirsizlik (7)	Gerçekçi hedefleri olmayan müşteriler	Görev Çevresi	Müşteri Talep ve Beklentileri	Belirsizlik
	Belirsizlik (7)	Görev faaliyetlerinin dinamikleri	Proje	Faaliyet-Dinamiklik	Belirsizlik
	Belirsizlik (7)	Hedeflerin veya amaçların belirsizliği ve netliği	Proje	Amaç/Hedef-Belirsizlik	Belirsizlik
	Belirsizlik (7)	Kapsam belirsizlikleri	Proje	Kapsam-Belirsizlik	Belirsizlik
	Belirsizlik (7)	Piyasa belirsizliği	Makro Çevre	Çevresel Belirsizlik	Belirsizlik
	Belirsizlik (7)	Teknik yöntemlerde belirsizlik	Proje	Yöntemsel-Belirsizlik	Belirsizlik
	Kapsam/İçerik (34)	Benzer türdeki projelerin tekrarı	Proje	Proje-Yenilik	Belirsizlik
	Kapsam/İçerik (34)	Bilgi edinme derecesi	Organizasyon	Örgütsel İklim	Belirsizlik
	Kapsam/İçerik (34)	Birlik gücü	Organizasyon	Örgütsel İklim	Belirsizlik

Çizelge A.1 (devam): Literatürdeki karmaşıklık faktörlerinin sınıflandırılması.

Kaynak	Karmaşıklık Kategorisi	Karmaşıklık Faktörü	Sınıflandırma - 1	Sınıflandırma - 2	Sınıflandırma - 3
Bakhshi vd. (2016)	Kapsam/İçerik (34)	Çakışan çalışma saatleri		Yönetsel-Zorluk	Bağımlılık
	Kapsam/İçerik (34)	Çevresel karmaşıklık	Makro Çevre	Çevresel Bağımlılık	Bağımlılık/Belirsizlik
	Kapsam/İçerik (34)	Değişen teknoloji, ekonomi ve doğa ortamı	Makro Çevre	Teknolojik Değişkenlik	Belirsizlik
	Kapsam/İçerik (34)	Destek eksikliği (üst yönetim, kullanıcılar, çalışanlar vb.)	Organizasyon	Örgütsel İklim	Belirsizlik
	Kapsam/İçerik (34)	Dış politika sorunu	Makro Çevre	Politik/Yasal Koşullar	Belirsizlik
	Kapsam/İçerik (34)	Geliştirme kapsamı	Proje	Proje-Yenilik	Büyüklik
	Kapsam/İçerik (34)	İç politika sorunu (belirsizlik, gizli bilgi vb.)	Organizasyon	Örgütsel İklim	Belirsizlik
	Kapsam/İçerik (34)	İlgili taraflarla deneyim	Görev Çevresi	Dış Paydaşlarla İşbirliği/İlişkiler	Belirsizlik
	Kapsam/İçerik (34)	İşlevsel rol	Organizasyon	Organizasyonel Yapı	Belirsizlik
	Kapsam/İçerik (34)	Jeolojik durum/konumun zorluğu	Makro Çevre	Çevresel Zorluk	Belirsizlik
	Kapsam/İçerik (34)	Kamu gündeminin önemi	Makro Çevre	Toplumsal Kısıtlar	Belirsizlik
	Kapsam/İçerik (34)	Karar verme sürecindeki zorluklar	Organizasyon	Organizasyonel Yapı	Büyüklik
	Kapsam/İçerik (34)	Komşu çevresi (şantiye erişimi/konum dahil)	Makro Çevre	Çevresel Zorluk	Belirsizlik
	Kapsam/İçerik (34)	Kurumsal riskler	Organizasyon	İç Paydaşlarla İşbirliği/İlişkiler	Belirsizlik
	Kapsam/İçerik (34)	Kurumsal yapılanmalar	Organizasyon	Organizasyonel Yapı	Çeşitlilik
	Kapsam/İçerik (34)	Kültürel yapılanma	Organizasyon	Örgütsel İklim	Çeşitlilik
	Kapsam/İçerik (34)	Olağandışı tasarım süreci	Proje	Proje-Yenilik	Büyüklik/Belirsizlik
	Kapsam/İçerik (34)	Örgütsel yenilik derecesi	Organizasyon	Organizasyonel Yapı	Belirsizlik
	Kapsam/İçerik (34)	Paydaşlar arasındaki çatışma	Görev Çevresi	Dış Paydaşlarla İşbirliği/İlişkiler	Belirsizlik

Çizelge A.1 (devam): Literatürdeki karmaşıklık faktörlerinin sınıflandırılması.

Kaynak	Karmaşıklık Kategorisi	Karmaşıklık Faktörü	Sınıflandırma - 1	Sınıflandırma - 2	Sınıflandırma - 3
Bakhshi vd. (2016)	Kapsam/İçerik (34)	Paydaşlar arasındaki rekabet düzeyi	Görev Çevresi	Rekabet Koşulları	Büyüklik
	Kapsam/İçerik (34)	Proje esneklik derecesi (kapsam, süreç, organizasyon vb.)	Proje	Operasyonel Zorluk/Riskler	Bağımlılık
	Kapsam/İçerik (34)	Project drive? (Proje enerjisi, iletişim vb.?)	Proje	Proje Takım-İşbirliği/İletişim	Belirsizlik/Bağımlılık
	Kapsam/İçerik (34)	Projenin ticari yeniliği (yeni ortaklar, ekipler vb.)	Proje	Proje-Yenilik	Belirsizlik
	Kapsam/İçerik (34)	Rekabet düzeyi	Görev Çevresi	Rekabet Koşulları	Büyüklik
	Kapsam/İçerik (34)	Sağlık, Emniyet, Güvenlik ve Çevre (İş sağlığı ve güvenliği) konuları	Makro Çevre	Politik/Yasal Koşullar	
	Kapsam/İçerik (34)	Sözleşme şekli	Görev Çevresi	Sözleşme Koşulları	Bağımlılık
	Kapsam/İçerik (34)	Stabil proje ortamı	Makro Çevre	Çevresel Değişkenlik	Belirsizlik
	Kapsam/İçerik (34)	Teknoloji sistemi ile dış çevre arasındaki etkileşim	Makro Çevre	Teknolojik Bağımlılık	Bağımlılık
	Kapsam/İçerik (34)	Yaratıcılık talebi	Görev Çevresi	Müşteri Talep ve Beklentileri	Büyüklik
	Kapsam/İçerik (34)	Yeni yasa ve yönetmelikler	Makro Çevre	Politik/Yasal Değişkenlik	Bağımlılık
	Kapsam/İçerik (34)	Yerel yasa ve yönetmelikler	Makro Çevre	Politik/Yasal Koşullar	Belirsizlik
	Özerklik/Otonomi (20)	Aktörler arasındaki bağımlılık	Organizasyon	Organizasyonel Yapı	Bağımlılık
	Özerklik/Otonomi (20)	Aşamalar/fazlar arasındaki karşılıklı ilişki düzeyi	Proje	Faaliyet-Bağımlılık	Büyüklik
	Özerklik/Otonomi (20)	Bilgi sistemlerinin bağımlılığı	Proje	Kaynak-Bağımlılık	Bağımlılık
	Özerklik/Otonomi (20)	Çevreye bağımlılık	Makro Çevre	Çevresel Bağımlılık	Bağımlılık
	Özerklik/Otonomi (20)	Dinamik ve gelişen ekip yapısı	Proje	Proje Takım-Dinamiklik	Çeşitlilik/Belirsizlik
	Özerklik/Otonomi (20)	Ekip/partner iş birliği ve iletişim	Proje	Proje Takım-İşbirliği/İletişim	Belirsizlik/Bağımlılık
	Özerklik/Otonomi (20)	Hedeflerin/çıkarların karşılıklı bağımlılıkları	Organizasyon	Organizasyonel Yapı	Bağımlılık

Çizelge A.1 (devam): Literatürdeki karmaşıklık faktörlerinin sınıflandırılması.

Kaynak	Karmaşıklık Kategorisi	Karmaşıklık Faktörü	Sınıflandırma - 1	Sınıflandırma - 2	Sınıflandırma - 3
Bakhshi vd. (2016)	Özerklik/Otonomi (20)	Kaynak ve hammadde bağımlılıkları	Proje	Kaynak-Bağımlılık	Bağımlılık
	Özerklik/Otonomi (20)	Kombine taşımacılık (tedarik/nakliye)	Görev Çevresi	Tedarikçilerle İşbirliği/İlişkiler	Çeşitlilik
	Özerklik/Otonomi (20)	Örtüşme ve etkileşim miktarı	Proje	Proje Takım-İşbirliği/İletişim	Büyüklik
	Özerklik/Otonomi (20)	Paydaşlar arası ilişki/bağımlılıklar	Görev Çevresi	Dış Paydaşlarla İşbirliği/İlişkiler	Bağımlılık
	Özerklik/Otonomi (20)	Paylaşım sebebiyle insan kaynağı, malzeme veya herhangi bir kaynağın kullanılabilirliği	Proje	Kaynak Kullanılabilirliği	Belirsizlik/Büyüklik/Bağımlılık
	Özerklik/Otonomi (20)	Programlar arasındaki bağımlılıklar	Proje	Faaliyet-Bağımlılık	Bağımlılık
	Özerklik/Otonomi (20)	Projedeki karar verme sürecine dahil olan yönetim seviyeleri	Organizasyon	Organizasyonel Yapı	Bağımlılık
	Özerklik/Otonomi (20)	Projelerde yer alan kamu çalışanlarının sayısı	Proje	Proje Takım-Büyüklik	Büyüklik
	Özerklik/Otonomi (20)	Spesifikasyonların bağımlılığı	Proje	Operasyonel Zorluk/Riskler	Bağımlılık
	Özerklik/Otonomi (20)	Süreç bağımlılığı	Proje	Faaliyet-Bağımlılık	Bağımlılık
	Özerklik/Otonomi (20)	Teknolojik süreç bağımlılıkları	Proje	Faaliyet-Bağımlılık	Bağımlılık
	Özerklik/Otonomi (20)	Tesisler, departmanlar ve şirketler arasındaki bağımlılıklar	Organizasyon	Organizasyonel Yapı	Bağımlılık
	Özerklik/Otonomi (20)	Ürün bileşenleri arasındaki bağımlılık	Proje	Çıktı-Bağımlılık	Bağımlılık
	Görev (11)	Bilgi bütünlüğü	Proje	Faaliyet-Belirsizlik/Yenilik	Belirsizlik
Lu vd. (2015)	Görev (11)	Çevresel faktörlerde öğelerin açıklığı	Proje	Faaliyet-Belirsizlik	Belirsizlik
	Görev (11)	Çevresel karmaşıklık	Proje	Faaliyet-Karmaşıklık	Belirsizlik
	Görev (11)	Görev niceliği/miktarı	Proje	Faaliyet Sayısı	Büyüklik
	Görev (11)	Hedef belirsizliği	Proje	Amaç/Hedef-Belirsizlik	Belirsizlik
	Görev (11)	Karşılıklı/Çift taraflı bağımlılık	Proje	Faaliyet-Bağımlılık	Bağımlılık
	Görev (11)	Kaynakların kullanılabilirliği	Proje	Kaynak Kullanılabilirliği	Bağımlılık
	Görev (11)	Sıralı bağımlılık	Proje	Faaliyet-Bağımlılık	Bağımlılık
	Görev (11)	Sürecin dinamikliği	Proje	Faaliyet-Dinamiklik	Belirsizlik
	Görev (11)	Teknolojik karmaşıklık	Proje	Faaliyet-Karmaşıklık	Belirsizlik
	Görev (11)	Toplanmış bağımlılık	Proje	Faaliyet-Bağımlılık	Bağımlılık

Çizelge A.1 (devam): Literatürdeki karmaşıklık faktörlerinin sınıflandırılması.

Kaynak	Karmaşıklık Kategorisi	Karmaşıklık Faktörü	Sınıflandırma - 1	Sınıflandırma - 2	Sınıflandırma - 3
Lu vd. (2015)	Organizasyon (9)	Çalışma deneyimi	Proje	Proje Takım-Kapasite	Belirsizlik/Bağımlılık
	Organizasyon (9)	Çalışma geçmişi	Proje	Proje Takım-Kapasite	Belirsizlik/Bağımlılık
	Organizasyon (9)	Koordinasyon yeteneği	Proje	Proje Takım-İşbirliği/İletişim	Belirsizlik/Bağımlılık
	Organizasyon (9)	Liderlik yeteneği	Proje	Yönetmel-Kapasite	Belirsizlik/Bağımlılık
	Organizasyon (9)	Matrisleme derecesi	Organizasyon	Organizasyonel Yapı	Büyüklik
	Organizasyon (9)	Merkezileştirme derecesi	Organizasyon	Organizasyonel Yapı	Büyüklik
	Organizasyon (9)	Organizasyonel çalışanlarının sayısı	Organizasyon	Organizasyonel Yapı	Büyüklik
	Organizasyon (9)	Resmileştirme derecesi	Organizasyon	Organizasyonel Yapı	Büyüklik
	Organizasyon (9)	Teknolojik yetenek	Proje	Proje Takım-Çeşitlilik	Belirsizlik/Bağımlılık
Luo vd. (2017, 2022); Luo, Zhang, & He (2020); Luo, Zhang, & Wu (2020)	Amaç (4)	Amaçların belirsizliği	Proje	Amaç/Hedef-Belirsizlik	Belirsizlik
	Amaç (4)	Paydaşların gerekliliklerindeki değişiklik taleplerinin sayısı	Görev Çevresi	Müşteri Talep ve Beklentileri	Belirsizlik
	Amaç (4)	Proje organizasyonunun değişikliği	Organizasyon	Organizasyonel Yapı	Belirsizlik
	Amaç (4)	Sözleşme ilişkisinin karmaşıklığı	Görev Çevresi	Sözleşme Koşulları	Bağımlılık
	Bilgi (9)	Bilgi belirsizliği	Proje	Bilgi-Belirsizlik	Belirsizlik
	Bilgi (9)	Bilgiyi elde etme derecesi	Proje	Proje Takım-Kapasite	Bağımlılık
	Bilgi (9)	İş birliği duygusu	Organizasyon	Örgütsel İklim	Belirsizlik
	Bilgi (9)	İşlenen bilgi düzeyi	Proje	Faaliyet-Karmaşıklık	Büyüklik
	Bilgi (9)	Katılımcıların deneyimi	Proje	Proje Takım-Kapasite	Belirsizlik
	Bilgi (9)	Kültürel farklılıklar	Organizasyon	Kültürel Çeşitlilik	Belirsizlik/Çeşitlilik
	Bilgi (9)	Proje organizasyonu arasındaki güven	Organizasyon	Örgütsel İklim	Belirsizlik
	Bilgi (9)	Proje yönetimi metodlarının ve araçlarının belirsizliği	Proje	Faaliyet-Belirsizlik/Yenilik	Belirsizlik
	Bilgi (9)	Transfer edilen bilgi kapasitesi	Proje	Proje Takım-Kapasite	Büyüklik
	Çevresel (4)	Değişen ekonomi ortamı	Makro Çevre	Ekonomik Koşullar	Belirsizlik
	Çevresel (4)	Değişen politika ve regülasyon ortamı	Makro Çevre	Politik/Yasal Değişkenlik	Belirsizlik
	Çevresel (4)	Dış paydaşların etkisi	Görev Çevresi	Dış Paydaşlarla İşbirliği/İlişkiler	Bağımlılık
	Çevresel (4)	İnşaat projesi ortamındaki değişiklikler	Makro Çevre	Çevresel Değişkenlik	Belirsizlik
	Görev (3)	Görevler arasındaki ilişkinin bağımlılığı	Proje	Faaliyet-Bağımlılık	Bağımlılık
	Görev (3)	Görevlerin çeşitliliği	Proje	Faaliyet-Çeşitlilik	Çeşitlilik
	Görev (3)	Projedeki teknoloji çeşitliliği	Proje	Kaynak-Çeşitlilik	Çeşitlilik

Çizelge A.1 (devam): Literatürdeki karmaşıklık faktörlerinin sınıflandırılması.

Kaynak	Karmaşıklık Kategorisi	Karmaşıklık Faktörü	Sınıflandırma - 1	Sınıflandırma - 2	Sınıflandırma - 3
Luo vd. (2017, 2022); Luo, Zhang, & He (2020); Luo, Zhang, & Wu (2020)	Organizasyonel (2)	Organizasyon yapısı hiyerarşi sayısı	Organizasyon	Organizasyonel Yapı	Büyüklik
	Organizasyonel (2)	Organizasyonel birim ve departmanların sayısı	Organizasyon	Organizasyonel Yapı	Büyüklik
	Teknolojik (4)	Çokça zor/yüksek teknoloji kullanımının riski	Proje	Operasyonel Zorluk/Riskler	Belirsizlik
	Teknolojik (4)	İnşaat ürünlerindeki yenilik	Makro Çevre	Teknolojik Belirsizlik	Belirsizlik/Çeşitlilik
	Teknolojik (4)	Kaynakların ve yeteneklerin kullanılabilirliği	Proje	Proje Takım-Kapasite	Bağımlılık
	Teknolojik (4)	Yeni teknoloji hakkında bilgi	Proje	Proje Takım-Kapasite	Belirsizlik
Maylor vd. (2008)	Ekip (3)	Grup/Ekip (5 soru)	Proje	Proje Takım-İşbirliği/İletişim	Maylor et al, 2008
	Ekip (3)	Proje personeli (8 soru)	Proje	Proje Takım-Kapasite	
	Ekip (3)	Proje yöneticisi (3 soru)	Proje	Yönetmel-Kapasite	
	Misyon (4)	Belirsizlik (17 soru)	Proje	Amaç/Hedef-Belirsizlik	Belirsizlik
	Misyon (4)	Hedefler (6 soru)	Proje	Amaç/Hedef Sayısı	
	Misyon (4)	Kısıtlar (4 soru)	Proje	Amaç/Hedef-Kısıtlar	Bağımlılık
	Misyon (4)	Ölçek (6 soru)	Proje	Kapsam-Genişlik	
	Organizasyon (2)	Organizasyonel ortam (proje/organizasyon fit, organizasyonel değişiklik)	Organizasyon	Organizasyonel Yapı	Belirsizlik
	Organizasyon (2)	Zaman ve mekan (zaman, mekan, coğrafya)	Proje	Yönetmel-Zorluk	
	Paydaşlar (2)	Paydaşların ilişkileri (sosyo-politik, bağımlılıklar)	Görev Çevresi	Dış Paydaşlarla İşbirliği/İlişkiler	Bağımlılık/Belirsizlik
	Paydaşlar (2)	Paydaşların özellikleri (kimlik, proje desteği, ilişki/sözleşme, deneyim, güç, ana paydaşlar)	Görev Çevresi	Dış Paydaşlarla İşbirliği/İlişkiler	Çeşitlilik
	Teslimat (2)	Kaynaklar (insan, teknoloji, mali)	Proje	Kaynak-Büyüklik	
	Teslimat (2)	Süreç (yönetim, karar alma, proje süreçleri, proje yönetim metodolojisi, değişiklik yönetimi)	Proje	Faaliyet-Belirsizlik/Yenilik	Maylor et al, 2020

Çizelge A.1 (devam): Literatürdeki karmaşıklık faktörlerinin sınıflandırılması.

Kaynak	Karmaşıklık Kategorisi	Karmaşıklık Faktörü	Sınıflandırma - 1	Sınıflandırma - 2	Sınıflandırma - 3
Maylor & Turner (2017)	Aniden Beliren Karmaşıklık (8)	Bütçenin kısıtlanması	Proje	Bütçe Kısıtları	Belirsizlik/Bağımlılık
	Aniden Beliren Karmaşıklık (8)	Liderlerin sürekli değişmesi	Organizasyon	Organizasyonel Yapı	Belirsizlik
	Aniden Beliren Karmaşıklık (8)	Müşteri ihtiyaçlarının değişmesinin projeyi geciktirmesi	Görev Çevresi	Müşteri Talep ve Beklentileri	Belirsizlik
	Aniden Beliren Karmaşıklık (8)	Müşteri isterinin net olmaması	Görev Çevresi	Müşteri Talep ve Beklentileri	Belirsizlik
	Aniden Beliren Karmaşıklık (8)	Projenin yeni bir ticari model olması	Proje	Proje-Yenilik	Belirsizlik
	Aniden Beliren Karmaşıklık (8)	Şirketin devredilmesi	Organizasyon	Organizasyonel Yapı	Belirsizlik
	Aniden Beliren Karmaşıklık (8)	Teknolojik deneyim eksikliği	Proje	Proje Takım-Kapasite	Belirsizlik
	Aniden Beliren Karmaşıklık (8)	Yeni yasa ve yönetmelikler	Makro Çevre	Politik/Yasal Değişkenlik	Belirsizlik
	Sosyo-politik Karmaşıklık (5)	Bazı çalışanların kendilerini projenin sahibi gibi görmesi ve hiçbir konuda uzlaşmaması	Proje	Proje Takım-İşbirliği/İletişim	Belirsizlik/Bağımlılık
	Sosyo-politik Karmaşıklık (5)	Çalışanların birbirini anlamaması	Proje	Proje Takım-İşbirliği/İletişim	Belirsizlik/Bağımlılık
	Sosyo-politik Karmaşıklık (5)	Herkesin kendini müşteri gibi görmesi ve farklı taleplerde bulunması	Görev Çevresi	Müşteri Talep ve Beklentileri	Belirsizlik/Bağımlılık
	Sosyo-politik Karmaşıklık (5)	Yabancı ekip üyeleri ile kültürel olarak farklı düşünme	Proje	Proje Takım-Çeşitlilik	Belirsizlik
	Sosyo-politik Karmaşıklık (5)	Yeni katılan ekip üyelerinden kaynaklanan çatışmalar	Proje	Proje Takım-İşbirliği/İletişim	Büyüklik/Belirsizlik
	Yapısal Karmaşıklık (9)	Birçok farklı departmanla çalışılma	Organizasyon	Organizasyonel Yapı	Büyüklik
	Yapısal Karmaşıklık (9)	Birçok farklı sürecin içerilmesi	Proje	Faaliyet-Çeşitlilik	Büyüklik
	Yapısal Karmaşıklık (9)	Diğer projelere güven	Organizasyon	Örgütsel İklim	Belirsizlik
	Yapısal Karmaşıklık (9)	Farklı lokasyonlarda çalışan takımlar	Proje	Yönetsel-Zorluk	Çeşitlilik/Bağımlılık
	Yapısal Karmaşıklık (9)	Paydaşların çokluğu	Görev Çevresi	Dış Paydaş Sayısı	Büyüklik
	Yapısal Karmaşıklık (9)	Projenin stratejik önemi	Proje	Proje Önem/Kritiklik	Büyüklik
	Yapısal Karmaşıklık (9)	Uzun süreçler	Proje	Operasyonel Zorluk/Riskler	Büyüklik
	Yapısal Karmaşıklık (9)	Yasal kısıtların çokluğu	Makro Çevre	Politik/Yasal Koşullar	Büyüklik
	Yapısal Karmaşıklık (9)	Zaman baskısı	Proje	Süre Kısıtları	Bağımlılık

Çizelge A.1 (devam): Literatürdeki karmaşıklık faktörlerinin sınıflandırılması.

Kaynak	Karmaşıklık Kategorisi	Karmaşıklık Faktörü	Sınıflandırma - 1	Sınıflandırma - 2	Sınıflandırma - 3
PMI (2014)	Anlam Karmaşası (2)	Beklenmeyen Değişiklikler	Makro Çevre	Çevresel Belirsizlik	Belirsizlik
	Anlam Karmaşası (2)	Belirsizlik	Proje	Faaliyet-Belirsizlik/Yenilik	Belirsizlik
	İnsan Davranışı (4)	Bireysel Davranışlar	Proje	Proje Takım-İşbirliği/İletişim	Belirsizlik/Bağımlılık
	İnsan Davranışı (4)	Grup, Organizasyonel ve Politik Davranışlar	Organizasyon	Örgütsel İklim	Çeşitlilik
	İnsan Davranışı (4)	İletişim ve Kontrol	Proje	Proje Takım-İşbirliği/İletişim	Belirsizlik/Bağımlılık
	İnsan Davranışı (4)	Organizasyonel tasarım ve geliştirme	Organizasyon	Organizasyonel Yapı	Çeşitlilik
	Sistem Davranışı (3)	Bağımlılık	Proje	Faaliyet-Bağımlılık	Bağımlılık
	Sistem Davranışı (3)	Bağılantılılık	Proje	Faaliyet-Bağımlılık	Bağımlılık
	Sistem Davranışı (3)	Sistem Dinamikleri	Proje	Faaliyet-Dinamiklik	Belirsizlik/Bağımlılık
	Amaçlar, gereklilikler ve beklentiler (4)	Açık bir şekilde ifade edilen gereksinimler	Proje	Müşeri Talep ve Beklentileri	Belirsizlik
Poveda-Bautista vd. (2018)	Amaçlar, gereklilikler ve beklentiler (4)	Belirsiz ve değişen mevzuat gereklilikleri	Makro Çevre	Politik/Yasal Değişkenlik	Belirsizlik
	Amaçlar, gereklilikler ve beklentiler (4)	Gerçekçi beklentiler	Proje	Müşeri Talep ve Beklentileri	Belirsizlik
	Amaçlar, gereklilikler ve beklentiler (4)	Net stratejik amaçlar	Proje	Amaç/Hedef-Belirsizlik	Belirsizlik
	İlgili taraflar, Entegrasyon (3)	Kullanıcı katılımı	Proje	Proje Takım-İşbirliği/İletişim	Bağımlılık
	İlgili taraflar, Entegrasyon (3)	Proje sponsorunun proje metodolojisine bağlılığı/taahhüdü	Organizasyon	İç Paydaşlarla İşbirliği/İlişkiler	Bağımlılık
	İlgili taraflar, Entegrasyon (3)	Üst yönetim desteği	Organizasyon	Örgütsel İklim	Belirsizlik
	Liderlik, Takım çalışması, Kararlar (4)	Dâhil edilen yakından/uzaktan çalışan takımlar	Proje	Proje Takım-İşbirliği/İletişim	Büyüklik
	Liderlik, Takım çalışması, Kararlar (4)	Gayretli ve odaklı ekip üyeleri	Proje	Proje Takım-Kapasite	Belirsizlik/Bağımlılık
	Liderlik, Takım çalışması, Kararlar (4)	Motivasyonu olan takım	Proje	Proje Takım-Kapasite	Belirsizlik/Bağımlılık
	Liderlik, Takım çalışması, Kararlar (4)	Yakından/uzaktan çalışan takımların projedeki teknik ve iş süreçlerine hâkimiyeti	Proje	Proje Takım-Kapasite	Belirsizlik/Bağımlılık
	Proje yönetimi metotları, araçları ve teknikleri (1)	Projede kullanılan kademeli veya tekrarlı metodoloji	Proje	Yöntemsel-Karmaşıklık	Bağımlılık

Çizelge A.1 (devam): Literatürdeki karmaşıklık faktörlerinin sınıflandırılması.

Kaynak	Karmaşıklık Kategorisi	Karmaşıklık Faktörü	Sınıflandırma - 1	Sınıflandırma - 2	Sınıflandırma - 3
Poveda-Bautista vd. (2018)	Teknoloji (5)	IT yönetimi desteği	Organizasyon	Organizasyonel Yapı	Belirsizlik
	Teknoloji (5)	Teknoloji deneyimsizliği	Proje	Proje Takım-Kapasite	Belirsizlik
	Teknoloji (5)	Teknolojinin yetersiz uygulaması/kullanımı	Proje	Proje Takım-Kapasite	Bağımlılık
	Teknoloji (5)	Telekomünikasyon kısıtları	Makro Çevre	Teknolojik Kısıtlar	Bağımlılık
	Teknoloji (5)	Yeni teknolojiler	Makro Çevre	Teknolojik Belirsizlik	Belirsizlik/Büyüklik
Senescu vd. (2013)	Organizasyon (6)	Açıklık (bağımsız, kendine yeten ekip - yüksek kamu ve/veya vatandaş katılımı sebebiyle proje ekibi eksik tanımlanmış)	Organizasyon	Örgütsel İklim	Bağımlılık
	Organizasyon (6)	Bağımlılıklar (çalışanlar bağımsız çalışabilir - çalışanlar çalışmak için birbirine ihtiyaç duyar)	Organizasyon	Organizasyonel Yapı	Bağımlılık
	Organizasyon (6)	Çeşitlilik/Çokluk (1: tek disiplin, az çalışan - 5: birçok şirket, yüzlerce çalışan)	Organizasyon	Organizasyonel Yapı	Çeşitlilik
	Organizasyon (6)	Doğrusal olmama (bir kişi diğer herkes üzerinde yüksek etkiye sahip değil - herkes kritik yol üzerinde, hiç kimse kolayca yer değiştirebilir değil)	Proje	Faaliyet-Bağımlılık	Çeşitlilik
	Organizasyon (6)	Eş etkinlik/Birliktelik (belirgin ve ayrı sorumlulukları olan ekip - birlikte çalışan ekip)	Proje	Proje Takım-İşbirliği/İletişim	Belirsizlik
	Organizasyon (6)	Nedensel ilişki (hiyerarşik etkileşim, bir kişi yalnızca bir üst hiyerarşideki kişiyi etkiler - yüksek entegrasyon, bir kişi diğer birçok kişiyi etkiler)	Organizasyon	Organizasyonel Yapı	Bağımlılık
	Süreç Karmaşıklığı (6)	Açıklık (görev kapsamını belirlemek ve tahmin etmek kolaydır - bilinmeyen faktörler hangi görevlerin gerekli olacağını önceden bilmeyi zorlaştırır)	Proje	Faaliyet-Belirsizlik/Yenilik	Belirsizlik
	Süreç Karmaşıklığı (6)	Bağımlılıklar (görevler bağımsız olarak yapılabilir ve küçük parçalara ayrılabilir - görevler aynı yapılmalıdır ve küçük parçalara ayrılamazlar)	Proje	Faaliyet-Bağımlılık	Bağımlılık
	Süreç Karmaşıklığı (6)	Çeşitlilik/Çokluk (Az görev, birçok görev/iş)	Proje	Faaliyet-Çeşitlilik	Çeşitlilik/Büyüklik
	Süreç Karmaşıklığı (6)	Doğrusal olmama (her görev neredeyse izoledir ve hatalar kümülatif değildir - öngörülemeyen büyük etkiler, küçük bir görevdeki küçük bir hata gelecekteki görevler üzerinde büyük etkiye sahip olabilir)	Proje	Faaliyet-Bağımlılık	Büyüklik
	Süreç Karmaşıklığı (6)	Eş etkinlik/Birliktelik (iki görev toplamı ikidir - iki görevin toplamı tüm işten daha büyüktür)	Proje	Faaliyet-Bağımlılık	Büyüklik
	Süreç Karmaşıklığı (6)	Nedensel ilişki (yinelemesiz/tekrarlamasız - iteratif/tekrarlayan)	Proje	Faaliyet-Karmaşıklık	Bağımlılık

Çizelge A.1 (devam): Literatürdeki karmaşıklık faktörlerinin sınıflandırılması.

Kaynak	Karmaşıklık Kategorisi	Karmaşıklık Faktörü	Sınıflandırma - 1	Sınıflandırma - 2	Sınıflandırma - 3
Senescu vd. (2013)	Ürün Karmaşıklığı (6)	Açıklık (ürün kapsamı veya kontrol açısından çevreye hassas/duyarlı değildir- çevreye karşı duyarlıdır)	Proje	Çıktı-Karmaşıklık	Çeşitlilik
	Ürün Karmaşıklığı (6)	Bağımlılıklar (fonksiyonlar bağımsız - fonksiyonlar bağımsız olarak çalışmaz, entegredir)	Proje	Çıktı-Bağımlılık	Bağımlılık
	Ürün Karmaşıklığı (6)	Çeşitlilik/Çokluk (1: az bileşen, az detay - 5: çok bileşen, yüksek detay)	Proje	Çıktı-Çeşitlilik	Çeşitlilik/Büyüklik
	Ürün Karmaşıklığı (6)	Doğrusal olmama (doğrusal, kolay tahmin edilebilir - doğrusal olmayan, tahmin edilebilirliği zor)	Proje	Çıktı-Belirsizlik	Belirsizlik
	Ürün Karmaşıklığı (6)	Eş etkinlik/Birliktelik (ürün küçük parçaların toplamıdır - her şeyin birlikte değerlendirilmesi gerekir)	Proje	Çıktı-Bağımlılık	Çeşitlilik
	Ürün Karmaşıklığı (6)	Nedensel ilişki (bir bileşenin diğerleri üzerinde etkisi yok - bir bileşen birçok diğer bileşeni etkiliyor)	Proje	Çıktı-Bağımlılık	Bağımlılık
Mamédio & Meyer (2020)	İnsan Boyutu (4)	Geçmiş deneyimi olmayan acentelerin/temsilcilerin çeşitliliği	Görev Çevresi	Dış Paydaş-Çeşitlilik	Çeşitlilik/Belirsizlik
	İnsan Boyutu (4)	İş birliği ve entegrasyon	Proje	Proje Takım-İşbirliği/İletişim	Belirsizlik/Bağımlılık
	İnsan Boyutu (4)	Yaratıcılık ve geçersizlik	Proje	Faaliyet-Belirsizlik/Yenilik	Büyüklik
	İnsan Boyutu (4)	Yenilik	Proje	Proje-Yenilik	Belirsizlik
	Siyasi Boyut (4)	Çatışmalar ve anlaşmazlıklar	Görev Çevresi	Dış Paydaşlarla İşbirliği/İlişkiler	Belirsizlik/Bağımlılık
	Siyasi Boyut (4)	İlgi alanlarının çeşitliliği ve belirsizlik	Görev Çevresi	Dış Paydaş-Çeşitlilik	Çeşitlilik/Belirsizlik
	Siyasi Boyut (4)	Müzakere ve açık söylemler	Görev Çevresi	Dış Paydaşlarla İşbirliği/İlişkiler	Belirsizlik
	Siyasi Boyut (4)	Öngörülemezlik	Makro Çevre	Politik/Yasal Değişkenlik	Belirsizlik
	Teknik Boyut (4)	Adaptasyon ve esneklik	Proje	Proje Takım-Kapasite	Bağımlılık
	Teknik Boyut (4)	Farklı uzmanlıklara sahip profesyonellerin çeşitliliği	Proje	Proje Takım-Çeşitlilik	Çeşitlilik
	Teknik Boyut (4)	Teknik formalite için yüksek talep	Görev Çevresi	Müşteri Talep ve Beklentileri	Belirsizlik
	Teknik Boyut (4)	Teknik geri bildirim döngüsü	Görev Çevresi	Müşteri Talep ve Beklentileri	Bağımlılık

Çizelge A.1 (devam): Literatürdeki karmaşıklık faktörlerinin sınıflandırılması.

Kaynak	Karmaşıklık Kategorisi	Karmaşıklık Faktörü	Sınıflandırma - 1	Sınıflandırma - 2	Sınıflandırma - 3
Dao vd. (2017, 2022); Kermanshachi vd. (2020)	Kapsam Tanımı (5)	Ana proje ekibi üyeleri üzerindeki değişiklik yönetiminin netliği	Proje	Faaliyet-Belirsizlik/Yenilik	Belirsizlik
	Kapsam Tanımı (5)	Değişiklik taleplerinin büyüklüğünün proje uygulama sürecine etkisi	Görev Çevresi	Müşteri Talep ve Beklentileri	Belirsizlik
	Kapsam Tanımı (5)	Değişiklik taleplerinin zamanlamasının proje uygulama sürecine etkisi	Görev Çevresi	Müşteri Talep ve Beklentileri	Belirsizlik
	Kapsam Tanımı (5)	İnşaat yapımının başlaması sırasında tamamlanan mühendislik/tasarım yüzdesi	Proje	Kapsam-Genişlik	Büyüklik
	Kapsam Tanımı (5)	Projedeki tasarımı değişikliklere yönlendiren Bilgi Talebi Dokümanı (RFI)	Görev Çevresi	Müşteri Talep ve Beklentileri	Belirsizlik
	Lokasyon (5)	Detaylı mühendislik/tasarım aşamasında bu projedeki uygulama lokasyonlarının sayısı	Proje	Yönetsel-Zorluk	Büyüklik
	Lokasyon (5)	Proje konumunun proje planı üzerindeki etkisi	Proje	Yönetsel-Zorluk	Büyüklik/Belirsizlik
	Lokasyon (5)	Projenin yoğun nüfuslu alanlardan uzak olan konumu (2016 çalışmasında yok)	Proje	Yönetsel-Zorluk	Bağımlılık
	Lokasyon (5)	Projeyi desteklemek için sahadaki mevcut altyapı seviyesi (2016 çalışmasında yok)	Makro Çevre	Çevresel Zorluk	Bağımlılık
	Lokasyon (5)	Üretim aşamasında bu projedeki uygulama lokasyonlarının sayısı	Proje	Yönetsel-Zorluk	Büyüklik
	Mali Planlama (2)	Konsept aşamasından projenin tamamlanmasına kadar olan finansman fazlarının sayısı	Proje	Bütçe Büyüklüğü	Büyüklik
	Mali Planlama (2)	Proje finansmanını sağlamada spesifik gecikmeler ve zorluklar	Proje	Bütçe Kısıtları	Bağımlılık
	Paydaş Yönetimi (3)	Bu projenin organizasyonun genel başarısı üzerine etkisi	Proje	Proje Önem/Kritiklik	Büyüklik
	Paydaş Yönetimi (3)	Dış (düzenleyici) kurum/kuruluşların gerekli teftişlerinin proje planı üzerindeki etkisi	Makro Çevre	Politik/Yasal Koşullar	Bağımlılık
	Paydaş Yönetimi (3)	Dış paydaşların gerekli onaylarının orijinal proje planı üzerindeki etkisi	Görev Çevresi	Dış Paydaşlarla İşbirliği/İlişkiler	Belirsizlik
	Proje Arayüzleri (3)	En yüksek katılımcı sayısı (tam zamanlı) (2016 çalışmasında yok)	Proje	Proje Takım-Büyüklik	Büyüklik
	Proje Arayüzleri (3)	Projenin detaylı mühendislik/tasarım aşamasında proje yönetim ekibindeki en yüksek katılımcı sayısı (tam zamanlı)	Proje	Proje Takım-Büyüklik	Büyüklik
	Proje Arayüzleri (3)	Projenin satın alma aşamasında proje yönetim ekibindeki en yüksek katılımcı sayısı (tam zamanlı)	Proje	Proje Takım-Büyüklik	Büyüklik

Çizelge A.1 (devam): Literatürdeki karmaşıklık faktörlerinin sınıflandırılması.

Kaynak	Karmaşıklık Kategorisi	Karmaşıklık Faktörü	Sınıflandırma - 1	Sınıflandırma - 2	Sınıflandırma - 3
Dao vd. (2017, 2022); Kermanshachi vd. (2020)	Proje Kaynakları (5)	Malzemelerin gerekli olduğunda mevcut olmamasından dolayı üretilen geçiçi çözümlerin sıklığı	Proje	Kaynak Kısıtları	Bağımlılık
	Proje Kaynakları (5)	Planlanan proje/inşaat yönetimi çalışanlarına kıyasla projede çalışacak olan proje/inşaat yönetimi çalışanının yüzdesi	Proje	Proje Takım-Büyüklik	Belirsizlik/Bağımlılık
	Proje Kaynakları (5)	Proje inşaatı sırasında yetenekli saha zanaat işçiliğinin kalite sorunları	Proje	Proje Takım-Kapasite	Bağımlılık
	Proje Kaynakları (5)	Yerel kaynaklı zanaat işçiliğinin yüzdesi (iş sahasının 100 mil yarıçapı içinde)	Proje	Proje Takım-Kapasite	Bağımlılık
	Proje Kaynakları (5)	Zanaatkar iş gücü devrinin (turnover) yüzdesi	Proje	Proje Takım-Dinamiklik	Belirsizlik/Bağımlılık
	Tasarım ve Teknoloji (4)	Projenin detaylı mühendislik/tasarım aşamasında yer alacak teknolojilere şirketin aşinalık derecesi	Proje	Proje Takım-Kapasite	Belirsizlik
	Tasarım ve Teknoloji (4)	Projenin tesis işletme aşamasında yer alacak teknolojilere şirketin aşinalık derecesi	Proje	Proje Takım-Kapasite	Belirsizlik
	Tasarım ve Teknoloji (4)	Projenin yapılış (construction) aşamasında yer alacak teknolojilere şirketin aşinalık derecesi	Proje	Proje Takım-Kapasite	Belirsizlik
	Tasarım ve Teknoloji (4)	Şirketteki tipik bir projeye kıyasla bu projedeki sistem tasarımı ve entegrasyonundaki zorluk	Proje	Proje-Yenilik	Büyüklik
	Uygulama Hedefleri (2)	Endüstriyel (dış)/ iç kıyasalamalarla (benchmarklarla) hedef proje finansmanının karşılaştırması	Proje	Bütçe Kısıtları	Belirsizlik
	Uygulama Hedefleri (2)	Endüstriyel (dış)/ iç kıyasalamalarla (benchmarklarla) hedef proje takviminin karşılaştırması	Proje	Faaliyet-Belirsizlik	Belirsizlik
	Yasal Yükümlülükler (4)	Dış kurumların proje planı üzerindeki etkisi	Makro Çevre	Politik/Yasal Koşullar	Bağımlılık
	Yasal Yükümlülükler (4)	Gerekli olan izinlerin toplam sayısı	Makro Çevre	Politik/Yasal Koşullar	Bağımlılık
	Yasal Yükümlülükler (4)	İzin alma sürecindeki zorluk seviyesi	Makro Çevre	Politik/Yasal Koşullar	Bağımlılık
	Yasal Yükümlülükler (4)	Tasarım onayını alma sürecindeki zorluk	Makro Çevre	Politik/Yasal Koşullar	Bağımlılık/Büyüklik
	Yönetişim (3)	Bu projedeki değişiklik talepleri onayının proje yöneticisinin üzerine çıkma sayısı	Organizasyon	Organizasyonel Yapı	Bağımlılık
	Yönetişim (3)	Bu projedeki ortak girişim partnerlerinin sayısı	Görev Çevresi	Dış Paydaş Sayısı	Büyüklik
	Yönetişim (3)	Proje planı üzerinde karar verme yetkisine sahip olacak, proje yönetimi ekibinin üzerindeki idari gözetim/izleme kuruluşlarının sayısı	Görev Çevresi	Dış Paydaş Sayısı	Büyüklik

EK B

Çalışma ile ilgili açıklamaları okudum, anladım ve dilediğim zaman ayrılma hakkım saklı kalmak koşulu ile çalışmaya katılmayı kabul ediyorum.

☐ Onaylıyorum

Ar-Ge Projesi Deneyimi

Daha önce ekip üyesi veya yönetici/yürütücü olarak, içinde Ar-Ge unsuru barındıran bir projede* görev aldınız mı?

**: Araştırma ve/veya pratik deneyimden elde edilen bilgilerden hareketle (i) yeni malzeme, ürün, hizmet, yazılım, cihaz, makine, süreç, teknoloji, sistem, vb. çıktıların üretildiği veya (ii) var olanların önemli ölçüde geliştirildiği*

- ☐ Evet
- ☐ Hayır (Hayırsa teşekkür edilerek anket sonlandırılır.)

Bölüm 1. Genel Bilgiler

Bu bölümde size ve çalıştığınız firmaya/kuruma ait genel bilgilerin yer aldığı sorular mevcuttur.

Yaşınız:

- ☐ 20-25
- ☐ 26-30
- ☐ 31-35
- ☐ 36-40
- ☐ 41-45
- ☐ 46-50
- ☐ 51-55
- ☐ 56-60
- ☐ 61-65
- ☐ 66 ve üzeri

Cinsiyetiniz:

- ☐ Kadın
- ☐ Erkek

Eğitim Düzeyiniz:

- ☐ Lisans
- ☐ Yüksek Lisans
- ☐ Doktora
- ☐ Diğer: (Belirtiniz)

Çalıştığınız Firmanın Sektörü:

- ☐ Bilişim Teknolojileri
- ☐ Cam, Çimento ve Toprak
- ☐ Danışmanlık
- ☐ Eğitim
- ☐ Elektrik ve Elektronik
- ☐ Enerji
- ☐ Finans
- ☐ Gıda
- ☐ Holding
- ☐ İnşaat
- ☐ Kimya
- ☐ Maden
- ☐ Makine
- ☐ Medya
- ☐ Metal
- ☐ Otomotiv
- ☐ Sağlık
- ☐ Savunma Sanayi
- ☐ Sigorta
- ☐ Spor
- ☐ Tarım
- ☐ Teknoloji
- ☐ Tekstil
- ☐ Telekomünikasyon
- ☐ Ticaret (Satış ve Pazarlama)
- ☐ Turizm
- ☐ Tüketim
- ☐ Ulaştırma ve Lojistik
- ☐ Diğer: (Belirtiniz)

Çalıştığınız Firmadaki Pozisyonunuz:

- Kısa metin girişi

En Son Görev Aldığınız/Yönettiğiniz Ar-Ge Projesindeki Pozisyonunuz:

- Proje Yöneticisi/Yürütücüsü
- Proje Ekip Üyesi (Mühendis, Uzman vb.)
- Danışman
- Diğer: (Belirtiniz)

Toplam İş Deneyim Süreniz:

- ≤ 1 yıl
- $> 1 - \leq 3$ yıl
- $> 3 - \leq 5$ yıl
- $> 5 - \leq 10$ yıl
- > 10 yıl

Proje Yönetiminde Toplam Deneyim Süreniz:

- ≤ 1 yıl
- $> 1 - \leq 3$ yıl
- $> 3 - \leq 5$ yıl
- $> 5 - \leq 10$ yıl
- > 10 yıl

En Son Görev Aldığınız/Yönettiğiniz Ar-Ge Projesinin Türü:

- Temel Araştırma Projesi
- Ürün/Hizmet Tasarımı Projesi
- Ürün/Hizmet Geliştirme Projesi
- Süreç Tasarımı Projesi
- Süreç Geliştirme Projesi
- Teknoloji Tasarımı Projesi
- Teknoloji Geliştirme Projesi
- Diğer: (Belirtiniz)

En Son Görev Aldığınız/Yönettiğiniz Ar-Ge Projesinin Büyüklüğü (Bütçe):

- ≤ 5 milyon TL
- $> 5 - \leq 10$ milyon TL
- $> 10 - \leq 30$ milyon TL
- $> 30 - \leq 50$ milyon TL
- $> 50 - \leq 100$ milyon TL
- > 100 milyon TL

En Son Görev Aldığınız/Yönettiğiniz Ar-Ge Projesinin Süresi:

- ≤ 6 ay
- $> 6 - \leq 12$ ay
- $> 12 - \leq 24$ ay
- $> 24 - \leq 36$ ay
- > 36 ay

Bölüm 2. Proje Karmaşıklığına Yönelik Sorular

Aşağıda proje karmaşıklığına sebep olan faktörler yer almaktadır. Listelenen bu faktörlerin, en son görev aldığınız/yönettiğiniz Ar-Ge projesi için ne düzeyde geçerli olduğunu değerlendiriniz.

Soruları cevaplarken genel deneyiminizi değil, en son görev aldığınız/yönettiğiniz Ar-Ge projesini göz önünde bulundurmanız beklenmektedir.

(1: Çok Az; 2: Az; 3: Orta Düzeyde; 4: Fazla; 5: Çok Fazla)

1. Çevresel ortamla ilgili (hava koşulları, coğrafik konum, altyapı eksiklikleri, vb.) değişkenlik, belirsizlik, bağımlılık ve risklerden kaynaklanan zorlayıcı koşullar
2. Ekonomik koşullardaki (döviz kuru, faiz oranları, enflasyon, vergiler, teşvikler vb.) değişkenlik, belirsizlik ve risklerden kaynaklanan zorlayıcı durumlar
3. Politik ve yasal koşullardaki (politik etkiler, yasa ve yönetmelikler, norm ve standartlar, yasal izinler, uluslararası ilişkiler, vb.) değişkenlik ve belirsizlikten kaynaklanan zorlayıcı durumlar
4. Teknolojik ortamla ilgili (teknolojik yenilik, teknoloji olgunluğu, teknolojik altyapı, fikri mülkiyet hakları, vb.) değişkenlik, belirsizlik ve bağımlılıktan kaynaklanan zorlayıcı koşullar
5. Toplumsal ortamla ilgili (kamu gündemi, toplumsal bilinç ve baskılar, medya, vb.) risk ve zorluklardan kaynaklanan zorlayıcı koşullar
6. Dış paydaşlarla (proje ortaklarıyla) ilişkiler, paydaşlar arası etkileşim ve bağımlılıklardan kaynaklanan zorlayıcı koşullar (Ortaklık yapısı, güven duygusu, çıkar çatışmaları, sözleşme koşulları, vb.)
7. Dış paydaşların (proje ortaklarının) çokluğu ve çeşitliliğinden kaynaklanan zorlayıcı koşullar (Paydaş sayısı, kültürel çeşitlilik, lokasyon çeşitliliği, ilgi alanlarının çeşitliliği, bakış açılarının çeşitliliği, vb.)
8. Müşterilerin talep ve beklentileri ile ilgili değişkenlik ve belirsizliklerden kaynaklanan zorlayıcı koşullar (Özelleşmiş çıktılar, kalite gereksinimleri, eksik tanımlanmış standartlar, gerçekçi olmayan beklentiler, vb.)
9. Tedarikçilerle ilişkiler, etkileşim ve bağımlılıklardan kaynaklanan zorlayıcı koşullar (Tedarikçilerin sayısı, tedarikçilerin pazarlık gücü ve yetkinliği, güven ilişkisi, çatışma ve anlaşmazlıklar, vb.)
10. Rekabet ortamı ve rekabet seviyesinden kaynaklanan zorlayıcı koşullar (Rakip sayısı, sektör dinamikleri, mevcut ve potansiyel rekabet düzeyi, vb.)
11. Proje organizasyonundaki bireyler ve bölümler arasındaki iş birliği ve ilişki ortamından kaynaklanan zorlayıcı koşullar (Açıklık, güven, destek, baskı, vb.)
12. Proje organizasyonundaki kültürel yapı ve çeşitlilikten kaynaklanan zorlayıcı koşullar (Kültürel farklılıklar, farklı uzmanlıklar, algısal farklılıklar, vb.)
13. Proje organizasyonu ile ilgili finansal risklerden kaynaklanan zorlayıcı koşullar (Zayıf mali yapı, tahsil edilemeyen alacaklar, ödeme zorlukları, vb.)
14. Proje organizasyonu ile ilgili operasyonel risklerden kaynaklanan zorlayıcı koşullar (Bürokrasi seviyesi, deneyim seviyesi, bilgi akışları, vb.)
15. Proje organizasyonunun organizasyonel yapısından kaynaklanan zorlayıcı koşullar (Merkezileşme derecesi, hiyerarşik düzey sayısı, matris/fonksiyonel yapı, birimler arası bağımlılıklar, vb.)

16. Projenin amaç ve hedeflerine ilişkin belirsizliklerin oluşturduğu zorlayıcı koşullar
17. Projenin amaç ve hedeflerinin sayısı, çeşitliliği ve bunların birbirlerine bağımlılık ve uyumluluk durumlarıyla ilgili zorlayıcı koşullar
18. Planlanan proje bütçesinin yapısı (finansal kaynakların sayısı, çeşitliliği, esnekliği, yatırım harcamalarının büyüklüğü, bütçe/maliyet kısıtları, vb.) ve yönetilebilirliği ile ilgili zorlayıcı koşullar
19. Hedeflenen proje çıktılarının yapısı (çıkıtı sayısı, çeşitliliği, bağımlılıkları, özelleştirme derecesi, tasarımın teknik zorluğu, vb.) ve yönetilebilirliği ile ilgili zorlayıcı koşullar
20. Proje kapsam ve faaliyetlerine/iş paketlerine ilişkin değişkenlik ve belirsizliklerin oluşturduğu zorlayıcı koşullar
21. Proje faaliyetlerinin sayısı (kapsam genişliği), çeşitliliği ve faaliyetler arası bağımlılıklardan kaynaklanan zorlayıcı koşullar
22. Planlanan proje kaynaklarının (teknoloji, sistem, araç, donanım, makine, vb.) ulaşılabilirliği ve yönetilebilirliği ile ilgili zorlayıcı koşullar
23. Planlanan proje insan kaynağı yapısı (sayısal yeterlilik, yetkinlik, uzmanlık alanı çeşitliliği, kültürel çeşitlilik, vb.) ve yönetilebilirliği ile ilgili zorlayıcı koşullar
24. Proje ekip üyeleri arasındaki ilişkiler ile aralarındaki etkileşim ve bağımlılıklardan kaynaklanan zorlayıcı koşullar (İletişim, koordinasyon, katılım düzeyi, güven duygusu, çatışmalar, vb.)
25. Proje yöneticisinin yönetsel yetkinliğinden kaynaklanan zorlayıcı koşullar (Bilgi düzeyi, deneyim, liderlik, vb.)
26. Proje yönetimi metot ve araçlarının yapısı (sayısı, çeşitliliği, değişkenliği, yenilik düzeyi, geliştirme kapsamı) ve bunların koordineli bir şekilde kullanımı ile ilgili zorlayıcı koşullar
27. Proje süresi ile ilgili zorlayıcı koşullar (zaman baskısı, çoklu zaman dilimleri, vb.)
28. Projenin stratejik öneminden ve kritiklik seviyesinden kaynaklanan zorlayıcı koşullar
29. **En son** görev aldığınız/yönettiğiniz ve **yukarıdaki soruları cevaplarken dikkate aldığınız Ar-Ge projesinin** karmaşıklık düzeyini belirtiniz. (1: Çok Az, 2: Az, 3: Orta Düzeyde, 4: Çok, 5: Çok Fazla)

EK C

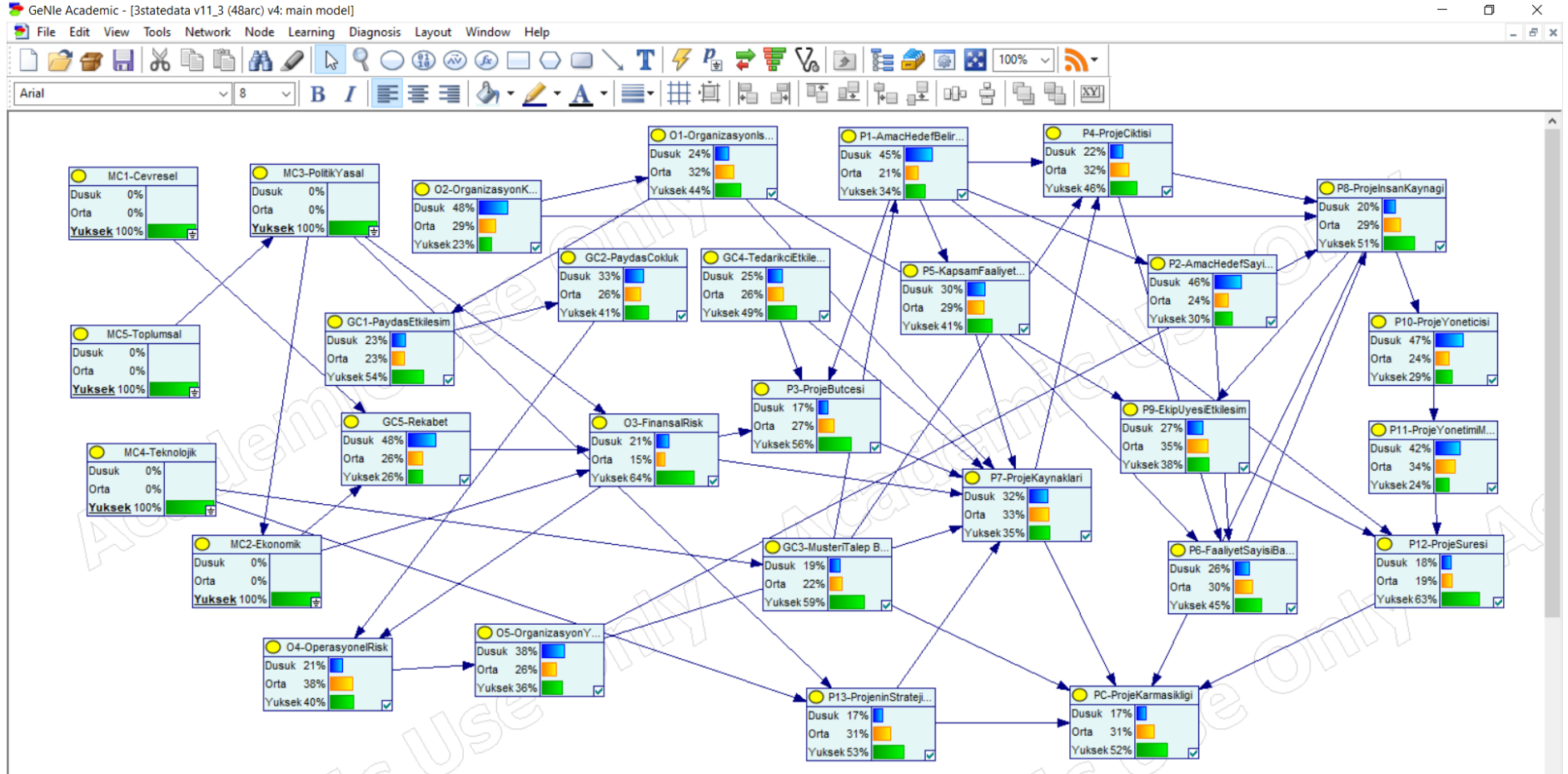
Çizelge C.1: Etki zinciri analizinin sayısal sonuçları.

Ebeveyn Düğüm	Çocuk Düğüm	Ortalama	Maksimum	Ağırlıklı
P1-AmacHedefBelirsizlik	P2-AmacHedefSayiCesBagimlilik	0,564	0,671	0,564
O3-FinansalRisk	P3-ProjeButcesi	0,481	0,867	0,481
MC2-Ekonomik	O3-FinansalRisk	0,415	0,750	0,415
GC5-Rekabet	O3-FinansalRisk	0,397	0,820	0,397
O1-OrganizasyonIsBirligi	P9-EkipUyesiEtkilesim	0,393	0,640	0,393
O4-OperasyonelRisk	O5-OrganizasyonYapisi	0,391	0,586	0,391
P1-AmacHedefBelirsizlik	P5-KapsamFaaliyetBelirsizlik	0,384	0,457	0,384
P4-ProjeCiktisi	P8-ProjeInsanKaynagi	0,374	0,820	0,374
P1-AmacHedefBelirsizlik	P4-ProjeCiktisi	0,373	0,683	0,373
MC3-PolitikYasal	O3-FinansalRisk	0,373	0,820	0,373
P10-ProjeYoneticisi	P11-ProjeYonetimiMetotArac	0,368	0,423	0,368
O2-OrganizasyonKultur	P8-ProjeInsanKaynagi	0,365	0,889	0,365
GC1-PaydasEtkilesim	GC2-PaydasCokluk	0,364	0,520	0,364
P5-KapsamFaaliyetBelirsizlik	P6-FaaliyetSayisiBagimlilik	0,360	0,750	0,360
P7-ProjeKaynaklari	P4-ProjeCiktisi	0,352	0,845	0,352
P11-ProjeYonetimiMetotArac	P12-ProjeSuresi	0,348	0,820	0,348
P4-ProjeCiktisi	P6-FaaliyetSayisiBagimlilik	0,333	0,763	0,333
GC4-TedarikciEtkilesim	P3-ProjeButcesi	0,330	0,790	0,330
MC2-Ekonomik	GC5-Rekabet	0,326	0,790	0,326
O2-OrganizasyonKultur	O1-OrganizasyonIsBirligi	0,324	0,428	0,324
O5-OrganizasyonYapisi	P8-ProjeInsanKaynagi	0,321	0,820	0,321
P6-FaaliyetSayisiBagimlilik	P8-ProjeInsanKaynagi	0,314	0,820	0,314
P2-AmacHedefSayiCesBagimlilik	P6-FaaliyetSayisiBagimlilik	0,304	0,750	0,304
MC1-Cevresel	GC5-Rekabet	0,297	0,652	0,297
GC3-MusteriTalep Belirsizlik	P4-ProjeCiktisi	0,290	0,710	0,290

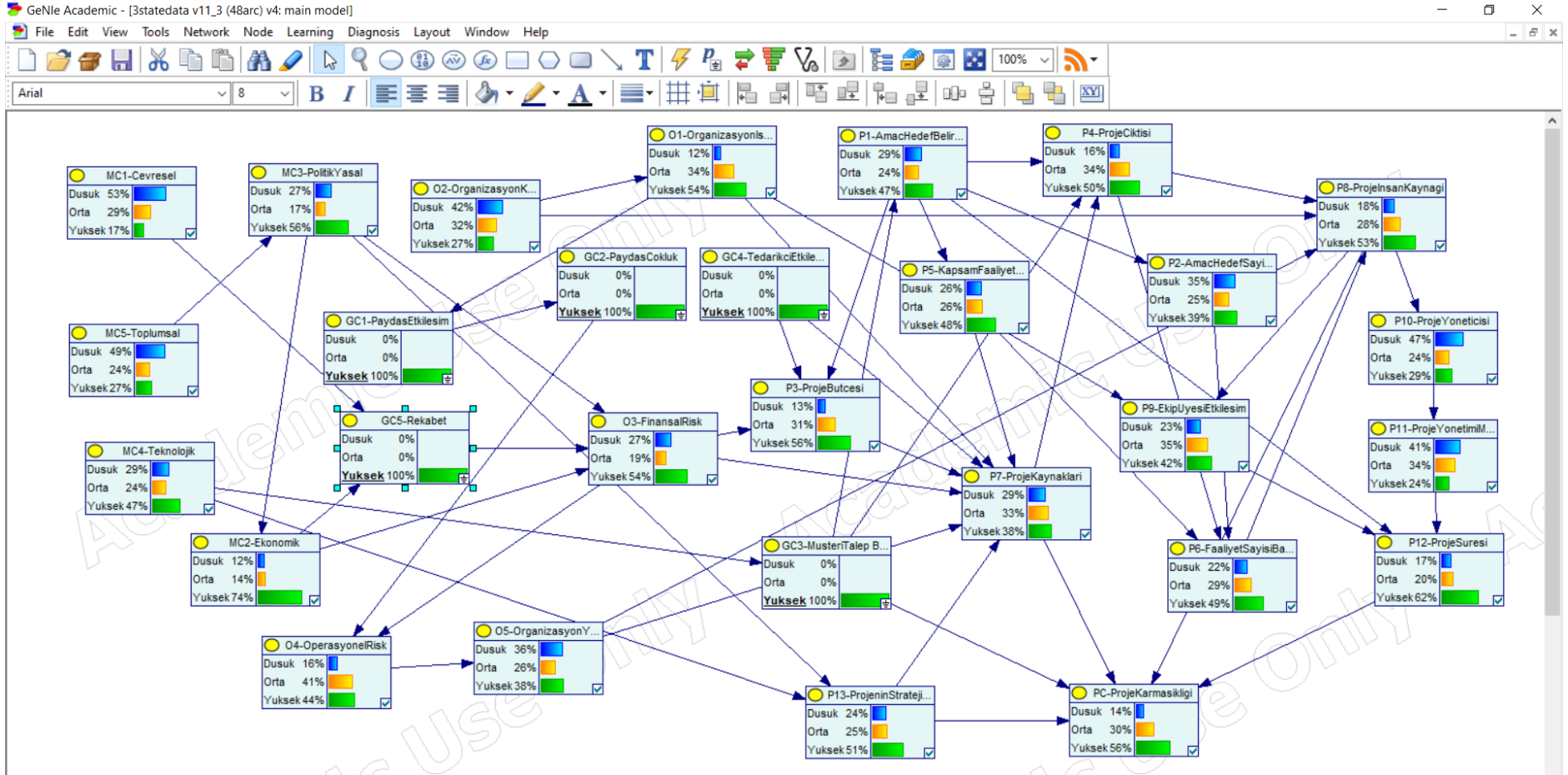
Çizelge C.1 (devam): Etki zinciri analizinin sayısal sonuçları.

Ebeveyn Düğüm	Çocuk Düğüm	Ortalama	Maksimum	Ağırlıklı
O3-FinansalRisk	O4-OperasyonelRisk	0,290	0,574	0,290
P1-AmacHedefBelirsizlik	P3-ProjeButcesi	0,285	0,635	0,285
P1-AmacHedefBelirsizlik	P12-ProjeSuresi	0,283	0,863	0,283
P9-EkipUyesiEtkilesim	P12-ProjeSuresi	0,271	0,845	0,271
GC3-MusteriTalep Belirsizlik	P1-AmacHedefBelirsizlik	0,248	0,368	0,248
O1-OrganizasyonIsBirligi	GC1-PaydasEtkilesim	0,248	0,369	0,248
MC4-Teknolojik	P13-ProjeninStratejikOnemi	0,242	0,423	0,242
P8-ProjeInsanKaynagi	P9-EkipUyesiEtkilesim	0,240	0,348	0,240
P12-ProjeSuresi	PC-ProjeKarmasikligi	0,234	0,845	0,234
GC3-MusteriTalep Belirsizlik	PC-ProjeKarmasikligi	0,224	0,820	0,224
P7-ProjeKaynaklari	PC-ProjeKarmasikligi	0,216	0,925	0,216
P8-ProjeInsanKaynagi	PC-ProjeKarmasikligi	0,216	0,845	0,216
MC5-Toplumsal	MC3-PolitikYasal	0,206	0,277	0,206
P13-ProjeninStratejikOnemi	PC-ProjeKarmasikligi	0,205	0,875	0,205
MC3-PolitikYasal	P13-ProjeninStratejikOnemi	0,183	0,417	0,183
MC3-PolitikYasal	MC2-Ekonomik	0,174	0,237	0,174
P8-ProjeInsanKaynagi	P10-ProjeYoneticisi	0,169	0,251	0,169
GC2-PaydasCokluk	O4-OperasyonelRisk	0,166	0,398	0,166
MC4-Teknolojik	GC3-MusteriTalep Belirsizlik	0,079	0,118	0,079
P3-ProjeButcesi	P7-ProjeKaynaklari	0,049	0,777	0,049
O3-FinansalRisk	P7-ProjeKaynaklari	0,048	0,750	0,048
GC4-TedarikciEtkilesim	P7-ProjeKaynaklari	0,047	0,938	0,047
P5-KapsamFaaliyetBelirsizlik	P7-ProjeKaynaklari	0,047	0,845	0,047
P13-ProjeninStratejikOnemi	P7-ProjeKaynaklari	0,046	0,949	0,046
O1-OrganizasyonIsBirligi	P7-ProjeKaynaklari	0,046	0,777	0,046
O5-OrganizasyonYapisi	P7-ProjeKaynaklari	0,045	0,820	0,045

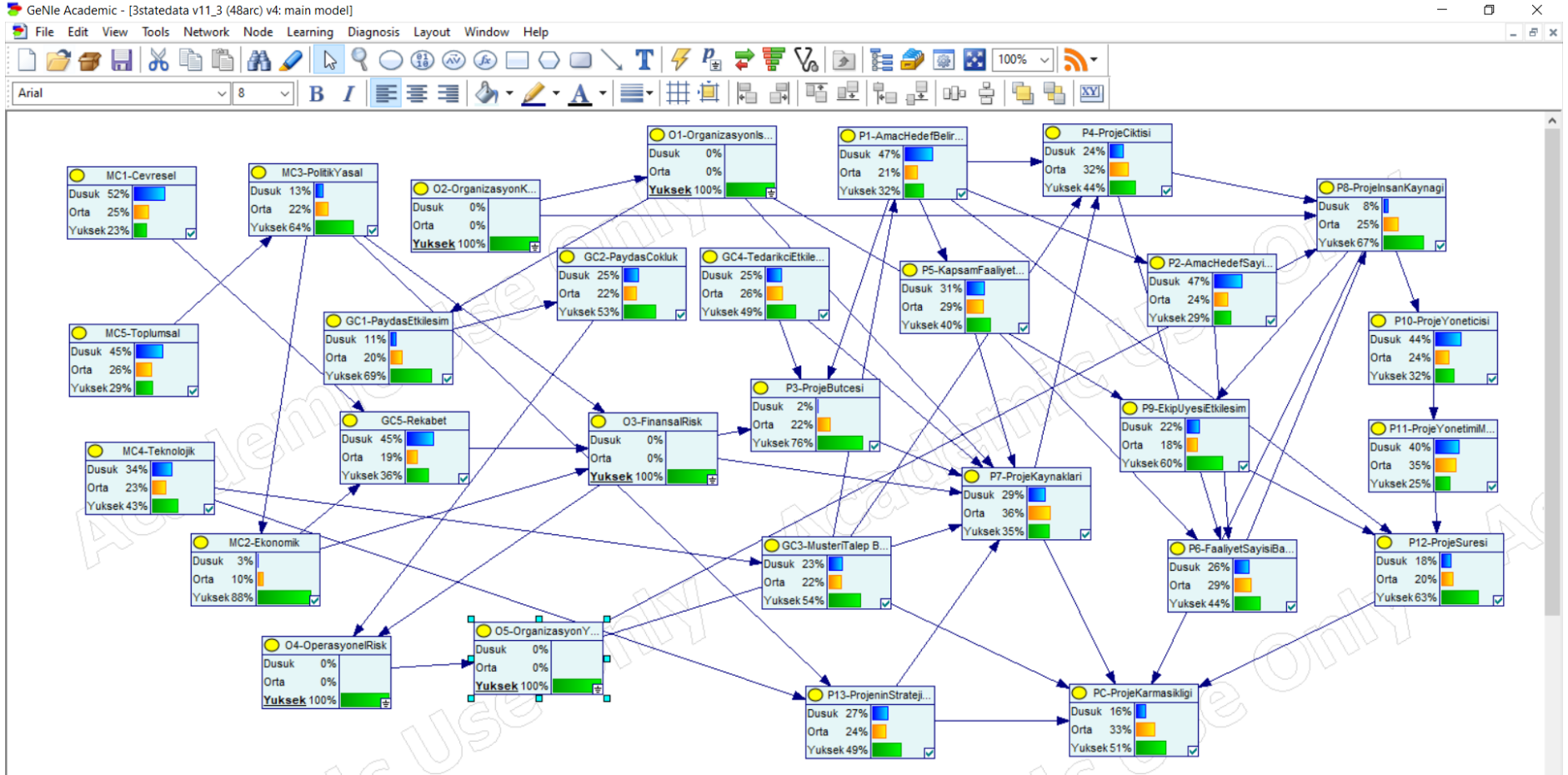
EK D



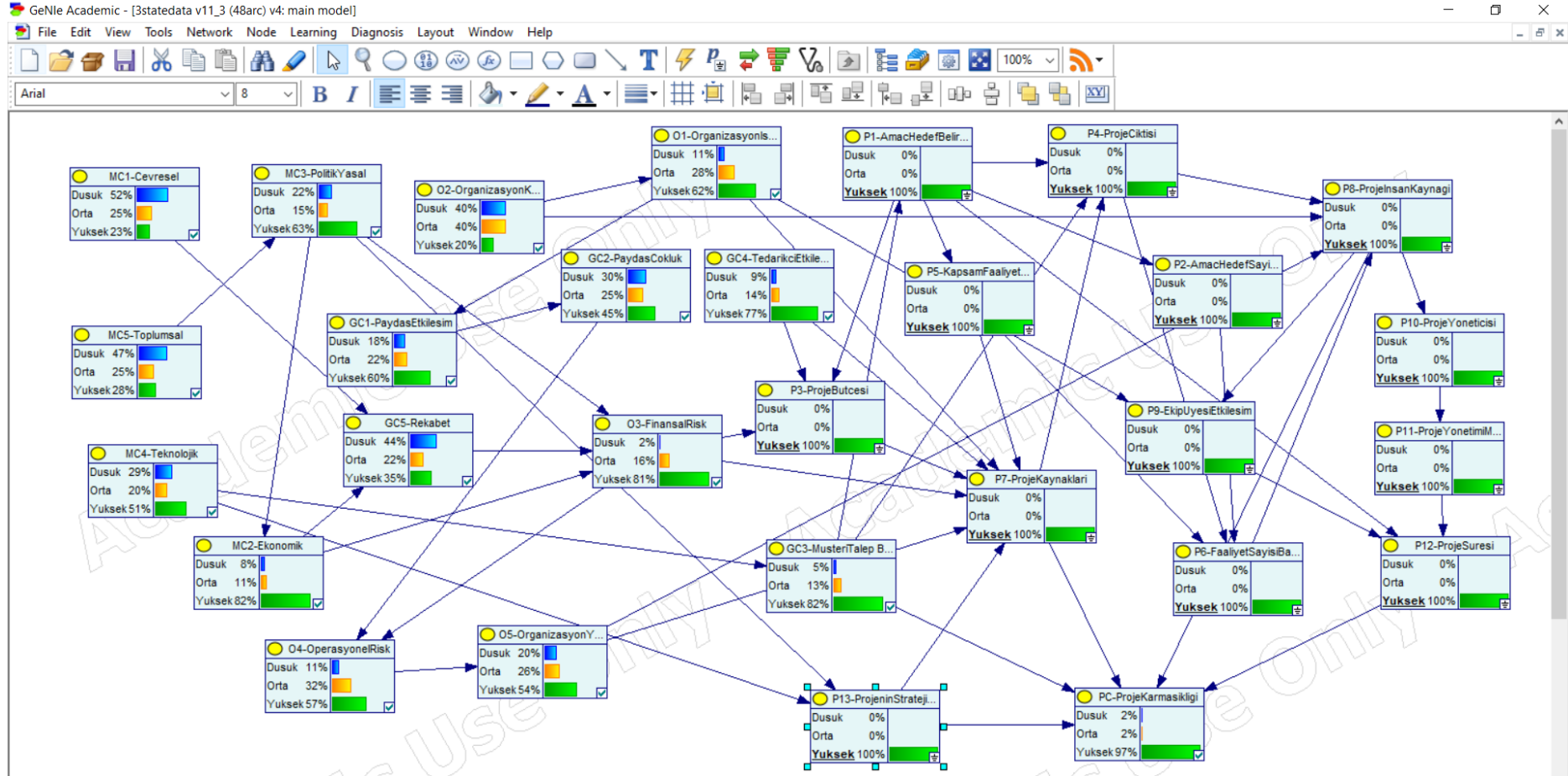
Şekil D.1: Makro çevrenin "yüksek" karmaşık olarak varsayılması sonucu proje karmaşıklığı (Senaryo1).



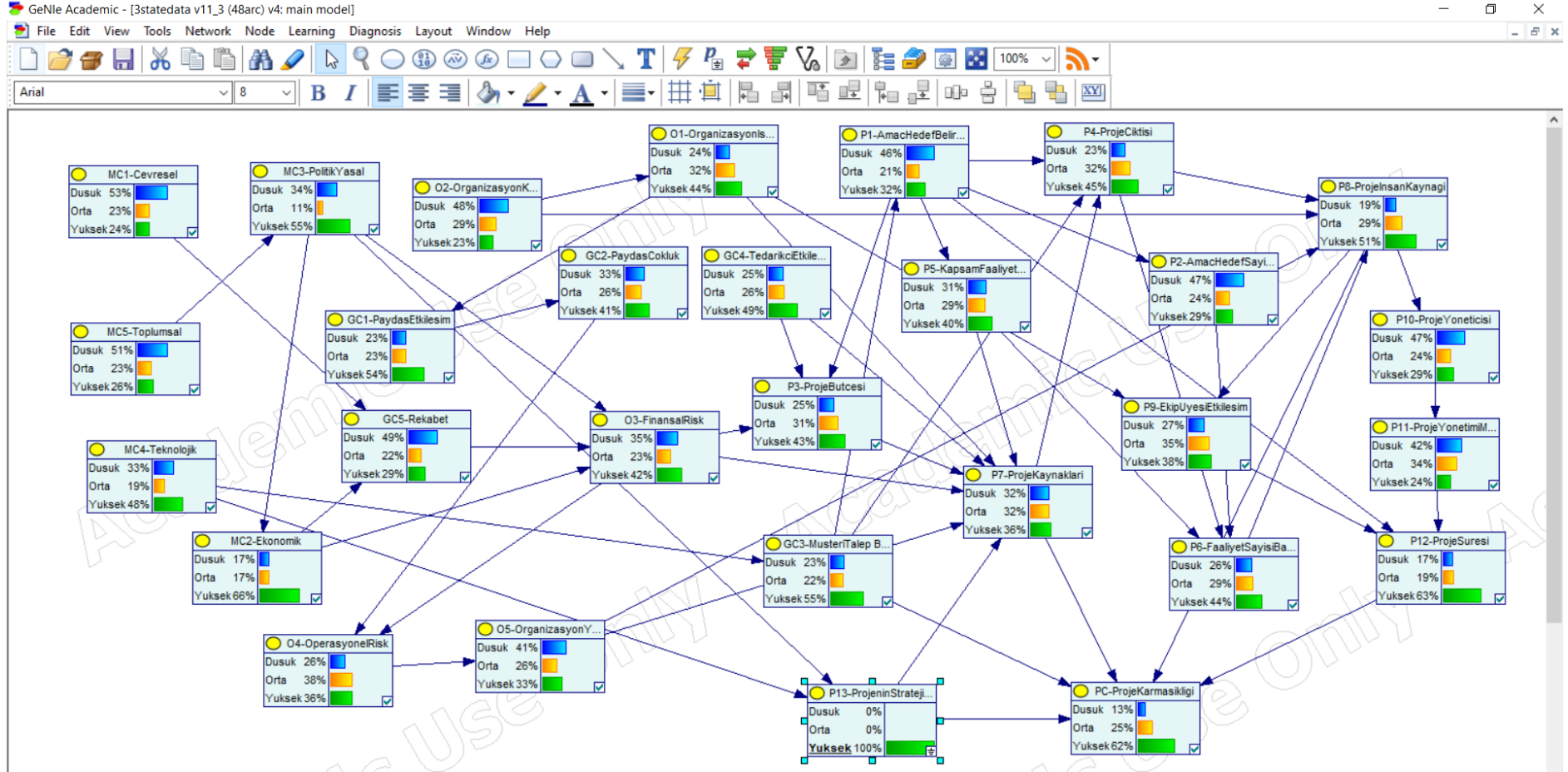
Şekil D.2: Görev çevresinin "yüksek" karmaşık olarak varsayılması sonucu proje karmaşıklığı (Senaryo2).



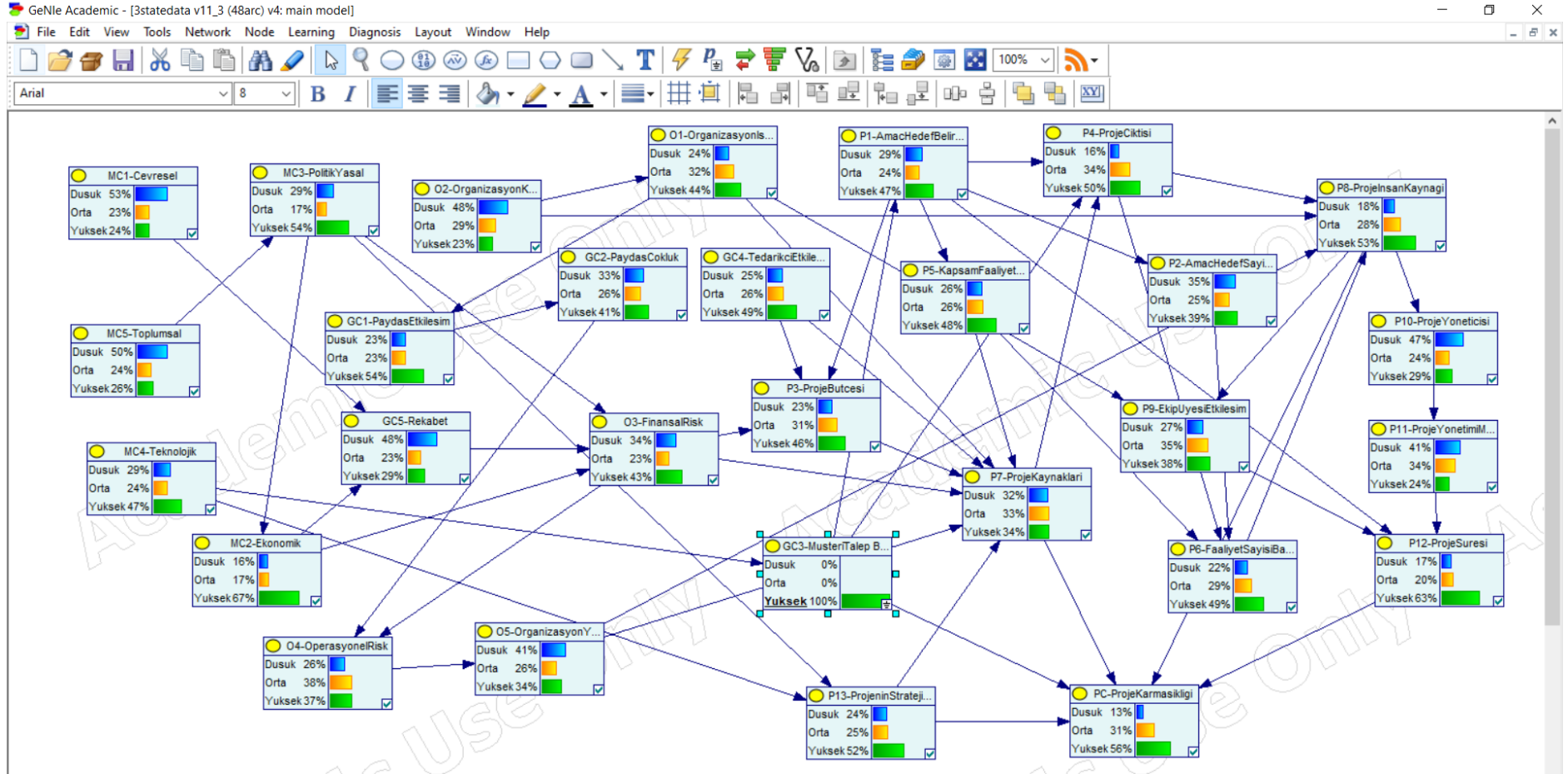
Şekil D.3: Organizasyonel faktörlerin "yüksek" karmaşık olarak varsayılması sonucu proje karmaşıklığı (Senaryo3).

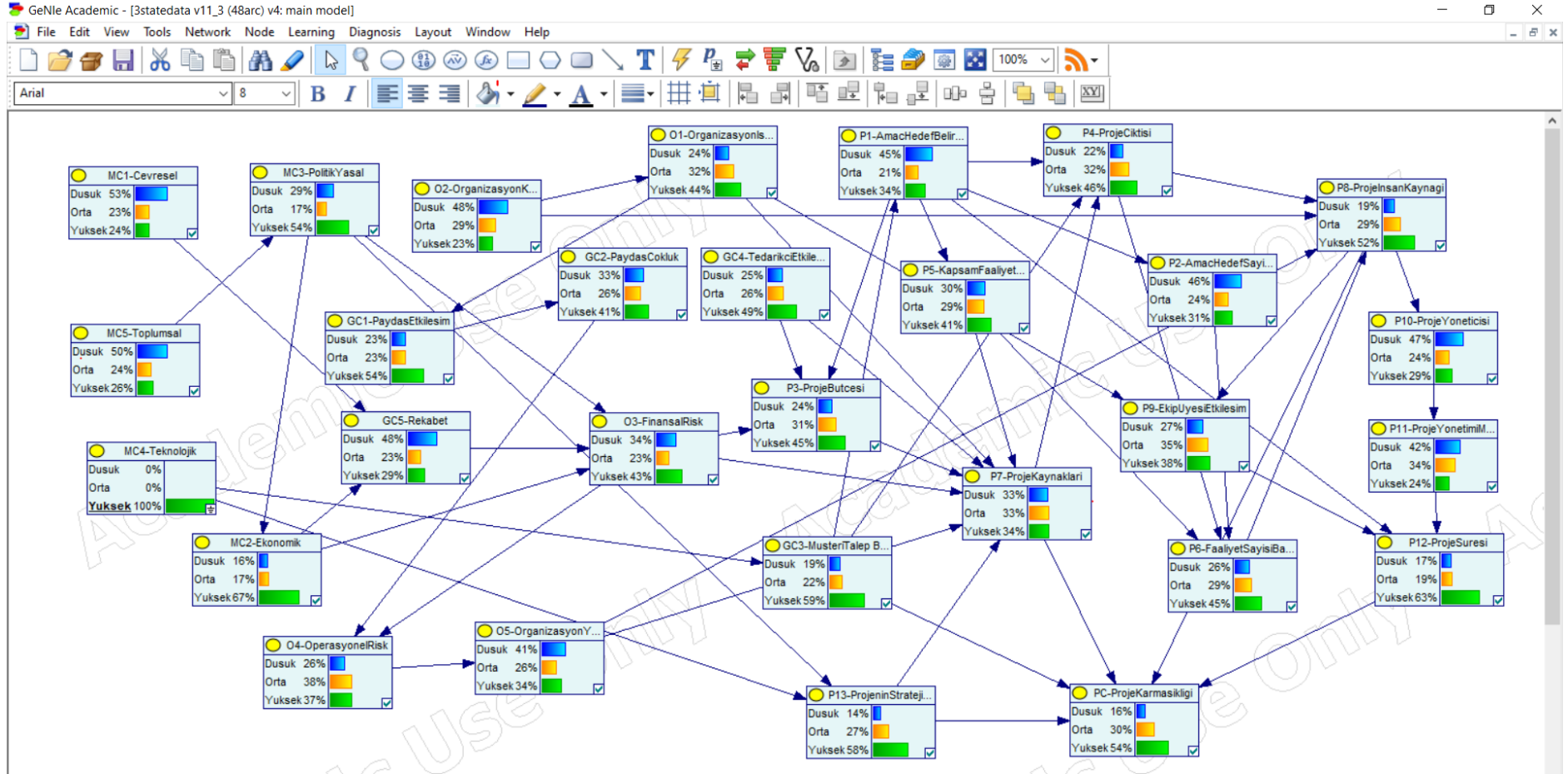


Şekil D.4: Proje karakteristiği faktörlerinin "yüksek" karmaşık olarak varsayılması sonucu proje karmaşıklığı (Senaryo4).

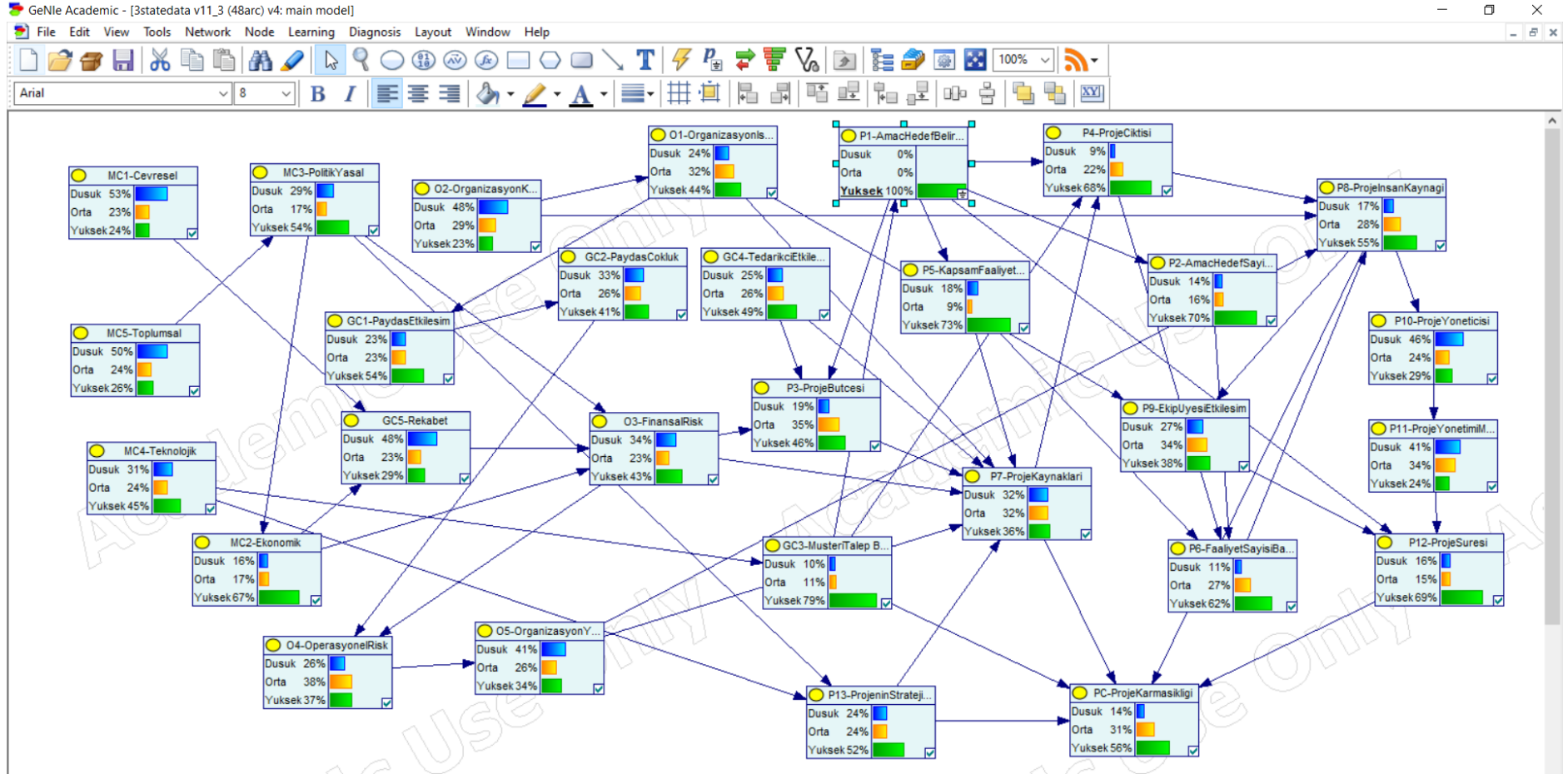


Şekil D.5: Projenin stratejik önemi (P13) faktörünün senaryo analizi (Senaryo5).

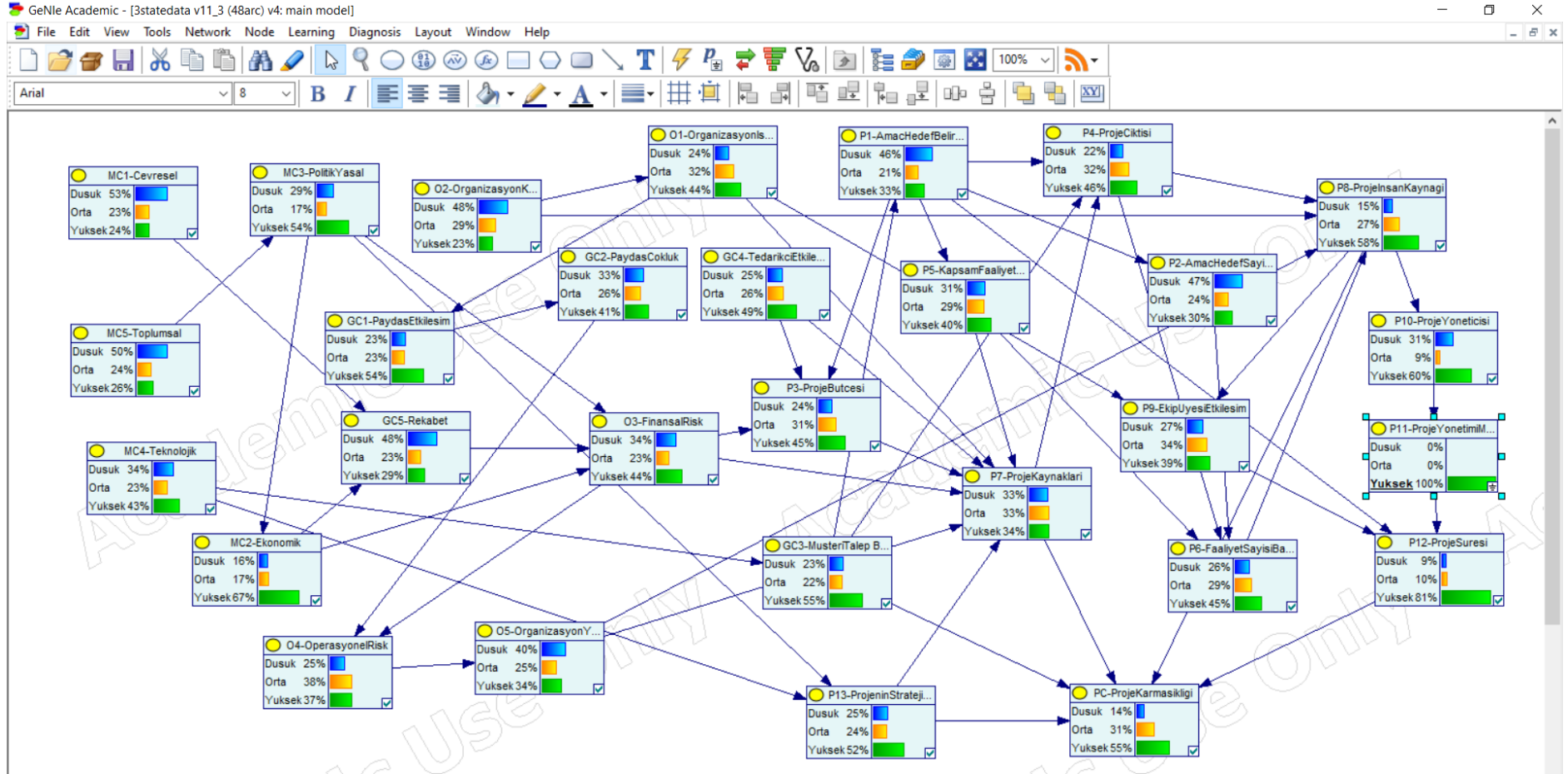




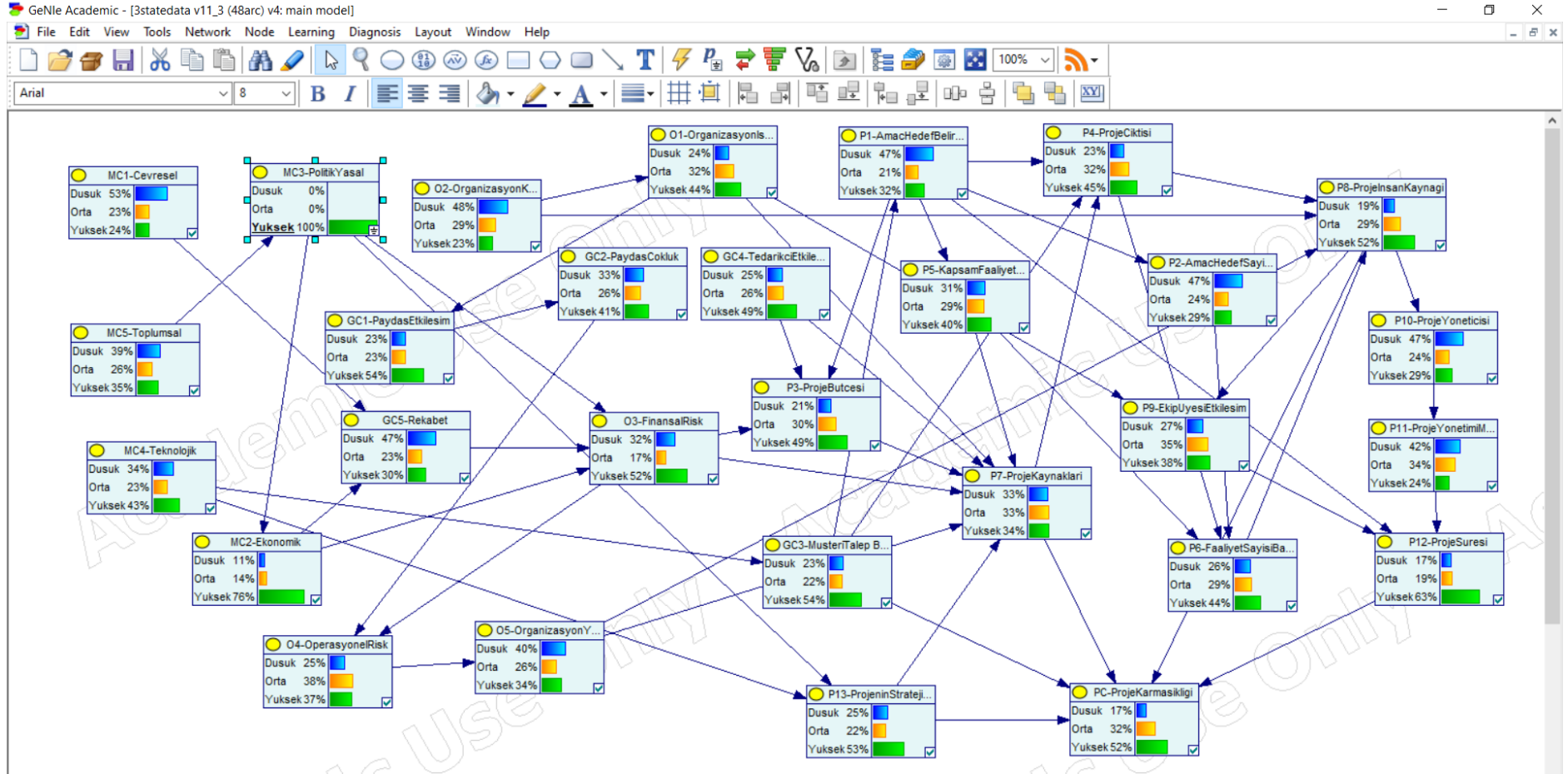
Şekil D.7: Teknolojik ortamdaki zorluklar (MC4) faktörünün senaryo analizi (Senaryo7).

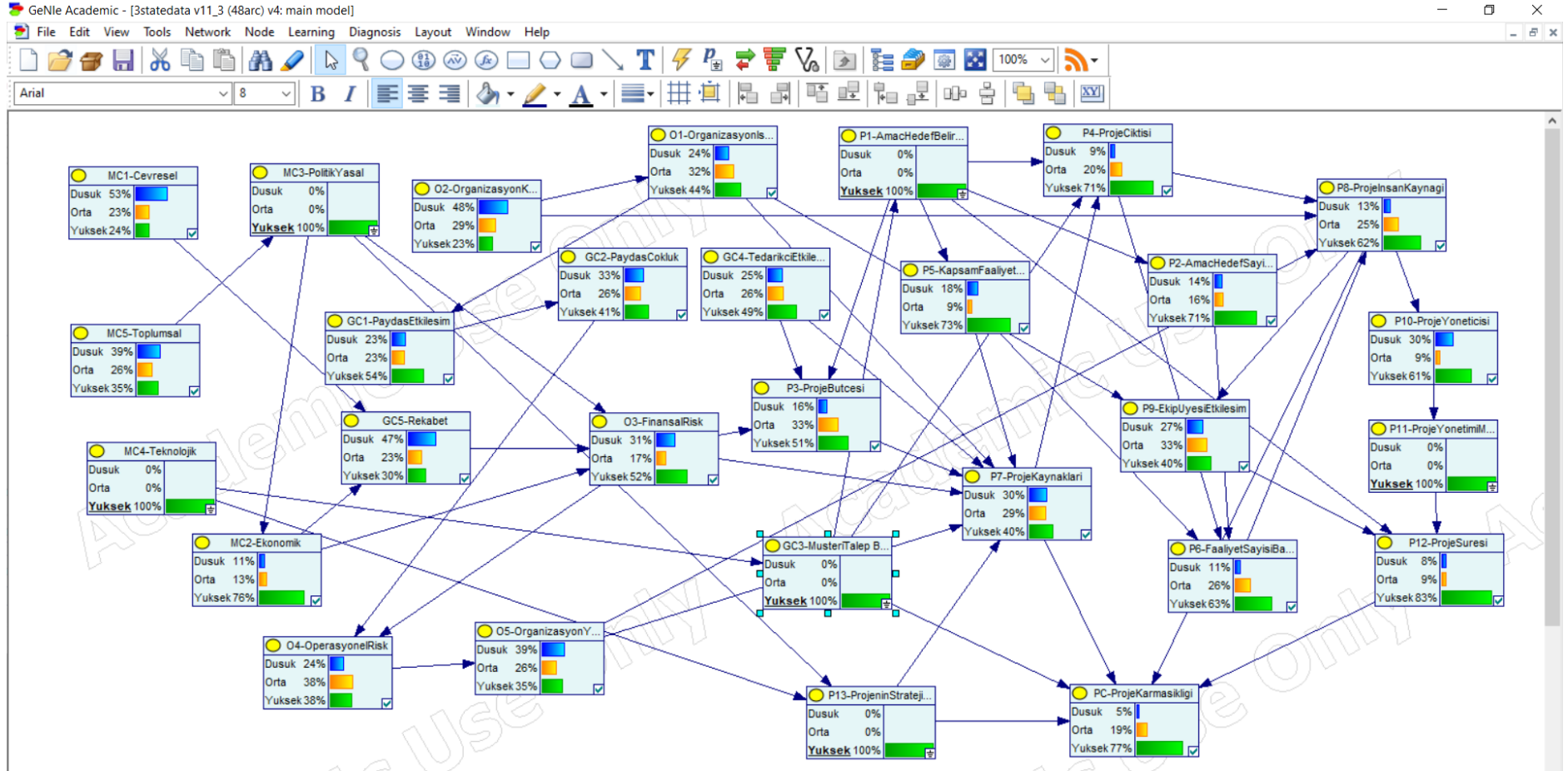


Şekil D.8: Amaç ve hedeflerin belirsizliği (P1) faktörünün senaryo analizi (Senaryo8).

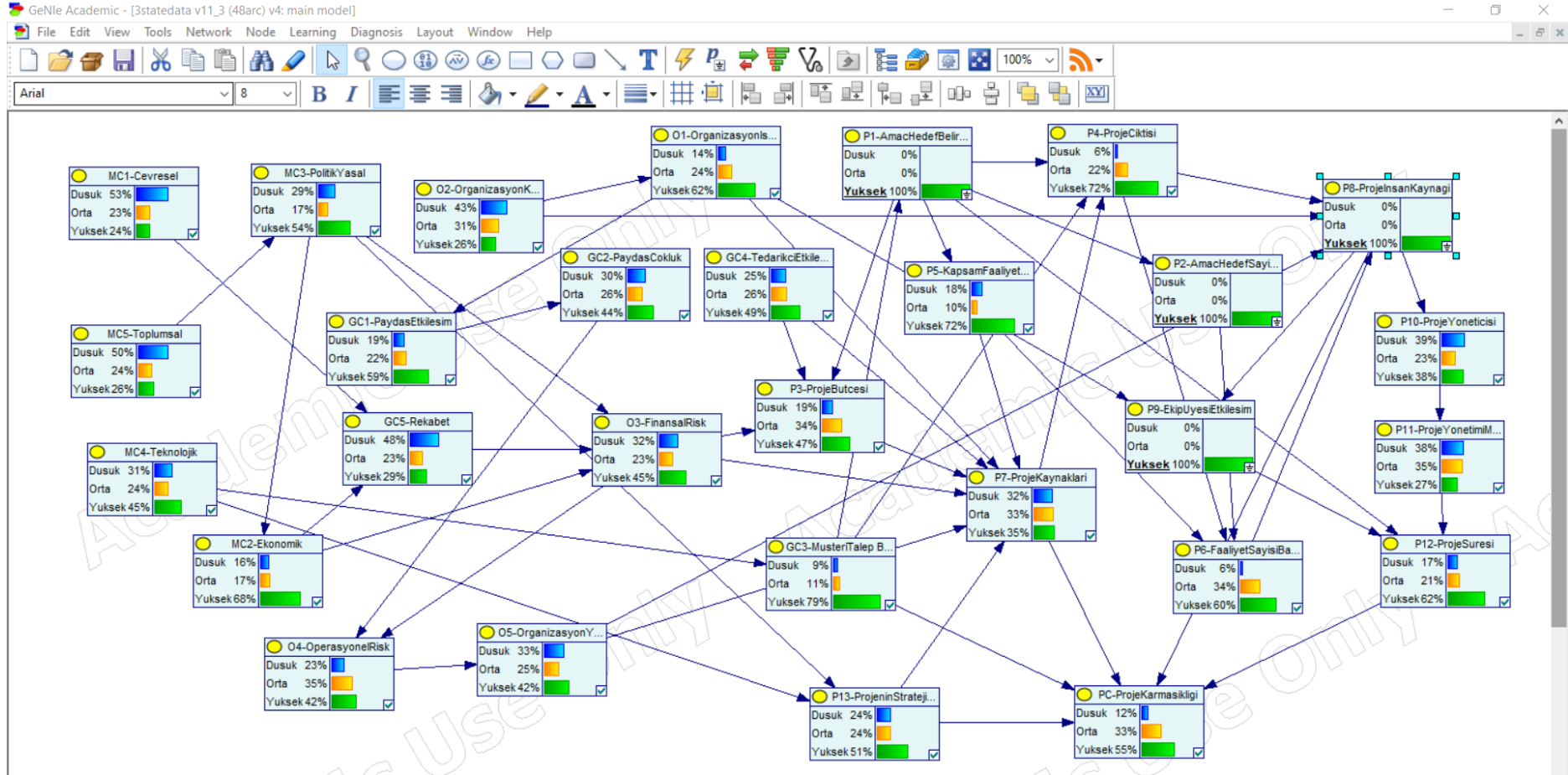


Şekil D.9: Proje yönetimi metot ve araçlarının yapısı ve entegrasyonu (P11) faktörünün senaryo analizi (Senaryo9).

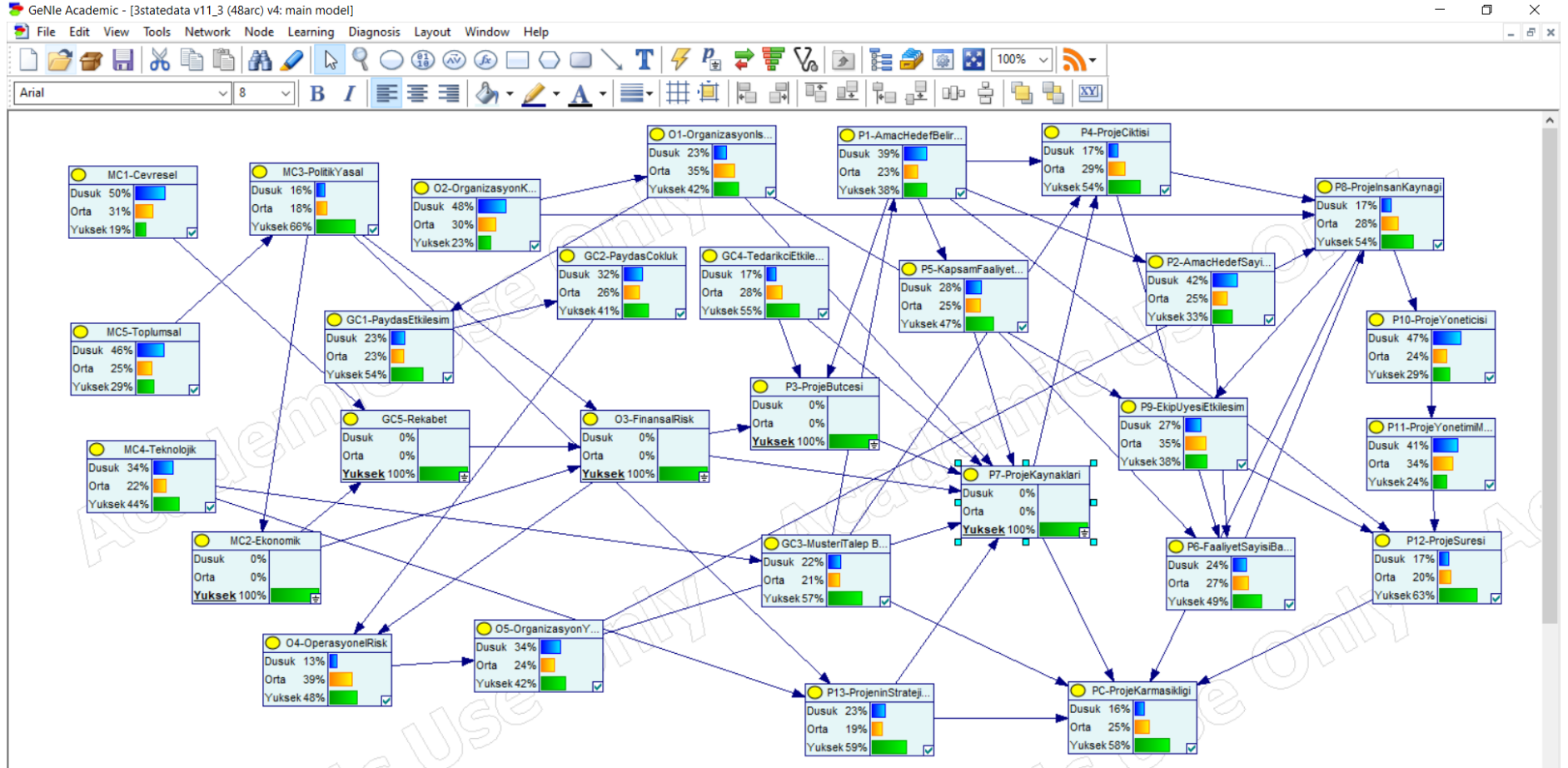




Şekil D.11: PC'nin yüksek duyarlı olduğu (P13, GC3, MC4, P1, P11, MC3) faktörlerin senaryo analizi (Senaryo11).



Şekil D.12: Proje karakteristiği faktörleri (P1, P2, P8, P9) ile senaryo analizi (Senaryo12).



Şekil D.13: İkinci nedensel zincirdeki faktörlerin (MC2, GC5, O3, P3, P7) senaryo analizi (Senaryo13).

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Zülfiye DERİN USLU

Doğum Tarihi ve Yeri :

E-posta :

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2019, Abdullah Gül Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği
(İngilizce)