



A novel approach based on type-2 fuzzy sets to augment technology roadmaps

Semanur Barip¹ , Koray Altun^{1,2*} 

¹Department of Intelligent Systems Engineering, Bursa Technical University, 16330 Bursa, Turkey

²Department of Industrial Engineering, Bursa Technical University, 16330 Bursa, Turkey

Highlights:

- Augmenting technology roadmaps by an advanced relationship analysis
- Use of type-2 fuzzy sets in setting inter-element relationships
- Providing an infographic to identify critical element clusters

Keywords:

- Technology roadmapping
- Relationship analysis
- Fuzzy systems
- 3D printing technologies

Article Info:

Research Article
Received: 14.01.2021
Accepted: 02.08.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.861510

Correspondence:

Author: Koray Altun
e-mail:
koray.altun@btu.edu.tr
phone: +90 224 3003 595

Graphical/Tabular Abstract

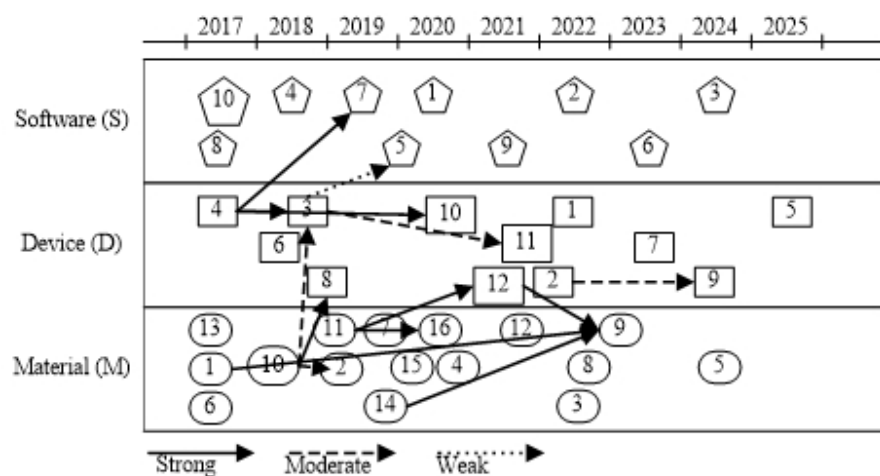


Figure A. An augmented technology roadmap for 3D printing technologies

Purpose: Importance of RDI outputs is increasing day by day in the business world. Harmony of RDI activities and technology strategies is one of the important guarantees of sustainable success. At this stage, the first thing that comes to mind is the “technology roadmaps”, which have been commonly used in order to direct RDI activities. Technology roadmaps are the tools linking technological developments and changes with other relevant layers (products, services, market, etc.), and thus they assist in decision making. To obtain a valid technology roadmap, its inter-element relationships need to be well-established. Prior work in this area is limited. With this research gap in mind, in this paper, we seek to develop a novel approach for handling these relationships better.

Theory and Methods:

This study proposes an infographic for the relationships between technology roadmap elements. Importance of the relationships and the relationship degree of element pairs are evaluated by using interval type-2 fuzzy systems (IT2FS).

Results:

Technology roadmaps have been augmented with the infographic employing evaluation results of the IT2FS executions. The work carried out has enabled the digitization of linguistic element significance levels, which are ambiguous and complex in nature. This augmented technology roadmap can better assist in subsequent technology management activities by providing a well-established network of inter-element relationships.

Conclusion:

To the best knowledge, this study is the first attempt to use the IT2FS in technology roadmapping. This study employs the IT2FS in assisting at the T-plan / workshop#4 (roadmapping) while setting the inter-element relationships. Thus, the process of T-plan technology roadmapping has become more sophisticated and data-driven. Future work can address customized and advanced network analysis for the identified critical elements.



Teknoloji yol haritalarını zenginleştirmek için tip-2 bulanık sistemler temelli yeni bir yaklaşım

Semanur Barip¹ , Koray Altun^{1,2*} 

¹BursaTeknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Akıllı Sistemler Mühendisliği Bölümü, 16330, Bursa, Türkiye

²BursaTeknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 16330, Bursa, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- İleri ilişki analizi ile teknoloji yol haritalarını zenginleştirme
- Ögeler arası ilişkilerin düzenlenmesinde tip-2 bulanık kümelerin kullanımı
- Kritik öge kümelerinin tanımlanması için bir infografikğin sağlanması

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 14.01.2021
Kabul: 02.08.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.861510

Anahtar Kelimeler:

Teknoloji yol haritası
oluşturma,
ilişki analizi,
bulanık sistemler,
3D yazıcı teknolojileri

ÖZ

İş dünyasında Ar-Ge ve inovasyon çıktılarının önemi her geçen artmaktadır. Ar-Ge ve inovasyon faaliyetlerinin teknoloji stratejileri ile uyumu sürdürülebilir başarının önemli güvencelerinden biridir. Bu aşamada ilk akla gelen, Ar-Ge ve inovasyon faaliyetlerini yönlendirme amacıyla yaygın bir şekilde kullanılan teknoloji yol haritalarıdır. Teknoloji yol haritaları, teknoloji gelişimi ve değişimini ilgili diğer katmanlarla (ürünler, hizmetler, pazar vb.) ilişkilendiren ve karar vermeye yardımcı olan araçlardır. Geçerli bir teknoloji yol haritası elde edebilmek için ögeler arası ilişkilerin doğru tanımlanması gerekir. Bu çalışma, teknoloji yol haritası ögeleri arasındaki ilişkiler için bir infografik önermektedir. Çalışmada, öge ikililerinin ilişki derecesi ve ilişkilerin önem derecesi aralıklı tip-2 bulanık sistemler (Interval Type-2 Fuzzy Systems - IT2FS) kullanılarak değerlendirilmektedir. Bu değerlendirme sonuçlarını kullanarak oluşturulan infografik teknoloji yol haritalarını zenginleştirmektedir. Önerilen sürecin daha iyi anlaşılması için üç boyutlu (3D) yazıcı teknolojilerine ilişkin bir uygulama örneği sunulmuştur. Sonuç olarak, zenginleştirilmiş teknoloji yol haritalarının özellikle büyük ölçekli sistemlerde strateji oluşturma sürecine ve teknoloji yönetim faaliyetlerine katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

A novel approach based on type-2 fuzzy sets to augment technology roadmaps

H I G H L I G H T S

- Augmenting technology roadmaps by an advanced relationship analysis
- Use of type-2 fuzzy sets in setting inter-element relationships
- Providing an infographic to identify critical element clusters

Article Info

Research Article
Received:14.01.2021
Accepted: 02.08.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.861510

Keywords:

Technology roadmapping,
relation analysis,
fuzzy systems,
3D printing technologies

ABSTRACT

Importance of RDI outputs is increasing day by day in the business world. Harmony of RDI activities and technology strategies is one of the important guarantees of sustainable success. At this stage, the first thing that comes to mind is the “technology roadmaps”, which have been commonly used in order to direct RDI activities. Technology roadmaps are the tools linking technological developments and changes with other relevant layers (products, services, market, etc.), and thus they assist in decision making. To obtain a valid technology roadmap, its inter-element relationships need to be well-established. This study proposes an infographic for the relationships between technology roadmap elements. In this study, importance of the relationships and the relationship degree of element pairs are evaluated through the use of interval type-2 fuzzy systems (IT2FS). The infographic employing these evaluation results augments the technology roadmaps. In order to illustrate how the proposed process executes, a case of three-dimensional (3D) printing technologies is presented. Consequently, it is considered that these augmented technology roadmaps contribute to strategy planning and technology management, especially for large-scale cases.

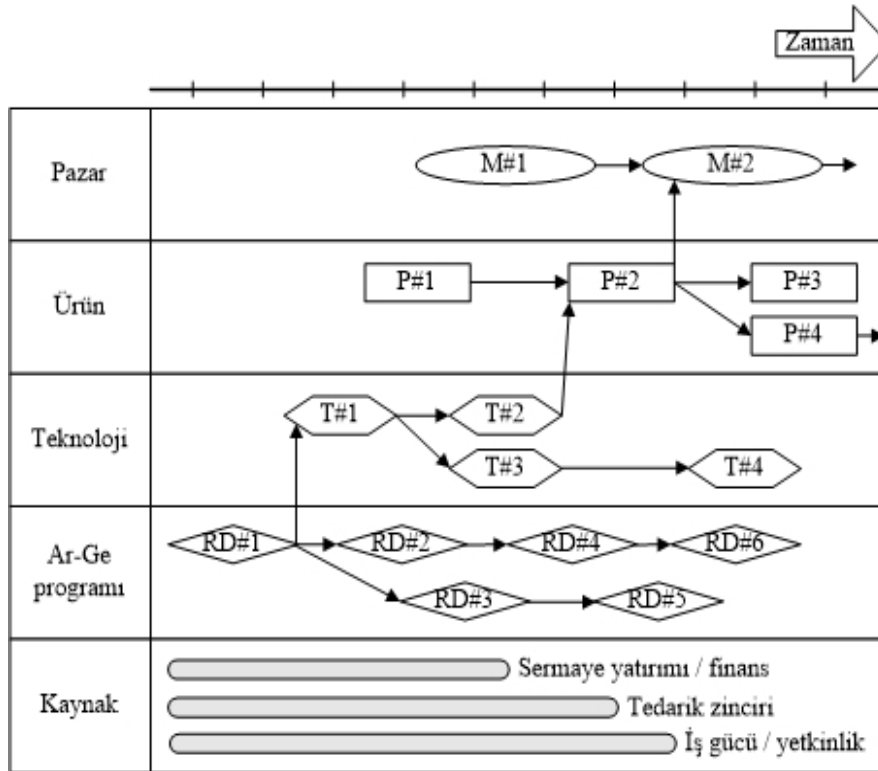
1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Teknoloji yol haritası, kritik öneme sahip teknoloji ve inovasyon yönetimi araçlarından biridir. Motorola, ürün stratejilerini teknoloji stratejileriyle uyumlu hale getirmek amacıyla 1987'de, ilk teknoloji yol haritasını oluşturmuştur ve günümüzde de oldukça yaygın bir şekilde, çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır [1, 2]. Teknoloji yol haritaları, teknolojik gelişmelerle diğer ilgili katmanlar (ürünler, süreçler, pazar vb.) arasındaki ilişkileri bir sistem dahilinde ele alır ve bir kurum içerisindeki tüm birimlerin aynı hedefler doğrultusunda ilerlemelerine olanak sağlar. Teknoloji yol haritalarının öne çıkan üç önemli fonksiyonu şunlardır [2]: İlk olarak, teknoloji yol haritası oluşturulması, bir dizi ihtiyaç ve bu ihtiyaçları karşılamak için gerekli teknolojiler hakkında bir fikir birliği geliştirilmesine yardımcı olabilir. İkinci önemli fonksiyonu, uzmanların hedeflenen alanlardaki teknolojik gelişmeleri tahmin etmelerine yardımcı olacak bir mekanizma sağlar. Üçüncü önemli fonksiyonu ise, hem bir şirkette hem de tüm bir sektörde teknolojik gelişmeleri planlamaya ve koordine etmeye yardımcı olacak bir çerçeve sağlamasıdır.

Uygun bir şekilde oluşturulmuş teknoloji yol haritasının sağlayacağı kolaylıklardan ilki bilgiyi yapılandırmaktır. Analist kişinin başka türlü kolayca algılayamayacağı büyük miktarda bilgiyi görmesine olanak sağlamaktadır. İkincisi, bu tür teknikler, kalıpları ve eğilimleri tanıyarak büyük veri kümelerinden uygun bilgilerin edinilmesine yardımcı

olabilir. Son olarak, orijinal verilerin boyutlarının küçültülmesiyle, normalde çok değişkenli veride var olan gürültüyü ortadan kaldırarak anlamlı çıkarımlar elde etmeye yardımcı olabilir [3]. Teknoloji yol haritaları sağladığı bu kolaylıklar ve kullanım esnekliği sayesinde yaygın olarak tercih edilmektedir.

Teknoloji yol haritaları, teknoloji ve inovasyon yönetimi stratejik planlarına zemin hazırlamaktadır. Ürün, pazar ve teknoloji arasındaki yapısal ilişkiyi görsel olarak sunmasından dolayı çok çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [3-6]. Farklı formatlarda teknoloji yol haritası kullanımı ile karşılaşılmışına rağmen, en genel ve esnek yaklaşım bir zaman grafiği üzerinde konumlandırılmış çoklu katmanlardan oluşan görselelerdir. Avrupa Endüstriyel Araştırma Yönetimi Derneği (European Industrial Research Management Association - EIRMA) tarafından sunulan jenerik teknoloji yol haritası formatı Şekil 1'de gösterilmiştir [7]. Teknoloji yol haritalarının oluşturulma sürecinin bir sistematik dahilinde ilerlemesi gerekmektedir. Literatürde kabul görmüş ve yaygın kullanılan teknoloji yol haritası oluşturma süreci Phaal vd. [8] tarafından önerilen T-plan (hızlı-başla) sürecidir. T-plan süreci, sıralı dört çalıştay esasına dayanmaktadır. İlk çalıştay "Pazar" ile ilgilidir. Performans boyutlarını, pazara ve iş dünyasına yön veren dinamikleri, öncelikleri, stratejik değerlendirmelerin yapıldığı SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats – Güçlü yönler, Zayıf yönler, Fırsatlar, Tehditler) analizlerini ve fırsatları tartışan bu çalıştay sonrasında,



Şekil 1. EIRMA tarafından önerilen teknoloji yol haritası formatı (The technology roadmap style proposed by EIRMA)

“Ürün” çalışmayı gerçekleştirilmektedir. Ürün ile ilgili değerlendirmeler, etki analizleri ve ürün stratejileri “Ürün” çalışmasının konusudur. Takibinde “Teknoloji” çalışmayı yer almaktadır. Benzer şekilde bu çalışmada da teknoloji ile ilgili değerlendirmeler, etki analizleri ve teknoloji stratejileri tartışılmaktadır. Son çalıştay ise bu çalışmanın esas konusunu da oluşturan “ilişkilendirme” sürecinin gerçekleştirildiği çalıştaydır. Önceki çalıştaylarda ortaya konulan pazarı, ürünü ve teknolojiyi ilgilendiren öğeler arasındaki ilişkilerin oluşturulduğu ve gelecek fırsatlarına nasıl erişilebileceğine dair planlara zemin hazırlayacak nihai teknoloji yol haritası görselinin şekillendirildiği aşamadır.

Bu çalışma, teknoloji yol haritası oluşturma tartışmalarında T-plan sürecini esas almaktadır. Belirli bir teknolojiyi geliştirme önceliği, teknoloji yol haritası katmanlarının içerisindeki, öğeler arasındaki ilişkilerle belirlenir ve bu öğelerin ilişkilendirilmesi görevi, teknoloji yol haritası geliştirme sürecinin önemli bir parçasıdır. Teknoloji yol haritasındaki katmanların sistematik olarak birbiriyle ilişkilendirilmesi, ilişkilerin derecelendirilmesi ile ilgili sınırlı sayıda çalışmaya literatürde rastlanmaktadır. Bu çalışma ile teknoloji yol haritası öğeleri arasındaki bu ilişkilerin değerlendirme sürecini sistemli bir şekilde yürütmeye olanak sağlayacak yeni bir yaklaşım önerilmektedir. Bu yaklaşım aralıklı tip-2 bulanık sistemleri (Interval Type-2 Fuzzy Systems - IT2FS) kullanmaktadır. Öğeler arasındaki ilişkilerin değerlendirilmesi sonrası ortaya çıkan sonuçları kullanarak, ilişkilerin infografisi oluşturulmakta ve bu sayede teknoloji yol haritaları görsel açıdan zenginleştirilmektedir. Önerilen bu yeni yaklaşımın üç boyutlu (3D) yazıcı / eklemeli imalat teknolojileri ile ilgili oluşturulmuş bir teknoloji yol haritası üzerinde uygulaması da örnek teşkil etmesi amacıyla bu çalışmada sunulmaktadır.

Geleneksel matematiksel modelleme tekniklerinin net veriler, yani sayılar içeren problemleri çözmesi beklenir. Ancak belirsizliklerle dolu bir dünyada yaşanmaktadır ve belirsiz ortamlarda kararlar alınmaktadır. Bu nedenle, geleneksel matematiksel modelleme teknikleri bu belirsizliği ele almak için yetersiz kalmaktadır [9]. Bu belirsizliklerle başa çıkabilmenin bir yolu yaygın bir şekilde kullanılan bulanık mantık sistemleridir. Belirsizlik çağrışımını taşıyan bir isme sahip olmasına rağmen araştırmalar tip-1 bulanık sistemlerin belirsizliklerin etkisini modelleme ve en aza indirme yeteneklerinde sınırlamalar olduğunu göstermiştir [10-13]. Bunun nedeni tip-1 bulanık kümelerin üyelik derecelerinin net değerler olmasıdır. Ancak tip-2 bulanık sistemlerde üyelik dereceleri de bulanık olduğundan belirsizliklerle daha iyi başa çıkabilmektedir. Daha fazla belirsizlikle başa çıkmak, daha az varsayımda bulunmak, gerçek hayattaki sorunlara daha gerçekçi çözümler sağlamak anlamına gelir. Bu nedenle, tip-2 bulanık kümeler ve diğer ileri bulanık küme yaklaşımları, tip-1 bulanık kümelerin ötesine geçmiş ve yaygın kullanımı gerçekleşmiştir [14]. T-plan teknoloji yol haritası oluşturma süreci, grup halinde çalışmayı esas almaktadır ve bu nedenle tip-1 kümelerin kullanımı durumunda oluşan farklı algıların değerlendirme sürecine yansıtılamayacağı düşünülmektedir. Benzer

süreçlerde, tip-2 bulanık sistemlerin daha fazla belirsizliği hesaba katabileceği ve bu sayede, daha iyi modellemelere zemin hazırlayabileceği gözlemlenmiştir [14]. Bu çalışmada, teknoloji yol haritası öğelerinin ilişkilerinin derecelendirilmesi için bu nedenle tip-2 bulanık sistemlerin kullanımı tercih edilmiştir.

Çalışmanın ilerleyen kısımlarının organizasyonu şu şekildedir. İkinci bölüm, teknoloji yol haritası ile ilgili literatürü değerlendirmekte ve çalışmanın literatürdeki konumunu tartışmaktadır. Üçüncü bölüm, materyal ve önerilen yaklaşımı sunmaktadır. Dördüncü bölüm, önerilen yaklaşımın bir uygulamasını sunmaktadır. Beşinci bölüm, önerilen çalışmanın olası faydalarını tartışmaktadır. Altıncı bölümde ise, sonuçlar ve gelecek çalışmalar yer almaktadır.

2. LİTERATÜR TARAMASI (LITERATURE REVIEW)

Teknoloji yol haritası ile ilgili güncel ve kapsamlı bir literatür değerlendirmesini Valerio vd. [15] sunmaktadır. Winkowski [6] ise teknoloji yol haritası bilimsel literatürünün bibliyometrik analizini gerçekleştirmiş ve güncel araştırma profilini ortaya çıkarmıştır.

Metodolojik açıdan bakıldığında önceki çalışmalar ürün, teknoloji ve pazar arasındaki ilişkiyi belirleyip katmanları birbirine bağlamak için kalite fonksiyonu yayılımı (Quality Function Deployment - QFD), bağlantı ızgarası, tasarım yapısı matrisi (Design Structure Matrix - DSM) ve tip-1 bulanık sistemler kullanmışlardır [15-17]. Strauss ve Radnor [18], senaryo planlama süreci ve teknoloji yol haritasını birleştirmiştir. Önerilen senaryoya dayalı yol haritası gelişimi, duyarlılık analizi için sistem dinamiği teknikleriyle birleştirilmiştir [16]. Fenwick vd. [19], internet güvenliği konusunda bir teknoloji yol haritasının geliştirilmesi sırasında, pazarlama planlamasını desteklemek için bir karar alma modeli uygulamıştır. Caetano ve Amaral [20], açık inovasyon bağlamında teknoloji yol haritasına değinmiş ve teknoloji merkezli bir stratejiyi ortaklık planlaması ile bütünleştirmek için bir yaklaşım önermiştir. Vishnevskiy vd. [21], yeni teknolojiler ve pazarlarla ilgili kurumsal planlamanın etkinliğini ve verimliliğini en üst düzeye çıkarmak için yol haritası geliştirme sürecinin gerekliliğinden ziyade, dış çevresel faktörleri değerlendirmiştir. Ayrıca, bir teknoloji yol haritası, teknoloji planlamasını işletme planlamasına entegre etmek amacıyla bir iş modeline bağlanmıştır [22].

Son vd. [23], ürün-servis sistemleri (Product Service Systems - PSS) için teknoloji yol haritasını destekleyen bir DSM kullanmıştır. Kullanılan DSM, öğeler arasındaki ilişkileri üç şekilde açıklar; paralel, ardışık ve eşleşmiş [24]. Paralel bir ilişkide, iki öge birbirinden bağımsızdır ve iki ögenin gelişimi aynı anda gerçekleştirilebilir. Sıralı bir ilişkide, iki öge bağımlıdır. Burada, bir ögenin gelişimi, diğer ögenin gelişimi tamamlanana kadar başlatılamaz. Son olarak, birleştirilmiş bir ilişki, iki öge arasındaki karşılıklı bağımlılıkları belirtir. Bu ilişkide, bir ögenin gelişimi diğer öge ile etkileşimi gerektirir; bu nedenle, iki öge birlikte sanki

tek bir ürün gibi geliştirilmelidir. Son ve Lee [25], tip-1 bulanık kümeleri kullanmış ve ögeler arasındaki bağımlı göreceli önemini belirlemeye çalışmıştır. Ögeler arasında bağlantı kurma temel prensibi iki ögenin önem derecesine dayanır. Örneğin ögelerin en az biri büyük önemli veya her iki öge de bir dereceye kadar önemlidir ve iki öge arasındaki ilişkinin derecesi, örneğin bir öge diğer ögeyi takip etmeli veya bir öge diğer ögeyi izlemelidir şeklinde ifade edilir [25].

2.1. Yol Haritası Geliştirme İçin İlişki Analizinin Önemi (The Importance of Relationship Analysis for Roadmap Development)

Valerio vd. [15], son on yıl içerisinde teknoloji yol haritası araştırmalarındaki trendleri kronolojik olarak listelemektedir. 2020 yılı trendi için yüksek teknolojiyi daha iyi planlama amacıyla algoritmaların, bulanık mantığın [27], senaryo analizlerinin [28] ve ileri veri analitiğinin [29] kullanımını ile teknoloji yol haritalarının modernize edilmesi olduğunu değerlendirmiştir. Bu itibar ile bu çalışma literatürde teknoloji yol haritalarının modernizasyonunda ileri bulanık sistemlerin kullanımına dikkat çekmekte ve tip-2 bulanık sistemlerin bir kullanım örneğini sunmaktadır. Yazarların en iyi bilgisine göre, bu çalışma diğer alanlarda yaygın bir şekilde kullanımı tercih edilen tip-2 bulanık sistemlerin teknoloji yol haritası literatüründeki ilk kullanımıdır. Tip-2 bulanık mantık, gürültü verilerinin düzenlenmesi ve daha gerçekçi analizler yapılabilmesi adına etkin olarak kullanılabilir. Bu çalışma, teknoloji yol haritası ögelerinin ilişkilerinin analizi aşamasında tip-2 bulanık sistemlerin kullanımını gerçekleştirerek teknoloji yol haritalarını zenginleştirmeyi amaçlamaktadır.

Teknoloji yol haritası geliştirilebilmesi için ögeler arası ilişkileri belirlemek önemlidir. Bu ilişkilerin analizinde, bilgisayar temelli veya bu çalışmanın önerdiği gibi uzman temelli yaklaşım kullanılabilir. Bilgisayar temelli yaklaşımlar, ögeler arası ilişkileri belirlemek ve analiz etmek için metin madenciliği, atf analizi, indeks analizi gibi teknikleri kullanır. Uzman temelli yaklaşım ise her biri alanında uzmanlaşmış insanların bulunduğu heyetlerin tecrübelerine göre analiz yapılmasını destekler. Baş döndürücü teknolojik ilerlemeler teknolojik öngörüleme açısından karmaşıklık ve belirsizliği artırmış ve bu nedenle teknoloji ögelerinin ilişkilerinin belirlenmesinde daha detaylı analiz yapılmasını zorunlu kılmış, yeni yöntemlerin önünü açmıştır. Bu çalışmada, teknoloji yol haritası ögelerinin arasındaki bağlantıların önem derecesini, her bir ögenin önem derecesi ve her bir ilişki bağının gücünü belirlemek için bu çalışmada, bulanık mantık uygulamalarından belirsizliğin ayak izi olarak bilinen, tip-2 bulanık mantık çalışılmıştır.

3. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHODOLOGY)

3.1. Genel Süreç (General Process)

Çalışma, teknoloji yol haritasını oluşturan ve stratejiye karar veren heyetin kararlarına destek sağlamaya yönelik bir

çalışmadır. Phaal vd. [8] tarafından önerilen T-plan çalıştaylarını esas almaktadır. Yol haritasını oluşturacak heyetin, hangi yetkinliklerden üyeler ile oluşturulması gerektiği hususu oldukça önem arz etmektedir. Bu aşamada, çalıştayların kapsamı ve kritik soruları, heyetlerin belirlenmesine rehberlik etmektedir. Phaal vd. [30], çalıştayların kapsamını ve kritik sorularını tartışmakta ve çalıştay süreci hakkında detaylı bilgi paylaşımında bulunmaktadır. Literatürdeki çalışmalar, teknoloji yol haritası oluşturmanın zorluğunu yeterli düzeyde yansıtamasa da çoğunlukla dilsel ifadeler üzerinden ilerlediği için karar vericiyi zorlamaktadır. Dilsel verilerin sayısallaştırılması ve bu dilsel veriler arası ilişkilerin sayısallaştırılması, teknoloji yol haritasında iyileştirme sağlamış ve çıktı kalitesini artırmaktadır [25]. Tip-2 bulanık sistemler ile oluşturulan teknoloji yol haritası, dilsel (ve algısal) belirsizlikler ile başa çıkarak uzmanların analizlerini kolaylaştırma potansiyeline sahiptir.

Önerilen çalışma aşağıdaki adımlar ile özetlenebilir.

- Teknoloji yol haritası ögeleri ve katmanları belirlenir (T-plan ürün, pazar ve teknoloji çalıştayları).
- Ögelerin önem dereceleri, ögeler arası ilişkilerin önem dereceleri ve bunlar arasındaki göreceli önem tip-2 bulanık sistemler yardımıyla belirlenir (T-plan ilişkilendirme çalıştay).
- Göreceli önem değerleri arasında, kümeleme ve sıralama yapılarak en yüksek ilişkili ögeler belirlenir (T-plan ilişkilendirme çalıştay).
- Teknoloji yol haritasında aralarında ilişki gücü en yüksek bulunan ögeler belirtilerek teknoloji ağı infografisi oluşturulur (T-plan ilişkilendirme çalıştay).

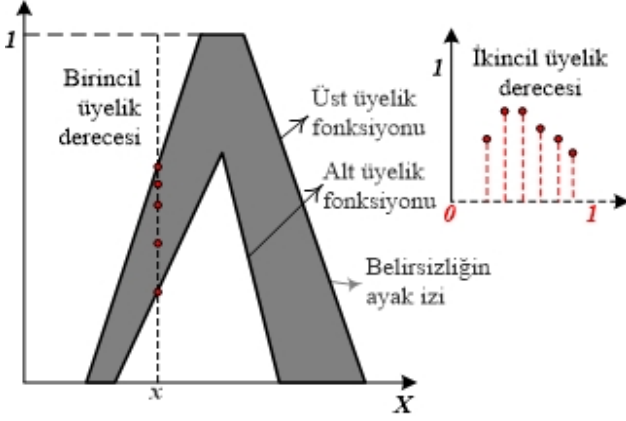
3.2. Tip-2 Bulanık Küme Operatörleri ve Çıkarsama Sistemi (Type-2 Fuzzy Set Operators and Inference System)

Tip-2 bulanık sistemler, tip-1 bulanık sistemlerin geliştirilmiş formlarından biridir. Tip-1 bulanık kümelerin üyelik değerleri belirgin olmasına rağmen, tip-2 bulanık kümelerin üyelik değerleri belirgin değildir (Şekil 2). Bulanık sistem uygulamalarında, üyelik derecelerinin belirgin olmadığı durumlarda, tip-2 bulanık sistemler kullanışlı hale gelmektedir. Üyelik fonksiyonu tanımındaki bu farklılaşmanın getirdiği avantaj ile belirsizliklerin üstesinden daha etkin gelinmesi, tip-2 bulanık kümelerin kullanımını yaygınlaştırmıştır.

Birincil ve ikincil üyelik dereceleri ile karakterize edilen tip-2 üyelik fonksiyonları üç boyutludur. İkincil üyelik dereceleri sayesinde, tip-2 bulanık kümeler daha fazla belirsizliği modelleyebilme serbestliğine sahiptir. Ancak, hesaplama kolaylığı avantajı nedeniyle, sadece alt ve üst üyelik fonksiyonlarını kullanan, "aralıklı" versiyonu tercih edilmiştir.

IT2FS, alt üyelik fonksiyonu ve üst üyelik fonksiyonu ile sınırlandırılmıştır. Bu fonksiyonlar arasında kalan alan,

“belirsizliğin ayak izi” (FOU - Footprint of Uncertainty) olarak isimlendirilmektedir. Tip-2 bulanık sistemler, Karnik ve Mendel [31]’den uyarlanan, Eş. 1’de gösterilen birleşim, Eş. 2’de gösterilen kesişim ve Eş. 3’de gösterilen tümleyen tanımlarını kullanmaktadır.



Şekil 2. Tip-2 üyelik fonksiyonu örneği (An example of the type-2 membership function)

$$\begin{aligned} \tilde{A} \cup \tilde{B} &= \int_{x \in X} \mu_{\tilde{A}}(x) \cup \mu_{\tilde{B}}(x) \\ &= \int_{x \in X} \left[\int_{u \in [\underline{J}_{x(\tilde{A})} \vee \underline{J}_{x(\tilde{B})}, \overline{J}_{x(\tilde{A})} \vee \overline{J}_{x(\tilde{B})}]} 1/u \right] / x \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \tilde{A} \cap \tilde{B} &= \int_{x \in X} \mu_{\tilde{A}}(x) \cap \mu_{\tilde{B}}(x) \\ &= \int_{x \in X} \left[\int_{u \in [\underline{J}_{x(\tilde{A})} \wedge \underline{J}_{x(\tilde{B})}, \overline{J}_{x(\tilde{A})} \wedge \overline{J}_{x(\tilde{B})}]} 1/u \right] / x \end{aligned} \quad (2)$$

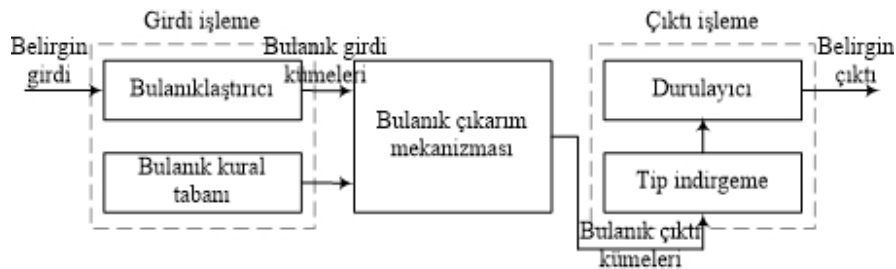
$$\begin{aligned} \tilde{A} \bar{\ } &\Leftrightarrow \mu_{\tilde{A} \bar{\ }}(x) = \neg \mu_{\tilde{A}}(x) \\ &= \int_{x \in X} \left[\int_{u \in [1 - \overline{J}_x, 1 - \underline{J}_x]} 1/u \right] / x \end{aligned} \quad (3)$$

Şekil 3, tip-2 bulanık çıkarsama sürecinin genel görünümünü sunmaktadır. Genel süreç, tip-1 eşleniğine benzemektedir. Tip indirgeme mekanizması ile gerçekleştirilen tip indirgeme işlemi nedeniyle, tip-1 eşleniğinden farklılaşmaktadır. İteratif prosedürler içeren, KM algoritmasına dayalı tip-2 bulanık çıkarsama sisteminin detayları, çalışmanın ilerleyen bölümlerinde, teknoloji yol haritaları uyarlaması ile sunulmaktadır.

3.3. Detaylı Uygulama Adımları (Detailed Application Stages)

Teknoloji yol haritası oluşturulurken, öncelikle, uygulayıcı kuruluşun faaliyeti ile ilgili analizler gerçekleştirilir ve hedefler belirlenir. Örneğin, bu hedef, otomotiv endüstrisi aktörü bir firma için “otonom sürüş” teknolojileri olabileceği gibi, savunma-uzay endüstrisi aktörü bir firma için “insansız hava aracı” teknolojileri olabilir. Kuruluşun hedefi doğrultusunda çalışacak bir uzman heyet oluşturulur. Bu heyet, teknoloji yol haritasını oluşturacak olan “pazar” ($M = \{M_1, M_2, \dots, M_n\}$), “ürün” ($P = \{P_1, P_2, \dots, P_m\}$) ve ihtiyaç duyulan “teknoloji” ($T = \{T_1, T_2, \dots, T_k\}$) öğelerini belirler. Bu süreç T-plan çalışma sistematığının ilk üç çalışmaya karşılık gelmektedir. Takibinde gerçekleştirilen son çalıştay ise “ilişkilendirme” çalıştıdır. Bu çalıştayın konusu, ilk üç çalıştay neticesinde belirginleşen, teknoloji yol haritası öğeleri arasındaki ilişkilerin ortaya çıkarılmasıdır. Bu aşamada, öge katmanlarının kendi iç ilişkileri ($M \times M, P \times P, T \times T$), Pazar-Ürün öğeleri arasındaki ilişkiler ($M \times P$) ve sonrasında Ürün-Teknoloji öğeleri arasındaki ilişkiler ($P \times T$) değerlendirilir. Bu çalışmanın kapsamı özellikle T-plan çalışma sistematığının son çalıştıyı olan “ilişkilendirme” çalıştıyı konu edinmekte ve bu aşamada katkı sağlamaktadır.

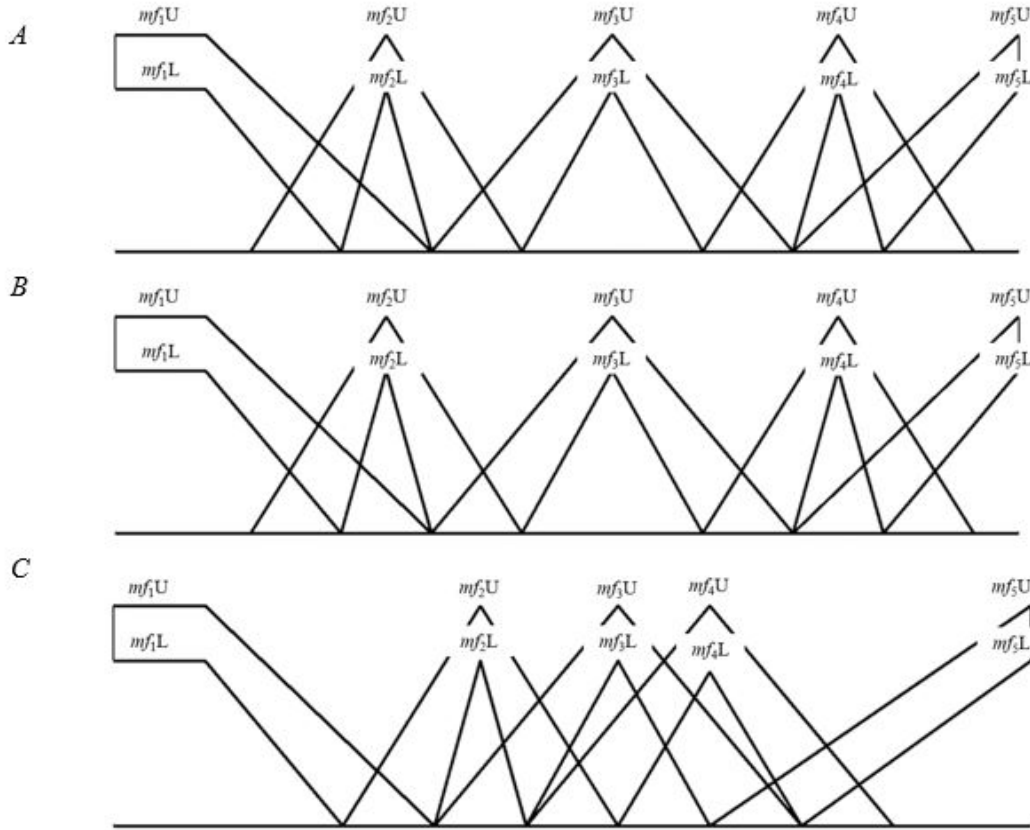
Bulanık çıkarım, belirli bir girdiden bir çıktı veri kümesine bulanık küme teorisi kullanılarak eşleme işlemidir. Yapılan çalışmada, teknoloji yol haritasındaki öge ikililerinin (A, B) ilişki derecesi ve ilişkilerin ($C = A \times B$) önem derecesi, Karnik Mendel [26] algoritmaları kullanılarak tip-2 bulanık çıkarsama ile değerlendirilmektedir. Tüm öğeler belirlendikten sonra her bir ögenin önemi ve diğer öğelerle ilişkisi belirlenir. Son ve Lee [25] tarafından önerilen ilişki değerlendirme sürecinin tip-2 bulanık mantık uyarlamasıdır. Tablo 1, dilsel ifadeleri, bu dilsel ifadelerin Son ve Lee [25] tarafından önerilen nümerik değer karşılıklarını ve bu çalışma kapsamında oluşturulmuş tip-2 bulanık küme



Şekil 3. Tip-2 bulanık çıkarsama süreci (The type-2 fuzzy inference process)

Tablo 1. Dilsel ifade ve aralık değerleri - *Son ve Lee [25] tarafından önerilen nümerik değerler (Linguistic variables and their intervals – *The numerical values adapted from Son and Lee [25])

Ögelerin önemi (A ve B)			İlişkilerin önemi (C = A × B)		
Dilsel ifadeler	*Nümerik değerler	Tip-2 bulanık kümeler	Dilsel ifadeler	*Nümerik değerler	Tip-2 bulanık kümeler
Çok az önemli	1, 2, 3	[0 0 1 3,5 1] [0 0 1 2,5 0,75]	Çok düşük	1, 2, 3	[0 0 1 3,5 1] [0 0 1 2,5 0,75]
Az önemli	2, 3, 4	[1,5 3 3 4,5 1] [2,5 3 3 3,5 0,75]	Düşük	3, 4, 5	[2,5 4 4 5,5 1] [3,5 4 4 4,5 0,75]
Oldukça önemli	4, 5, 6, 7	[3,5 5,5 5,5 7,5 1] [4,5 5,5 5,5 6,5 0,75]	Orta	4, 5, 6, 7	[3,5 5,5 5,5 7,5 1] [4,5 5,5 5,5 6,5 0,75]
Çok önemli	7, 8, 9	[6,5 8 8 9,5 1] [7,5 8 8 8,5 0,75]	Yüksek	5, 6, 7, 8	[4,5 6,5 6,5 8,5 1] [5,5 6,5 6,5 7,5 0,75]
Son derece önemli	8, 9, 10	[7,5 10 10 10 1] [8,5 10 10 10 0,75]	Çok yüksek	7, 8, 9, 10	[6,5 10 10 10 1] [7,5 10 10 10 0,75]

**Şekil 4.** Tip-2 girdi bulanık kümeler: ilişkili öge ikililerinin önemi (A ve B), ilişkinin önemi (C = A × B) (Type-2 fuzzy input sets: importance of the element pairs in relation (A and B), importance of the relation (C = A × B))

karşılıklarını göstermektedir. Şekil 4 ise bu ifadeler karşılık gelen IT2FS'nin girdi kümelerini göstermektedir.

Yaklaşımın uygulanabilmesi için iki farklı *If-Then* kuralları seti gerekmektedir. Bu kural setlerinden ilki, öğelerin önem dereceleri ile ilgili iken, ikincisi ise belirlenmiş ilk öge olan X ve belirlenmiş ikinci öge olan Y öğeleri arasındaki ilişkinin derecesinin değerlendirilebilmesi için gereklidir. Çalışmanın girdi değerleri de, belirlenmiş ilk öge olan X 'in önem derecesi, belirlenmiş ikinci öge olan Y 'nin önem derecesi ve belirlenmiş iki öge olan X ve Y arasındaki ilişkinin önem derecesidir. X ve Y öğelerinin göreceli önemlerini tespit

etmek için *If-Then* kuralları uygulanır. İlk kural seti, X ve Y öğelerinin önem derecelerini inceler. İkinci kural seti ise, ilk öge olan X 'in önem derecesini ve X ve Y arasındaki göreceli ilişkiyi dikkate alır. Tablo 2, bu kuralların bir örneğini sunmaktadır.

Tablo 3, kullanılan kural setlerinin tam listesini sunmaktadır. Bu kurallara göre, X ve Y öğelerinin önem düzeyleri yüksek olarak değerlendirildi ise aralarındaki göreceli ilişkinin değeri de artmaktadır. Benzer şekilde, X ve Y öğelerinin önem düzeyleri düşük olarak değerlendirildi ise aralarında göreceli ilişkinin değeri de azalmaktadır.

Tablo 2. Kural örnekleri (Instances from the rule-base)

<i>Kural 1:</i>	<i>Eğer</i>	$x = A_4$ ise	(İlk öge çok önemli)
	<i>ve</i>	$y = B_3$ ise	(İkinci öge oldukça önemli)
	<i>O halde</i>	$S_1 = [0,8 \ 1,0]$	(Göreceli önem yüksek seviyede)
<i>Kural 2:</i>	<i>Eğer</i>	$x = A_4$ ise	(İlk öge çok önemli)
	<i>ve</i>	$z = C_3$ ise	(Ögeler arasındaki ilişki oldukça önemli)
	<i>O halde</i>	$S_2 = [0,6 \ 0,8]$	(Göreceli önem orta seviyede)

Tablo 3. Kural tabanı: a - kural seti #1, b - kural seti #2 (The rule-base: a – rule set #1, b – rule set #2)

a.	x:	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
	y:					
	B_1	[0,0 0,2]	[0,2 0,4]	[0,2 0,4]	[0,2 0,4]	[0,2 0,4]
	B_2	[0,0 0,2]	[0,2 0,4]	[0,4 0,6]	[0,4 0,6]	[0,4 0,6]
	B_3	[0,2 0,4]	[0,4 0,6]	[0,4 0,6]	[0,6 0,8]	[0,6 0,8]
	B_4	[0,2 0,4]	[0,4 0,6]	[0,4 0,6]	[0,6 0,8]	[0,8 1,0]
	B_5	[0,2 0,4]	[0,4 0,6]	[0,6 0,8]	[0,8 1,0]	[0,8 1,0]
b.	x:	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
	z:					
	C_1	[0,0 0,2]	[0,0 0,2]	[0,2 0,4]	[0,2 0,4]	[0,2 0,4]
	C_2	[0,2 0,4]	[0,2 0,4]	[0,2 0,4]	[0,4 0,6]	[0,4 0,6]
	C_3	[0,2 0,4]	[0,4 0,6]	[0,4 0,6]	[0,4 0,6]	[0,6 0,8]
	C_4	[0,4 0,6]	[0,4 0,6]	[0,6 0,8]	[0,8 1,0]	[0,8 1,0]
	C_5	[0,4 0,6]	[0,6 0,8]	[0,6 0,8]	[0,8 1,0]	[0,8 1,0]

Kurallar, T-plan heyeti üyelerinin görüşleri ile belirlenmektedir. Çıktı değeri ise, Karnik-Mendel (KM) [26] algoritması kullanılarak elde edilmektedir. İki kural seti uygulandıktan sonra elde edilen ilişkilerin önem dereceleri ve öge ikililerinin ilişki derecesini temsil eden göreceli önem değerlerinin aritmetik ortalamaları alınarak, tek bir değere indirgenmekte ve bütünlük göreceli önem dereceleri elde edilmektedir.

KM algoritması genel hatlarıyla şu şekilde çalışmaktadır;

Kural tabanı N ($n = 1, 2, \dots, N$) adet kural içermektedir.

Kural (n): Eğer $x_1 \tilde{X}_1^n$ ise ve $x_2 \tilde{X}_2^n$ ise o halde $y Y^n$ dir.

Burada, \tilde{X}_1^n ve \tilde{X}_2^n kümeleri girişler için tanımlanmış aralıklı tip-2 bulanık kümelerdir. x_1 ve x_2 değerleri ise önem derecesini temsil eden nümerik skorlardır. $Y^n (= [y^n, \bar{y}^n])$ değerleri ise çıkış tip-2 bulanık kümelerdir.

Her bir kuralın ateşleme derecesi, $F^n(x_1, x_2)$, alt ve üst üyelik fonksiyonların aitlik derecelerini kullanan Eş. 4 ile hesaplanır.

$$F^n(x_1, x_2) = [\mu_{\tilde{X}_1^n}(x_1) \times \mu_{\tilde{X}_2^n}(x_2), \mu_{\bar{X}_1^n}(x_1) \times \mu_{\bar{X}_2^n}(x_2)] \equiv [f^n, \bar{f}^n] \quad (4)$$

Tip-1'e indirgeme işlemini gerçekleştiren çerçeve model bu aşamada kümelerin merkezlerini Eş. 5 dikkate almaktadır.

$$Y_{cos}(x) = \bigcup_{\substack{f^n \in F^n(x) \\ y^n \in Y^n}} \frac{\sum_{n=1}^N f^n y^n}{\sum_{n=1}^N f^n} = [y_l, y_r] \quad (5)$$

Burada, y_l ve y_r aralıklı kümenin ekstrem noktalarıdır. Eş. 6 ve Eş. 7 kullanılarak hesabı yapılmaktadır.

$$y_l = \frac{\sum_{n=1}^L \bar{f}^n y^n + \sum_{n=L+1}^N \underline{f}^n y^n}{\sum_{n=1}^L \bar{f}^n + \sum_{n=L+1}^N \underline{f}^n} \quad (6)$$

$$y_r = \frac{\sum_{n=1}^R \underline{f}^n y^n + \sum_{n=R+1}^N \bar{f}^n y^n}{\sum_{n=1}^R \underline{f}^n + \sum_{n=R+1}^N \bar{f}^n} \quad (7)$$

Burada, L ve R noktaları $\underline{y}^L \leq y_l \leq \underline{y}^{L+1}$ ve $\bar{y}^R \leq y_r \leq \bar{y}^{R+1}$ olacak şekildedir. KM algoritması y_l hesabını takipteki adımlar ile gerçekleştirmektedir:

Adım 1. \underline{y}^n değerlerini artan bir şekilde sırala.

Adım 2. Aynı $F^n(x)$ değerlerini yeni sıralamaya göre \underline{y}^n değerleri ile eşleştir.

Adım 3. f^n değerini Eş. 8 ile hesapla, ve sonrasında çıkış değeri y hesabını Eş. 9 ile yap.

$$f^n = \frac{f^n + \bar{f}^n}{2} \quad (8)$$

$$y = \frac{\sum_{n=1}^N y^n f^n}{\sum_{n=1}^N f^n} \quad (9)$$

Adım 4. $\underline{y}^k \leq y \leq \underline{y}^{k+1}$ olacak şekilde kesme noktasını bul $k(1 \leq k \leq N - 1)$.

Adım 5. Atamayı Eş. 10 ile gerçekleştir.

$$f^n = \begin{cases} \bar{f}^n, & n \leq k \\ \underline{f}^n, & n > k \end{cases} \quad (10)$$

Ve takipteki Eş. 11 ile yeni çıkış noktası y' hesabını gerçekleştirir.

$$y' = \frac{\sum_{n=1}^N y^n f^n}{\sum_{n=1}^N f^n} \quad (11)$$

Adım 6. Eğer $y' = y$ ise dur, $y_l = y$ ve $L = k$ olarak ata; aksi durumda *Adım 7* ile devam et.

Adım 7. $y = y'$ olarak ata ve *Adım 4* ile devam et.

KM algoritması y_r hesabını takipteki adımlar ile gerçekleştirmektedir:

Adım 1. \bar{y}^n değerlerini artan bir şekilde sırala.

Adım 2. Aynı $F^n(x)$ değerlerini yeni sıralamaya göre \bar{y}^n değerleri ile eşleştir.

Adım 3. f^n değerini Eş. 12 ile hesapla, ve sonrasında çıkış değeri y hesabını Eş. 13 ile yap.

$$f^n = \frac{f^n + \bar{y}^n}{2} \quad (12)$$

$$y = \frac{\sum_{n=1}^N \bar{y}^n f^n}{\sum_{n=1}^N f^n} \quad (13)$$

Adım 4. $\bar{y}^k \leq y \leq \bar{y}^{k+1}$ olacak şekilde, kesme noktasını bul $k(1 \leq k \leq N - 1)$.

Adım 5. Atamayı Eş. 14 ile gerçekleştirir.

$$f^n = \begin{cases} f^n, & n \leq k \\ \bar{y}^n, & n > k \end{cases} \quad (14)$$

Ve Eş. 15'i kullanarak yeni çıkış noktası y' hesabını gerçekleştirir.

$$y' = \frac{\sum_{n=1}^N \bar{y}^n f^n}{\sum_{n=1}^N f^n} \quad (15)$$

Adım 6. Eğer $y' = y$ ise dur, $y_r = y$ ve $R = k$ olarak ata; aksi durumda *Adım 7* ile devam et.

Adım 7. $y = y'$ olarak ata ve *Adım 4* ile devam et.

Kesme noktaları hesabı sonrası belirgin çıktı değeri Eş. 16 ile hesaplanır.

$$y = \frac{y_l + y_r}{2} \quad (16)$$

3.3.1. Ögeleri kümeleme, önceliklendirme ve görselleştirme (Clustering, Prioritizing and Visualizing the Elements)

Tüm ögelerin arasındaki ilişkilerin göreceli önemleri belirlendikten sonra bu değerler, infografik oluşturabilmek için gruplandırılmıştır. Gruplama yapılırken belirli bir değer üstündeki göreceli önem değerleri teknoloji yol haritası çiziminde görselleştirilirken, diğerleri infografiğe dahil edilmemektedir. Bu çalışmanın önerdiği zenginleştirilmiş teknoloji yol haritası formatı Şekil 5'te gösterilmektedir. Geleneksel şekilde oluşturulması durumunda, teknoloji yol

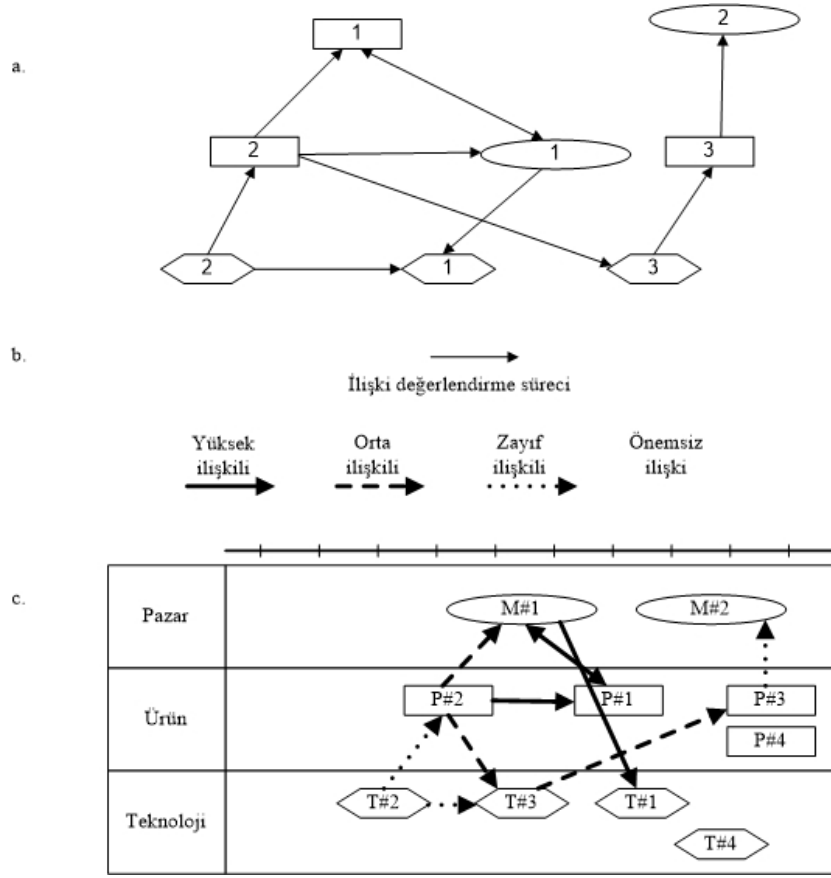
haritası, sadece Şekil 5a'nın gösterdiği şebeke ağını kullanacaktır. İlişki değerlendirme süreci sonrasında *yüksek ilişki*, *orta ilişki* ve *zayıf ilişki* görselleri, teknoloji yol haritasına dahil edilmekte ve büyük ölçekli şebekeler için strateji oluşturmaya dönük ileri analizlere zemin hazırlanmaktadır. İlişkinin yönü ok ile gösterilirken, ilişkinin derecesi yüksek ise derecesine göre düz, kesikli ve noktalı oklar ile gösterilmektedir. Bu çalışma bir kesme değeri olması durumunu hesaba katmaktadır. Göreceli önem değeri, kesme değerinin altında bir değere sahip ise, ilişki şebekeden çıkarılır. Ögelerin şekli ise, ögenin ait olduğu sınıfa özgü görsele sahiptir. Bu çalışma, kesme değerini, ilişkilerin en fazla %25'ini kapsaması şartı ile değerlendirme aralığının orta değeri olarak kabul etmektedir. Değerlendirme sonuçlarından elde edilen derecelerin değişim aralığı ve üzerinde çalışılan ilişki sayıları dikkate alınarak, T-plan çalıştay heyeti tarafından, bu değer, arttırılabilir veya azaltılabilir.

Çalışmada belirlenen format, temel bir teknoloji yol haritası oluşturulmasına yöneliktir. Katmanlar arttıkça, katmanların sıralaması da değişebilir. Teknoloji yol haritasında genellikle en alt katman teknolojidir ve diğer katmanlarla yüksek ilişkiye sahiptir. Ürün katmanları yerine daha farklı hizmet katmanları varsa teknoloji katmanı ile yakın ilişkiye sahip olduğundan hemen sonrasında gelecektir. En fazla ilişkili olan katmanlar birbirine yakın konumlandırılarak görsel karmaşa oluşmasının önüne geçilebilir. Bu ilişki şebekelerine dayalı olarak çeşitli stratejik karar analizleri, teknoloji yönetim kararları ve optimizasyon çalışmaları yapılabilir. Bu tür analizler, ürün, hizmet ve teknoloji ile kritik ürün, hizmet ve teknoloji unsurları arasındaki ilişkileri dikkate alabilir. Teknoloji çalışma gruplarının üyeleri, kritik ilişki şebekeleri dikkate alınarak oluşturulabilir.

4. VAKA ANALİZİ (CASE STUDY)

Önerilen yaklaşımın daha iyi kavranması için bu bölümde, Son ve Lee [25]'nin konu edindiği 3D yazıcı teknolojileri yol haritası verilerini kullanan bir uygulama örneği paylaşılmıştır. Teknoloji yol haritası ögeleri arasında karışık bir yapılanma olması nedeniyle önerilen yaklaşım için uygun bir vaka olduğu değerlendirilmiştir.

Bu vaka çalışmasına konu olan teknoloji yol haritası, toplamda 38 öge içermektedir. Ögelerin tam listesi Tablo 4'te sunulmaktadır. Bu ögelerin; 12'si ekipman (D) katmanı ögesi, 16'sı malzeme (M) katmanı ögesi ve 10'u ise yazılım (S) katmanı ögesidir. 10 puanlık Likert ölçeğinde, her bir ögenin önemi ile ilgili uzman paneli değerlendirmeleri Tablo 5'te paylaşılmıştır. IT2FS ile değerlendirilen öge ikililerinin ilişki dereceleri ve ilişkinin önem dereceleri Tablo 6'de paylaşılmıştır. Belirlenen ilk öge (X) ve takip eden ikinci ögenin (Y), değer aralıkları ve ilişkilerinin gücü (Z) değerleri, IT2FS'in girdi değerleridir. Çalışma kapsamında dikkate alınan kural tabanı Ekte paylaşılmıştır. Çıktılar, KM algoritması kullanan IT2FS ile elde edilmiştir. Elde edilen değerler aritmetik ortalamaları alınarak tek bir değere indirgenmiştir. Nihai çıktı değeri $[0,1]$ aralığına doğrusal



Şekil 5. Öğeler arasındaki ilişkilerin değerlendirilmesi: (a) ilişki kümesi, (b) ilişki değerlendirme süreci, (c) zenginleştirilmiş teknoloji yol haritası (Evaluation of the relationships between elements: (a) set of relations, (b) evaluation process of the relations, (c) the augmented technology roadmap)

standardize edilmiş değerlerden oluşmaktadır (Tablo 6). Bir sonraki adımda, infografik oluşturulurken bu değerler dikkate alınmıştır.

Tablo 6’da, Son ve Lee [25]’in tip-1 bulanık çıkarsama sonuçları da yer almaktadır. Tip-2 bulanık çıkarsama sonuçları ile karşılaştırıldığında, değerlendirmelerin önemli ölçüde farklılaştığı gözlemlenebilir. Bu çalışmadaki örnek uygulama, önerilen yaklaşımın nasıl uygulanacağını göstermek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada, bu çalışmaya özel bir yargı olmamakla birlikte, üyelik fonksiyonlarındaki belirsizliği de hesaba katması nedeniyle, tip-2 eşleniğinin daha güvenilir sonuçlar ürettiği savunulabilir.

4.1. Öğeleri Kümeleme, Önceliklendirme ve Sonuçları Görselleştirme (Clustering and Prioritizing the Elements, and Visualizing the Results)

Eğer bir ilişkinin göreceli ilişki değeri belirli bir seviyenin altında ise ilişki göz ardı edilebilir ve teknoloji yol haritasına dahil edilmeyebilir. Örnekteki D_1 ve D_5 arasındaki ilişkinin göreceli önem ortalama değeri değerlendirme kapsamında belirlenen kesme değeri 0,5’ten küçük olması nedeniyle oluşturulan teknoloji yol haritası görselinde dikkate alınmamıştır. Doğrusal standardizasyon işlemine tabi tutulan

göreceli ilişki değerleri bu sayede $[0,1]$ aralığında konumlandırılmıştır. Bu sayede, değerler arasındaki farkları da gözetebilecek bir sınıflandırma gerçekleştirilebilecektir. Standardize değerler üzerinden ilişkiler şu şekilde sınıflandırılmıştır; 0,9 değerinden büyük ise “yüksek” ilişkili, 0,7 ve 0,9 sınırları içerisinde ise “orta” ilişkili diğer durumlar ise “zayıf” ilişkili olarak değerlendirilmiştir. Değerlendirme sonuçlarından elde edilen derecelerin değişim aralığı, yayılımı ve üzerinde çalışılan ilişki sayıları dikkate alınarak, T-plan heyeti tarafından, bu değerler, artırılabilir veya azaltılabilir. Büyük ölçekli uygulamalarda, bu sınıflandırmalar için, ileri kümeleme analizleri gerçekleştirilebilir. Şekil 6’da, öğeleri önceliklendiren, kümelendiren ve bu aşamada ilişkilerin göreceli önem değerlerini kullanan bir şebeke oluşturulmuştur. Şekil 4a’daki bu şebeke dikkate alınarak Şekil 4b’deki zenginleştirilmiş teknoloji yol haritası oluşturulmuştur. Katman sıralaması birbiriyle yakın ilişkide olan malzeme-ekipman ve ekipman-yazılım katmanlarına göre teknoloji yol haritası dizayn edilmiştir. Sıralama malzeme, ekipman ve yazılım şeklinde ilerlemiştir. Öğeler, teknoloji yol haritalarında konumlandırılırken, öğenin ilgili zaman aralığı, öğenin yataydaki konumunu belirlemektedir. Katmanlardaki dikey konumlar ise, öğelerin öncelikleri ve teknoloji yol haritası görselinin karmaşıklığı dikkate alınarak belirlenebilir.

Tablo 4. 3D yazıcı / eklemeli imalat teknoloji yol haritası öğeleri (Son ve Lee [25])
(Elements of the 3D printing / additive manufacturing technology roadmap (Son and Lee [25]))

<i>D₁</i>	Büyük ölçekli stratejik metal yapılar için 3D baskı ekipmanı
<i>D₂</i>	Büyük boyutlu yüksek hızlı polimer yazıcı M9 yüksek mukavemetli, yüksek performanslı amorf metal malzeme
<i>D₃</i>	Hibrit metal 3D baskı sistemi tabanlı teknoloji M10 metal matris kompozitler çökeltir
<i>D₄</i>	Yüksek hassasiyetli 3D tarayıcı M11 yüksek yakıt tüketimi hafif malzeme
<i>D₅</i>	Büyük ölçekli stratejik metal yapılar için yüksek hızlı 3D yazıcı
<i>D₆</i>	Orta ve büyük polimer yazıcılar
<i>D₇</i>	Ultra kompakt / ultra büyük 3D tarayıcı
<i>D₈</i>	Orta ölçekli stratejik metal yapı baskı teknolojisi
<i>D₉</i>	Büyük süper yüksek hızlı hibrit metal 3D yazıcı M16 yüksek verimlilik için akıllı parça malzemesi taşıma makinesi
<i>D₁₀</i>	Elde tutulan 3D tarayıcı
<i>D₁₁</i>	Hibrit metal 3D baskı sistemi
<i>D₁₂</i>	Büyük polimer yazıcılar
<i>M₁</i>	3D baskı işlemi yüksek verimli malzeme ve nano-mikro kompozit toz malzeme
<i>M₂</i>	Ultra hafif metal polimer kompozitler
<i>M₃</i>	Aşırı çevre taşıma ekipmanı için akıllı parçalar
<i>M₄</i>	Süper ısıya dayanıklı ve aşınmaya dayanıklı içten yanmalı motor metal toz malzeme
<i>M₅</i>	Duygusal tepki taşıma makinesi için akıllı parça malzemesi
<i>M₆</i>	Yüksek korozyona dayanıklı hafif metal toz malzeme
<i>M₇</i>	Hafif kafes yapı malzemesi
<i>M₈</i>	Yüksek mukavemetli, yüksek ısıya dayanıklı, alev geciktirici poliamid malzeme
<i>M₉</i>	Yüksek mukavemetli, yüksek performanslı amorf
<i>M₁₀</i>	Metal matris kompozitler
<i>M₁₁</i>	Yüksek yakıt tüketimi hafif malzeme
<i>M₁₂</i>	Çevreye duyarlı nakliye ekipmanları için akıllı bileşen malzemesi
<i>M₁₃</i>	Hafif nakliye için metal toz malzeme
<i>M₁₄</i>	Yüksek işlevsel polimer malzemeler
<i>M₁₅</i>	Yüksek mukavemetli demir bazlı toz malzeme
<i>M₁₆</i>	Yüksek verimlilik için akıllı parça malzemesi
<i>S₁</i>	Çok noktalı 3D hacim modeli edinimi
<i>S₂</i>	Ultra 3D tarama
<i>S₃</i>	Ultra hassas 3D edinimi
<i>S₄</i>	Taşıma ekipmanı güç sistemi tasarımı ve modellemesi
<i>S₅</i>	3D baskı çıktı simülasyonu ve çıktı kalitesi doğrulaması
<i>S₆</i>	Sert hassas 3D tarama
<i>S₇</i>	Çok noktalı 3D model alma / düzeltme
<i>S₈</i>	Araç gövde tasarımı, modelleme, simülasyon
<i>S₉</i>	Heterojen sensör kaplin modellemesi
<i>S₁₀</i>	Elde tutulan gerçek zamanlı 3D tarama

Tablo 5. Öğeler ve önem dereceleri: 3D yazıcı teknolojileri yol haritası (Son ve Lee [25]'den uyarlanmıştır)
(The elements and their importance degrees: 3D printing technology roadmap (adapted from Son and Lee [25]))

Öge	Önem	Öge	Önem	Öge	Önem
D_1	8,5	M_1	8,4	S_1	9,1
D_2	8,2	M_2	8,2	S_2	8,1
D_3	7,8	M_3	7,8	S_3	8,2
D_4	9,1	M_4	9,1	S_4	7,9
D_5	8,4	M_5	7,6	S_5	8,6
D_6	8,2	M_6	8,9	S_6	8,7
D_7	9,1	M_7	8,8	S_7	8,4
D_8	8,7	M_8	8,7	S_8	7,8
D_9	8,1	M_9	8,6	S_9	8,3
D_{10}	9,3	M_{10}	8,1	S_{10}	8,2
D_{11}	7,9	M_{11}	9,2		
D_{12}	8,4	M_{12}	7,6		
		M_{13}	9,4		
		M_{14}	8,4		
		M_{15}	8,6		
		M_{16}	8,7		

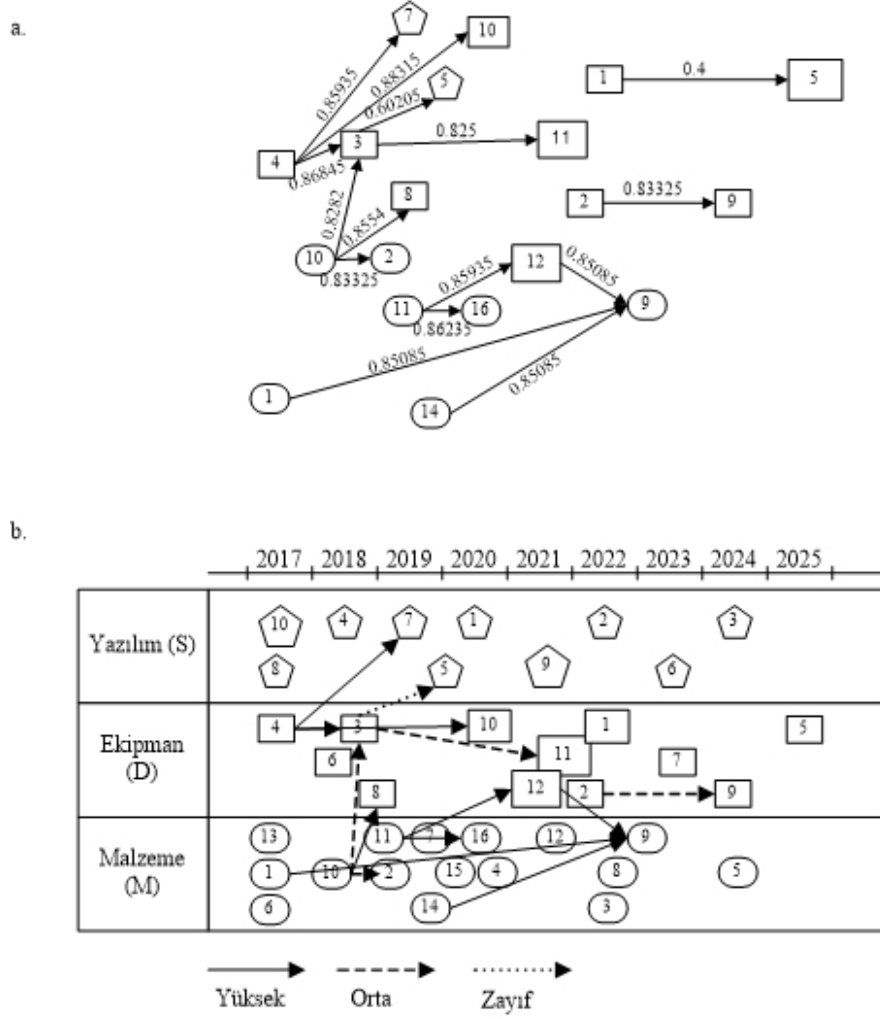
Tablo 6. Öğeler arası ilişkiler: 3D yazıcı teknolojileri yol haritası (Kesme değeri: $\alpha=0,5$)
(Relations between the element pairs: 3D printing technology roadmap (The cut value: $\alpha=0,5$))

***İlişkili Öğeler (X, Y)	***İlişkinin Önemi (Z)	*Öğeler arası ilişki derecesi	*İlişkinin önem derecesi	***Göreceli önem ortalaması ($Tip-1$ Bulanık Çıkarsama)	*Göreceli önem ortalaması ($Tip-2$ Bulanık Çıkarsama)	**Standart önem derecesi
D_1 D_5	9,2	0,4	0,4	8,3	0,4	0
D_2 D_9	8,4	0,7665	0,9	8,4	0,83325	0,89672
D_3 D_{11}	8,3	0,75	0,9	8,4	0,825	0,87964
D_3 S_5	7,5	0,8041	0,4	8,2	0,60205	0,41819
D_4 D_3	6,9	0,8369	0,9	8,8	0,86845	0,96957
D_4 D_{10}	8,2	0,8663	0,9	8,3	0,88315	1
D_4 S_7	8,7	0,8187	0,9	8,6	0,85935	0,95074
M_9 D_{12}	7,9	0,8017	0,9	8,2	0,85085	0,93315
M_9 M_1	8,8	0,8017	0,9	8,2	0,85085	0,93315
M_9 M_{14}	8,4	0,8017	0,9	8,2	0,85085	0,93315
M_{10} D_3	7,9	0,7564	0,9	8,3	0,8282	0,88627
M_{10} D_8	6,7	0,8108	0,9	7,4	0,8554	0,94256
M_{10} M_2	8,4	0,7665	0,9	8,4	0,83325	0,89672
M_{11} D_{12}	7,6	0,8187	0,9	8,4	0,85935	0,95074
M_{11} M_{16}	9,1	0,8247	0,9	8,4	0,86235	0,95695

*IT2FS değerlendirmeleri sonrası elde edilen çıktılar

**[0,1] aralığı için doğrusal standardize edilmiş değerler

***Son ve Lee [25]'ten uyarlanmıştır



Şekil 6. T-plan ilişkilendirme aşaması (a) ve ilişki değerlendirme sonrası teknoloji yol haritası (b)
(The T-plan relations phase (a), and the roadmap having assessed the relations (b))

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (CONCLUSIONS AND DISCUSSIONS)

Bu çalışma, IT2FS kullanarak teknoloji yol haritası T-plan ilişki çalışmaları için süreç iyileştirme katkısı sunmaktadır. Teknoloji yol haritalarını oluşturan öğelerin önemi ve ilişkilerin dilsel ifadelerini sayısal değerlere dönüştüren ve nihayetinde ilişkiler için bir infografik sunabilen yeni bir değerlendirme süreci önerilmiştir. Böylelikle, uzmanların teknoloji yol haritası oluşturma süreci daha sistematik ve bilgiye dayalı hale getirilmiştir. Gerçek hayattaki teknoloji yol haritalarında, ikili öge ilişkilerindeki belirsizlik ve karmaşıklığın daha fazla olacağı düşünüldüğünde, önerilen sürecin strateji oluşturma ve teknoloji yönetimi faaliyetleri için karar desteği sağlayacağı değerlendirilmektedir.

Stratejik bakımdan, sınırlı kaynakların Ar-Ge faaliyetlerine en etkin şekilde paylaşılması; operasyonel açıdan ise projelendirilecek fikirlerin doğru değerlendirilmesi kritik karar süreçleridir [32]. Yapılan çalışma, teknoloji yol haritasındaki kritik öge şebekelerinin belirlenmesini

sağlayan mevcut yaklaşımlar için tamamlayıcı bir etki sağlayabilir. Yapılan çalışmada, öğeler arası ilişkilerin göreceli önemi belirlenerek analiz yapılmıştır. Çalışmanın örnek uygulamasında (Şekil 6), yakın gelecekte 3D yazıcı teknolojileri arasında rol oynayacağı değerlendirilen öğelerden, M_9 (yüksek mukavemetli, yüksek performanslı amorf) malzemesi, uygun Ar-Ge projelerinin gerçekleştirilmesi neticesinde, erişilebilir bir konumda durmaktadır. D_2 ve D_9 arasındaki ilişki ise M_9 'un ilişkilerine kıyasla daha zayıf görünmektedir. Uygulayıcı kurumların, rekabet koşulları, teknoloji edinim stratejileri ve yetkinleri de hesaba katılarak, önerilen zenginleştirilmiş teknoloji yol haritaları ile bu değerlendirmelere benzer, kritik teknoloji geliştirme patikaları belirlenebilir ve ileri analizler yapılabilir. Yürütülecek Ar-Ge programları ve tahsis edilecek kaynaklar, bütünlük olarak planlanarak, yürütülen faaliyetlerin strateji ile uyumu güvence altına alınabilir.

Yapılan çalışma tip-2 bulanık sistemler kullanarak teknoloji yol haritası öğeleri arasındaki göreceli önem derecelerini belirlemeye çalışmıştır. Geçmişte yapılan çalışmalara göre

bu yöntemin kullanılmasının avantajları bulunmaktadır. Öncelikle, doğası gereği belirsiz ve karmaşık olan dilsel öge önem derecelerinin sayısallaştırılması sağlanmış ve girdi değerleri belirli olan tip-1 bulanık küme teorisine kıyasla belirsizlikleri daha iyi modellemiştir. Uzmanların karar verme sürecini daha fazla desteklemek için gelecek çalışmalarda, özelleştirilmiş ve/veya ileri şebeke analizleri de dahil edebilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Willyard C.H., McClees C.W., Motorola's technology roadmap process, *Research Management*, 30 (5), 13–19, 1987.
2. Garcia M.L., Bray O.H., *Fundamentals of technology roadmapping*, Albuquerque: Sandia National Laboratories, New Mexico, 1997.
3. Bloem S.L., Vasconcellos E., Guedes L.V., Guedes L.F.A., Costa R.M., *Technology roadmapping: A methodologic proposition to refine Delphi results*, *Technological Forecasting and Social Change* 126, 194–206, 2018.
4. Daim T.U., Yoon B.S., Lindenberg J., Grizzi R., Estep J., Oliver T., *Strategic roadmapping of robotics technologies for the power industry: A multicriteria technology assessment*, *Technological Forecasting and Social Change* 131, 49–66, 2018.
5. Amer M., Daim T.U., Jetter A., *Technology roadmap through fuzzy cognitive map based scenarios: The case of wind energy sector of a developing country*, *Technology Analysis & Strategic Management* 28 (2), 131–155, 2016.
6. Winkowski C., *Technology development roadmaps: A bibliometrics analysis of scientific literature*, *European Research Studies Journal* 23 (2), 2020.
7. EIRMA, *Technology roadmapping – delivering business vision*, Working group report, European Industrial Research Management Association, Paris, 52, 1997.
8. Phaal R., Farrukh C.J., Probert, D.R., *Technology roadmapping – A planning framework for evolution and revolution*, *Technological Forecasting and Social Change* 71 (1–2), 5–26, 2004.
9. Dereli T., Altun K., *Technology evaluation through the use of interval type-2 fuzzy sets and systems*, *Computers & Industrial Engineering*, 65 (4), 624–633, 2013.
10. Hagraş H., *A hierarchical type-2 fuzzy logic control architecture for autonomous mobile robots*, *IEEE Trans. on Fuzzy Systems* 12, 524–539, 2004.
11. Hagraş H., *Type-2 FLCs: A new generation of fuzzy controllers*, *IEEE Computational Intelligence Magazine* 2 (1), 30–43, 2007.
12. Mendel J.M., *Uncertain rule-based fuzzy logic systems: Introduction and new directions*, Upper Saddle River, NJ, Prentice-Hall, 2001.
13. Wu D., Tan W.W., *Genetic learning and performance evaluation of type-2 fuzzy logic controllers*, *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 19 (8), 829–841, 2006.
14. Dereli T., Baykasoğlu A., Altun K., Durmuşoğlu A., Türkşen İ.B., *Industrial applications of type-2 fuzzy sets and systems: A concise review*, *Computers in Industry* 62 (2), 125–137, 2011.
15. Valerio K.G.O., Silva C.E.S., Neves S.M., *Overview on the technology roadmapping (TRM) literature: Gaps and perspectives*, *Technological Analysis & Strategic Management*, 2020. <https://doi.org/10.1080/09537325.2020.1787976>
16. Geum Y., Lee S., Park Y., *Combining technology roadmap and system dynamics simulation to support scenario-planning: A case of car-sharing service*, *Computers & Industrial Engineering* 71, 37–49, 2014.
17. Yoon B., Phaal R., *Structuring technological information for technology roadmapping: Data mining approach*, *Technology Analysis & Strategic Management* 25, 1119–1137, 2013.
18. Strauss J.D., Radnor M., *Roadmapping for dynamic and uncertain environments*, *Research-Technology Management*, 47 (2), 51–58, 2004.
19. Fenwick D., Daim T.U., Gerdşri N., *Value driven technology roadmapping (VTRM) process integrating decision making and marketing tools: Case of internet security technologies*, *Technological Forecasting and Social Change* 76 (8), 1055–1077, 2009.
20. Caetano M., Amaral D.C., *Roadmapping for technology push and partnership: A contribution for open innovation environments*, *Technovation* 31 (7), 320–335, 2011.
21. Vishnevskiy K., Karasev O., Meissner D., *Integrated roadmaps and corporate foresight as tools of innovation management: The case of Russian companies*, *Technological Forecasting and Social Change* 90, 433–443, 2015.
22. Toro-Jarrin M.A., Ponce-Jaramillo I., Guemes-Castorena D., *Methodology for the of building process integration of business model canvas and technological roadmap*, *Technological Forecasting and Social Change* 110, 213–225, 2016.
23. Son H., Kwon Y., Park S., Lee S., *Using a design structure matrix to support technology roadmapping for product–service systems*, *Technology Analysis & Strategic Management* 30 (3), 337–350, 2018.
24. Warfield J.N., *Binary matrices in system modeling*, *IEEE Transactions on systems, man and cybernetics SMC* 3 (5), 441–449, 1973.
25. Son W., Lee S., *Integrating fuzzy-set theory into technology roadmap development to support decision-making*, *Technology Analysis & Strategic Management* 31(4), 447–461, 2019.
26. Mendel J.M., Wu D., *Perceptual computing: Aiding people in making subjective judgements*, *IEEE Press Series on Computational Intelligence*, 2010.
27. Huang C.Y., Lin Y.C., Yang C.L., Sun Y., Cheng J.C., Kuo Y.T., Wang L.C., Wang S.Y., Hsu H.E., Hsu H.H., *A fuzzy MOP based competence set expansion method for technology roadmap definitions*, *Knowledge Innovation Through Intelligent Software Methodologies, Tools and Techniques* (Ed. Fujita H.), IOS Press, 2020.

28. Son C., Kim J., Kim Y., Developing scenario-based technology roadmap in the big data era: A utilization of fuzzy cognitive map and text mining techniques, *Technology Analysis & Strategic Management* 32 (3), 272-291, 2020.
29. Lai C., Xu L., Shang J., Optimal planning of technology roadmap under uncertainty, *Journal of the Operational Research Society* 71 (4), 673-686, 2020.
30. Phaal R., Farrukh C., Probert D.R., Fast-Start Roadmapping Workshop Approaches, in: Moehrle, M.G., Isenmann, R., Phaal, R. (Eds.), *Technology Roadmapping for Strategy and Innovation*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 91–106, 2013. https://doi.org/10.1007/978-3-642-33923-3_6
31. Karnik N.N., Mendel J.M., Applications of type-2 fuzzy logic systems to forecasting of time-series. *Information Sciences* 120, 89-111, 1999.
32. Kat B., An algorithm and a decision support system for the panelist assignment problem: The case of TUBITAK, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 36 (1), 69-87, 2021.

